



## 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 Portlan sebagai komponen pengikat utama beton menyumbang sekitar 7–8% dari total emisi CO<sub>2</sub> 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 sebagian 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.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan fly ash hingga batas tertentu mampu meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas beton. Misalnya, substitusi 10% abu terbang pada beton berpori dengan water-cement ratio (FAS) 0,3 menghasilkan kekuatan tekan 5,4 MPa dengan porositas 7,75 m<sup>3</sup>/s, yang merupakan hasil optimal pada variasi yang diuji (Journal Saintis, 2023). Pada beton geopolimer, kombinasi kandungan fly ash yang tinggi dengan gradasi agregat yang baik terbukti menurunkan penyerapan air dan meningkatkan kekuatan tekan (Ghosh et al., 2018). Bahkan pada beton pervious, penggunaan kombinasi fly ash dan silica fume hingga 60% mampu meningkatkan kekuatan tekan tanpa mengorbankan permeabilitas yang dibutuhkan (ScienceDirect, 2023). Dalam konteks evaluasi mutu, pengujian non-destruktif seperti Ultrasonic Pulse Velocity (UPV). UPV mampu mengukur homogenitas dan mendeteksi retakan internal berdasarkan kecepatan rambat gelombang ultrasonik dalam beton (Wikipedia, 2025).

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 lentur, dan kecepatan gelombang ultrasonik (UPV). 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 presentase abu terbang sebagai pengganti semen terhadap sifat mekanik beton yang diukur melalui uji kuat lentur?
2. Bagaimana pengaruh variasi presentase abu terbang sebagai pengganti semen terhadap sifat mekanik beton yang diukur melalui uji UPV?
3. Bagaimana hubungan antara hasil uji kuat lentur dengan hasil kecepatan gelombang ultrasonic (UPV) ?
4. Bagaimana presen

### 1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh substitusi abu terbang dengan variasi tertentu terhadap sifat mekanik beton yang diukur melalui uji kuat lentur.
2. Menganalisis hubungan antara hasil uji kuat lentur dengan hasil uji non-destruktif (kecepatan gelombang ultrasonic (UPV) menggunakan beton yang mengandung abu terbang.

### 1.1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian diharapkan mampu mengembangkan pemanfaatan abu terbang sebagai alternatif material pada bidang konstruksi sipil serta mengurangi dampak lingkungan yang terjadi akibat penggunaan material alam yang berlebihan.

### 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 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. Penelitian menggunakan cetakan balok (Panjang 30 cm, lebar 10 cm, dan tinggi 10 cm) untuk pengujian kuat lentur dan kecepatan gelombang ultrasonic.
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

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 kedekatan 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 kasar 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	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 Agergat 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





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 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 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 ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), fero oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dan kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida ( $\text{MgO}$ ), titanium oksida ( $\text{TiO}_2$ ), alkalin ( $\text{Na}_2\text{O}$ )



dan K<sub>2</sub>O), sulfur trioksida (SO<sub>3</sub>), pospor oksida (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 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 kedekatan 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 diatome, 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.

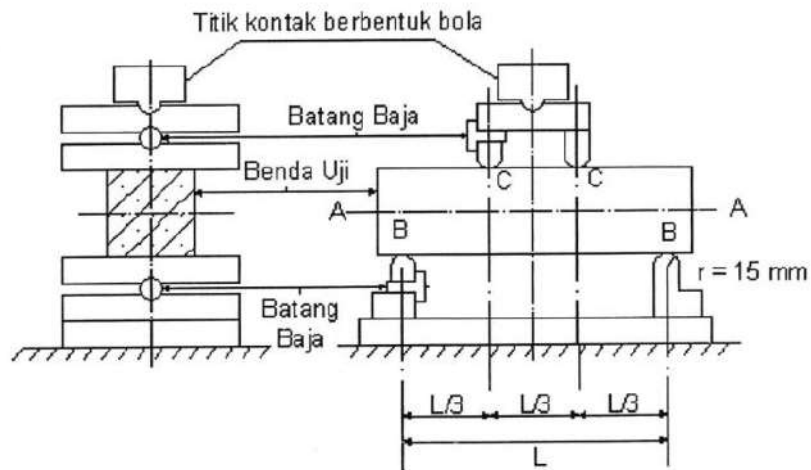
Pada SNI 03-2834-2000 juga mengatur bahwa perancangan campuran harus mempertimbangkan faktor lingkungan seperti tingkat keagresifan kimia dan kondisi kelembaban, sehingga durabilitas beton dapat terjamin dalam jangka panjang. Standar ini juga memberikan pedoman mengenai kadar semen minimum dan rasio 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 Lentur

Menurut SNI 4431:2011, kuat lentur beton normal didefinisikan sebagai kemampuan suatu balok beton untuk menahan gaya yang bekerja tegak lurus terhadap sumbu panjangnya hingga benda uji mengalami patah. Dengan kata lain, uji kuat lentur bertujuan untuk mengetahui sejauh mana beton mampu menahan beban yang menyebabkan terjadinya lenturan (*bending*). Beton pada dasarnya merupakan material yang kuat terhadap tekan tetapi lemah terhadap Tarik. Oleh karena itu, uji kuat lentur menjadi penting untuk menilai kapasitas tarik tidak langsung dari beton. Dalam pelaksanaannya, benda uji berbentuk balok diletakkan pada dua tumpuan sederhana lalu diberi beban di bagian atas hingga retak dan akhirnya patah. Nilai beban maksimum yang mampu ditahan benda uji sebelum runtuh menjadi dasar dalam perhitungan kuat lentur (Badan Standardisasi Nasional, 2011)

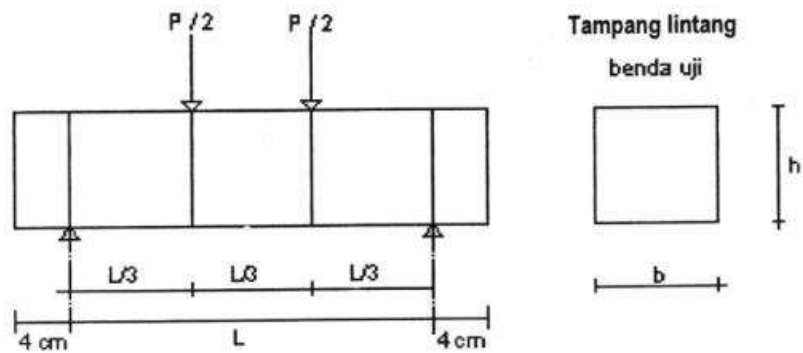


Dalam SNI 4431:2011, pengujian kuat lentur beton dilakukan dengan metode dua titik pembebanan. Parameter yang digunakan meliputi beban maksimum ( $P$ ), panjang bentang ( $L$ ), lebar balok ( $b$ ), dan tinggi balok ( $h$ ) dengan ketentuan benda uji, perletakan dan pembebanan sebagai berikut



**Gambar 1.** Benda uji, perletakan dan pembebanan uji lentur (SNI 4431-2011)  
Sumber: SNI 4431-2011

Dengan keterangan A-A adalah sumbu memanjang, B Adalah titik-titik perletakan, dan C adalah titik-titik pembebanan.



**Gambar 2.** Garis-garis perletakan dan pembebanan uji lentur (SNI 4431-2011)  
Sumber: SNI 4431-2011



Dengan keterangan L adalah jarak (bentang) antara dua garis perletakan (cm), b Adalah lebar tampak lintang benda uji (cm), h adalah tinggi tampak lintang benda uji (cm), dan P adalah beban tertinggi yang ditunjukkan oleh mesin uji (kg).

Apabila keruntuhan terjadi pada daerah tengah bentang, kuat lentur dihitung dengan rumus:

$$\sigma_l = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2}$$

Namun, jika keruntuhan terjadi di luar sepertiga tengah bentang (tetapi tidak lebih dari 5 % dari panjang bentang), maka digunakan rumus:

$$\sigma_l = \frac{P \cdot a}{b \cdot h^2}$$

Dengan keterangan:

- $\sigma_l$  = Kuat lentur benda uji (MPa)
- P = Beban tertinggi yang terbaca pada mesin uji (pembacaan dalam ton sampai 3 angka dibelakang koma)
- L = Jarak (bentang) antara dua garis perletakan (mm)
- b = Lebar tampang lintang patah arah horixontal (mm)
- h = Lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)
- a = jarak rata-rata antara tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada 4 tempat pada sudut dari bentang (mm)

Hasil penelitian Zhang dkk menunjukkan bahwa kuat lentur beton sangat dipengaruhi oleh faktor umur perawatan (curing) dan kualitas material penyusunnya. Penelitian tersebut menegaskan bahwa semakin lama proses perawatan beton, semakin baik ikatan mikrostruktur pasta semen sehingga kemampuan menahan beban lentur meningkat (Zhang et al., 2014). Selain itu, studi lain dalam *Cement and Concrete Research* menyebutkan bahwa kuat lentur beton murni berkorelasi langsung dengan kepadatan internal serta distribusi pori yang terbentuk selama proses hidrasi. Beton dengan porositas rendah cenderung memiliki nilai kuat lentur yang lebih tinggi karena mampu menahan retak awal sebelum terjadi patah (Li & Xu, 2015). Temuan ini sejalan dengan prinsip dasar uji kuat lentur yang menekankan bahwa parameter struktural internal beton memiliki peran penting terhadap ketahanan terhadap beban lentur, di samping faktor dimensi benda uji dan kondisi pengujian

Dengan menggunakan balok beton murni berukuran 30 × 10 × 10 cm, pengujian kuat lentur tetap mengikuti prinsip dasar dalam SNI 4431:2011 dengan metode dua titik pembebanan. Meskipun ukuran ini berbeda dari dimensi standar (15 × 15 × 53 cm), perhitungan tetap sah selama parameter utama (P, L, b, h, dan a) dipenuhi. Namun, perlu dicatat bahwa efek ukuran dapat menurunkan atau menaikkan hasil dibandingkan dengan benda uji standar. Secara praktis, beton murni tanpa bahan tambah umumnya menunjukkan nilai kuat lentur sekitar 10–15 % dari kuat tekan, tetapi pengujian aktual sangat diperlukan untuk memastikan akurasi, khususnya pada desain struktural yang menuntut ketahanan terhadap beban lentur.



### 1.2.5 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

Uji Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) adalah metode non-destruktif yang mengukur kecepatan gelombang ultrasound longitudinal menembus beton. Prinsipnya jelas, yaitu pulsa gelombang dikirim melalui transduser ke permukaan beton dan diterima pada sisi seberang, kemudian dihitung waktu tempuh guna memperoleh kecepatan gelombang. Semakin tinggi kecepatan pulsa, semakin baik homogenitas dan kualitas beton karena beton padat dan berkualitas akan memfasilitasi propagasi gelombang lebih cepat. Uji ini sering digunakan untuk mendeteksi retak, rongga, heterogenitas, serta menilai mutu beton secara umum tanpa merusak struktur (American Concrete Institute, Wikipedia).

Menurut ASTM C597-02, pengujian UPV fokus pada pengukuran kecepatan longitudinal gelombang melalui beton. Standar ini menjamin bahwa nilai yang digunakan adalah dalam satuan SI dan tidak berlaku untuk jenis gelombang lainnya. Parameter penting meliputi pengukuran jarak antar transduser, ketepatan waktu tempuh pulsa, serta kondisi beton seperti saturasi air, yang bisa mempengaruhi hasil, misalnya beton jenuh dapat menghasilkan kecepatan hingga 5 % lebih tinggi dibanding beton kering. Akurasi hasil sangat bergantung pada kualitas coupling transduser serta ketepatan operator dalam menghitung waktu tempuh gelombang.

Patil dan Londhe (2017) melaporkan bahwa nilai *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) menunjukkan korelasi yang signifikan dengan kuat lentur beton, di mana penurunan kecepatan gelombang seiring peningkatan kerusakan internal mencerminkan penurunan kemampuan lentur material. Sementara itu, Bhosale dkk. (2020) menegaskan bahwa UPV dapat digunakan sebagai parameter prediktif terhadap degradasi beton akibat siklus beku-cair, dengan hasil yang konsisten terhadap variasi kuat tekan maupun kuat lentur. Temuan lain oleh Mohamed dan Najm (2017) juga menekankan bahwa hubungan UPV dengan sifat mekanis, termasuk kuat lentur, cukup kuat untuk menjadikannya alat evaluasi struktural non-destruktif pada beton normal maupun beton ringan.

### 1.3 Penelitian terdahulu

Hooton (2012) meneliti beton dengan material pengikat berupa campuran RCC dan fly ash kelas tinggi (HVFA) yang difokuskan pada pengujian kuat lentur. Benda uji berupa balok berukuran 100×100×600 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat lentur meningkat signifikan seiring dengan penambahan fly ash hingga 20%, namun setelah melewati proporsi tersebut peningkatan kuat lentur cenderung menurun. Hal ini mengindikasikan adanya batas optimum penggunaan fly ash pada beton RCC dalam meningkatkan performa mekanis khususnya pada kuat lentur.

Nikbin et al. (2022) melakukan penelitian dengan menggunakan Portland Composite Cement (PCC) yang sebagian digantikan oleh fly ash dalam variasi 0–60%. Parameter yang diuji adalah kecepatan gelombang ultrasonik (UPV) serta rebound hammer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model prediksi kuat tekan melalui kombinasi UPV dan rebound hammer menghasilkan error prediksi kurang dari 5%. Benda uji berupa silinder berukuran 100×200 mm, dan penelitian ini



menegaskan efektivitas metode nondestruktif dalam memperkirakan kuat tekan beton berbasis PCC dan fly ash.

Naik dan Kraus (2002) mengevaluasi beton dengan pengikat PCC dan HVFA (50–70%) dengan fokus pada pengujian kuat lentur serta ketahanan abrasi. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa kuat lentur meningkat seiring bertambahnya umur beton. Selain itu, terdapat korelasi yang cukup baik antara kuat lentur dengan ketahanan abrasi, sehingga penggunaan fly ash dalam proporsi tinggi tidak hanya meningkatkan performa mekanis, tetapi juga ketahanan permukaan terhadap aus.

Al-Rawas et al. (2024) mengkaji beton Self Compacting Concrete (SCC) berbasis HVFA dengan fokus pada pengujian kuat lentur. Benda uji berupa balok berukuran 150×250×2000 mm. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa SCC berbasis HVFA memiliki performa kuat lentur yang lebih stabil dan konsisten dibandingkan dengan beton normal. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun menggunakan kadar fly ash tinggi, SCC masih dapat mempertahankan sifat mekanisnya serta lebih unggul dibanding beton konvensional.

Yuliana et al. (2024) meneliti beton dengan campuran PCC dan fly ash sebesar 0–12,5% yang diuji melalui pengujian lentur serta tarik belah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran dengan 12,5% fly ash menghasilkan kuat lentur lebih dari 3 MPa. Selain itu, nilai kuat tarik belah yang diperoleh cukup tinggi sehingga beton layak digunakan untuk konstruksi rigid pavement. Temuan ini menegaskan bahwa penambahan fly ash dalam proporsi terbatas mampu meningkatkan performa mekanis beton secara signifikan.

Prasetyo et al. (2023) meneliti beton berbasis PCC dengan penambahan fly ash sebesar 10–20% dan agregat daur ulang (RCA). Parameter yang diuji meliputi kuat tekan dan kuat lentur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi optimum tercapai pada 10% fly ash ditambah RCA, menghasilkan performa mekanis (tekan dan lentur) yang mendekati bahkan menyamai beton normal. Hal ini menegaskan potensi penggunaan limbah RCA dan fly ash dalam menghasilkan beton yang ramah lingkungan sekaligus memenuhi persyaratan struktural.

Studi yang diterbitkan oleh MDPI (2022) di Taiwan meneliti beton dengan pengikat berupa PCC dan fly ash (20–30%) dengan tambahan GGBFS serta superplasticizer. Parameter yang diuji mencakup kuat lentur serta kecepatan gelombang ultrasonik (UPV). Benda uji berupa balok berukuran 40×40×160 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa uji fleksural dan UPV menghasilkan korelasi yang baik, dan pemodelan dengan pendekatan neural network mampu memprediksi performa beton secara lebih akurat.



**Table 3.** Ringkasan penelitian terdahulu

Referensi (Penulis, Tahun)	Material Pengikat	Parameter yang Diuji	Hasil Penelitian
Hooton, 2012 (Constr. Build. Mater.)	RCC + FA HVFA	Flexural	Balok 100×100×600 mm; flexural meningkat sampai 20% FA, menurun setelahnya
Naik & Kraus, 2002 ( <i>Materials &amp; Structures</i> , Springer)	PCC + HVFA (50–70%)	Flexural & abrasi	Flexural strength meningkat seiring umur, korelasi kuat lentur–abrasi baik
Al-Rawas et al., 2024 (ETASR)	SCC + FA HVFA	Flexural	Balok 150×250×2000 mm; HVFA-SCC lebih daktil dibanding NC
Yuliana et al., 2024 ( <i>Jurnal Inersia PNS</i> )	PCC + FA 0–12.5%	Flexural & tarik belah	12.5% FA: kuat lentur $f_r > 3$ MPa; tekan cukup tinggi untuk paving rigid
Prasetyo et al., 2023 ( <i>Jurnal Riset Rekayasa Sipil UNS</i> )	PCC + FA 10–20% + RCA	Tekan & flexural	10% FA + RCA optimum: tekan & lentur lebih baik dibanding kontrol
MDPI study (Taiwan) on HVFGC	PCC + FA 20–30% + GGBFS + SPs	Flexural & UPV	Uji flexural (40×40×160 mm) dan UPV dilakukan; prediksi model neural network



#### 1.4 Desain konseptual

Desain konseptual penelitian ini berfokus pada pemanfaatan abu terbang (*fly ash*) sebagai material tambahan dalam campuran beton, dengan tujuan untuk meningkatkan sifat mekanik, fisik, serta durabilitas beton. Abu terbang dipilih karena ketersediaannya yang melimpah sebagai limbah industri sekaligus memiliki potensi sebagai bahan pengganti sebagian semen, sehingga mampu mendukung prinsip konstruksi berkelanjutan. Penelitian ini tidak hanya menitikberatkan pada kinerja mekanik, tetapi juga pada karakteristik fisik dan perilaku beton terhadap lingkungan. Dengan demikian, rancangan penelitian dirancang untuk menguji secara komprehensif melalui beberapa metode uji laboratorium.

Pengujian lentur dipilih untuk mengetahui kapasitas beton dalam menahan gaya transversal, yang berhubungan dengan daktilitas serta kemampuan struktur terhadap beban dinamis. Uji kecepatan gelombang ultrasonik (UPV) digunakan untuk mengevaluasi homogenitas, kualitas internal, serta indikasi adanya rongga atau retakan mikro. Selain itu, uji kekerasan permukaan dilakukan untuk menilai ketahanan lapisan luar beton terhadap degradasi awal.

Dalam aspek akustik dan porositas, penelitian ini juga mengukur tingkat kebisingan dengan koefisien absorpsi suara beton, sehingga dapat menilai potensi pemanfaatan beton berbasis abu terbang sebagai material dengan fungsi akustik. Setiap metode uji saling melengkapi untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa beton berbasis abu terbang.

Secara konseptual, penelitian ini diharapkan dapat menghubungkan antara komposisi material alternatif berupa abu terbang dengan karakteristik beton yang diuji melalui berbagai aspek mekanik, fisik, dan akustik. Hasil penelitian tidak hanya memberikan kontribusi pada pengembangan material beton yang ramah lingkungan, tetapi juga menawarkan pemahaman baru mengenai hubungan sifat mikrostruktur dengan performa makrostruktur beton. Dengan pendekatan multidimensi ini, penelitian mampu menjawab kebutuhan akan material konstruksi yang lebih berkelanjutan, efisien, dan memiliki ketahanan lebih baik dalam menghadapi tantangan lingkungan.



## 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. Mesin pencampur material (*mixer*)
5. Satu set alat pengukur *slump*
6. Cetakan berbentuk balok (30cm x 10cm x 10cm)
7. *Stopwatch*, untuk mengukur durasi pencampuran di *mixer*
8. Timbangan, untuk mengukur komposisi campuran beton
9. Ultrasonic Pulse Velocity Tester



1



2



3



4



5



6



7



8



9

**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 Pengujian Karakteristik Material

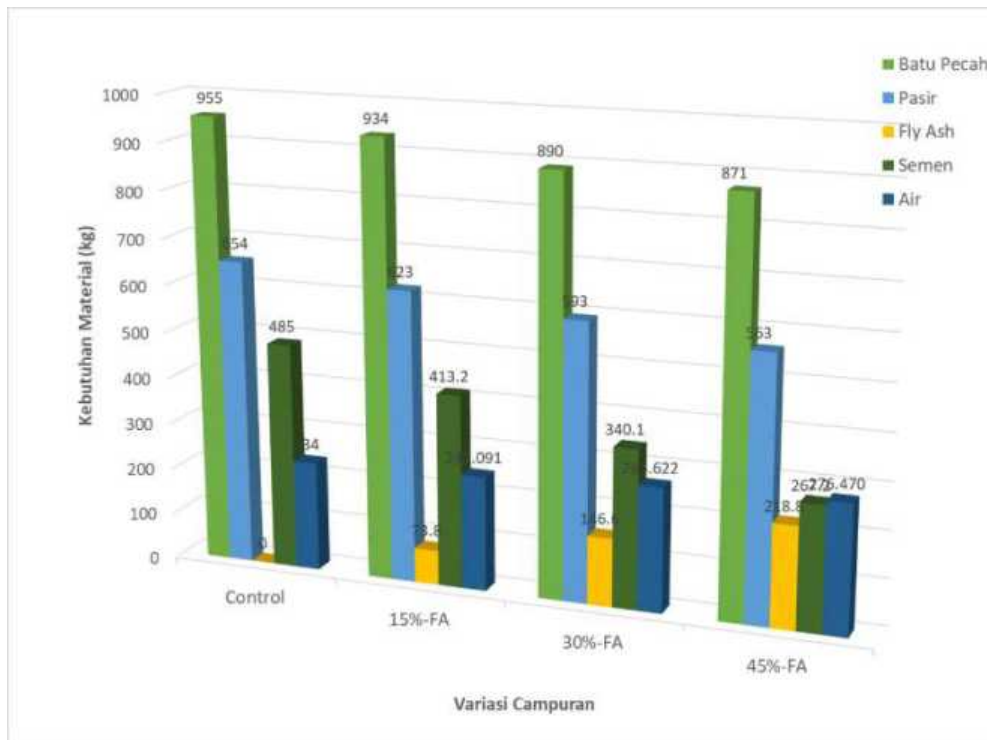
Pengujian karakteristik material beton berbasis fly ash mencakup pemeriksaan sifat kimia dan fisiknya. Analisis komposisi kimia abu terbang dilakukan menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF). Sementara itu, pengujian sifat fisik meliputi penentuan berat jenis, penyerapan air, dan analisis gradasi 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 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 4.** Komposisi campuran beton (kg/m<sup>3</sup>)

Mix	Air			Semen	Fly Ash	Pasir	Batu Pecah	Volume	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 6.** Grafik komposisi campuran beton ( $\text{kg/m}^3$ )

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

**Tabel 5.** Jumlah benda uji

Jenis Variasi	Waktu Pengujian	Dimensi benda uji	Jenis pengujian	Jumlah benda uji
<b>Control</b>	28 Hari	30 cm x 10 cm x 10 cm	Kuat Lentur, UPV	3
<b>15% FA</b>		30 cm x 10 cm x 10 cm	Kuat Lentur, UPV	3
<b>30% FA</b>		30 cm x 10 cm x 10 cm	Kuat Lentur, UPV	3
<b>45% FA</b>		30 cm x 10 cm x 10 cm	Kuat Lentur, UPV	3
<b>Jumlah</b>				<b>12</b>

### 2.7.2 Metode Perawatan (Curing) Benda Uji

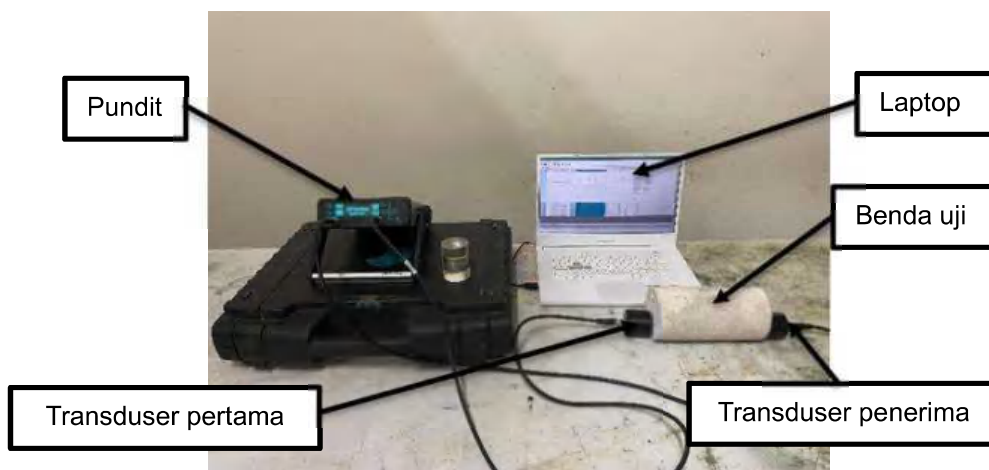
Perawatan (curing) dilakukan dengan merendam benda uji ke dalam bak berisi air untuk memastikan proses pengikatan campuran beton berlangsung secara optimal. Proses perendaman ini dilakukan sesuai umur rencana pengujian beton, yaitu pada usia 28 hari.



### 2.7.3 Pengujian UPV

Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) pada beton dilaksanakan mengacu pada standar ASTM C597. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk menentukan kecepatan rambat gelombang ultrasonik longitudinal yang melalui beton, sehingga dapat digunakan untuk menilai homogenitas serta mutu beton secara non-destruktif. Prosedur pengujian UPV adalah sebagai berikut:

- 1) Menyiapkan peralatan UPV, dalam hal ini menggunakan Proceq Pundit Lab+, dengan memasang transduser penerima dan penguat sinyal (amplifier).
- 2) Mengoleskan gel pada permukaan sampel beton di titik kontak transduser untuk memastikan transmisi gelombang yang optimal dan untuk kalibrasi.
- 3) Melakukan pembacaan kecepatan perambatan gelombang menggunakan alat yang telah disiapkan.
- 4) Mencatat hasil pembacaan kecepatan gelombang sebagai data evaluasi kualitas beton.



**Gambar 7.** Pengujian *ultrasonic pulse velocity* (UPV)



#### 2.7.4 Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur ini bertujuan untuk menentukan nilai kuat lentur beton menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 30 cm × 10 cm × 10 cm yang ditempatkan di atas dua titik tumpuan. Beban diberikan secara bertahap pada bagian tengah bentang hingga balok menunjukkan keretakan atau mengalami kegagalan.

Dalam penelitian ini, alat uji yang digunakan adalah Tokyo Testing Machine (TTM) dengan kapasitas maksimum 1000 kN. Besarnya beban lentur yang diterima oleh balok diukur dan divalidasi menggunakan load cell dengan kapasitas 500 kN. Nilai kuat lentur beton ditentukan berdasarkan tegangan lentur maksimum yang menyebabkan keruntuhan. Pengujian dilakukan terhadap masing-masing variasi menggunakan tiga balok uji, dan hasilnya diambil rata-rata. Seluruh pengujian dilakukan pada balok beton yang telah mencapai umur 28 hari.



**Gambar 8.** Pengujian kuat lentur