

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia karena sifatnya yang kuat, tahan lama, dan mudah dibentuk. Namun, penggunaan beton dalam skala masif membawa konsekuensi lingkungan yang cukup signifikan. Produksi semen Portland sebagai komponen pengikat utama beton menyumbang sekitar 7–8% dari total emisi CO₂ global, menjadikannya salah satu kontributor utama terhadap perubahan iklim dan degradasi lingkungan (Wikipedia, 2025). Kondisi ini menuntut inovasi dalam pemilihan bahan baku yang lebih ramah lingkungan, salah satunya melalui pemanfaatan abu terbang (*fly ash*) sebagai bahan pengganti parsial semen.

Abu terbang merupakan limbah hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang memiliki sifat pozzolanik, yaitu mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen untuk membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C–S–H). Senyawa ini berperan penting dalam memperbaiki kekuatan dan ketahanan beton (Nikoloutsopoulos et al., 2021). Pemanfaatan abu terbang tidak hanya mengurangi ketergantungan pada semen, tetapi juga mengatasi masalah penumpukan limbah industri yang berpotensi mencemari lingkungan. Penggunaan abu terbang terbukti mampu meningkatkan kemudahan pengerjaan (*workability*), kerapatan mikrostruktur, serta ketahanan jangka panjang beton berkat efek pengisi (*filler effect*) dan aktivitas pozzolanik lanjutannya.

Berbagai penelitian terdahulu telah banyak mengkaji pengaruh abu terbang terhadap kuat tekan beton. Namun, evaluasi menyeluruh terhadap sifat mekanik dan durabilitas jangka panjang masih perlu diperluas, khususnya pada parameter **kuat tarik belah** (*splitting tensile strength*) dan **resistivitas listrik** (*electrical resistivity*). Kedua parameter ini menjadi indikator kunci dalam menilai ketahanan beton terhadap retak dan penetrasi zat agresif, yang tidak selalu terlihat dari pengujian tekan semata.

Kuat tarik belah mencerminkan kemampuan beton menahan beban tarik tidak langsung dan sangat terkait dengan kualitas zona transisi antar muka (*interfacial transition zone*). Pada beton geopolimer berbasis abu terbang, nilai kuat tarik belah dilaporkan mencapai 7% dari kuat tekannya, mengindikasikan efisiensi transfer beban yang baik pada sistem pengikat alkali-aktif (ScienceDirect, 2025). Studi lainnya menunjukkan bahwa beton dengan substitusi 20% abu terbang tipe F yang dipaparkan pada lingkungan agresif (air asam tambang) tetap mengalami peningkatan kuat tarik belah secara konsisten hingga umur 56 hari dengan nilai puncak 2,89 MPa, berbeda dengan kuat tekannya yang cenderung menurun setelah umur tertentu (GEOMATE, 2025). Hal ini menegaskan bahwa abu terbang berkontribusi positif terhadap perbaikan ketahanan retak, terutama pada kondisi lingkungan ekstrem.

Dari aspek durabilitas, resistivitas listrik beton kini diakui sebagai indikator non-destruktif yang andal untuk memprediksi ketahanan terhadap intrusi ion klorida dan potensi korosi tulangan. Resistivitas berkorelasi langsung dengan karakteristik pori, konektivitas antar pori, serta kimia larutan pori dalam beton (ACI, 2019; Kang et al., 2020). Penggunaan abu terbang secara signifikan meningkatkan nilai resistivitas listrik seiring waktu. Campuran biner dengan abu terbang mencapai resistivitas dan

faktor formasi tertinggi selama periode 360 hari, melampaui beton semen Portland murni yang justru menunjukkan nilai terendah (Purdue, 2025). Peningkatan ini disebabkan oleh pemadatan struktur pori dan peningkatan *tortuosity* akibat pembentukan C–S–H sekunder dari reaksi pozzolanik lanjutan. Lebih lanjut, beton dengan abu terbang tipe C menunjukkan peningkatan resistivitas 1,5 kali lebih besar dibandingkan tipe F, yang berdampak pada ketahanan yang lebih tinggi terhadap penetrasi klorida (Buildings, 2025). Dalam model prediksi korosi, penggunaan abu terbang terbukti memperpanjang masa inisiasi korosi hingga proyeksi 50 tahun, memberikan keuntungan signifikan bagi infrastruktur yang terpapar lingkungan marin atau bahan kimia anti-beku (Buildings, 2025).

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi presentase abu terbang sebagai pengganti semen terhadap sifat mekanik beton yang diukur melalui uji kuat tarik belah ?
2. Bagaimana pengaruh variasi presentase abu terbang sebagai pengganti semen terhadap sifat mekanik beton yang diukur melalui uji Resistivity ?
3. Bagaimana hubungan antara hasil uji kuat tarik belah dengan hasil pengujian resistivitas listrik?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh substitusi abu terbang dengan variasi persentase tertentu (0%, 15%, 30%, dan 45%) terhadap sifat mekanik beton yang diukur melalui uji kuat tarik belah.
2. Menganalisis pengaruh substitusi abu terbang dengan variasi persentase tertentu (0%, 15%, 30%, dan 45%) terhadap sifat durabilitas beton yang diukur melalui uji resistivitas listrik.
3. Menganalisis hubungan antara hasil uji kuat tarik belah dengan hasil uji resistivitas listrik pada beton yang mengandung abu terbang.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian diharapkan Mengembangkan pemanfaatan abu terbang (*fly ash*) sebagai material alternatif pengganti sebagian semen dalam campuran beton, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada semen Portland, Memberikan kontribusi dalam upaya mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh limbah abu terbang dari PLTU serta mengurangi eksploitasi material alam yang berlebihan, Menjadi referensi bagi penelitian lanjutan maupun aplikasi praktis di bidang teknologi beton, khususnya dalam penggunaan abu terbang untuk meningkatkan sifat mekanik (kuat tarik belah) dan sifat durabilitas (resistivitas listrik) beton., dan Memberikan pemahaman mengenai korelasi antara pengujian destruktif (kuat tarik belah) dan non-destruktif (resistivitas listrik) dalam mengevaluasi kualitas beton.

1.1.4 Batasan Masalah

Penelitian terkait beton ringan geopolimer sangat luas, sehingga perlu untuk membatasi masalah penelitian ini agar dapat lebih terarah.

1. Penelitian dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Struktur dan Bahan, Universitas Hasanuddin.
2. Benda uji berupa silinder beton dengan ukuran tinggi 30 cm dan diameter 15 cm, yang digunakan untuk pengujian kuat tarik belah dan resistivitas listrik.
3. Variasi persentase abu terbang sebagai pengganti semen dibatasi pada 0%, 15%, 30%, dan 45% dari berat semen.
4. Pengujian dilakukan pada umur beton 28 hari dengan metode perawatan (*curing*) menggunakan air.

5. Seluruh pengujian dilaksanakan di laboratorium mengacu pada standar resmi yang berlaku (misalnya ASTM atau SNI), sehingga hasil yang diperoleh diharapkan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

1.2 Teori

1.2.1 Beton

Beton merupakan salah satu material berbasis semen yang paling banyak digunakan dalam bidang teknik sipil dan teknik lingkungan. Penggunaan beton telah menjadi pilar utama dalam pembangunan infrastruktur modern karena sifatnya yang ekonomis, mudah dibentuk sesuai kebutuhan, serta mampu menunjukkan performa yang baik terutama dalam kekuatan tekan, ketahanan terhadap penetrasi air, dan kestabilan termal (Madraszewski, 2022). Selain itu, beton dapat diproduksi hampir di setiap lokasi konstruksi dengan memanfaatkan peralatan yang tersedia secara luas, serta dapat dibentuk sesuai cetakan yang direncanakan, sehingga menjadikannya material serbaguna dalam berbagai aplikasi struktural. Tayebani et al. (2023) menegaskan bahwa beton merupakan material komposit serbaguna yang terus memperoleh kekuatan seiring berjalannya waktu, sehingga penggunaannya sangat luas dalam pembangunan infrastruktur di seluruh dunia. Komposisi dasar beton terdiri atas semen, agregat, air, dan bahan kimia tambahan yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik struktur. Melalui kombinasi tersebut, beton mampu menyediakan material konstruksi dengan kinerja yang stabil dan dapat diandalkan dalam jangka panjang.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, beton juga memiliki beberapa keterbatasan mendasar yang mempengaruhi sifat mekanis dan keawetannya. (Alex et al. 2022) menjelaskan bahwa kelemahan utama beton antara lain sifat getas, ketahanan yang rendah terhadap pembentukan retak, kekuatan tarik yang relatif kecil, serta kapasitas regangan yang terbatas. Sifat getas tersebut menjadikan beton rentan terhadap kerusakan akibat beban tarik, lentur, maupun beban dinamis yang melebihi kapasitasnya. Oleh karena itu, dalam praktiknya, beton sering dipadukan dengan material lain seperti baja tulangan untuk meningkatkan performa mekanisnya, khususnya pada bagian struktur yang mengalami tegangan tarik dominan. Namun, di sisi lain, semen sebagai bahan pengikat utama dalam campuran beton memiliki peran dominan dalam menentukan sifat fisik dan kimia material ini (Alex et al., 2022). Hal ini karena hidrasi semen merupakan proses fundamental yang membentuk matriks pengikat antara agregat, sehingga secara langsung mempengaruhi kekuatan, ketahanan, dan durabilitas beton.

Lebih jauh, beton dipandang sebagai material komposit multi-fase yang berstruktur nano, terdiri dari fase amorf, kristal berukuran nano hingga mikrometer, serta air terikat dalam pori-porinya (Vehmas et al., 2014). Fase amorf utama yang berfungsi sebagai pengikat adalah kalsium-silikat-hidrat (C-S-H), yakni nanomaterial adhesif yang bertanggung jawab dalam menyatukan keseluruhan struktur beton. Produk hidrasi semen yang paling utama, yaitu gel C-S-H, terbentuk melalui kombinasi nanokristalin dengan struktur atomik yang kompleks (Rossen et al., 2015). Keberadaan C-S-H ini sangat menentukan sifat mekanik beton, terutama kekuatan tekan dan kedap air, serta memengaruhi interaksi mikrostruktural antar partikel dalam matriks. Dengan demikian, meskipun secara makroskopis beton

tampak sebagai material homogen yang padat, pada tingkat mikro dan nano sebenarnya beton adalah sistem heterogen dengan interaksi antar fase yang kompleks. Pemahaman terhadap aspek mikrostruktural ini penting karena menjadi dasar bagi pengembangan inovasi beton modern, misalnya dengan penambahan material nano untuk memperbaiki sifat mekanis maupun keawetannya.

Dalam kerangka aplikatif, pemanfaatan beton telah meluas pada hampir seluruh sektor konstruksi, mulai dari bangunan gedung, jalan raya, jembatan, bendungan, hingga struktur bawah tanah. Beton dipilih karena kemampuannya dalam memikul beban tekan yang besar, ketersediaan bahan baku yang melimpah, serta biaya produksi yang relatif rendah dibandingkan material alternatif lainnya (Madraszewski, 2022). Selain itu, beton menunjukkan keunggulan dalam aspek ketahanan lingkungan, seperti ketahanannya terhadap air, gas, dan variasi suhu, yang membuatnya cocok diaplikasikan pada kondisi iklim tropis maupun ekstrem. Namun, keunggulan ini tidak meniadakan fakta bahwa kinerja beton sangat dipengaruhi oleh kualitas bahan penyusunnya, metode pencampuran, proses pengerasan, dan kondisi lingkungan tempat struktur berada. Oleh karena itu, penelitian mengenai modifikasi campuran beton terus dikembangkan, baik melalui pemanfaatan bahan pengganti semen seperti fly ash, slag, maupun material daur ulang, dengan tujuan untuk meningkatkan performa sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari industri semen.

Secara keseluruhan, beton adalah material konstruksi fundamental yang menggabungkan aspek kinerja mekanik, fleksibilitas dalam aplikasi, serta efisiensi biaya. Akan tetapi, pemahaman yang mendalam terhadap sifat mikrostruktural dan keterbatasannya sangat diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaannya. Kelemahan beton dalam hal sifat getas, kekuatan tarik, dan ketahanan terhadap retak menuntut adanya pendekatan rekayasa baik melalui desain struktur yang tepat maupun inovasi material. Di sisi lain, peran semen sebagai bahan pengikat utama menjadikan hidrasi sebagai proses kunci yang harus dikendalikan dengan cermat untuk memperoleh sifat beton yang optimal. Dengan kemajuan teknologi material, penelitian terkini terus diarahkan pada pemanfaatan material nano, aditif kimia, serta substitusi material ramah lingkungan untuk menghasilkan beton yang lebih kuat, lebih tahan lama, dan lebih berkelanjutan. Dengan demikian, pemahaman teori beton tidak hanya terletak pada karakteristik makroskopisnya, tetapi juga pada keterkaitan fundamental antara komposisi, struktur mikro, dan kinerja jangka panjang yang menjadikannya material konstruksi yang tak tergantikan dalam pembangunan infrastruktur modern.

1.2.2 Material Penyusun Beton

Dilihat dari fungsinya, setiap material penyusun beton memiliki peran masing-masing. Semen dan air membentuk pasta semen yang berfungsi sebagai perekat, sementara pasta tersebut bersama agregat halus (pasir) menghasilkan mortar yang bertugas mengikat agregat kasar (batu pecah) sehingga menjadi satu bagian yang solid dan kompak.

1.2.2.1 Agregat

1.2.2.1.1 Agregat Kasar

Menurut *American Society for Testing And Materials* (ASTM), Agregat asar didefinisikan sebagai material granural yang memiliki ukuran butiran lebih besar dari 4,75 mm (atau lolos ayakan No. 4). Agregat kasar termasuk kerikil, batu pecah, dan material sejenis lainnya yang digunakan dalam campuran beton. ASTM C33 merupakan standar spesifikasi untuk agregat beton, menetapkan berbagai persyaratan untuk agregat kasar, termasuk karakteristik fisik, kimia, dan mekanik yang harus dipenuhi agar agregat tersebut dapat digunakan dalam campuran beton dan menghasilkan kualitas beton yang optimal. Beberapa persyaratan yang diatur dalam ASTM C33 mencakup antara lain:

1. Kekerasan dan ketahanan: Agregat kasar dipersyaratkan cukup keras dan tahan lama untuk menahan proses pengangkutan, pencampuran, dan pengerasan beton tanpa mengalami kerusakan signifikan. Pengujian seperti uji abrasi Los Angeles merupakan salah satu metode untuk mengukur ketahanan agregat kasar dari abrasi.
2. Kebersihan dan Bebas Kontaminasi: Agregat kasar harus bebas dari kotoran, bahan organik, dan partikel halus yang dapat mengganggu proses pengikatan dan pengerasan beton.
3. Distribusi Ukuran Butir: Agregat kasar dipersyaratkan memiliki distribusi ukuran butir yang sesuai dengan persyaratan gradasi yang dipersyaratkan. Ukuran gradasi agregat kasar diatur dalam ASTM C33 seperti yang disajikan dalam Tabel 2. Gradasi agregat yang tepat memastikan beton memiliki kepadatan yang baik dan memiliki sifat mekanik yang optimal.
4. Kandungan Zat Berbahaya: Agregat halus bebas dari bahan kimia berbahaya yang dapat menyebabkan reaksi merugikan yang menurunkan pengikatannya dengan semen atau pasir.

Tabel 1. Gradasi agregat kasar (ASTM C33)

Diameter Saringan		% Lolos Saringan		
		Ukuran Maks.	Ukuran Maks.	Ukuran Maks.
SNI	ASTM	10 mm	20 mm	40 mm
75,0	3 in	-	-	100 – 100
37,5	1 ½ in	-	100 – 100	95 – 100
19,0	¾ in	100 – 100	95 – 100	35 – 70
9,5	¾ in	50 – 85	30 – 60	10 – 40
4,75	No. 4	0 – 10	0 – 10	0 – 5

Sumber: ASTM C33

1.2.2.1.1 Agregat Halus

Menurut *American Society for Testing And Materials* (ASTM), agregat halus didefinisikan sebagai material granural yang lolos ayakan dengan ukuran 4,75 mm (No. 4 sieve) dan tertahan pada ayakan dengan ukuran 0,075 mm (No. 200 sieve). Agregat halus biasanya berupa pasir alami, pasir buatan, atau kombinasi keduanya. Agregat halus dalam campuran beton berfungsi membentuk mortar yang akan mengikat agregat kasar serta menjaid bahan pengisi untuk meningkatkan kekuatan beton. Persyaratan untuk agregat halus yang digunakan dalam campuran beton diatur dalam ASTM C33. Beberapa persyaratan untuk agregat halus tersebut antara lain:

1. Kebersihan dan bebas dari kontaminasi: Agregat halus harus bebas dari bahan orhanik, lumpur, dan partikel halus yang dapat mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton.
2. Gradasi ukuran Butir: Agregat halus dipersyaratkan memiliki distribusi ukuran butir yang sesuai dengan persyaratan gradasi yang ditetapkan dalam ASTM C33 seperti yang disajikan pada Tabel 3. Gradasi yang tepat memastikan beton memiliki kepadatan dan kohesi yang baik serta sifat mekanik yang optimal.
3. Kandungan Zat Berbahaya: Agregat halus harus bebas dari bahan kimia berbahaya yang dapat menyebabkan reaksi merugikan dengan semen atau mengurangi kekuatan dan daya tahan beton.
4. Kestabilan kimia dan fisik: Agregat halus dipersyaratkan harus memiliki kestabilan kimia dan fisik untuk memastikan tidak terjadi perubahan volume yang signifikan saat digunakan dalam campuran beton. Kestabilan kimia dan fisik: Agregat halus dipersyaratkan harus memiliki kestabilan kimia dan fisik untuk memastikan tidak terjadi perubahan volume yang signifikan saat digunakan dalam campuran beton.

Tabel 2. Gradasi agregat halus

Ukuran Saringan		SNI 03-2843-2000			ASTM C-33	
Ayakan		Pasir Kasar	Pasir Sedang	Pasir Agak Halus	Pasir Halus	<i>Fine Aggregate</i>
		Grad				
SNI (mm)	ASTM	Gradasi No. 1	Gradasi No. 2	Gradasi No. 3	asi No. 4	<i>Sieve Analysis</i>
9,6	3/8 in	100 - 100	100 - 100	100 -100	100 – 100	100 – 100
4,8	N0. 4	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100	95 – 100
2,4	N0. 8	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100	80 – 100
1,2	N0. 16	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100	50 – 85
0,6	N0. 30	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100	25 – 60
0,3	N0. 50	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50	5 – 30
0,15	N0. 100	0 – 10	0 - 10	0 – 10	0 - 15	5 – 10

Sumber: SNI 03-2834-2000 dan ASTM C33

1.2.2.2 Semen

Semen adalah material penyusun beton yang berfungsi sebagai perekat antara agregat kasar dan agregat halus. Apabila semen dicampur dengan air maka akan membentuk adukan yang disebut pasta semen, semen dicampur dengan agregat halus dan air, membentuk adukan yang disebut mortar, semen dicampur dengan agregat halus, agregat kasar dan air, maka akan membentuk campuran beton.

Menurut SNI 15-2049-2004, menjelaskan bahwa semen portland adalah semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland yang terdiri atas kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan tambahan lain. Semen portland bersifat hidrolis karena di dalamnya terkandung kalsium silikat dan kalsium sulfat yang bersifat hidrolis dan sangat cepat bereaksi dengan air. Reaksi semen dengan air berlangsung

secara irreversibel, artinya hanya dapat terjadi satu kali dan tidak bisa kembali lagi ke kondisi semula.

Menurut SNI 15-2049-2004 semen portland dibedakan menjadi 5 tipe yakni:

- 1) Tipe I yaitu semen Portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus,
- 2) Tipe II yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang,
- 3) Tipe III yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi,
- 4) Tipe IV yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah,
- 5) Tipe V yaitu semen Portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan 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. Secara umum, ada 4 senyawa kimia utama yang menyusun semen portland, yaitu:

1. Trikalsium Silikat ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) yang disingkat menjadi C3S.
2. Dikalsium Silikat ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) yang disingkat menjadi C2S.
3. Trikalsium Aluminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) yang disingkat menjadi C3A.
4. Tertrakalsium aluminoferrit ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) yang disingkat menjadi C4AF.

Senyawa tersebut menjadi kristal-kristal yang saling mengikat/mengunci ketika menjadi klinker. Komposisi C3S dan C2S adalah 70%-80% dari berat semen dan merupakan bagian yang paling dominan memberikan sifat semen (Cokrodimuljo, 1992). Semen dan air saling bereaksi. Persenyawaan ini dinamakan proses hidrasi, dan hasilnya dinamakan hidrasi semen. Senyawa C3S jika terkena air akan cepat bereaksi dan menghasilkan panas. Panas tersebut akan mempengaruhi kecepatan mengeras sebelum hari ke-14. Senyawa C2S lebih lambat bereaksi dengan air dan hanya berpengaruh terhadap semen setelah umur 7 hari. C2S memberikan ketahanan terhadap serangan kimia (chemical attack) dan mempengaruhi susut terhadap pengaruh panas akibat lingkungan.

1.2.2.3 Fly Ash

Fly ash digunakan dalam beton untuk peningkatan mutu dan ekonomis. Manfaat ekologis dan teknis. Penggunaan fly ash sebagai bahan pencampur mineral pozzolan menghasilkan perbaikan sifat beton, perbaikan pada sifat-sifatnya meliputi peningkatan kemampuan kerja, kekompakan, kemampuan pompa, kekuatan, dan daya tahan, serta penurunan kebutuhan air, permeabilitas, dan potensi korosi (Tarun., 1991)

Fly ash batubara mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O)

dan K₂O), sulfur trioksida (SO₃), pospor oksida (P₂O₅) dan karbon

Menurut Yogaswara (1998) Keuntungan menggunakan fly ash pada beton segar adalah sebagai berikut.

- 1) Memperbaiki sifat pengerjaan adukan beton (workability) akibat bentuk partikelnya yang bundar, mengurangi jumlah air campuran yang dibutuhkan. Menurut pendapat Hadi (2000) menyatakan bahwa abu terbang dapat menambah workability dan kualitas mortar dalam hal kekuatan dan kedap air.
- 2) Mengurangi jumlah panas hidrasi yang terjadi, sehingga baik untuk pembuatan beton massa karena dapat mengurangi terjadinya retak, dapat mengurangi kemungkinan terjadinya segregasi dan bleeding.
- 3) Pada beton keras keuntungan penggunaan fly ash adalah mempertinggi daya tahan terhadap lingkungan yang bersifat agresif, meningkatkan kerapatan beton, mengurangi penyusutan, mengurangi pengembangan yang disebabkan oleh reaksi alkali agregat.

Dalam SK SNI S-15-1990-F spesifikasi abu Terbang sebagai bahan tambahan untuk campuran beton disebutkan ada 3 jenis abu terbang, yaitu

- 1) Abu terbang kelas F, adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran batubara, jenis antrasit pada suhu 1560°C.
- 2) Abu terbang kelas N, adalah hasil kalsinasi dari pozolan alam seperti tanah diatomea, shale (serpih), tuft, dan batu apung.
- 3) Abu terbang kelas C adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran limit atau Batubara dengan kadar karbon ± 60 %. Abu terbang ini mempunyai sifat pozzolan dan sifat seperti semen dengan kadar kapur di atas 10 %.

1.2.2.4 Air

Air adalah salah satu bahan untuk campuran beton yang diperlukan untuk bereaksi dengan semen. Air diperlukan untuk memicu proses kimiawi semen, membasahi agregat dan memberikan kemudahan dalam pekerjaan beton. Air yang dipakai dalam campuran beton adalah air yang memenuhi persyaratan bahan bangunan, memenuhi syarat untuk bahan campuran beton. Air yang mengandung senyawa-senyawa berbahaya yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan-bahan kimia lainnya, bila dipakai dalam campuran beton akan menurunkan kualitas beton, bahkan dapat mengubah sifat-sifat beton yang dihasilkan.

1.2.3 Rancangan Campuran Beton

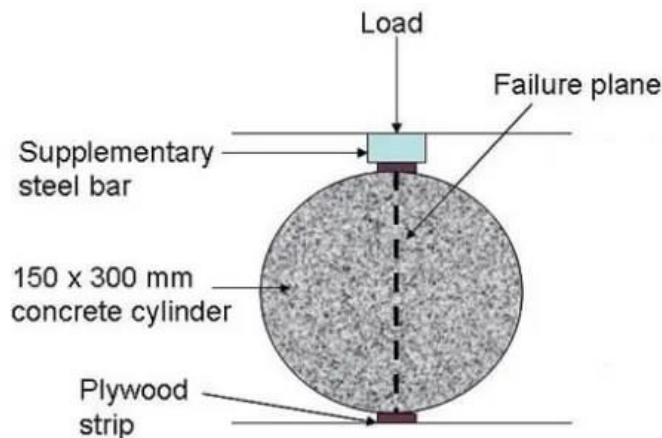
Rancangan campuran beton menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) pada dasarnya bertujuan untuk menghasilkan beton dengan mutu, durabilitas, dan kemudahan pengerjaan yang sesuai dengan persyaratan teknis. SNI 03-2834-2000 tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal menjadi acuan utama dalam menetapkan langkah-langkah perancangan campuran beton di Indonesia. Standar ini mengatur penentuan proporsi material berdasarkan kebutuhan kuat tekan rencana, nilai slump, ukuran maksimum agregat, serta kondisi ekspos lingkungan. Menurut SNI, rancangan campuran dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu penentuan kuat tekan beton yang ditargetkan, pemilihan rasio air- semen yang sesuai dengan mutu beton dan kondisi ekspos, penentuan kebutuhan air berdasarkan nilai slump dan ukuran agregat, serta perhitungan jumlah semen minimum untuk memenuhi rasio air-semen dan durabilitas. Selain itu, SNI menekankan pentingnya pemilihan agregat berkualitas sesuai ketentuan SNI 03-2461-2002 untuk agregat halus dan SNI 03-2835-2002 untuk agregat kasar, karena karakteristik agregat seperti gradasi, bentuk butiran, kebersihan, dan penyerapan air sangat memengaruhi kualitas beton.

Pada SNI 03-2834-2000 juga mengatur bahwa perancangan campuran harus mempertimbangkan faktor lingkungan seperti tingkat keagresifan kimia dan kondisi kelembaban, sehingga durabilitas beton dapat terjamin dalam jangka panjang. Standar ini juga memberikan pedoman mengenai kadar semen minimum dan rasio air-semen maksimum sesuai kategori eksposur untuk mencegah kerusakan akibat sulfat, karbonasi, maupun korosi tulangan. Selain itu, SNI mensyaratkan uji coba campuran di laboratorium untuk memverifikasi hasil perancangan, karena perhitungan awal hanya bersifat estimasi dan perlu disesuaikan dengan kondisi nyata material yang digunakan. Melalui tahapan uji coba ini, nilai slump, kuat tekan, dan workability dapat dievaluasi dan dioptimalkan sebelum beton diproduksi dalam skala besar.

1.2.4 Kuat Tarik Belah

Menurut SNI 03-2491-2002 (yang mengadopsi ASTM C496-96), kuat tarik belah beton adalah nilai kuat tarik tidak langsung dari benda uji beton berbentuk silinder yang diperoleh dari hasil pembebanan benda uji yang diletakkan sejajar dengan sumbu mendatarnya di antara dua plat penekan. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan beban tekan secara merata pada seluruh permukaan benda uji sepanjang garis longitudinal. Akibat pembebanan tersebut, benda uji akan mengalami tegangan tarik yang relatif seragam pada bidang vertikal yang melalui sumbu benda uji hingga akhirnya benda uji mengalami keruntuhan (terbelah). Uji kuat tarik belah menjadi penting karena beton pada dasarnya merupakan material yang kuat terhadap tekan tetapi lemah terhadap tarik, sehingga parameter ini digunakan dalam desain struktur beton untuk mengevaluasi ketahanan geser dari komponen struktur serta menentukan panjang penyaluran tulangan.

Menurut SNI 03-2491-2002 (ASTM C496-96), pengujian kuat tarik belah beton dilakukan dengan metode pembebanan tekan pada benda uji silinder sepanjang garis longitudinal. Parameter yang digunakan meliputi beban maksimum (P), diameter benda uji (D), dan panjang benda uji (L) dengan ketentuan benda uji, perletakan, dan pembebanan sebagai berikut:



Gambar 1. Pengujian Kuat Tarik Belah

Dengan keterangan:

- **P** = Beban tekan maksimum yang terbaca pada mesin uji (N atau kN)
- **D** = Diameter benda uji silinder (mm)
- **L** = Panjang/tinggi benda uji silinder (mm)

Dalam pengujian kuat tarik belah, benda uji silinder diletakkan dalam posisi horizontal (memanjang) di antara dua plat baja keras. Beban tekan diberikan secara merata sepanjang garis kontak hingga benda uji mengalami keruntuhan tarik pada bidang vertikalnya. Kuat tarik belah beton dihitung berdasarkan rumus teoritis dari teori elastisitas yang diturunkan dari distribusi tegangan pada silinder yang dibebani tekan sepanjang garis longitudinal .

Rumus yang digunakan untuk menghitung kuat tarik belah adalah sebagai berikut:

$$T = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot D}$$

Atau dapat dituliskan sebagai:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi LD}$$

di mana:

- **f_{ct}** atau **T** = Kuat tarik belah beton (MPa)
- **P** = Beban maksimum yang ditunjukkan oleh mesin uji (N)
- **L** = Panjang benda uji (mm)
- **D** = Diameter benda uji (mm)
- **π** = 3,14 (bilangan pi)

Rumus ini didasarkan pada prinsip bahwa tegangan tarik maksimum yang terjadi pada bidang vertikal melalui sumbu silinder sebanding dengan beban tekan yang diberikan dan berbanding terbalik dengan luas bidang kontak ($L \times D$) .

Hasil penelitian Takapente dkk (2018) menunjukkan bahwa kuat tarik belah beton geopolimer berbasis abu vulkanik yang diuji pada umur 28 hari mencapai nilai rata-rata 1,795 MPa. Penelitian tersebut menegaskan bahwa faktor umur perawatan (curing) dan suhu perawatan sangat mempengaruhi ikatan mikrostruktur pasta

pengikat sehingga kemampuan menahan beban tarik belah meningkat . Selain itu, studi lain dalam *Frattura ed Integrità Strutturale* menyebutkan bahwa kuat tarik belah beton berkorelasi langsung dengan kepadatan internal serta distribusi pori yang terbentuk selama proses hidrasi. Beton dengan porositas rendah cenderung memiliki nilai kuat tarik belah yang lebih tinggi karena mampu menahan inisiasi retak sebelum terjadi keruntuhan . Temuan ini sejalan dengan prinsip dasar uji kuat tarik belah yang menekankan bahwa parameter struktural internal beton memiliki peran penting terhadap ketahanan terhadap beban tarik tidak langsung.

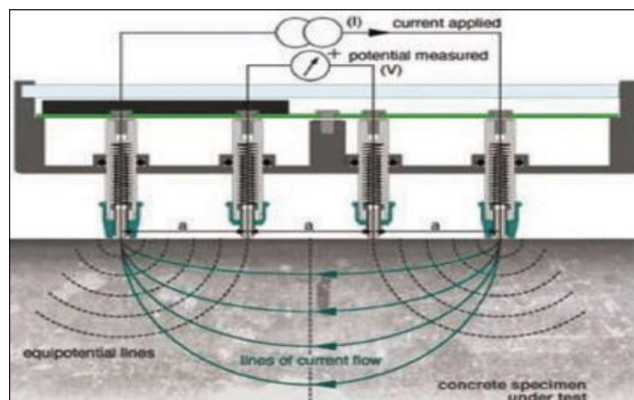
Dalam penelitian ini, digunakan benda uji silinder beton berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian kuat tarik belah mengikuti prinsip dasar dalam SNI 03-2491-2002 (ASTM C496-96) dengan metode pembebanan tekan sepanjang garis longitudinal. Perhitungan kuat tarik belah tetap sah selama parameter utama (P , L , dan D) dipenuhi. Secara teoritis, beton normal tanpa bahan tambah umumnya menunjukkan nilai kuat tarik belah sekitar 8–14% dari kuat tekannya, namun pengujian akurat sangat diperlukan untuk memastikan akurasi, khususnya pada desain struktural yang menuntut ketahanan terhadap beban geser dan tarik.

1.2.5 Resistivity Test

Menurut AASHTO T 358-19 (*Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*), resistivitas listrik beton adalah kemampuan beton untuk menahan aliran arus listrik yang melaluinya, yang memberikan indikasi cepat terhadap ketahanan beton terhadap penetrasi ion klorida. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur potensial listrik pada permukaan beton menggunakan konfigurasi empat elektroda (Wenner probe). Arus listrik bolak-balik (AC) dialirkan melalui dua elektroda luar, sementara dua elektroda dalam mengukur beda potensial yang terjadi. Nilai resistivitas kemudian dihitung berdasarkan hukum Ohm dan faktor geometri dari konfigurasi elektroda yang digunakan.

Resistivitas listrik menjadi parameter penting dalam evaluasi durabilitas beton karena berkorelasi langsung dengan sifat transportasi beton, seperti permeabilitas, difusivitas, dan kapilaritas. Beton dengan resistivitas tinggi menunjukkan struktur pori yang lebih rapat sehingga lebih tahan terhadap penetrasi zat agresif yang dapat menyebabkan korosi tulangan. Pengujian ini termasuk metode *non-destructive testing* (NDT) yang cepat, ekonomis, dan tidak merusak benda uji, sehingga memungkinkan pengujian berulang pada spesimen yang sama.

Menurut AASHTO T 358-19, pengujian resistivitas permukaan beton dilakukan dengan metode Wenner *four-probe* pada benda uji silinder dalam kondisi jenuh air. Parameter yang digunakan meliputi arus listrik (I), beda potensial (V), jarak antar elektroda (a), dan diameter benda uji dengan ketentuan sebagai berikut:



Gambar 2. Pengujian Resistivity

Dengan keterangan:

- ρ = Resistivitas permukaan beton ($k\Omega \cdot cm$)
- V = Beda potensial yang terukur pada elektroda dalam (volt)
- I = Arus listrik yang dialirkan pada elektroda luar (ampere)
- a = Jarak antar elektroda (cm), umumnya digunakan jarak 1,5 inci
- k = Faktor koreksi geometri yang bergantung pada dimensi benda uji

Dalam pengujian resistivitas permukaan, benda uji silinder diletakkan dengan posisi sumbu memanjang horizontal. Empat elektroda probe diletakkan pada permukaan benda uji dengan jarak yang sama. Pengukuran dilakukan pada empat posisi keliling (0° , 90° , 180° , dan 270°) untuk mendapatkan nilai rata-rata yang mewakili kondisi beton secara keseluruhan.

Rumus yang digunakan untuk menghitung resistivitas permukaan adalah sebagai berikut:

$$\rho = \frac{2\pi aV}{I}$$

di mana:

- ρ = Resistivitas permukaan beton ($\Omega \cdot \text{cm}$ atau $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$)
- a = Jarak antar elektroda (cm)
- V = Beda potensial yang terukur (volt)
- I = Arus listrik yang dialirkan (ampere)
- π = 3,14 (bilangan pi)

Untuk benda uji silinder dengan diameter terbatas, diperlukan faktor koreksi karena efek geometri. AASHTO T 358 memberikan panduan koreksi berdasarkan rasio diameter benda uji terhadap jarak antar elektroda .

Klasifikasi mutu beton berdasarkan nilai resistivitas permukaan sesuai AASHTO T 358 adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Klasifikasi Penetrasi Ion Klorida Berdasarkan Nilai Resistivitas Permukaan

Kelas Penetrasi Ion Klorida	Resistivitas Permukaan ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$)	Resistivitas Permukaan ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$)
	Silinder 4×8 inci	Silinder 6×12 inci
Tinggi (High)	< 12	< 9,5
Sedang (Moderate)	12 – 21	9,5 – 16,5
Rendah (Low)	21 – 37	16,5 – 29
Sangat Rendah (Very Low)	37 – 254	29 – 199
Dapat Diabaikan (Negligible)	> 254	> 199

Sumber: AASHTO T 358-19, Giatec Scientific (2020)

Hasil penelitian Obla dan Lobo (2021) menunjukkan bahwa resistivitas beton sangat dipengaruhi oleh faktor umur perawatan (*curing*), derajat kejenuhan, dan komposisi material penyusunnya. Beton dengan perawatan yang baik cenderung memiliki nilai resistivitas lebih tinggi karena proses hidrasi yang lebih sempurna menghasilkan struktur pori yang lebih rapat . Studi lain dalam ACI Materials Journal menyebutkan bahwa terdapat korelasi yang baik antara hasil uji resistivitas dengan uji permeabilitas air, meskipun korelasi dengan volume pori permeabel menunjukkan hasil yang kurang konsisten .

Penelitian Almarshoud dkk (2021) menegaskan bahwa penggunaan material

semen tambahan (*supplementary cementitious materials/SCM*) seperti abu terbang (*fly ash*), terak slag, dan silika fume dapat meningkatkan nilai resistivitas beton secara signifikan. Hal ini disebabkan oleh perbaikan mikrostruktur dan pengurangan porositas akibat reaksi pozzolanik yang menghasilkan produk hidrasi sekunder. Temuan ini sejalan dengan prinsip dasar bahwa parameter struktural internal beton memiliki peran penting terhadap ketahanan terhadap penetrasi ion klorida yang menjadi penyebab utama korosi tulangan.

Dalam penelitian ini, digunakan benda uji silinder beton berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Pengujian resistivitas listrik mengikuti prinsip dasar dalam AASHTO T 358-19 dengan metode Wenner *four-probe* pada empat posisi pengukuran. Perhitungan nilai resistivitas dilakukan dengan mempertimbangkan faktor koreksi geometri sesuai standar. Beton dengan substitusi abu terbang diharapkan menunjukkan peningkatan nilai resistivitas seiring dengan meningkatnya persentase substitusi akibat perbaikan mikrostruktur dan berkurangnya porositas, yang berkorelasi dengan peningkatan durabilitas beton terhadap serangan klorida.

1.3 Penelitian terdahulu

Budi, Purwanto, dan Aji (2021) melakukan kajian tentang kuat tarik langsung dan kuat tarik belah beton dengan memanfaatkan abu terbang (**fly ash**) sebagai pengganti sebagian semen dengan kadar 15%, 30%, dan 40%. Benda uji yang digunakan berupa silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk pengujian tarik belah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kuat tarik belah pada variasi abu terbang 15% mencapai 79,47% dari kuat tarik belah beton normal. Sementara itu, pada variasi 30% dan 40%, nilai kuat tarik belah justru mengalami peningkatan dibandingkan beton normal, mengindikasikan bahwa penggunaan abu terbang dalam proporsi tertentu mampu meningkatkan performa tarik belah beton.

Seo dan Kim (2025) meneliti dampak sinergis antara udara terperangkap (**entrained air**) dan abu terbang terhadap ketahanan penetrasi klorida pada beton perkerasan menggunakan pendekatan model resistivitas listrik. Penelitian ini menggunakan sampel beton dengan variasi kadar udara terperangkap (0–10%) serta abu terbang kelas C dan F. Pengujian resistivitas permukaan dilakukan selama tiga tahun dalam kondisi perendaman larutan garam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran dengan abu terbang kelas C mengalami peningkatan resistivitas 1,5 kali lebih besar dibandingkan dengan abu terbang kelas F. Faktor reaksi pada spesimen dengan udara terperangkap 3,5% menunjukkan nilai 67% lebih tinggi dibandingkan dengan kadar 10,0%, sementara penggunaan abu terbang kelas F dan C menurunkan faktor reaksi masing-masing sebesar 57% dan 41% pada seluruh konsentrasi klorida.

Kurda, de Brito, dan Silvestre (2019) melakukan kajian literatur dan eksperimental tentang pengaruh penggunaan abu terbang kadar tinggi dan agregat beton daur ulang (**recycled concrete aggregates*/RCA*) terhadap sistem pori beton yang berpengaruh signifikan terhadap durabilitas. Pengujian yang dilakukan meliputi resistivitas listrik dan absorpsi air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa absorpsi air meningkat dan resistivitas listrik menurun seiring dengan peningkatan kadar RCA. Sebaliknya, penambahan abu terbang memberikan efek sebaliknya pada kedua pengujian tersebut. Kombinasi RCA dan abu terbang menghasilkan persentase penurunan absorpsi air yang lebih tinggi dibandingkan penjumlahan penurunan pada campuran dengan hanya RCA atau abu terbang saja, sehingga produksi beton dengan kedua material non-tradisional tersebut sangat disarankan dalam hal absorpsi air dan resistivitas listrik.

Liu dkk (2025) meneliti pengaruh modifikasi *carbon nanotubes* (CNT) terhadap sifat tarik belah beton busa (*foamed concrete*) berbahan pengikat semen dan abu terbang. Pengujian tarik belah menggunakan metode *Brazilian* dengan benda uji berbentuk silinder diameter 5 cm dan tinggi 10 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kadar CNT optimum 0,05%, kekuatan puncak dan regangan ultimit beton busa termodifikasi meningkat rata-rata sebesar 67,2% dan 21,7%. Selain itu, beton busa yang dimodifikasi dengan CNT cenderung tidak mudah mengalami konsentrasi regangan sebelum mencapai kekuatan puncak. Struktur penahan beban segitiga stabil yang terbentuk setelah belah menyebabkan kurva tegangan-regangan mengalami *"backlash"* dengan berbagai tingkatan .

Gencel dkk (2022) mengkaji pengaruh komposisi agregat dan bahan pengikat terhadap mikrostruktur dan kinerja beton geopolimer berbasis abu terbang. Penelitian ini mengevaluasi efek proporsi campuran (kadar pasta pengikat dan rasio agregat kasar terhadap agregat halus) terhadap workabilitas, kuat tekan, dan kuat tarik belah beton. Analisis mikrostruktur dilakukan menggunakan *scanning electron microscopy* dan *energy-dispersive X-ray spectroscopy*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tarik belah mencapai 7% dari kuat tekan beton geopolimer. Kekuatan tinggi ini disebabkan oleh pembentukan gel natrium aluminosilikat dan zona transisi antar muka (*interfacial transition zone*/ITZ) yang lebih padat di sekitar agregat. ITZ yang padat berkontribusi pada peningkatan ikatan antara agregat dan pasta alkali-aktif, yang mengakibatkan keruntuhan agregat .

Balestra dkk (2023) mengevaluasi kinerja beton LC3 (*Limestone Calcined Clay Cements*) yang menggabungkan berbagai material semen tambahan (*supplementary cementitious materials*/SCM) termasuk abu terbang, silika fume, abu ampas tebu, dan abu batu acai. Parameter yang diuji meliputi resistivitas listrik volumetrik dan karbonasi dipercepat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan SCM dalam beton LC3 meningkatkan resistivitas terhadap aliran ion, kemungkinan disebabkan oleh pemurnian mikrostruktur beton. Sementara itu, untuk karbonasi, semua beton dengan LC3 menunjukkan bidang karbonasi yang lebih tinggi dibandingkan beton referensi karena ketersediaan portlandit yang rendah untuk bereaksi dengan CO₂ yang menembus pori-pori beton .

Costa dkk (2025) melakukan analisis pengujian migrasi klorida, resistivitas listrik, dan penetrasi air pada beton alkali-aktif berbasis abu terbang dan terak baja (*steel slag*). Penelitian ini bertujuan untuk memverifikasi kesesuaian pengujian karakterisasi durabilitas yang umum diterapkan pada beton konvensional terhadap beton alkali-aktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun beton alkali-aktif menunjukkan permeabilitas rendah, konduktivitasnya yang tinggi mengakibatkan arus listrik yang tinggi selama pengujian migrasi klorida, berpotensi menyebabkan estimasi migrasi klorida berlebihan. Kromatografi ion menunjukkan migrasi klorida aktual yang lebih rendah, mengindikasikan bahwa arus listrik tidak hanya terkait dengan migrasi klorida .

Bentz dkk (2018) dalam publikasi NIST meneliti pengaruh abu terbang terhadap resistivitas listrik beton sebagai indikator potensial penetrasi ion klorida. Penelitian ini menggunakan variasi kadar abu terbang dan faktor air-semen yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar abu terbang secara signifikan meningkatkan resistivitas listrik beton pada umur 28 hari dan seterusnya, terutama disebabkan oleh perbaikan mikrostruktur dan pengurangan porositas akibat reaksi pozzolanik. Korelasi yang baik ditemukan antara resistivitas listrik dan koefisien difusi klorida, memperkuat penggunaan resistivitas sebagai indikator durabilitas beton.

Ghosh dan Tran (2020) mengkaji hubungan antara kuat tarik belah dan

resistivitas listrik pada beton mutu tinggi yang mengandung abu terbang dan terak. Benda uji berupa silinder berukuran 100×200 mm diuji pada umur 7, 28, dan 91 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat korelasi eksponensial antara kuat tarik belah dan resistivitas listrik, dengan koefisien determinasi (R^2) di atas 0,85. Penelitian ini menegaskan bahwa pengujian resistivitas listrik tidak hanya berguna untuk evaluasi durabilitas tetapi juga dapat memberikan estimasi tidak langsung terhadap sifat mekanik beton khususnya kuat tarik belah.

Referensi (Penulis, Tahun)	Material Pengikat	Parameter yang Diuji	Hasil Penelitian
Budi, Purwanto & Aji, 2021 (Jurnal Matriks Teknik Sipil)	Semen + FA (15%, 30%, 40%)	Kuat tarik belah	Silinder $\varnothing 15 \times 30$ cm; FA 30% dan 40% meningkatkan tarik belah dibanding beton normal; FA 15% mencapai 79,47% dari beton normal
Seo & Kim, 2025 (Materials, MDPI)	Semen + FA kelas C dan F + <i>entrained air</i> (0–10%)	Resistivitas listrik	FA kelas C meningkatkan resistivitas 1,5× lebih besar dibanding FA kelas F; udara terperangkap 3,5% memberikan faktor reaksi 67% lebih tinggi dari 10,0%
Kurda, de Brito & Silvestre, 2019 (Construction & Building Materials)	Semen + FA kadar tinggi + RCA	Resistivitas listrik & absorpsi air	FA meningkatkan resistivitas; RCA menurunkan resistivitas; kombinasi FA + RCA direkomendasikan untuk perbaikan durabilitas
Liu dkk, 2025 (Case Studies in Construction Materials)	Semen + FA + CNT (<i>carbon nanotubes</i>)	Kuat tarik belah	Silinder $\varnothing 5 \times 10$ cm; CNT 0,05% meningkatkan kekuatan puncak 67,2% dan regangan ultimit 21,7%; struktur penahan beban segitiga stabil terbentuk pasca belah
Gencil dkk, 2022 (Journal of Building Engineering)	Geopolimer berbasis FA	Kuat tarik belah & mikrostruktur	Kuat tarik belah mencapai 7% dari kuat tekan; ITZ padat akibat gel aluminosilikat menyebabkan keruntuhan agregat
Balestra dkk, 2023 (Journal of Building Engineering)	LC3 (semen + FA + SCM lain)	Resistivitas listrik & karbonasi	SCM meningkatkan resistivitas akibat pemurnian mikrostruktur; bidang karbonasi lebih tinggi karena portlandit rendah
Costa dkk, 2025 (Cement and Concrete Composites)	Alkali-aktif (FA + <i>steel slag</i>)	Resistivitas listrik, migrasi klorida, penetrasi air	Beton alkali-aktif permeabilitas rendah tetapi konduktivitas tinggi; arus listrik tinggi menyebabkan estimasi migrasi klorida berlebihan
Bentz dkk, 2018 (NIST Technical Note)	Semen + FA variasi kadar	Resistivitas listrik	Peningkatan kadar FA signifikan meningkatkan resistivitas umur 28 hari ke atas; korelasi baik antara resistivitas dan koefisien difusi klorida
Ghosh & Tran, 2020 (Journal of Sustainable Cement-Based Materials)	Semen + FA + <i>slag</i> mutu tinggi	Kuat tarik belah & resistivitas listrik	Silinder 100×200 mm; korelasi eksponensial antara tarik belah dan resistivitas ($R^2 > 0,85$); resistivitas dapat mengestimasi sifat mekanik

1.4 Desain konseptual

Desain konseptual penelitian ini berfokus pada evaluasi sifat mekanik dan sifat durabilitas beton melalui pengujian **kuat tarik belah** serta **resistivitas beton**. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kemampuan beton dalam menahan gaya tarik tidak langsung serta ketahanannya terhadap proses degradasi yang berkaitan dengan penetrasi ion dan kelembapan di dalam struktur beton.

Pengujian **kuat tarik belah (split tensile strength)** dipilih sebagai salah satu parameter utama untuk mengevaluasi kapasitas beton dalam menahan tegangan tarik tidak langsung. Beton pada umumnya memiliki kekuatan tarik yang jauh lebih rendah dibandingkan kekuatan tekan, sehingga pengujian ini penting untuk mengetahui potensi terjadinya retak awal yang dapat mempengaruhi kinerja struktural. Melalui pengujian ini, akan dianalisis kemampuan beton dalam mendistribusikan tegangan tarik serta hubungannya dengan kualitas ikatan antara pasta semen dan agregat.

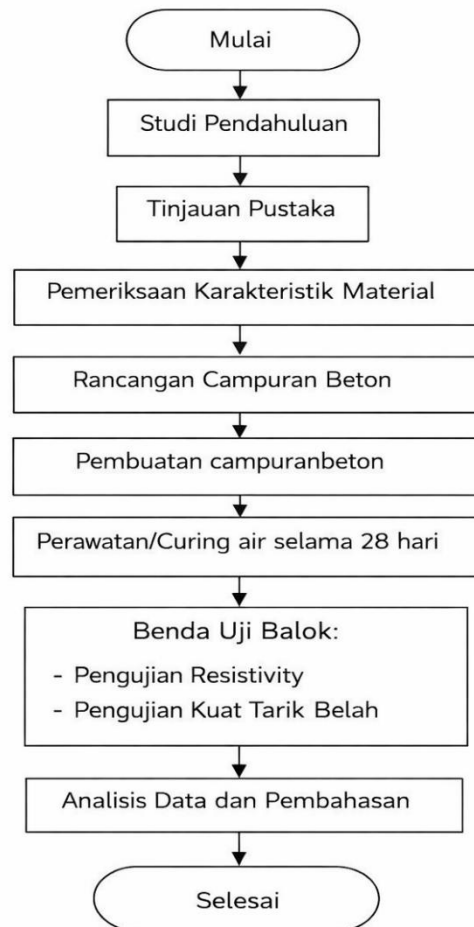
Selain itu, penelitian ini juga menggunakan **pengujian resistivitas beton** untuk mengevaluasi karakteristik durabilitas beton, khususnya yang berkaitan dengan kemampuan beton dalam menghambat pergerakan ion di dalam pori-porinya. Nilai resistivitas yang lebih tinggi umumnya menunjukkan struktur pori yang lebih rapat serta potensi ketahanan yang lebih baik terhadap proses korosi tulangan akibat penetrasi ion klorida atau zat agresif lainnya. Dengan demikian, pengujian resistivitas dapat memberikan gambaran mengenai kualitas mikrostruktur beton serta tingkat permeabilitasnya.

Kedua metode pengujian tersebut digunakan secara komplementer untuk memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai performa beton. Pengujian kuat tarik belah merepresentasikan aspek **mekanik beton**, sedangkan pengujian resistivitas memberikan gambaran mengenai **aspek durabilitas dan karakteristik transport ion** dalam beton. Kombinasi kedua parameter ini diharapkan mampu memberikan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap kualitas beton yang dihasilkan.

Secara konseptual, penelitian ini bertujuan untuk menghubungkan antara sifat mekanik beton dengan karakteristik durabilitasnya melalui analisis hubungan antara nilai kuat tarik belah dan resistivitas beton. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pemahaman mengenai kinerja beton baik dari segi kekuatan maupun ketahanan terhadap lingkungan agresif, sehingga dapat menjadi dasar dalam pengembangan material beton yang lebih kuat, tahan lama, dan sesuai dengan kebutuhan konstruksi modern.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3. Bagan alir penelitian

2.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Waktu penelitian dilaksanakan selama 3 bulan dengan pengujian sampel beton pada usia 28 hari.

2.3 Data Penelitian

Penelitian menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh langsung dari pengujian eksperimental di laboratorium. Sedangkan data sekunder didapatkan dari studi literatur dan hasil penelitian yang sudah ada, baik yang dilakukan di laboratorium maupun dilakukan di tempat lain yang berkaitan dengan penelitian beton berabasis abu terbang.

2.4 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. *Universal Testing Machine* (Tokyo Testing Machine Inc.) kapasitas 1000 kN yang dapat diatur pada kapasitas 500 kN pada pengujian kuat lentur.
2. *Load Cell* kapasitas 500 kN untuk mengukur pembacaan beban maksimum.
3. *High Speed Data Logger THS-1100* dan satu set komputer yang berfungsi untuk memonitor, mencatat, dan menyimpan data beban.
4. Timbangan, untuk menghitung berat sampel
5. Kain/Towel untuk mengelap Permukaan (SSD)
6. Resipod Geometric Resistivity untuk menukuran Resistivitas pada Sampel



1



2



3



4



5



6

Gambar 4. Alat yang digunakan

Sedangkan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Abu terbang (*Fly ash*)
2. Agregat Halus
3. Semen campuran, Semen Portland Komposit.
4. Agregat Kasar ukuran 10-20 mm
5. Air yang digunakan adalah air bersih.



Semen



Abu Terbang



Agregat Halus



Agregat Kasar



Air

Gambar 5. Bahan/material campuran beton berbasis abu terbang

2.5 Pemeriksaan Karakteristik Material

2.5.1 Agregat Kasar

Tabel 5. Karakteristik Material Agregat Kasar

Karakteristik Agregat	Hasil Pemeriksaan	Satuan	Spesifikasi	Standar
Modulus Kehalusan	-	-	5,5 – 8,5	SNI ASTM C136:2012
Berat Jenis Semu	2,75	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Berat Jenis Curah	2,64	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Berat Jenis SSD	2,68	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Penyerapan Air	2,54	%	Maks. 4%	SNI 1970:2016
Berat Volume Lepas	1,30	Kg/lit	1,4 – 1,9	SNI 03-4804-1998
Berat Volume Padat	1,52	Kg/lit	1,4 – 1,9	SNI 03-4804-1998
Kadar Air	2,43	%	0,5 – 2,0	SNI 1971:2011
Kadar Lumpur	1,89	%	0,2 – 1,0	SNI ASTM C177:2012
Keausan Agregat	31,1	%	Maks. 40%	SNI 2417:2008

2.5.2 Agregat Halus

Tabel 6. Karakteristik Material Agregat Halus

Karakteristik Agregat	Hasil Pemeriksaan	Satuan	Spesifikasi	Standar
Modulus Kehalusan	2,80	-	2,2 – 3,1	SNI ASTM C136:2012
Berat Jenis Semu	2,71	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Berat Jenis Curah	2,59	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Berat Jenis SSD	2,65	-	1,6 – 3,2	SNI 1970:2016
Penyerapan Air	1,88	%	Maks. 2%	SNI 1970:2016
Berat Volume Lepas	1,62	Kg/lit	1,4 – 1,9	SNI 03-4804-1998
Berat Volume Padat	1,60	Kg/lit	1,4 – 1,9	SNI 03-4804-1998
Kadar Air	7,83	%	3,0 – 5,0	SNI 1971:2011
Kadar Lumpur	3,82	%	0,2 – 6,0	SNI ASTM C177:2012
Kadar Organik	No.2	%	< No.3	SNI 2816:2014

2.5.3 Abu Terbang (FA)

Tabel 7. Karakteristik Material Abu Terbang

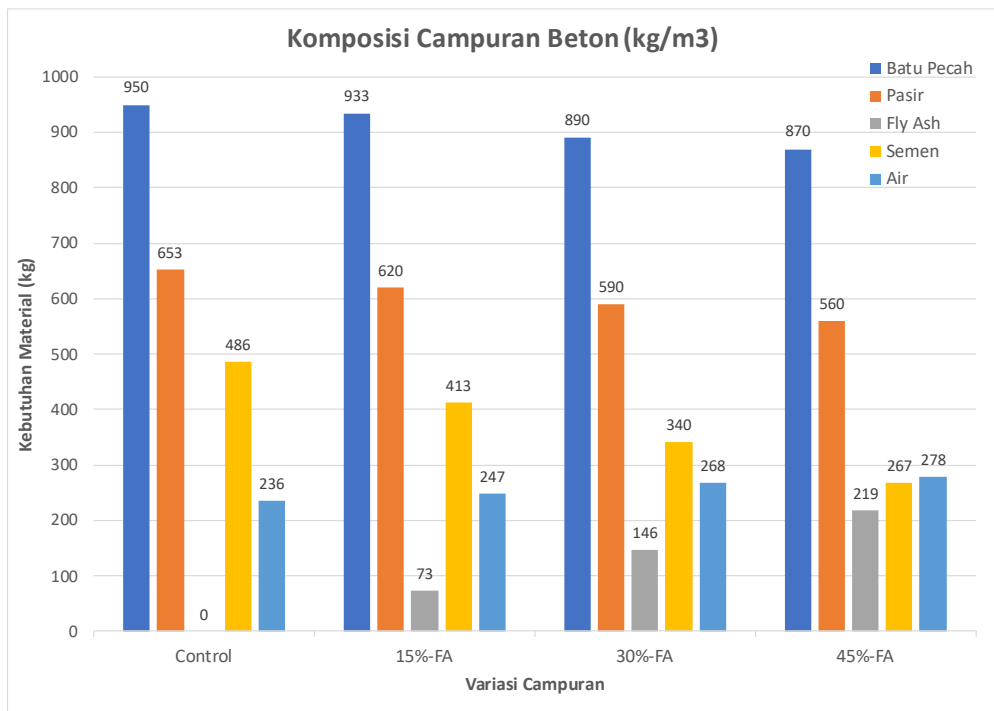
Jenis Pemeriksaan	Hasil Pemeriksaan	Satuan	Spesifikasi	Standar
Specific Gravity (SSD)	2,61	g/cm ³	2,1 – 3,0	SNI ASTM 2531:2015

2.6 Komposisi Bahan dan Campuran

Hasil *trial mix* untuk komposisi campuran beton dengan tambahan abu terbang sebagai pengganti semen PCC dapat dilihat pada tabel 9 Pada komposisi campuran dilakukan kombinasi campuran dengan penambahan fly ash sebesar 15%, 30% dan 45% sebagai pengganti semen.

Tabel 8. Komposisi campuran beton (kg/m³)

Mix	Air			Semen	Fly Ash	Pasir	Batu Pecah	Volume
	Awal	Tambahan	Total					
Control	0.236	0	0.236	0.154	0	0.251	0.35849	1.000
15%-FA	0.236	0.011	0.247	0.131	0.031	0.238	0.35208	1.000
30%-FA	0.236	0.032	0.268	0.108	0.062	0.227	0.33585	1.000
45%-FA	0.236	0.042	0.278	0.085	0.093	0.215	0.3283	1.000



Gambar 6. Grafik komposisi campuran beton (kg/m³)

2.7 Prosedur Eksperimental

Secara garis besar, prosedur eksperimental beton berbasis abu terbang terdiri dari pekerjaan persiapan, pembuatan benda uji, perawatan dan pengujian, analisa hasil pengujian, analisa keberlanjutan lingkungan, dan kesimpulan.

2.7.1 Metode Pembuatan Benda Uji Beton

Pembuatan dan pengujian ini dirancang untuk mengetahui hubungan beban tarik dengan waktu pada beton yang terbuat dari abu terang dengan cetakan balok dan silinder. Jumlah benda uji silinder yang diproduksi sebanyak 12 unit. Variasi serta jumlah masing-masing benda uji berdasarkan persentase substitusi abu terbang dapat dilihat pada Tabel 8. Adapun tahapan pembuatan benda uji dilakukan sebagai berikut:

1. Persiapan Material

- Menyiapkan bahan campuran beton dalam wadah terpisah dengan kondisi agregat SSD.
- Menimbang agregat kasar, agregat halus, semen, abu terbang, dan air sesuai berat yang tercantum dalam rancangan campuran.
- Mempersiapkan cetakan atau bekisting silinder, mengencangkan sekrup, serta mengolesi bagian dalam cetakan dengan pelumas.

2. Persiapan Material

- a. Memasukkan agregat kasar, semen, abu terbang, dan agregat halus secara berurutan ke dalam mesin portable concrete mixer.
- b. Menghidupkan mesin untuk memulai proses pencampuran.
- c. Membiarkan bahan dalam mixer tercampur hingga homogen selama 30 detik.
- d. Menambahkan air secara bertahap sambil memperhatikan tingkat workability beton.
- e. Setelah 2 menit, mesin dimatikan dan campuran diaduk manual untuk memastikan tidak ada material yang tertinggal atau tidak tercampur merata.
- f. Menyalakan kembali mixer, menambahkan air tambahan, dan melanjutkan pengadukan selama 1 menit.
- g. Setelah campuran beton homogen, mesin dimatikan dan dilakukan pemeriksaan awal campuran.



Gambar 7. Tahap Mixing Material

3. Pengujian Slump

- a. Membasahi kerucut terpancung dan pelat slump.
- b. Menempatkan kerucut terpancung di atas pelat slump.
- c. Mengisi beton segar ke dalam kerucut dalam tiga lapisan, setiap lapisan dipadatkan dengan 25 tusukan.
- d. Meratakan permukaan beton setelah kerucut penuh dan mengangkat cetakan secara perlahan.
- e. Mengukur nilai slump menggunakan rol meter atau mistar baja.



Gambar 8. Tahap Slump Test Mix

4. Pemadatan Benda Uji

- a. Menuangkan beton segar ke dalam cetakan yang telah diberi pelumas.
- b. Memadatkan campuran menggunakan mesin vibrator atau alat penggetar.

Tabel 9. Jumlah benda uji

Jenis Variasi	Waktu Pengujian	Dimensi benda uji	Jenis pengujian	Jumlah benda uji
Control		30 cm x 10 cm x 10 cm	Kuat Tarik Belah, Resistivity	3
15% FA	28 Hari	30 cm x 10 cm x 10 cm	Kuat Tarik Belah, Resistivity	3
30% FA		30 cm x 10 cm x 10 cm	Kuat Tarik Belah, Resistivity	3
45% FA		30 cm x 10 cm x 10 cm	Kuat Tarik Belah, Resistivity	3
Jumlah				12

2.7.2 Metode Perawatan (Curing) Benda Uji

Perawatan (curing) dilakukan dengan merendam benda uji ke dalam bak berisi air untuk memastikan proses pengikatan campuran beton berlangsung secara optimal. Proses perendaman ini dilakukan sesuai umur rencana pengujian beton, yaitu pada usia 28 hari.

2.7.3 Pengujian Resistivity

Pengujian resistivitas listrik pada beton dapat dilaksanakan dengan dua metode utama, yaitu pengujian resistivitas permukaan (*surface resistivity*) yang mengacu pada AASHTO T 358-21, atau pengujian resistivitas volume (*bulk electrical resistivity*) yang mengacu pada ASTM C1876-24. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengukur kemampuan beton dalam menahan aliran arus listrik, yang memberikan indikasi cepat terhadap ketahanan beton terhadap penetrasi ion klorida serta mengevaluasi durabilitas beton secara non-destruktif. Prosedur pengujian resistivitas volume berdasarkan ASTM C1876 adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan peralatan pengujian resistivitas, meliputi perangkat uji konduktivitas, elektroda plat baja tahan karat, kabel penghubung, spons, larutan simulated pore (larutan Ca(OH)_2 jenuh dengan NaOH dan KOH), serta kaliper untuk mengukur dimensi benda uji.
2. Menyiapkan benda uji silinder sesuai dengan ASTM C192 atau C31 untuk benda uji cetak, atau ASTM C42 untuk benda uji inti (*core*). Potong kedua ujung benda uji agar rata dan sejajar menggunakan gergaji berlian.
3. Mengukur dimensi benda uji menggunakan kaliper. Ukur diameter penampang pada kedua ujung benda uji dalam satuan meter dengan ketelitian 0,001 m, lakukan pada empat posisi berbeda dengan sudut 90° .
4. Merendam benda uji dalam larutan simulated pore solution selama minimal 6 hari (atau sejak saat pembongkaran cetakan untuk benda uji cetak) dalam wadah 18L atau 20L, pastikan larutan cukup untuk menutupi benda uji setinggi 35-40 mm di atas permukaan. Jaga suhu larutan pada $23,0^\circ\text{C} \pm 2,0^\circ\text{C}$ menggunakan sensor suhu.
5. Mengeluarkan benda uji dari wadah perendaman, membilasnya dengan air keran mengalir sambil memutar benda uji untuk membersihkan sisa larutan. Keringkan permukaan dengan kain dan segera pindahkan ke tempat uji. Benda uji tidak boleh dibiarkan terpapar udara lebih dari 5 menit sebelum pengujian.
6. Memasukkan dimensi benda uji ke dalam perangkat uji konduktivitas.
7. Membasahi spons dengan cairan konduktif listrik dan menempelkannya pada setiap elektroda untuk memastikan kontak listrik yang baik dengan permukaan beton. Menghubungkan elektroda ke kedua ujung benda uji.
8. Menjalankan pengujian pada frekuensi 1 kHz, atau sesuai spesifikasi yang ditentukan. Perangkat uji konduktivitas akan mengirimkan sinyal listrik melalui beton dan mengukur tegangan serta arus yang terjadi.
9. Membiarkan pembacaan stabil selama 2-5 detik, kemudian mencatat nilai yang terbaca. Lepaskan elektroda dari benda uji, pasang kembali, dan ulangi pengukuran setidaknya dua kali untuk mendapatkan nilai rata-rata.



Gambar 9. Pengujian Resistivity

2.7.4 Pengujian Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik belah (*splitting tensile strength*) pada beton dilaksanakan mengacu pada standar SNI 03-2491-2002 yang mengadopsi ASTM C496-96. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk menentukan nilai kuat tarik tidak langsung dari benda uji beton berbentuk silinder, yang diperoleh dari hasil pembebanan benda uji yang diletakkan sejajar dengan sumbu mendatarnya di antara dua plat penekan. Parameter ini penting dalam desain struktur beton untuk mengevaluasi ketahanan geser dari komponen struktur serta menentukan panjang penyaluran tulangan, terutama pada beton yang menggunakan agregat ringan. Prosedur pengujian kuat tarik belah adalah sebagai berikut :

1. Menyiapkan benda uji silinder beton yang telah memenuhi persyaratan ukuran, pencetakan, dan perawatan (*curing*). Untuk benda uji cetak, gunakan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, sesuai dengan standar ASTM C192 atau C31.
2. Menandai setiap benda uji dengan garis diametral pada kedua ujungnya untuk memastikan benda uji berada pada bidang aksial yang sama selama pengujian.
3. Mengukur diameter benda uji pada beberapa titik dan mencatat nilai rata-ratanya. Lakukan pengukuran panjang (tinggi) benda uji dengan ketelitian yang memadai.
4. Memosisikan strip perantara (*bearing strips*) dari kayu lapis di tengah blok penumpu bawah. Strip ini berfungsi menciptakan gesekan yang mengamankan silinder beton dan mencegah pergerakan selama pengujian.
5. Meletakkan benda uji silinder secara horizontal di atas strip kayu lapis, memastikan garis yang telah ditandai berada dalam posisi vertikal dan terpusat. Kemudian, menempatkan strip kayu lapis lainnya secara memanjang di atas silinder, sejajar dengan garis diametral yang telah ditandai.
6. Menyelaraskan dan memusatkan perangkat penjepit sehingga batang penumpu tambahan dan pusat benda uji berada tepat di bawah pusat blok penumpu bola (*spherical bearing block*).
7. Memberikan beban tekan secara merata sepanjang garis kontak hingga benda uji mengalami keruntuhan tarik pada bidang vertikalnya. Mencatat beban maksimum yang ditunjukkan oleh mesin uji saat benda uji pecah, serta mendokumentasikan jenis keruntuhan dan kondisi beton.



Gambar 10. Pengujian kuat tarik belah