

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Kajian tentang pemanfaatan serbuk batu, khususnya serbuk batu Andesit (*Andesit dust*), sebagai agregat halus dalam campuran beton merupakan bidang penelitian yang berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Peningkatan jumlah penelitian ini tidak terlepas dari meningkatnya kebutuhan beton berkinerja tinggi yang ramah lingkungan dan memanfaatkan material lokal secara efisien. Salah satu arah penelitian yang menonjol adalah penggunaan limbah hasil proses pemecahan batu sebagai pengganti sebagian pasir alam. Material tersebut dianggap potensial karena memiliki gradasi halus dan kandungan mineral silikat tinggi yang mampu memperbaiki kerapatan struktur beton.

(Rajiman & Allamsyah, 2024) mengkaji penggunaan serbuk batu Andesit skoria sebagai bahan tambahan dalam campuran beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serbuk Andesit sebesar 15% dari berat semen mampu meningkatkan kuat tekan 28 hari hingga 14,75% dibandingkan beton normal. Peningkatan tersebut disebabkan oleh kemampuan partikel halus serbuk Andesit untuk mengisi pori-pori di antara butir agregat, sehingga menghasilkan beton dengan *packing density* yang lebih baik. Walaupun penelitian ini lebih berfokus pada kuat tekan, peningkatan densitas dan homogenitas pasta semen secara teoritis juga berpengaruh terhadap kuat lentur, karena ikatan antarpartikel pada zona transisi (*interfacial transition zone* atau ITZ) menjadi lebih rapat dan kuat.

Selanjutnya, meneliti pengaruh substitusi abu batu hasil proses stone crusher terhadap berat isi dan kuat tekan beton. Variasi penggantian yang diuji berkisar antara 0% hingga 28%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar abu batu menyebabkan penurunan *workability* atau kemudahan pengerjaan beton akibat meningkatnya luas permukaan partikel halus, namun pada kadar 22–24% terjadi peningkatan kuat tekan yang signifikan sebelum menurun kembali pada kadar lebih tinggi. Hal ini menunjukkan adanya kadar optimum dalam penggunaan agregat halus pengganti, di mana keseimbangan antara pengisian rongga dan kebu-

tuhan air tercapai dengan baik. Fenomena ini menjadi dasar penting dalam menentukan kadar substitusi optimum untuk penelitian kuat lentur balok beton dengan serbuk Andesit.

Penelitian lain dilakukan oleh (Sijabat & Chairina, 2024) yang menggunakan abu batu *stone crusher* sebagai pengganti agregat halus pada beton normal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan abu batu sebesar 20–30% dapat menghasilkan kuat tekan yang masih berada di atas mutu rencana. Selain itu, beton dengan abu batu memiliki berat jenis yang sedikit lebih besar dan porositas yang lebih rendah dibanding beton kontrol. Penelitian ini memperkuat dugaan bahwa pemanfaatan limbah hasil pemecahan batu dapat memberikan keuntungan tidak hanya secara mekanik, tetapi juga dari sisi kerapatan mikrostruktur beton.

Selain itu, menguji penggunaan *quarry dust* dan limbah granit sebagai pengganti sebagian agregat halus dalam beton struktural. Hasil penelitian menunjukkan bahwa material hasil tambang batu tersebut memiliki potensi sebagai pengganti pasir, dengan catatan perlu kontrol ketat terhadap gradasi dan kadar air karena partikel halusnya cenderung meningkatkan viskositas campuran. Peningkatan viskositas berpengaruh terhadap homogenitas beton dan dapat berdampak pada perilaku lentur balok beton.

Secara umum, pemanfaatan serbuk Andesit sebagai pengganti pasir dalam beton berpotensi meningkatkan kekuatan lentur, meskipun hasilnya bervariasi tergantung pada komposisi campuran beton dan kondisi pengujian kekuatan yang dilakukan. Beberapa penelitian yang dilakukan di Indonesia menunjukkan bahwa penggunaan Andesit sebagai agregat kasar maupun halus dapat meningkatkan kekuatan tekan dan ketahanan beton terhadap berbagai pengaruh eksternal, termasuk kekuatan lentur yang lebih tinggi pada balok beton (Resti et al., 2021) Meskipun penelitian spesifik mengenai pengaruh serbuk Andesit terhadap kekuatan lentur beton masih terbatas, penggunaan agregat lokal seperti Andesit sudah terbukti dapat memperbaiki kinerja beton, termasuk ketahanan terhadap fraktur dan deformasi akibat lenturan (Buarlele et al., 2023) Oleh karena itu, pemanfaatan serbuk Andesit sebagai agregat halus tidak hanya memberikan solusi alternatif untuk menggantikan

pasir sungai, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan dari penambangan pasir dan meningkatkan kualitas beton secara keseluruhan.

Sementara itu, tinjauan literatur oleh beberapa peneliti yang dimuat dalam Portal Garuda (2023) menunjukkan bahwa penggunaan abu batu dan *stone dust* sebagai agregat halus dapat memengaruhi berbagai sifat mekanik beton, termasuk kuat tekan, kuat lentur, dan tarik belah. Hasil tinjauan tersebut menunjukkan adanya kecenderungan penurunan kekuatan pada kadar substitusi yang terlalu tinggi, terutama jika distribusi ukuran partikel tidak dikontrol dengan baik. Hal ini menegaskan pentingnya penentuan kadar optimum agar sifat mekanik, termasuk kuat lentur, dapat dipertahankan atau bahkan ditingkatkan.

Dari perspektif jenis batuan, Andesit merupakan batuan vulkanik dengan densitas dan kekuatan tinggi, sehingga banyak digunakan sebagai agregat kasar dalam beton berkekuatan tinggi. Penelitian oleh (Panjaitan & Harahap, n.d.) menegaskan bahwa beton dengan agregat Andesit memiliki kuat tekan lebih tinggi dibanding agregat batu kapur pada kondisi perendaman yang sama. Secara tidak langsung, temuan ini menunjukkan bahwa Andesit memiliki sifat mekanik dan adhesi yang baik terhadap pasta semen, sehingga ketika diolah menjadi serbuk halus, material ini juga berpotensi memberikan kontribusi positif terhadap kuat lentur beton.

Berbagai penelitian di atas memperlihatkan pola yang konsisten: penggunaan material serbuk batu sebagai pengganti agregat halus mampu meningkatkan kinerja mekanik beton hingga titik optimum tertentu. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada kuat tekan, sementara kajian spesifik mengenai kuat lentur balok beton dengan serbuk Andesit masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian dengan judul “Pengaruh Pemanfaatan Serbuk Batu Andesit sebagai Agregat Halus terhadap Kuat Lentur Balok Beton” menjadi relevan untuk dilaksanakan. Penelitian ini diharapkan dapat melengkapi temuan sebelumnya dengan menyoroti hubungan antara karakteristik partikel halus Andesit, kerapatan mikrostruktur beton, dan respon lentur balok, sekaligus menentukan kadar substitusi yang paling efektif untuk memperoleh kinerja mekanik optimal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian Beton

Beton merupakan material komposit yang tersusun dari campuran semen portland, air, agregat halus, agregat kasar, serta bahan tambahan (*admixture*) bila diperlukan. Campuran ini, setelah mengalami proses hidrasi, akan membentuk massa padat yang memiliki kekuatan tinggi dan daya tahan lama. Menurut SNI 2847:2019, beton didefinisikan sebagai material yang diperoleh dari pencampuran agregat kasar, agregat halus, air, dan semen dengan atau tanpa bahan tambahan yang setelah mengeras akan membentuk suatu massa padat.

Sifat beton dipengaruhi oleh banyak faktor, antara lain faktor air-semen (FAS), gradasi agregat, jenis semen, serta metode pencampuran dan perawatan (*curing*). Beton memiliki keunggulan seperti kekuatan tekan tinggi, kemudahan dibentuk, serta ketahanan terhadap cuaca. Namun, beton memiliki kelemahan pada kekuatan tarik dan lentur, sehingga memerlukan perkuatan dengan tulangan baja untuk menahan gaya tarik atau lentur.

2.2.2 Material Penyusun Beton

Beton merupakan material komposit yang tersusun dari campuran beberapa bahan dasar, yaitu semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambahan (*admixture*) bila diperlukan. Kualitas beton yang dihasilkan sangat tergantung pada kualitas dan proporsi dari masing-masing material penyusunnya. Menurut SNI 7656:2012, kombinasi bahan yang tepat akan menghasilkan beton dengan kuat tekan, kuat lentur, dan durabilitas yang sesuai dengan perencanaan.

1. Semen Portland

Semen merupakan bahan pengikat hidrolis utama dalam pembuatan beton yang berfungsi menyatukan butiran agregat halus dan agregat kasar menjadi satu kesatuan padat dan keras. Peran semen sangat penting karena menentukan kekuatan, keawetan, dan daya tahan beton terhadap beban serta pengaruh lingkungan.

Menurut), semen Portland adalah hasil penggilingan klinker yang terutama terdiri atas kalsium silikat, kalsium aluminat, dan kalsium aluminoferrit, dengan

penambahan sejumlah gipsium untuk mengatur waktu ikat. Dari komposisi tersebut, semen memiliki fungsi kimia dan fisik yang kompleks dalam membentuk struktur beton.

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 digunakan untuk pekerjaan struktur harus memiliki kualitas tertentu sesuai dengan standar yang telah ditetapkan agar dapat berfungsi secara efektif. Oleh karena itu, pemeriksaan mutu perlu dilakukan secara berkala, baik pada kondisi semen masih berupa bubuk kering maupun setelah dicampur menjadi pasta. Komposisi kimia utama semen Portland dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Komposisi semen Portland

Oksidasi	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. 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 hidrolis. 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, 2019)

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 (SNI 03-2847-2002 Tentang tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung, 2002).halus dan agregat kasar, sebagaimana dijelaskan dalam

a) Agregat Halus

Menurut SNI 03-2834-2000, agregat halus adalah butiran mineral alami yang lolos saringan 4,75 mm, sedangkan agregat kasar 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, penambahan pasir alam secara berlebihan menyebabkan kerusakan

lingkungan, sehingga perlu dicari material alternatif seperti abu batu atau serbuk batu hasil proses *stone crusher*.

b) Agregat Kasar

Agregat kasar merupakan material berupa kerikil alami yang dihasilkan dari proses disintegrasi batuan secara alami atau batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu (*stone crusher*), dengan ukuran butiran berkisar. Agregat kasar berfungsi sebagai rangka utama beton, yang memberikan kekuatan tekan, kestabilan bentuk, serta mengurangi penyusutan beton.

Berdasarkan (SNI 03-2847-2002 tentang Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, agregat kasar yang digunakan untuk pembuatan beton harus memenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut:

1. Agregat untuk beton harus sesuai dengan salah satu ketentuan berikut:
 - a. ASTM C33 – *Standard Specification for Concrete Aggregates*, atau
 - b. SNI 03-2461-1991 – Spesifikasi Agregat Ringan untuk Beton Struktural.
2. Ukuran maksimum nominal agregat kasar tidak boleh melebihi:
 - a. 1/5 dari jarak terkecil antara sisi-sisi cetakan, atau
 - b. 1/3 dari tebal pelat lantai, atau
 - c. 3/4 dari jarak bersih minimum antara batang-batang tulangan, kawat, bundel, tendon, atau selongsong.

Selain itu, menurut ASTM C33 (1986), agregat kasar untuk beton juga harus memenuhi ketentuan berikut:

- a. Kandungan lumpur pada agregat kasar tidak boleh melebihi 1% dari berat kering. Jika kandungan lumpur lebih dari 1%, maka agregat kasar harus dicuci hingga memenuhi syarat.
- b. Agregat kasar sebaiknya tidak mengandung zat-zat reaktif terhadap alkali, karena dapat menyebabkan reaksi kimia yang merusak beton dikenal sebagai (*alkali-aggregate reaction*).

Dengan demikian, agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini dipilih dari sumber batuan yang bersih, keras, tidak mudah hancur, serta memenuhi spesifikasi SNI 03-2847-2002, agar mutu dan kekuatan beton yang dihasilkan dapat optimal.

3. Air

Air merupakan salah satu komponen utama dalam pembuatan beton yang paling ekonomis dan memiliki peran sangat penting dalam proses pembentukan beton. Fungsi utama air adalah bereaksi dengan semen untuk memicu proses hidrasi, serta bertindak sebagai pelumas antarbutiran agregat sehingga mempermudah proses pencampuran, pengangkutan, dan pemadatan beton. Kualitas air yang digunakan harus memenuhi standar bahan bangunan agar beton yang dihasilkan memiliki kekuatan dan daya tahan yang optimal. Air yang digunakan dalam campuran beton idealnya mampu menghasilkan kekuatan beton sekurang-kurangnya 90% dari kekuatan beton yang dibuat dengan air suling. Apabila air mengandung zat-zat berbahaya seperti garam, minyak, gula, atau bahan kimia tertentu, maka hal tersebut dapat menurunkan kualitas beton, memperlambat reaksi hidrasi, bahkan mengubah karakteristik fisik dan kimiawi beton yang terbentuk.

Menurut Virdaus (2005) dalam Atira (2016), air yang digunakan untuk campuran beton harus memenuhi beberapa kriteria berikut:

- a. Tidak mengandung lumpur atau bahan melayang lebih dari 2 gram per liter.
- b. Tidak mengandung zat organik atau garam yang dapat merusak beton.
- c. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram per liter, karena dapat menyebabkan korosi pada tulangan baja di dalam beton.

Dengan demikian, pemilihan air yang bersih dan memenuhi standar teknis sangat berpengaruh terhadap kualitas beton yang dihasilkan, baik dari segi kekuatan mekanis maupun ketahanan terhadap lingkungan.

2.3 Pengadukan atau Campuran Beton

Secara umum, proses pengadukan beton dilakukan hingga diperoleh campuran yang plastis, homogen, dan seragam. Ciri-ciri beton segar yang baik ditandai dengan warna adukan yang merata, kelecakan (*workability*) yang sesuai, serta tidak terdapat gumpalan bahan yang belum tercampur sempurna. Tujuan utama dari

proses ini adalah untuk memastikan setiap partikel agregat halus, agregat kasar, air, dan semen tercampur secara merata, sehingga beton yang dihasilkan memiliki kualitas dan kekuatan yang seragam.

Selama proses pengadukan, perlu dilakukan pencatatan data secara rinci guna menjaga konsistensi mutu campuran. Beberapa hal yang perlu dicatat meliputi:

1. Jumlah bak atau volume adukan beton yang dihasilkan.
2. Proporsi material (semen, agregat halus, agregat kasar, air, dan bahan tambahan) yang digunakan dalam setiap batch.
3. Perkiraan lokasi penuangan akhir dari beton pada struktur yang sedang dikerjakan.
4. Waktu dan tanggal pengadukan serta penuangan beton untuk memastikan ketepatan waktu pengecoran.

Ketentuan mengenai waktu pengadukan minimum sangat penting untuk menjamin keseragaman campuran. Menurut SNI 7656:2012 – Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat, dan Beton Massa, waktu pengadukan beton umumnya tidak boleh kurang dari 1,5 menit setelah seluruh bahan dimasukkan ke dalam alat pengaduk. Namun, durasi tersebut dapat disesuaikan dengan kapasitas *mixer* dan jenis beton yang dibuat.

Waktu pengadukan yang terlalu singkat dapat menyebabkan bahan tidak tercampur homogen, sedangkan pengadukan yang terlalu lama dapat menyebabkan kehilangan air dan penurunan kelecakan. Oleh karena itu, pengadukan harus dilakukan dengan waktu dan kecepatan putar yang sesuai untuk mencapai campuran beton segar yang optimal. Ketentuan lengkap mengenai waktu pengadukan minimal dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut (mengacu pada SNI 7656:2012 atau ASTM C94):

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

2.4 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:

2.4.1 Beton Ringan

Beton ringan adalah beton yang memiliki berat jenis kurang dari 1.900 kg/m³. 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.

2.4.2 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.

2.4.3 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.

2.4.4 Beton Jenis Lain

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:

- Beton Massa, digunakan pada struktur berukuran besar seperti bendungan dan fondasi masif, di mana pengendalian panas hidrasi menjadi hal penting.
- Fero semen, yaitu beton tipis yang diperkuat dengan jaring kawat baja halus untuk meningkatkan ketahanan tarik dan daktilitas.

- Beton Serat (*Fiber Concrete*), beton yang dicampur dengan serat baja, plastik, atau serat alami untuk meningkatkan ketahanan terhadap retak dan beban kejut.
- Beton Siklop (*Cyclopean Concrete*), yaitu beton dengan tambahan batu besar (boulder) untuk menghemat semen pada struktur volume besar.
- Beton Hampa (*Vacuum Concrete*), dibuat dengan menyedot air berlebih dari beton segar menggunakan pompa vakum, menghasilkan beton yang lebih rapat dan kuat.
- Beton Ekspos (*Exposed Concrete*), digunakan untuk elemen arsitektural dengan permukaan akhir yang menonjolkan tekstur alami beton tanpa ples-teran 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.

2.5 Kuat Lentur Beton

Kuat lentur beton (*flexural strength*) merupakan kemampuan beton untuk menahan gaya lentur yang bekerja pada permukaannya, biasanya dinyatakan dalam satuan Mega Pascal (MPa). Menurut SNI 4431:2011, pengujian kuat lentur dilakukan menggunakan metode dua titik pembebanan (*two-point loading*) pada balok beton dengan 15 cm x 15 cm x 60 cm.

Kuat lentur beton tidak hanya bergantung pada kuat tekan, tetapi juga pada komposisi agregat, ikatan antarpartikel, homogenitas campuran, dan kualitas ITZ (*Interfacial Transition Zone*). Umumnya, nilai kuat lentur beton normal berkisar antara 10%–20% dari kuat tekan. Semakin baik ikatan antara pasta semen dan agregat halus, semakin besar pula kekuatan lentur yang dapat dicapai.

Penelitian oleh Pujiastuti dkk.(2023) menunjukkan bahwa penggunaan agregat silika sisa tambang batu kapur dapat meningkatkan kuat lentur beton hingga 18% dibanding beton normal, karena adanya perbaikan distribusi partikel halus dan pengurangan porositas. Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa penambahan

serbuk batu Andesit sebagai agregat halus berpotensi menghasilkan efek serupa terhadap peningkatan kuat lentur.

Kuat lentur beton merupakan kemampuan beton dalam menahan gaya lentur yang timbul akibat beban transversal yang bekerja pada elemen struktur, seperti balok. Menurut SNI 4431:2011, pengujian kuat lentur dilakukan menggunakan metode pembebanan dua titik pada balok uji dengan ukuran standar, dengan tujuan untuk menentukan nilai *modulus of rupture*, yaitu tegangan lentur maksimum yang terjadi sebelum benda uji mengalami retak pertama atau kegagalan.

Nilai kuat lentur yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain homogenitas campuran beton, kepadatan struktur internal, serta kualitas ikatan antara pasta semen dan agregat. Selain itu, keberadaan cacat mikro seperti pori-pori atau retak rambut juga dapat menurunkan nilai kuat lentur beton, karena mengurangi kontinuitas material dalam menahan tegangan tarik di serat luar balok.

Berdasarkan SNI 4431:2011, apabila bidang patahan pada benda uji terletak di daerah tengah (sepertiga jarak antara dua titik perletakan), maka nilai kuat lentur beton (R) dihitung menggunakan persamaan (2.1) berikut:

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

dengan keterangan:

f_r = Kuat lentur beton (MPa)

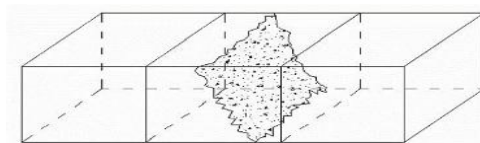
P = Beban maksimum yang menyebabkan patah (N)

L = Jarak antara dua perletakan (mm)

b = Lebar penampang balok uji (mm)

h = Tinggi penampang balok uji (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. 1 Patah pada 1/3 bentangan

Pada pengujian kuat lentur beton, apabila bidang patahan benda uji terjadi di luar daerah tengah ($1/3$ jarak antara dua titik perletakan), dan jarak antara titik pusat patahan dengan titik tengah bentang kurang dari 5% dari panjang bentang, maka nilai kuat lentur beton (R) dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.2) berikut (SNI 4431:2011):

$$f_r = \frac{3P \times a}{b \times h^2} \quad (2.2)$$

dengan keterangan:

f_r = Kuat lentur beton (MPa)

P = Beban maksimum yang menyebabkan patah (N)

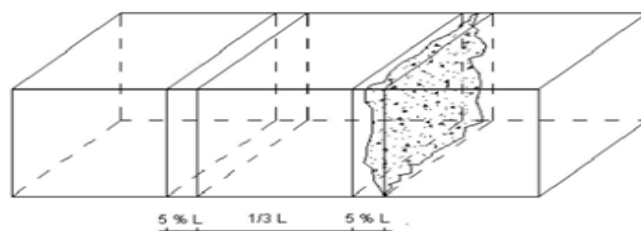
a = Jarak rata-rata antara bidang patahan dengan tumpuan luar terdekat (mm)

b = Lebar penampang balok uji (mm)

h = Tinggi penampang balok uji (mm)

Rumus tersebut digunakan untuk menentukan tegangan lentur maksimum pada kondisi patahan tidak terjadi tepat di tengah bentang, melainkan sedikit bergeser ke arah salah satu tumpuan. Situasi ini umum terjadi karena ketidaksempurnaan campuran beton, penempatan beban yang tidak simetris, atau variasi struktur mikro pada benda uji.

Pada gambar 2.2 menunjukkan patahan balok yang terjadi di luar $1/3$ bentang



tangan tengah dan garis patahan pada $< 5\%$ dari bentangan. Hal ini terjadi karena selain gaya lentur, di daerah tersebut juga mengalami gaya geser yang cukup besar.

Gambar 2. 2 Patah di luar $1/3$ bentang tengah dan garis patahan pada $< 5\%$ dari bentangan

Dalam konteks elemen struktural, kuat lentur merupakan salah satu parameter utama dalam perancangan balok beton bertulang. Kemampuan beton untuk

menahan momen lentur maksimum sebelum terjadi retak pertama (*first crack*) menentukan daktilitas dan keandalan struktur secara keseluruhan. Oleh karena itu, berbagai upaya untuk meningkatkan kuat lentur beton, seperti penggunaan bahan tambahan berupa serbuk batu Andesit sebagai agregat halus, menjadi kajian yang relevan baik dari sisi teoretis maupun praktis.

Serbuk batu Andesit, dengan ukuran partikel yang sangat halus, diharapkan dapat memperbaiki interaksi antara pasta semen dan agregat, serta mengurangi jumlah rongga (*voids*) dalam beton. Peningkatan kerapatan ini secara langsung akan memperbaiki daya tahan beton terhadap lenturan, yang pada akhirnya mendukung peningkatan kinerja struktural balok beton bertulang.

2.6 Batu Andesit

Batu Andesit merupakan salah satu jenis batuan beku berwarna gelap yang terbentuk akibat proses pendinginan cepat lava yang keluar ke permukaan bumi saat terjadi letusan gunung berapi. Proses pendinginan yang berlangsung relatif cepat ini menghasilkan batuan dengan tekstur padat, kuat, dan keras, serta Pororitas yang rendah sehingga memiliki nilai struktural tinggi serta ketahanan yang baik terhadap cuaca dan abrasi. Karena sifat mekaniknya yang unggul, batu Andesit banyak digunakan dalam berbagai bidang konstruksi. Di Indonesia, batu Andesit dapat ditemukan secara melimpah di berbagai wilayah, terutama di daerah yang memiliki aktivitas vulkanik tinggi, seperti Provinsi Lampung, Jawa Barat, Nusa Tenggara, Sulawesi, dan sebagian wilayah Kalimantan. Ketersediaannya yang luas serta harga yang relatif terjangkau menjadikan batu Andesit sebagai alternatif material konstruksi yang ekonomis dan efisien.

Menurut Yuliansyah dan Sujatmiko (2019), batu Andesit banyak dimanfaatkan sebagai material dasar konstruksi, antara lain untuk lapisan perkerasan jalan raya, pondasi bangunan, agregat pada campuran beton dan aspal, serta ballast (bantalan) pada jalur kereta api. Batu Andesit juga dikenal memiliki daya lekat tinggi dengan semen, sehingga meningkatkan ikatan antara agregat dan pasta semen dalam beton. Secara fisik, batu Andesit memiliki warna hitam hingga abu-abu gelap, bertekstur halus hingga menengah, dan terdiri atas mineral plagioklas, piroksen, serta olivin. Kandungan silika (SiO_2) yang cukup tinggi serta dominasi senyawa

besi dan magnesium menyebabkan batu ini bersifat padat, keras, dan memiliki ketahanan aus yang tinggi. Hal tersebut menjadikan batu Andesit sangat potensial digunakan sebagai bahan penyusun beton, baik sebagai agregat kasar maupun agregat halus.

Beberapa penelitian terdahulu telah meneliti pemanfaatan batu Andesit sebagai bahan campuran beton. Salah satunya dilakukan oleh Nurika Aulia Ramadhani (2022) dalam penelitian berjudul “Analisis Kuat Tarik Lentur Beton Menggunakan Material Batu Andesit (Studi Kasus: FS 4.5 MPa)”. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa penggunaan batu Andesit sebagai agregat kasar mampu meningkatkan kuat tarik lentur beton secara signifikan. Nilai kuat lentur yang diperoleh mencapai 53,62 kg/cm² atau 5,36 MPa pada umur 28 hari, lebih tinggi dari mutu rencana yang ditetapkan yaitu FS = 4,5 MPa (Ramadhani dkk., 2022).

Temuan tersebut menunjukkan bahwa batu Andesit memiliki potensi besar untuk digunakan dalam pembuatan beton struktural, karena mampu memberikan kekuatan lentur yang lebih tinggi dibandingkan beton dengan agregat konvensional. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, penelitian ini akan melanjutkan dan memperluas kajian dengan fokus pada pemanfaatan batu Andesit sebagai agregat halus, bukan lagi sebagai agregat kasar. Tujuannya adalah untuk mengeksplorasi lebih lanjut pengaruh serbuk batu Andesit terhadap kuat lentur balok beton, sekaligus menilai efektivitasnya sebagai material substitusi pasir alam dalam upaya pengembangan material beton yang berkelanjutan dan efisien.



Gambar 2. 3 batu Andesit

2.6.1 Serbuk Batu Andesit sebagai Agregat Halus

Batu Andesit merupakan batuan beku vulkanik berwarna gelap yang terbentuk dari pendinginan magma di permukaan bumi. Andesit memiliki komposisi mineral utama berupa plagioklas, piroksen, dan olivin. Secara fisik, batu Andesit memiliki kekerasan dan densitas tinggi, serta porositas rendah, sehingga sangat baik digunakan sebagai bahan konstruksi.

Serbuk batu Andesit dihasilkan sebagai limbah atau produk samping dari proses pemecahan batu pada industri bahan bangunan. Serbuk ini memiliki ukuran butiran yang lebih halus dibanding pasir alami, umumnya lolos saringan No. 4 (4,75 mm). Karena sifatnya yang halus, serbuk Andesit dapat berperan sebagai mikro-filler, yaitu mengisi rongga-rongga kecil antar butiran agregat sehingga menghasilkan beton yang lebih rapat dan padat.

Menurut penelitian (Rajiman, 2024) penggunaan serbuk Andesit skoria sebesar 15% dari berat semen meningkatkan kuat tekan beton hingga 14,75%. Hal ini menunjukkan bahwa partikel halus Andesit mampu meningkatkan ikatan antar partikel dan mengurangi rongga udara dalam beton. Sementara (Panjaitan & Harahap, n.d.) menemukan bahwa beton dengan agregat Andesit menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap air dibanding agregat batu kapur.

Dari segi lingkungan, pemanfaatan serbuk batu Andesit juga mendukung konsep konstruksi berkelanjutan (*sustainable construction*), karena mengurangi ketergantungan pada pasir alam dan meminimalkan limbah dari kegiatan penambangan batu.



Gambar 2. 4 Serbuk batu Andesit

2.6.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kuat Lentur Beton

Beberapa faktor utama yang memengaruhi kuat lentur beton antara lain:

1. Faktor air-semen (FAS) semakin rendah FAS, semakin tinggi kekuatan tekan dan lentur beton, hingga batas tertentu.
2. Gradasi agregat halus gradasi halus yang baik meningkatkan kerapatan dan mengurangi rongga udara.
3. Jenis agregat dan permukaannya agregat bertekstur kasar seperti Andesit meningkatkan ikatan mekanis dengan pasta semen.
4. Homogenitas campuran pencampuran merata menjamin distribusi beban lentur secara seragam.
5. Perawatan (*curing*) proses curing yang baik memastikan hidrasi semen berjalan optimal, sehingga beton mencapai kekuatan maksimum.