

BAB II

TINJAUN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Perkembangan teknologi bahan bangunan menuntut penggunaan material alternatif yang tidak hanya kuat secara mekanik, tetapi juga ramah lingkungan dan ekonomis. Salah satu material yang banyak diteliti dalam beberapa tahun terakhir adalah abu batu andesit, yaitu serbuk halus hasil sampingan proses pemecahan batu andesit. Batu andesit sendiri merupakan batuan beku vulkanik berwarna gelap dengan kandungan mineral utama berupa plagioklas, piroksen, dan olivin, yang memiliki sifat keras, padat, dan tahan aus. Abu batu andesit berpotensi digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton karena dapat memperbaiki struktur mikro dan meningkatkan kekuatan tarik serta tekan beton. Sejumlah penelitian dalam lima tahun terakhir telah dilakukan untuk menilai pengaruh variasi kadar abu batu andesit terhadap sifat mekanik beton, khususnya kuat tekan dan kuat tarik belah.

Penelitian yang dilakukan oleh (Rajiman & Ningrum, 2019) dalam jurnal teknologi plikasi konstruksi dan konservasi meneliti pengaruh penambahan serbuk batu andesit terhadap kuat tekan beton dengan variasi kadar 1%, 3%, 5% dari berat semen. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan serbuk andesit sebesar 3% memberikan hasil terbaik dengan peningkatan kuat tekan beton dari 26,7 MPa menjadi 29,8 MPa, atau meningkat sebesar 11,6% dibanding beton normal. Namun, ketika kadar ditingkatkan menjadi 5% dan lebih, nilai kuat tekan cenderung menurun karena meningkatnya jumlah partikel halus yang menyerap air dan menurunkan *workability*. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kadar abu batu andesit yang optimal berada pada kisaran 3% dari berat semen, di mana partikel halus andesit berfungsi sebagai *filler* yang mengisi pori-pori mikro dan meningkatkan kerapatan matriks beton.

Penelitian lain oleh (Yuliansyah & Sujatmiko, 2019) dalam jurnal teknika sains menyoroti pengaruh variasi ukuran agregat andesit scoria terhadap kuat tekan beton mutu K-250. Walaupun fokus penelitian ini lebih pada agregat kasar, hasilnya

memberikan gambaran bahwa penggunaan material andesit meningkatkan kuat tekan dari 25,5 MPa menjadi 27,3 MPa, karena lekatan yang kuat antara agregat andesit dan pasta semen. Temuan ini mendukung teori bahwa material berbasis andesit baik dalam bentuk agregat maupun serbuk halus mampu memperbaiki kerapatan dan kekuatan struktur beton.

Penelitian yang dilakukan oleh (Padang Israel & Lodi Honta zwenli, 2024) meneliti tentang pemanfaatan abu limbah kulit kopi Toraja sebagai substitusi parsial semen terhadap kuat tekan beton. Menggunakan metode eksperimental, penelitian ini menguji variasi campuran sebesar 0%, 5%, 7,5%, dan 10% dari berat semen dengan total 48 benda uji silinder berukuran 15cm × 30cm. Hasil pengujian pada umur 28 hari menunjukkan bahwa meskipun kuat tekan meningkat seiring bertambahnya usia beton, nilai akhirnya masih berada di bawah beton normal. Beton normal mencapai kuat tekan 25,45 MPa, sementara variasi substitusi abu kulit kopi mencapai nilai maksimum pada kadar 7,5% dengan kuat tekan sebesar 24,13 MPa atau setara dengan 84% dari kinerja beton normal. Dengan demikian, disimpulkan bahwa penggunaan abu kulit kopi Toraja sebagai bahan pozzolan memiliki potensi sebagai material alternatif, dengan efektivitas tertinggi ditemukan pada tingkat substitusi 7,5%.

Peneliti oleh (Erlinawati et al., 2022) dalam Jurnal Surya Beton meneliti pengaruh penggunaan abu batu sebagai bahan tambah terhadap sifat mekanik beton porous. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan abu batu hingga kadar 15% dapat meningkatkan kuat tekan dan menurunkan porositas beton. Penurunan porositas ini disebabkan oleh efek *filler* dari partikel halus abu batu yang mengisi rongga di antara agregat dan pasta semen, sehingga menghasilkan struktur yang lebih rapat.

Selain itu, penelitian oleh (Budilaksono et al., 2024) mengkaji pemanfaatan abu batu hasil pemecahan batu sebagai material alternatif dalam campuran beton. Hasilnya menunjukkan bahwa abu batu memiliki potensi besar untuk menggantikan sebagian agregat halus alami tanpa menurunkan kekuatan beton secara signifikan.

Penelitian serupa dilakukan oleh (Satriani & Bastomi, 2021) yang meneliti pengaruh abu batu limbah *stone crusher* sebagai substitusi parsial agregat halus

terhadap mutu beton normal. Ia menemukan bahwa penambahan abu batu sebesar 10–20% dari total berat pasir dapat meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik beton. Namun, pada kadar di atas 25%, *workability* campuran menurun dan beton menjadi lebih kaku, yang akhirnya berpengaruh negatif terhadap kekuatan tarik belah. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa proporsi optimal abu batu perlu ditentukan dengan cermat agar efek *filler* tidak menyebabkan peningkatan kebutuhan air atau penurunan kelecakan adukan.

Penelitian yang dilakukan oleh (Al Rasyid & Prayitno, 2024) dalam Jurnal Teknik Sipil UII dengan judul “Pengaruh Substitusi Parsial Agregat Halus Menggunakan Abu Batu dan Superplasticizer terhadap Kuat Tekan dan Tarik Belah Beton” menunjukkan bahwa penggunaan abu batu sebagai bahan substitusi parsial agregat halus memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kekuatan beton. Dalam penelitian tersebut, variasi substitusi abu batu ditetapkan sebesar 0%, 15%, 17,5%, 20%, 22,5%, dan 25% dari berat agregat halus, serta ditambahkan *superplasticizer* jenis *Viscocrete 3115N* sebesar 0,5% dari berat semen. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kadar optimum 22,5%, kuat tekan beton pada umur 28 hari meningkat dari 42,8 MPa menjadi 48,83 MPa, atau naik sekitar 14,07% dibandingkan beton kontrol, sedangkan kuat tarik belah meningkat dari 2,77 MPa menjadi 3,14 MPa, atau meningkat sebesar 13,23%.

Hasil-hasil penelitian terdahulu ini menjadi landasan penting bagi penelitian lebih lanjut yang berfokus pada abu batu andesit dari Toraja untuk menentukan kadar optimum dan pengaruhnya terhadap kuat tarik belah beton. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material lokal yang efisien, ekonomis, dan berkelanjutan, serta memperkaya kajian akademik di bidang teknologi beton berbasis material lokal Indonesia.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian beton

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam berbagai jenis pekerjaan struktur, mulai dari bangunan sederhana hingga gedung bertingkat. Menurut Sni 2847:2019 tentang “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung,” beton adalah campuran semen *portland*, air,

agregat halus, agregat kasar, serta bahan tambahan (*admixture*) yang setelah proses hidrasi akan membentuk massa padat yang menyerupai batu. Beton memiliki kuat tekan tinggi, durabilitas yang baik, dan kemudahan dalam pembentukan, sehingga menjadi pilihan utama dalam konstruksi modern. Meskipun demikian, beton memiliki kelemahan mendasar, yaitu kemampuan menahan gaya tarik yang rendah. Kuat tarik beton biasanya hanya sekitar 8–15% dari kuat tekannya (Deolinda Bere et al., 2022). Inilah sebabnya mengapa beton sering diperkuat dengan baja tulangan atau dikembangkan dengan bahan tambahan tertentu untuk meningkatkan kinerja tariknya.

2.2.2 Keunggulan beton

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia karena memiliki berbagai keunggulan baik dari segi teknis, ekonomi, maupun kemudahan dalam pengerjaan. Beton tersusun atas campuran semen *Portland*, agregat halus, agregat kasar, air, dan kadang ditambah bahan tambahan (*admixture* maupun *additive*) untuk memperoleh sifat tertentu sesuai kebutuhan struktur. Keunggulan utama beton terletak pada kekuatan tekan yang tinggi, kemampuan dibentuk sesuai kebutuhan desain, serta ketahanannya terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

Secara teknis, beton memiliki kekuatan tekan yang tinggi dibandingkan material konstruksi lainnya seperti kayu atau bata. Dengan proporsi campuran yang tepat dan kualitas bahan yang baik, beton mampu menahan beban tekan hingga puluhan bahkan ratusan megapascal. Menurut SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, mutu beton struktural dapat diklasifikasikan hingga di atas 40 MPa, tergantung jenis dan penggunaannya. Keunggulan ini menjadikan beton sangat efektif digunakan sebagai elemen struktural seperti kolom, balok, pelat, dan pondasi. Selain itu, beton memiliki daya tahan (*durabilitas*) yang tinggi terhadap pengaruh cuaca, air, api, dan bahan kimia tertentu. Struktur beton yang padat dan homogen dapat menahan korosi serta abrasi, sehingga cocok digunakan pada lingkungan agresif seperti daerah pantai, bendungan, jembatan, dan pelabuhan. Beton juga memiliki stabilitas bentuk yang

baik, di mana volume beton tidak mudah berubah akibat suhu atau kelembapan, serta tidak mengalami pembusukan atau pelapukan seperti material organik lainnya.

2.2.3 Kelemahan beton

Meskipun beton memiliki banyak keunggulan dalam hal kekuatan tekan, durabilitas, dan efisiensi biaya, material ini juga memiliki sejumlah kelemahan yang perlu diperhatikan, terutama ketika digunakan sebagai elemen struktural pada bangunan. Pemahaman terhadap kelemahan beton sangat penting agar dapat dilakukan perbaikan dan inovasi dalam komposisi maupun teknologi pembuatannya.

Kelemahan utama beton adalah rendahnya kekuatan tarik dibandingkan dengan kekuatannya. Secara umum, kuat tarik beton hanya berkisar 8–15% dari kuat tekannya (SNI 2847:2019). Hal ini menyebabkan beton mudah mengalami retak apabila mendapatkan beban tarik atau lentur berlebih, terutama pada bagian bawah balok atau pelat. Oleh karena itu, pada sebagian besar struktur beton, digunakan tulangan baja (*reinforcement*) untuk menahan gaya tarik yang tidak mampu ditanggung beton. Rendahnya kuat tarik ini juga dapat diperparah oleh distribusi partikel semen yang tidak homogen dan munculnya *microcracks* selama proses pengerasan beton (Syafriadi, 2020).

Kelemahan berikutnya adalah berat jenis yang tinggi, umumnya antara 2.300–2.500 kg/m³, sehingga beton termasuk material yang berat. Berat sendiri yang besar menambah beban mati pada struktur dan memerlukan pondasi yang lebih kuat. Untuk mengatasi hal ini, dikembangkan variasi seperti *lightweight concrete* dengan agregat ringan atau beton berpori, namun hal ini biasanya mengorbankan sebagian kekuatan tekan beton (Rajiman, 2019).

Selain itu, beton memiliki sifat getas (*brittle*) dan modulus elastisitas yang relatif rendah, sehingga kemampuan deformasinya terbatas. Beton cenderung mengalami kerusakan mendadak tanpa tanda-tanda plastis sebelum mengalami patah total. Sifat getas ini menjadi permasalahan terutama pada struktur yang harus menahan beban dinamis seperti gempa atau getaran mesin.

Kelemahan lain yang sering muncul adalah mudah mengalami retak akibat susut (*shrinkage*) dan perubahan suhu (*thermal cracking*). Proses hidrasi semen

menghasilkan panas yang menyebabkan pemuaian, dan setelah beton mengeras terjadi pendinginan yang menimbulkan gaya tarik internal. Jika tidak diimbangi dengan perawatan yang tepat, beton akan mengalami retak halus pada permukaannya. Retakan ini walaupun kecil, dapat menjadi jalur masuk air, klorida, dan karbon dioksida yang mempercepat korosi tulangan serta mengurangi durabilitas struktur (Prasetyono & Rahman, 2021)

2.2.4 Bahan penyusun beton

Agar beton memiliki kualitas yang baik, seluruh bahan penyusunnya harus memenuhi syarat mutu sesuai standar nasional. Komposisi dan karakteristik tiap bahan sangat memengaruhi kekuatan tekan, tarik, serta durabilitas beton.

a. Semen

Jenis-jenis semen terdiri dari yaitu:

(a) Semen *Portland* tipe I–V

Semen *Portland* adalah jenis semen yang paling umum digunakan dalam industri konstruksi. Semen ini dihasilkan melalui proses pemanasan klinker yang terdiri dari kalsium silikat dan kalsium aluminat. Berdasarkan penggunaan dan karakteristiknya, semen *Portland* dibedakan menjadi beberapa tipe, yang masing-masing memiliki spesifikasi dan kegunaan tertentu seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Tipe semen portland dan penggunaannya

Tipe	Karakteristik Utama	Kegunaan
Tipe I	Semen <i>Portland</i> biasa dengan ketahanan standar terhadap air dan kondisi lingkungan umum.	Digunakan untuk beton umum seperti bangunan, jalan, jembatan, dan struktur lain yang tidak memerlukan ketahanan khusus terhadap lingkungan agresif.
Tipe II	Memiliki ketahanan sedang terhadap sulfat dan menghasilkan panas hidrasi yang moderat.	Cocok untuk struktur yang terpapar air laut, tanah mengandung sulfat, atau kondisi lingkungan yang agak agresif.

Tipe III	Memiliki kekuatan awal tinggi dan waktu pengerasan cepat.	Digunakan untuk pekerjaan yang memerlukan kekuatan awal tinggi, seperti perbaikan cepat, pengecoran dalam cuaca dingin, atau proyek dengan waktu konstruksi singkat.
Tipe IV	Menghasilkan panas hidrasi rendah, memperlambat peningkatan suhu selama pengerasan.	Sesuai untuk struktur besar seperti bendungan atau fondasi masif yang memerlukan kontrol suhu selama pengerasan.
Tipe V	Tahan terhadap serangan sulfat tinggi.	Digunakan pada lingkungan yang sangat agresif seperti tanah atau air dengan kandungan sulfat tinggi (misalnya, instalasi bawah tanah, saluran air limbah, dan struktur pantai).

(b) *Semen Portland Pozzolan (PPC)*

Semen Portland Pozzolan (PPC) digunakan untuk konstruksi yang memerlukan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang lebih agresif. PPC memberikan keuntungan dalam hal biaya, karena *pozzolan* yang digunakan sering kali lebih murah daripada semen murni. Selain itu, PPC juga lebih ramah lingkungan karena mengurangi emisi CO₂ yang terkait dengan produksi semen *Portland* biasa (Fattuhi & Bouikni, 2020).

(c) *Semen Portland Komposit (PCC)*

Semen Portland Komposit adalah campuran antara semen *Portland* dengan bahan pengganti seperti *fly ash*, *slag*, atau bahan mineral lainnya. PCC tidak hanya lebih ekonomis tetapi juga lebih ramah lingkungan karena menggunakan bahan sisa industri yang sulit terurai. Semen ini sering digunakan untuk struktur beton yang membutuhkan durabilitas lebih tinggi di lingkungan yang tidak ekstrem.

(d) Semen khusus (misalnya semen cepat keras, semen tahan sulfat)

Selain semen jenis *Portland* dan campuran, ada juga semen khusus yang dirancang untuk kebutuhan konstruksi tertentu, terutama dalam kondisi ekstrem. Dapat di lihat pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Semen khusus	
Jenis Semen Khusus	Aplikasi Umum
Semen Cepat Keras	Digunakan pada proyek yang membutuhkan kekuatan dan pengerasan cepat, seperti perbaikan jalan, pekerjaan darurat, atau pengecoran dalam kondisi cuaca dingin.
Semen Tahan Sulfat	Digunakan untuk konstruksi di lingkungan dengan kadar sulfat tinggi, seperti di daerah pantai, saluran pembuangan, atau tanah yang mengandung senyawa kimia agresif.

b. Agregat halus (Pasir)

Agregat halus merupakan butiran mineral alami yang lolos saringan No.4 dan tertahan pada saringan No.50. Fungsinya adalah mengisi rongga di antara agregat kasar serta membantu menghasilkan permukaan beton yang padat. Berdasarkan (SNI 03-2834-2000) tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal, agregat halus harus memiliki gradasi yang baik, bersih dari lumpur dan bahan organik, serta tidak mengandung garam yang dapat mengganggu ikatan pasta semen. Menurut penelitian Hadianto et al. (2022), kualitas pasir sangat berpengaruh terhadap workability dan kuat tekan beton. Pasir dengan kadar lumpur tinggi akan menghambat ikatan semen dan menurunkan kekuatan beton.

c. Agregat Kasar (kerikil atau batu pecah)

Agregat kasar merupakan material yang berfungsi sebagai pengisi utama dalam beton, memberikan kekuatan tekan dan stabilitas volume. Ukuran agregat kasar yang digunakan lolos saringan 1¹/₂ dan tertahan pada No.4. Menurut (SNI 03-2834-2000), agregat kasar harus bersih, keras, dan tidak mengandung bahan organik. Hasil penelitian Hadianto et al. (2022) menunjukkan bahwa karakteristik

agregat kasar, seperti gradasi dan kekasaran permukaan, sangat memengaruhi kekuatan ikatan antara pasta semen dan agregat.

d. Air

Air berperan penting dalam proses hidrasi semen dan pencampuran beton. Kualitas air harus memenuhi ketentuan, yaitu air yang digunakan untuk beton harus bebas dari bahan kimia berbahaya, minyak, atau asam yang dapat mengganggu proses hidrasi. Proporsi air yang berlebihan dapat menurunkan kekuatan beton, sementara jumlah yang terlalu sedikit dapat mengurangi *workability* atau kemudahan pengerjaan (Setiawan & Riyanto, 2022).

2.2.5 Klasifikasi mutu beton

Berdasarkan (SNI 2847 : 2019) tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung, mutu beton diklasifikasikan berdasarkan kekuatan tekan karakteristiknya ($f'c$), yang umumnya diuji pada umur 28 hari. Mutu beton menjadi salah satu indikator utama kualitas dan ketahanan suatu struktur bangunan. Berikut klasifikasi beton berdasarkan mutu:

a. Beton mutu rendah

Mutu beton rendah memiliki kuat tekan di bawah 20 MPa. Jenis ini digunakan untuk pekerjaan non-struktural, seperti lantai kerja, jalan setapak, trotoar, saluran air, atau pondasi dangkal. Beton mutu rendah tidak direkomendasikan untuk elemen yang menahan beban struktural utama.

b. Beton mutu sedang

Mutu beton sedang memiliki kekuatan tekan 20 sampai 40 MPa. Umumnya digunakan untuk bangunan sederhana dan struktur rumah bertingkat rendah, seperti kolom, balok, dan pelat lantai. Kelas ini banyak dipakai untuk proyek perumahan dan konstruksi kecil hingga menengah.

c. Beton mutu tinggi

Beton mutu tinggi memiliki kuat tekan lebih dari 40 MPa ke atas. Digunakan untuk struktur berat atau konstruksi khusus, seperti jembatan, landasan pacu pesawat, gedung bertingkat tinggi, dan beton prategang. Mutu tinggi ini diperlukan untuk proyek yang menuntut daya tahan besar terhadap beban dan lingkungan ekstrem.

d. Beton mutu ultra tinggi

Beton mutu ultra tinggi jenis beton yang memiliki kekuatan tekan yang lebih dari 100 Mpa. Beton ini sering digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan ketahanan yang sangat tinggi, seperti jembatan panjang dan struktur di lingkungan yang ekstrim.

Menurut ketentuan (SNI 2847 : 2019), beton struktural minimal harus memiliki kuat tekan 20 MPa untuk bangunan sederhana, dan 30 MPa atau lebih untuk struktur dengan beban berat atau bangunan bertingkat tinggi. Uji kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari untuk memastikan mutu sesuai rencana. Selain kekuatan, faktor lain seperti durabilitas, jenis semen, proporsi campuran, dan kualitas agregat juga sangat mempengaruhi performa beton dalam jangka panjang.

2.2.6 Defenisi abu batu

Abu batu merupakan hasil sampingan dari proses pemecahan batu (stone crusher) yang memiliki ukuran partikel lebih kecil dari 4,75 mm. Berdasarkan (SNI 03-2834-2000, 2000) tentang tata cara pembuatan rencana campuran beton normal, abu batu dapat digunakan sebagai agregat halus buatan jika memenuhi persyaratan kebersihan dan gradasi yang baik. Secara umum, abu batu mengandung senyawa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida logam lain yang berpotensi meningkatkan kekuatan beton. Selain itu, abu batu memiliki bentuk butiran tajam dan permukaan kasar yang dapat memperkuat ikatan antara pasta semen dan agregat, sehingga berpengaruh positif terhadap sifat mekanik beton.

Abu batu merupakan hasil sampingan dari proses pemecahan batuan alam yang memiliki ukuran halus dan permukaan tajam. Penambahan abu batu sebagai bahan tambah dapat meningkatkan kekuatan tarik dan tekan beton karena partikel halus nya mengisi pori-pori mikro di antara agregat dan pasta semen. Penelitian (Erlinawati et al., 2022) dalam Surya Beton: Jurnal Ilmu Teknik Sipil menunjukkan bahwa penambahan abu batu sebanyak 10% dari berat semen meningkatkan kuat tarik belah beton sebesar 11,35% dibanding beton normal. Hal ini dikaitkan dengan peningkatan densitas dan penurunan porositas beton akibat efek pengisian (*filler effect*).

2.2.7 Prinsip pemanfaatan abu batu dalam beton

Pemanfaatan abu batu dalam campuran beton didasarkan pada dua mekanisme utama, yaitu mekanisme fisik dan mekanisme kimia.

a. Mekanisme fisik (*Filler Effect*):

Secara fisik, partikel halus abu batu berperan mengisi rongga mikro di antara butiran semen dan agregat. Proses ini meningkatkan kerapatan struktur beton, mengurangi porositas, dan menambah kekompakan material. Hasil penelitian Erlinawati et al. (2022) menunjukkan bahwa efek pengisian partikel halus ini mampu meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik belah hingga 10% dibandingkan beton normal. Semakin rapat beton, semakin kecil kemungkinan retak mikro berkembang menjadi retak besar.

b. kimia (Reaksi Pozzolan):

Dari sisi kimia, abu batu yang kaya silika aktif dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida $[Ca(OH)_2]$ hasil hidrasi semen, membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C–S–H). Reaksi ini dikenal dengan istilah reaksi pozzolanik. Senyawa C–S–H yang dihasilkan mampu meningkatkan kekuatan beton dan memperbaiki mikrostruktur, terutama pada zona transisi antarmuka (ITZ). Hadianto et al. (2022) menemukan bahwa kadar abu batu optimum 15% mampu meningkatkan kuat tekan sekaligus memperbaiki ketahanan beton terhadap retak.

2.2.8 Karakteristik batu andesit



Gambar 2. 1 Batu andesit

Batu andesit adalah batuan beku vulkanik (ekstrusif) yang terbentuk dari magma dengan kandungan silika sedang yang membeku di permukaan bumi. Batuan ini umumnya berwarna abu-abu kehitaman, bertekstur halus atau porfiritik,

serta tersusun oleh mineral seperti plagioklas, piroksen, dan hornblende serta kandungan silika (SiO_2) sekitar 53–63% (Noor, 2012). Batu andesit banyak ditemukan di daerah zona subduksi, seperti di Indonesia, dan sering dimanfaatkan sebagai bahan bangunan karena sifatnya yang kuat dan tahan terhadap cuaca.

Abu batu andesit Toraja merupakan hasil sampingan dari proses pemecahan batu andesit (*andesit rock*), yaitu batuan beku vulkanik berwarna abu-abu muda hingga kegelapan dengan tekstur halus dan padat. Andesit termasuk batuan akan mineral piroksen dan plagioklas kalsik, serta memiliki kandungan silika (SiO_2) sedang sekitar 53–63%. Berdasarkan penelitian (Yuliansyah & Sujatmiko, 2019) dalam Jurnal Teknik Sains, batu andesit memiliki densitas tinggi (2,8–3,0 g/cm³), ketahanan aus yang baik, dan sifat mekanik yang kuat, sehingga limbah halusnya berpotensi digunakan sebagai bahan tambah dalam campuran beton atau semen. Dalam bentuk serbuk atau abu halus, batu andesit berperan sebagai mineral additive (bahan tambah mineral) yang ditambahkan ke dalam semen untuk memperbaiki sifat mekanik dan mikrostruktur beton. Bahan ini dapat meningkatkan kekuatan tekan dan tarik belah beton karena efek pengisian partikel halusnya (*filler effect*) serta kemampuan sebagian mineralnya untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen (Ningrum, 2019).

Menurut (Rajiman & Ningrum, 2019) dalam Jurnal TAPAK menyatakan bahwa penambahan serbuk andesit sebesar 3% dari berat semen meningkatkan kuat tarik belah beton sebesar 9,7% dibandingkan beton kontrol. Peningkatan ini terjadi karena serbuk andesit mengisi pori mikro dan meningkatkan lekatan antara agregat dan pasta semen.

SNI spesifik untuk bahan tambah abu batu belum ada, artinya abu batu dianggap sebagai bagian dari agregat halus atau filler, sehingga dia diukur melalui uji-uji agregat standar. Abu batu andesit dapat dinyatakan memenuhi ketentuan umum SNI sebagai material dalam campuran beton apabila hasil pengujiannya menunjukkan gradasi yang sangat halus dengan dominasi butiran lolos saringan No. 200 (0,075 mm) berdasarkan metode analisis saringan agregat sesuai (SNI ASTM C 136-06, 2012), serta memiliki nilai berat jenis dalam kisaran agregat normal ($\pm 2,50$ – $2,70$) yang ditentukan melalui prosedur pengujian menurut cara uji berat

jenis dan penyerapan air agregat halus (SNI 1970, 2008) dengan terpenuhinya parameter gradasi dan berat jenis tersebut sesuai standar yang ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional, maka abu batu andesit secara fisik layak digunakan dalam campuran beton.

2.2.9 Pengaruh abu batu terhadap kuat tarik belah beton

Abu batu memiliki ukuran butir yang sangat halus, lolos saringan No. 200 (0,075 mm). Ketika dicampurkan ke dalam semen, partikel halus ini akan mengisi rongga mikro di antara butiran semen dan agregat, sehingga menghasilkan struktur beton yang lebih padat. Penelitian (Rajiman & Ningrum, 2019) menunjukkan bahwa penambahan 3% serbuk andesit terhadap berat semen dapat meningkatkan kuat tarik belah beton hingga 9,7% dibanding beton normal. Peningkatan ini disebabkan oleh berkurangnya rongga udara dan peningkatan kepadatan pada zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone* / ITZ).

Walaupun andesit bukan bahan pozzolanik aktif, kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) di dalamnya dapat bereaksi sebagian dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasil hidrasi semen, membentuk lapisan sekunder calcium silicate hydrate (*C-S-H*) yang memperkuat ikatan antarpartikel semen. Reaksi ini menyebabkan peningkatan kekuatan tarik dan tekan beton pada umur 28 hari (Rajiman & Ningrum, 2019).

2.2.10 Kuat tarik belah beton

Kuat tarik belah merupakan sifat mekanik beton yang menggambarkan kemampuan beton dalam menahan gaya tarik tidak langsung akibat beban luar. Menurut (SNI 2491:2014) tentang “Metode Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Silinder,” pengujian dilakukan dengan memberikan beban tekan pada benda uji silinder secara diametral sampai beton retak. Besarnya beban pada saat retak digunakan untuk menghitung kuat tarik belah. Penelitian (Sriyadi, 2010) menjelaskan bahwa semakin rapat dan homogen struktur internal beton, semakin tinggi pula kemampuan beton untuk menahan retak tarik. Kuat tarik belah beton dihitung dengan persamaan :

$$f_{ct} = \frac{2p}{\pi lD} \quad (2.1)$$

Dimana :

Fct = Kuat tarik belah (Mpa)

P = Beban pada waktu belah (N)

I = Panjang benda uji (mm)

D = Diameter benda uji (mm)

π = Phi (mm)