

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pembangunan gedung, jembatan, dan infrastruktur lainnya. Kualitas beton sangat berpengaruh terhadap kekuatan dan keamanan suatu struktur. Oleh karena itu, pengujian mutu beton menjadi hal yang sangat penting, baik pada tahap perencanaan maupun setelah bangunan digunakan.

Pengujian mutu beton dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu pengujian destruktif dan pengujian non-destruktif. Pengujian destruktif, seperti uji kuat tekan beton, memerlukan pengambilan benda uji dan dapat merusak struktur. Sebaliknya, metode non-destruktif dapat digunakan tanpa merusak beton sehingga lebih praktis dan efisien untuk evaluasi beton di lapangan (Nugroho et al., 2020).

Dua metode non-destruktif yang sering digunakan adalah *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dan *Schmidt Hammer*. Metode UPV bekerja dengan mengukur kecepatan rambat gelombang ultrasonik pada beton untuk mengetahui tingkat kerapatan dan homogenitas beton (Hanif et al., 2024). Sementara itu, metode Schmidt Hammer digunakan untuk memperkirakan kuat tekan beton berdasarkan nilai pantulan palu pada permukaan beton (Robandi, 2025). Kedua metode ini banyak digunakan karena pelaksanaannya cepat dan relatif mudah.

Seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap isu lingkungan, penggunaan abu terbang (*fly ash*) sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam campuran beton semakin banyak diteliti. *Fly ash* merupakan limbah hasil pembakaran batu bara yang memiliki sifat pozolanik dan dapat meningkatkan keawetan beton serta mengurangi penggunaan semen (Chandak et al., 2022). Namun, penambahan *fly ash* dapat mempengaruhi karakteristik beton, baik dari segi kuat tekan maupun struktur internalnya.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dapat mempengaruhi hasil pengujian non-destruktif, khususnya nilai UPV dan *Schmidt Hammer* (Rada & Aji, 2025). Oleh karena itu, diperlukan evaluasi lebih lanjut untuk mengetahui sejauh mana metode UPV dan Schmidt Hammer masih akurat dalam menilai mutu beton yang menggunakan abu terbang.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja metode non-destruktif UPV dan *Schmidt Hammer* pada beton yang menggunakan abu terbang. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian non-destruktif dengan hasil uji kuat tekan beton sebagai acuan. Dengan adanya perbandingan tersebut, diharapkan dapat diketahui tingkat keakuratan dan hubungan antara nilai UPV dan nilai Schmidt Hammer pada beton yang mengandung *fly ash*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam penggunaan metode non-destruktif yang lebih tepat untuk menilai mutu beton ramah lingkungan, khususnya pada pemeriksaan struktur beton di lapangan tanpa merusak elemen struktur.

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 UPV?
2. Bagaimana pengaruh variasi presentase abu terbang sebagai pengganti semen terhadap sifat mekanik beton yang diukur melalui uji Schmidt Hammer?
3. Bagaimana hubungan antara hasil uji Schmidt Hammer dengan hasil kecepatan gelombang ultrasonic (UPV) ?

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 UPV dan Schmidt Hammer.
2. Menganalisis hubungan antara hasil uji Schmidt Hammer dengan hasil uji kecepatan gelombang ultrasonic (UPV) menggunakan beton yang mengandung abu terbang.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian diharapkan dapat mendukung pengembangan penggunaan abu terbang sebagai material alternatif pada konstruksi sipil serta berkontribusi dalam mengurangi dampak lingkungan akibat pemanfaatan 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 dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Struktur dan Bahan, Universitas Hasanuddin.
2. Abu terbang yang digunakan merupakan limbah PLTU yang berasal dari Kabupaten Jeneponto, Kecamatan Bangkala, Desa Punagayya, Sulawesi Selatan.
3. Benda uji yang digunakan berupa beton silinder untuk pengujian kecepatan gelombang ultrasonic (UPV) dan Schmidt Hammer.
4. Variasi campuran abu terbang sebagai pengganti semen dibatasi pada presentase tertentu yaitu 0%, 15%, 30% dan 45%.
5. Pengujian dilakukan pada umur beton 28 hari dengan kondisi perawatan (curing) menggunakan air.
6. Seluruh pengujian dilaksanakan di laboratorium sesuai dengan standar pengujian yang berlaku, sehingga hasil yang diperoleh diharapkan akurat dan dapat dipertanggungjawabkan.

1.2 Teori

1.2.1 Beton

Beton merupakan material berbasis semen yang paling banyak dimanfaatkan dalam bidang teknik sipil dan teknik lingkungan. Material ini menjadi komponen utama dalam pembangunan infrastruktur modern karena memiliki biaya yang relatif ekonomis, mudah dicetak sesuai kebutuhan, serta menunjukkan kinerja yang baik, khususnya dalam hal kuat tekan, ketahanan terhadap masuknya air, dan kestabilan termal (Madraszewski, 2022). Selain itu, beton dapat diproduksi langsung di lokasi konstruksi dengan menggunakan peralatan yang mudah diperoleh, serta dapat dicetak sesuai bentuk yang direncanakan, sehingga penggunaannya sangat fleksibel pada berbagai jenis struktur. Menurut Tayebani et al. (2023), beton merupakan material komposit yang bersifat serbaguna dan mengalami peningkatan kekuatan seiring bertambahnya umur, sehingga banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur di berbagai negara. Beton tersusun dari campuran semen, agregat, air, dan bahan tambah yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan struktur tertentu. Kombinasi bahan tersebut menghasilkan material konstruksi yang memiliki kinerja stabil dan dapat diandalkan dalam jangka waktu yang panjang.

Meskipun memiliki berbagai keunggulan, beton juga mempunyai beberapa keterbatasan yang berpengaruh terhadap sifat mekanis dan daya tahannya. Alex et al. (2022) menyatakan bahwa kelemahan utama beton meliputi sifat getas, ketahanan yang rendah terhadap terjadinya retak, kuat tarik yang relatif kecil, serta kemampuan regangan yang terbatas. Sifat getas ini menyebabkan beton mudah mengalami kerusakan ketika menerima beban tarik, , maupun beban dinamis yang melampaui kapasitasnya. Oleh karena itu, dalam penerapannya, beton umumnya dikombinasikan dengan material lain seperti baja tulangan untuk meningkatkan kinerja mekanisnya, terutama pada bagian struktur yang mengalami dominasi gaya tarik. Di sisi lain, semen sebagai bahan pengikat utama dalam campuran beton memiliki peranan yang sangat penting dalam menentukan sifat fisik dan kimia beton (Alex et al., 2022). Hal ini disebabkan proses hidrasi semen yang membentuk matriks pengikat antar agregat, sehingga berpengaruh langsung terhadap 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 asar didefinisikan sebagai material granural yang memiliki ukuran butiran lebih besar dari 4,75 mm (atau lolos ayakan No. 4). Agregat kasar termasuk kerikil, batu pecah, dan material sejenis lainnya yang digunakan dalam campuran beton. ASTM C33 merupakan standar spesifikasi untuk agregat beton, menetapkan berbagai persyaratan untuk agregat kasar, termasuk karakteristik fisik, kimia, dan mekanik yang harus dipenuhi agar agregat tersebut dapat digunakan dalam campuran beton dan menghasilkan kualitas beton yang optimal. Beberapa persyaratan yang diatur dalam ASTM C33 mencakup antara lain:

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

Tabel 1. Gradasi agregat kasar (ASTM C33)

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

Sumber: ASTM C33

1.2.2.1.1 Agregat Halus

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

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

perubahan volume yang signifikan saat digunakan dalam campuran beton.

Tabel 2. Gradasi agregat halus

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

Sumber: SNI 03-2834-2000 dan ASTM C33

1.2.2.2 Semen

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

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

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

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

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

Semen Portland yang dipakai untuk struktur harus mempunyai kualitas tertentu yang telah ditentukan agar dapat berfungsi secara efektif. Pemeriksaan secara berkala perlu dilakukan, baik masih berbentuk bubuk kering maupun yang pasta. Secara umum, ada 4 senyawa kimia utama yang menyusun semen portland, yaitu:

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

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

1.2.2.3 Fly Ash

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

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

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

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

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

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

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

1.2.2.4 Air

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

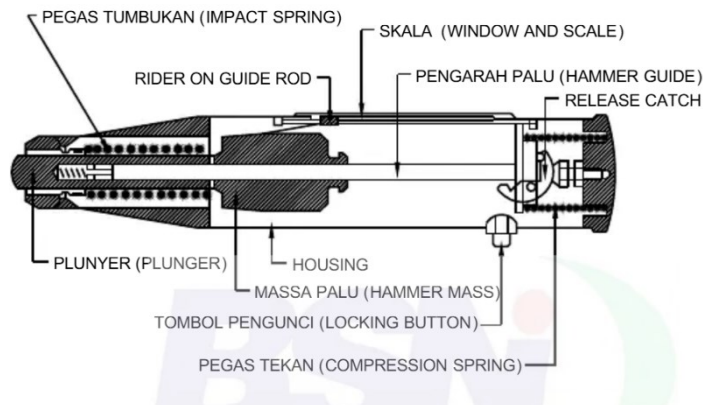
1.2.3 Rancangan Campuran Beton

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

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

1.2.4 Schmidt Hammer

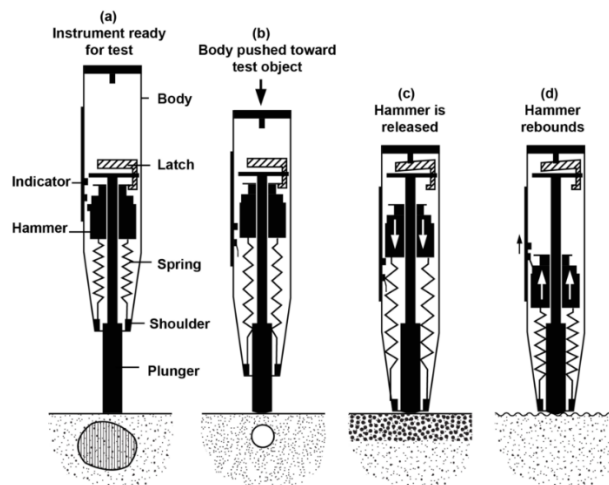
Pengujian Schmidt Hammer atau Rebound Hammer Test merupakan metode uji tidak merusak (Non-Destructive Test/NDT) yang digunakan untuk menentukan angka pantul (rebound number) dari permukaan beton keras. Di Indonesia, tata cara pengujian ini mengacu pada SNI ASTM C805:2012 – Metode Uji Angka Pantul Beton Keras, yang merupakan adopsi dari standar internasional ASTM C805/C805M. SNI ASTM C805:2012 menyatakan bahwa pengujian angka pantul dapat dilakukan pada struktur beton eksisting maupun benda uji beton di laboratorium, termasuk benda uji silinder beton. Prinsip pengujian didasarkan pada pemantulan massa pegas dari alat Schmidt Hammer terhadap permukaan beton, di mana nilai pantulan yang dihasilkan berkorelasi dengan kekerasan permukaan beton. Besarnya pantulan ini dinyatakan sebagai angka pantul, yang kemudian digunakan untuk memperkirakan mutu beton. Pengujian Schmidt Hammer bertujuan untuk menilai keseragaman mutu beton pada suatu elemen atau benda uji memberikan perkiraan awal nilai kuat tekan beton keras dan membantu evaluasi mutu beton eksisting tanpa merusak struktur. Pengujian ini tidak dimaksudkan sebagai pengganti uji tekan beton, melainkan sebagai metode pendukung atau evaluasi awal.



Gambar 1. Contoh Palu Pantul (SNI ASTM C805:2012)

Sumber: SNI ASTM C805:2012

SNI 03-4430-1997 mengatur bahwa permukaan beton yang diuji harus bersih, kering, dan bebas dari lapisan lepas. Alat Schmidt Hammer ditempatkan tegak lurus terhadap permukaan beton, kemudian ditekan hingga terjadi pemukulan. Pengujian dilakukan pada beberapa titik pengukuran dalam satu area uji. Jumlah titik uji yang dianjurkan minimal 10-12 titik untuk satu area pengujian. Nilai pantul yang menyimpang secara signifikan harus diabaikan, kemudian dihitung nilai rata-rata angka pantul sebagai representasi mutu beton pada area tersebut



Gambar 2. Skema ilustrasi pengujian rebound hammer

Sumber: ACI Committee 228 Report

Pengujian Schmidt Hammer merupakan salah satu metode Non-Destructive Test (NDT) yang digunakan untuk memperkirakan mutu dan kuat tekan beton tanpa merusak benda uji. Berdasarkan SNI ASTM C805:2012 – Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete, pengujian ini bertujuan untuk memperoleh nilai angka pantul (rebound number) yang berkaitan dengan kekerasan permukaan beton, yang selanjutnya dapat digunakan sebagai indikasi kuat tekan beton.

Menurut SNI ASTM C805:2012, prinsip pengujian Schmidt Hammer didasarkan pada hubungan empiris antara kekerasan permukaan beton dan kuat tekan beton. Ketika alat Schmidt Hammer ditekan tegak lurus ke permukaan beton, pegas di dalam alat akan mendorong massa pemukul yang kemudian memantul kembali setelah menumbuk beton. Jarak pantulan ini dinyatakan sebagai nilai rebound. Beton dengan permukaan lebih keras akan menghasilkan nilai rebound yang lebih tinggi. Namun demikian, standar ini menegaskan bahwa nilai rebound bukan merupakan ukuran langsung kuat tekan beton, melainkan hanya sebagai indikator mutu beton yang perlu dikorelasikan dengan hasil uji tekan atau kurva kalibrasi yang sesuai.

Nilai rebound rata-rata yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan kurva kalibrasi atau dikorelasikan dengan hasil uji tekan beton. SNI ASTM C805:2012 menekankan bahwa hasil pengujian ini sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti umur beton, kondisi kelembaban permukaan, jenis agregat, serta arah pengujian. Oleh karena itu, penggunaan Schmidt Hammer lebih tepat sebagai alat evaluasi awal mutu beton atau untuk membandingkan keseragaman beton, bukan sebagai pengganti uji tekan destruktif.

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa terdapat korelasi positif antara nilai rebound Schmidt Hammer dan kuat tekan beton silinder. Penelitian oleh *Malhotra dan Carino* menunjukkan bahwa Schmidt Hammer efektif digunakan untuk menilai keseragaman beton, namun akurasi meningkat secara signifikan jika dikombinasikan dengan pengujian lain seperti Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).

Penelitian lain oleh *Kheder (1999)* menyimpulkan bahwa korelasi antara rebound number dan kuat tekan beton sangat dipengaruhi oleh jenis agregat dan mutu beton, sehingga diperlukan kalibrasi lokal. Studi eksperimental pada beton silinder oleh *Brozovsky (2014)* juga menunjukkan bahwa Schmidt Hammer memberikan hasil yang cukup konsisten untuk beton mutu menengah, tetapi cenderung kurang akurat pada beton mutu tinggi.

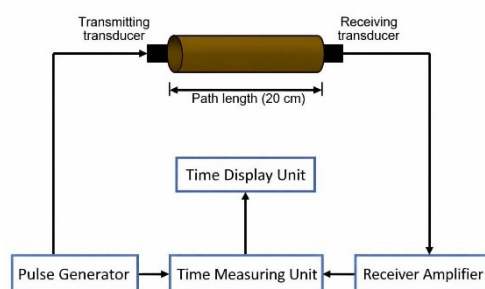
Berdasarkan SNI ASTM C805:2012 dan hasil penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa pengujian Schmidt Hammer pada beton silinder merupakan metode NDT yang praktis dan efisien untuk evaluasi mutu beton, namun penggunaannya harus disertai dengan pengujian lain atau data kalibrasi agar hasil yang diperoleh lebih andal.

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,).

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 Schmidt Hammer beton, di mana penurunan kecepatan gelombang seiring peningkatan kerusakan internal mencerminkan penurunan kemampuan 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 Schmidt Hammer. Temuan lain oleh Mohamed dan Najm (2017) juga menekankan bahwa hubungan UPV dengan sifat mekanis, termasuk Schmidt Hammer, cukup kuat untuk menjadikannya alat evaluasi struktural non-destruktif pada beton normal maupun beton ringan.



Gambar 3. Skema Pengujian UPV

1.3 Penelitian terdahulu

Barluenga et al., 2018 meliti bahwa penggunaan fly ash pada Self-Compacting Concrete (SCC) sangat dipengaruhi oleh rasio air-pengikat, kondisi curing, dan metode pelaksanaan di lapangan. Pada kondisi panas-kering dan skala nyata, peningkatan rasio air-pengikat serta proses pumping menyebabkan peningkatan porositas, terutama di zona transisi antarmuka (ITZ), yang berdampak pada penurunan kuat tekan dan nilai Ultrasonic Pulse Velocity (UPV). Meskipun pumping mempercepat hidrasi pada umur dini, efek akhirnya justru menurunkan

kualitas mikrostruktur beton akibat meningkatnya mezzo-porosity dan permeabilitas udara. Hasil ini menegaskan bahwa parameter NDT seperti UPV dan (secara konseptual) Schmidt Hammer sangat sensitif terhadap perubahan mikrostruktur beton, sehingga perlu dikombinasikan dengan evaluasi kondisi produksi dan curing untuk memperoleh estimasi mutu beton yang lebih andal. 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.

Penel bahwa penggunaan fly ash sebagai material pengikat parsial pada beton berpengaruh signifikan terhadap nilai Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) dan kuat tekan beton. Pada umur awal, beton dengan kandungan fly ash tinggi cenderung memiliki nilai UPV dan kuat tekan lebih rendah akibat lambatnya reaksi pozzolan, namun pada umur lanjut nilai UPV meningkat seiring terbentuknya produk hidrasi sekunder berupa C–S–H yang memperpadat mikrostruktur beton dan menurunkan porositas. Hubungan yang kuat antara UPV dan kuat tekan membuktikan bahwa metode non-destruktif ini efektif untuk mengevaluasi kualitas internal beton fly ash, terutama bila digunakan bersama metode lain seperti Schmidt Hammer sesuai rekomendasi standar SNI ASTM, sehingga estimasi mutu beton menjadi lebih andal. Yuliana et al. (2024) meneliti beton dengan campuran PCC dan fly ash sebesar 0–12,5% yang diuji melalui pengujian serta tarik belah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran dengan 12,5% fly ash menghasilkan Schmidt Hammer 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 Schmidt Hammer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi optimum tercapai pada 10% fly ash ditambah RCA, menghasilkan performa mekanis (tekan dan) 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 Schmidt Hammer 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
Lekhya & Kumar, 2024 (Constr. Build. Mater.)	OPC + UFFA 10% + 15% SF	UPV dan Rebound Number	Campuran optimum dengan kuat tekan 104,28 MPa (90 hari); RN tertinggi (~60) menunjukkan permukaan sangat keras; UPV $\pm 5,28$ km/s (mutu sangat baik); absorpsi air turun hingga $\pm 45\%$; struktur mikro sangat padat akibat pembentukan C–S–H tambahan.
Mohammed et al., 2018 (<i>Application in Engineering Science</i>)	OPC + HVFA 50%	Kuat tekan, UPV dan Rebound Number	Penggunaan HVFA menurunkan kuat tekan, RN, dan UPV, terutama pada umur awal, akibat reaksi pozzolan fly ash yang lambat dan meningkatnya porositas beton.
Shariq et al., 2025 (<i>Cement & Concrete Composites</i>)	OPC + FA	Kuat tekan, UPV dan Rebound Number	Penambahan fly ash menurunkan kuat tekan dan RN pada umur awal, namun pada umur lanjut nilai UPV dan RN meningkat akibat reaksi pozzolan yang membentuk C–S–H tambahan.
Barluenga et al., 2018 (Constr. Build. Mater.)	OPC + FA	Kuat tekan, UPV, porositas, permeabilitas	Kondisi panas–kering pada skala nyata meningkatkan kebutuhan air, memperbesar porositas dan menurunkan kuat tekan serta parameter ultrasonik.
Rao et al., 2016 (<i>Journal of pavement Research</i>)	OPC + FA 10–20%	UPV	Substitusi fly ash hingga $\pm 15\%$ menghasilkan peningkatan UPV dan kuat tekan pada umur 28 hari akibat reaksi pozzolan yang membentuk C–S–H tambahan dan memperbaiki mikrostruktur beton.
MDPI Study, 2022 (<i>Journal of Building Engineering</i>)	PCC + FA 20-30% + GGBFS + SPs	UPV	uji fleksural dan UPV menghasilkan korelasi yang baik, dan pemodelan dengan pendekatan neural network mampu memprediksi performa beton secara lebih akurat.

1.4 Desain konseptual

Desain konseptual penelitian ini menitikberatkan pada pemanfaatan abu terbang (*fly ash*) sebagai bahan tambahan dalam campuran beton dengan tujuan meningkatkan sifat mekanik, karakteristik fisik, serta durabilitasnya. Abu terbang dipilih karena ketersediaannya yang melimpah sebagai limbah industri dan potensinya sebagai substitusi sebagian semen, sehingga dapat mendukung konsep konstruksi berkelanjutan. Penelitian ini tidak hanya berfokus pada kinerja mekanik, tetapi juga mengkaji sifat fisik serta respons beton terhadap pengaruh lingkungan. Oleh karena itu, desain penelitian disusun untuk melakukan pengujian secara menyeluruh melalui berbagai metode uji laboratorium.

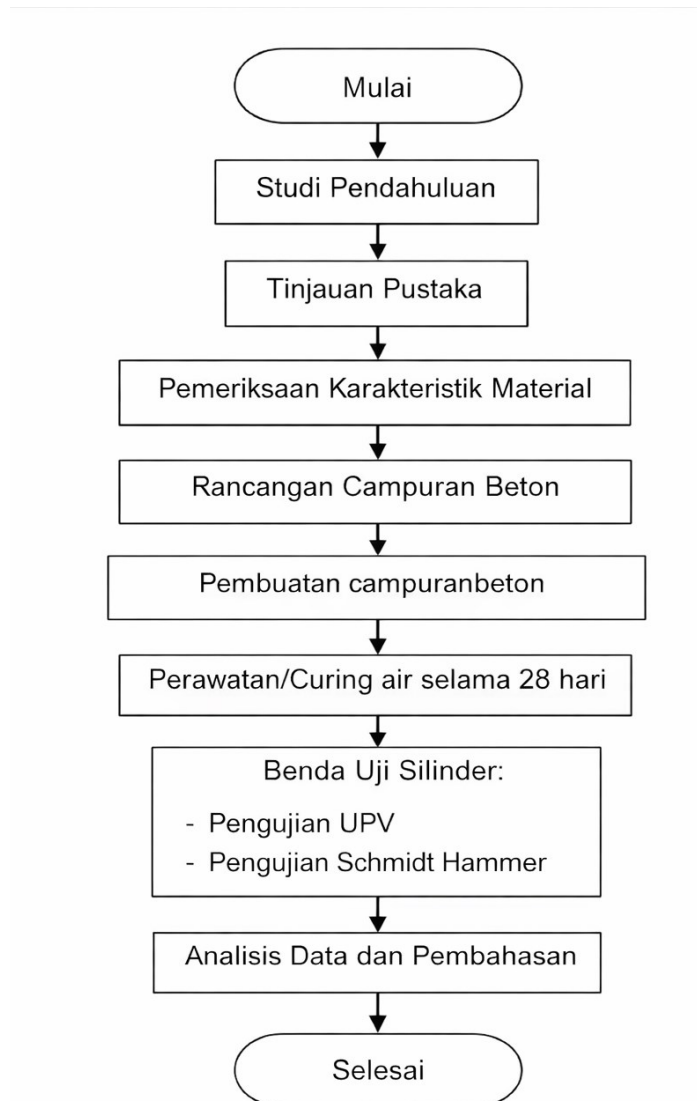
Pengujian Schmidt Hammer dipilih untuk mengetahui tingkat kekerasan permukaan beton yang berkorelasi dengan kuat tekan beton, serta digunakan untuk mengevaluasi kualitas dan keseragaman beton secara non-destruktif. Uji kecepatan gelombang ultrasonik (UPV) digunakan untuk mengevaluasi homogenitas, kualitas internal, serta indikasi adanya rongga atau retakan mikro. Selain itu, uji kekerasan permukaan dilakukan untuk menilai ketahanan lapisan luar beton terhadap degradasi awal.

Dalam kajian aspek akustik dan porositas, penelitian ini turut mengevaluasi tingkat kebisingan melalui pengukuran koefisien serapan suara pada beton, sehingga dapat diketahui potensi beton berbasis abu terbang sebagai material yang memiliki fungsi akustik. Setiap metode pengujian yang digunakan saling melengkapi guna memberikan gambaran yang komprehensif terhadap kinerja beton berbasis abu terbang.

Secara konseptual, penelitian ini diarahkan untuk mengkaji keterkaitan antara penggunaan abu terbang sebagai material alternatif dengan karakteristik beton yang ditinjau dari aspek mekanik, fisik, dan akustik. Hasil yang diperoleh diharapkan tidak hanya berkontribusi pada pengembangan beton yang lebih ramah lingkungan, tetapi juga memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai hubungan antara sifat mikrostruktur dan kinerja makrostruktur beton. Melalui pendekatan multidimensional ini, penelitian diharapkan mampu menjawab kebutuhan akan material konstruksi yang lebih berkelanjutan, efisien, serta memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh lingkungan.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Bagan Alir Penelitian



Gambar 4. 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. Mesin pencampur material (*mixer*)
2. Satu set alat pengukur *slump*
3. Cetakan berbentuk silinder (10cm x 20cm)
4. *Stopwatch*, untuk mengukur durasi pencampuran di *mixer*
5. Timbangan, untuk mengukur komposisi campuran beton
6. Ultrasonic Pulse Velocity Tester
7. Schmidt Hammer



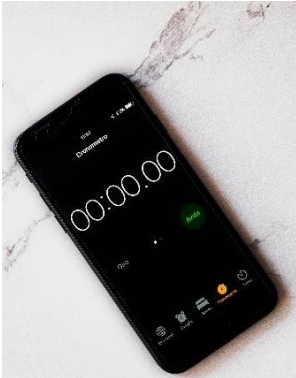
1



2



3



4



5



6



7

Gambar 5. 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 6. 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

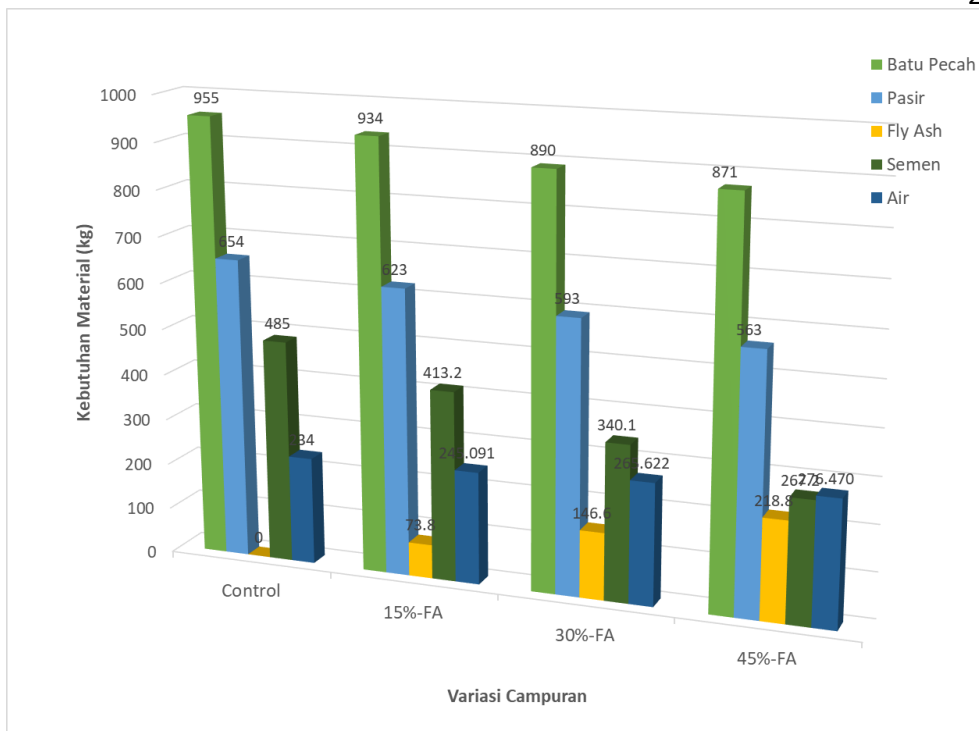
Hasil *trial mix* untuk komposisi campuran beton dengan tambahan abu terbang sebagai pengganti semen PCC dapat dilihat pada tabel 9. Pada komposisi campuran dilakukan kombinasi campuran dengan penambahan fly ash sebesar 15%, 30% dan 45% sebagai pengganti semen.

Tabel 4. Komposisi campuran beton (kg/m³)

Mix	Air			Semen	Fly Ash	Pasir	Batu Pecah	Volume	W/ (C+FA)	Slump
	Awal	Tambahan	Total							
Control	234	0	234	485	0	654	955	2328	0.48	14
15%-FA	234	11.091	245.09	413.2	73.8	623	934	2289.1	0.50	14
30%-FA	234	31.622	265.62	340.1	146.6	593	890	2235.3	0.55	14
45%-FA	234	42.470	276.470	267.2	218.8	563	871	2196.5	0.57	14

Tabel 5. Komposisi campuran beton (m³)

Mix	Air			Semen	Fly Ash	Pasir	Batu Pecah	Volume
	Awal	Tambahan	Total					
Control	0.234	0	0.234	0.154	0	0.252	0.3604	1.000
15%-FA	0.234	0.011	0.245	0.131	0.031	0.240	0.3525	1.000
30%-FA	0.234	0.032	0.266	0.108	0.062	0.228	0.3358	1.000
45%-FA	0.234	0.042	0.276	0.085	0.093	0.217	0.3287	1.000



Gambar 7. Grafik komposisi campuran beton (kg/m³)

2.7 Prosedur Eksperimental

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

2.7.1 Metode Pembuatan Benda Uji Beton

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

1. Persiapan Material
 - a. Menyiapkan bahan campuran beton dalam wadah terpisah dengan kondisiagregat 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 6. Jumlah benda uji

Jenis Variasi	Waktu Pengujian	Dimensi benda uji	Jenis pengujian	Jumlah benda uji
Control		10 cm x 20 cm	Schmidt Hammer, UPV	3
15% FA	28 Hari	10 cm x 20 cm	Schmidt Hammer, UPV	3
30% FA		10 cm x 20 cm	Schmidt Hammer, UPV	3
45% FA		10 cm x 20 cm	Schmidt Hammer, UPV	3
Jumlah				12

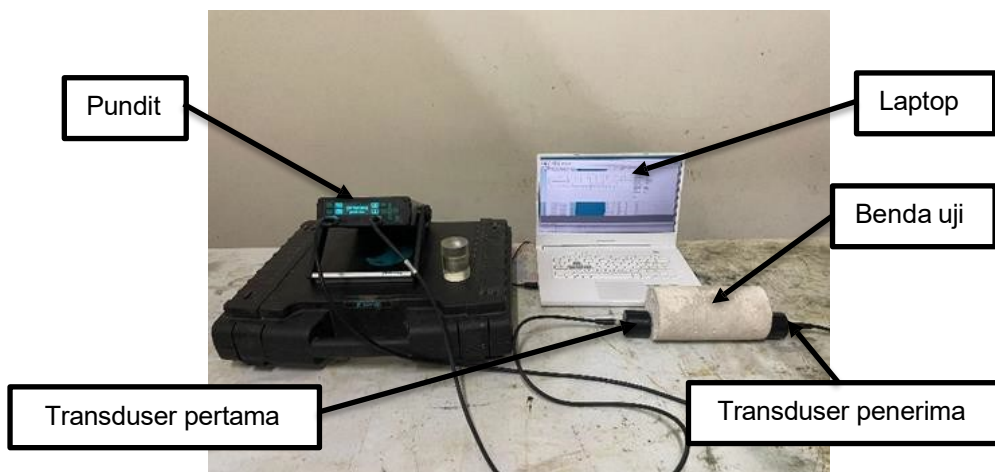
2.7.2 Metode Perawatan (Curing) Benda Uji

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

2.7.3 Pengujian 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.

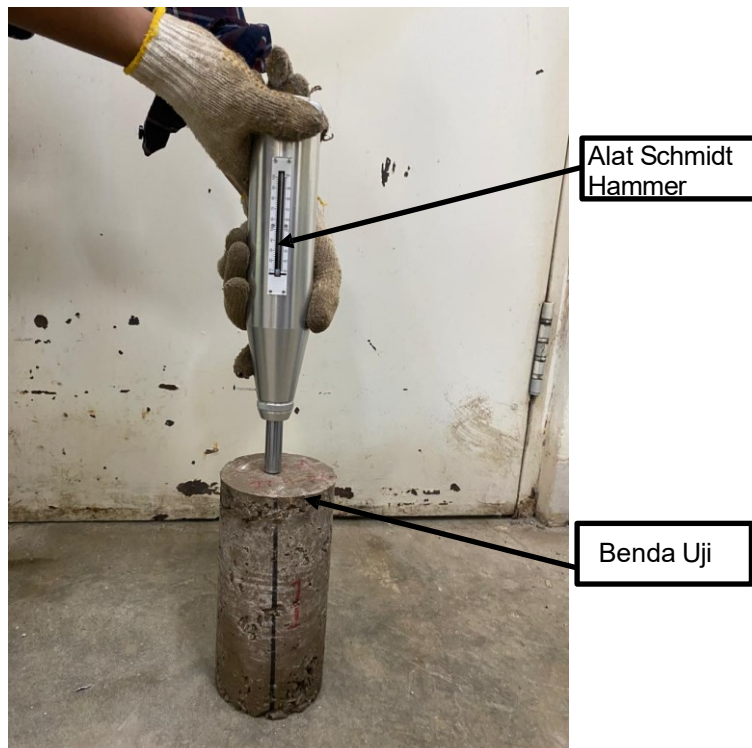


Gambar 8. Pengujian *ultrasonic pulse velocity* (UPV)

2.7.4 Pengujian Schmidt Hammer

Pengujian Schmidt Hammer bertujuan untuk menilai keseragaman mutu beton pada suatu elemen atau benda uji memberikan perkiraan awal nilai kuat tekan beton keras dan membantu evaluasi mutu beton eksisting tanpa merusak struktur. Pada pengujian kali ini menggunakan benda uji silinder dengan ukuran 10 cm x 20 cm. Pengujian ini tidak dimaksudkan sebagai pengganti uji tekan beton, melainkan sebagai metode pendukung atau evaluasi awal.

Pada pengujian Schmidt Hammer ini dilakukan pada struktur beton eksisting maupun pada benda uji beton di laboratorium, termasuk benda uji silinder beton. Pada penelitian laboratorium, pengujian dilakukan setelah beton mencapai umur rencana, yaitu 28 hari, dengan kondisi permukaan beton yang bersih, kering, dan bebas dari kotoran atau partikel lepas. Alat Schmidt Hammer ditempatkan tegak lurus terhadap permukaan beton, kemudian ditekan hingga terjadi pemukulan. Pengujian dilakukan pada beberapa titik yang tersebar merata, dengan jumlah titik uji 12 titik untuk memperoleh hasil yang representatif.



Gambar 9. Pengujian Schmidt Hammer