

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan material konstruksi paling banyak digunakan di dunia karena kemampuannya menahan beban tekan tinggi, kemudahan pembentukan, serta ketersediaan bahan baku yang melimpah (Mehta & Monteiro, 2001). Namun, penggunaan beton dalam skala besar juga menimbulkan tantangan lingkungan yang signifikan. Proses produksinya, terutama dari bahan penyusun seperti semen portland dan agregat alam, berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca, konsumsi energi tinggi, dan degradasi sumber daya alam (Li et al., 2015; Salas et al., 2016). Oleh karena itu, pengembangan beton ramah lingkungan dengan pemanfaatan limbah industri sebagai bahan pengganti sebagian komponen konvensional menjadi fokus penelitian global dalam mendukung konsep *green construction*.

Salah satu limbah industri yang memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam beton adalah fly ash, yaitu hasil samping pembakaran batu bara dari pembangkit listrik tenaga uap. Fly ash tergolong bahan pozzolanik yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) reaktif, sehingga dapat berpartisipasi dalam reaksi sekunder membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berkontribusi terhadap kekuatan beton (Hemalatha & Ramaswamy, 2017). Penggunaan fly ash sebagai bahan pengganti sebagian semen atau filler dalam campuran beton terbukti mampu meningkatkan keawetan, mengurangi panas hidrasi, serta memperbaiki mikrostruktur beton (Poon et al., 2018). Selain itu, pemanfaatan fly ash juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan mengurangi jumlah limbah padat yang harus ditimbun.

Meskipun demikian, penggunaan fly ash dalam kadar tinggi (lebih dari 40%) sering menimbulkan permasalahan pada umur awal, seperti penurunan kekuatan tekan dan peningkatan waktu pengerasan akibat lambatnya reaksi pozzolanik (Thomas, 2013). Namun, pada umur lanjut (lebih dari 28 hari), reaksi tersebut semakin stabil sehingga kekuatan beton berbasis fly ash dapat mendekati atau bahkan melampaui beton konvensional (Hemalatha & Ramaswamy, 2017). Oleh karena itu, pemahaman terhadap perkembangan sifat mekanik dan durabilitas beton dengan kadar fly ash tinggi menjadi penting dalam upaya penerapan material ini secara luas di bidang konstruksi.

Selain sebagai pengganti sebagian semen, fly ash juga dapat dimanfaatkan untuk memperbaiki karakteristik tanah dasar (*subgrade*) pada sistem perkerasan kaku. Penambahan fly ash terbukti menurunkan plastisitas tanah, meningkatkan nilai CBR, dan memperbaiki daya dukung terhadap beban lalu lintas (Ahmed et al., 2024). Kombinasi antara beton berbasis fly ash dan tanah dasar yang distabilisasi fly ash diharapkan menciptakan sistem perkerasan yang lebih efisien, kuat, dan berkelanjutan. Penggunaan dua bentuk pemanfaatan fly ash ini tidak hanya memberikan keuntungan teknis, tetapi juga memberikan dampak positif terhadap lingkungan dengan mengurangi emisi karbon dan pemanfaatan limbah industri secara optimal.

Dalam konteks perkerasan kaku, analisis perilaku pelat beton terhadap beban lalu lintas dilakukan menggunakan teori Westergaard (1926). Teori ini menjelaskan distribusi tegangan, regangan, dan lendutan pada pelat beton yang diletakkan di atas pondasi elastis. Tiga posisi kritis yang dianalisis meliputi tengah pelat (interior), tepi (edge), dan sudut (corner), yang masing-masing memiliki pola tegangan berbeda. Hingga kini, teori Westergaard tetap digunakan secara luas karena mampu memberikan estimasi yang rasional terhadap kinerja pelat beton perkerasan, baik untuk perancangan maupun evaluasi (Huang, 2004).

Analisis berbasis teori Westergaard memungkinkan evaluasi pengaruh variasi ketebalan pelat, sifat mekanik beton, serta karakteristik tanah dasar terhadap distribusi tegangan dan lendutan. Dengan demikian, kombinasi antara beton berbasis fly ash dan subgrade hasil stabilisasi fly ash dapat diuji secara teoretis untuk menilai efektivitas dan sinergi kedua material tersebut dalam sistem perkerasan kaku. Hasil analisis ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah untuk pengembangan *eco-efficient pavement system* yang memiliki kinerja struktural baik sekaligus berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan.

1.1.1 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana pengaruh substitusi sebagian semen dengan fly ash terhadap sifat fisik dan mekanis beton, meliputi *workability*, kuat tekan, modulus elastisitas, kuat lentur, serta deformasi?
2. Sejauh mana penambahan fly ash dalam variasi tertentu dapat meningkatkan nilai *California Bearing Ratio (CBR)* dan modulus reaksi (*k*) pada tanah dasar untuk aplikasi perkerasan kaku?
3. Bagaimana menganalisis hasil pengujian tidak merusak (UPV dan resistivitas listrik) beton fly ash?
4. Bagaimana pengaruh variasi kadar fly ash dan ketebalan pelat terhadap kekakuan, kapasitas beban maksimum, serta tegangan maksimum pelat beton berdasarkan analisis teori Westergaard?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh substitusi sebagian semen dengan fly ash terhadap sifat fisik dan mekanis beton, termasuk *workability*, kuat tekan, modulus elastisitas, kuat lentur, dan deformasi.
2. Mengevaluasi karakteristik tanah dasar akibat stabilisasi dengan fly ash terhadap nilai CBR dan modulus reaksi tanah (*k*).
3. Menganalisis hasil pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) dan resistivitas listrik beton fly ash.

4. Menerapkan teori Westergaard untuk menganalisis kekakuan, kapasitas beban, dan tegangan pelat beton fly ash

1.1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bermanfaat dalam memberikan pemahaman komprehensif mengenai pengaruh penggunaan fly ash terhadap kinerja mekanis dan struktural beton pada perkerasan kaku. Secara ilmiah, penelitian ini memperluas pengetahuan tentang hubungan antara karakteristik mikrostruktur material dengan sifat fisik dan mekanis seperti kuat tekan, kuat lentur, modulus elastisitas, kecepatan gelombang ultrasonik, dan resistivitas listrik. Secara praktis, hasilnya dapat menjadi acuan dalam perencanaan perkerasan kaku yang ramah lingkungan dengan mempertimbangkan tanah dasar yang distabilisasi fly ash. Analisis berdasarkan teori Westergaard juga memberikan dasar bagi optimasi ketebalan pelat dan kapasitas beban maksimum. Selain itu, penelitian ini mendukung prinsip keberlanjutan dengan mengurangi penggunaan semen dan memanfaatkan limbah industri secara produktif, sehingga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan pengembangan teknologi beton berkelanjutan.

1.1.4 Batasan Masalah

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

1. Fly ash yang digunakan merupakan tipe Fly Ash kelas F
2. Penelitian ini hanya memfokuskan pada pengaruh variasi kadar penggantian semen dengan fly ash sebesar 45% dan 60% terhadap sifat mekanis dan fisik beton.
3. Stabilisasi tanah dasar hanya dilakukan menggunakan fly ash dengan kadar 15% dan 30%.
4. Analisis kinerja struktural perkerasan kaku didasarkan pada teori Westergaard dengan asumsi pelat homogen, isotropik, dan berperilaku elastis linier, tanpa mempertimbangkan efek retak atau beban dinamis berulang.
5. Nilai Poisson's ratio yang digunakan diasumsikan sebesar 0,2.
6. Pengujian sifat beton terbatas pada parameter kuat tekan, kuat lentur, modulus elastisitas, Ultrasonic Pulse Velocity (UPV), dan resistivitas listrik, tanpa melibatkan uji ketahanan durabilitas jangka panjang seperti serangan sulfat atau klorida.
7. Variasi ketebalan pelat beton yang dianalisis hanya mencakup empat ukuran, yaitu 20 cm, 25 cm, 30 cm, dan 40 cm, tanpa mempertimbangkan efek sambungan atau kondisi tepi pada sistem perkerasan aktual.
8. Seluruh pengujian dilakukan pada kondisi laboratorium, sehingga hasil belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi lapangan secara aktual.

1.2 Teori

1.2.1 Beton

Beton merupakan material komposit yang tersusun atas semen portland atau jenis semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, serta air, yang dalam pembuatannya dapat ditambahkan bahan campuran tertentu sesuai kebutuhan kinerja (SNI-2847, 2019). Kombinasi bahan-bahan tersebut menghasilkan material dengan sifat mekanis dan durabilitas yang dapat disesuaikan terhadap kebutuhan struktural.

Beton segar didefinisikan sebagai campuran beton setelah proses pengadukan selesai dan sebelum terjadi perubahan sifat fisik akibat proses pengikatan awal. Seiring berjalannya waktu dan berlangsungnya reaksi hidrasi, beton segar akan mengalami pengerasan dan berubah menjadi beton keras, yaitu material padat yang terbentuk dari campuran semen portland atau sejenisnya, agregat halus, agregat kasar, air, serta bahan tambahan lain yang telah mencapai kondisi mengeras (SNI 03-4810-1998).

Agregat yang digunakan dalam pembuatan beton terdiri dari agregat halus dan agregat kasar. Agregat halus umumnya berupa pasir alami atau pasir hasil proses pemecahan batu, sedangkan agregat kasar biasanya berupa batu alam atau hasil produksi industri pemecah batu. Dalam sistem beton, semen berperan sebagai bahan pengikat yang menyatukan partikel agregat sekaligus mengisi rongga-rongga di antara butiran, sehingga terbentuk struktur yang padat dan memiliki kekuatan.

Berdasarkan berat jenisnya, beton normal diklasifikasikan sebagai beton dengan berat satuan berkisar antara 2200 hingga 2500 kg/m³, yang umumnya dibuat menggunakan agregat alam, baik dalam kondisi dipecah maupun tidak dipecah. Jenis beton ini paling banyak digunakan pada konstruksi struktural karena keseimbangan antara kekuatan, berat, dan kemudahan pelaksanaan.

Secara umum, beton memiliki sejumlah keunggulan dan keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi.

1. **Kelebihan beton** antara lain adalah kemampuannya menahan gaya tekan yang tinggi, sehingga sangat sesuai digunakan sebagai elemen struktural utama. Selain itu, beton memiliki ketahanan yang baik terhadap pengaruh lingkungan, termasuk korosi dan proses pembusukan, sehingga relatif awet dalam jangka panjang. Pada kondisi segar, beton mudah dibentuk sesuai kebutuhan desain melalui penggunaan bekisting, yang dapat digunakan kembali sehingga lebih efisien dan ekonomis. Beton segar juga memungkinkan diaplikasikan dengan berbagai metode pelaksanaan, seperti penyemprotan (shotcrete) pada permukaan beton lama yang mengalami retak atau pengisian celah dalam pekerjaan perbaikan. Kemampuan beton untuk dipompakan memudahkan pengecoran pada lokasi dengan akses terbatas. Di samping itu, beton memiliki ketahanan yang baik terhadap keausan dan api, sehingga biaya perawatan selama masa layan struktur relatif rendah.

2. **Kekurangan beton** terutama terletak pada kemampuannya yang rendah dalam menahan gaya tarik, sehingga beton cenderung mengalami retak apabila menerima tegangan tarik. Oleh karena itu, beton umumnya dikombinasikan dengan baja tulangan untuk menahan gaya tarik dan meningkatkan kinerja struktural. Beton juga mengalami perubahan volume berupa susut dan muai akibat variasi suhu dan kelembapan, sehingga pada struktur tertentu diperlukan sambungan dilatasi untuk mencegah retak yang tidak diinginkan. Selain itu, untuk memperoleh beton yang benar-benar kedap air, diperlukan pengendalian mutu dan pelaksanaan yang sangat teliti. Beton juga bersifat getas atau tidak daktil, sehingga perhitungan dan perencanaan struktur harus dilakukan secara cermat, khususnya pada bangunan tahan gempa, agar setelah dikombinasikan dengan tulangan baja, struktur mampu menunjukkan perilaku yang lebih daktil dan aman.

1.2.2 Material Penyusun Beton

1.1.1.1. 1.2.2.1 Semen Portland

Indonesia telah mampu memproduksi semen Portland yang terdiri atas lima jenis utama sesuai dengan fungsi dan penggunaannya, yaitu semen Portland Jenis I, II, III, IV, dan V. Seiring perkembangan teknologi material, Indonesia juga telah mengembangkan semen Portland Pozzolan (PPC) dan semen Portland Komposit (PCC), yang memanfaatkan material anorganik tambahan serta klinker semen untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan material.

Menurut SNI 2049-2015 (SNI 2049-2015, 2015), semen Portland didefinisikan sebagai semen hidrolis yang dihasilkan melalui proses penggilingan terak semen Portland, yang terutama tersusun atas senyawa kalsium silikat bersifat hidrolis, dan digiling bersama bahan tambah berupa satu atau lebih kristal senyawa kalsium sulfat, serta dapat ditambahkan bahan tambahan lain sesuai ketentuan.

Jenis dan penggunaannya adalah sebagai berikut:

Jenis semen Portland berdasarkan SNI 2049:2015 serta aplikasinya dapat diuraikan sebagai berikut:

1. **Semen Portland Jenis I**
Digunakan untuk keperluan umum yang tidak memerlukan persyaratan khusus terkait ketahanan sulfat atau kalor hidrasi.
2. **Semen Portland Jenis II**
Digunakan pada konstruksi yang membutuhkan ketahanan sedang terhadap sulfat atau menghasilkan kalor hidrasi sedang.
3. **Semen Portland Jenis III**
Digunakan apabila diperlukan perkembangan kekuatan awal yang tinggi setelah proses pengikatan.
4. **Semen Portland Jenis IV**
Digunakan pada struktur yang memerlukan kalor hidrasi rendah, seperti beton massa.
5. **Semen Portland Jenis V**

Digunakan pada kondisi lingkungan dengan kandungan sulfat tinggi sehingga memerlukan ketahanan sulfat yang tinggi.

Klinker semen Portland pada umumnya mengandung empat senyawa kimia utama yang dikenal sebagai mineral klinker. Komposisi potensial mineral-mineral tersebut dapat dianalisis menggunakan pendekatan komposisi Bogue sebagai berikut:

C₃S (Trikalsium Silikat)

$$C_3S = 4,071(CaO) - 7,600SiO_2 - 6,718Al_2O_3 - 1,430Fe_2O_3$$

C₂S (Dikalsium Silikat)

$$C_2S = 2,867SiO_2 - 0,7544C_3S$$

C₃A (Trikalsium Aluminat)

$$C_3A = 2,65Al_2O_3 - 1,692Fe_2O_3$$

C₄AF (Tetrakalsium Aluminoforit)

$$C_4AF = 3,043Fe_2O_3$$

Peran Mineral Klinker dalam Pengembangan Kekuatan

Dua mineral utama, yaitu **C₃S** dan **C₂S** (dalam bentuk β-C₂S), merupakan komponen paling berpengaruh terhadap perkembangan kekuatan beton serta ketahanan dan sifat struktural jangka panjang semen Portland. Mineral C₃S berperan dominan dalam pembentukan kekuatan awal, sedangkan C₂S berkontribusi pada kekuatan jangka panjang.

Reaksi antara CaO (kapur yang berasal dari batu kapur) dan SiO₂ (silika dari pasir) pada dasarnya sulit berlangsung, bahkan pada suhu pembakaran yang tinggi. Oleh karena itu, diperlukan penambahan:

- **Al₂O₃ (alumina)** sekitar 5%, dan
- **Fe₂O₃ (oksida besi)** sekitar 3%,

yang berfungsi sebagai fluks cair untuk mempermudah pelarutan kapur dan silika, sehingga memungkinkan terbentuknya senyawa C₃S dan C₂S secara lebih efektif selama proses pembakaran klinker.

Tabel 1 Syarat kimia utama

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO ₂ , minimum		20			
2	Al ₂ O ₃ , maksimum		6			
3	Fe ₂ O ₃ , maksimum		6		6,5	
4	MgO, maksimum	6	6	6	6	6
5	SO ₃ , maksimum Jika C ₃ A ≤ 8,0 Jika C ₃ A > 8,0	3,0 3,5	3	3,5 4,5	2,3	2,3
6	Hilang pijar, maksimum	5	3	3	2,5	3
7	Bagian tak larut, maksimum	3	1,5	1,5	1,5	1,5

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
8	C ₃ S, maksimum				35	
9	C ₂ S, minimum				40	
10	C ₃ A, maksimum		8	15	7	5
11	C ₄ AF + 2C ₃ A atau C ₄ AF + C ₂ F, maksimum					25

CATATAN:

a) Persyaratan pembatasan secara kimia berdasarkan perhitungan untuk senyawa potensial tertentu tidak harus diartikan bahwa oksida dari senyawa potensial tersebut dalam keadaan murni.

C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, Contoh C₃A = 3CaO.Al₂O₃

Titanium dioksida (TiO₂) dan fosfor pentaoksida (P₂O₅) termasuk dalam Al₂O₃.

Nilai yang biasa digunakan untuk Al₂O₃ dalam menghitung senyawa potensial (misal : C₃A) untuk tujuan spesifikasi adalah jumlah endapan yang diperoleh dengan penambahan NH₄OH dikurangi jumlah Fe₂O₃ (R₂O₃ – Fe₂O₃) yang diperoleh dalam analisis kimia basah.

Apabila: $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} \geq 0,64$, maka persentase C₃S, C₂S, C₃A dan C₄AF dihitung sebagai berikut:

$$\text{C}_3\text{S} = (4,071 \times \% \text{CaO}) - (7,600 \times \% \text{SiO}_2) - (6,718 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,430 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) - (2,852 \times \% \text{SO}_3)$$

$$\text{C}_2\text{S} = (2,867 \times \% \text{SiO}_2) - (0,7544 \times \% \text{C}_3\text{S})$$

$$\text{C}_3\text{A} = (2,650 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,692 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_4\text{AF} = (3,043 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

Apabila: $\frac{\% \text{Al}_2\text{O}_3}{\% \text{Fe}_2\text{O}_3} < 0,64$, terbentuk larutan padat (C₄AF + C₂F) = 4CaO. Al₂O₃.Fe₂O₃

Semen dengan komposisi ini di dalamnya tidak terdapat C₃A. maka (C₄AF + C₂F) dan C₃S dihitung sebagai berikut:

$$(\text{C}_4\text{AF} + \text{C}_2\text{F}) = (2,100 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) + (1,702 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_3\text{S} = (4,071 \times \% \text{CaO}) - (7,600 \times \% \text{SiO}_2) - (4,479 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (2,859 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) - (2,852 \times \% \text{SO}_3)$$

C₂S tetap dihitung dengan menggunakan rumus di atas: Perhitungan untuk semua senyawa potensial adalah berdasarkan hasil penentuan oksidanya yang dihitung sampai sedekat mungkin 0,1%. Semua hasil perhitungan dilaporkan sampai sedekat mungkin dengan 1,0%.

b) Apabila yang disyaratkan adalah kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4), maka syarat kimia ini tidak berlaku.

c) Apabila yang disyaratkan adalah pemuai karena sulfat yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4), maka syarat kimia ini tidak berlaku.

d) Tidak dapat dipergunakan.

Hidrasi semen Portland melibatkan unsur-unsur semen yaitu reaksi kalsium silikat anhidrat dan aluminat dengan air untuk membentuk fase yang terhidrasi. Hasil hidrasi padat tersebut menempati ruang lebih banyak dari partikel-partikel anhidrat dan menghasilkan massa yang kaku saling mengunci, dimana porositas adalah fungsi dari rasio air terhadap semen (w/c) dalam campuran.

Hidrasi semen adalah kompleks dan sehingga reaksi dari masing-masing unsur semen dalam bentuk silikat (C_3S dan C_2S) dan aluminat (C_3A dan C_4AF) terlebih dahulu dianalisa masing-masing secara tunggal.

Syarat mutu dari semen Portland harus memenuhi persyaratan berikut:

Tabel 2 Syarat fisika utama

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	Kehalusan: Uji permeabilitas udara, m^2/kg dengan alat: - Turbidimeter, min - Blaine,	160 280	160 280	160 280	160 280	160 280
2	Kekekalan: Pemuai dengan autoclave, maks %	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
3	Kuat tekan: - Umur 1 hari, kg/cm^2 , minimum - Umur 3 hari, kg/cm^2 , minimum - Umur 7 hari, kg/cm^2 , minimum - Umur 28 hari, kg/cm^2 , minimum	135 215 300	100; 70 175 120	120 240	70 170	80 150 210
4	Waktu pengikatan (metode alternatif) dengan alat: a) Gillmore - Awal, menit, minimal - Akhir, menit, maksimum b) Vicat - Awal, menit, minimal - Akhir, menit, maksimum	60 600 45 375	60 600 45 375	60 600 45 375	60 600 45 375	60 600 45 375

CATATAN:

a) Syarat kuat tekan ini berlaku jika syarat kalor hidrasi seperti tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4) atau jika syarat $C_3S + C_3A$ seperti tercantum pada tabel syarat kimia tambahan disyaratkan (Tabel 2).

Tabel 3 Syarat fisika tambahan

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
1	Pengikatan semu penetrasi akhir, % minimum	50	50	50	50	50
2	Kalor hidrasi - Umur 7 hari, $kal/gram$, maks - Umur 28 hari, $kal/gram$, maks		70 b)		60 70	
3	Kuat tekan: - Umur 38 hari, kg/cm^2 , minimum		280			
4	Pemuai karena sulfat 14 hari, %, maksimum		220 b)			0,04
5	Kandungan udara mortar, % volume, maksimum	12	12	12	12	12

CATATAN:

a) Persyaratan fisika tambahan ini berlaku hanya jika secara khusus diminta.

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
b)	Bila syarat kalor hidrasi ini disyaratkan, maka syarat $C_3S + C_3A$ seperti tercantum pada tabel kimia tambahan (Tabel 2) tidak diperlukan. Syarat kuat tekan ini berlaku bila syarat kalor hidrasi seperti yang tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4) atau bila syarat $C_3S + C_3A$ seperti yang tercantum pada tabel syarat kimia tambahan (Tabel 2) disyaratkan.					

1.2.2.2 Semen Portland Komposit

Semen Portland Komposit (Portland Composite Cement/PCC) merupakan bahan pengikat hidrolis yang diproduksi melalui proses penggilingan bersama antara klinker semen Portland dan gips, yang dikombinasikan dengan satu atau lebih material anorganik tambahan. Selain melalui penggilingan bersama, PCC juga dapat dihasilkan dari proses pencampuran bubuk semen Portland dengan bubuk material anorganik lainnya. Material anorganik yang digunakan antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), bahan pozzolan, senyawa silikat, dan batu kapur, dengan kadar total bahan tambahan berkisar antara 6% hingga 35% dari massa semen PCC (SNI 7064, 2014).

Semen PCC termasuk ke dalam kelompok *blended cement* atau semen campuran, yang dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan sifat tertentu yang tidak sepenuhnya dapat dicapai oleh semen Portland tipe I. Penggunaan semen PCC didasarkan pada pertimbangan peningkatan kinerja, efisiensi material, serta aspek keberlanjutan. Untuk memperoleh karakteristik yang diinginkan, pada proses produksinya ditambahkan bahan aditif atau bahan campuran mineral seperti pozzolan, fly ash, dan *silica fume*. Keberadaan bahan-bahan tersebut berperan dalam memodifikasi sifat fisik dan mekanis semen, seperti meningkatkan durabilitas, menurunkan panas hidrasi, serta memperbaiki kinerja beton dalam jangka panjang. Tabel 4 menunjukkan syarat fisika dari semen PCC.

Tabel 4 Syarat fisika utama semen portland komposit

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan
1	Kehalusan dengan alat <i>blayne</i>	m ² /kg	min. 280
2	Kekekalan bentuk dengan autoclave:		
	- Pemuaian	%	maks. 0,80
	- Penyusutan	%	maks. 0,20
3	Waktu pengikatan dengan alat vicat:		
	- Pengikatan awal	menit	min. 45
	- Pengikatan akhir	menit	maks. 375
4	Kuat tekan:		
	- umur 3 hari	kg/cm ²	min. 125
	- umur 7 hari	kg/cm ²	min. 200
	- umur 28 hari	kg/cm ²	min. 280
5	Pengikatan semu:		

No.	Uraian	Satuan	Persyaratan
	- Penetrasi akhir	%	min. 50
6	Kandungan udara dalam mortar	% volume	maks. 12

1.2.2.3 Agregat

Agregat, yang terdiri dari agregat halus dan agregat kasar, menempati porsi dominan dalam beton, yaitu sekitar 70–75% dari volume total campuran. Pada mortar, agregat halus bahkan dapat mencapai proporsi serupa. Oleh karena itu, karakteristik agregat memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap kekuatan, stabilitas volume, dan ketahanan beton serta mortar terhadap pengaruh lingkungan, umur layanan, dan paparan material agresif. Selain aspek teknis, agregat juga memiliki nilai ekonomis yang lebih rendah dibandingkan semen, sehingga penggunaannya dioptimalkan dalam campuran beton dengan tetap memperhatikan gradasi dan proporsi yang sesuai.

Jumlah dan kombinasi agregat dalam beton ditentukan berdasarkan ukuran butir dan susunan gradasi antara agregat halus dan agregat kasar. **Agregat halus** didefinisikan sebagai material yang lolos ayakan No. 4 (ukuran < 4,75–5,0 mm), umumnya berupa pasir alam atau pasir hasil pemecahan batu. **Agregat kasar** merupakan material yang tertahan pada ayakan No. 4, berupa kerikil atau batu pecah. Agregat alam yang memenuhi standar mutu masih menjadi pilihan utama dalam konstruksi beton dan mortar. Pasir yang digunakan harus bersih dari lumpur dan kotoran, sedangkan agregat kasar diharapkan berbentuk relatif kubikal dan tidak pipih memanjang agar memberikan interlocking yang baik.

Data karakteristik agregat yang perlu diketahui dalam perencanaan campuran beton meliputi:

- Berat jenis
- Gradasi
- Kadar air
- Kadar lumpur
- Berat volume
- Keausan
- Resapan agregat
- Kandungan bahan organik
- Modulus kehalusan
- Ukuran maksimum agregat

Persyaratan Agregat Halus

Agregat halus untuk beton dapat berupa pasir alam hasil pelapukan batuan atau pasir buatan hasil pemecahan batu, dengan ukuran maksimum sekitar 5 mm. Berdasarkan ketentuan standar, agregat halus harus memenuhi persyaratan berikut:

1. Terdiri dari butir-butir tajam dan keras serta memiliki indeks kekerasan $\leq 2,2$.
2. Bersifat kekal, tidak mudah hancur akibat pengaruh cuaca seperti panas dan hujan.

3. Memenuhi uji keawetan dengan larutan garam sulfat, yaitu:
 - Kehilangan maksimum 12% bila diuji dengan natrium sulfat.
 - Kehilangan maksimum 10% bila diuji dengan magnesium sulfat.
4. Kandungan lumpur tidak melebihi 5% terhadap berat kering; apabila melampaui batas tersebut, pasir harus dicuci.
5. Tidak mengandung bahan organik berlebihan, yang dibuktikan melalui uji warna Abrams–Harder menggunakan larutan NaOH 3%.
6. Memiliki modulus kehalusan antara 1,5–3,8 dan susunan gradasi yang masuk dalam salah satu zona gradasi yang ditetapkan.
7. Tidak bereaksi negatif terhadap alkali apabila digunakan pada beton dengan tingkat keawetan tinggi.
8. Pasir laut tidak diperkenankan digunakan sebagai agregat halus kecuali dengan rekomendasi lembaga penguji resmi.

Pasir Standar untuk Pengujian Semen dan Fly Ash

Pasir standar yang digunakan dalam pengujian semen portland dan fly ash harus berupa pasir kuarsa alam berbentuk bulat, bersih, dan keras, dengan ketentuan utama:

- Kadar SiO_2 minimum 95%.
- Kadar SiO_2 larut HCl maksimum 0,25%.
- Tidak mengandung lumpur dan bahan organik.
- Seluruh butir berada pada rentang ukuran 1,2–0,6 mm dengan toleransi $\pm 2\%$.

Persyaratan agregat halus secara umum menurut SNI 03-6821-2002 adalah sebagai berikut:

- Memiliki butir tajam dan keras.
- Bersifat kekal terhadap pengaruh cuaca.
- Mengandung lumpur maksimum 5% terhadap berat kering, dan wajib dicuci apabila melampaui batas tersebut.

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 2847:2019, agregat kasar didefinisikan sebagai material granular yang berasal dari hasil pelapukan alami batuan berupa kerikil, atau dari hasil proses mekanis pemecahan batuan (*crushed stone*) yang diproduksi oleh industri pemecah batu. Agregat kasar tersebut memiliki ukuran butir yang umumnya berada pada rentang 5 mm hingga 40 mm. Suatu agregat diklasifikasikan sebagai agregat kasar apabila ukuran partikelnya lebih besar dari $\frac{1}{4}$ inci atau sekitar 6 mm.

Karakteristik agregat kasar memiliki peranan penting terhadap mutu beton yang telah mengeras. Sifat-sifat agregat kasar, seperti kekerasan, bentuk, dan kebersihannya, sangat memengaruhi kekuatan akhir beton serta ketahanannya terhadap disintegrasi, pengaruh cuaca, dan berbagai mekanisme kerusakan lainnya. Oleh karena itu, agregat kasar mineral harus bebas dari kandungan bahan organik dan kotoran yang dapat mengganggu proses hidrasi. Selain itu, agregat kasar

dituntut memiliki kemampuan berikatan yang baik dengan pasta semen agar terbentuk matriks beton yang kuat dan stabil (Nawy, 2010).

SNI 2847:2019 juga mengatur batasan ukuran maksimum nominal agregat kasar yang diperbolehkan dalam campuran beton. Ukuran maksimum tersebut harus memenuhi ketentuan berikut:

1. Tidak melebihi seperlima ($1/5$) jarak terkecil antara sisi cetakan,
2. Tidak melebihi sepertiga ($1/3$) dari ketebalan pelat beton (*slab*), dan
3. Tidak melebihi tiga perempat ($3/4$) jarak bersih minimum antara tulangan, kawat, bundel tulangan, tendon prategang, atau selongsong.

Ketentuan ini dimaksudkan untuk menjamin kemudahan pengerjaan, pemadatan yang optimal, serta distribusi agregat yang merata di dalam beton, sehingga kualitas dan kinerja struktural beton dapat tercapai sesuai dengan perencanaan.

Syarat-syarat gradasi agregat kasar dapat dilihat pada Tabel 5 di bawah ini:

Tabel 5 Syarat - Syarat Gradasi Agregat Kasar

Ukuran Saringan (mm)	Presentasi Lolos Saringan (%)
50	100
38	95 - 100
19	35 - 70
9,5	10 - 30
4,75	0 - 5

Sumber: *Concrete Technology, AM.Nevile & J.J Brooks*

1.2.2.4 Air

Air merupakan komponen penting dalam pembuatan beton karena berperan langsung dalam memicu reaksi kimia antara semen dan air (hidrasi), membasahi permukaan agregat, serta memberikan efek pelumasan yang memudahkan proses pencampuran dan pengerjaan beton. Pada umumnya, air yang layak minum dapat digunakan sebagai air pencampur beton. Sebaliknya, air yang mengandung zat-zat berbahaya seperti garam, minyak, gula, atau bahan kimia tertentu tidak dianjurkan karena dapat menurunkan kekuatan beton dan mengubah sifat fisik maupun kimia semen.

Penggunaan air yang tercemar juga berpotensi mengurangi daya lekat antara agregat dan pasta semen, serta dapat berdampak negatif terhadap kemudahan pengerjaan (*workability*) beton. Oleh karena itu, kualitas air pencampur harus diperhatikan agar tidak mengganggu proses hidrasi dan pembentukan struktur beton yang stabil.

Karakteristik pasta semen ditentukan oleh reaksi kimia antara semen dan air, sehingga parameter yang paling berpengaruh terhadap kekuatan beton bukanlah perbandingan air terhadap keseluruhan material penyusun beton, melainkan rasio air terhadap semen (*water-cement ratio*). Rasio air-semen yang terlalu tinggi akan menghasilkan pori-pori atau rongga kapiler berlebih setelah proses hidrasi, yang berakibat pada penurunan kekuatan beton. Sebaliknya, jumlah air yang terlalu sedikit

menyebabkan hidrasi semen tidak berlangsung secara sempurna, sehingga beton yang dihasilkan juga memiliki kekuatan yang rendah. Oleh karena itu, pengendalian rasio air-semen menjadi faktor kunci dalam menghasilkan beton dengan mutu yang optimal (Nawy, 2008).

1.2.2.5 Fly Ash

Fly ash umumnya dihasilkan sebagai produk samping dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik. Produk samping ini mencakup abu terbang, abu dasar, slag boiler, dan gas buang. Partikel abu terbang adalah produk samping utama yang terdiri dari partikel bubuk halus dan heterogen. Selama proses pembakaran batu bara, partikel abu terbang umumnya diangkut oleh gas buang dan diendapkan menggunakan pengendap elektrostatik atau mekanik. Pada suhu sekitar 1500°C , lelehan terbentuk dari bahan non-organik dalam batu bara dan kemudian mengeras membentuk bola kaca padat berongga dengan permukaan yang halus, dengan ukuran partikel bervariasi dari 0,5 hingga 200 mikrometer.

Karakteristik komposisi fly ash sangat bervariasi tergantung pada jenis batu bara yang dibakar, kondisi proses, pengendalian pendinginan, dan metode pembakaran. Karena keragaman ini, abu terbang diklasifikasikan ke dalam dua kelompok utama, yaitu abu terbang kelas C dan kelas F. Abu terbang kelas F, yang dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis antrasit atau bituminus, memiliki total kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 yang lebih dari 70%. Sementara itu, abu terbang kelas C, yang dihasilkan dari pembakaran batu bara sub-bituminus atau lignit, memiliki jumlah total SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 yang lebih dari 50% menurut standar ASTM. ASTM juga menggunakan kandungan oksida logam sebagai dasar untuk karakterisasi abu terbang kelas C dan F. Fly ash yang mengandung lebih dari 20% kalsium oksida diklasifikasikan sebagai kelas C, sedangkan yang memiliki kandungan kalsium yang lebih rendah diklasifikasikan sebagai kelas F (Bentz, 2011). Selain itu, berdasarkan ASTM C618-22 (ASTM C618-22, 2022a), perbedaan antara kelas C dan F juga dapat dibedakan berdasarkan persentase CaO , dimana kelas C memiliki lebih dari 10% CaO sedangkan kelas F kurang dari 10%. Tabel 8 menunjukkan persyaratan kimia abu terbang.

Fly ash tidak memiliki sifat pengikat mandiri sebagaimana semen, namun keberadaannya dalam sistem beton tetap memberikan kontribusi signifikan melalui mekanisme reaksi pozzolanik. Dengan adanya air dan ukuran partikel yang sangat halus, kandungan oksida silika (SiO_2) dalam fly ash bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] yang dihasilkan selama proses hidrasi semen, sehingga membentuk senyawa baru yang bersifat mengikat dan berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan beton (Djiwantoro, 2001).

Abu batubara dapat dimanfaatkan dalam beton baik sebagai material terpisah maupun sebagai bagian dari campuran semen, dengan tujuan utama untuk memperbaiki karakteristik fisik dan mekanis beton. Dalam perannya sebagai bahan tambahan (*admixture*), fly ash dapat bertindak sebagai pengisi (*filler*) yang meningkatkan kohesi internal dan memperbaiki struktur mikro beton. Keberadaan

partikel fly ash yang halus mampu mengisi rongga-rongga mikro, khususnya pada zona transisi antara pasta semen dan agregat, yang merupakan bagian terlemah dalam beton. Akibatnya, porositas beton berkurang dan kerapatan matriks meningkat, sehingga kekuatan beton menjadi lebih baik.

Kontribusi fly ash terhadap perkembangan kekuatan beton terjadi secara bertahap. Pada umur awal hingga sekitar 7 hari, peningkatan kekuatan terutama dipengaruhi oleh perubahan fisik dan efek pengisian dari partikel fly ash. Selanjutnya, pada rentang umur 7 hingga 28 hari, peningkatan kekuatan beton merupakan hasil sinergi antara hidrasi semen yang berkelanjutan dan reaksi pozzolanik fly ash, yang semakin aktif seiring waktu. Proses ini menghasilkan struktur beton yang lebih padat dan stabil pada umur lanjut.

Seperti yang telah disebutkan, abu terbang adalah bahan pozzolanik berbasis silika atau silika-alumina yang memungkinkan untuk digunakan sebagai pengganti parsial semen dalam beton (McCarthy, 2019). Abu terbang terdiri dari tiga komponen utama yaitu bahan organik, bahan anorganik dalam fase amorf dan kristalin, serta bahan fluida yang terkandung dalam bahan organik dan anorganik.

Penggunaan abu terbang tidak hanya terbatas pada industri beton, tetapi juga digunakan dalam aplikasi lain seperti pengolahan air limbah, sintesis zeolit, stabilisasi tanah, dan nano abu terbang untuk meningkatkan sifat-sifatnya (Mushtaq, 2019). Penggunaan abu terbang telah dimulai sejak awal abad ke-20, dimana abu terbang seringkali ditambahkan sebagai komponen utama dalam produksi semen atau beton (Scrivener et al., 2018). Substitusi semen dengan abu terbang bukan hanya menguntungkan dari segi lingkungan dengan mengurangi emisi gas rumah kaca, tetapi juga dapat menurunkan biaya konstruksi. Abu terbang memiliki berbagai keunggulan, seperti harga yang terjangkau, ketersediaan yang mudah, struktur yang baik dengan kandungan alumina aktif tinggi dan silikat amorf, serta kecocokan untuk produksi geopolimer dengan kekuatan tinggi menggunakan larutan aktivator alkali (Gupta et al., 2017; Schmucker & Mackenzie, 2005). Tabel 6 memperlihatkan karakteristik fisik fly ash, Tabel 7 menunjukkan karakteristik kimia fly ash, dan Tabel 8 menunjukkan klasifikasi fly ash.

Tabel 6 Karakteristik fisik *fly ash* (ASTM C618-22, 2022b)

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
Kehalusan: Jumlah tertahan 14elati disaring pada 45 μ m (No. 325) saringan, maksimum, %A	34	34	34
Indeks kekuatan 14elative: Dengan semen portland, saat umur 7 hari, persen kontrol	75c	75c	75c
Dengan semen portland, saat umur 28 hari, persen control	75c	75c	75c
Kebutuhan air, maksimum, persen control	115	105	105
Kekekalan: Ekspansi atau kontraksi autoklaf, maks, %	0.8	0.8	0.8

Kebutuhan	N	Kelas F	C
Persyaratan keberagaman: Kepadatan dan kehalusan sampel individual tidak boleh bervariasi dari rata-rata yang ditetapkan oleh sepuluh pengujian sebelumnya, atau oleh semua pengujian sebelumnya jika jumlahnya kurang dari sepuluh, lebih dari:			
Densitas, variasi maksimum rata-rata, %	5	5	5
Persentase yang tertahan pada 45 μm (No.325, variasi maks, poin persentase dari rata-rata	5	5	5

Tabel 7 Kandungan kimia *fly ash* (ASTM C618-22, 2022b)

Kebutuhan	N	Kelas F	C
Silicon dioxide (SiO_2) + aluminium oxide (Al_2O_3) + iron oxide (Fe_2O_3), min, %	70	70	50
Sulfur trioxide (SO_3), maks, %	4,0	5,0	5,0
Moisture, maks, %	3,0	3,0	3,0
Loss on ignition (LOI), maks, %	10,0	6,0	6,0

Tabel 8 Klasifikasi *fly ash*

Komponen	Bituminus	Sub-bituminus	Lignit
SiO_2	20-60	40-60	15-45
Al_2O_3	5-35	20-30	20-25
Fe_2O_3	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO_3	0-4	0-2	0-10
Na_2O	0-4	0-2	0-6
K_2O	0-3	0-4	0-4
LOI	0-15	0-3	0-5

1.2.3 Sifat Mekanis Beton

Sifat mekanis beton yang telah mengeras dapat dikelompokkan ke dalam dua kategori utama, yaitu sifat jangka pendek dan sifat jangka panjang. Sifat jangka pendek berkaitan dengan respons beton terhadap pembebanan sesaat, yang meliputi kemampuan menahan gaya tekan, tarik, dan geser, serta kekakuan material yang dinyatakan melalui nilai modulus elastisitas. Sementara itu, sifat jangka panjang berhubungan dengan perilaku beton akibat pembebanan dan kondisi lingkungan dalam kurun waktu tertentu, yang umumnya ditunjukkan oleh fenomena rangkak (*creep*) dan susut (*shrinkage*).

1.2.3.1 Kuat Tekan

Kuat tekan beton diidentifikasi sebagai parameter utama dalam menentukan kapasitas beton untuk menahan beban tekan per satuan area penampangnya. Tingkat kekuatan tekan beton ini secara langsung proporsional dengan kekuatan struktur yang diperlukan. Nawy (2008) menyatakan bahwa beberapa variabel mempengaruhi kuat tekan beton, termasuk komposisi campuran, karakteristik agregat, serta durasi dan kualitas perawatan (curing).

Sebagaimana dikemukakan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI 1974, 2011), kuat tekan beton didefinisikan sebagai rasio antara beban maksimal yang bisa dipikul oleh sampel beton selama pengujian terhadap luas area penampang sampel tersebut. Beban yang diberikan terus-menerus kepada sampel beton dapat mengakibatkan kerusakan sampel jika beban yang bekerja telah melebihi beban maksimum yang dapat dipikul oleh sampel yang diaplikasikan oleh alat uji tekan. Nilai kuat tekan beton tersebut dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 1 yang diberikan sebagai berikut.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Di mana:

$f'c$ = Kuat tekan beton benda uji silinder (MPa atau N/mm²)

P = Gaya tekan aksial dari mesin tekan (N)

A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

1.2.3.2 Kuat Lentur

Kuat lentur (*flexural strength* atau *modulus of rupture*) adalah kemampuan beton untuk menahan tegangan tarik yang timbul pada serat terluar akibat momen lentur yang bekerja pada suatu elemen struktural. Menurut SNI 4431:2011 tentang *Metode Pengujian Kuat Lentur Beton dengan Dua Titik Pembebanan*, pengujian kuat lentur dilakukan dengan membebani balok beton secara bertahap hingga terjadi retak atau patah pada bagian bawah balok. Tegangan maksimum yang terjadi pada serat terluar pada saat patah dinyatakan sebagai kuat lentur beton. Parameter ini menjadi penting terutama pada elemen beton yang mengalami pembebanan lentur dominan, seperti pelat lantai, perkerasan beton, dan balok beton bertulang.

Secara mekanika material, kuat lentur menggambarkan kemampuan beton dalam mentransfer tegangan tarik melalui mekanisme adhesi antara pasta pengikat dan agregat, serta melalui jembatan mikro yang terbentuk di zona transisi antar muka (ITZ) (Neville, 2011). Beton termasuk material yang lemah terhadap tarik, sehingga kuat lentur menjadi parameter yang sensitif terhadap perubahan mikrostruktur dan homogenitas campuran (Mindess, Young, & Darwin, 2003). Ketika beton dibebani lentur, bagian bawah elemen mengalami tegangan tarik sedangkan bagian atas mengalami tegangan tekan. Retak awal umumnya terbentuk pada zona tarik, dan

penyebaran retak ini menjadi indikator dari perilaku lentur beton (Mehta & Monteiro, 2014).

Secara teoritis, kuat lentur (f_r) dihitung menggunakan persamaan 2:

$$f_r = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (2)$$

Di mana:

- f_r = kuat lentur (MPa),
- P = beban maksimum yang menyebabkan patah (N),
- L = jarak antara tumpuan (mm),
- b = lebar spesimen (mm),
- h = tinggi spesimen (mm).

Nilai kuat lentur beton tidak hanya bergantung pada kekuatan tekan, tetapi juga pada kualitas pasta semen, ikatan antar partikel agregat, dan distribusi pori di dalam matriks beton (Neville, 2012). Pada beton normal, kuat lentur umumnya berkisar antara 10–15% dari kuat tekan (Mindess et al., 2003), sedangkan pada beton dengan bahan tambah pozzolanik atau material alternatif seperti fly ash dan slag, nilai ini dapat bervariasi tergantung tingkat reaksi pozzolanik dan pembentukan gel pengikat (Mehta & Monteiro, 2014).

Menurut ACI Committee 318 (2019), pengujian kuat lentur menggunakan metode *third-point loading* memberikan representasi yang lebih merata terhadap momen lentur dibanding metode pembebanan di tengah bentang (*center-point loading*). Hal ini karena daerah momen maksimum terbentuk lebih luas sehingga hasil uji menjadi lebih stabil dan dapat menggambarkan kualitas beton secara keseluruhan.

Faktor-faktor yang memengaruhi kuat lentur beton dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Kualitas pasta pengikat: Densitas dan kekompakan pasta semen atau pasta geopolimer sangat menentukan kemampuan beton menahan tegangan tarik. Pasta yang padat dengan sedikit rongga udara akan menghasilkan kuat lentur lebih tinggi (Neville, 2011).
- Zona transisi antar muka (ITZ): ITZ merupakan daerah lemah antara pasta dan agregat. Struktur ITZ yang lebih rapat dan berikatan baik akan meningkatkan distribusi tegangan dan memperlambat inisiasi retak (Mindess et al., 2003).
- Kualitas dan jenis agregat: Agregat keras, bersih, dan bertekstur kasar memperkuat ikatan mekanis dengan pasta pengikat, sehingga meningkatkan ketahanan lentur. Sebaliknya, agregat ringan atau berpori dapat menurunkan kuat lentur karena berkurangnya kekakuan sistem (Mehta & Monteiro, 2014).
- Rasio air terhadap bahan pengikat (w/b atau A/FA): Rasio yang rendah menghasilkan porositas lebih kecil dan ikatan antar partikel yang lebih

kuat, sedangkan rasio tinggi memperlemah struktur mikro beton (Neville, 2011).

- Adanya bahan tambah (admixtures) dan serat: Penambahan bahan mineral seperti fly ash, slag, atau silika fume dapat memperbaiki mikrostruktur dan meningkatkan kuat lentur melalui pembentukan gel C-S-H atau N-A-S-H yang lebih rapat (Thomas, 2013). Sementara itu, serat polimer seperti polypropylene mampu menahan penyebaran retak dan meningkatkan daktilitas (Bentur & Mindess, 2007).

1.2.3.3 Modulus Elastisitas

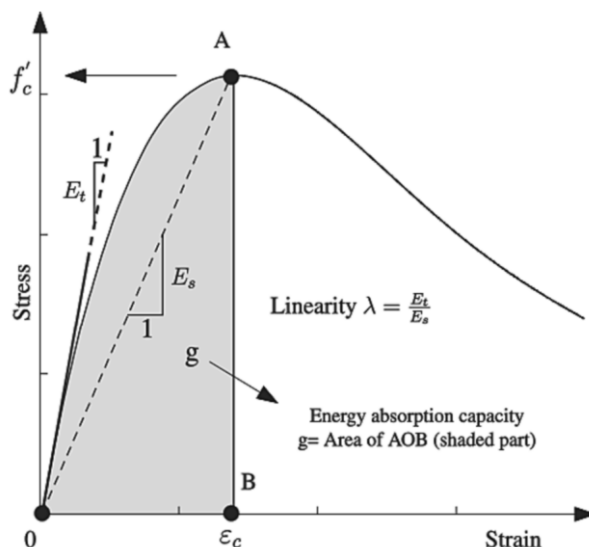
Standar ASTM C469-22 dapat digunakan untuk menguji modulus elastisitas beton di bawah beban tertentu. Untuk melakukan pengujian ini, benda uji silinder beton ditempatkan di dalam alat kompresi uniaxial yang dilengkapi dengan Linear Variable Differential Transformer (LVDT) untuk mengukur deformasi dan mencatat regangan benda uji di bawah beban yang diterapkan. Akhirnya, diagram kurva tegangan yang diperoleh digunakan untuk menghitung modulus elastisitas beton.

Metode uji modulus elastisitas dilakukan sesuai dengan ASTM C469-21 (2021). Persamaan 4 digunakan untuk menghitung modulus elastisitas benda uji eksperimental.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (3)$$

Di mana:

- E = Modulus Elastisitas (MPa)
 S_1 = Tegangan sesuai dengan regangan 0,00005 (MPa)
 S_2 = Tegangan 40% dari beban maksimum (MPa)
 ε_2 = Regangan pada tegangan S_2



Gambar 1 Kurva Tegangan-regangan (Zhong & Wille, 2015)

Sedangkan secara teoritis, modulus elastisitas beton normal (E_c) dapat dihitung dengan Persamaan 4 dan 5 yang dikutip dari SNI 2847:2019, yaitu:

$$E_c = W_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'c} \quad (4)$$

Dimana:

- E_c = Modulus Elastisitas Beton (MPa)
- $f'c$ = Kuat tekan beton umur 28 hari (MPa)
- W_c = Berat satuan beton (kg/m^3)

$$E_c = 4700 \sqrt{f'c} \quad (5)$$

Dimana:

- E_c = Modulus Elastisitas Beton (MPa)
- $f'c$ = Kuat tekan beton umur 28 hari (MPa)

1.2.4 Uji Tanpa Merusak

1.2.4.1 Uji Kecepatan Rambat Gelombang Beton (UPV)

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) adalah metode uji tak merusak untuk menilai kualitas dan keseragaman beton in-situ dengan mengukur kecepatan rambat gelombang ultrasonik melalui material. ASTM C597-22 (2022) mendeskripsikan prinsip dasar: sebuah transduser memancarkan pulsa gelombang tegangan longitudinal yang merambat dalam beton dan diterima oleh transduser kedua pada jarak tertentu; waktu tempuh dicatat secara elektronik untuk menghitung kecepatan rambat. UPV terutama digunakan untuk memetakan variasi mutu, mengindikasikan adanya rongga atau retak, mengevaluasi efektivitas perbaikan retak, dan bila dikalibrasi mendukung estimasi parameter mekanik beton. Pengaturan lintasan (langsung, semi-langsung, atau permukaan), kondisi permukaan, serta kelembapan dan suhu beton harus dikendalikan karena memengaruhi pembacaan UPV. Secara kuantitatif, kecepatan pulsa (V) dihitung menggunakan persamaan 6.

$$V = \frac{L}{T} \quad (6)$$

Dimana:

- V = Kecepatan rambat pulsa ultrasonik (m/s)
- L = Jarak antar transducer (m)
- T = Waktu tempuh pulsa (s)

Nilai V yang diperoleh dapat dikaitkan dengan sifat elastisitas dan densitas beton. ASTM C597-22 juga menjelaskan hubungan teoritis kecepatan rambat gelombang longitudinal dengan sifat material beton melalui persamaan 7.

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (7)$$

Dimana:

E = Modulus elastisitas dinamik beton (Pa atau N/m²)

μ = Rasio poisson dinamik

ρ = Massa jenis beton (kg/m³)

Persamaan ini menunjukkan bahwa peningkatan modulus elastisitas (E) akan meningkatkan kecepatan gelombang, sementara nilai rasio Poisson (μ) dan massa jenis (ρ) berpengaruh dalam menurunkan kecepatan rambat. Oleh karena itu, parameter-parameter material seperti kadar air, jenis agregat, serta suhu beton harus dilaporkan bersama nilai V untuk interpretasi yang akurat. Adapun tingkat kualitas beton berdasarkan hasil uji UPV dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9 Tingkat kualitas beton berdasarkan uji UPV (International Atomic Energy Agency, 2002)

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

Yang (2022) menegaskan bahwa kecepatan gelombang dipengaruhi oleh kerapatan material dan modulus (sehingga korelasi dengan kuat tekan memerlukan pemahaman komposisi dan kondisi curing beton). Bolborea et al. (2021) mengemukakan pendekatan-pendekatan statistik untuk meningkatkan prediksi kuat tekan dari data UPV dan menyoroti perlunya kalibrasi lokal dengan inti beton (core) untuk memperoleh estimasi yang andal. Selain itu, tinjauan kombinasi teknik NDT menyarankan integrasi UPV dengan metode lain (mis. rebound hammer/sonReb, radiografi, atau pengujian resonansi) untuk memperbaiki akurasi penilaian kondisi dan kekuatan beton (Kouddane, 2022).

1.2.4.2 Resistivitas Beton

Pengujian resistivitas beton merupakan salah satu metode tak merusak yang bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan beton dalam menghambat pergerakan ion di dalam pori-porinya. Menurut ASTM C1876, resistivitas listrik beton diperoleh dengan mengukur hambatan aliran arus listrik melalui sampel beton yang telah dikondisikan hingga mencapai keadaan jenuh. Nilai resistivitas dianggap sebagai indikator penting terhadap ketahanan beton, khususnya dalam menahan penetrasi ion klorida yang dapat memicu korosi pada tulangan. Oleh karena itu, parameter ini

sering digunakan untuk menilai durabilitas beton dan memprediksi kinerja jangka panjang suatu struktur.

Dalam ASTM C1876, resistivitas beton dihitung dengan membagi nilai hambatan listrik yang terukur dengan faktor geometrik spesimen, sehingga menghasilkan satuan ohm-meter ($\Omega \cdot m$). Secara prinsip, resistivitas merupakan invers dari konduktivitas listrik dan bergantung pada kondisi mikrostruktur beton. Standar ini menekankan pentingnya pengendalian faktor-faktor yang berpengaruh, seperti tingkat kejenuhan, suhu pengujian, serta dimensi dan bentuk spesimen.

Obla dan Lobo (2021) menegaskan bahwa resistivitas beton menunjukkan korelasi yang baik dengan ketahanan beton terhadap penetrasi ion klorida, meskipun hasilnya sangat dipengaruhi oleh prosedur *conditioning* sebelum pengujian. Medeiros-Junior (2016) menemukan bahwa kondisi kejenuhan beton berperan besar terhadap nilai resistivitas, di mana beton yang tidak sepenuhnya jenuh menunjukkan nilai yang berfluktuasi seiring waktu. Sementara itu, Xue et al. (2021) menekankan bahwa metode empat elektroda dapat meminimalkan pengaruh kontak permukaan dan menghasilkan pengukuran yang lebih akurat, sehingga dapat meningkatkan reliabilitas pengujian baik di laboratorium maupun di lapangan. Temuan-temuan ini menegaskan bahwa meskipun uji resistivitas bersifat sederhana, interpretasinya harus mempertimbangkan kondisi material dan prosedur pengujian yang diterapkan.

1.2.5 Tanah

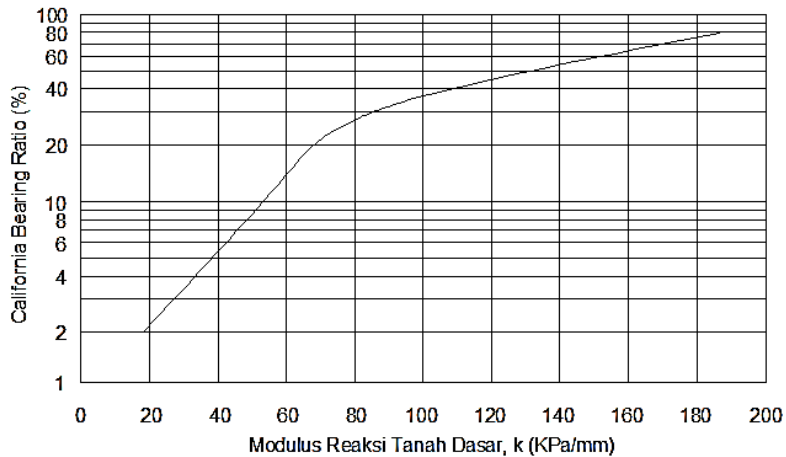
1.2.5.1 California Bearing Ratio (CBR)

Pengujian CBR dilakukan untuk mengukur tahanan penetrasi tanah. Pengujian CBR dapat dilakukan di laboratorium maupun di lapangan. Nilai CBR laboratorium dan lapangan tidak selalu menghasilkan nilai yang sama. Hal ini terjadi pada tanah berbutir. Pada tanah berbutir, pengaruh tekanan kekang pada dinding silinder CBR laboratorium sangat besar, sehingga hasil CBR laboratorium akan lebih tinggi.

Daya dukung tanah dasar untuk struktur perkerasan kaku ditentukan dengan pengujian CBR lapangan sesuai dengan SNI 03-1731-1989 atau CBR laboratorium sesuai dengan SNI 03-1744-1989. Apabila tanah dasar mempunyai CBR lebih kecil dari 2%, maka harus ditambahkan pondasi bawah yang terbuat beton kurus (*lean mix-concrete*) setebal 15 cm yang dianggap mempunyai CBR tanah dasar efektif 5%.

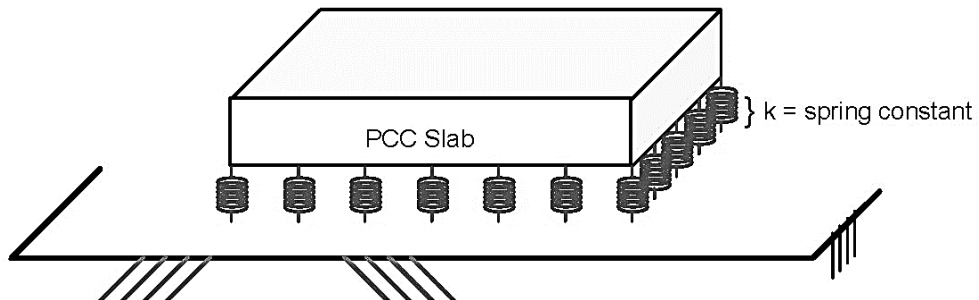
1.2.4.3 Modulus reaksi tanah

Kekuatan tanah dasar pada struktur perkerasan kaku dinyatakan dengan modulus reaksi tanah (k). Daya dukung atau kapasitas dasar pada konstruksi perkerasan kaku yang umum digunakan adalah CBR yang nilainya dikorelasikan menjadi modulus reaksi tanah dasar (k). Hubungan antara CBR dan modulus reaksi tanah dapat dilihat pada Gambar 2.



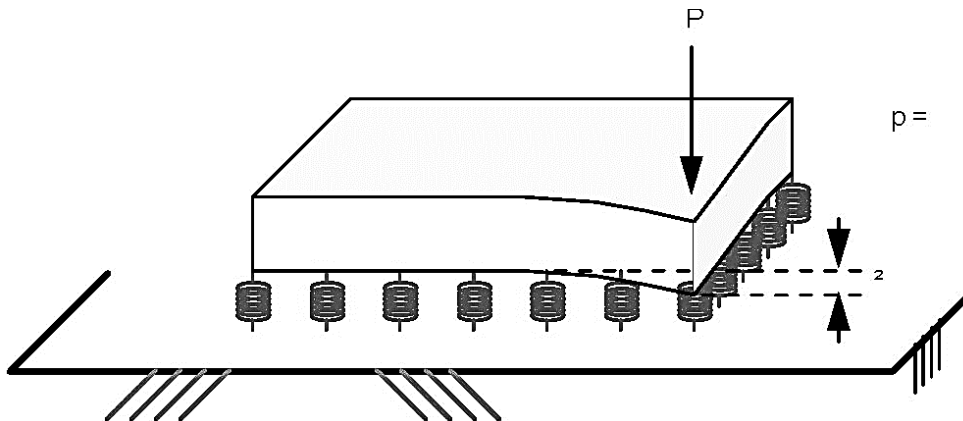
Gambar 2 Hubungan antara CBR dengan modulus reaksi tanah dasar (Pd T-14-2003)

Modulus reaksi tanah dasar merupakan estimasi kapasitas daya dukung lapisan di bawah pelat beton pada struktur perkerasan kaku. Modulus reaksi tanah dasar awalnya dikembangkan oleh Westergaard yang menyatakan nilai k sebagai konstanta pegas pada model dukungan atau tumpuan di bawah pelat beton seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Modulus reaksi tanah dasar Westergaard (Zhou,2006)

Tekanan reaktif untuk melawan beban sebanding dengan deformasi pada pegas dan nilai k sebagaimana digambarkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Defleksi pelat beton yang dibebani (Zhou,2006)

1.3 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu pemanfaatan fly ash sebagai material konstruksi beton masih berkembang hingga saat ini sebagai substitusi terhadap semen (SCM). Sehingga dipandang perlu untuk meninjau hasil-hasil penelitian terdahulu terkait beton fly ash untuk memberikan hipotesis dan gambaran hasil yang akan diperoleh. Tabel 10 menampilkan ringkasan penelitian terdahulu terkait pemanfaatan fly ash pada beton.

Penelitian Thorne et al., (2024) mengevaluasi penilaian siklus hidup (LCA) pada beton rendah karbon yang menggabungkan abu terbang dan batu kapur sebagai material pengganti semen (SCM). Temuan mereka menunjukkan bahwa penggantian semen Portland biasa (OPC) dengan abu terbang meningkatkan kuat tekan beton rata-rata sebesar 20,5%, sambil mengurangi emisi setara CO₂ sebesar 21,1%, dibandingkan dengan campuran yang hanya menggunakan batu kapur. Selain itu, total emisi karbon terwujud pada campuran abu terbang berkurang hingga 75%, bergantung pada rasio SCM, sambil mempertahankan kuat tekan beton yang sesuai untuk penggunaan beton struktural. Penelitian ini mengemukakan bahwa proses pirolisis menyumbang 65% hingga 92% dari total emisi, sementara transportasi menyumbang kurang dari 4%, yang menekankan pentingnya sumber SCM lokal untuk mengurangi dampak lingkungan. Penelitian ini memberikan dasar kuantitatif untuk mengintegrasikan SCM ke dalam produksi beton guna mencapai pengurangan jejak karbon yang signifikan dengan tetap mempertahankan integritas beton.

Sambangi et al. (2023) meneliti pengaruh penggunaan abu terbang dan alccofine sebagai material pengganti semen dalam beton mutu M40. Dalam studi ini, semen digantikan dengan abu terbang pada variasi 5%, 10%, 15%, dan 20% terhadap berat semen, di mana substitusi optimal didapatkan pada 15%. Selanjutnya, pada campuran beton abu terbang optimal, alccofine ditambahkan pada tingkat yang sama. Hasilnya menunjukkan bahwa campuran beton dengan 15% abu terbang dan 15% alccofine menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 62,74 MPa pada 28 hari, meningkat 20,7% dibandingkan beton normal. Kekuatan tarik belah dan

lentur juga meningkat masing-masing sebesar 21,54% dan 16,16% pada substitusi 15% abu terbang dan 15% alccofine. Kombinasi ini membuktikan potensi alccofine dan abu terbang sebagai material bangunan yang berkelanjutan.

Bhagath Singh & Durga Prasad (2024) mengkaji dampak lingkungan dari beton yang menggunakan abu terbang (FA) dan terak tanur tinggi (GGBS) dalam volume tinggi sebagai substitusi semen. Penelitian ini menggunakan beton mutu M30 dengan substitusi semen hingga 70%, dan menemukan bahwa penggantian 65% fly ash menghasilkan penurunan konsumsi energi sebesar 59% dan emisi CO₂ sebesar 54%, dibandingkan dengan beton normal berbasis semen Portland. Penurunan dampak lingkungan juga terlihat pada kategori GWP sebesar 56%, HTP sebesar 80%, dan ODP sebesar 46%. Selain itu, sebagian besar campuran beton ini memenuhi mutu rencana yang ditargetkan dengan pengurangan biaya hingga 34%. Hasil ini membuktikan bahwa FA dan GGBS dapat digunakan sebagai alternatif bahan bangunan berkelanjutan dengan tetap mempertahankan performa structural beton yang diinginkan.

Nguyen et al. (2019) melakukan penelitian eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh abu terbang Vietnam sebagai pengganti sebagian semen terhadap kuat tekan, ketahanan terhadap asam sulfat, dan potensi korosi baja tulangan dalam beton. Abu terbang digunakan dengan kadar substitusi sebesar 10%, 20%, dan 40% terhadap semen, termasuk pengujian kuat tekan pada umur 1 hingga 90 hari dengan variasi rasio air terhadap bahan semen (W/CM) sebesar 0,42, 0,50, dan 0,55. Hasil menunjukkan bahwa pada umur 90 hari, kuat tekan beton dengan 20% abu terbang (W/CM = 0,42) hampir menyamai beton kontrol tanpa fly ash, sedangkan pada rasio W/CM 0,50 dan 0,55, kuat tekan beton dengan 10% abu terbang bahkan melebihi beton kontrol pada umur 28 hari. Penambahan abu terbang sebesar 20% juga menurunkan kehilangan kuat tekan akibat serangan asam sulfat dari 61,2% menjadi 40,8% pada rasio W/CM = 0,42.

Majhi & Nayak (2019) meneliti pengaruh abu terbang (FA) sebagai substitusi semen dan abu endapan batubara (CBA) sebagai substitusi pasir pada beton, masing-masing dengan variasi 0%, 20%, 30%, 40%, dan 50%. Hasil menunjukkan bahwa beton dengan 20% FA dan 30% CBA mengalami penurunan kuat tekan sebesar 10,5%, kuat tarik belah 10,7%, dan kuat lentur 9,6% dibandingkan beton normal pada 28 hari. Selain itu, densitas beton dengan kombinasi FA dan CBA ini menurun sebesar 10,3% dibandingkan beton normal. Penambahan superplasticizer pada campuran tersebut mampu meningkatkan kekuatan awal, menunjukkan bahwa kombinasi FA dan CBA dapat menghasilkan beton yang lebih ramah lingkungan tanpa pengaruh signifikan terhadap sifat mekanis beton.

Shaikh dan Supit (2015) melakukan penelitian eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh penambahan 8% ultrafine fly ash (UFFA) terhadap kuat tekan dan durabilitas beton yang mengandung high volume fly ash (HVFA) kelas F hingga 60%. Penelitian ini menggunakan campuran beton dengan penggantian semen sebesar 40% dan 60% oleh fly ash, serta penambahan UFFA sebesar 8% sebagai bahan pozzolan halus tambahan. Metode pengujian mencakup pengujian kuat tekan pada umur 3, 7, 28, 56, dan 90 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa

beton HVFA dengan 32% fly ash dan 8% UFFA mengalami peningkatan kuat tekan sebesar 200% pada umur 3 hari dibanding beton HVFA tanpa UFFA, dan mencapai kuat tekan 45 MPa pada 28 hari. Selain itu, kuat tekan beton biasa juga meningkat sekitar 55% pada umur 90 hari akibat penambahan UFFA.

Wang dan Park (2015) meneliti pengembangan prosedur numerik untuk mengevaluasi perkembangan kuat tekan beton dengan kandungan fly ash volume tinggi (High Volume Fly Ash/HVFA). Metode yang digunakan menggabungkan model hidrasi campuran semen-fly ash yang mempertimbangkan efek dilusi semen, reaksi pozzolan fly ash, dan interaksi keduanya. Derajat reaksi semen dan fly ash dihitung sebagai fungsi waktu perawatan, kemudian digunakan untuk menentukan kandungan calcium silicate hydrate (CSH) sebagai parameter utama dalam prediksi kuat tekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada umur awal (3–7 hari), kuat tekan beton dengan 45% dan 55% fly ash berada di bawah beton tanpa fly ash, misalnya pada rasio air terhadap binder 0,5, kuat tekan 7 hari menurun hingga sekitar 40% dibanding kontrol. Namun, pada umur 180 hingga 720 hari, kuat tekan meningkat signifikan, terutama pada campuran dengan rasio air terhadap binder rendah (0,19–0,30), di mana beton dengan 25–45% fly ash dapat melampaui kuat tekan beton kontrol. Model prediksi yang dikembangkan menunjukkan korelasi kuat dengan hasil eksperimen, dengan koefisien regresi sebesar 0,96 dan galat RMSE sebesar 2,47 MPa.

Sumer (2012) melakukan penelitian eksperimental untuk mengevaluasi kuat tekan dan ketahanan terhadap serangan sulfat pada beton yang menggunakan fly ash Kelas C dan Kelas F asal Turki sebagai bahan pengganti sebagian semen. Penelitian ini menggunakan 39 variasi campuran beton dengan penggantian semen sebesar 10% dan 17%, serta penambahan fly ash hingga 34%, dengan pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 dan 90 hari. Hasil menunjukkan bahwa beton dengan fly ash Kelas C memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibanding beton kontrol, yaitu mencapai 51,22 MPa pada 28 hari dan meningkat hingga 59,84 MPa pada 90 hari untuk campuran dengan 34% fly ash (C266C108). Sebaliknya, fly ash Kelas F menunjukkan penurunan kuat tekan pada umur 28 hari namun mengalami peningkatan pada umur 90 hari, dengan nilai maksimum 55,76 MPa pada campuran C266F108.

Tabel 10 Ringkasan penelitian terdahulu terkait beton fly ash

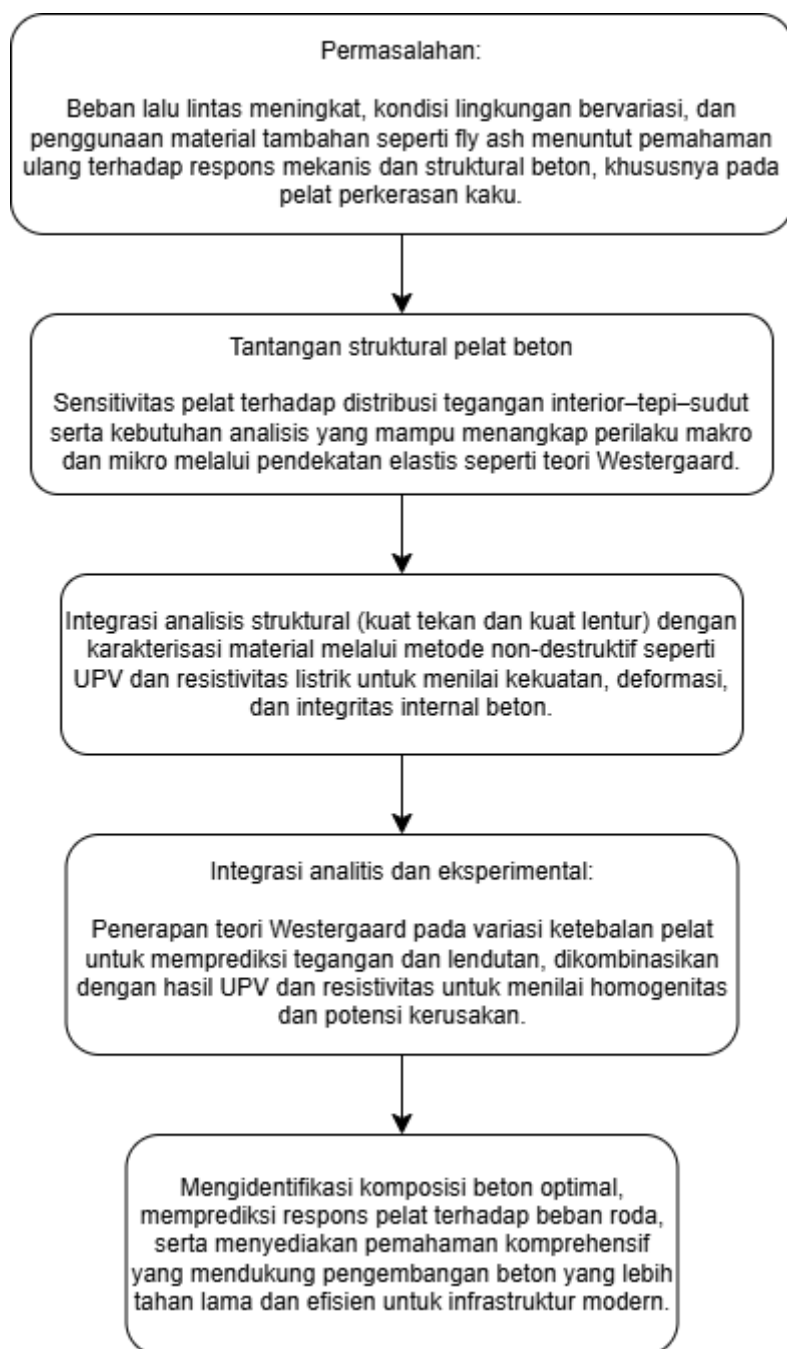
Referensi	Material	Parameter yang diuji	Hasil
Thorne et al. (2024)	Fly ash, Limestone	LCA, kuat tekan,	Kuat tekan meningkat 20,5%, emisi CO2 turun 21,1%, emisi karbon turun hingga 75%
Sambangi et al. (2023)	Fly ash, Alccofine	kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur	Kuat tekan maksimum 62,74 MPa (28 hari), meningkat 20,7%, kuat tarik naik 21,54%, lentur naik 16,16%
Bhagath Singh & Durga Prasad (2024)	Fly ash, GGBS	Energi yang digunakan, LCA	Energi turun 59%, CO2 turun 54%, GWP turun 56%, HTP turun 80%, ODP turun 46%
Nguyen et al. (2019)	Vietnamese Fly ash	kuat tekan, ketahanan asam, korosi	Kuat tekan setara kontrol (20% FA, 90 hari), penurunan kuat tekan akibat asam dari 61,2% jadi 40,8%
Majhi & Nayak (2019)	Fly ash, Coal bottom ash	kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, densitas	Kuat tekan turun 10,5%, tarik belah 10,7%, lentur 9,6%, densitas turun 10,3%
Shaikh & Supit (2015)	Fly ash (HVFA), Ultrafine fly ash	Kuat tekan	Kuat tekan naik 200% (3 hari, 32% FA + 8% UFFA), 45 MPa (28 hari), naik 55% (90 hari)
Wang & Park (2015)	Fly ash (HVFA)	Kuat tekan (model)	Pada 7 hari turun 40% (45–55% FA), namun >180 hari meningkat signifikan, regresi $R^2 = 0,96$, RMSE = 2,47 MPa
Sumer (2012)	Fly ash Class C & F	Kuat tekan, ketahanan sulfat	FA Class C: 51,22 MPa (28 hari), 59,84 MPa (90 hari); FA Class F: naik jadi 55,76 MPa (90 hari)
Penelitian ini	Fly ash	Kuat tekan, kuat lentur, UPV, resistivity, analisis Westergaard	-

1.4 Desain Konseptual

Beton merupakan material struktural yang paling luas digunakan karena kekuatan, durabilitas, dan fleksibilitas aplikasinya pada berbagai jenis infrastruktur. Namun, peningkatan intensitas beban lalu lintas, variasi kondisi lingkungan, serta penggunaan bahan tambah seperti fly ash, agregat daur ulang, dan serat polimer menimbulkan kebutuhan untuk memahami kembali kinerja mekanis dan respons beton terhadap pembebanan. Tantangan ini semakin kompleks ketika beton diaplikasikan pada elemen pelat seperti perkerasan kaku, yang sensitif terhadap distribusi tegangan di area interior, tepi, dan sudut. Selain itu, karakteristik mikro seperti kecepatan rambat gelombang ultrasonik dan resistivitas listrik memberikan informasi penting terkait kualitas internal, densifikasi, dan potensi kerusakan, sehingga integrasi pendekatan makro dan mikro menjadi relevan dalam analisis berbasis teori elastis seperti Westergaard.

Solusi yang ditawarkan dalam penelitian ini adalah melakukan evaluasi menyeluruh terhadap perilaku beton menggunakan kombinasi metode analisis struktural yaitu pengujian kuat tekan, dan kuat lentur dan karakterisasi material. Teori Westergaard diterapkan untuk menghitung tegangan dan lendutan pelat beton dengan variasi ketebalan, sehingga memungkinkan prediksi respons struktural pada kondisi pembebanan nyata. Secara bersamaan, pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) dan resistivitas listrik digunakan untuk menilai homogenitas, integritas internal, dan potensi penurunan kinerja beton melalui pendekatan non-destruktif. Dengan menggabungkan metode analitis dan eksperimental, penelitian berupaya memetakan pengaruh variasi komposisi material terhadap kekuatan, deformasi, dan kualitas internal beton secara lebih komprehensif.

Tujuan utama dari desain konseptual ini adalah menghasilkan pemahaman terpadu mengenai hubungan antara komposisi material, performa mekanis, dan respons struktural beton. Hasil yang diharapkan meliputi identifikasi campuran beton yang paling optimal, prediksi perilaku pelat beton terhadap beban roda, serta penilaian non-destruktif yang mampu memperkuat interpretasi hasil analitis. Secara keseluruhan, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi pada pengembangan material beton yang lebih tahan lama, efisien, dan sesuai dengan kebutuhan desain infrastruktur modern.



Gambar 5 Desain konseptual

BAB II METODE

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini Laboratorium Riset Eco-material, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Juni 2025 – Desember 2025.

2.2 Data Penelitian

Penelitian menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh langsung dari pengujian eksperimental di laboratorium dan lapangan. 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 fly ash.

2.3 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. *Universal Testing Machine* (Tokyo Testing Machine Inc.) kapasitas 2000 kN yang dapat diatur pengujian kuat tekan dan kuat lentur.
2. *Load Cell* kapasitas 500 kN untuk mengukur pembacaan beban maksimum.
3. *High Speed Data Logger THS-1100* dan satu set komputer yang berfungsi untuk memonitor, mencatat, dan menyimpan data beban.
4. Satu set alat pengujian karakteristik material
5. Satu set komputer yang berfungsi untuk mengolah data.
6. Mesin pencampur material (*mixer*)
7. Satu set pengujian *slump flow*
8. Cetakan beton dalam bentuk silinder 10x20 cm.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Semen PCC
2. Abu terbang (*fly ash*)
3. Agregat halus
4. Agregat kasar
5. Air

2.4 Pengujian Karakteristik Material

Standar pemeriksaan karakteristik yang digunakan mengacu pada Standardisasi Nasional Indonesia, dan aturan lain terkait aspal. Pemeriksaan dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 11 Metode Pengujian Karakteristik Material

Pengujian Karakteristik	Metode Pengujian	
	Agregat Kasar	Agregat Halus
Analisa saringan	SNI 03-1968-1990	
Berat jenis dan penyerapan air	SNI 03-1969-1990	SNI 03-1970-1990
Berat volume	SNI 03-4804-1998	
Kadar air	SNI 03-1971-1990	
Kadar lumpur	SNI 03-4141-1996	
Kadar organik	-	SNI 03-2816-1992
Keausan agregat kasar dengan mesin Los Angeles	SNI 03-2417-1991	-

2.5 Pemeriksaan Karakteristik Tanah Dasar

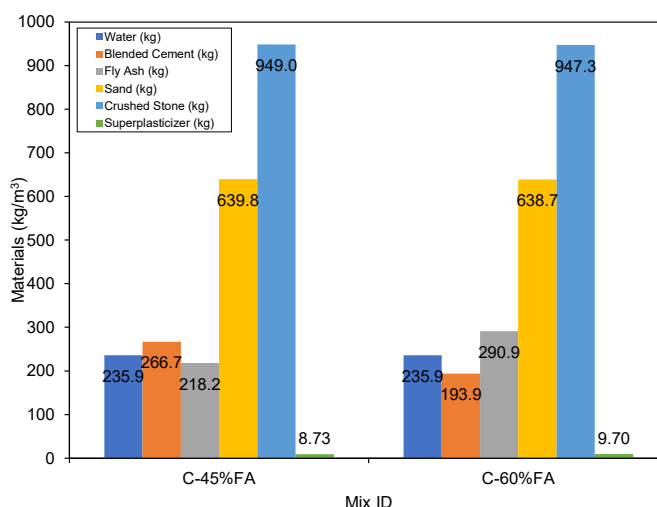
Pemeriksaan karakteristik tanah dasar bertujuan untuk mengetahui kondisi tanah dasar yang akan dilapisi struktur perkerasan jalan sehingga tanah dasar dapat mendukung lapisan struktur di atasnya. Pengujian yang dilakukan ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12 Pengujian dan metode pengujian karakteristik tanah dasar

Pengujian	Metode Pengujian
Kompaksi	SNI 03-2832-1992
CBR laboratorium	SNI 03-1744-1989

2.6 Komposisi Bahan dan Campuran

Komposisi campuran 1 m³ mutu beton f'c 30 MPa mengacu pada PERMEN PUPR No.8 (2023). Target slump beton normal 10 ± 2 cm. Detail komposisi campuran disajikan pada Gambar 6.

**Gambar 6** Komposisi campuran beton f'c 30 MPa

2.7 Prosedur Eksperimental

Secara garis besar, prosedur eksperimental beton fly ash 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

Jumlah benda uji yang dibuat sebanyak 10 silinder, dan 6 balok untuk masing-masing variasi campuran. Adapun metode pembuatan yang dilakukan sebagai berikut:

1. Material beton air, pasir, kerikil, semen dan fly ash ditimbang terlebih dahulu dalam kondisi saturated surface dry (SSD) sesuai komposisi campuran.
2. Pembuatan beton menggunakan mixer kapasitas 150 Liter. Material semen, pasir, fly ash dan agregat kasar pertama-tama dimasukkan kemudian di mix secara merata selama 30 detik. Setelah itu air dimasukkan secara perlahan dan proses pencampuran dilakukan sampai 3 menit.
3. Setelah itu, campuran beton diaduk secara manual selama 1 menit untuk menjamin material beton tercampur secara homogen.
4. Proses pencampuran dilanjutkan lagi selama 2 menit, setelah itu campuran beton segar dituang ke dalam wadah berukuran 1,5 m x 1,5 m dan dilakukan pengadukan secara manual.
5. Campuran beton segar tersebut selanjutnya diuji slump untuk mengetahui tingkat workability/kelecekan beton.
6. Beton segar selanjutnya dicetak dalam silinder berukuran Ø100 mm x 200 mm, dan juga pada balok berukuran panjang 400 mm x lebar dan tinggi masing-masing 100 mm dan dipadatkan dengan mesin vibrator selama 1 menit.
7. Beton dibiarkan selama 24 jam dalam kondisi tertutup untuk mencegah panas hidrasi yang berlebihan.
8. Cetakan silinder dan balok selanjutnya dibuka setelah 24 jam dan sampel beton direndam/curing dalam air tawar pada suhu $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sampai umur 28 hari.

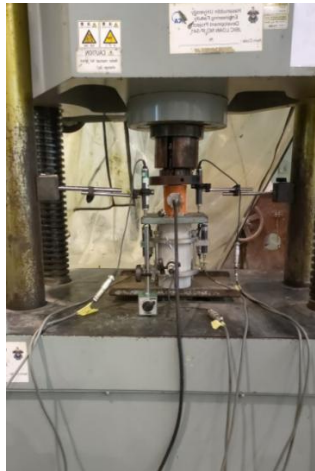
2.7.2 Metode Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan benda uji dilakukan berdasarkan SNI 1974:2011 (SNI 1974, 2011) tentang Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM). Pengujian kuat tekan dilakukan dengan memberi beban secara terus menerus dengan laju konstan pada benda uji secara aksial. Kecepatan batang penekan dalam pengujian kuat tekan berkisar antara 0,5 - 1,3 mm/menit. Tegangan tekan yang dialami benda uji akan menyebabkan benda uji runtuh atau hancur. Sehingga nilai kuat tekan yang dihitung ialah pembebanan maksimum yang menyebabkan benda uji mengalami benda uji runtuh atau hancur. Sebanyak 5 benda uji untuk masing-

masing variasi akan diuji kuat tekan kemudian hasil yang diperoleh dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai kuat tekan maksimum.

Prosedur pengujian kuat tekan terdiri dari beberapa tahapan, yaitu:

1. Menyiapkan satu set komputer, data logger, LVDT, dan Load Cell sebagai alat untuk merekam beban dan perpindahan benda uji.
2. Menyiapkan benda uji berupa silinder beton dengan diameter 10 cm dan tinggi 20 cm yang sebelumnya telah dicuring selama 28 hari.
3. Menimbang benda uji dan menghitung densitas.
4. Letakkan benda uji pada *Universal Testing Machine* (*Tokyo Testing Machine Inc.*) kapasitas 1000 kN secara sentris.
5. Letakkan pelat besi di bagian bawah dan di atas benda uji.
6. Memasang LVDT sejajar dengan arah pembebanan, kemudian memasang Load Cell di atas pelat besi.
7. Atur alat *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kecepatan penurunan batang penekan yang tetap yaitu 0,5 mm/menit.
8. Dalam melakukan pengujian ini dapat diperoleh hasil beban kuat tekan dan regangan yang terjadi pada benda uji.



Gambar 7 Pengujian kuat tekan beton

2.7.3 Modulus Elastisitas

Pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas ini bertujuan untuk menentukan mutu beton yang diisyaratkan dan modulus elastisitas dari benda uji beton pada umur 28 hari. Metode uji modulus elastisitas dilakukan sesuai dengan ASTM C469-21.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (8)$$

Di mana:

- E = Modulus Elastisitas (MPa)
- S_1 = Tegangan sesuai dengan regangan 0,00005 (MPa)
- S_2 = Tegangan 40% dari beban maksimum (MPa)
- ϵ_2 = Regangan pada tegangan S_2

Sedangkan secara teoritis, modulus elastisitas beton normal (E_c) dapat dihitung dengan Persamaan 9 dan 10 yang dikutip dari SNI 2847:2019, yaitu:

$$E_c = W_c^{1,5} 0,043 \sqrt{f'_c} \quad (9)$$

Dimana:

- E_c = Modulus Elastisitas Beton (MPa)
- f'_c = Kuat tekan beton umur 28 hari (MPa)
- W_c = Berat satuan beton (kg/m^3)

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (10)$$

Dimana:

- E_c = Modulus Elastisitas Beton (MPa)
- f'_c = Kuat tekan beton umur 28 hari (MPa)

2.7.4 Metode Pengujian Kuat Lentur

Pengujian ini dilakukan dengan metode dua titik pembebanan (two-point loading method) sesuai dengan ketentuan SNI 4431:2011 (2011). Metode dua titik pembebanan dipilih karena menghasilkan distribusi momen lentur yang merata di bagian tengah balok uji, sehingga lebih representatif untuk menilai sifat mekanik beton terhadap beban lentur. Dalam metode ini, beban diberikan secara bertahap hingga terjadi retak dan patah pada bagian bawah balok, yang merupakan daerah dengan tegangan tarik maksimum. Nilai kuat lentur (*modulus of rupture*) dihitung berdasarkan tegangan maksimum yang timbul pada serat terluar saat benda uji patah.

Tata cara pelaksanaan pengujian dilakukan sebagai berikut:

1. Persiapan benda uji: Benda uji berbentuk balok dengan ukuran standar 100 mm × 100 mm × 400 mm atau sesuai SNI 4431:2011. Setiap benda uji diperiksa untuk memastikan permukaan rata dan bebas cacat.
2. Kondisi perawatan: Benda uji direndam dalam air pada suhu 23 ± 2 °C selama 28 hari untuk memastikan kondisi jenuh sebelum pengujian.
3. Penempatan benda uji: Balok diletakkan di atas dua tumpuan dengan jarak bentang efektif $L = 300$ mm.
4. Penerapan beban: Dua beban diberikan secara simetris pada jarak $L/3$ dari masing-masing tumpuan menggunakan mesin uji lentur hidrolik berkecepatan pembebanan konstan.
5. Pencatatan data: Beban maksimum (P) yang menyebabkan patah dicatat dari indikator mesin uji.

6. Perhitungan kuat lentur: Nilai kuat lentur (R) dihitung menggunakan persamaan menurut SNI 4431:2011.

$$R = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (11)$$

Di mana:

R = kuat lentur (MPa)

P = beban maksimum (N)

L = panjang bentang antar tumpuan (mm)

b = lebar penampang benda uji (mm)

h = tinggi penampang benda uji (mm)

2.7.5 Ultrasonic Pulse Velocity

Prosedur pengujian mengacu pada ASTM C597-22. Alat yang digunakan terdiri dari UPV tester, dua buah transduser (pemancar dan penerima), serta lapisan *couplant* seperti gel silikon untuk memastikan transmisi gelombang yang optimal antara sensor dan permukaan benda uji. Pengujian dilakukan pada benda uji berbentuk silinder atau balok yang telah mencapai umur perawatan tertentu yaitu 28 hari.

Dalam pelaksanaannya, gelombang ultrasonik dikirimkan dari transduser pemancar ke penerima melalui beton, dan waktu tempuh gelombang (*transit time*) diukur secara otomatis oleh alat. Nilai kecepatan rambat gelombang ultrasonik (V) dihitung menggunakan Persamaan 12.

$$V = \frac{L}{t} \quad (12)$$

Di mana: L adalah panjang lintasan gelombang (m), dan t adalah waktu tempuh (s).

Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan klasifikasi mutu beton berdasarkan standar SNI, di mana kecepatan rambat di atas 4.5 km/s menunjukkan beton dengan kualitas sangat baik, sedangkan nilai di bawah 3.0 km/s menandakan adanya keretakan atau ketidakseragaman internal.

2.7.6 Resistivitas Listrik

Pengujian dilakukan sesuai dengan standar ASTM C1876-19 : Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Formation Factor of Concrete menggunakan alat Surface Resistivity Meter tipe empat titik (four-point Wenner probe). Penggunaan metode empat titik ini dimaksudkan untuk meminimalkan efek kontak resistansi antara elektroda dan permukaan benda uji, sehingga hasil pengukuran menjadi lebih akurat dan representatif (Ramezaniapour & Pilvar, 2012).

Prosedur pengujian dilakukan sebagai berikut:

1. Benda uji beton dibasahi hingga mencapai kondisi jenuh permukaan kering (SSD).
2. Alat resistivitas diletakkan pada permukaan benda uji dengan posisi elektroda sejajar.
3. Tegangan dan arus diukur secara otomatis oleh perangkat, dan nilai resistivitas dihitung oleh sistem internal alat.
4. Setiap benda uji diukur pada empat posisi berbeda, kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh nilai akhir.

Nilai resistivitas (ρ) dinyatakan dalam satuan kilo-ohm sentimeter ($k\Omega \cdot cm$) dan dihitung menggunakan persamaan yang direkomendasikan oleh ASTM C1876-19. Nilai resistivitas yang tinggi menunjukkan kepadatan pori yang baik dan kemampuan yang lebih tinggi dalam menghambat penetrasi ion.

2.8 Analisis Westergaard

Analisis berdasarkan teori Westergaard digunakan untuk mengevaluasi tegangan (*stress*) dan lendutan (*deflection*) yang terjadi pada pelat beton kaku akibat pembebanan roda pada posisi interior, tepi, dan sudut pelat. Teori ini pertama kali dikembangkan oleh Westergaard (1926) untuk memodelkan perilaku pelat beton homogen dan isotropik yang beristirahat di atas lapisan tanah elastis. Meskipun teori ini memiliki sejumlah asumsi penyederhanaan — seperti menganggap pelat memiliki dimensi tak terbatas dan material berperilaku elastis linier — pendekatan Westergaard tetap menjadi dasar utama dalam perencanaan dan analisis perkerasan kaku hingga saat ini (Huang, 2012; Yoder & Witczak, 1975).

Teori ini berasumsi bahwa beban yang bekerja pada pelat beton disalurkan melalui bidang kontak berbentuk lingkaran dengan radius tertentu (a), di mana tanah dasar berfungsi sebagai media elastis dengan modulus reaksi (k). Beban ini menyebabkan pelat mengalami deformasi dan menghasilkan tegangan lentur yang bervariasi tergantung pada posisi pembebanan. Analisis Westergaard dilakukan untuk berbagai kondisi teoretis, yaitu pembebanan di bagian interior, tepi, dan sudut, karena ketiga posisi tersebut memiliki tingkat dukungan tanah dan distribusi momen yang berbeda.

Dalam penelitian ini, analisis Westergaard diterapkan pada pelat beton dengan ketebalan 20 cm, 25 cm, 30 cm, dan 40 cm. Parameter input utama meliputi beban terapan (P), modulus elastisitas beton (E_c), rasio Poisson (μ), ketebalan pelat (h), modulus reaksi tanah dasar (k), serta radius beban (a). Untuk mempermudah perhitungan, digunakan satuan sistem imperial sebagaimana dalam formulasi asli Westergaard. Nilai-nilai tegangan dan lendutan dihitung berdasarkan Persamaan (13)–(15), sedangkan radius kekakuan relatif (l) dan radius beban efektif (a) ditentukan menggunakan Persamaan (7) dan (8).

Formulasi Westergaard dinyatakan sebagai berikut:

a. Pembebanan Interior:

$$\sigma_i = \frac{3P(1 + \mu)}{2\pi h^2} \left[\ln \left(\frac{2l}{a} \right) + 0.5 + \gamma \right]$$

$$\Delta_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{a}{2l} \right) + \gamma - \frac{5}{4} \right] \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

b. Pembebanan Tepi:

$$\sigma_e = 0.529(1 + 0.54\mu) \frac{P}{h^2} \left[\log_{10} \left(\frac{Eh^3}{ka^4} \right) - 0.71 \right]$$

$$\Delta_e = \frac{1}{\sqrt{6}} (1 + 0.4\mu) \frac{P}{kl^2} \quad (14)$$

c. Pembebanan Sudut:

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a}{l} \right)^{0.6} \right]$$

$$\Delta_c = \frac{P}{kl^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{a}{l} \right) \right] \quad (15)$$

Keterangan variabel:

- P = beban terapan (lb)
- E_c = modulus elastisitas beton (psi)
- μ = rasio Poisson beton
- h = tebal pelat (in.)
- k = modulus reaksi tanah dasar (pci)
- a = radius bidang kontak beban (in.)
- l = jari-jari kekakuan relatif (in.)
- γ = konstanta Euler (= 0.57722)

Konversi dari satuan internasional (SI) ke satuan Imperial (USCS)

- 1 N = 0,225 lb
- 1 mm = 0,0394 in.
- 1 MPa/mm = 3685,96 pci
- 1 MPa = 145,038 psi

Radius kekakuan relatif (l) dihitung menggunakan Persamaan 16.

$$l = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12(1 - \mu^2)k}} \quad (16)$$

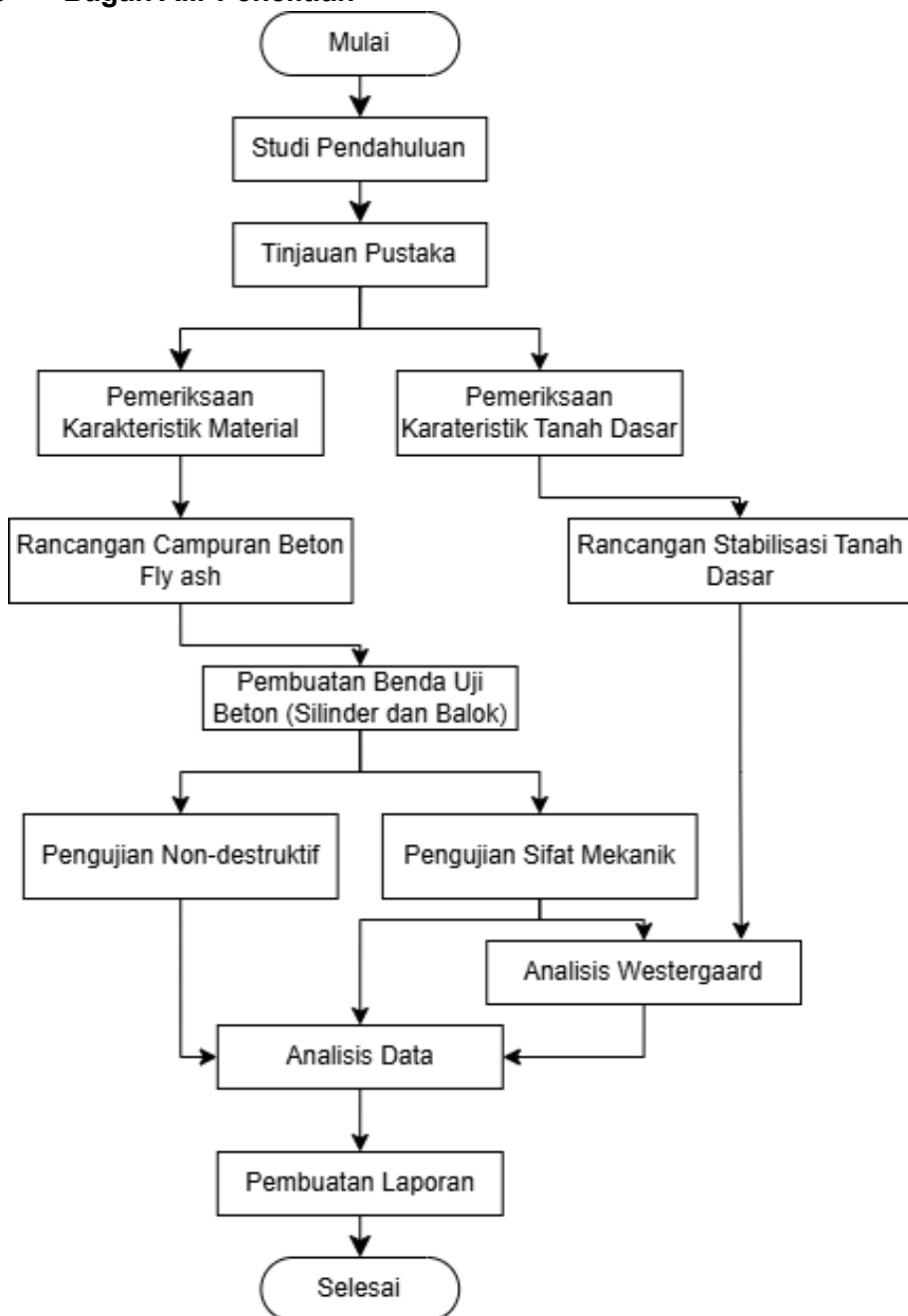
Apabila $a < 1.724h$, maka radius beban efektif (a) diperoleh menggunakan Persamaan 17.

$$a = \sqrt{1.6a^2 + h^2} - 0.675h \quad (17)$$

Melalui pendekatan ini, analisis Westergaard memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap respon pelat beton terhadap pembebanan berulang, baik dari segi tegangan lentur maksimum maupun lendutan permukaan. Hasil perhitungan digunakan untuk menilai efisiensi struktural pelat dalam menahan beban lalu lintas dan menentukan batas aman ketebalan minimum berdasarkan modulus reaksi tanah dasar yang diperoleh dari uji CBR atau hasil stabilisasi tanah.

Penelitian terdahulu Ioannides (2006) menunjukkan bahwa teori Westergaard memiliki tingkat akurasi yang baik untuk analisis awal dan perbandingan antarvariasi campuran beton atau kondisi tanah dasar. Namun demikian, perlu disadari bahwa teori ini bersifat idealisasi dan tidak mempertimbangkan efek retak, suhu, kelembapan, serta perilaku nonlinier material. Oleh karena itu, hasil analisis Westergaard dalam penelitian ini digunakan sebagai acuan perbandingan teoritis, bukan representasi absolut dari kondisi lapangan.

2.9 Bagan Alir Penelitian



Gambar 8 Bagan Alir Penelitian