

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur di Indonesia maupun dunia karena memiliki kekuatan yang tinggi, durabilitas yang baik, serta kemudahan dalam proses pembentukannya. Meskipun demikian, pengujian kualitas beton masih didominasi oleh metode destruktif seperti uji kuat tekan, yang memerlukan peralatan laboratorium, biaya tinggi, dan tidak memungkinkan dilakukan langsung pada struktur yang sedang beroperasi. Keterbatasan ini menimbulkan kebutuhan akan metode pengujian yang lebih efisien, praktis, dan tidak merusak, khususnya untuk inspeksi kualitas beton di lapangan.

Metode *Non-Destructive Testing* (NDT) hadir sebagai solusi untuk menilai kualitas beton tanpa merusak benda uji. Dua metode yang paling banyak digunakan adalah Uji Frekuensi Suara, yang mengukur *Sound Absorption Coefficient* (SAC) beton, dan *Resistivity*, yang merepresentasikan porositas, kadar air, dan kondisi mikrostruktur internal beton. Hubungan keduanya terhadap tingkat kekompakan internal beton telah banyak diteliti, namun hasilnya sering bervariasi karena dipengaruhi oleh umur beton, metode *curing*, dan komposisi material. Kondisi ini menjadikan analisis korelasi NDT sebagai isu penting dalam evaluasi mutu beton (Songkhla et al., 2025).

Tantangan lain dalam pengendalian mutu beton berkaitan dengan penggunaan material tambahan seperti abu terbang (*fly ash*), yang semakin diperhatikan dalam konteks keberlanjutan konstruksi. *Fly ash* merupakan limbah pembakaran batu bara di PLTU yang jumlahnya terus meningkat, dan apabila tidak dikelola dengan baik dapat mencemari udara, tanah, serta mengancam kesehatan masyarakat (Zhang et al., 2023). Dalam konteks evaluasi mutu material berbasis kinerja akustik, pengujian non-destruktif melalui pengukuran *Sound Absorption Coefficient* (SAC) menjadi metode penting untuk menilai kemampuan beton dalam meredam energi suara. SAC digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik porositas, struktur rongga, serta tingkat kemampuan material menyerap gelombang akustik pada berbagai frekuensi. (Liu et al., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, diperlukan suatu kajian yang menyeluruh mengenai pengaruh penggunaan abu terbang terhadap sifat mekanik, fisik, dan durabilitas beton melalui serangkaian pengujian yang meliputi uji frekuensi suara untuk menentukan nilai *Sound Absorption Coefficient* (SAC) dan uji *resistivity*. Kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan material konstruksi yang ramah lingkungan sekaligus memenuhi standar kinerja struktural.

1.1.1 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh variasi persentase abu terbang sebagai pengganti semen terhadap respons akustik beton yang diukur melalui uji frekuensi suara untuk memperoleh nilai *Sound Absorption Coefficient* (SAC)?
2. Bagaimana pengaruh variasi persentase abu terbang sebagai pengganti semen terhadap nilai *resistivity* beton yang mencerminkan tingkat kekompakan dan keterhubungan pori?
3. Bagaimana hubungan antara nilai *Sound Absorption Coefficient* (SAC) dari uji frekuensi suara dengan nilai *resistivity*?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh variasi persentase abu terbang sebagai pengganti semen terhadap respons akustik beton melalui nilai *Sound Absorption Coefficient* (SAC).
2. Menganalisis pengaruh variasi persentase abu terbang sebagai pengganti semen terhadap nilai *resistivity* pada beton berbasis abu terbang.
3. Mengidentifikasi dan mengevaluasi hubungan antara nilai *Sound Absorption Coefficient* (SAC) dengan nilai *resistivity* dalam menilai tingkat kekompakan internal dan keterhubungan pori pada beton berbasis abu terbang.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi ilmiah melalui pemahaman yang lebih komprehensif mengenai pengaruh penggunaan abu terbang (*fly ash*) terhadap hasil pengujian non-destruktif, khususnya nilai SAC dan *resistivity*, pada beton dengan benda uji silinder. Temuan penelitian ini dapat memperkaya literatur terkait keterkaitan kedua parameter NDT tersebut pada beton yang mengandung bahan tambah mineral, sehingga meningkatkan pemahaman mengenai perilaku fisik dan mikrostruktural beton yang dimodifikasi. Penelitian ini juga berpotensi mendukung pengembangan metode evaluasi mutu beton yang lebih efisien dan produksi beton ramah lingkungan, terutama dalam konteks pemanfaatan limbah industri seperti abu terbang sebagai bahan pengganti sebagian semen. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi pijakan bagi studi lanjutan dalam merumuskan pendekatan evaluasi atau model prediksi berbasis NDT untuk menilai kualitas beton secara berkelanjutan.

1.1.4 Batasan Masalah

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

1. Penelitian yang dilakukan berbentuk eksperimental di laboratorium struktur dan bahan Universitas Hasanuddin
2. Penelitian ini menggunakan limbah abu terbang yang berasal dari PLTU di Kabupaten Jeneponto, Kecamatan Bangkala, Desa Punagayya, Sulawesi Selatan.
3. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan ukuran 10 cm × 20 cm.
4. Variasi campuran abu terbang sebagai pengganti semen dibatasi pada presentase tertentu yaitu 0%, 15%, 30% dan 45%.
5. Pengujian dilaksanakan pada umur 28 hari pada kondisi *curing* air.
6. Pengujian dilakukan di laboratorium yang sesuai dengan standar resmi dan akan didapatkan hasil pengujian yang diharapkan.

1.2 Teori

1.2.1 Beton Abu Terbang

Beton merupakan material komposit yang dibentuk dari campuran semen Portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus dan kasar, air, serta bahan tambahan (*admixture*) yang berfungsi untuk memodifikasi sifat-sifat tertentu dari campuran. Berdasarkan (Badan Standardisasi Nasional, 2013), beton harus memenuhi persyaratan minimum terkait kekuatan, kemudahan pengerjaan, dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan. Beton memiliki karakteristik utama berupa kemampuan menahan beban tekan yang tinggi, namun lemah terhadap gaya tarik, sehingga dalam penerapan struktural biasanya dipadukan dengan baja tulangan untuk membentuk beton bertulang. Parameter yang paling umum digunakan untuk menentukan mutu beton adalah kuat tekan (f'_c), karena parameter ini memiliki keterkaitan langsung dengan sifat mekanis lainnya seperti kuat tarik, kuat lentur, dan modulus elastisitas.

Secara mikrostruktural, beton tersusun atas pasta semen, agregat, dan zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone/ITZ*) yang berperan besar terhadap perilaku mekanis material. Selama proses hidrasi, semen menghasilkan produk utama berupa kalsium silikat hidrat (C–S–H) yang menjadi penentu utama kekuatan tekan beton. Sebaliknya, keberadaan portlandit serta porositas tinggi pada ITZ menjadi titik lemah yang berpotensi menyebabkan pembentukan retak mikro. (K. Mehta & Monteiro, 1998) menegaskan bahwa sifat mekanis beton termasuk kuat tekan, kuat tarik, dan modulus elastisitas sangat dipengaruhi oleh densifikasi mikrostruktur dan kualitas ikatan antara pasta semen dan agregat. Sejalan dengan

itu, (Scrivener et al., 2018) menyatakan bahwa distribusi ukuran pori dan derajat hidrasi berperan signifikan dalam meningkatkan performa struktural beton. Oleh karena itu, secara konseptual, mutu beton tidak hanya bergantung pada komposisi makroskopik, tetapi juga pada interaksi mikrostruktural yang kompleks yang menentukan integritas dan durabilitas keseluruhan material.

Beton dengan substitusi abu terbang (*fly ash*) merupakan salah satu inovasi material konstruksi berkelanjutan yang bertujuan untuk meningkatkan performa teknis sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari penggunaan semen portland konvensional. Abu terbang merupakan residu halus hasil pembakaran batubara di pembangkit listrik tenaga uap, yang umumnya mengandung silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan oksida kalsium (CaO) dalam kadar bervariasi tergantung pada sumber batubara. Berdasarkan karakteristik kimia dan fisiknya, abu terbang dikategorikan sebagai material pozolanik yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) hasil hidrasi semen untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C–S–H) sekunder, yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan durabilitas beton dalam jangka panjang (Hawileh et al., 2025). Mekanisme kerja abu terbang dalam beton melibatkan dua efek utama, yaitu efek *filler* dan efek pozolanik. Efek *filler* berasal dari partikel abu terbang yang berukuran sangat halus dan berbentuk sferis, sehingga mampu mengisi rongga antarpartikel semen dan agregat, meningkatkan kepadatan matriks, serta menurunkan porositas beton (Nayak et al., 2022). Sementara itu, efek pozolanik terjadi ketika abu terbang bereaksi lambat dengan Ca(OH)_2 menghasilkan C–S–H tambahan, yang memperkuat struktur mikro beton dan menurunkan kandungan kalsium hidroksida bebas yang bersifat rapuh (Wang et al., 2004).

Penggunaan abu terbang sebagai substitusi sebagian semen memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik beton. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang hingga 30% dari berat semen mampu meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik beton pada umur lebih dari 28 hari, meskipun perkembangan kekuatan awalnya relatif lebih lambat akibat reaksi pozolanik yang 6 tertunda (Hawileh et al., 2025). Selain itu, keberadaan abu terbang juga dapat meningkatkan sifat kelecakan (*workability*) beton karena bentuk partikelnya yang sferis, sehingga mengurangi kebutuhan air dalam campuran tanpa mengorbankan kekuatan akhir (Nayak et al., 2022). Dalam jangka panjang, beton dengan substitusi *fly ash* menunjukkan peningkatan daya tahan terhadap penetrasi ion klorida, serangan sulfat, dan reaksi alkali-silika, karena struktur mikro yang lebih rapat dan berkurangnya porositas (Piratheepan et al., 2012). Namun, efektivitas penggunaan *fly ash* sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor penting seperti rasio air–binder (*w/b*), ukuran partikel abu terbang, kadar penggantian semen, serta kondisi *curing*, yang telah dilaporkan dalam berbagai studi eksperimen (Nayak et al., 2022).

Dari sisi keberlanjutan, pemanfaatan abu terbang sebagai bahan pengganti sebagian semen tidak hanya mengurangi volume limbah industri yang berpotensi mencemari lingkungan, tetapi juga menurunkan emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari proses produksi semen Portland. Dengan demikian, penerapan abu terbang pada beton sejalan dengan prinsip pembangunan berkelanjutan (*sustainable construction*) yang menekankan efisiensi sumber daya dan pengurangan dampak lingkungan (Sivakugan et al., 2014). Secara umum, beton abu terbang mampu menunjukkan kombinasi kinerja mekanik dan durabilitas yang baik apabila proporsi pengantiannya dioptimalkan antara 15% hingga 30%. Berdasarkan temuan tersebut, penelitian terhadap beton dengan substitusi abu terbang memiliki signifikansi tinggi tidak hanya untuk mengembangkan alternatif material ramah lingkungan, tetapi juga untuk memperdalam pemahaman tentang hubungan antara sifat akustik dasar dengan parameter tingkat kekompakan internal beton yang dikaji melalui pendekatan gabungan uji *Sound Absorption Coefficient* (SAC) dan uji *resistivity*.

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 kasar didefinisikan sebagai material granular 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 1**. Gradasi agregat yang tepat memastikan beton memiliki kepadatan yang baik dan memiliki sifat mekanik yang optimal.
4. Kandungan Zat Berbahaya: Agregat halus kasar 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	3/4 in	100 – 100	95 – 100	35 – 70
9,5	3/8 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 organik, 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 2**. 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.

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>
SNI (mm)	ASTM	Gradasi No. 1	Gradasi No. 2	Gradasi No. 3	Gradasi 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 ireversibel, 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 di singkat 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 Air

Air merupakan komponen yang sangat penting dalam pembuatan beton karena menjalankan dua peran utama. Pertama, air berfungsi sebagai medium terjadinya reaksi hidrasi antara semen dan air yang membentuk ikatan kimia penyusun pasta semen. Kedua, air bertindak sebagai pelumas yang mempermudah proses pencampuran, pemadatan, serta pelaksanaan pekerjaan beton di lapangan. Secara teoritis, kebutuhan air untuk mencapai reaksi hidrasi sempurna hanya sekitar

30% dari berat semen. Namun, dalam praktiknya nilai faktor air-semen (*water-cement ratio*, w/c) umumnya tidak kurang dari 0,35 karena diperlukan tambahan air untuk memperoleh tingkat *workability* yang memadai agar campuran beton mudah diaduk, dicor, dan dipadatkan. Meskipun demikian, penggunaan air yang berlebihan dapat memberikan dampak negatif terhadap sifat mekanis beton, terutama menurunkan kuat tekan dan meningkatkan porositas, yang pada akhirnya berpotensi mengurangi durabilitas struktur.

Berdasarkan SNI 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan, air yang digunakan sebagai air pencampur beton harus memenuhi persyaratan mutu tertentu. Air tersebut tidak boleh mengandung zat-zat yang dapat mengganggu reaksi hidrasi semen, menyebabkan korosi pada tulangan baja, ataupun menurunkan kualitas beton. Selain itu, SNI mensyaratkan bahwa beton yang dibuat menggunakan air pencampur harus mampu mencapai paling sedikit 90% dari mutu beton yang dibuat dengan menggunakan air suling sebagai acuan standar.

Lebih lanjut, penelitian yang dikemukakan oleh Mehta dan Monteiro (2001) menyatakan bahwa pengendalian rasio air-semen berpengaruh besar terhadap kepadatan mikrostruktur beton. Semakin rendah nilai rasio air-semen, selama masih berada pada batas optimum, semakin padat struktur internal beton yang terbentuk. Kondisi ini berimplikasi pada peningkatan kuat tekan serta ketahanan beton terhadap masuknya zat-zat berbahaya. Dengan demikian, pengaturan jumlah dan kualitas air dalam campuran beton tidak hanya berperan dalam kemudahan pengerjaan, tetapi juga menjadi faktor kunci yang menentukan kekuatan, ketahanan, dan keawetan beton dalam jangka panjang.

1.2.3 Abu Terbang (*Fly ash*)

Abu terbang (*fly ash*) merupakan hasil samping dari proses pembakaran batubara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berbentuk serbuk sangat halus dengan ukuran partikel berskala mikroskopis. Mengacu pada SNI 03-2460-1991, abu terbang dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambahan (*admixture*) dalam campuran beton guna meningkatkan mutu serta daya tahannya. Standar tersebut menetapkan persyaratan kimia dan fisik tertentu yang harus dipenuhi, antara lain jumlah oksida utama ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) minimal 70%, kandungan SO_3 maksimum 5%, nilai hilang pijar (loss on ignition) tidak lebih dari 6%, kadar air maksimum 3%, serta total alkali (Na_2O) tidak melebihi 1,5%. *Fly ash* yang memenuhi ketentuan ini bersifat pozolantik, yaitu mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida

($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasil hidrasi semen untuk membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C–S–H) yang berperan penting dalam meningkatkan kekuatan, kerapatan, dan durabilitas beton.

Penelitian yang dilakukan oleh Sumer (2012) menunjukkan bahwa penggunaan abu terbang sebagai substitusi parsial semen dapat meningkatkan kuat tekan beton, ketahanannya terhadap serangan sulfat, serta menurunkan permeabilitas, sehingga beton menjadi lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang agresif. Namun demikian, Nayak et al. (2022d) menegaskan bahwa proporsi penambahan *fly ash* perlu dikendalikan secara tepat, karena penggunaan dalam jumlah berlebihan dapat memperlambat reaksi hidrasi semen dan memperpanjang waktu pengerasan beton. Selain itu, Saha (2018) menyatakan bahwa sifat fisik *fly ash*, seperti ukuran partikel, bentuk butiran, dan distribusi ukuran, sangat memengaruhi efektivitasnya dalam campuran beton. Partikel yang lebih halus cenderung mampu mengisi rongga antar agregat dengan lebih optimal, sehingga meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton.

Oleh karena itu, pemanfaatan *fly ash* yang memenuhi standar mutu serta memiliki karakteristik fisik yang sesuai dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kinerja mekanis, durabilitas, dan keberlanjutan beton. Di samping manfaat teknis, penggunaan *fly ash* dalam bidang konstruksi juga memberikan keuntungan lingkungan, karena dapat mengurangi jumlah limbah industri batubara serta menekan emisi karbon yang dihasilkan dari produksi semen konvensional, sejalan dengan konsep pembangunan berkelanjutan di sektor konstruksi.

1.2.4 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.

1.2.5 Non Destructive Test (NDT)

1.2.5.1 Resistivity

Electrical Resistivity (ER) didefinisikan sebagai kapasitas material untuk menoleransi transfer ion saat terkena medan listrik. *Resistivity* adalah rasio antara tegangan suplai (V) dan arus resultan (I) dikalikan dengan konstanta sel, dan arus listrik yang diangkut oleh ion-ion yang terlarut dalam cairan pori. *Resistivity* dirumuskan dengan **Persamaan 1** sebagai berikut:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{d} \dots \dots \dots \text{Persamaan 1}$$

Dengan:

ρ = Nilai *electrical resistivity* (k Ω .cm),

R = Resistansi listrik spesimen (k Ω),

A = Luas penampang spesimen (cm²),

d = Jarak antara dua probe pada mesin uji (cm)

Pengukuran *electrical resistivity* dipengaruhi oleh jumlah pori dan kadar air dalam beton, beton dapat menunjukkan karakteristik yang konduktif maupun isolasi misalnya beton akan menunjukkan resistensi yang tinggi saat kering, tetapi beton yang sama akan memiliki resistensi yang jauh lebih rendah Ketika basah. Selain itu beton memiliki sifat kapasitif yang berarti dapat menahan muatan listrik karena Ketika arus searah (DC) dapat menyebabkan efek polarisasi tinggi pada antarmuka elektroda beton Teknik arus DC ini gagal dalam menghilangkan sifat kapasitansi beton dalam pengukuran. Hal berbeda terjadi Ketika beton dialiri arus bolak balik (AC), dipol ion dalam larutan pori berada apada posisi sedemikian rupa sehingga mengarahkan arus listrik. Oleh karena itu, arus AC harus digunakan untuk mengukur *electrical resistivity* (Layssi H. et al., 2016).

Berdasarkan ASTM B193-20 (2020), *resistivity* listrik beton adalah hambatan terhadap pergerakan ion dalam material saat diberi medan listrik, dan merupakan kebalikan dari konduktivitas Listrik. Uji *resistivity* merupakan metode non-destruktif untuk mengukur kemampuan beton menahan aliran ion dalam rangka menilai daya tahan terhadap penetrasi zat agresif. Nilai *resistivity* ini dipengaruhi oleh struktur kapiler, komposisi larutan pori, derajat jenuh, temperatur, serta karakteristik campuran seperti rasio air-semen, penggunaan material tambahan, dan agregat. *Resistivity* berhubungan erat dengan kemampuan beton menahan penetrasi klorida, uji ini sering digunakan sebagai indikator cepat daya tahan beton terhadap degradasi lingkungan.

1.2.5.2 Soundness Absorption Coefficient (SAC)

Pengujian *Sound Absorption Coefficient* (SAC) merupakan metode evaluasi non-destruktif yang digunakan untuk menilai kemampuan beton dalam menyerap energi gelombang suara, yang merefleksikan karakteristik internal material seperti porositas, konektivitas pori, dan tingkat kekompakan mikrostruktur beton. Pengujian SAC umumnya dilakukan menggunakan metode *impedance tube* sesuai dengan standar internasional seperti ASTM E1050 dan ISO 10534, di mana nilai koefisien serap suara diperoleh dari perbandingan antara energi gelombang suara datang dan gelombang pantul pada permukaan spesimen beton dalam rentang frekuensi tertentu. Hasil pengujian ini dapat dimanfaatkan untuk mengevaluasi keseragaman struktur pori beton, mengidentifikasi variasi kualitas internal, serta menilai efektivitas beton sebagai material fungsional peredam bising. SAC dirumuskan dengan **Persamaan 2** sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{4 \times 10^{\Delta L/20}}{(1 + 10^{\Delta L/20})} \dots \dots \dots \text{Persamaan 2}$$

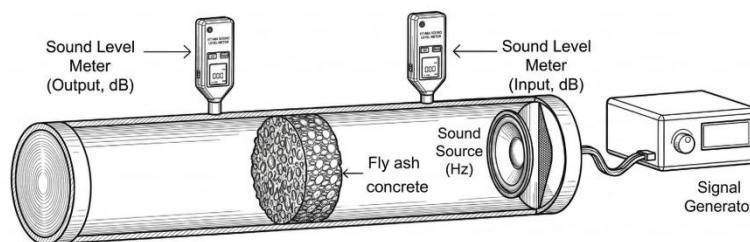
Dengan:

α = koefisien serap bunyi (*Sound Absorption Coefficient*),

ΔL = selisih antara frekuensi (dB)

Namun demikian, interpretasi nilai SAC tidak bersifat universal dan sangat dipengaruhi oleh parameter campuran serta kondisi fisik beton, sehingga diperlukan pendekatan korelasi yang spesifik untuk setiap jenis beton dan konfigurasi pengujian. Faktor-faktor seperti porositas total dan terbuka, ukuran dan distribusi pori, ketebalan spesimen, rasio semen–agregat, serta rentang frekuensi pengujian memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai SAC yang dihasilkan. Selain itu, kondisi kelembapan, metode pembuatan spesimen, dan batasan alat uji juga dapat memengaruhi hasil pengukuran. Oleh karena itu, meskipun pengujian SAC efektif

sebagai alat evaluasi cepat untuk menilai kinerja akustik dan indikasi mikrostruktur beton, hasilnya tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar penilaian mutu mekanis beton, melainkan perlu dikombinasikan dengan pengujian sifat fisik dan mekanis lainnya guna memperoleh evaluasi yang komprehensif dan akurat. Adapun untuk visualisasi pengujian SAC dapat dilihat pada **Gambar 1** berikut:



Gambar 1. Skematik Pengujian *Sound Absorption Coefficient* (SAC) Beton

1.3 Penelitian terdahulu

Zhang et al. (2020) menekankan *Sound Absorption Coefficient* (SAC) sebagai parameter yang merepresentasikan kemampuan beton berpori dalam menyerap energi gelombang suara, yang sangat dipengaruhi oleh karakteristik mikrostruktur internal beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai SAC cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya porositas beton, meskipun tingkat korelasinya tidak selalu kuat dan sangat dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori, konektivitas pori, serta morfologi rongga internal. Selain itu, peningkatan porositas yang berkontribusi terhadap kemampuan serap suara umumnya diikuti oleh peningkatan nilai *resistivity* beton, akibat meningkatnya jalur konduktif dalam matriks beton. Temuan ini mengindikasikan bahwa hubungan antara *resistivity* beton dan SAC cenderung bersifat berbanding lurus. Studi ini menegaskan bahwa SAC dan *resistivity* merefleksikan aspek kinerja beton yang berbeda tetapi saling terkait melalui kontrol mikrostruktur, sehingga keduanya perlu dipahami sebagai parameter dalam evaluasi sifat mekanis, durabilitas, dan karakteristik fungsional beton.

Wijesinghe et al. (2025) menegaskan bahwa performa akustik mortar berpori, yang direpresentasikan oleh nilai *Sound Absorption Coefficient* (SAC) dan *Sound Absorption Average* (SAA), sangat erat kaitannya dengan karakteristik mikrostruktur, khususnya *open porosity*, *flow resistivity*, dan *tortuosity*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan antara *resistivity* dan SAC tidak bersifat linier sederhana, melainkan bersifat optimum dan frekuensi-dependent. *Flow resistivity* yang terlalu rendah menyebabkan energi suara lolos tanpa dissipasi yang

cukup, sedangkan *resistivity* yang terlalu tinggi justru menghambat penetrasi gelombang suara ke dalam material. Nilai SAC tertinggi dicapai pada mortar dengan *resistivity* menengah yang dikombinasikan dengan *open porosity* tinggi dan jalur pori yang *tortuous*, sehingga mekanisme disipasi viskositas dan termal berlangsung optimal.

Kang et al. (2020) menganalisis bahwa penggunaan abu terbang sebagai pengganti sebagian semen berpengaruh besar terhadap nilai resistivitas listrik beton. Pengaruh ini bergantung pada jumlah abu terbang yang digunakan serta sifat partikel *fly ash* tersebut. Studi tersebut menunjukkan bahwa beton dengan kadar *fly ash* 40% secara umum memiliki nilai *resistivity* yang lebih tinggi dibandingkan beton dengan kadar *fly ash* 20% maupun beton kontrol tanpa *fly ash*, terutama pada umur hidrasi menengah hingga lanjut. Peningkatan *resistivity* ini dikaitkan dengan peran reaksi pozolanik *fly ash* yang berkontribusi pada pembentukan produk hidrasi tambahan, penyempurnaan struktur pori, serta penurunan konektivitas pori kapiler, sehingga menghambat transport ion dan fluida dalam matriks beton. Selain itu, penelitian ini menegaskan bahwa hubungan antara kadar *fly ash* dan *resistivity* tidak semata-mata ditentukan oleh persentase penggantian, tetapi juga oleh komposisi kimia dan reaktivitas partikel *fly ash* pada skala mikro. *Fly ash* dengan kandungan fase silikat dan aluminosilikat reaktif cenderung meningkatkan *resistivity* beton seiring bertambahnya umur, sedangkan partikel yang kurang reaktif memberikan kontribusi yang lebih terbatas. Dengan demikian, studi ini memperkuat pemahaman bahwa peningkatan kadar *fly ash*, dalam batas tertentu, berkorelasi positif dengan peningkatan *resistivity* beton.

Do et al. (2021) menekankan peran *Sound Absorption Coefficient* (SAC) beton sebagai indikator kinerja akustik yang sangat dipengaruhi oleh kondisi mikrostruktur internal beton. Keterkaitan antara *fly ash* (FA) dengan nilai *Sound Absorption Coefficient* (SAC) menunjukkan bahwa peningkatan kandungan *fly ash* dalam komposit aerogel secara signifikan meningkatkan kemampuan penyerapan suara material. Hal ini disebabkan oleh peran ganda partikel *fly ash* yang berbentuk bulat dan halus, yang tidak hanya memperkecil ukuran pori dalam struktur aerogel tetapi juga menciptakan jalur rambatan suara yang lebih berliku (*tortuous path*), sehingga meningkatkan gesekan udara dan disipasi energi suara menjadi panas. Selain itu, permukaan bulat *fly ash* memantulkan gelombang suara secara berulang di dalam material (multi-refleksi), yang memperpanjang interaksi suara dengan dinding pori dan partikel padat. Hasil pengujian membuktikan bahwa komposit dengan kandungan *fly ash* tertinggi (4,0 wt%) menghasilkan nilai *Noise Reduction Coefficient* (NRC) sebesar 0,31 dan rata-rata koefisien serapan suara (α) 0,38, yang merupakan nilai tertinggi dibandingkan variasi lainnya, terutama pada rentang frekuensi tinggi 1400–6000 Hz. Dengan demikian, *fly ash* terbukti berperan sebagai pengisi fungsional yang efektif dalam meningkatkan performa akustik material komposit aerogel.

Laxmi et al. (2023) menyoroti efektivitas penggunaan limbah industri, seperti *Fly ash* (FA) dan butiran *Waste Tyre Rubber* (WTR), dalam mengembangkan material komposit penyerap suara yang inovatif. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa kinerja akustik material, yang direpresentasikan oleh *Sound Absorption Coefficient* (SAC), sangat bergantung pada karakteristik porositas dan struktur internal matriks komposit tersebut. Peningkatan proporsi WTR dan FA secara signifikan meningkatkan rasio rongga hingga 470%, yang memungkinkan gelombang suara masuk ke dalam pori-pori yang saling terhubung dan mengalami disipasi energi melalui mekanisme redaman akibat gesekan antara energi suara dengan dinding pori. Studi ini menunjukkan bahwa meskipun penambahan limbah ban menurunkan kepadatan dan kekuatan tekan material, hal tersebut justru mengoptimalkan kemampuan penyerapan suara, dengan nilai SAC mencapai puncak pada frekuensi 1600 Hz. Penggunaan *Fly ash* sebagai pengganti semen terbukti meningkatkan porositas lebih jauh tanpa mengurangi kekuatan tekan secara drastis, sehingga menghasilkan material dengan *Average Sound Absorption Coefficient* (ASAC) yang lebih baik, terutama pada rentang frekuensi kebisingan lalu lintas. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa rekayasa mikrostruktur melalui pemanfaatan limbah industri tidak hanya memberikan solusi lingkungan yang berkelanjutan, tetapi juga menciptakan parameter fungsional yang efektif untuk mitigasi polusi suara melalui penghalang bising yang ringan dan ekonomis.

Analisis ringkas penelitian terdahulu menunjukkan bahwa *resistivity* listrik dan *Sound Absorption Coefficient* (SAC) merupakan dua parameter nondestruktif yang sama-sama sensitif terhadap perubahan mikrostruktur internal beton, khususnya porositas, konektivitas pori, dan karakteristik jalur pori. Berbagai studi menegaskan bahwa peningkatan porositas terbuka dan keterhubungan sistem pori cenderung meningkatkan nilai SAC melalui mekanisme disipasi energi viskositas dan termal. Pada saat yang sama nilai *resistivity* meningkat akibat terbentuknya jalur konduktif yang lebih kontinu di dalam matriks beton. Temuan ini mengindikasikan bahwa hubungan antara *resistivity* dan SAC umumnya bersifat berbanding lurus, meskipun tidak selalu linear dan sangat dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori, *tortuosity*, serta tingkat *resistivity* optimum yang bergantung pada frekuensi. Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa penggunaan bahan pozolan seperti *fly ash* mampu memodifikasi mikrostruktur beton melalui reaksi pozolanik, yang berpotensi meningkatkan *resistivity* akibat penyempurnaan struktur pori, sekaligus memengaruhi nilai SAC tergantung pada keseimbangan antara porositas terbuka dan hambatan aliran udara dalam sistem pori. Dengan demikian, kajian khusus mengenai hubungan *resistivity* dan SAC pada beton berbasis *fly ash* menjadi penting untuk memahami bagaimana parameter nondestruktif tersebut merefleksikan perubahan mikrostruktur internal serta kinerja fungsional beton, khususnya dalam konteks beton berpori dan beton dengan tuntutan performa akustik.

1.4 Desain konseptual

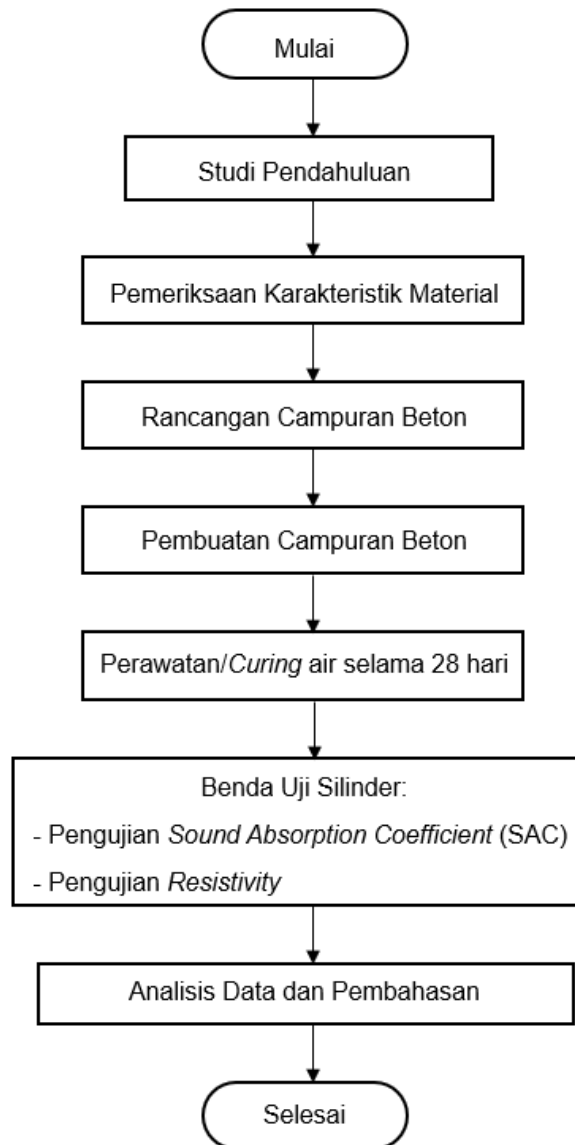
Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi hubungan antara nilai *resistivity* listrik (ρ) dan hasil pengujian frekuensi suara (SAC) pada beton dengan bentuk benda uji silinder. Konsep penelitian didasarkan pada prinsip bahwa *resistivity* beton dipengaruhi oleh porositas, kadar air, dan densitas matriks, sedangkan uji frekuensi suara kemampuan beton dalam menyerap gelombang suara, yang mencerminkan karakteristik internal material seperti struktur pori, kepadatan, dan tingkat kekompakan beton. Dengan mengukur kedua parameter tak merusak ini, penelitian berfokus pada konsistensi pengukuran pada berbagai bentuk benda uji serta pengaruh perbedaan geometri silinder. Proses penelitian mencakup persiapan material, pencampuran beton, pembuatan benda uji, dan perawatan sesuai standar *curing*, dilanjutkan dengan pengujian *resistivity* (ρ) dan pengujian frekuensi suara (SAC) pada permukaan beton, sebelum dianalisis untuk korelasi antara kedua parameter.

Selain itu, penelitian ini menekankan pentingnya optimalisasi proporsi campuran beton melalui pengendalian rasio air-semen (w/c ratio), efisiensi penggunaan semen, serta karakterisasi sifat fisik dan kimia abu terbang sebagai bahan pengganti sebagian semen. Pengendalian faktor-faktor tersebut memengaruhi kepadatan matriks beton, porositas, dan konduktivitas listrik, yang berdampak pada nilai *resistivity* (ρ) dan respons permukaan terhadap frekuensi suara (SAC). Dengan demikian, pengaturan proporsi dan karakter bahan penyusun beton menjadi dasar yang memungkinkan interpretasi hasil pengujian tak merusak dilakukan secara akurat dan konsisten pada berbagai bentuk benda uji. Penelitian ini diharapkan memberikan pemahaman lebih baik mengenai karakteristik permukaan beton secara tak merusak serta menjadi acuan bagi penerapan metode pengendalian kualitas beton yang efisien dan berkelanjutan.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bagan Alir Penelitian

Tahap penelitian ini dapat dilihat secara sistematis dalam bentuk diagram alir pada **Gambar 2** sebagai berikut:



Gambar 2. Bagan alir penelitian

2.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di 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 berbasis abu terbang.

2.4 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Komputer tambahan yang digunakan untuk proses pengolahan dan analisis data hasil pengujian.
2. *Resipod Resistivity Meter*
3. *Impedance Tube for SAC test*
4. Mesin pencampur material (*mixer*) untuk mencampurkan bahan penyusun beton secara homogen.
5. Mesin penggetar (*vibrator*) untuk memadatkan adukan beton di dalam cetakan.
6. Satu set alat pengukur slump untuk menentukan kelecakan adukan beton segar.
7. Cetakan silinder berukuran 10 cm × 20 cm untuk pembuatan benda uji.
8. Timbangan untuk menimbang bahan dengan ketelitian sesuai kebutuhan laboratorium.

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.

Bahan/material campuran beton berbasis abu terbang yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3** berikut:



Semen



Abu Terbang



Agregat Halus



Agregat Kasar



Air

Gambar 3. Bahan/material campuran beton berbasis abu terbang

2.5 Pengujian Karakteristik Material

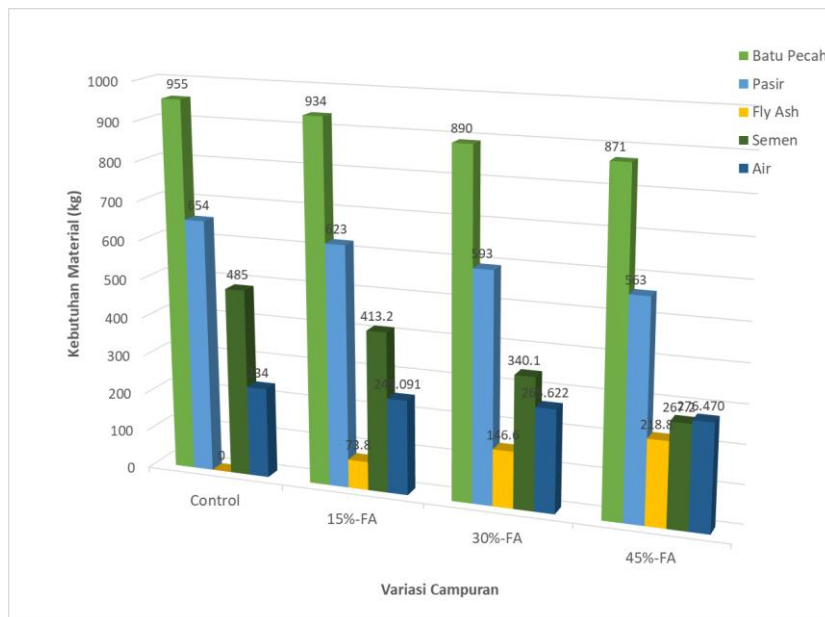
Pengujian karakteristik material beton berbasis *fly ash* mencakup pemeriksaan sifat kimia dan fisiknya. Analisis komposisi kimia abu terbang dilakukan menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF). Sementara itu, pengujian sifat fisik meliputi penentuan berat jenis, penyerapan air, dan analisis gradasi melalui saringan. Pengujian berat jenis dan penyerapan air mengikuti standar SNI-1970-2016 (SNI 1970, 2016), sedangkan analisis saringan mengacu pada ASTM C136-2019 (ASTM C136, 2019).

2.6 Komposisi Bahan dan Campuran

Hasil *trial mix* untuk komposisi campuran beton dengan tambahan abu terbang (*fly ash*) sebagai pengganti semen PCC dapat dilihat pada **Tabel 3** dan **Gambar 4**. Pada komposisi campuran dilakukan kombinasi campuran dengan penambahan *fly ash* sebesar 15%, 30% dan 45% sebagai pengganti semen.

Tabel 3. Komposisi campuran beton

Mix	Air (kg/m ³)			Semen (kg/m ³)	Fly ash (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)	Batu Pecah (kg/m ³)	Volume (kg/m ³)	W/B
	Awal	Tambahan	Total						
Control	234	0	234	485	0	654	955	2328	0.48
15%-FA	234	11.091	245.09	413.2	73.8	623	934	2289.09	0.50
30%-FA	234	31.622	265.62	340.1	146.6	593	890	2235.32	0.55
45%-FA	234	42.470	276.47	267.2	218.8	563	871	2196.47	0.57



Gambar 4. 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 sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Alur pembuatan benda uji

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 4**. Adapun tahapan pembuatan benda uji dilakukan sebagai berikut:

1. Persiapan Material
 - a. Menyiapkan bahan campuran beton dalam wadah terpisah dengan kondisi agregat SSD.
 - b. Menimbang agregat kasar, agregat halus, semen, abu terbang, dan air sesuai berat yang tercantum dalam rancangan campuran.
 - c. 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.
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.
 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 4. Jumlah benda uji

Jenis Variasi	Waktu Pengujian	Dimensi benda uji	Jenis pengujian	Jumlah benda uji
Control	28 Hari	Silinder (10 cm x 20 cm)	<i>SAC test, Resistivity</i>	3
15% FA		Silinder (10 cm x 20 cm)	<i>SAC test, Resistivity</i>	3
30% FA		Silinder (10 cm x 20 cm)	<i>SAC test, Resistivity</i>	3
45% FA		Silinder (10 cm x 20 cm)	<i>SAC test, Resistivity</i>	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 Metode Pengujian SAC

Pengujian *Sound Absorption Coefficient* (SAC) pada beton silinder mengacu pada standar ASTM E1050 dan ISO 10534-2 dengan menggunakan metode *impedance tube*. Tujuan utama pengujian SAC adalah untuk memperoleh nilai koefisien serap suara beton pada rentang frekuensi tertentu, sehingga dapat digunakan untuk menilai pengaruh mikrostruktur beton, seperti porositas dan konektivitas pori, terhadap perilaku akustik material. Pengujian *Sound Absorption Coefficient* (SAC) beton dapat dilihat pada **Gambar 6**.

Prosedur pengujian SAC adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan peralatan pengujian SAC, berupa *impedance tube* yang dilengkapi dengan sumber bunyi, dua mikrofon (*sound level meter*), dan sistem akuisisi data (komputer), serta memastikan diameter tabung sesuai dengan diameter spesimen beton silinder.
2. Menempatkan spesimen beton silinder pada tengah tabung impedansi dengan posisi rapat dan kedap untuk mencegah kebocoran udara yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran.
3. Mengaktifkan sumber bunyi dan melakukan pengukuran respon akustik pada rentang frekuensi yang telah ditentukan sesuai standar pengujian.
4. Merekam dan mengolah sinyal tekanan suara yang diterima oleh mikrofon untuk menghitung nilai *Sound Absorption Coefficient* (SAC) sebagai data evaluasi kinerja akustik beton.



Gambar 6. Pengujian *Sound Absorption Coefficient* (SAC) Beton

2.7.4 Metode Pengujian *Resistivity*

Pengujian *resistivity* beton dilakukan dengan menggunakan alat *Proceq Resipod Bulk Resistivity* yang mengacu pada AASHTO T-358. Metode *resistivity* beton ini bekerja dengan mengalirkan arus listrik AC melalui elektroda luar dan mengukur beda potensial pada elektroda dalam yang ditempatkan pada permukaan beton. Nilai *resistivity* yang diperoleh menggambarkan kemampuan beton untuk menghambat pergerakan ion di dalam pori, sehingga berhubungan dengan durabilitas beton. Semakin tinggi *resistivity*, maka semakin rendah permeabilitas ion dan semakin kecil kemungkinan terjadinya korosi. Pengujian ini juga dapat digunakan sebagai indikator tingkat kejenuhan beton serta kualitas perlindungan lapisan penutup terhadap tulangan. Pengujian *resistivity* beton dapat dilihat pada **Gambar 7**.

Prosedur pengujian *resistivity* beton terdiri dari beberapa tahapan, yaitu:

1. Menyiapkan alat *Proceq Resipod Bulk Resistivity* dan melakukan kalibrasi alat.
2. Menyiapkan sampel benda uji beton, benda uji harus dalam keadaan lembap permukaan untuk meningkatkan konduktivitas.
3. Menempatkan alat tegak lurus dengan benda uji.
4. Menekan alat ke permukaan benda uji hingga pembacaan stabil, lakukan hingga 4 kali pembacaan di permukaan beton yang berbeda.
5. Mencatat nilai *resistivity* beton. tengah bentang hingga balok menunjukkan keretakan atau mengalami kegagalan.



Gambar 7. Pengujian *Resistivity* Beton