

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan *high-volume fly ash* (HVFA) sebagai material pengganti sebagian besar semen dalam beton telah menjadi perhatian utama dalam penelitian material konstruksi berkelanjutan selama dua dekade terakhir. Fly ash, sebagai hasil samping dari pembakaran batubara, memiliki karakteristik pozzolanik yang signifikan dan mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida untuk membentuk *calcium silicate hydrate* (C-S-H), yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan kerapatan mikrostruktur beton pada umur lanjut (Habert et al., 2011; Thomas, 2013). Berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan fly ash dalam proporsi tinggi (lebih dari 40% penggantian semen) dapat secara substansial mengurangi emisi karbon dioksida (CO_2) dan konsumsi energi dalam industri semen (Yang et al., 2023; Peng et al., 2023). Dari perspektif lingkungan, beton HVFA merupakan strategi mitigasi yang efektif terhadap dampak pemanasan global dan degradasi sumber daya alam, sehingga mendukung prinsip *low-carbon materials* dalam agenda dekarbonisasi sektor konstruksi global (Gursel et al., 2014).

Namun, penerapan HVFA dalam skala struktural masih menghadapi tantangan teknis terkait penurunan kinerja awal, terutama dalam hal kekuatan tekan, kekakuan, dan daktilitas beton pada umur dini. Fly ash Class F yang umumnya digunakan memiliki reaktivitas rendah akibat kandungan kalsium yang minim, sehingga proses pembentukan C-S-H berlangsung lebih lambat dibandingkan hidrasi semen Portland konvensional (ASTM C618-22, 2022; Amran et al., 2020). Keterlambatan reaksi ini dapat menurunkan kekuatan awal dan meningkatkan deformasi plastis, yang pada akhirnya mempengaruhi perilaku tegangan-regangan dan ketahanan beban siklik beton (Chindaprasirt et al., 2018). Dalam konteks mekanika material, perbedaan karakteristik reaktivitas ini mengakibatkan pergeseran perilaku nonlinier beton, termasuk penurunan *modulus elastisitas*, perubahan deformasi maksimum, serta perubahan pada *post-peak ductility*, yang berperan penting dalam mendesain beton tahan gempa dan struktur berenergi tinggi (Yahia et al., 2020).

Untuk mengatasi masalah tersebut, penelitian terkini mengusulkan penggunaan *blended cement* dan *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate ether* (PCE) untuk meningkatkan kelecakan dan kepadatan beton HVFA (Nodehi et al., 2024; Stengel, 2014). Kombinasi ini terbukti dapat memperbaiki ikatan antarpartikel dan menurunkan porositas beton, sehingga menghasilkan peningkatan sifat mekanis tanpa menambah kebutuhan air. Secara simultan, pendekatan ini juga mempertahankan keuntungan ekologis dari HVFA dengan tetap menekan proporsi klinker yang berkontribusi besar terhadap emisi karbon (Zhang et al., 2023). Selain itu, penggunaan bahan tambahan kimia seperti PCE meningkatkan kemampuan beton HVFA dalam mencapai kinerja mekanis sebanding dengan beton normal,

khususnya pada aspek ketahanan deformasi dan penyerapan energi sebelum keruntuhan (Yazici et al., 2019).

Dalam ranah pemodelan mekanis, sejumlah model matematis telah dikembangkan untuk merepresentasikan perilaku nonlinier tegangan–regangan beton, terutama pada zona pasca-puncak yang menentukan kapasitas daktilitas dan ketangguhan (*toughness*). Di antara model yang paling banyak digunakan adalah model Popovics (1973) dan Carreira & Chu (1985), yang memberikan pendekatan analitik berbasis parameter bentuk (*shape parameter* β) untuk memprediksi kurva tegangan–regangan normalisasi. Model Popovics menekankan kesesuaian empiris untuk beton konvensional, sedangkan model Carreira & Chu menyesuaikan parameter β terhadap hubungan antara *modulus elastisitas* dan regangan pada tegangan puncak, menjadikannya lebih fleksibel untuk beton berperilaku plastis dan viskoelastik. Beberapa penelitian terkini (Aslani & Nejadi, 2012; Nguyen et al., 2021) telah menunjukkan bahwa model Carreira memberikan estimasi yang lebih akurat pada beton dengan bahan tambahan pozzolanik, seperti fly ash, terutama pada fase pasca-puncak yang berkaitan erat dengan kapasitas penyerapan energi.

Meskipun berbagai model telah terbukti efektif untuk beton konvensional, penelitian terkait validasi model matematis pada beton HVFA masih terbatas, terutama dalam konteks beton berbasis *blended cement* yang melibatkan interaksi kompleks antara hidrasi semen dan reaksi pozzolanik. Studi empiris yang membandingkan hasil eksperimental dengan model teoritis diperlukan untuk memahami sejauh mana parameter β mampu menangkap pengaruh substitusi fly ash terhadap bentuk kurva tegangan–regangan, serta bagaimana perubahan komposisi kimia dan struktur mikro memengaruhi perilaku makroskopis beton (Popovics, 1973; Carreira & Chu, 1985; Amran et al., 2020). Selain itu, analisis kuantitatif terhadap parameter ketangguhan (*toughness*) dan *toughness index* masih jarang dikaitkan langsung dengan variasi kadar fly ash, padahal parameter tersebut merupakan indikator penting untuk mengevaluasi kemampuan beton dalam menyerap energi dan mempertahankan deformasi setelah beban puncak.

1.1.1 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana menganalisis secara kuantitatif dan kualitatif pengaruh variasi kadar fly ash tinggi terhadap karakteristik kurva tegangan–regangan beton berbasis *blended cement*, meliputi modulus elastisitas, deformasi maksimum, dan perilaku pasca-puncak.
2. Bagaimana mengevaluasi kemampuan model Popovics (1973) dan Carreira & Chu (1985) dalam mensimulasikan respons eksperimental beton high-volume fly ash melalui analisis kesesuaian bentuk kurva, deviasi numerik, dan sensitivitas parameter β terhadap kekuatan tekan.
3. Bagaimana mengkonstruksi hubungan komprehensif antara kadar fly ash, nilai *toughness*, dan *toughness index* untuk menentukan pengaruh

fly ash terhadap kemampuan penyerapan energi serta daktilitas beton setelah beban puncak.

4. Bagaimana menganalisis penilaian lingkungan berbasis life cycle assessment (LCA) guna menentukan kontribusi penggantian semen dengan fly ash terhadap pengurangan emisi karbon dan dampak ekotoksik lain pada tahap cradle-to-gate produksi beton.

1.1.2 Tujuan Penelitian

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

1. Menganalisis secara kuantitatif dan kualitatif pengaruh variasi kadar fly ash tinggi terhadap karakteristik kurva tegangan–regangan beton berbasis blended cement, meliputi modulus elastisitas, deformasi maksimum, dan perilaku pasca-puncak.
2. Mengevaluasi kemampuan model Popovics (1973) dan Carreira & Chu (1985) dalam mensimulasikan respons eksperimental beton high-volume fly ash melalui analisis kesesuaian bentuk kurva, deviasi numerik, dan sensitivitas parameter β terhadap kekuatan tekan.
3. Mengkonstruksi hubungan komprehensif antara kadar fly ash, nilai toughness, dan toughness index untuk menentukan pengaruh fly ash terhadap kemampuan penyerapan energi serta daktilitas beton setelah beban puncak.
4. Menganalisis penilaian lingkungan berbasis life cycle assessment (LCA) guna menentukan kontribusi penggantian semen dengan fly ash terhadap pengurangan emisi karbon dan dampak ekotoksik lain pada tahap cradle-to-gate produksi beton.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara teoretis maupun praktis dalam pengembangan ilmu dan teknologi beton berkelanjutan. Secara teoretis, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pemahaman mendalam mengenai perilaku tegangan–regangan beton dengan substitusi semen kadar tinggi menggunakan *high-volume fly ash*, terutama dalam konteks beton berbasis *blended cement*. Analisis hubungan antara kadar fly ash, modulus elastisitas, deformasi, serta perilaku pasca-puncak memperkaya basis data ilmiah yang dapat digunakan dalam pemodelan numerik dan pengembangan teori material komposit semen. Selain itu, hasil validasi model Popovics (1973) dan Carreira & Chu (1985) memberikan dasar ilmiah dalam menentukan model prediktif yang paling representatif untuk menggambarkan perilaku nonlinier beton pozzolanik. Secara praktis, penelitian ini bermanfaat dalam mendukung implementasi *green concrete technology* melalui pemanfaatan fly ash sebagai material pengganti semen, yang terbukti mampu menurunkan emisi karbon dan dampak lingkungan berdasarkan hasil analisis *life cycle assessment (LCA)*.

1.1.4 Batasan Masalah

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

1. Penelitian difokuskan pada beton dengan substitusi semen menggunakan fly ash Class F berdasarkan klasifikasi ASTM C618 (2022).
2. Proporsi penggantian semen dengan fly ash dibatasi pada dua variasi utama, yaitu 45% dan 60% dari total massa pengikat (binder).
3. Semen yang digunakan adalah *Portland Composite Cement (PCC)* atau *blended cement* yang umum digunakan dalam konstruksi struktural di Indonesia.
4. Superplasticizer yang digunakan berbasis *polycarboxylate ether (PCE)*
5. Kurva tegangan–regangan diperoleh melalui uji eksperimental dengan pembebanan aksial menggunakan alat *Universal Testing Machine (UTM)* berkapasitas 2000 kN.
6. Analisis *toughness* dan *toughness index* dilakukan berdasarkan luas area di bawah kurva tegangan–regangan hingga titik penurunan 90% dari beban puncak.
7. Pemodelan analitik hanya menggunakan dua model matematis, yaitu Popovics (1973) dan Carreira & Chu (1985), sebagai pembanding hasil eksperimental.
8. Dampak lingkungan yang dianalisis meliputi empat kategori utama: Global Warming Potential (GWP), Acidification Potential (AP), Eutrophication Potential (EP), dan Photochemical Ozone Creation Potential (POCP).
9. Data *life cycle inventory* diambil dari literatur sekunder yang telah terverifikasi dan disesuaikan dengan satuan massa per meter kubik beton.
10. Penelitian dibatasi pada skala laboratorium, tanpa melakukan uji lapangan atau simulasi beban dinamis pada struktur beton aktual.

1.2 Teori

1.2.1 Beton

Beton merupakan material komposit yang tersusun atas semen Portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, serta dapat ditambahkan bahan tambahan tertentu sesuai kebutuhan kinerja (SNI 2847, 2019). Berdasarkan kondisi fisiknya, beton dapat dibedakan menjadi beton segar dan beton keras. Beton segar adalah campuran beton setelah proses pengadukan yang dalam rentang waktu tertentu masih mempertahankan karakteristik awalnya. Sementara itu, beton keras adalah beton yang telah mengalami proses pengerasan akibat reaksi hidrasi semen, sehingga membentuk massa padat yang tersusun dari semen, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan (SNI 03-4810-1998).

Agregat yang digunakan dalam campuran beton umumnya terdiri dari agregat halus berupa pasir alam atau pasir hasil proses pemecahan batu, serta agregat kasar yang berasal dari batuan alam maupun batu pecah hasil industri. Dalam sistem beton, semen berperan sebagai bahan pengikat yang menyatukan butiran agregat dan mengisi rongga di antaranya, sehingga terbentuk struktur yang kompak dan memiliki kekuatan mekanis. Beton normal didefinisikan sebagai beton dengan berat isi berkisar antara 2200 hingga 2500 kg/m³ yang dibuat menggunakan agregat alam, baik yang dipecah maupun tidak dipecah.

Adapun kelebihan dan kekurangan beton antara lain sebagai berikut:

Kelebihan Beton:

1. Beton memiliki kapasitas yang tinggi dalam menahan gaya tekan sehingga sangat kuat dalam menopang beban aksial.
2. Beton menunjukkan ketahanan yang baik terhadap pengaruh lingkungan, termasuk korosi dan proses pembusukan.
3. Pada kondisi segar, beton mudah dibentuk mengikuti berbagai konfigurasi geometri sesuai kebutuhan perencanaan.
4. Bekisting yang digunakan pada pekerjaan beton dapat dimanfaatkan kembali, sehingga lebih efisien dari sisi ekonomi.
5. Beton segar dapat diaplikasikan dengan berbagai metode, seperti dipompa atau disemprotkan, sehingga memudahkan pelaksanaan pada lokasi yang sulit dijangkau.
6. Beton dapat digunakan untuk pekerjaan perbaikan dengan cara pengisian atau penutupan retakan pada struktur beton eksisting.
7. Beton memiliki ketahanan yang baik terhadap keausan dan api, yang berkontribusi pada umur layanan yang panjang serta kebutuhan perawatan yang relatif rendah.

Kekurangan Beton:

1. Beton memiliki kemampuan yang rendah dalam menahan gaya tarik, sehingga memerlukan tulangan baja untuk meningkatkan kapasitas tarik dan mencegah retak.
2. Beton mengalami penyusutan dan pemuaian akibat perubahan suhu dan kelembaban, sehingga diperlukan sambungan muai untuk mengurangi risiko retakan.
3. Untuk mencapai sifat kedap air yang optimal, beton memerlukan pengendalian mutu dan ketelitian tinggi selama proses pencampuran, pengecoran, dan perawatan.
4. Beton bersifat getas dengan daktilitas yang rendah, sehingga perencanaan struktur harus dilakukan secara cermat agar perilaku daktil dapat dicapai melalui kombinasi dengan tulangan, terutama pada struktur tahan gempa.

1.2.2 Material Penyusun Beton

1.2.2.1 Semen Portland

Indonesia telah memiliki kemampuan produksi semen Portland yang mencakup lima jenis utama sesuai dengan fungsi dan kebutuhan penggunaannya, yaitu semen Portland tipe I hingga tipe V. Seiring dengan perkembangan teknologi material dan tuntutan keberlanjutan, industri semen nasional juga mengembangkan jenis semen berbasis campuran, seperti semen Portland Pozzolan (PPC) dan semen Portland Komposit (PCC), yang memanfaatkan material anorganik tambahan sebagai pengganti sebagian klinker semen.

Menurut SNI 2049-2015 (SNI 2049-2015, 2015), semen Portland didefinisikan sebagai semen hidrolis yang dihasilkan melalui proses penggilingan klinker semen Portland yang terutama tersusun atas senyawa kalsium silikat bersifat hidrolis, digiling bersama bahan tambahan berupa satu atau lebih senyawa kalsium sulfat, serta dapat ditambahkan bahan lain sesuai ketentuan. Berdasarkan karakteristik dan tujuan penggunaannya, semen Portland diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis sebagai berikut:

1. Semen Portland Tipe I, digunakan untuk keperluan umum tanpa persyaratan khusus terkait ketahanan atau laju hidrasi.
2. Semen Portland Tipe II, dirancang untuk kondisi yang memerlukan ketahanan sedang terhadap sulfat dan panas hidrasi yang lebih terkendali.
3. Semen Portland Tipe III, digunakan pada konstruksi yang membutuhkan perkembangan kekuatan awal yang tinggi.
4. Semen Portland Tipe IV, diformulasikan untuk menghasilkan panas hidrasi rendah, umumnya digunakan pada struktur beton massa.
5. Semen Portland Tipe V, ditujukan untuk lingkungan dengan tingkat serangan sulfat yang tinggi.

Klinker semen Portland tersusun atas empat senyawa kimia utama yang dikenal sebagai mineral klinker. Komposisi potensial dari mineral-mineral tersebut dapat diperkirakan melalui pendekatan komposisi Bogue, yang mengaitkan kandungan oksida utama dalam semen dengan fraksi mineral penyusunnya. Mineral utama tersebut meliputi trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), trikalsium aluminat (C_3A), dan tetrakalsium aluminoferrit (C_4AF).

$$\begin{aligned}
 C_3S &= 4,071(\text{total CaO, kapur bebas}) - 7,600SiO_2 - 6,718Al_2O_3 - 1,430Fe_2O_3 \\
 C_2S &= 2,867SiO_2 - 0,7544C_3S \\
 C_3A &= 2,65Al_2O_3 - 1,692Fe_2O_3 \\
 C_4AF &= 3,043Fe_2O_3
 \end{aligned}$$

Di antara mineral-mineral tersebut, C_3S dan C_2S , khususnya dalam bentuk β - C_2S , berperan dominan dalam perkembangan kuat tekan dan berkontribusi besar terhadap kinerja mekanis serta ketahanan jangka panjang semen Portland. C_3S umumnya bertanggung jawab terhadap perkembangan kekuatan awal, sedangkan

C₂S lebih berpengaruh terhadap peningkatan kekuatan pada umur lanjut. Namun demikian, reaksi antara kalsium oksida (CaO) yang berasal dari batu kapur dan silika (SiO₂) dari pasir secara langsung tergolong sulit terjadi, bahkan pada suhu pembakaran yang tinggi. Oleh karena itu, penambahan alumina (Al₂O₃) dan oksida besi (Fe₂O₃) dalam jumlah tertentu diperlukan untuk membentuk fase cair (*flux*) selama proses pembakaran, yang berfungsi mempercepat pelarutan dan reaksi antara CaO dan SiO₂ sehingga pembentukan mineral C₃S dan C₂S dapat berlangsung secara efektif.

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
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:

$$C_3S = (4,071 \times \% \text{CaO}) - (7,600 \times \% \text{SiO}_2) - (6,718 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,430 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) - (2,852 \times \% \text{SO}_3)$$

$$C_2S = (2,867 \times \% \text{SiO}_2) - (0,7544 \times \% \text{C}_3S)$$

$$C_3A = (2,650 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1,692 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$C_4AF = (3,043 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
Apabila: $\frac{\% Al_2O_3}{\% Fe_2O_3} < 0,64$, terbentuk larutan padat $(C_4AF + C_2F) = 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ Semen dengan komposisi ini di dalamnya tidak terdapat C_3A. maka $(C_4AF + C_2F)$ dan C_3S dihitung sebagai berikut: $(C_4AF + C_2F) = (2,100 \times \% Al_2O_3) + (1,702 \times \% Fe_2O_3)$ $C_3S = (4,071 \times \% CaO) - (7,600 \times \% SiO_2) - (4,479 \times \% Al_2O_3) - (2,859 \times \% Fe_2O_3) - (2,852 \times \% SO_3)$ C_2S 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.						

Proses hidrasi semen Portland merupakan rangkaian reaksi kimia antara senyawa utama semen, khususnya kalsium silikat dan aluminat anhidrat, dengan air yang menghasilkan fase-fase terhidrasi. Produk hidrasi yang terbentuk memiliki volume yang lebih besar dibandingkan partikel anhidrat awal, sehingga secara bertahap mengisi ruang antarbutir dan membentuk suatu massa padat yang saling mengunci. Kondisi ini menghasilkan struktur yang kaku dan berkontribusi terhadap perkembangan kekuatan beton. Tingkat porositas yang terbentuk dalam pasta semen sangat dipengaruhi oleh rasio air terhadap semen (w/c), di mana semakin tinggi rasio tersebut, semakin besar pula pori kapiler yang tersisa setelah proses hidrasi berlangsung.

Secara fundamental, mekanisme hidrasi semen bersifat kompleks karena melibatkan beberapa senyawa dengan karakteristik reaksi yang berbeda. Oleh karena itu, untuk memahami perilaku hidrasi secara menyeluruh, reaksi masing-masing komponen utama semen umumnya dianalisis secara terpisah. Senyawa silikat, yaitu trikalsium silikat (C_3S) dan dikalsium silikat (C_2S), serta senyawa aluminat, yaitu trikalsium aluminat (C_3A) dan tetrakalsium aluminoferrit (C_4AF), memiliki laju reaksi dan kontribusi yang berbeda terhadap perkembangan kekuatan, panas hidrasi, serta mikrostruktur pasta semen. Pendekatan analitis ini memungkinkan pemahaman yang lebih jelas mengenai peran individual setiap senyawa dalam proses pengerasan dan kinerja jangka panjang beton.

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, dengan alat: m^2/kg					

No	Uraian	Jenis semen Portland				
		I	II	III	IV	V
	- Turbidimeter, min	160	160	160	160	160
	- Blaine,	280	280	280	280	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			120		
	- Umur 3 hari, kg/cm ² , minimum	135	100; 70	240		80
	- Umur 7 hari, kg/cm ² , minimum	215	175 120		70	150
	- Umur 28 hari, kg/cm ² , minimum	300			170	210
4	Waktu pengikatan (metode alternatif) dengan alat:					
	a) Gillmore					
	- Awal, menit, minimal	60	60	60	60	60
	- Akhir, menit, maksimum	600	600	600	600	600
	b) Vicat					
	- Awal, menit, minimal	45	45	45	45	45
	- Akhir, menit, maksimum	375	375	375	375	375

CATATAN:

a) Syarat kuat tekan ini berlaku jika syarat kalor hidrasi seperti tercantum pada tabel syarat fisika tambahan (Tabel 4) atau jika syarat C₃S + C₃A 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		70		60	
	- Umur 28 hari, kal/gram, maks		b) 70		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.
- b) Bila syarat kalor hidrasi ini disyaratkan, maka syarat C₃S + C₃A 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 C₃S + C₃A 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 bahan anorganik tambahan, atau melalui pencampuran bubuk semen Portland dengan material anorganik lainnya. Bahan anorganik yang umum digunakan meliputi terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozolan, senyawa silikat, serta batu kapur, dengan kadar total bahan tambahan tersebut berkisar antara 6–35% terhadap massa semen Portland komposit (SNI 7064, 2014). Keberadaan bahan anorganik ini bertujuan untuk memodifikasi karakteristik fisik, kimia, dan mekanis semen sesuai dengan kebutuhan aplikasi konstruksi.

Secara konseptual, semen PCC termasuk dalam kelompok *blended cement* atau semen campuran, yaitu semen yang dirancang untuk memperoleh sifat tertentu yang tidak sepenuhnya dapat dicapai oleh semen Portland tipe I konvensional. Perancangan semen campuran didasarkan pada kebutuhan spesifik, seperti peningkatan durabilitas, pengendalian panas hidrasi, atau peningkatan kinerja jangka panjang beton. Untuk mencapai tujuan tersebut, pada proses pembuatannya ditambahkan material aditif atau bahan mineral tambahan seperti pozolan alam, fly ash, dan silica fume. Bahan-bahan tersebut berperan dalam memperbaiki mikrostruktur pasta semen melalui reaksi pozzolanik maupun efek pengisian (*filler effect*), sehingga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan semen sekaligus mendukung aspek keberlanjutan material konstruksi. 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 vikat:		
	- 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:		
	- Penetrasi akhir	%	min. 50
6	Kandungan udara dalam mortar	% volume	maks. 12

1.2.2.3 Agregat

Agregat, yang terdiri atas agregat kasar dan agregat halus, menyusun sekitar 75% dari volume total beton. Proporsi yang besar ini juga ditemukan pada mortar, di mana agregat halus mendominasi komposisi campuran dengan persentase yang serupa. Oleh karena itu, karakteristik agregat memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap kekuatan mekanis beton dan mortar, serta terhadap ketahanannya (*durability*), termasuk ketahanan terhadap degradasi akibat kondisi lingkungan, pengaruh umur layanan, dan serangan material agresif. Mengingat harga agregat relatif lebih rendah dibandingkan semen, penggunaannya dalam campuran beton dan mortar dioptimalkan hingga batas maksimum yang masih memenuhi persyaratan teknis. Jumlah dan proporsi agregat dalam campuran diatur berdasarkan ukuran butiran dan gradasi, yang menunjukkan keseimbangan antara fraksi agregat halus dan kasar guna memperoleh kinerja beton yang optimal.

Secara klasifikasi, agregat halus berupa pasir didefinisikan sebagai material yang lolos saringan No. 4, yaitu dengan ukuran butiran lebih kecil dari sekitar 4,75–5 mm. Sebaliknya, agregat kasar mencakup material dengan ukuran butiran yang tertahan pada saringan No. 4, seperti kerikil atau batu pecah. Dalam praktik konstruksi beton dan mortar, agregat alam yang memenuhi persyaratan standar teknis umumnya digunakan karena ketersediaan dan kestabilan kualitasnya. Pasir sebagai agregat halus harus berada dalam kondisi bersih, bebas dari kandungan lumpur, tanah, maupun bahan organik yang dapat mengganggu ikatan pasta semen. Sementara itu, agregat kasar berupa batu pecah diharapkan memiliki bentuk butiran yang relatif kubikal dan tidak pipih memanjang, sehingga dapat meningkatkan interlocking antarbutir dan mendukung kinerja mekanis beton secara keseluruhan.

Data-data karakteristik agregat yang harus diketahui adalah:

- Berat jenis
 - Gradasi
 - Kadar air
 - Kadar lumpur
 - Berat volume
 - Keausan
 - Resapan agregat
 - Kandungan organik
 - Modulus kehalusan
 - Diameter maksimum agregat
- 1) Agregat halus untuk beton adalah agregat berupa pasir alam sebagai hasil desintegrasi alami dari batuan-batuan atau berupa pasir buatan yang dihasilkan oleh alat-alat pemecah batu dan mempunyai ukuran butir sebesar 5 mm;
 - 2) Pasir standar, yang dimaksud dalam standar ini adalah pasir kwarsa alam dari, dengan susunan butir dan sifat-sifat tertentu yang digunakan untuk uji semen portland.

Agregat halus yang digunakan dalam campuran beton harus memenuhi persyaratan teknis tertentu guna menjamin kualitas dan kinerja beton yang dihasilkan. Secara umum, ketentuan agregat halus dapat dirangkum sebagai berikut:

- a. Agregat halus harus tersusun atas butir-butir yang keras dan tajam, dengan indeks kekerasan tidak melebihi 2,2, sehingga mampu memberikan kontribusi yang baik terhadap kekuatan beton.
- b. Butiran agregat halus harus bersifat kekal, yaitu tidak mudah mengalami kerusakan atau disintegrasi akibat pengaruh lingkungan seperti panas matahari dan air hujan.
- c. Ketahanan agregat halus terhadap pengaruh cuaca dapat dievaluasi melalui pengujian dengan larutan jenuh garam sulfat, dengan ketentuan:
 - Apabila digunakan larutan natrium sulfat, persentase bagian yang hancur tidak boleh melebihi 12%.
 - Apabila digunakan larutan magnesium sulfat, persentase bagian yang hancur dibatasi maksimum 10%.
- d. Kandungan lumpur dalam agregat halus tidak diperkenankan melebihi 5% dari berat kering. Lumpur yang dimaksud adalah fraksi material yang lolos ayakan berukuran 0,060 mm. Apabila kadar lumpur melampaui batas tersebut, agregat halus wajib dicuci sebelum digunakan.
- e. Agregat halus tidak boleh mengandung bahan organik dalam jumlah berlebihan. Keberadaan bahan organik diuji melalui uji warna Abrams–Herder, di mana larutan di atas endapan agregat yang direndam dalam larutan NaOH 3% tidak boleh lebih gelap dibandingkan larutan standar pembanding. Agregat yang tidak memenuhi uji warna masih dapat digunakan dengan syarat kuat tekan mortar pada umur 7 dan 28 hari mencapai minimal 95% dari mortar pembanding yang menggunakan agregat yang telah dibersihkan.
- f. Susunan gradasi agregat halus harus memiliki modulus kehalusan antara 1,5 hingga 3,8 dan terdiri dari variasi ukuran butiran. Jika diuji dengan susunan ayakan standar, agregat harus berada pada salah satu zona gradasi (Zona 1, 2, 3, atau 4) sesuai ketentuan SKBI/BS.882, dengan persyaratan tambahan:
 - Sisa agregat pada ayakan 4,8 mm maksimum 2% berat.
 - Sisa agregat pada ayakan 1,2 mm minimum 10% berat.
 - Sisa agregat pada ayakan 0,30 mm minimum 15% berat.
- g. Untuk beton dengan persyaratan keawetan tinggi, agregat halus harus menunjukkan hasil negatif terhadap potensi reaksi alkali–silika.
- h. Pasir laut tidak diperkenankan digunakan sebagai agregat halus untuk seluruh mutu beton, kecuali dengan rekomendasi khusus dari lembaga pengujian bahan yang berwenang.
- i. Agregat halus yang digunakan untuk spesi plesteran maupun spesi terapan wajib memenuhi persyaratan teknis agregat halus sebagaimana diuraikan di atas.

Pasir yang digunakan sebagai pasir standar dalam pengujian semen Portland dan fly ash harus berupa pasir kuarsa alam dengan bentuk butiran membulat, bersih, dan keras, serta memenuhi ketentuan berikut:

1. Kandungan silika (SiO_2) minimum sebesar 95,0%.
2. Kandungan silika (SiO_2) yang larut dalam larutan HCl maksimum 0,25%.
3. Kandungan bahan organik harus lebih jernih dibandingkan larutan warna standar.
4. Kandungan lumpur harus nol (0,0%).
5. Susunan butiran harus berada pada rentang ukuran 1,2 mm hingga 0,6 mm dengan jumlah $100\% \pm 2\%$.

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

- a. Agregat halus harus terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras.
- b. Agregat halus harus bersifat kekal dan tidak mudah hancur akibat pengaruh cuaca, yang dapat diuji menggunakan larutan jenuh garam sulfat, dengan batas maksimum bagian yang hancur sebesar 10% berat apabila menggunakan natrium sulfat.
- c. Kandungan lumpur agregat halus dibatasi maksimum 5% dari berat kering, dan agregat harus dicuci apabila kadar lumpur melebihi nilai tersebut.

Berdasarkan SNI 2847-2019 tentang persyaratan beton struktural, agregat kasar didefinisikan sebagai material berupa kerikil yang berasal dari hasil pelapukan alami batuan atau batu pecah yang diproduksi melalui proses pemecahan mekanis di industri. Agregat ini umumnya memiliki ukuran butiran berkisar antara 5 mm hingga 40 mm. Secara klasifikasi, suatu agregat digolongkan sebagai agregat kasar apabila ukuran partikelnya melebihi $\frac{1}{4}$ inci atau sekitar 6 mm.

Karakteristik agregat kasar memiliki peran penting terhadap kekuatan akhir beton yang telah mengeras serta ketahanannya terhadap berbagai bentuk degradasi, seperti disintegrasi akibat cuaca maupun pengaruh lingkungan agresif lainnya. Oleh karena itu, agregat kasar mineral yang digunakan harus bebas dari kandungan bahan organik dan mampu membentuk ikatan yang baik dengan pasta semen, sehingga transfer tegangan dalam beton dapat berlangsung secara efektif (Nawy, 2010).

Selain itu, SNI 2847-2019 juga mengatur batas ukuran maksimum nominal agregat kasar agar sesuai dengan kondisi elemen struktur yang direncanakan. Ukuran maksimum nominal agregat kasar tidak diperkenankan melebihi ketentuan berikut:

- a. Seperlima dari jarak terkecil antara sisi cetakan beton.
- b. Sepertiga dari tebal pelat (slab).
- c. Tiga perempat dari jarak bersih minimum antar tulangan, antar bundel tulangan, tendon prategang, atau selongsong.

Ketentuan tersebut bertujuan untuk menjamin kemudahan pengerjaan (workability), pemadatan yang optimal, serta distribusi agregat yang merata di dalam

beton, sehingga kinerja struktural dan durabilitas beton dapat tercapai secara optimal.

Syarat-syarat gradasi agregat kasar dapat dilihat pada tabel 2.9 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 berperan esensial dalam pembuatan beton karena berfungsi sebagai media terjadinya reaksi kimia antara semen dan air, sekaligus membasahi agregat serta melumasi campuran agar proses pengerjaan dan pemadatan dapat berlangsung dengan baik. Pada praktiknya, air yang layak minum umumnya memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai air pencampur beton. Sebaliknya, air yang mengandung zat berbahaya, seperti garam, minyak, gula, maupun bahan kimia tertentu, berpotensi menurunkan kekuatan beton secara signifikan serta mengubah karakteristik hidrasi semen. Selain itu, keberadaan senyawa tersebut dapat mengganggu ikatan antara agregat dan pasta semen serta menurunkan tingkat kemudahan pengerjaan beton segar.

Karakteristik pasta semen sangat ditentukan oleh reaksi hidrasi yang terjadi antara semen dan air, sehingga parameter yang paling berpengaruh bukanlah perbandingan air terhadap total material penyusun beton, melainkan rasio air terhadap semen. Penggunaan air yang berlebihan akan meningkatkan jumlah pori kapiler akibat terbentuknya rongga setelah proses hidrasi berlangsung, yang pada akhirnya menurunkan kekuatan dan durabilitas beton. Sebaliknya, jumlah air yang terlalu sedikit menyebabkan reaksi hidrasi tidak berlangsung secara optimal, sehingga sebagian semen tidak bereaksi sempurna. Kondisi ini juga berdampak negatif terhadap perkembangan kekuatan beton yang dihasilkan (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 bersifat hidrolis sehingga tidak memiliki kemampuan mengikat secara langsung seperti semen. Namun demikian, dalam kondisi adanya air dan dengan ukuran partikel yang sangat halus, kandungan oksida silika (SiO_2) di dalam fly ash dapat bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida [Ca(OH)_2] yang dihasilkan dari proses hidrasi semen. Reaksi ini membentuk senyawa yang bersifat mengikat dan berkontribusi terhadap perkembangan kekuatan beton melalui mekanisme reaksi pozzolanik (Djiwantoro, 2001). Abu batubara dapat dimanfaatkan dalam beton baik sebagai material terpisah maupun sebagai bagian dari campuran semen dengan tujuan meningkatkan kinerja beton secara keseluruhan.

Sebagai bahan tambahan, fly ash berperan sebagai pengisi (filler) yang mampu meningkatkan kohesi internal pasta semen serta memperbaiki zona transisi antar muka (interfacial transition zone), yang dikenal sebagai bagian terlemah dalam struktur beton. Perbaikan pada zona ini berkontribusi terhadap penurunan porositas dan peningkatan kepadatan mikrostruktur beton, sehingga berdampak positif pada kekuatan dan durabilitas. Pada umur awal hingga sekitar 7 hari, peningkatan kekuatan beton lebih dipengaruhi oleh efek fisik fly ash, seperti pengisian rongga dan pemadatan matriks. Selanjutnya, pada rentang umur 7 hingga 28 hari, perkembangan kekuatan beton terjadi akibat interaksi antara hidrasi semen yang berkelanjutan dan reaksi pozzolanik fly ash yang semakin aktif, sehingga menghasilkan peningkatan sifat mekanis beton secara bertahap.

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 disaring pada 45 μm (No. 325) saringan, maksimum, %	34	34	34
Indeks kekuatan relative: Dengan semen portland, saat umur 7 hari, persen control	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
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	Kelas		
	N	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

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
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 ₂ O ₃	5-35	20-30	20-25
Fe ₂ O 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 ₂ O	0-4	0-2	0-6
K ₂ O	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 (sesaat) dan sifat jangka panjang. Sifat jangka pendek mencakup kemampuan beton dalam menahan beban mekanis, seperti kuat tekan, kuat tarik, dan kuat geser, serta respons elastis yang direpresentasikan oleh nilai modulus elastisitas. Sementara itu, sifat jangka panjang beton berkaitan dengan fenomena deformasi waktu, khususnya rangkak (creep) dan susut (shrinkage), yang terjadi akibat pengaruh beban berkelanjutan dan perubahan kondisi lingkungan.

Dalam konteks penelitian ini, pembahasan difokuskan secara khusus pada kuat tekan beton sebagai parameter utama. Beton diketahui memiliki kapasitas yang jauh lebih baik dalam menahan tegangan tekan dibandingkan dengan tegangan tarik atau geser. Oleh karena itu, dalam perencanaan dan analisis struktur beton bertulang, sifat tekan beton menjadi dasar utama dalam penentuan kapasitas dan kinerja struktural. Dengan demikian, kuat tekan sering dianggap sebagai indikator paling representatif dalam mengevaluasi mutu beton, terutama dalam kaitannya dengan perilaku mekanis dan kemampuan beton dalam mendukung beban struktural.

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)

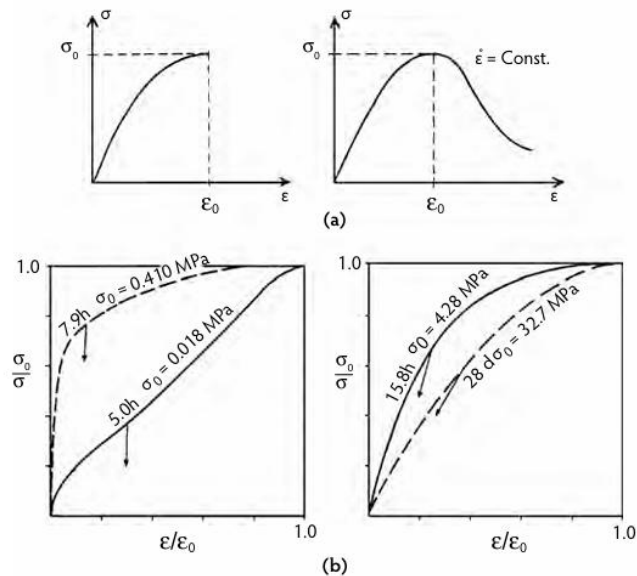
A = Luas penampang melintang benda uji (mm²)

1.2.3.2 Kurva Tegangan-Regangan

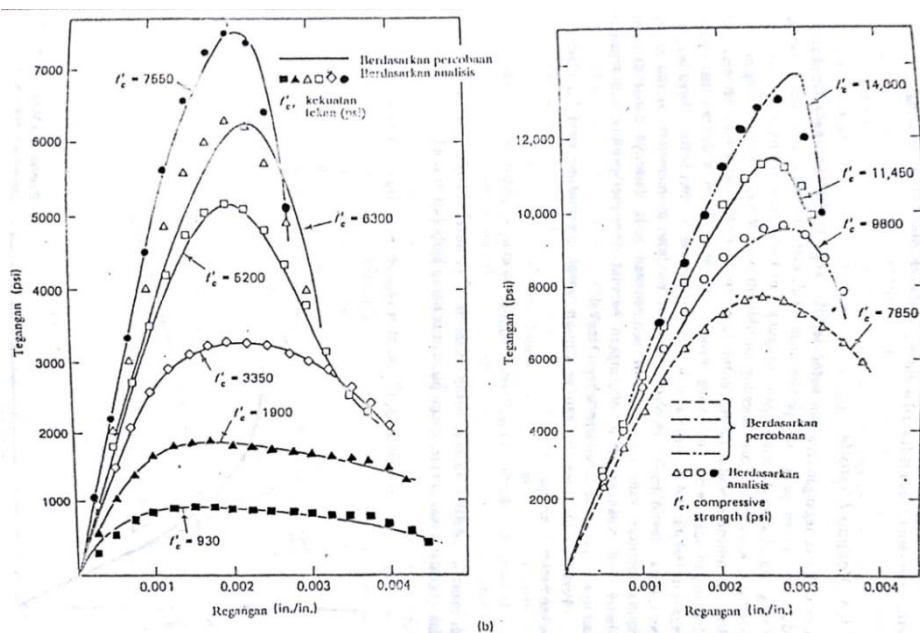
Hubungan tegangan–regangan beton merupakan aspek fundamental yang perlu dipahami dalam pengembangan persamaan analitis, prosedur perencanaan, serta evaluasi perilaku struktur beton. Gambar 1 menunjukkan kurva tegangan–regangan beton tipikal yang diperoleh melalui pengujian tekan uniaksial menggunakan benda uji silinder beton, di mana pembebanan diberikan secara bertahap dalam rentang waktu tertentu. Kurva tersebut merepresentasikan respons material beton terhadap peningkatan tegangan hingga mencapai kondisi keruntuhan.

Pada tahap awal pembebanan, yaitu hingga sekitar 40% dari kuat tekan puncak ($f'c$), hubungan antara tegangan dan regangan umumnya dapat diasumsikan bersifat linier untuk keperluan praktis. Namun, ketika tingkat tegangan mendekati sekitar 70% dari tegangan hancur, beton mulai mengalami penurunan kekakuan yang signifikan akibat terbentuknya mikroretak internal, sehingga respons material menjadi semakin nonlinier. Pada kondisi mendekati beban batas, retak-retak sejajar arah pembebanan berkembang secara jelas, dan pada sebagian besar benda uji silinder beton—kecuali beton dengan kuat tekan sangat rendah—keruntuhan terjadi secara tiba-tiba.

Selanjutnya, Gambar 2 memperlihatkan perbandingan kurva tegangan–regangan beton dengan berbagai tingkat kuat tekan yang dilaporkan oleh Portland Cement Association. Dari kurva tersebut dapat diamati beberapa kecenderungan utama, yaitu semakin rendah kuat tekan beton maka regangan hancur yang terjadi semakin besar, semakin tinggi kuat tekan beton maka panjang daerah linier pada kurva cenderung meningkat, serta peningkatan kuat tekan beton diikuti oleh penurunan tingkat daktilitas material. Fenomena ini menunjukkan bahwa beton berkekuatan tinggi memiliki sifat yang lebih kaku namun relatif lebih getas dibandingkan beton berkekuatan normal (Nawy, 2008).



Gambar 1 Kurva tegangan-regangan tipikal beton (Nawy, 2008).



Gambar 2 Kurva Tegangan-Regangan Untuk Berbagai Kekuatan Beton (Nawy, 2008).

1.2.3.3 Toughness dan Toughness Index

Toughness pada beton menggambarkan kemampuan material untuk menyerap energi sebelum mengalami keruntuhan total, yang secara langsung

mencerminkan perilaku daktil dan kapasitas deformasi pasca-puncak. Parameter ini menjadi penting terutama pada beton dengan modifikasi material seperti penggunaan *high-volume fly ash (HVFA)* atau serat, yang bertujuan meningkatkan ketahanan terhadap retak dan kemampuan energi serap beton (Banthia & Sheng, 1996; Mindess et al., 2003). Secara umum, *toughness* didefinisikan sebagai total energi yang diserap oleh beton selama proses pembebanan hingga titik tertentu setelah beban puncak tercapai. Energi ini dihitung sebagai luas di bawah kurva tegangan–regangan, yang menggambarkan respons beton terhadap peningkatan beban hingga terjadi penurunan tegangan akibat mikroretak dan keruntuhan material (Carreira & Chu, 1985; Popovics, 1973).

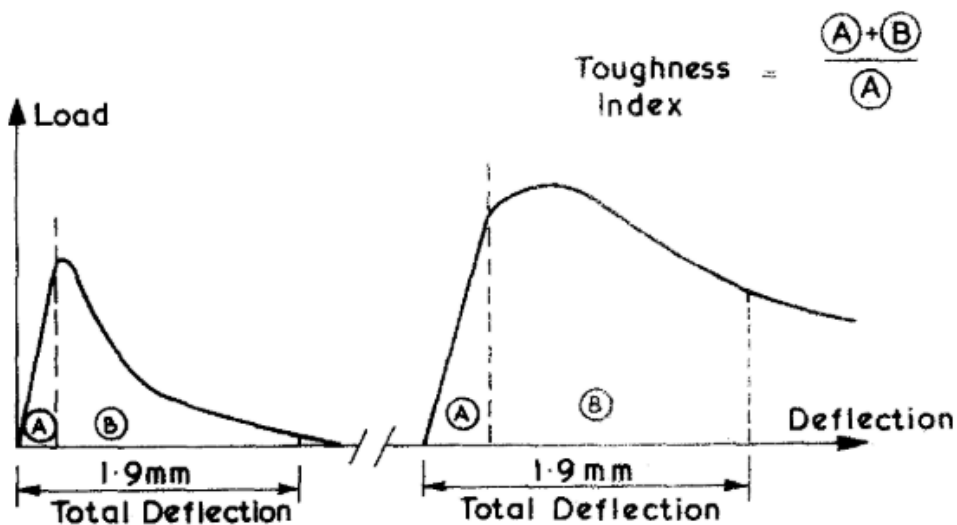
Dalam konteks perilaku mekanik beton, *toughness* memiliki hubungan erat dengan *post-peak ductility*, yaitu kemampuan beton untuk tetap menahan deformasi setelah mencapai tegangan maksimum tanpa kehilangan kekuatan secara drastis. Beton konvensional umumnya bersifat getas dengan penurunan tegangan yang tajam setelah mencapai beban maksimum. Namun, beton dengan penambahan bahan pengganti semen seperti fly ash cenderung memperlihatkan peningkatan *toughness* melalui mekanisme perbaikan mikrostruktur dan pengisian rongga kapiler (Chindaprasirt & Rukzon, 2008). Dengan demikian, nilai *toughness* yang lebih tinggi menunjukkan beton lebih mampu menyerap energi deformasi, meningkatkan ketahanan terhadap beban dinamis, impak, atau siklik (Gopalaratnam & Shah, 1985). Untuk memperjelas hubungan antara *toughness* dan karakteristik deformasi beton, beberapa aspek utama dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Toughness sebelum puncak (pre-peak) mencerminkan energi yang tersimpan selama proses elastis dan awal plastis, di mana deformasi masih dapat pulih sebagian setelah beban dilepaskan.
- Toughness pasca-puncak (post-peak) menggambarkan energi yang terserap saat beton mengalami retak dan deformasi permanen, di mana perilaku ini terkait dengan kemampuan material mempertahankan integritas struktural setelah terjadinya keruntuhan mikro.
- Total toughness merupakan gabungan keduanya dan menjadi indikator utama ketahanan energi beton dalam menahan beban hingga fase kegagalan penuh (Li et al., 2001).

Selain *toughness*, parameter lain yang digunakan untuk menilai daktilitas dan ketahanan pasca-puncak beton adalah *Toughness Index (TI)*. Indeks ini pertama kali diperkenalkan dalam studi beton berserat oleh ACI Committee 544 (1999) dan kemudian diadaptasi secara luas untuk menilai berbagai tipe beton, termasuk beton dengan kandungan fly ash tinggi (*high-volume fly ash concrete*). *Toughness Index* didefinisikan sebagai perbandingan antara energi total yang diserap hingga 90% tegangan pasca-puncak terhadap energi yang diserap hingga mencapai tegangan maksimum. Dengan kata lain, nilai TI menggambarkan seberapa besar kemampuan beton dalam mempertahankan kekuatan residu dan deformasi setelah mencapai kondisi puncak (Barr et al., 1982).

Semakin tinggi nilai *Toughness Index*, semakin besar kemampuan beton dalam menahan deformasi tanpa kehilangan kekuatan secara signifikan. Hal ini menandakan perilaku yang lebih daktail, di mana energi tidak langsung dilepaskan secara mendadak setelah keruntuhan awal terjadi. Sebaliknya, nilai TI yang rendah menunjukkan sifat getas dan kecenderungan beton mengalami keruntuhan tiba-tiba tanpa fase deformasi plastis yang berarti (Li et al., 2001). Beberapa faktor yang memengaruhi nilai TI antara lain:

- Kandungan fly ash dan bahan pengikat pozzolanik lainnya, yang dapat memperbaiki mikrostruktur dan meningkatkan deformabilitas pasca-puncak.
- Jenis dan dosis bahan tambahan kimia, seperti superplasticizer, yang berperan dalam meningkatkan homogenitas campuran dan mengurangi porositas.
- Rasio air terhadap pengikat (w/b ratio) yang memengaruhi kepadatan serta keuletan matriks semen.
- Umur beton, karena reaksi pozzolanik berlangsung lambat dan terus meningkatkan kekuatan serta kemampuan energi serap seiring waktu (Thomas, 2007).



Gambar. Toughness Index pada beton (Barr, 1982)

1.2.4 Model Tegangan – Regangan

Model tegangan–regangan beton merupakan pendekatan matematis yang digunakan untuk menggambarkan perilaku nonlinier material beton ketika menerima beban tekan. Pemahaman mengenai hubungan antara tegangan dan regangan menjadi sangat penting, terutama dalam analisis numerik seperti *finite element modeling* (FEM), desain struktural, dan prediksi kapasitas deformasi material. Karena beton merupakan material yang bersifat getas (*brittle*) dengan perilaku yang tidak

linier setelah mencapai beban maksimum, model matematis diperlukan untuk memprediksi respons tegangan–regangan secara lebih akurat dalam berbagai kondisi pembebanan (Carreira & Kuang-Han Chu, 1985; Sandor Popovics, 1973).

Model matematis ini pada dasarnya menghubungkan tegangan tekan (σ) dan regangan aksial (ϵ) hingga titik puncak (ϵ_0) dan sesudahnya. Dalam pendekatan klasik, perilaku beton di bawah beban tekan dapat dibagi ke dalam tiga zona utama, yaitu:

- Zona pra-puncak (ascending branch): menunjukkan kenaikan tegangan yang hampir linier seiring dengan peningkatan regangan, mencerminkan dominasi perilaku elastis dan pembentukan mikroretak awal.
- Zona puncak (peak point): menggambarkan kondisi maksimum di mana beton mencapai kuat tekan tertinggi (f'_c).
- Zona pasca-puncak (descending branch): memperlihatkan penurunan tegangan akibat berkembangnya retakan internal hingga terjadinya keruntuhan total.

Dua model matematis yang paling banyak digunakan untuk menggambarkan perilaku ini adalah model Popovics (1973) dan model Carreira & Chu (1985). Kedua model tersebut memformulasikan hubungan tegangan–regangan beton dalam bentuk persamaan parametrik dengan memasukkan faktor bentuk (*shape parameter*, β) yang mengatur kelengkungan kurva tegangan–regangan. Parameter β berperan penting dalam menentukan seberapa tajam transisi dari fase elastis menuju fase plastis, serta menggambarkan tingkat daktilitas material.

Model Popovics (1973) merupakan salah satu model awal yang paling berpengaruh dan banyak digunakan untuk beton normal. Model ini dikembangkan berdasarkan data eksperimental dari uji tekan silinder beton, dengan tujuan untuk menggambarkan kurva tegangan–regangan secara empiris. Popovics mendefinisikan parameter β sebagai fungsi empiris dari kuat tekan puncak (f'_c), di mana peningkatan kuat tekan akan menghasilkan kurva yang lebih curam dan puncak yang lebih tajam. Model ini secara umum akurat pada fase pra-puncak, namun cenderung sedikit menyimpang pada fase pasca-puncak karena tidak mempertimbangkan efek *microcracking* dan kehilangan kekakuan (*stiffness degradation*). Meski demikian, model Popovics tetap banyak digunakan karena kesederhanaannya dan kemampuannya menggambarkan perilaku beton konvensional secara konsisten (Popovics, 1973).

Sementara itu, model Carreira & Chu (1985) dikembangkan sebagai penyempurnaan dari model Popovics. Model ini memasukkan parameter tambahan berupa modulus elastisitas (E) dan regangan pada puncak (ϵ_0) untuk meningkatkan ketepatan prediksi terutama pada fase pasca-puncak. Carreira & Chu berpendapat bahwa hubungan antara tegangan dan regangan tidak hanya dipengaruhi oleh kekuatan tekan puncak, tetapi juga oleh rasio antara modulus elastisitas dan deformasi maksimum yang dapat dicapai beton sebelum keruntuhan. Dengan demikian, model ini mampu menangkap perilaku nonlinier yang lebih realistis,

termasuk efek degradasi kekakuan dan perubahan bentuk kurva pada beton mutu tinggi maupun beton dengan bahan tambahan pozzolanik seperti fly ash.

Dalam konteks penelitian beton modern, kedua model ini sering digunakan secara bersamaan untuk tujuan validasi. Model Popovics umumnya digunakan untuk menggambarkan perilaku pra-puncak yang relatif linier dan stabil, sementara model Carreira & Chu lebih representatif untuk memprediksi respons pasca-puncak yang kompleks dan nonlinier (Zhang et al., 2020; Amran et al., 2020). Dengan demikian, penggunaan kedua model secara komplementer memberikan pemahaman menyeluruh terhadap perilaku deformasi beton di bawah beban tekan, baik dari sisi kekuatan puncak maupun kapasitas daktilitasnya.

Selain itu, penelitian-penelitian lanjutan menunjukkan bahwa parameter β dalam kedua model dapat dikalibrasi ulang untuk berbagai jenis beton, seperti *high-performance concrete*, *self-compacting concrete*, maupun beton dengan kadar fly ash tinggi (*high-volume fly ash concrete*), guna meningkatkan akurasi prediksi (Nataraja et al., 2005; Chindaprasirt & Rukzon, 2008). Dengan demikian, model tegangan-regangan tidak hanya berfungsi sebagai alat prediksi perilaku mekanis beton, tetapi juga sebagai dasar analisis perilaku struktur dalam desain berbasis kinerja (*performance-based design*).

1.2.5 Dampak Lingkungan

Dampak lingkungan dievaluasi untuk mengkaji keuntungan dari penggunaan fly ash sebagai pengganti semen dalam campuran beton. Studi ini menghitung dampak lingkungan dalam beberapa parameter, antara lain GWP (*Global Warming Potential*), AP (*Acidification Potential*), EP (*Eutrophication Potential*), dan POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*). Dampak lingkungan dihitung menggunakan Persamaan 2.

GWP berhubungan dengan semua jenis gas rumah kaca, terutama emisi CO₂ dan metana, yang berpotensi menaikkan suhu global dan mengakibatkan dampak negatif terhadap ekosistem, kesehatan manusia, dan keberlanjutan bahan. Secara umum, perubahan iklim mencerminkan variabilitas suhu global. CO₂ yang dihasilkan oleh aktivitas manusia menetap di atmosfer bumi, menghalangi kehilangan panas yang telah diterima dari matahari. Kenaikan suhu global ini berpotensi memicu perubahan iklim, penggurunan, naiknya permukaan laut, dan penyebaran penyakit. Berdasarkan konsensus ilmiah, peningkatan emisi gas rumah kaca berdampak besar terhadap perubahan iklim.

Dampak AP terlihat dari deposisi polutan asam, seperti sulfur dan nitrogen, yang berakibat pada tanah, air, organisme, ekosistem, dan bahan lainnya. Gas asam, seperti sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x), yang terlepas saat pembakaran bahan bakar fosil, bereaksi dengan air baik di tanah atau di atmosfer, menciptakan fenomena "hujan asam." Zat asam ini menghasilkan ion hidrogen (H⁺), yang sangat reaktif dan bisa mengubah komposisi serta sifat fisik bahan lain. Akibatnya, deposisi asam ini merusak ekosistem dan menyebabkan korosi pada bermacam-macam bahan.

Kategori EP mencakup dampak tingginya kadar nutrisi makro seperti fosfor dan nitrogen yang menyebabkan produksi biomassa yang berlebihan di ekosistem akuatik dan terestrial. Misalnya, kehadiran polutan udara dan limbah cair dapat meningkatkan kadar nitrat dan fosfat dalam air, yang mendorong eutrofikasi (kondisi berlebihnya nutrisi), merangsang pertumbuhan alga berlebih, menurunkan oksigen di air, dan merusak ekosistem.

Kategori POCP berkaitan dengan reaksi polutan dari aktivitas manusia di udara dengan sinar matahari, menghasilkan bahan kimia seperti ozon (O_3) yang meningkatkan konsentrasi ozon di permukaan tanah. Fenomena ini menyumbang pada terbentuknya kabut asap yang mengandung senyawa kimia berbahaya bagi kesehatan manusia, pertumbuhan tanaman, dan kelangsungan ekosistem.

$$i_{mix} = \sum_{i=1}^n (W_i - EI_i) \quad (2)$$

Di mana:

- i_{mix} = total dampak lingkungan parameter i yang diperoleh dari mix design yang digunakan dalam 1 fungsional unit (kg/m^3)
- W_i = berat masing-masing material dalam 1 fungsional unit untuk setiap campuran (kg/m^3)
- EI_i = nilai dampak lingkungan untuk masing-masing parameter (kg)

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 9 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 CO_2 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.

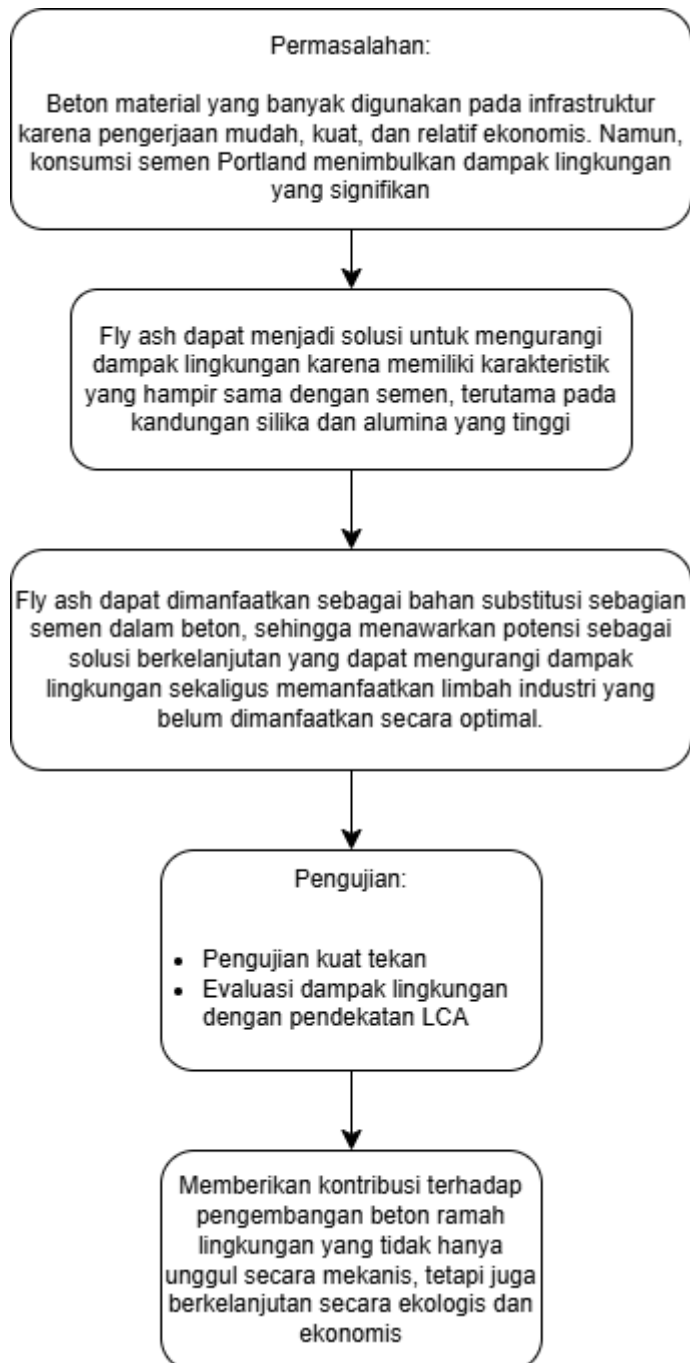
Wang dan Park (2015) meneliti pengembangan prosedur numerik untuk mengevaluasi perkembangan kuat tekan beton dengan kandungan fly ash volume tinggi (High Volume Fly Ash/HVFA). Metode yang digunakan menggabungkan model hidrasi campuran semen-fly ash yang mempertimbangkan efek dilusi semen, reaksi pozzolan 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 9 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, modulus elastisitas, kurva tegangan-regangan, model kurva tegangan-regangan, toughness dan toughness index, LCA	-

1.4 Desain Konseptual



Gambar 3 Desain konseptual

BAB II

METODE

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di 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 1000 kN yang dapat diatur pada kapasitas 500 kN pada pengujian kuat tekan.
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 komputer yang berfungsi untuk mengolah data.
5. Satu set pengujian karakteristik material.
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. Blended cement atau Semen PCC.
2. Abu terbang (*fly ash*).
3. Agregat halus.
4. Agregat kasar.
5. Air.
6. Superplasticizer.

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 10.

Tabel 10 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 Komposisi Bahan dan Campuran

Dua variasi campuran disiapkan dengan kadar fly ash berbeda, yaitu 45% (Mix 1) dan 60% (Mix 2). Penggunaan superplasticizer berbasis polycarboxylate ether ditetapkan pada dosis yang berbeda sebesar 1,8%, dan 2% dari berat semen, berturut-turut. Komposisi material untuk tiap campuran ditampilkan pada Tabel 11.

Tabel 11 Komposisi campuran beton fly ash

Mix	Air (kg)	Semen PCC (kg)	Fly Ash (kg)	Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	Superplasticizer (kg)
Mix 1	236.3	266.5	218.1	628.4	932.0	8.72
Mix 2	236.3	193.8	290.8	623.5	924.8	9.69

2.6 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.

2.6.1 Metode Pembuatan Benda Uji Beton

Jumlah benda uji yang dibuat sebanyak 25 benda uji silinder. 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 kedalam 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 dipadatkan dengan mesin vibrator selama 1 menit.
7. Beton didiamkan selama 24 jam dalam kondisi tertutup untuk mencegah panas hidrasi yang berlebihan.
8. Cetakan silinder selanjutnya dibuka setelah 24 jam dan sampel beton direndam/curing dalam air tawar pada suhu $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ sampai umur pengujian.

2.6.2 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 4 Pengujian kuat tekan beton

2.6.3 Model Tegangan-Regangan

Pemodelan hubungan tegangan–regangan beton tekan dilakukan menggunakan dua model analitik yang telah banyak digunakan dan tervalidasi dalam literatur, yaitu model Popovics (1973) dan model Carreira & Chu (1985). Kedua model tersebut digunakan untuk merepresentasikan perilaku nonlinier beton berbasis *blended cement* dengan substitusi *high-volume fly ash*, serta untuk membandingkan respons analitik dengan hasil pengujian eksperimental.

Persamaan 3 dan 4 menunjukkan formulasi model tegangan–regangan yang dikembangkan oleh Popovics (1973). Model ini menyatakan hubungan antara tegangan tekan beton (σ_c) dan regangan aksial (ε) dalam bentuk fungsi rasional yang dikontrol oleh parameter bentuk kurva β .

$$\sigma_c = \frac{f'_c \beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^\beta} \quad (3)$$

dengan nilai parameter bentuk β ditentukan secara empiris sebagai fungsi dari kuat tekan beton pada Persamaan 4.

$$\beta = 1 + 0.058f'_c \quad (4)$$

dalam hal ini, σ_c adalah tegangan tekan beton, f'_c adalah kuat tekan maksimum beton, ε adalah regangan aksial, dan ε_0 adalah regangan pada saat tercapai tegangan maksimum. Model Popovics (1973) banyak digunakan karena kesederhanaannya dan kemampuannya merepresentasikan bagian pra-puncak kurva tegangan–regangan beton dengan cukup baik, khususnya untuk beton normal hingga beton mutu menengah.

Selanjutnya, Persamaan 5-7 memperlihatkan model tegangan–regangan yang dikembangkan oleh Carreira & Chu (1985), yang merupakan pengembangan lebih lanjut dari model Popovics dengan mempertimbangkan pengaruh modulus elastisitas beton. Bentuk umum persamaan tegangan–regangan pada model ini secara matematis identik dengan model Popovics.

$$\sigma_c = \frac{f'_c \beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^\beta} \quad (5)$$

Namun demikian, perbedaan utama terletak pada penentuan parameter β , yang dalam model Carreira & Chu (1985) dirumuskan pada Persamaan 6.

$$\beta = \frac{1}{1 - \left(\frac{f'_c}{\varepsilon_0 E_{it}} \right)} \quad (6)$$

dengan modulus elastisitas awal beton E_{it} dihitung menggunakan hubungan empiris pada Persamaan 7.

$$E_{it} = 0.0736 \rho^{1.51} (f'_c)^{0.3} \quad (7)$$

di mana ρ adalah massa jenis beton (kg/m^3). Dengan memasukkan parameter modulus elastisitas dan regangan puncak secara eksplisit, model Carreira & Chu (1985) memiliki fleksibilitas yang lebih tinggi dalam menangkap perilaku nonlinier beton, terutama pada fase pasca-puncak dan pada beton dengan modifikasi material seperti penggunaan fly ash dalam kadar tinggi.

2.6.4 Toughness dan Toughness Index

Evaluasi toughness dilakukan berdasarkan kurva tegangan–regangan hasil pengujian tekan silinder beton. Toughness didefinisikan sebagai luas daerah di bawah kurva tegangan–regangan sejak awal pembebanan hingga titik ketika tegangan menurun menjadi 90% dari tegangan puncak setelah mencapai kuat tekan maksimum. Batas 90% dari tegangan puncak dipilih untuk memastikan bahwa kapasitas penyerapan energi beton dapat direpresentasikan secara konsisten dalam rentang deformasi yang realistis, sekaligus menghindari pengaruh berlebihan dari fase *post-failure softening* yang sangat tidak stabil.

Secara matematis, nilai toughness dihitung sebagai integral dari fungsi tegangan terhadap regangan hingga regangan yang bersesuaian dengan 90% kuat tekan maksimum. Dalam penelitian ini, perhitungan integral dilakukan secara numerik menggunakan metode trapezoidal berdasarkan data diskret hasil pengujian eksperimental, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan 8.

$$\text{Toughness} = \int_0^{\varepsilon_{0.9f'_c}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \quad (8)$$

dengan $\sigma(\varepsilon)$ menyatakan tegangan sebagai fungsi dari regangan, dan $\varepsilon_{0.9f'_c}$ merupakan regangan yang bersesuaian dengan 90% dari tegangan puncak f'_c . Nilai toughness dinyatakan dalam satuan N/mm².

Untuk mengevaluasi perilaku daktilitas beton secara lebih komprehensif, khususnya kemampuan material dalam mempertahankan deformasi setelah melewati beban puncak, digunakan parameter toughness index (TI). Toughness index didefinisikan sebagai rasio antara energi total yang diserap beton hingga mencapai 90% tegangan pasca-puncak terhadap energi yang diserap hingga mencapai tegangan puncak. Perhitungan toughness index dilakukan menggunakan Persamaan 9.

$$\text{Toughness Index} = \frac{\int_0^{\varepsilon_{0.9f'_c}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_{f'_c}} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon} \quad (9)$$

di mana $\varepsilon_{f'_c}$ adalah regangan pada saat tegangan puncak tercapai. Pembilang pada persamaan tersebut merepresentasikan total energi hingga 90% tegangan pasca-puncak, sedangkan penyebutnya menyatakan energi yang diserap hingga titik puncak saja.

2.6.5 Dampak Lingkungan

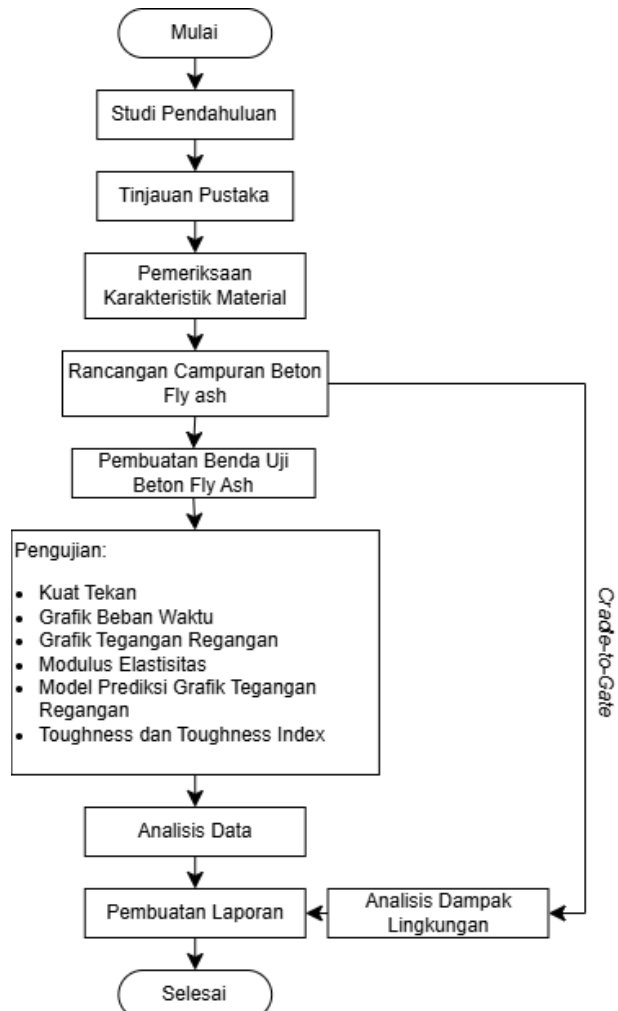
Parameter ini diambil berdasarkan data penelitian terdahulu yang bereputasi dan terpercaya. Parameter yang dihitung di penelitian ini adalah GWP (*Global Warming Potential*), POCP (*Photochemical Ozone Creation Potential*), AP (*Acidification Potential*), dan EP (*Eutrophication Potential*). Tabel 12 memperlihatkan nilai-nilai GWP, AP, EP, dan POCP untuk material fly ash, agregat kasar, agregat halus, dan air berdasarkan data dari penelitian terdahulu.

Tabel 12 Data indikator lingkungan dari produksi material beton

Material	Referensi	GWP (kgCO ₂ -eq)	AP (kgSO ₂ -eq)	EP (kgPO ₄ -eq)	POCP (kgC ₂ H ₄ -eq)
Agregat Kasar	Yang et al., (2023)	2,44E-03			
	Nodehi et al., (2024)		3,85E-02	6,97E-03	
	Park et al., (2019)				1,41E-05
Agregat Halus	Braga et al., (2017)	9,87E-03	4,58E-05	1,08E-05	2,80E-06
Air	Braga et al., (2017)	1,33E-04	3,87E-08	9,70E-07	4,99E-08

Material	Referensi	GWP (kgCO₂-eq)	AP (kgSO₂-eq)	EP (kgPO₄-eq)	POCP (kgC₂H₄-eq)
Semen	Peng et al., (2023)	8,98E-01			
	Zhang et al., (2023)		9,24E-03	2,09E-03	
	Li et al., (2015)				1,16E-04
Fly ash	Habert et al., (2011)	5,26E-03	3,32E-05	4,94E-06	1,93E-06

2.7 Bagan Alir Penelitian



Gambar 5 Bagan Alir Penelitian