

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi membawa pengaruh yang signifikan terhadap semua aspek kehidupan manusia. Termasuk diantaranya di bidang konstruksi Teknik sipil. Dalam bidang konstruksi, beton merupakan salah satu elemen yang paling mendapat perhatian. Beton sangat populer dan umum digunakan untuk membangun berbagai infrastruktur di kalangan masyarakat.

Beton Konvensional terdiri atas agregat kasar, agregat halus, Semen Portland (SP), dan air. Beton jenis ini umum ditemui di masyarakat dan dapat diproduksi dengan metode sederhana. Seiring dengan meningkatnya penggunaan material beton, terdapat beberapa faktor penting yang harus diperhatikan antara lain keawetan material beton (durabilitas) dan isu global tentang kerusakan lingkungan akibat produksi Semen Portland.

Beberapa tahun belakangan ini, para ahli material konstruksi bangunan melakukan berbagai penelitian tentang beton. Salah satu penelitian yang dilakukan adalah tentang Beton Geopolymer. Beton Geopolymer adalah beton yang dibuat tanpa menggunakan semen portland sebagai bahan pengikat, sebagai pengganti semen Portland digunakan *Fly Ash* dicampur dengan alkalin aktivator. Beton Geopolymer dengan bahan dasar *Fly Ash* merupakan beton yang ramah lingkungan (environmentally friendly).

Fly Ash adalah material hasil sampingan (by-product) industri, dalam hal ini dihasilkan dari pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Abu terbang dikategorikan dalam material "pozzolon" yakni material siliceous atau aluminous yang didalamnya terdapat sedikit sekali atau tidak sama sekali material cementious seperti yang ada pada semen Portland. Material ini dapat bereaksi secara kimia dengan cairan alkalin pada temperatur tertentu untuk membentuk material campuran yang memiliki sifat seperti semen.

Ditinjau dari segi mekaniknya, beton mempunyai kuat tarik yang relatif lebih rendah dari kuat tekannya. Presentase kekuatan tarik beton sekitar 10% - 15% terhadap kekuatan tekannya. Untuk menanggulangi kelemahan pada beton ini maka digunakan tulangan baja. Walaupun kuat tarik beton tidak digunakan dalam perencanaan beton bertulang, namun kuat tarik beton berperan dalam meminimalisir retakretak pada beton sehingga tidak terjadi korosi pada tulangan baja yang disebabkan oleh air yang masuk.

Kekuatan beton dapat diuji dalam dua cara yaitu pengujian laboratorium dan pengujian lapangan. Beton menjadi komponen utama struktural yang mampu menahan dan mendistribusikan seluruh beban-beban dalam suatu bangunan. Maka perlu dilakukan pengujian terhadap beton tersebut dengan non destructive test atau pengujian tanpa merusak benda uji. Metode yang umum dipakai untuk pengujian beton insitu tanpa merusak strukturnya atau non-destructive test (NDT) salah satunya adalah menggunakan Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).

Alat yang digunakan dalam pengujian UPV disebut Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester (PUNDIT). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui korelasi antara UPV dengan kuat lentur beton. Dari hasil penelitian tersebut maka diperoleh rumus empiris untuk memprediksi kuat tekan beton dengan menggunakan data uji UPV. Dari hasil UPV maka dapat diprediksi kuat tekan beton dan kuat lentur balok beton. Dengan adanya penelitian-penelitian tersebut, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai korelasi antara UPV dengan kuat lentur beton.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang terkait, maka rumusan masalah yang dapat di ambil sebagai berikut:

1. Bagaimana kualitas beton sebelum dan setelah menggunakan FA sebagai substitusi semen?
2. Bagaimana hubungan antara beban dan lendutan beton yang menggunakan FA sebagai substitusi semen dan yang tidak?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Berdasarkan rumusan masalah yang di ambil, tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Menganalisis kualitas beton sebelum dan setelah menggunakan FA sebagai substitusi semen.
2. Menganalisis hubungan antara beban dan lendutan beton yang menggunakan FA sebagai substitusi semen dan yang tidak.

1.4 Manfaat Penelitian

Dari penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat bagi perkembangan teknologi beton, antara lain sebagai berikut:

1. Memperluas ilmu di bidang Teknik Sipil, khususnya tentang inovasi beton FA mengingat jumlah penggunaan batu bara dan produksi emisi CO₂ yang terus saja meningkat seiring waktu.
2. Dapat menjadi bahan para pelaku dunia konstruksi untuk semakin mempertimbangkan penggunaan FA sebagai material konstruksi.
3. Memberi gambaran akan kualitas beton yang meningkat sebab penggunaan FA dengan rancangan campuran yang tepat.
4. Dapat menjadi referensi bagi penelitian-penelitian selanjutnya untuk kemudian semakin dikembangkan.
5. Penelitian ini juga merupakan bagian dari tugas akhir jenjang Strata 1 bidang Teknik Sipil sebagai persyaratan penulis untuk memperoleh gelar sarjana teknik sehingga penulis dapat secara kredibel dengan ilmunya memberi kontribusi kepada masyarakat.

1.5 Ruang Lingkup

Agar penelitian berjalan dengan baik dan terarah, maka penulis memberikan batasan masalah dalam melaksanakan penelitian, sebagai berikut:

1. Bahan yang digunakan adalah *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen.
2. Semen yang digunakan adalah *Portland Composite Cement (PCC)*.
3. Benda uji yang dibuat berbentuk balok dengan ukuran 40x10x10 cm³.
4. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari dengan perawatan benda uji menggunakan metode *water curing*.
5. Pengujian dilakukan di laboratorium dengan mengikuti prosedur yang sesuai dengan standar pengujian yang berlaku di Indonesia.
6. Pengujian non-destruktif dalam penelitian ini yaitu pengujian *ultrasonic pulse velocity*.
7. Pengujian kuat lentur dilakukan dengan metode dua titik pembebanan.

1.6 Teori

1.6.1 Penelitian terdahulu

(R.N. Swamy et al, 1984), Melakukan penelitian tentang perilaku lentur balok beton yang dibuat dengan abu terbang dan pasir. Data tentang defleksi, rotasi, retak, regangan beton, layanan desain dan beban akhir disajikan. Hasilnya menunjukkan bahwa balok beton agregat *Fly Ash* dapat memenuhi persyaratan kemudahan servis defleksi dan retak, dan bahwa balok tersebut memiliki daktilitas dan faktor beban yang memadai terhadap kegagalan lentur. Ditemukan bahwa estimasi defleksi jangka pendek yang lebih baik dapat diperoleh jika kontribusi beton dalam tegangan diabaikan. Beberapa balok mungkin tidak sepenuhnya memenuhi persyaratan defleksi jangka panjang dan aspek ini harus dipertimbangkan dalam desain. Telah ditunjukkan bahwa balok beton agregat *Fly Ash* dapat memberikan kinerja struktural yang memuaskan menurut Kode Inggris dan Amerika.

(Joana et al, 2020), Melakukan penelitian dengan menggunakan beton *Fly Ash* volume tinggi dalam balok dan menganalisa perilaku lentur balok Beton dengan 50% *Fly Ash* sebagai pengganti semen. Empat spesimen balok dengan High Volume *Fly Ash* Concrete (HVFAC) dan empat spesimen dengan Beton Semen Portland Biasa (OPCC) dikenakan beban lentur dua titik. Data yang disajikan meliputi karakteristik defleksi, perilaku retak, indeks daktilitas, kelengkungan momen dan rotasi akhir spesimen balok dengan beton berkelanjutan. Dari hasil penelitian ditemukan bahwa kapasitas momen balok HVFA sedikit lebih banyak daripada spesimen OPCC pada akhir 56 hari dan juga defleksi di bawah beban layanan desain berada dalam batas yang diijinkan. Spesimen HVFA juga menunjukkan energi terkandung yang lebih rendah dan karbon terkandung dibandingkan dengan spesimen OPCC.

(Ghosh et al, 2017), melakukan penelitian pengukuran ultrasonic pulse velocity dan kuat tekan beton pada umur 1, 7, 28, dan 90 hari. Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini adalah beton geopolimer yang disintesis pada suhu kamar

dengan aktivator alkali dengan konsentrasi berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai UPV dan kuat tekan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya umur beton.

(Liu et al, 2012), melakukan penelitian yang menyajikan metode untuk mengoptimalkan kandungan semen dan abu terbang dalam beton berdasarkan pengujian sifat beton yang mengeras dan dampak lingkungan. Dari hasil penelitian didapatkan bahwa beton dengan 0:4 w/cm dirancang untuk mengoptimalkan kandungan material semen dan kandungan abu terbang berdasarkan sifat beton dan dampak lingkungan. Pergantian kadar semen dengan *Fly Ash* Kelas C harus dibatasi hingga 50% dengan 0:4 w/cm berdasarkan kuat tekan awal dan kuat tekan 28 hari. Efek fill-out dari *Fly Ash* ditemukan pada campuran beton, yang disebabkan oleh peningkatan kandungan material semen jauh di atas persyaratan untuk memenuhi spesifikasi CDOT.

(Case et al, 2016), melakukan penelitian pengaruh *Fly Ash* sebagai pengganti sebagian semen pada kekuatan beton percobaan sistematis telah dilakukan untuk menyelidiki pengaruh rasio dan umur abu terbang. Kuat tekan benda uji beton dengan perbandingan penggantian 15%, 30% dan 45% serta berumur 7 dan 28 hari diukur dan dibandingkan dengan benda uji beton tanpa *Fly Ash* pada umur yang sama. Hasilnya menunjukkan bahwa kekuatan beton yang mengandung abu terbang meningkat lebih lambat namun lebih kuat seiring bertambahnya usia, dibandingkan beton bebas abu terbang, dan terdapat rasio penggantian abu terbang yang optimal dimana kuat tekan maksimum beton yang mengandung abu terbang dapat dicapai, dan kekuatan maksimum benda uji berumur 28 hari ke atas lebih tinggi dibandingkan beton bebas abu terbang.

1.6.2 Beton

Beton didefinisikan sebagai campuran dari bahan penyusunnya yang terdiri dari bahan hidrolik (portland cement), agregat kasar, agregat halus, dan air dengan atau tanpa menggunakan bahan tambah (*Admixture* atau additive). (SNI 2847-2019)

Beton adalah suatu campuran yang terdiri dari pasir, kerikil, batu pecah atau agregat lain yang dicampur menjadi satu dengan suatu pasta yang terbuat dari semen dan air membentuk suatu massa mirip batuan. Kadang, satu atau lebih bahan aditif ditambahkan untuk menghasilkan beton dengan karakteristik tertentu, seperti kemudahan pengerjaan (*workability*), durabilitas, dan waktu pengerasan. (Mc Cormac, 2003).

Beton banyak dipakai secara luas sebagai bahan bangunan. Dalam adukan beton, air, dan semen membentuk pasta yang disebut pasta semen. Pasta semen ini selain mengisi pori-pori diantara butiran-butiran agregat halus juga bersifat sebagai perekat/pengikat dalam proses pengerasan, sehingga butiran-butiran agregat saling terekat dengan kuat dan terbentuklah suatu massa yang kompak/padat (Tjokrodinuljo, 1996).

Proses awal terbentuknya beton adalah pasta semen yaitu proses hidrasi antara air dengan semen, selanjutnya apabila ditambahkan dengan agregat halus maka menjadi mortar dan jika ditambahkan dengan agregat kasar akan menjadi beton dengan atau tidak menggunakan bahan tambah (*Admixture*) (Mulyono, 2019).

Menurut Tumpu dkk (2022), Komposisi material beton didapatkan dari hasil analisis mix design, dicampur merata hingga homogen setelah itu dituang ke dalam pencetak. Hasil adukan beton tersebut jika didiamkan akan menjadi keras akibat reaksi kimia antara semen dengan air atau dapat dikatakan bahwa adukan beton akan bertambah keras seiring dengan waktu (umur beton). Kualitas mutu beton bergantung pada bahan dasar penyusun beton, bahan tambah, pelaksanaan pada saat dibuat dan alat-alat yang dipakai saat pembuatan adukan beton. Kualitas mutu beton bisa dikatakan baik kalau bahan yang digunakan baik, cara mengaduk yang baik (homogen), proses pelaksanaan yang dilakukan baik, alat-alat yang dipakai juga baik dan tingkat porositasnya kecil.

Kelebihan dan kekurangan beton. Menurut Tjokrodimuljo (2007) beton memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan sebagai berikut.

1. Kelebihan

- a) Harga yang relatif lebih murah karena menggunakan bahan-bahan dasar yang umumnya mudah didapat
- b) Termasuk bahan yang awet, tahan aus, tahan panas, tahan terhadap pengkaratan atau pembusukan oleh kondisi lingkungan, sehingga biaya perawatan menjadi lebih murah
- c) Mempunyai kuat tekan yang cukup tinggi sehingga jika dikombinasikan dengan baja tulangan yang mempunyai kuat tarik tinggi sehingga dapat menjadi satu kesatuan struktur yang tahan tarik dan tahan tekan, untuk itu struktur beton bertulang dapat diaplikasikan atau dipakai untuk pondasi, kolom, balok, dinding, perkerasan jalan, landasan pesawat udara, penampung air, pelabuhan, bendungan, jembatan dan sebagainya
- d) Pengerjaan (*workability*) mudah karena beton mudah untuk dicetak dalam bentuk dan ukuran sesuai keinginan. Cetakan beton dapat dipakai beberapa kali sehingga secara ekonomi menjadi lebih murah.

2. Kekurangan

- a) Bahan dasar penyusun beton agregat halus maupun agregat kasar bermacam-macam sesuai dengan lokasi pengambilannya, sehingga cara perencanaan dan cara pembuatannya bermacam-macam
- b) Beton mempunyai beberapa kelas kekuatannya sehingga harus direncanakan sesuai dengan bagian bangunan yang akan dibuat, sehingga cara perencanaan dan cara pelaksanaan bermacam-macam pula
- c) Beton mempunyai kuat tarik yang rendah, sehingga getas atau rapuh dan mudah retak. Oleh karena itu perlu diberikan cara-cara untuk mengatasinya, misalnya dengan memberikan baja tulangan, serat baja dan sebagainya agar memiliki kuat tarik yang tinggi.

Jenis-jenis Beton. Menurut Mulyono (2006) secara umum beton dibedakan menjadi dua kelompok, yaitu sebagai berikut.

1. Beton Berdasarkan Kelas dan Mutu Beton

Kelas dan mutu beton dibedakan menjadi 3 kelas sebagai berikut.

a. Beton Kelas I

Beton kelas I adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan non struktural. Untuk pelaksanaannya tidak diperlukan keahlian khusus. Pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan ringan terhadap mutu bahan-bahan, sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Mutu kelas I dinyatakan dengan B0.

b. Beton Kelas II

Beton kelas II adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural secara umum. Pelaksanaannya memerlukan keahlian yang cukup dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Beton kelas II dibagi dalam mutu-mutu standar B1, K 125, K 175, dan K225. Pada mutu B1, pengawasan mutu hanya dibatasi pada pengawasan terhadap mutu bahan-bahan sedangkan terhadap kekuatan tekan tidak disyaratkan pemeriksaan. Pada mutu-mutu K 125 dan K 175 dengan keharusan untuk memeriksa kekuatan tekan beton secara kontinu dari hasil-hasil pemeriksaan benda uji.

c. Beton Kelas III

Beton kelas III adalah beton untuk pekerjaan-pekerjaan struktural yang lebih tinggi dari K 225. Pelaksanaannya memerlukan keahlian khusus dan harus dilakukan di bawah pimpinan tenaga-tenaga ahli. Disyaratkan adanya laboratorium beton dengan peralatan yang lengkap serta dilayani oleh tenaga-tenaga ahli yang dapat melakukan pengawasan mutu beton secara kontinu.

2. Beton Berdasarkan Jenisnya

a. Beton Ringan

Beton ringan merupakan beton yang dibuat dengan bobot yang lebih ringan dibandingkan dengan bobot beton normal. Agregat yang digunakan untuk memproduksi beton ringan pun merupakan agregat ringan juga. Agregat yang digunakan umumnya merupakan hasil dari pembakaran shale, lempung, slates, residu slag, residu batu bara dan banyak lagi hasil pembakaran vulkanik. Berat jenis agregat ringan sekitar 1900 kg/m³ atau berdasarkan kepentingan penggunaan strukturnya berkisar antara 1440 kg/m³ - 1850 kg/m³, dengan kekuatan tekan umur 28 hari lebih besar dari 17,2 MPa.

b. Beton Normal

Beton normal adalah beton yang menggunakan agregat pasir sebagai agregat halus dan batu pecah sebagai agregat kasar sehingga mempunyai berat jenis beton antara 2200 kg/m³ - 2400 kg/m³ dengan kuat tekan sekitar 15 - 40 MPa.

c. Beton Berat

Beton berat adalah beton yang dihasilkan dari agregat yang memiliki berat isi lebih besar dari beton normal atau lebih dari 2400 kg/m³. Untuk menghasilkan beton berat digunakan agregat yang mempunyai berat jenis yang besar.

d. Beton Massa (Mass Concrete)

Mass Concrete atau beton massa ialah beton yang dituang dalam volume besar yaitu perbandingan antara volume dan luas permukaannya besar. Biasanya dianggap beton massa jika dimensinya lebih dari 60 cm. Beton massa digunakan

untuk pekerjaan beton yang besar dan masif, misalnya untuk proyek bendungan, kanal, fondasi, dan jembatan.

e. Beton Serat

Beton serat adalah beton komposit yang terdiri dari beton biasa dan bahan lain yang berupa serat. Bahan serat dapat berupa serat asbes, serat tumbuh-tumbuhan (rami, bambu, ijuk), serat plastik (polypropylene) atau potongan kawat logam.

f. Beton Non Pasir

Beton non pasir adalah suatu bentuk sederhana dan jenis beton ringan yang diperoleh menghilangkan bagian halus agregat pada pembuatannya. Rongga dalam beton mencapai 20-25 %.

g. Beton Siklop

Beton siklop sama dengan beton normal namun agregat yang digunakan memiliki ukuran yang besar. Ukurannya bisa mencapai 20 cm. Namun, proporsi agregat yang lebih besar tidak boleh lebih dari 20 %.

h. Beton Hampa (Vacuum Concrete)

Beton hampa adalah beton yang dibuat seperti beton biasa namun setelah tercetak padat kemudian air sisa reaksi disedot secara khusus. Dengan demikian air yang tinggal hanyalah air yang dipakai untuk bereaksi dengan semen sehingga beton yang diperoleh sangat kuat.

Menurut SNI 03-6468-2000 pembagian mutu beton terdiri dari tiga kategori:

1. Beton mutu rendah (*low strength concrete*)

Beton mutu rendah adalah beton yang memiliki kuat tekan 10-15 MPa dan biasanya digunakan sebagai lantai kerja, sedangkan untuk beton mutu rendah yang memiliki kuat tekan 16-20 MPa pada umumnya digunakan pada struktur tanpa tulangan seperti siklop, trotoar dan pasangan batu kosong yang diisi adukan, pasangan batu.

2. Beton mutu sedang (*medium strength concrete*)

Beton mutu sedang memiliki kuat tekan sekitar 21-40 MPa yang biasanya digunakan untuk beton bertulang seperti pelat lantai jembatan, gelagar beton bertulang, diafragma, gorong-gorong beton bertulang, kerb beton pracetak, dan bangunan bawah jembatan.

3. Beton mutu tinggi (*high strength concrete*)

Beton mutu tinggi yang memiliki kuat tekan >40 MPa yang pada umumnya digunakan untuk beton prategang seperti tiang pancang, pelat beton prategang, gelagar beton prategang dan sejenisnya.

1.6.3 Geopolimer

Geopolimer didefinisikan sebagai bahan yang digunakan sebagai alternatif pengganti semen agar lebih ramah terhadap lingkungan, karena material yang digunakan tersusun dari bahan sintesa-bahan alam non organik melalui proses polimerisasi, dari pengertian geopolimer diatas dapat diartikan bahwa beton geopolimer adalah beton ramah lingkungan yang mengganti semen yang berfungsi sebagai pengikat dengan bahan yang ramah lingkungan. Bahan utama untuk

pembentukan geopolimer yang memiliki ikatan alumino-silikat harus kaya akan silika dan aluminium. Bahan buatan seperti abu terbang merupakan material yang paling potensial sebagai bahan dasar beton geopolimer (Ikomudin et al, 2016).

Geopolimer, suatu pengikat anorganik, merupakan alternatif yang layak untuk semen portland. Seorang ilmuwan Perancis, Joseph Davidovits menciptakan kata geopolimer pada tahun 1991 untuk mewakili berbagai bahan yang dicirikan oleh jaringan molekul anorganik. Ini adalah pengikat yang diaktifkan alkali, dihasilkan oleh reaksi polimer cairan alkali dengan silikon dan aluminium oksida dalam bahan sumber asal geologi, seperti metakaolinit (kaolinit terkalsinasi), atau bahan produk sampingan seperti abu terbang. (Nagalia et al, 2016).

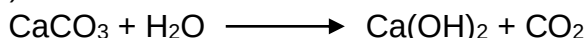
1.6.4 Material penyusun beton

Semen. Menurut Parsika (2019), Semen adalah suatu bahan perekat kimia yang memberikan perkerasan terhadap material campuran lainnya menjadi suatu bentuk yang kaku dan dapat bertahan lama. Bahan alami seperti kapur dan tanah liat memiliki banyak keterbatasan, sementara semen dapat diproduksi dalam kondisi yang terkontrol, dikemas dan dapat dengan mudah diangkut dan disimpan di tempat yang diperlukan. Kapur dan tanah liat merupakan bahan alami yang memiliki banyak keterbatasan, oleh sebab itu semen diproduksi dengan kondisi terkontrol yang kemudian dikemas serta dapat diangkut ke tempat yang diperlukan dengan mudah.

Dalam bubuk semen, ada banyak bahan mineral dan senyawa kimia yang terkandung didalamnya. Setiap bahan kandungan tertentu dapat memengaruhi kualitas dari semennya. Secara umum semen merupakan bubuk berwarna abu-abu gelap yang terbuat dari Alkali, Magnesium Oksida, Alumina, kapur, Sulfur Trioksida, Iron Oxide dan Silika.

Semen dalam pengertian umum merupakan bahan yang mempunyai sifat *adhesive* dan *cohesive*, digunakan sebagai bahan pengikat (*bonding material*), yang dipakai bersama-sama dengan batu kerikil dan pasir. Semen dapat dibagi atas dua kelompok, yaitu:

1. Semen non hidraulis adalah semen yang tidak dapat mengeras dalam air atau tidak stabil dalam air. Contoh semen non hidraulis (hydraulic binder) adalah lime, dimana lime ini adalah perekat klasik dalam bangunan yang dibuat dengan memanaskan limestone pada suhu 850°C.
2. CaCO₃ dari limestone akan melepaskan CO₂ dan menghasilkan burn lime atau quick lime (CaO).



Produk ini bereaksi cepat dengan air yang akan menghasilkan Ca(OH)₂ di dalam butiran yang halus dan Ca(OH)₂ yang tidak dapat mengeras dalam air akan tetapi dapat mengeras apabila bereaksi dengan CO₂ dari udara membentuk CaCO₃ kembali.

3. Semen hidraulis adalah semen yang dapat mengeras dalam air yang menghasilkan padatan yang stabil dalam air. Oleh karena mempunyai sifat hidraulis, maka semen hidraulis bersifat:

- Dapat mengeras bila dicampur air
- Tidak larut dalam air
- Dapat mengeras walau didalam air

Contoh semen hidraulis adalah semen Portland, semen campur, semen khusus dan sebagainya.

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia S-04-1989-F, semen merupakan bahan bangunan bukan logam, ada 5 tipe semen yang sering digunakan di Indonesia, yaitu:

1. Semen Tipe I: digunakan pada konstruksi umum, tidak perlu syarat khusus.
2. Semen Tipe II: digunakan pada konstruksi tahan
3. Terhadap sulfat dan hidrasi sedang.
4. Semen Tipe III: digunakan pada konstruksi yang memiliki kuat tekan awal tinggi.
5. Semen Tipe IV: digunakan pada konstruksi yang memiliki hidrasi rendah.
6. Semen Tipe V: digunakan pada konstruksi yang tahan sulfat.

Tabel 1. Syarat kimia utama semen portland

No	Uraian	Jenis Semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO ₂ , minimum	-	20,0	-	-	-
2	Al ₂ O ₃ , maksimum	-	6,0	-	-	-
3	Fe ₂ O ₃ , maksimum	-	6,0	-	6,5	-
4	MgO, maksimum	6,0	6,0	-	6,0	6,0
5	SO ₃ , maksimum					
	Jika C ₃ A ≤ 8,0	3,0		3,5		
	Jika C ₃ A > 8,0	3,5	3,0	4,5	2,3	2,3
6	Hilang pijar, maksimum	5,0	3,0	3,0	2,5	3,0
7	Bagian tak larut, maksimum	3,0	1,5	1,5	1,5	1,5
8	C ₃ S, maksimum	-	-	-	35	-
9	C ₃ S, minimum	-	-	-	40	-
10	C ₃ A, maksimum	-	8,0	15	7	5
11	C ₄ AF + 2C ₃ A atau C ₄ AF + C ₂ F, maksimum	-	0	0	-	25

Sumber: SNI 15 2049 2004

Agregat. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia T-15-1991-03, material agregat merupakan bahan granular seperti kerak tungku besi, kerikil dan pasir, yang digunakan bersamaan dengan media pengikat yaitu semen dan air dalam pembentukan beton.

Komposisi agregat tersebut menempati sekitar 60%-70% dari berat campuran beton, hanya sebagai pengisi, tetapi dengan melihat komposisinya yang cukup besar dalam suatu campuran, maka agregat inipun menjadi penting. Untuk itu perlu dipelajari karakteristik yang akan menentukan sifat dari mortar atau beton yang akan di bentuk nantinya. Agregat dapat berasal dari alam ataupun dari agregat buatan (*artificial aggregates*) (Mulyono, 2019).

Gradasi agregat ialah distribusi ukuran butiran dari agregat. Bila butiran-butiran agregat mempunyai ukuran sama (seragam) volume pori akan besar. Sebaliknya bila ukuran butir-butirnya bervariasi maka volume pori menjadi kecil. Hal ini karena butiran yang kecil mengisi pori diantara butiran yang besar, sehingga pori-pori menjadi sedikit, dengan kata lain kemampatan menjadi tinggi (Tjokrodimulyo, 2007).

1. Agregat Halus

Agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm (SNI 1970:2016).

Agregat halus ini dapat diperoleh dari dalam tanah ataupun dasar sungai dan tepi laut. Oleh karena itu, pasir digolongkan menjadi 3 macam, yaitu: pasir galian; pasir sungai; dan pasir laut. Sedangkan, ukuran agregat halus (pasir) dibagi menjadi 4 zona yang diketahui dari uji gradasi ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Batas gradasi agregat halus

Lubang Ayakan (mm)	Presentase Lolos			
	Daerah I	Daerah II	Daerah III	Daerah IV
10	100	100	100	100
4,8	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
2,4	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100
1,2	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
0,6	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
0,3	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
0,15	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15

Sumber: SNI 03 2834 2000

2. Agregat Kasar

Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 4,75 mm sampai 40 mm (SNI 1969:2016).

Untuk menghasilkan beton dengan kekompakan yang baik, diperlukan gradasi agregat yang baik, dimana ukuran maksimal agregat kasar dikelompokkan menjadi 3 golongan yang dapat diketahui melalui uji gradasi yang akan ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Batas gradasi agregat kasar

Ukuran Saringan (mm)	Presentasi Lolos (%)		
	Gradasi Agregat		
	40 mm	20 mm	10 mm
76	100	-	-
38	95 – 100	100	-
19	35 – 70	95 – 100	100
9,6	10 – 40	10 – 40	50 – 58
4,8	0 – 5	0 – 5	0 – 10

Sumber: SNI 03 2834 2000

Air. Fungsi air pada campuran beton adalah digunakan untuk reaksi kimia dalam pengikatan campuran beton sehingga terjadi proses pengerasan beton dan menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat dalam adukan beton sehingga mudah dipadatkan pada saat dituang pada media yang akan dicor. Kebutuhan air sebesar 25 % dari berat semen. Kuat tekan beton sangat dipengaruhi oleh air, air yang berlebih akan menyebabkan penurunan kekuatan beton dan bisa mengakibatkan terjadi bleeding yaitu air semen naik ke permukaan beton segar baru saja selesai dituang. Jika terjadi Bleeding maka dapat menyebabkan terjadi berkurangnya lekatan beton antara lapis permukaan dengan beton lapisan di bawahnya (Tumpu dkk, 2022).

Air yang dapat di minum umumnya dapat di pergunakan sebagai campuran beton. Air yang mengandung senyawa-senyawa yang berbahaya, yang tercemar garam, minyak, gula, atau bahan kimia lainnya, bila di pakai dalam campuran beton akan menyebabkan penurunan kualitas beton yang di hasilkan dan juga akan mengubah sifat-sifat beton yang di buat. Karena karakter pasta semen merupakan hasil reaksi kimia antara semen dengan air, maka bukan perbandingan jumlah air terhadap total berat campuran yang di tinjau, tetapi hanya perbandingan antara air dengan semen saja atau biasa di sebut faktor air semen (water cement ratio). Air yang berlebihan akan menyebabkan banyaknya gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang sedikit akan menyebabkan proses hidrasi seluruhnya tidak akan tercapai, yang pada akhirnya akan mempengaruhi kekuatan mutu beton yang tidak akan tercapai (Mulyono, 2019).

Nilai banding berat air dan semen untuk suatu adukan beton dinamakan faktor air semen. Agar terjadi proses hidrasi yang sempurna dalam adukan beton, pada umumnya dipakai nilai faktor air semen (f.a.s) 0,4-0,6 tergantung mutu beton dan hendak dicapai. Semakin tinggi mutu beton yang ingin dicapai umumnya menggunakan nilai f.a.s rendah, sedangkan dilain pihak, untuk menambah daya workability (kelecekan, sifat mudah dikerjakan) diperlukan nilai f.a.s yang lebih tinggi (Istimawan, 1990).

Kekuatan semen yang telah mengeras tergantung pada jumlah air yang diperlukan waktu proses hidrasi berlangsung. Pada dasarnya jumlah air yang diperlukan untuk proses hidrasi hanya kira-kira 25 persen dari berat semennya, penambahan jumlah air akan mengurangi kekuatan setelah mengeras. Kelebihan air dari yang diperlukan untuk proses hidrasi pada umumnya memang diperlukan pada pembuatan beton, agar adukan beton dapat dicampur dengan baik, diangkut dengan mudah dan dapat dicetak tanpa rongga-rongga yang besar (tidak keropos). Akan tetapi hendaknya selalu diusahakan jumlah air sesedikit mungkin, agar kekuatan beton tidak terlalu rendah. Kuat tekan beton sangat dipengaruhi oleh besarnya pori-pori pada beton. Kelebihan air akan mengakibatkan beton berpori banyak, sehingga hasilnya kurang kuat dan juga lebih berpori (porous) (Tjokrodimuljo, 1996).

Dalam pemakaian air untuk beton sebaiknya air memenuhi syarat sebagai berikut (Tjokrodimuljo, 2007):

1. Tidak mengandung lumpur (benda melayang lainnya) lebih dari 2 gram/liter.
2. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zatorganik, dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter.

3. Tidak mengandung klorida (Cl) lebih dari 0,5 gram/liter.
4. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gram/liter

Abu Terbang. Berdasarkan SNI 2460-2014, abu terbang atau yang dikenal dengan *Fly Ash* adalah residu halus yang dihasilkan dari pembakaran atau pembubukan batubara dan diangkutasi oleh aliran udara panas. *Fly Ash* diklasifikasikan menjadi tiga kelas, yaitu sebagai berikut:

1. Kelas N

Buangan atau pozzolan alam terkalsinasi yang dipenuhi dengan kebutuhan yang memenuhi syarat yang dapat dipakai sesuai kelasnya, seperti beberapa tanah diatomaceous, opalinse chert dan serpihanserpihan tuff dan debu-debu vulkanik atau pumicities, dan bahan-bahan lainnya yang mungkin masih belum terproses oleh kalsinasi; dan berbagai material yang memerlukan kalsinasi untuk memperoleh sifat-sifat yang memuaskan, misalnya beberapa jenis tanah liat dan serpihan-serpihan.

2. Kelas F

Abu batubara yang umumnya diproduksi dari pembakaran anthracite (batubara keras yang mengkilat) atau bitumen-bitumen batubara yang memenuhi syarat-syarat yang dapat dipakai untuk kelas ini seperti yang disyaratkan. Abu batubara jenis ini memiliki sifat Pozzolanic.

3. Kelas C

Abu batubara yang umumnya diproduksi dari lignite atau batubara subitumen yang memenuhi syarat yang dapat dipakai untuk kelas ini seperti yang disyaratkan. Abu batubara kelas ini, selain memiliki sifat 10 pozzolan juga memiliki beberapa sifat yang lebih menyerupai semen. Untuk beberapa abu batubara kelas C bias mengandung kapur lebih tinggi dari 10 %.

Limbah *Fly Ash* yang dihasilkan dari pembakaran batubara terdiri dari komponen SiO_2 , Al_2HAl_3 , CaO , Na_2O , Fe_2HAl_3 , MgO , K_2O , dan oksida logam lainnya. Komponen minor lainnya yang terdapat pada *Fly Ash* adalah Cr, Cd, Pb, dan Hg. *Fly Ash* merupakan produk samping industri yang dikenal sebagai polutan lingkungan (Permatasari, 2023).

Fly Ash sebagai material silika adalah material pozzolan yang paling banyak digunakan sebagai bahan tambah material semen. Dalam industri konstruksi pengembangan dan penggunaan semen campuran semakin meningkat dan *Fly Ash* mendapat perhatian lebih karena penggunaannya dapat meningkatkan properti dari semen, menghemat biaya, dan mengurangi dampak negatif pada lingkungan. (Sumrerng R dan Prinya C, 2008).

Fly Ash biasanya digunakan dalam beton dalam penggantian berkisar antara 0 % sampai 30 % dari massa total semen. Namun, dalam berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan *Fly Ash* 50 persen atau lebih dapat memiliki berbagai manfaat. *Fly Ash* merupakan limbah, karena itu lebih murah dari semen portland, namun juga dikenal bisa meningkatkan workability dan menurunkan temperatur reaksi pada beton (Mindness Sidney, Young J dan Darwin David, 2002).

Persyaratan kimia *Fly Ash* sebagai pengganti semen harus memenuhi persyaratan sesuai tabel berikut:

Tabel 4. Syarat kimia *fly ash* sebagai pengganti semen

No	Senyawa	Kadar (%)
1	Jumlah Oksida $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ Minimum	70
2	SO_3 maksimum	5
3	Hilang Pijar maksimum	6
4	Kadar Air maksimum	3
5	Total Alkali dihitung sebagai Na_2O maksimum	1,5

SNI 03-2460-1991

Selain itu terdapat pula persyaratan fisika *Fly Ash* sebagai pengganti semen tercantum pada tabel berikut

Tabel 5. Syarat fisika *fly ash* sebagai pengganti semen

No	Uraian	Persyaratan
1	Kehalusan: Jumlah yang tertinggal di atas ayakan no. 325 (0,045 mm) maksimum %	34
2	Indeks keaktifan pozolan: 1) dengan menggunakan semen Portland kuat tekan pada umur 28 hari, minimum 2) dengan menggunakan kapur padam yang aktif, kuat tekan 7 hari, minimum N/mm	75% KT adukan pembanging 550
3	Kekekalan bentuk Pengembangan /penyusutan dengan autoclave, maksimum %	0,8
4	Jumlah air yang digunakan	105% dari jumlah air untuk adukan pembedin
5	Keseragaman: Berat jenis dan kehalusan dari contoh uji masing-masing tidak boleh banyak berbeda dari rata-rata 10 benda uji atau dari seuruh benda uji yang jumlahnya kurang dari 10 buah, maka untuk: 1) berat jenis, perbedaan maksimum dari rata-rata, % 2) presentasi partikel yang tertinggal pada ayakan no. 325 perbedaan dari rata-rata	5 5
6	Pertambahan penyusutan karena pengeringan (pada umur 28 hari maksimum, %)	0,03
7	Reaktifitas dengan alkali semen: Pengembangan mortar pada umur 14 hari, maksimum %	0,02

Sumber: SNI 03-2460-1991

Admixture. Bahan campuran tambahan (*Admixtures*) adalah bahan yang bukan air, agregat maupun semen yang ditambahkan ke dalam campuran sesaat atau selama pencampuran. Fungsi dari bahan ini adalah untuk mengubah sifat-sifat beton atau pasta semen agar menjadi cocok untuk pekerjaan tertentu, atau ekonomis untuk tujuan lain seperti menghemat energi (Nawi, 1996).

Admixture yang digunakan pada campuran beton dalam penelitian ini adalah retarder dan superplasticizer. Retarder adalah bahan kimia pembantu untuk memperlambat waktu pengikatan (*setting time*) sehingga campuran akan tetap mudah dikerjakan (*workable*) untuk waktu yang lebih lama. Sedangkan Superplasticizer (*high range water reducer Admixtures*) sangat meningkatkan kelecakan campuran. Campuran dengan slump sebesar 7,5 cm akan menjadi 20 cm. Digunakan terutama untuk beton mutu tinggi, karena dapat mengurangi air sampai 30%. Pada prinsipnya mekanisme kerja dari setiap superplasticizer sama, yaitu dengan menghasilkan gaya tolak-menolak (*dispersion*) yang cukup antarpartikel semen agar tidak terjadi penggumpalan partikel semen (*flocculate*) yang dapat menyebabkan terjadinya rongga udara di dalam beton, yang akhirnya akan mengurangi kekuatan atau mutu beton tersebut (Nugraha dkk, 2007).

Menurut Kardiyo Tjokrodimulyo (1996) bahan tambah adalah bahan selain unsur pokok beton (air, semen, agregat) yang ditambahkan pada adukan beton, sebelum, segera atau selama pengadukan beton. Tujuannya ialah mengubah satu atau lebih sifat-sifat beton sewaktu masih dalam keadaan segar atau setelah mengeras, misalnya mempercepat pengerasan, menambah encer adukan, menambah kuat tekan, menambah daktilitas, mengurangi sifat getas, mengurangi retak-retak pengerasan dan sebagainya.

1.6.5 Ultrasonic Pulse Velocity

Dalam SNI ASTM C597:2012 tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang melalui Beton dimana pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dilakukan dengan merambatkan gelombang longitudinal yang dipancarkan oleh transduser elektro akustik yang berhubungan dengan salah satu permukaan beton yang diuji. Setelah melalui beton, rambat gelombang diterima dan dikonversikan menjadi energi listrik oleh transduser kedua yang berjarak L dari transduser pemancar. Waktu tempuh T diukur secara elektronik. Kecepatan rambat gelombang V dihitung dengan membagi L dengan T . Kecepatan rambat gelombang, V , dari gelombang longitudinal dalam suatu massa beton berhubungan dengan sifat elastisitas dan kerapatan, sesuai dengan persamaan berikut.

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

Keterangan:

E = modulus elastisitas dinamis;

μ = rasio poisson dinamis;

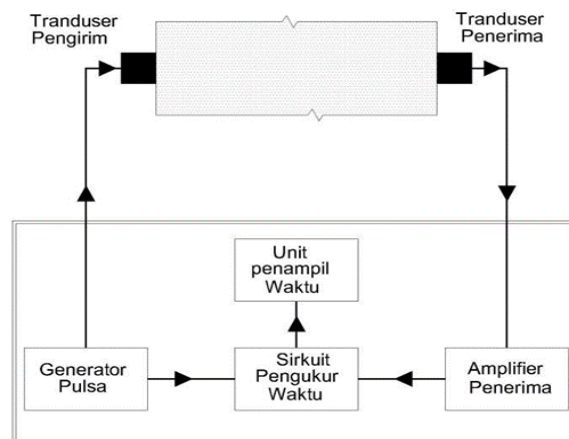
ρ = adalah kerapatan beton.

Pengujian kecepatan rambat gelombang melalui beton ini digunakan untuk menilai atau mengetahui keseragaman dan mutu relatif beton, mendeteksi adanya rongga dan retak, dan untuk mengevaluasi efektivitas perbaikan retak. Pengujian ini juga dapat digunakan untuk mengetahui adanya perubahan sifat-sifat beton dan pada pemeriksaan suatu struktur untuk memperkirakan tingkat kerusakan atau retakan pada beton. Apabila digunakan untuk mengamati perubahan-perubahan kondisi pada periode tertentu, lokasi uji harus diberi tanda pada struktur untuk memastikan pengujian dapat diulang pada posisi yang sama.

Tingkat kejenuhan beton mempengaruhi kecepatan rambat gelombang, dan faktor ini harus dipertimbangkan jika mengevaluasi hasil uji. Sebagai tambahan, kecepatan rambat gelombang pada beton yang jenuh air kurang sensitif terhadap perubahan-perubahan mutu beton relatif. Kecepatan rambat gelombang pada beton yang jenuh air dapat mencapai 5% lebih tinggi daripada beton yang kering. Kecepatan rambat gelombang tidak tergantung pada ukuran obyek pengujian, pantulan gelombang dari sisi benda uji tidak berpengaruh pada waktu tiba dari kecepatan rambat gelombang yang dipancarkan langsung. Dimensi terkecil dari objek pengujian harus lebih besar dari panjang gelombang getaran ultrasonik.

Ketelitian pengukuran bergantung dari kemampuan operator dalam menentukan jarak yang tepat antara transduser pengirim dan transduser penerima dan kemampuan peralatan untuk mengukur dengan tepat waktu tempuh kecepatan rambat gelombang. Kuat sinyal yang diterima dan waktu tempuh yang terukur dipengaruhi oleh penempatan pasangan transduser pada permukaan beton. Bahan perantara (coupling agent) dan tekanan yang cukup harus diaplikasikan pada transduser untuk menjamin waktu tempuh yang stabil. Kuat sinyal yang diterima juga dipengaruhi oleh jarak tempuh serta tingkat keretakan atau penurunan mutu beton yang diuji.

Peralatan untuk pengujian, ditunjukkan secara skematik pada Gambar 1, terdiri dari generator kecepatan rambat gelombang, sepasang alat transduser (pengirim dan penerima), amplifier, sirkuit pengukur waktu, unit untuk menampilkan waktu, dan kabel penghubung.



Gambar 1. Skematik pengujian UPV

Dalam perhitungan nilai kecepatan rambat gelombang dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$V = \frac{L}{T} \quad (2)$$

Keterangan:

V = kecepatan rambat gelombang, meter per sekon (m/s)

L = jarak antara pusat permukaan transduser, meter (m)

T = waktu tempuh, sekon (s)

Tabel 6. Tingkat kualitas beton berdasarkan uji UPV

Kecepatan rambat gelombang ultrasonic (UPV) (m/s)	Kualitas Beton
>4500	Sangat baik
3500 – 4500	Baik
3000 – 3500	Cukup baik
2000 – 3000	Buruk
<2000	Sangat buruk

1.6.6 Pengujian kuat lentur (*flexural strength test*)

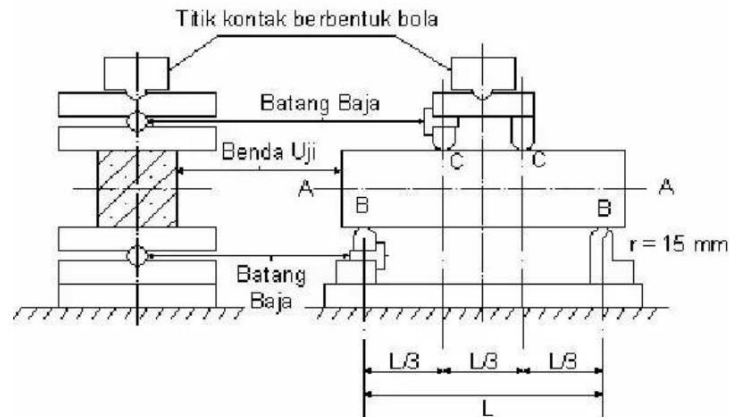
Berdasarkan SNI 2493:2011 tentang Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium, pada prinsipnya struktur beton pada bangunan sipil harus mampu menahan gaya yang bekerja seperti tekan dan lentur yang diakibatkan oleh energi dari luar. Untuk mendapatkan mutu beton yang sesuai dengan yang disyaratkan pada beton untuk struktur bangunan sipil, perlu dilakukan pengujian laboratorium baik untuk agregat, adukan beton maupun beton pada umur tertentu. Agar struktur beton aman terhadap gaya lentur yang bekerja, beton harus mempunyai kuat lentur tertentu sesuai dengan yang disyaratkan. Untuk mengetahui kuat lentur dari struktur beton perlu dilakukan pengujian kuat lentur di laboratorium. Kuat lentur beton merupakan kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji, yang diberikan kepadanya, sampai benda uji patah, dinyatakan dalam Mega Pascal (MPa) gaya per satuan luas.

Terkait dimensi benda uji, panjang spesimen harus minimal 50 mm lebih besar dari tiga kali ketebalannya dan lebar spesimen tidak boleh melebihi 1,5 kali ketebalannya yang diatur dalam ASTM C31/C31M-22.

Selanjutnya setelah cetakan selesai diisi dengan beton segar, tutup menggunakan goni basah untuk menghindari penguapan beton sebelum mengeras, letakkan lembaran plastik di atas goni untuk menjaga agar karung goni tetap basah hingga benda uji dibuka dari cetakan (24 jam $\pm$ 8 jam setelah pencetakan). Kecuali selama penyimpanan untuk masa minimum 20 jam segera sebelum pengujian harus direndam dalam cairan jenuh kapur pada $23^{\circ}\text{C} \pm 1,7^{\circ}\text{C}$. Saat akhir masa perawatan, antara waktu benda uji dipindahkan dari perawatan hingga pengujian selesai, pengeringan benda uji harus dihindari (SNI 2493:2011).

Pengujian kuat lentur beton menggunakan mesin tekan beton yang mendukung

pengujian kuat lentur dengan perlengkapan antara lain manometer dengan dua jarum pembacaan beban, dua buah titik perletakan berbentuk silinder, dua buah titik pembebanan berbentuk silinder, ketelitian peralatan pada skala pembacaan minimum adalah 12,5 g. Sebelum pengujian, harus dilakukan kalibrasi terhadap skala pembacaan beban pada manometer. Kalibrasi dilakukan setiap periode tertentu. Cara uji kuat beton normal dengan dua titik pembebanan diatur dalam SNI 4431:2011.

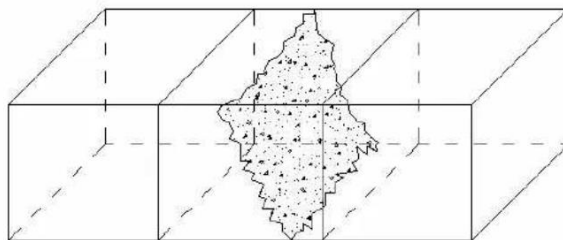


Keterangan gambar:
 A-A adalah sumbu memanjang
 B adalah titik-titik perletakan
 C adalah titik-titik pembebanan

Gambar 2. Susunan benda uji kuat lentur, perletakan dan pembebanan
 Sumber: SNI 4431:2011

Rumus-rumus perhitungan yang digunakan adalah:

- a) Untuk pengujian dimana bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah),



Gambar 3. Patah pada 1/3 bentang tengah
 Sumber: SNI 4431:2011

maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan sebagai berikut.

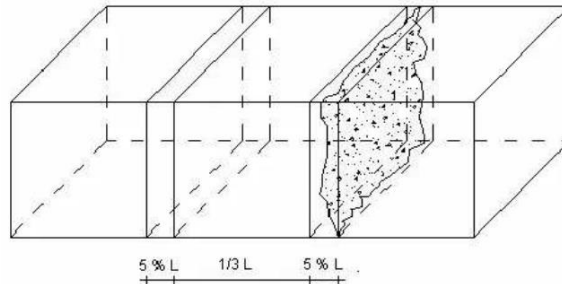
$$\sigma = \frac{P.L}{b.h^2} \quad (3)$$

dimana,

σ = kuat lentur benda uji (MPa),

P = beban max (N),

- L = jarak perletakan (mm)
 b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm),
 h = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)
- b) Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada diluar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari jarak antara titik perletakan.



Gambar 4. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada < 5% dari bentang

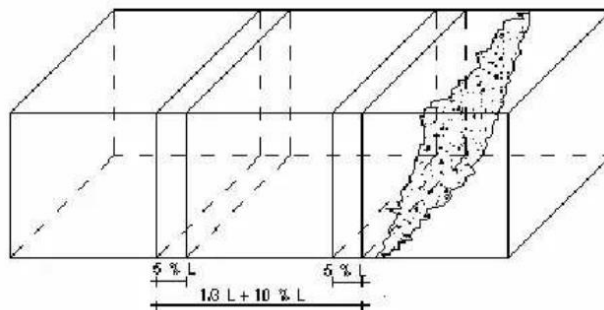
Sumber: SNI 4431:2011

Maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan sebagai berikut.

$$\sigma = \frac{P \cdot a}{b \cdot h^2} \quad (4)$$

dimana,

- σ = kuat lentur benda uji (MPa),
 P = beban max (N),
 a = jarak rata-rata antara tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada 4 tempat pada sudut dari bentang (mm),
 b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm),
 h = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm).
- c) Untuk benda uji yang patahnya di luar pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak antara titik pembebanan dan titik patah lebih dari 5% bentang, hasil pengujian tidak digunakan.



Gambar 5. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada >5% dari bentang

Sumber: SNI 4431:2011

Pada penelitian ini digunakan sampel beton dengan ukuran $40 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$, dengan panjang bentang efektif yang digunakan 30 cm dengan bentang tumpuan 5 cm dari tiap ujung balok di kedua sisi dan 2 pembebanan berada 5 cm dari tengah bentang hal ini mengacu pada aturan.

Peralatan pengujian. Menurut SNI 4431 2011, peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Mesin tekan beton yang dapat digunakan untuk pengujian kuat lentur dengan perlengkapan antara lain manometer dengan dua jarum pembacaan beban, dua buah titik perletakan berbentuk silinder, dua buah titik pembebanan berbentuk silinder, ketelitian peralatan pada skala pembacaan minimum adalah 12,5 g.
2. Cetakan benda uji berbentuk balok dengan ukuran lebar 10 cm, tinggi 10 cm dan panjang 40 cm.

Benda uji. Benda uji yang digunakan dalam pengujian kuat lentur beton ini ialah benda uji berbentuk balok yang dimana terdapat beberapa ketentuan yang harus dipenuhi dalam pembuatan benda uji sesuai dengan SNI 4431:2011, sebagai berikut.

1. Pengambilan adukan beton untuk pembuatan benda uji harus menggunakan sendok aduk atau sekop sedemikian rupa sehingga tidak terjadi segregasi.
2. Penuangan adukan beton ke dalam cetakan benda uji dilakukan secara hati-hati, kemudian dipadatkan.
3. Pembuatan benda uji harus memenuhi ketentuan SNI 03-2493-1991 mengenai metode pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium.

Kecepatan pembebanan. Dalam SNI 1974 2011, pengujian kuat tekan beton yang dilakukan menggunakan mesin uji kuat tekan dengan melakukan pembebanan hingga benda uji hancur. Pembebanan dilakukan secara terus-menerus dan tanpa kejutan dengan memenuhi ketentuan sebagai berikut.

1. Untuk mesin penguji tipe ulir, kepala mesin tekan yang bergerak harus bergerak pada kecepatan mendekati 1,3 mm/menit, pada saat mesin bergerak tanpa beban. Untuk mesin yang digerakan secara hidrolis, beban harus diberikan pada kecepatan gerak yang sesuai dengan kecepatan pembebanan pada benda uji dalam rentang 0,15 MPa/detik sampai dengan 0,35 MPa/detik. Kecepatan gerak yang ditentukan harus dijaga minimal selama setengah pembebanan terakhir dari fase pembebanan yang diharapkan dari siklus pengujian;
2. Selama periode $\frac{1}{2}$ (setengah) pertama dari 1 (satu) fase pembebanan yang diharapkan, pembebanan yang lebih cepat diperbolehkan;
3. Jangan membuat perubahan pada kecepatan gerak dari dasar mendatar kapanpun saat benda uji kehilangan kekakuan secara cepat sesaat sebelum hancur.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin Kampus Gowa dengan waktu penelitian selama 2 bulan yang dimulai pada 18 September 2023 sampai 30 Oktober 2023.

2.2 Jenis Penelitian dan Sumber Data

Metode yang dilakukan di dalam penelitian ini adalah metode secara eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil. Dalam penelitian ini terdapat dua cara pengumpulan data, yaitu sebagai berikut:

1. Studi pustaka, metode ini dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh data- data sekunder melalui berbagai sumber, yaitu artikel-artikel ilmiah, jurnal penelitian, buku, serta standar pengujian yang berlaku di Indonesia
2. Pemeriksaan dan pengujian sampel di laboratorium dengan tujuan untuk memperoleh data-data primer yang akan digunakan untuk menganalisa hasil penelitian yang dilakukan.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.) kapasitas 1000 kN,
2. Load Cell kapasitas 200 kN,
3. High Speed Data Logger THS-1100 dan satu set komputer,
4. Mesin pencampur (mixer)
5. Cetakan berbentuk balok dengan ukuran panjang 40 cm, lebar 20 cm dan tinggi 20 cm.
6. Alat slump test
7. Timbangan digital
8. Gelas ukur

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Agregat halus,
2. Agregat kasar (batu pecah),
3. Portland Composite Cement (PCC),
4. Abu terbang (Fly Ash),
5. Admixture, yaitu super plasticizer dan retarder, dan
6. Air.



Gambar 6. Material beton

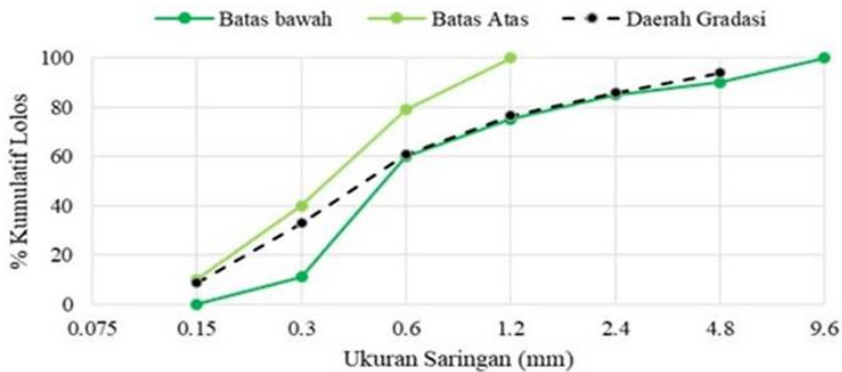
2.4 Pemeriksaan Karakteristik Material

2.4.1 Agregat halus

Pemeriksaan karakteristik agregat halus dapat dilihat pada Tabel 7

Tabel 7. Standar pemeriksaan karakteristik agregat halus

No	Karakteristik Agregat	Standar
1	Modulus Kehalusan	SNI ASTM C136 : 2012
2	Berat Jenis Semu	SNI 1970 : 2016
3	Berat Jenis Curah	SNI 1970 : 2016
4	Berat Jenis SSD	SNI 1970 : 2016
5	Penyerapan Air	SNI 1970 : 2016
6	Berat Volume	SNI 03-4804 : 1998
7	Kadar Air	SNI 1971 : 2011
8	Kadar Lumpur	SNI ASTM C117 : 2012
9	Kadar Organik	SNI 2816 : 2018



Gambar 7. Gradasi agregat halus (pasir)

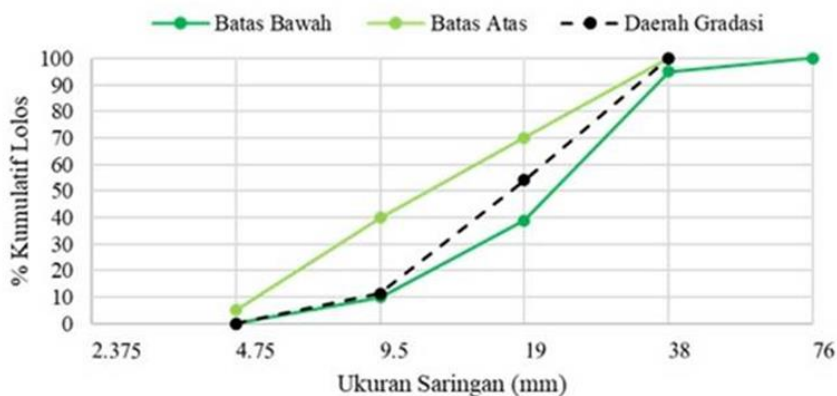
Hasil pengujian analisis saringan agregat halus yang ditunjukkan pada Gambar 4 diperoleh bahwa gradasi pasir yang digunakan masuk pada zona 3 yakni pasir agak halus.

2.4.2 Agregat kasar (batu pecah)

Pemeriksaan karakteristik agregat halus dapat dilihat pada Tabel 8

Tabel 8. Standar pemeriksaan karakteristik agregat kasar

No	Karakteristik Agregat	Standar
1	Modulus Kehalusan	SNI ASTM C136 : 2012
2	Berat Jenis Semu	SNI 1970 : 2016
3	Berat Jenis Curah	SNI 1970 : 2016
4	Berat Jenis SSD	SNI 1970 : 2016
5	Penyerapan Air	SNI 1970 : 2016
6	Berat Volume	SNI 03-4804 : 1998
7	Kadar Air	SNI 1971 : 2011
8	Kadar Lumpur	SNI ASTM C117 : 2012
9	Keausan Agregat	SNI 2417 : 2008



Gambar 8. Gradasi agregat kasar (batu pecah)

Hasil pengujian analisis saringan agregat halus yang ditunjukkan pada Gambar 4 diperoleh bahwa gradasi pasir yang digunakan masuk pada zona gradasi maksimal 40 mm.

2.4.3 Fly ash

Pemeriksaan karakteristik agregat halus dapat dilihat pada Tabel 9

Tabel 9. Standar pemeriksaan karakteristik fly ash

Jenis Pemeriksaan	Standar/Metode uji
Pemeriksaan berat jenis	SNI 2531:2015
(semen)	ASTM C 188-95 (2003),MOD

2.5 Pembuatan Benda Uji

2.5.1 Rancangan campuran beton

Penelitian ini dilakukan menggunakan sampel berbentuk balok dengan ukuran 40 x 20 x 20 cm sebanyak 12 benda uji. Pada 12 benda uji tersebut terdapat 4 variasi campuran yaitu beton normal sebagai kontrol, dan beton dengan penambahan *Fly Ash* sebagai substitusi semen sebanyak 15, 30, dan 45 persen dari persentasi semen yang digunakan dalam campuran. Selain penggunaan *Fly Ash*, digunakan pula admixture dalam campuran yaitu retarder untuk menghambat pengerasan beton dan super plasticizer untuk meningkatkan fleksibilitas beton. Untuk memudahkan penelitian, pada setiap benda uji diberikan kode. Kode tersebut berupa C sebagai beton kontrol atau normal, FA 15%, FA 30%, FA 45% sebagai beton dengan penggantian semen dengan *Fly Ash* sebanyak 15%, 30%, dan 45%. Rancangan campuran benda uji dalam ukuran m³ dapat dilihat pada tabel dibawah

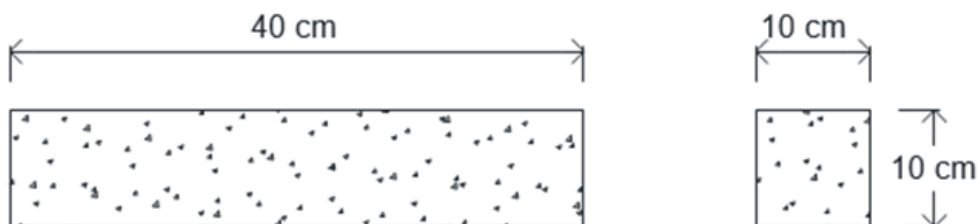
Tabel 10. Rancangan campuran beton

MIX ID	Water (kg)	Cement (kg)	Fa (kg)	Sand (kg)	Batu Pecah (kg)	Retarder (ml)	Super Plasticizer (ml)
C	9,4	22	0	45,1	55,55	44	110
FA 15%	9,6	18,7	3,3	45,1	55,55	44	110
FA 30%	9,75	15,4	6,6	45,1	55,55	44	110
FA 45%	10,15	12,1	9,9	45,1	55,55	44	110

2.5.2 Pembuatan benda uji

Adapun metode pencampuran yang dilakukan pada benda uji dilakukan sesuai dengan langkah-langkah berikut:

1. Menyiapkan alat dan bahan serta material yang digunakan dalam campuran beton (batu pecah, pasir, semen, Fly Ash, air, dan admixture).
2. Menimbang masing-masing material sesuai dengan komposisi campuran yang telah direncanakan.
3. Memasukkan agregat kasar, agregat halus, semen, dan Fly Ash ke dalam mesin pencampur.
4. Mengaduk material yang telah dimasukkan dengan mixer selama 60 detik.
5. Memasukkan air ke dalam mixer dan diaduk selama 120 detik.
6. Mematikan mixer dan mengaduk campuran secara manual hingga merata
7. Nyalakan kembali mixer selama 60 detik dan matikan kembali.
8. Mengeluarkan hasil campuran kemudian lakukan pengujian slump.
9. Bekisting diberi lapisan tipis dari oli agar mudah dalam pelepasan.
10. Mencetak hasil campuran dengan cetakan balok, lalu dilakukan penumbukan sebanyak 25 kali tumbukan menggunakan penumbuk manual setelah itu diratakan.
11. Mendinginkan benda uji selama 24 jam agar campuran dapat memadat dengan sempurna.
12. Mengeluarkan benda uji dari cetakan, kemudian meletakkan benda uji ke dalam bak curing selama 28 hari.



Gambar 9. Dimensi benda uji balok

2.6 Perawatan (Curing) Benda Uji

Perawatan juga dilakukan pada benda uji sesuai dengan standar SNI 2493:2011, dimana pada penelitian ini semua variasi di-curing dengan merendam sampel ke dalam air jenuh kapur pada ruang penyimpanan sampel dengan temperatur $23^{\circ}\text{C} \pm 1,7^{\circ}\text{C}$ hingga hari pengujian sesuai waktu yang telah ditentukan yang dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 10. Perawatan (*curing*) benda uji

3.7 Pengujian Kuat Lentur

Kuat lentur adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji yang diberikan padanya sampai benda uji patah yang dinyatakan dalam Mega Pascal (Mpa) gaya tiap satuan luas (SNI 03-4431-2011).

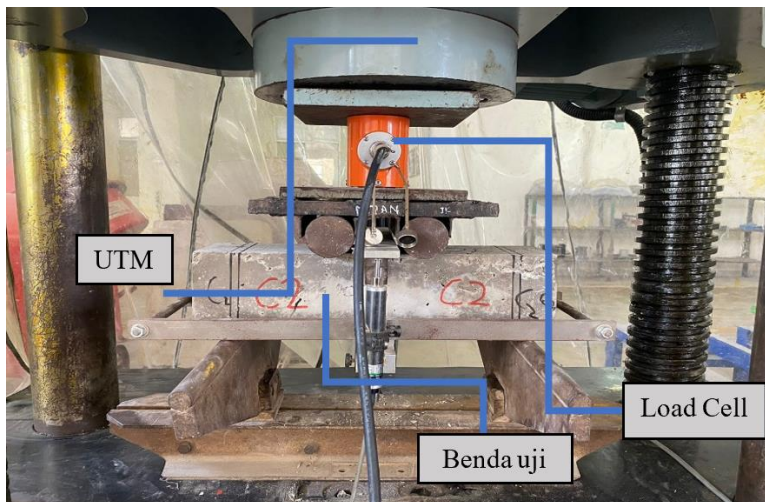
Sebuah balok yang diberi beban akan mengalami deformasi, dan oleh sebab itu timbul momen – momen lentur sebagai perlawanan dari material yang membentuk balok tersebut terhadap beban luar. Tegangan yang timbul selama mengalami deformasi tidak boleh melebihi tegangan lentur ijin untuk bahan dari beton itu. Sistem pembebanan pada pengujian tarik lentur, yaitu benda uji dibebani sedemikian rupa sehingga hanya akan mengalami keruntuhan akibat lentur murni.

Sebanyak 3 benda uji tiap variasi diuji kuat tekan menggunakan Universal Testing Machine (Tokyo Testing Machine Inc.) kapasitas 1000 kN yang kemudian dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai kuat lentur sampel tiap variasi.

Adapun prosedur pengujian kuat lentur sesuai dengan SNI 4431:2011 dapat dilihat pada langkah-langkah berikut :

1. Hidupkan mesin uji tekan beton yang telah dipersiapkan, tunggu kira-kira 30 detik.
2. Letakkan benda uji pada tumpuan dan atur benda uji sehingga siap untuk pengujian.
3. Atur pembebanannya untuk menghindari terjadi benturan.
4. Atur katup-katup pada kedudukan pembebanan dan kecepatan pembebanan pada kedudukan yang tepat sehingga jarum skala bergerak secara perlahan-lahan dan kecepatannya 8 kg/cm²-10 kg/cm² tiap menit.
5. Kurangi kecepatan pembebanan pada saat saat menjelang patah yang ditandai dengan kecepatan gerak jarum pada skala beban agak lambat, sehingga tidak terjadi kejut.

6. Hentikan pembebanan dan catat beban maksimum yang menyebabkan patahnya benda uji, pada formulir uji.
7. Ambil benda uji yang telah selesai diuji, yang dapat dilakukan dengan menurunkan plat perletakan benda uji atau menaikkan alat pembebanannya.
8. Ukur dan catat lebar dan tinggi tampang lintang patah dengan ketelitian 0,25 mm sedikitnya pada 3 tempat dan ambil harga rata-ratanya.
9. Ukur dan catat jarak antara tampang lintang patah dari tumpuan luar terdekat pada 4 tempat di bagian tarik pada arah bentang dan ambil harga rata-ratanya.



Gambar 11. Proses pengujian kuat lentur

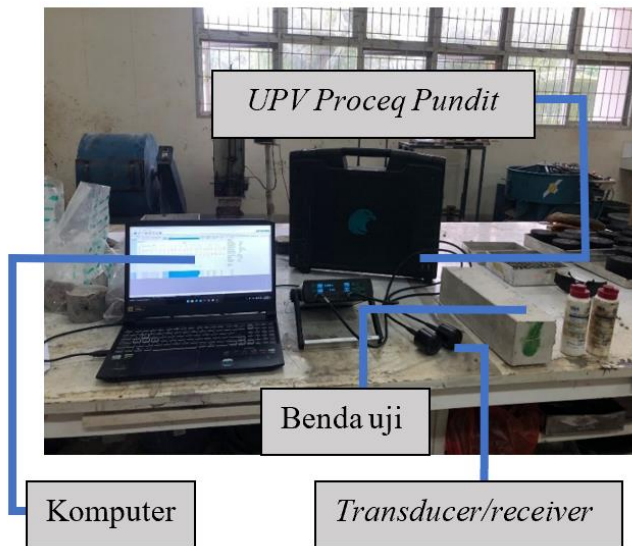
3.8 Pengujian *Itrasonik Puls Velocity*

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dilakukan berdasarkan SNI ASTM C597:2012 tentang Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang Melalui Beton. Pengujian UPV menggunakan alat *Ultrasonic Pulse Velocity Proceq Pundit Lab+*. Tujuan dari pengujian ini ialah untuk mengetahui kecepatan rambat gelombang dari beton. Setiap variasi terdapat 3 sampel yang akan diuji dengan 4 titik penembakan menggunakan metode direct. Sehingga nilai kecepatan rambat gelombang yang diambil ialah nilai ckecepatan rata-rata dari tiap sampel pada setiap variasi.

Prosedur pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* sebagai berikut:

1. Meratakan dan membersihkan permukaan beton.
2. Mengkalibrasi alat uji UPV dengan tujuan agar pembacaan waktu tempuh pada *transmitter* dan *receiver* sama, kedua transduser ditempatkan pada kedua sisi *calibration rod* yang telah disediakan.
3. Menentukan jarak *transmitter* dan *reciver* pada layar alat UPV.

4. Memberikan gel pada permukaan kontak *transmitter* dan *receiver* setiap sebelum pengujian dimulai.
5. Pengujian dilakukan pada titik yang telah ditentukan sebelumnya.
6. Pengujian UPV telah selesai dan didapatkan hasil berupa bentuk gelombang ultrasonic beserta waktu transmisi dan cepat rambatnya.



Gambar 12. Pengujian *ultrasonic pulse velocity*