

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan infrastruktur Indonesia yang pesat menjadikan beton sebagai material konstruksi paling dominan. Namun, produksi beton konvensional, khususnya pada tahap produksi semen, menimbulkan tantangan lingkungan serius berupa emisi karbon dan polusi lainnya. Sebuah kajian di Indonesia menunjukkan bahwa produksi beton *readymix* dapat menyebabkan penurunan kualitas udara ambien dan ruang kerja, peningkatan kebisingan, serta pencemaran badan air (Permana, 2021). Temuan ini menggarisbawahi urgensi pencarian solusi material yang lebih berkelanjutan tanpa mengorbankan kinerja struktural.

Salah satu pendekatan strategis untuk memitigasi dampak tersebut adalah dengan mensubstitusi sebagian semen menggunakan material lain. Abu terbang (*fly ash*), limbah padat dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batu bara, telah lama diidentifikasi sebagai bahan pengganti semen yang efektif karena sifat pozolaniknya. Di Indonesia, di mana PLTU batu bara masih dominan, pemanfaatan abu terbang menawarkan potensi ganda: mengurangi jejak karbon beton sekaligus mengatasi masalah penumpukan limbah industri. Penelitian terdahulu mengonfirmasi bahwa substitusi semen dengan *fly ash* hingga persentase tertentu masih dapat memberikan kinerja yang memadai (Rahmayanti et al., 2023).

Namun, dari perspektif kinerja material, respons kuat lentur—parameter kritis yang menentukan kemampuan beton menahan tegangan tarik akibat pembebanan lentur—terhadap variasi kadar substitusi *fly ash* masih perlu dikaji lebih mendalam. Meskipun penggunaan *fly ash* dalam kadar tinggi (>50%) dilaporkan dapat memberikan kinerja mekanis yang baik (Mubarak et al., 2023), data komprehensif yang memanfaatkan *fly ash* lokal Indonesia dan mengaitkannya secara eksplisit dengan persyaratan teknis struktur (seperti kuat lentur) masih terbatas. Di sisi lain, evaluasi holistik beton berbasis *fly ash* tidak hanya terbatas pada kinerja mekanis, tetapi juga harus mencakup aspek dampak lingkungan. Meskipun secara intuitif substitusi semen mengurangi emisi CO₂, besaran pengurangan ini perlu dikuantifikasi secara ilmiah untuk memberikan justifikasi yang kuat atas klaim keberlanjutannya (Muttaqien et al., 2023).

Berdasarkan uraian di atas, terdapat kesenjangan antara potensi pemanfaatan *fly ash* yang melimpah dengan kurangnya data komprehensif yang mengintegrasikan kinerja mekanis (khususnya kuat lentur) dan analisis dampak lingkungan secara kuantitatif. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk menjawab kesenjangan tersebut dengan mengkaji pengaruh variasi kadar *fly ash* terhadap kuat lentur beton sekaligus menguantifikasi pengurangan dampak lingkungan yang dihasilkan. Dasar empiris dari penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada formulasi beton yang tidak hanya memenuhi tuntutan teknis-struktural, tetapi juga lebih ramah lingkungan, mendukung praktik konstruksi berkelanjutan di Indonesia.

1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka permasalahan utama yang menjadi fokus dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penggunaan abu terbang sebagai bahan substitusi sebagian semen terhadap kuat lentur beton?
2. Bagaimana dampak lingkungan beton yang menggunakan abu terbang sebagai bahan substitusi sebagian semen?

1.1.2 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kuat lentur beton yang menggunakan abu terbang sebagai bahan substitusi sebagian semen dengan variasi persentase abu terbang pada umur beton 28 hari.
2. Menganalisis dampak lingkungan beton yang menggunakan abu terbang sebagai bahan substitusi sebagian semen.

1.1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini terletak pada pemahaman karakteristik kuat lentur beton sekaligus evaluasi dampak lingkungan yang dihasilkan dari penggunaan abu terbang sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam campuran beton. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif dalam upaya pengurangan penggunaan semen Portland yang berdampak besar terhadap emisi karbon. Selain itu, penelitian ini diarahkan untuk memanfaatkan limbah hasil pembakaran batu bara secara optimal, sehingga diharapkan mampu mendukung konsep pembangunan berkelanjutan serta mengurangi dampak pencemaran lingkungan akibat limbah industri.

1.1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan terfokus, maka ditetapkan batasan masalah sebagai berikut:

1. Bahan substitusi yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu terbang sebagai pengganti sebagian semen Portland.
2. Abu terbang yang digunakan merupakan abu terbang hasil pembakaran batu bara yang diperoleh dari PLTU di Kabupaten Jeneponto, Kecamatan Bangkala, Desa Punagayya, Sulawesi Selatan.
3. Jenis semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah Semen Portland Komposit (PCC).
4. Variasi kadar abu terbang yang digunakan sebagai substitusi semen adalah 0%, 15%, 30%, dan 45%.
5. Benda uji yang dibuat berupa balok beton berukuran 400 x 100 x 100 mm.

6. Pengujian sifat mekanik beton dalam penelitian ini dibatasi pada pengujian kuat lentur beton umur 28 hari.
7. Penilaian dampak lingkungan hanya untuk parameter GWP, ADP, AP, EP, ODP dan POCP berdasarkan data dan literatur terdahulu.
8. Analisis dampak lingkungan hanya dilakukan pada tahap campuran beton dan tidak mencakup analisis siklus hidup secara menyeluruh.
9. Standar dan pedoman yang digunakan sebagai dasar penelitian ini adalah Standar Nasional Indonesia (SNI) serta jurnal dan literatur ilmiah yang relevan dengan topik penelitian.

1.2 Teori

1.2.1 Beton

Beton merupakan material konstruksi yang memiliki peranan sangat penting dalam pembangunan infrastruktur modern. Secara global, beton menjadi material yang paling banyak digunakan setelah air, seiring dengan tingginya kebutuhan pembangunan gedung, jembatan, jalan raya, bendungan, dan berbagai fasilitas publik lainnya. Penggunaan beton yang masif disebabkan oleh kemudahan produksi, ketersediaan bahan penyusun, serta kekuatannya yang baik dalam menahan beban tekan dan daya tahan yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan. Dengan pertumbuhan penduduk dan kebutuhan infrastruktur yang terus meningkat, beton diperkirakan akan tetap menjadi material utama dalam industri konstruksi di masa yang akan datang.

Beton didefinisikan sebagai campuran antara semen Portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan (*Admixture*), yang setelah mengalami proses pengerasan membentuk massa padat (Badan Standardisasi Nasional, 2019). Komposisi bahan penyusun beton diperoleh melalui perhitungan *mix design*, kemudian dicampur secara merata hingga mencapai kondisi homogen sebelum dituangkan ke dalam cetakan. Campuran beton yang telah dicetak akan mengalami pengerasan akibat terjadinya reaksi kimia antara semen dan air, sehingga kekuatan beton meningkat seiring bertambahnya umur beton.

Menurut Zulkarnain (2021), beton memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

1. Tahan terhadap temperatur tinggi.
2. Memiliki umur yang tahan lama.
3. Memiliki kuat tekan tinggi.
4. Biaya pemeliharaan yang lebih ekonomis.
5. Mudah didapat bahan bakunya.

Pembuatan beton melibatkan pengukuran dan pencampuran bahan-bahan dengan proporsi yang tepat untuk mencapai karakteristik yang diinginkan. Beberapa variabel yang mempengaruhi kekuatan dan kualitas beton antara lain:

1. Proporsi Bahan

Perbandingan antara semen, agregat halus, agregat kasar, dan air sangat

mempengaruhi kekuatan beton akhir. Komposisi yang lebih tinggi dari semen biasanya menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi, tetapi dapat mengurangi *workability* beton (E. Nugraha & Kusdian, 2023).

2. Kualitas Bahan

Kualitas agregat dan semen juga mempengaruhi hasil akhir beton. Misalnya, menggunakan batu karang sebagai pengganti kerikil dapat menghasilkan beton yang tergolong baik (Lukas & Rafael, 2023).

3. Metode Pengadukan dan Penuangan

Teknik pengadukan yang efektif dan penanganan yang tepat saat pengecoran sangat penting untuk meminimalkan segregasi dan memastikan distribusi yang merata dari material dalam campuran (Edi & Mokhtar, 2022).

4. Perawatan Beton

Setelah pengecoran, beton perlu dirawat dengan baik agar hidrasi semen dapat berlangsung dengan baik, yang penting untuk kekuatan akhir beton. Perlakuan yang buruk dapat menyebabkan retakan dan penurunan kekuatan secara signifikan (Purnawirati & Herlambang, 2022).

Kualitas dan mutu beton sangat dipengaruhi oleh jenis dan karakteristik bahan penyusunnya. Oleh karena itu, pemilihan material yang tepat, termasuk penggunaan bahan tambahan seperti *fly ash*, sangat berperan dalam menentukan performa mekanik dan daya tahan beton. Penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen tidak hanya dapat meningkatkan sifat tertentu pada beton, seperti kelecakan dan ketahanan terhadap lingkungan, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan dampak lingkungan akibat produksi semen.

1.2.2 Bahan penyusun beton

Beton merupakan material komposit yang terdiri dari beberapa bahan penyusun utama. Kualitas dan kinerja akhir beton sangat ditentukan oleh proporsi dan karakteristik dari masing-masing bahan tersebut, yang dicampur berdasarkan *mix design* tertentu.

1.2.2.1 Semen

Semen adalah komponen utama dalam pembuatan beton yang berfungsi sebagai bahan pengikat antara agregat halus, agregat kasar, dan air. Mekanisme pengikatan tersebut terjadi melalui reaksi kimia antara semen dan air yang menghasilkan pasta semen, yang selanjutnya mengalami proses pengerasan seiring berjalannya waktu akibat reaksi hidrasi. Sebagai salah satu material yang paling sering digunakan dalam industri konstruksi, semen termasuk salah satu bahan bangunan yang tingkat konsumsinya sangat tinggi dan secara global menempati urutan kedua setelah air. Menurut penelitian, semen Portland adalah jenis semen yang paling umum digunakan dalam dunia konstruksi (Lavagna & Nisticò, 2022).

Di Indonesia, jenis-jenis semen umumnya diklasifikasikan berdasarkan komposisi dan kegunaannya dalam proyek bangunan.

1. Jenis Semen Portland
Semen Portland adalah tipe paling umum dengan warna abu-abu kebiruan, kegunaannya untuk rumah , gedung bertingkat, dan jalan raya. Jenis semen ini terdiri dari lima tipe.
 - a. Tipe I: Untuk konstruksi umum seperti rumah dan jalan, jauh dari pantai dengan kadar sulfat rendah.
 - b. Tipe II: Tahan sulfat sedang, cocok untuk beton massa di tepi pantai atau tanah rawa.
 - c. Tipe III: Kekuatan awal tinggi, ideal untuk gedung tinggi, jalan tol, bandara, dan struktur dalam air non-sulfat.
 - d. Tipe IV: Hidrasi panas rendah, digunakan pada bendungan dan landasan pacu.
 - e. Tipe V: Tahan sulfat tinggi, untuk lingkungan agresif seperti air laut.
2. Jenis Semen Komposit
 - a. *Portland Composite Cement* (PCC): Campuran terak, gipsum, dan bahan anorganik; tahan lingkungan ekstrem untuk plester dan beton struktural.
 - b. *Portland Pozzolan Composite* (PPC): Mengandung pozolan untuk ketahanan sulfat dan hidrasi sedang; dipakai pada perumahan, dermaga, irigasi.
3. Jenis Khusus Lainnya
 - a. *Super Masonry Cement* (SMC): Untuk genteng beton, tegel, *paving block*, *hollow brick*, dan struktur beton hingga K225.
 - b. *Super Blended Cement* (SBC): Semen campur untuk proyek khusus seperti jembatan di air laut.

Setiap jenis semen ini tidak hanya berfungsi sebagai bahan pengikat, tetapi juga memberikan sifat mekanik dan ketahanan yang diinginkan untuk berbagai kondisi lingkungan. Menurut penelitian, semen Portland adalah jenis semen yang paling umum digunakan dalam dunia konstruksi (Lavagna & Nisticò, 2022). Dalam penelitian ini, semen yang digunakan adalah Semen Portland Komposit (PCC). PCC merupakan jenis semen yang didapatkan dengan mencampurkan klinker semen Portland dengan bahan tambahan seperti *fly ash*, *slag*, atau material lainnya untuk meningkatkan sifat mekanik dan lingkungan (Munawir & Khalid, 2024). Menurut penelitian sebelumnya, PCC memiliki kinerja yang lebih baik dalam kekuatan tekan dan ketahanan dibandingkan dengan semen Portland biasa (*Ordinary Portland Cement*). Misalnya, PCC dapat mengurangi emisi karbon dioksida yang dihasilkan selama proses produksinya, menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan (Febriasto et al., 2020).

1.2.2.2 Agregat Kasar

Agregat kasar, yang juga dikenal sebagai kerikil atau batu pecah, merupakan material hasil pemecahan alami atau buatan dari batuan. Berdasarkan (ASTM C33, 2003), agregat kasar didefinisikan sebagai agregat yang memiliki ukuran

butir lebih besar dari 4,75 mm. Dalam beton struktural, agregat kasar menyusun 40-50% volume beton. Ketentuan mengenai agregat kasar meliputi:

- a. Modulus halus butir 6,0 sampai 7,1.
- b. Harus tersusun dari butir-butir yang keras dan tidak berpori.
- c. Memiliki sifat kekal, yaitu tidak mudah pecah atau hancur akibat pengaruh cuaca.
- d. Tidak mengandung zat-zat yang dapat merusak beton, seperti senyawa yang bersifat alkalis.
- e. Kadar lumpur maksimum yang diperbolehkan adalah 1%. Jika kadar lumpur melebihi batas tersebut, agregat kasar harus dicuci sebelum digunakan.
- f. Agregat kasar harus memiliki variasi ukuran butir yang beragam dan terdistribusi dengan baik sesuai dengan ketentuan gradasi yang dipersyaratkan.

(British Standard Institution, 1982) telah menetapkan batasan daerah gradasi untuk agregat kasar yang dibagi ke dalam tiga kategori berdasarkan ukuran maksimum butir, yaitu 10 mm, 20 mm, dan 40 mm. Ketentuan gradasi ini digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kesesuaian distribusi ukuran butir agregat kasar terhadap persyaratan yang ditetapkan. Pada beton dengan kandungan *fly ash* tinggi, gradasi agregat kasar yang baik menjadi lebih penting karena *fly ash* mengubah sifat reologi dan kepadatan pasta semen.

1.2.2.3 Agregat Halus

Agregat halus merupakan material berupa pasir alam yang berasal dari hasil pelapukan batuan atau pasir buatan yang diperoleh dari proses pemecahan batuan secara mekanis. Agregat halus memiliki ukuran butir maksimum sebesar 4,75 mm dan ukuran minimum sekitar 0,15 mm. Dalam campuran beton, agregat halus berfungsi untuk mengisi ruang kosong di antara agregat kasar sehingga meningkatkan kepadatan dan homogenitas beton. Agregat halus ini berperan sebagai bahan pengisi (*filler*) yang umumnya memiliki ukuran butir dalam rentang saringan No.4 hingga No.100 berdasarkan standar saringan Amerika. Agar agregat halus dalam campuran beton dapat berperan sesuai keutamaannya, agregat halus harus memenuhi syarat-syarat berikut:

- a. Nilai angka kehalusan (*fineness modulus*) harus berada dalam rentang 1,5 sampai 3,8 agar memenuhi persyaratan teknis.
- b. Kadar lumpur atau bagian yang lebih kecil dari 0,074 mm yang di perbolehkan adalah maksimum 5%. Apabila kadar lumpur melebihi batas tersebut, agregat halus wajib dicuci terlebih dahulu sebelum digunakan dalam campuran beton.
- c. Agregat halus tidak diperkenankan mengandung bahan organik dalam jumlah berlebihan, yang pembuktiannya dilakukan melalui uji warna metode *Abrams–Harder* menggunakan larutan NaOH 3%.
- d. Tingkat kekerasan butiran agregat juga diuji dengan membandingkannya terhadap pasir pembanding yang berasal dari pasir kuarsa Bangka, dengan nilai yang diperoleh tidak boleh melebihi 2,20.

- e. Ketahanan atau kekekalan agregat diuji menggunakan larutan natrium sulfat atau magnesium sulfat, dengan batas maksimum bagian yang hancur masing-masing sebesar 10% dan 15%.
- f. Agregat halus harus memiliki variasi ukuran butir yang beragam dan terdistribusi dengan baik sesuai dengan ketentuan gradasi yang dipersyaratkan.

(ASTM C33-86, 1986) memberikan syarat gradasi agregat halus di mana agregat halus tidak boleh mengandung bagian yang lolos lebih dari 45% dari yang tertahan pada ayakan berikutnya.

1.2.2.4 Air

Air merupakan salah satu komponen utama dalam pembuatan beton karena berfungsi sebagai media reaksi kimia antara semen dan bahan penyusun lainnya serta sebagai pelumas agar campuran beton menjadi mudah dikerjakan (*workable*). Air dibutuhkan untuk memicu reaksi hidrasi semen sehingga campuran beton dapat mengeras dan membentuk struktur yang kuat. Selain itu, air juga berperan dalam memudahkan butir-butir agregat dan partikel semen bergerak satu sama lain sehingga beton segar dapat dipadatkan dengan baik saat proses pengecoran. Dalam praktik, kebutuhan air umumnya berkisar sekitar 25% dari berat semen, sedangkan secara teoritis jumlah air yang dibutuhkan untuk hidrasi penuh semen berada pada kisaran 35–37% dari berat semen (Hamdi et al., 2022).

Air yang digunakan sebagai air pencampur beton harus memenuhi persyaratan mutu tertentu agar tidak mengganggu proses hidrasi, kekuatan, maupun ketahanan beton. Menurut (A. Nugraha et al., 2023), syarat penggunaan air adalah sebagai berikut:

1. Tidak mengandung lumpur atau benda melayang lainnya lebih dari 2gr/ltr.
2. Tidak mengandung garam-garam yang dapat merusak beton (asam, zat organik) lebih dari 15 gr/ltr.
3. Tidak mengandung Klorida (Cl) lebih dari 0,5 gr/ltr.
4. Tidak mengandung senyawa sulfat lebih dari 1 gr/ltr.

Air pencampur dianggap tidak berpengaruh buruk terhadap waktu pengikatan dan kekuatan beton apabila memenuhi kriteria berikut:

1. Perbedaan waktu pengikatan awal antara campuran yang menggunakan air uji dan air suling tidak lebih dari 30 menit.
2. Kuat tekan beton yang dibuat dengan air uji tidak kurang dari 90% kuat tekan beton yang dibuat dengan air suling.

1.2.2.5 Admixture

Admixture adalah bahan yang ditambahkan dalam campuran beton selain semen, air, agregat, dan bahan pengikat. Penggunaan *admixture* dapat memberikan dampak signifikan terhadap sifat kerja beton, termasuk waktu pengaturan, kekuatan, dan daya tahan. *Admixture* sering digunakan untuk meningkatkan kinerja beton dalam kondisi tertentu, seperti meningkatkan

ketahanan terhadap serangan kimia atau menurunkan kebutuhan air dalam campuran (Hasyim et al., 2018).

Jenis-jenis *admixture* dapat dibedakan menjadi beberapa kategori, termasuk *admixture* kimia, serat, dan bahan buangan non-kimia, yang masing-masing memiliki fungsi dan manfaat spesifik dalam meningkatkan kualitas beton.

1. *Admixture* Kimia

Admixture kimia merupakan kategori yang paling umum digunakan, dan di dalamnya terdapat subkategori seperti *superplasticizers*, *air-reducing agents*, dan *set retarders*. Penggunaan *superplasticizers*, seperti *polycarboxylate ethers*, telah terbukti secara signifikan meningkatkan kerja beton dan kekuatan tekan.

2. *Admixture* Berbasis Polimer

Admixture berbasis polimer, seperti *superabsorbent polymers* (SAP), memainkan peran penting dalam kontrol air dalam campuran beton. Mereka dapat menyerap air hingga 500 kali beratnya dan melepaskannya secara perlahan ke dalam beton, membantu mengatasi penyusutan plastik dan *autogenik* yang biasa terjadi selama pengerasan beton.

3. Bahan Tambah Alami

Dalam upaya untuk membuat beton lebih ramah lingkungan, penggunaan bahan tambah alami seperti tebu yang telah dieksplorasi. *Admixture* ini tidak hanya berkontribusi pada karakteristik pengaturan dan kekuatan, tetapi juga memungkinkan pengurangan emisi CO₂ dibandingkan dengan *admixture* kimia berbasis sintetik.

1.2.3 Abu Terbang (*Fly ash*)

Abu terbang (*fly ash*) merupakan material sisa hasil pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang terbawa oleh gas buang dan di tanggap menggunakan alat pengendali partikulat. Menurut ASTM C6187-19, *fly ash* didefinisikan sebagai partikel halus yang dihasilkan oleh pembakaran batu bara atau bubuk batu bara. *Fly ash* dan *slag* telah terbukti menjadi sumber bahan pembuatan geopolimer. *Fly ash* dianggap menguntungkan karena reaktivitas partikelnya lebih halus daripada *slag*. Secara fisik, *fly ash* memiliki karakteristik yang menyerupai semen, terutama dari segi tingkat kehalusan butirannya. Berdasarkan ACI Committee 226, *fly ash* tersusun dari partikel-partikel halus yang sebagian besar lolos saringan No. 325 (45 µm) dengan persentase antara 5–27%, memiliki berat jenis berkisar 2,15–2,60, serta berwarna abu-abu hingga kehitaman. *Fly ash* tidak bersifat sebagai bahan pengikat hidrolik seperti semen. Namun, dalam kondisi adanya air dan ukuran partikel yang sangat halus, kandungan oksida silika di dalam *fly ash* akan bereaksi secara pozolan dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen, sehingga membentuk senyawa yang memiliki sifat pengikat dan berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan matriks beton. Dari sisi kimia, *fly ash* didominasi oleh senyawa silika dan alumina dengan kadar yang dapat mencapai sekitar 80%. Perbandingan sifat kimia abu terbang dan semen ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Perbandingan sifat kimia *fly ash* dan semen

Komponen Pembanding	rata-rata untuk <i>fly ash</i> (%)	rata-rata untuk semen Portland (%)
Kapur, CaO	1-12	60-65
Silika, SiO ₂	20-60	17-25
Alumina, Al ₂ O ₃	5-35	3-8
Besi, Fe ₂ O ₃	10-40	0,5-6
Magnesia, MgO	0-5	0,5-4
Sulfur, SO ₃	0-4	1-2
Soda/Potash, Na ₂ O + K ₂ O	0-7	0,5-1

Sumber: Setiawati, 2018

Menurut (Badan Standardisasi Nasional, 2014), *fly ash* diklasifikasikan ke dalam tiga kelas, yaitu kelas N, kelas F, dan kelas C.

1. Kelas N

Kelas N merupakan pozolan alami yang dapat berupa material mentah maupun yang telah mengalami proses kalsinasi dan memenuhi persyaratan untuk kelas tersebut. Contohnya meliputi tanah diatom (hasil pelapukan), batu rijang opalin dan serpih, tufa, abu vulkanik atau batu apung baik yang telah dikalsinasi maupun belum, serta beberapa bahan lain seperti lempung dan serpih yang memerlukan proses kalsinasi untuk memperoleh sifat yang diinginkan.

2. Kelas F

Kelas F merupakan abu terbang yang berasal dari pembakaran batubara dan memenuhi persyaratan untuk kelas F. *Fly ash* pada kelas ini memiliki sifat pozolanik, yaitu mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam kondisi tertentu untuk membentuk senyawa yang bersifat sementisius.

3. Kelas C

Kelas C merupakan abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran batubara dan memenuhi persyaratan untuk kelas C. *Fly ash* kelas ini memiliki sifat pozolanik sekaligus sementisius sehingga selain bereaksi dengan kalsium hidroksida, juga dapat berkontribusi langsung dalam proses hidrasi seperti semen.

Fly ash kelas F umumnya dihasilkan dari pembakaran batubara antrasit atau bituminus, namun juga dapat berasal dari batubara subbituminus dan lignit. Sementara itu, *fly ash* kelas C biasanya dihasilkan dari pembakaran batubara lignit atau subbituminus, meskipun dapat pula berasal dari batubara antrasit atau bituminus. *Fly ash* kelas C umumnya memiliki kandungan kalsium yang relatif tinggi dengan kadar kalsium oksida (CaO) lebih dari 10% (Badan Standardisasi Nasional, 2014).

Spesifikasi *fly ash* untuk kelas C dan F yang digunakan sebagai bahan pozzolan dalam campuran beton telah ditetapkan dalam ASTM C-618 (Mahmood et al., 2018). Standar ini mengatur batas komposisi kimia utama yang harus dipenuhi

oleh *fly ash* berdasarkan klasifikasinya ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Spesifikasi *fly ash* untuk Kelas C dan Kelas F

Komponen Kimia	Kelas F	Kelas C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	Min 70%	Min 50%
SO_3	Max 5%	Max 5%
Kadar Air	Max 3%	Max 3%
Loss on Ignition (LOI)	Max 6%	Max 6%

Sumber: Mahmood et al., 2018

Selain persyaratan kimia, *fly ash* juga harus memenuhi persyaratan fisik agar dapat digunakan secara optimal sebagai bahan tambahan dalam campuran beton yang diperlihatkan pada **Tabel 3**. Persyaratan fisik tersebut berkaitan dengan ukuran partikel, aktivitas kekuatan, kebutuhan air, serta densitas material.

Tabel 3. Persyaratan fisik *fly ash*

Karakteristik Fisik	Persyaratan
Kehalusan (lolos ayakan No.325)	Max 34%
Indeks Aktivitas Kekuatan	Min 75% dari kontrol pada 7 dan 28 hari
Kebutuhan Air	Max 105%
Densitas	Max 5% variasi dari densitas rata-rata

Sumber: SNI 2460:2014

Menurut (Mubarak et al., 2023), kehalusan dan bentuk partikel *fly ash* memberikan efek pengisian (*filler effect*), yaitu kemampuan partikel halus mengisi rongga di antara partikel semen dan agregat. Efek ini dapat meningkatkan kepadatan beton dan memperbaiki zona transisi antar muka (*interfacial transition zone*), yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik beton.

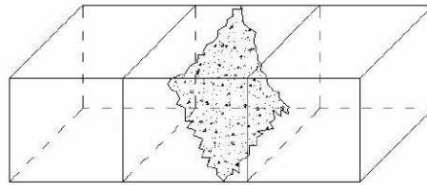
1.2.4 Pengujian Kuat Lentur Beton

Menurut (Badan Standardisasi Nasional, 2011) mengenai prosedur pembuatan dan pemeliharaan benda uji beton di laboratorium, struktur beton pada bangunan sipil diwajibkan untuk menahan gaya-gaya yang beroperasi di atasnya, seperti gaya tekan dan lentur, yang dihasilkan oleh energi eksternal. Untuk memastikan bahwa kualitas beton memenuhi standar yang ditetapkan untuk konstruksi, perlu dilakukan serangkaian pengujian di laboratorium yang mencakup agregat, adukan beton, serta beton pada berbagai umur. Agar struktur beton dapat dengan aman mendukung beban lentur yang diterimanya, beton harus memiliki kekuatan lentur tertentu yang ditentukan dalam spesifikasi. Kuat lentur beton didefinisikan sebagai kemampuan elemen balok beton yang ditumpu pada dua perletakan dalam menahan beban yang bekerja tegak lurus terhadap sumbu memanjang benda uji hingga terjadi keruntuhan. Balok yang menerima beban akan mengalami deformasi sehingga menimbulkan

momen lentur sebagai respons perlawanan material penyusunnya terhadap beban luar. Tegangan yang terjadi akibat deformasi tersebut harus berada di bawah batas tegangan lentur yang diizinkan untuk beton. Momen luar yang bekerja harus dapat dipikul oleh material beton, di mana nilai maksimum yang dapat ditahan sebelum balok mengalami keruntuhan atau patah setara dengan kapasitas momen lentur internal balok (Pane et al., 2015).

Berdasarkan posisi garis patah yang terjadi, perhitungan kuat lentur beton dibedakan menjadi dua kondisi, yaitu:

1. Patah terjadi pada daerah tengah bentang (dalam 1/3 bentang tengah) ditunjukkan pada **Gambar 1**



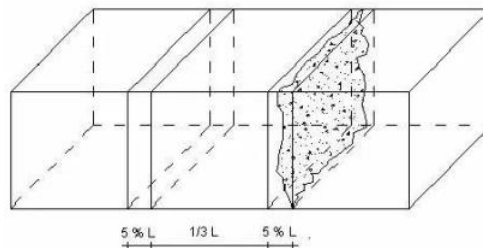
Sumber: SNI 4431:2011

Gambar 1. Patah pada 1/3 bentang tengah

Apabila garis patah terjadi pada daerah tengah bentang, maka kuat lentur beton dihitung menggunakan persamaan:

$$R = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$

2. Patah terjadi di luar daerah tengah bentang (di luar 1/3 bentang tengah) ditunjukkan pada **Gambar 2**



Sumber: SNI 4431:2011

Gambar 2. Patah di luar 1/3 bentang tengah dan garis patah pada <5% dari bentang

Apabila garis patah terjadi di luar daerah tengah, namun jaraknya tidak melebihi 5% dari bentang, maka kuat lentur beton dihitung menggunakan persamaan:

$$R = \frac{3 \times P \times a}{b \times d^2}$$

Dengan:

R = kuat lentur (N/mm^2)

P = beban maksimum total (N)

L = panjang bentang (mm)

b = lebar benda uji (mm)

d = tebal benda uji (mm)

a = jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan terdekat diukur pada bagian tarik specimen.

Apabila garis patah terjadi di luar batas yang ditentukan oleh standar, maka hasil pengujian dianggap tidak sah dan pengujian harus diulang. Ketentuan ini bertujuan untuk memastikan bahwa keruntuhan yang terjadi benar-benar disebabkan oleh momen lentur maksimum pada daerah tarik beton. Metode pembebanan dua titik lebih disukai dibandingkan pembebanan satu titik di tengah bentang karena memberikan kondisi tegangan lentur yang lebih merata pada daerah kritis. Pada pembebanan satu titik, keruntuhan sangat bergantung pada kondisi lokal beton tepat di bawah titik beban, sehingga hasil pengujian cenderung lebih bervariasi. Oleh karena itu, pengujian kuat lentur dengan pembebanan dua titik dianggap lebih representatif dalam menilai kapasitas tarik beton akibat lentur.

Pengujian kuat lentur beton didasarkan pada asumsi perilaku elastis linier, di mana hubungan antara tegangan dan regangan dianggap linier hingga mendekati keruntuhan. Namun, pada kondisi mendekati keruntuhan, distribusi tegangan tarik pada beton tidak lagi linier dan membentuk pola parabola. Akibatnya, nilai kuat lentur yang diperoleh sering kali lebih besar dibandingkan nilai kuat tarik beton yang sebenarnya. Meskipun demikian, kuat lentur tetap digunakan secara luas sebagai parameter praktis dalam evaluasi kinerja beton, terutama untuk keperluan perancangan dan penelitian eksperimental.

1.2.5 Parameter Dampak Lingkungan

Aktivitas pembangunan infrastruktur dan penggunaan material konstruksi dalam skala besar, khususnya beton, berkontribusi signifikan terhadap berbagai permasalahan lingkungan, seperti peningkatan emisi gas rumah kaca, eksploitasi sumber daya alam tak terbarukan, serta penurunan kualitas tanah dan perairan. Dampak-dampak tersebut sering kali tidak terlihat secara langsung, namun dapat menimbulkan konsekuensi jangka panjang terhadap keseimbangan ekosistem dan keberlanjutan lingkungan. Di sisi lain, berbagai upaya untuk mengurangi dampak lingkungan melalui pemanfaatan material alternatif telah banyak dikembangkan. Namun, sebagian penelitian dan praktik di lapangan masih cenderung menilai keberhasilan material tersebut hanya berdasarkan peningkatan atau pemenuhan sifat mekanik beton, tanpa disertai evaluasi dampak lingkungan yang komprehensif. Pendekatan semacam ini berpotensi menimbulkan bias dalam pengambilan keputusan, karena suatu material yang secara teknis unggul belum tentu

memberikan keuntungan dari sudut pandang lingkungan apabila dampak ekologisnya tidak dianalisis secara menyeluruh.

Menurut (Laurin & Dhaliwal, 2017), penilaian dampak lingkungan bertujuan untuk mengonversi data inventori menjadi potensi dampak terhadap lingkungan serta menunjukkan bagaimana dampak tersebut dapat memengaruhi kondisi lingkungan secara keseluruhan. Parameter yang umum untuk menganalisis dampak lingkungan antara lain:

1. *Global Warming Potential* (GWP)
2. *Abiotic Depletion Potential* (ADP)
3. *Acidification Potential* (AP)
4. *Eutrophication Potential* (EP)
5. *Ozone Depletion Potential* (ODP)
6. *Photochemical Ozone Creation Potential* (POCP).

Global Warming Potential (GWP) merupakan salah satu indikator dampak lingkungan yang penting dalam evaluasi sistem energi dan analisis siklus hidup. GWP menggambarkan kemampuan suatu sistem atau emisi gas rumah kaca dalam menjebak panas di atmosfer yang dapat menyebabkan perubahan iklim. Beberapa gas yang berkontribusi terhadap pemanasan global antara lain karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (N_2O). Nilai GWP umumnya dinyatakan dalam $\text{kg CO}_2\text{-eq}$ (Murphy et al., 2013).

Abiotic Depletion Potential (ADP) merupakan parameter yang menilai potensi penipisan sumber daya abiotik atau tidak terbarukan, seperti mineral, bijih logam, dan bahan bakar fosil. Metrik ini memberikan indikasi tentang tekanan yang diberikan oleh aktivitas manusia terhadap cadangan sumber daya alam yang terbatas, yang berkaitan langsung dengan keberlanjutan jangka panjang. Industri ekstraktif dan manufaktur yang intensif sumber daya, seperti pertambangan dan pengolahan material konstruksi, biasanya memiliki nilai ADP yang tinggi. Pengukuran ADP sering dinyatakan dalam satuan setara (misalnya, kg Sb-ekivalen) yang menyatakan tingkat kelangkaan sumber daya yang dikonsumsi, sehingga membantu dalam merancang strategi ekonomi sirkular dan efisiensi material (Fu et al., 2013).

Acidification Potential (AP) merupakan salah satu indikator dampak lingkungan yang digunakan untuk menilai potensi suatu sistem dalam menyebabkan pengasaman lingkungan. Dampak ini terjadi akibat emisi senyawa asam atau zat pembentuk asam ke lingkungan yang dapat menyebabkan penurunan pH pada tanah dan perairan. Proses pengasaman tersebut dapat merusak ekosistem alami seperti organisme perairan dan vegetasi, serta berpotensi merusak bangunan dan infrastruktur. Sumber utama emisi zat penyebab pengasaman berasal dari aktivitas pertanian dan pembakaran bahan bakar fosil. Beberapa senyawa yang berkontribusi terhadap proses ini antara lain sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan amonia (NH_3). Nilai *Acidification Potential* biasanya dinyatakan dalam $\text{kg SO}_2\text{-eq}$ (Murphy et al., 2013).

Eutrophication Potential (EP) merupakan indikator dampak lingkungan yang menunjukkan potensi suatu sistem dalam menyebabkan eutrofikasi pada ekosistem

perairan maupun tanah. Eutrofikasi terjadi akibat peningkatan konsentrasi nutrisi yang berlebihan sehingga memicu pertumbuhan biomassa, seperti alga dan tanaman air, secara tidak terkendali. Kondisi ini dapat mengganggu keseimbangan ekosistem karena menurunkan kualitas air serta menghambat kehidupan organisme lain di dalamnya. Senyawa yang berkontribusi terhadap proses eutrofikasi antara lain fosfat, nitrat, amonia, dan oksida nitrogen. Besarnya Eutrophication Potential umumnya dinyatakan dalam $\text{kg PO}_4\text{-eq}$ (Murphy et al., 2013).

Ozone Depletion Potential (ODP) menggambarkan kemampuan relatif suatu senyawa kimia untuk mengurai molekul ozon (O_3) di stratosfer dibandingkan dengan zat referensi seperti CFC-11. Lapisan ozon ini berfungsi sebagai perisai pelindung bumi dari radiasi *ultraviolet-B* (UV-B) yang berbahaya. Senyawa-senyawa seperti klorofluorokarbon (CFC) dan halon, yang dahulu banyak digunakan sebagai refrigerant dan blowing agent, memiliki nilai ODP yang tinggi karena melepaskan atom klorin atau bromin yang dapat memicu reaksi berantai perusakan ozon. Pengaturan global melalui Protokol Montreal telah berhasil membatasi produksi zat-zat perusak ozon, sehingga ODP menjadi contoh sukses regulasi lingkungan berbasis sains, meskipun dalam konteks industri konstruksi kontribusinya umumnya tidak signifikan (Tsai, 2017).

Photochemical Ozone Creation Potential (POCP) merupakan indikator yang mengevaluasi kontribusi suatu senyawa (biasanya Senyawa Organik Volatil/VOCs dan nitrogen oksida) dalam pembentukan ozon troposferik (ozon permukaan tanah) melalui reaksi fotokimia. Ozon di lapisan dekat permukaan ini merupakan komponen utama kabut asap (smog) dan polutan sekunder yang berbahaya. Paparan ozon tingkat tinggi dapat mengakibatkan gangguan pernapasan, iritasi mata, dan kerusakan vegetasi. Emisi dari kendaraan bermotor, pelarut industri, dan proses pembakaran tidak sempurna adalah sumber utama prekursor POCP. Dalam perencanaan pengendalian pencemaran udara, pemahaman terhadap POCP sangat penting untuk memprioritaskan pengurangan emisi senyawa-senyawa yang paling reaktif dalam membentuk *smog* (Hu et al., 2014).

Berdasarkan penelitian (Kim et al., 2016), nilai parameter dampak lingkungan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$E = \sum_{i=1}^n N_i w_i \quad (1)$$

Dengan :

E = nilai total dampak lingkungan

N_i = nilai standar dampak lingkungan untuk kategori ke- i

w_i = bobot kategori ke- i (kg/m^3)

n = jumlah kategori dampak lingkungan yang dianalisis

Inventarisasi parameter lingkungan GWP, ADP, AP, EP, ODP dan POCP dilakukan dengan mengkaji literatur saintifik yang terpercaya. **Tabel 4**

memperlihatkan nilai-nilai GWP, ADP, AP, EP, ODP dan POCP untuk material OPC, pasir, air, batu pecah, dan abu terbang yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari literatur.

Tabel 4. Data dampak lingkungan dari produksi bahan beton

Sumber	Material	GWP	ADP	AP	EP	ODP	POCP
		(kgCO ₂ eq)	(kgSbeq)	(kgSO ₂ eq)	(kgPO ₄ eq)	(CFC ₁₁ eq)	(kg C ₂ H ₄ eq)
(Park et al., 2020)	OPC	9.50E-01	2.70E-03	1.28E-03	1.34E-04	1.70E-08	2.43E-03
(Roh et al., 2020)	Air	1.02E-04	1.76E-06	1.95E-07	3.34E-08	2.78E-15	1.64E-09
(Kurda et al., 2018)	Abu Terbang	8.77E-03	3.37E-04	5.53E-05	8.23E-06	5.58E-09	3.22E-06
(Roh et al., 2020)	Batu Pecah	6.46E-03	1.04E-05	1.13E-05	2.10E-06	1.75E-11	2.25E-07
(Xing et al., 2023)	Pasir	4.00E-03	7.61E-09	5.47E-06	1.54E-06	2.19E-10	3.57E-07

1.2.6 Environmental Performance

Environmental performance pada beton merupakan indikator yang digunakan untuk mengevaluasi keberlanjutan material dengan mempertimbangkan hubungan antara kinerja mekanik dan dampak lingkungan yang dihasilkan selama proses produksinya. Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan penilaian simultan dengan mengaitkan aspek mekanik dan lingkungan, seperti kajian yang menghubungkan kuat tekan beton dengan emisi CO₂ oleh (Julmile et al., 2023) dan (Rajendiran et al., 2025). Sejalan dengan pendekatan tersebut, penelitian ini mengembangkan penilaian kelayakan yang mengintegrasikan parameter kuat lentur beton dengan parameter dampak lingkungan yang dirumuskan dalam persamaan berikut.

$$EP_{i-fr} = \frac{f_r}{total\ i_{mix}} \quad (2)$$

Dengan:

P_{i-fr} = rasio kinerja lingkungan terhadap kuat lentur untuk parameter dampak lingkungan ke-i (MPa per unit dampak lingkungan)

$total\ i_{mix}$ = total nilai dampak lingkungan parameter ke-i yang dihasilkan dari mix design beton yang digunakan (misalnya GWP, ADP, AP, dsb.)

f_r = kuat lentur beton (MPa).

Nilai EP_{i-fr} menunjukkan tingkat efisiensi lingkungan suatu campuran beton. Nilai yang lebih tinggi menunjukkan bahwa beton mampu menghasilkan kekuatan yang lebih besar dengan emisi karbon yang lebih rendah sehingga memiliki kinerja lingkungan yang lebih baik. Sebaliknya, nilai yang lebih rendah menunjukkan bahwa

emisi karbon yang dihasilkan relatif lebih besar dibandingkan dengan kekuatan beton yang diperoleh.

1.3 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen telah banyak dilakukan dengan fokus pada peningkatan sifat mekanik beton. Penelitian Mohamad et al. (2024) melakukan penelitian mengenai kombinasi beton *Roller Compacted Concrete* (RCC) dengan substitusi *fly ash* sebagai pengganti agregat halus. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kadar *fly ash* terhadap *workability*, kuat tekan, kuat lentur, dan kuat tarik belah beton RCC. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental dengan variasi kadar *fly ash* sebesar 0%, 55%, 65%, dan 75% sebagai pengganti agregat halus, kemudian dilakukan pengujian slump, kuat tekan (kubus $100 \times 100 \times 100$ mm), kuat lentur, dan kuat tarik belah pada umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh campuran dengan *fly ash* mengalami slump nol, berbeda dengan campuran kontrol yang masih menunjukkan kemerosotan nyata. Kuat tekan tertinggi diperoleh pada kadar 65% *fly ash* sebesar 49,84 MPa pada umur 28 hari, sedangkan kuat lentur tertinggi dicapai pada kadar 75% sebesar 5,45 MPa. Namun, kuat tarik belah tertinggi sebesar 8,84 MPa justru diperoleh pada beton tanpa *fly ash*. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai pengganti agregat halus dapat meningkatkan kuat tekan dan lentur RCC, tetapi kadar berlebih dapat menurunkan kuat tarik belah sehingga diperlukan komposisi optimum dalam desain campuran.

Kanta Rao & Ch. (2022) melakukan penelitian untuk mengevaluasi sifat kekuatan beton yang menggunakan *fly ash* Kelas F sebagai pengganti sebagian semen. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh variasi kadar *fly ash* dan rasio air terhadap pengikat (W/B) terhadap kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton pada berbagai umur perawatan. Metode yang digunakan meliputi pembuatan spesimen dengan kadar *fly ash* 0% hingga 60%, rasio W/B 0,4 dan 0,5, serta kandungan semen 350 kg/m^3 dan 450 kg/m^3 . Pengujian dilakukan pada umur 7, 28, 56, 90, dan 180 hari, sedangkan kuat tarik belah dan kuat lentur diuji sesuai standar India (IS 5816 dan IS 516:1959). Hasil menunjukkan bahwa penggantian 30% *fly ash* dengan kandungan semen 450 kg/m^3 dan rasio W/B 0,4 menghasilkan kinerja optimal, dengan kuat tekan maksimum 83,5 MPa, kuat tarik belah 4,9 MPa, dan kuat lentur 6,6 MPa pada umur 180 hari. Peningkatan kekuatan dibanding beton konvensional mencapai 13% untuk kuat tekan dan lentur serta 9% untuk kuat tarik belah. Disimpulkan bahwa kadar 30% *fly ash* merupakan komposisi optimum untuk meningkatkan kekuatan jangka panjang beton melalui reaksi pozolanik yang lebih efektif.

Babalu et al. (2023) meneliti kuat tekan, kuat lentur, dan durabilitas beton *fly ash* volume tinggi (*High-Volume Fly ash Concrete/HVFAC*) sebagai alternatif beton berkelanjutan. Tujuan penelitian adalah mengkaji pengaruh kadar *fly ash* 0–70% terhadap sifat mekanik dan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif. Metode penelitian dilakukan dengan membuat enam variasi campuran dan melakukan

pengujian kuat tekan (kubus 150 mm), kuat lentur (balok 150 × 150 × 700 mm), penyerapan air, ketahanan abrasi, ketahanan benturan, dan ketahanan asam hingga umur 90 hari. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan *fly ash* di atas 30% menyebabkan penurunan kuat tekan dan lentur. Pada umur 90 hari, penurunan kuat tekan masing-masing sebesar 1,17% (40%), 3,50% (50%), 8,13% (60%), dan 23,46% (70%), sedangkan penurunan kuat lentur sebesar 2,47%, 4,50%, 11,93%, dan 18,01%. Campuran dengan 30% *fly ash* (M303) menunjukkan kuat tekan tertinggi sebesar 46 MPa serta performa durabilitas terbaik, termasuk kehilangan abrasi minimum sebesar 0,223%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kadar 30% *fly ash* memberikan keseimbangan optimum antara kekuatan dan ketahanan, sementara kadar yang sangat tinggi meningkatkan ketahanan asam tetapi menurunkan kapasitas mekanis.

Ndihokubwayo (2011) melakukan penelitian mengenai kuat tekan dan kuat lentur beton dengan volume *fly ash* yang cukup besar untuk meninjau manfaat struktural, ekonomi, dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi ketahanan beban tekan dan lentur pada beton dengan kadar *fly ash* 30%, 40%, dan 50%. Metode yang digunakan adalah pengujian eksperimental terhadap 144 spesimen, terdiri atas 72 kubus (150 mm) untuk uji tekan dan 72 balok (100 × 100 × 400 mm) untuk uji lentur, dengan variasi rasio air-semen 0,39 dan 0,46. Hasil menunjukkan bahwa pada umur 28 hari beton dengan 30% *fly ash* mencapai kuat tekan 30,9 MPa dan kuat lentur 5,1 MPa; pada 40% masing-masing 29,7 MPa dan 4,0 MPa; sedangkan pada 50% menurun menjadi 26,2 MPa dan 3,9 MPa. Penggunaan *superplasticizer* terbukti meningkatkan kekuatan beton secara signifikan. Disimpulkan bahwa kadar 30–40% *fly ash* masih layak digunakan untuk struktur dengan beban sedang serta memberikan manfaat ekonomi dan pengurangan emisi CO₂ akibat berkurangnya penggunaan semen.

Kumar et al. (2025) meneliti pengaruh gabungan kadar *fly ash* dan ukuran agregat kasar terhadap kuat lentur balok beton bertulang. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kombinasi optimum antara proporsi *fly ash* dan ukuran agregat guna meningkatkan kapasitas lentur dan mengurangi defleksi. Metode penelitian dilakukan dengan menyiapkan 12 variasi campuran dengan kadar *fly ash* 0%, 5%, 10%, dan 15% serta ukuran agregat 6,25 mm, 12,5 mm, dan 20 mm, menggunakan rasio air-semen 0,48 dan perawatan selama 28 hari. Pengujian kuat lentur dilakukan sesuai ASTM C78. Hasil menunjukkan bahwa kombinasi 5% *fly ash* dan agregat 12,5 mm menghasilkan performa terbaik dengan peningkatan beban ultimit sebesar 56,48% dibanding beton nominal serta kepadatan tertinggi sebesar 2813,33 kg/m³. Namun peningkatan kadar *fly ash* menjadi 10% hanya meningkatkan beban sebesar 36,24%, dan pada 15% terjadi penurunan 12,14% dibandingkan campuran 5%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan *fly ash* dalam jumlah kecil dengan ukuran agregat yang tepat dapat secara signifikan meningkatkan kuat lentur beton bertulang, namun peningkatan kadar *fly ash* yang berlebihan dapat menurunkan performa struktural.

Kim et al. (2016) melakukan penelitian mengenai evaluasi dampak lingkungan beton menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan

tujuan menganalisis pengaruh kuat tekan, rasio campuran, penggunaan agregat daur ulang, dan jumlah bahan pengikat terhadap berbagai kategori dampak lingkungan. Metode penelitian menggunakan batas sistem *cradle-to-gate* yang mencakup tahap bahan baku, transportasi, dan manufaktur, dengan basis data 1000 desain campuran beton yang dianalisis berdasarkan metodologi indikator lingkungan Korea. Parameter yang dikaji meliputi *Global Warming Potential* (GWP), *Acidification Potential* (AP), *Eutrophication Potential* (EP), *Ozone Depletion Potential* (ODP), *Photochemical Ozone Creation Potential* (POCP), dan *Abiotic Depletion Potential* (ADP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kuat tekan beton meningkatkan nilai GWP, POCP, dan ADP, sedangkan AP dan EP sedikit menurun. Beton berkekuatan tinggi (60 MPa) memiliki GWP dan POCP sekitar 13% lebih rendah per satuan kuat tekan dibanding beton normal (24 MPa), serta AP, EP, ODP, dan ADP 10–25% lebih rendah per satuan kuat tekan. Peningkatan rasio substitusi bahan campuran seperti *fly ash* secara umum menurunkan GWP, AP, ODP, ADP, dan POCP, meskipun sedikit meningkatkan EP. Disimpulkan bahwa semen merupakan kontributor terbesar terhadap GWP, POCP, dan ADP, sehingga pengurangan kandungan semen melalui substitusi abu terbang efektif dalam menekan dampak lingkungan beton.

Park et al. (2019) meneliti dampak lingkungan produksi agregat daur ulang menggunakan metode LCA berdasarkan standar ISO 14044 dengan tujuan membandingkan metode produksi kering dan basah serta membandingkannya dengan agregat alami dan agregat buatan. Unit fungsional yang digunakan adalah 1 kg agregat dengan batas sistem *cradle-to-gate*. Parameter yang dianalisis meliputi GWP, AP, EP, ODP, POCP, dan ADP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produksi agregat daur ulang metode basah menghasilkan dampak lingkungan 16% (EP) hingga 40% (AP) lebih tinggi dibanding metode kering akibat konsumsi energi penghancuran yang lebih besar. Secara umum, agregat daur ulang memiliki GWP hingga dua kali lebih tinggi dibanding agregat alami, namun nilai ADP agregat alami sekitar 20 kali lebih besar dibanding agregat daur ulang karena eksploitasi sumber daya alam. Disimpulkan bahwa penggunaan agregat daur ulang dapat secara signifikan mengurangi potensi penipisan sumber daya (ADP), meskipun perlu optimalisasi energi produksi untuk menekan GWP.

Isaia & Gastaldini (2004) melakukan studi mengenai penggunaan kandungan tinggi bahan tambahan mineral (*fly ash* dan *slag*) sebagai pengganti semen Portland dalam beton struktural dengan tujuan mengevaluasi manfaat teknis, ekonomi, dan lingkungan. Metode penelitian berupa studi kasus dengan campuran biner dan terner yang menggantikan semen hingga 90% (70% *slag* dan 20% *fly ash*), dirancang untuk mencapai kuat tekan 40 MPa. Evaluasi meliputi analisis biaya material, konsumsi energi, emisi CO₂, serta uji daya tahan seperti karbonasi dan penetrasi klorida (ASTM C1202). Hasil menunjukkan bahwa campuran 90% bahan tambahan mineral menurunkan biaya sebesar 5%, konsumsi energi 58%, dan emisi CO₂ hingga 81%, serta meningkatkan indeks daya tahan rata-rata sebesar 34% dibanding beton konvensional. Disimpulkan bahwa peningkatan kadar substitusi semen secara signifikan berbanding lurus dengan penurunan konsumsi energi dan emisi karbon, sehingga sangat relevan dalam upaya konstruksi berkelanjutan.

1.4 Desain Konseptual

Desain konseptual penelitian ini disusun untuk menggambarkan alur pemikiran dan pendekatan penelitian dalam mengkaji pengaruh penggunaan abu terbang sebagai bahan substitusi sebagian semen terhadap kuat lentur beton serta dampak lingkungan yang dihasilkan. Penelitian ini berangkat dari permasalahan tingginya dampak lingkungan akibat penggunaan semen Portland dalam produksi beton, yang kemudian diarahkan pada pemanfaatan abu terbang sebagai material alternatif yang berpotensi meningkatkan keberlanjutan tanpa mengurangi kinerja mekanis beton.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi kadar abu terbang sebagai substitusi sebagian semen Portland Komposit (PCC), yaitu sebesar 0%, 15%, 30%, dan 45%. Variasi tersebut diterapkan pada campuran beton dengan komposisi agregat dan air yang dikendalikan agar pengaruh yang diamati berasal dari perubahan kadar abu terbang. Variabel terikat meliputi kuat lentur beton pada umur 28 hari serta besaran dampak lingkungan yang ditinjau melalui parameter *Global Warming Potential* (GWP), *Abiotic Depletion Potential* (ADP), *Acidification Potential* (AP), *Eutrophication Potential* (EP), *Ozone Depletion Potential* (ODP), dan *Photochemical Ozone Creation Potential* (POCP). Dengan pengendalian variabel lain, hubungan antara variasi kadar abu terbang dan respons beton dapat dianalisis secara sistematis. Secara konseptual, tahapan penelitian dimulai dari perancangan campuran beton dengan variasi kadar abu terbang sesuai dengan rencana penelitian. Selanjutnya dilakukan pembuatan benda uji berupa balok beton berukuran 400 × 100 × 100 mm, yang kemudian dirawat hingga mencapai umur pengujian 28 hari. Setelah proses perawatan, pengujian kuat lentur beton dilakukan untuk memperoleh data kinerja mekanis yang merepresentasikan kemampuan beton dalam menahan tegangan tarik akibat pembebanan lentur.

Selain pengujian mekanis, penelitian ini juga mencakup analisis dampak lingkungan beton dengan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) berbasis data dan literatur terdahulu. Analisis ini difokuskan pada tahap produksi material penyusun beton, khususnya pengaruh pengurangan penggunaan semen akibat substitusi abu terbang terhadap nilai GWP, ADP, AP, EP, ODP dan POCP. Data dampak lingkungan per satuan massa material digunakan untuk menghitung dan membandingkan dampak lingkungan dari setiap variasi campuran beton yang diteliti. Hasil akhir dari desain konseptual ini adalah keterkaitan yang jelas antara variasi kadar abu terbang, kinerja kuat lentur beton, dan dampak lingkungan yang dihasilkan.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Laboratorium ini dipilih karena memiliki fasilitas dan peralatan yang memadai untuk pembuatan benda uji beton, perawatan (*curing*), serta pengujian kuat lentur beton.

Waktu penelitian dilaksanakan selama tiga bulan. Rentang waktu tersebut mencakup tahap persiapan material, pembuatan benda uji, perawatan beton, pengujian kuat lentur, serta pengolahan dan analisis data. Pengujian kuat lentur beton dilakukan pada usia beton 28 hari, yang merupakan umur standar beton untuk mengevaluasi sifat mekanik dan kinerjanya.

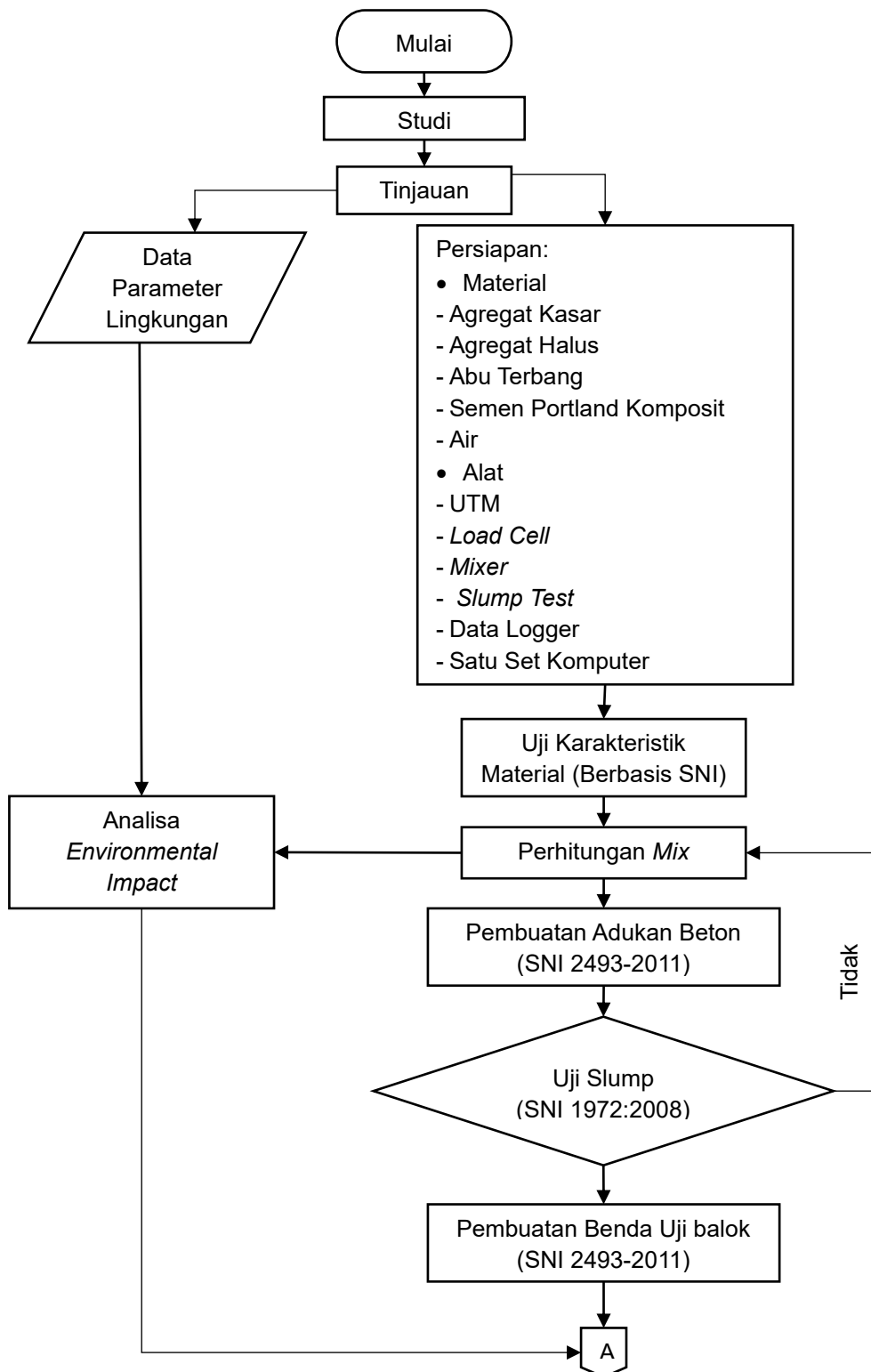
2.2 Jenis dan Sumber Penelitian

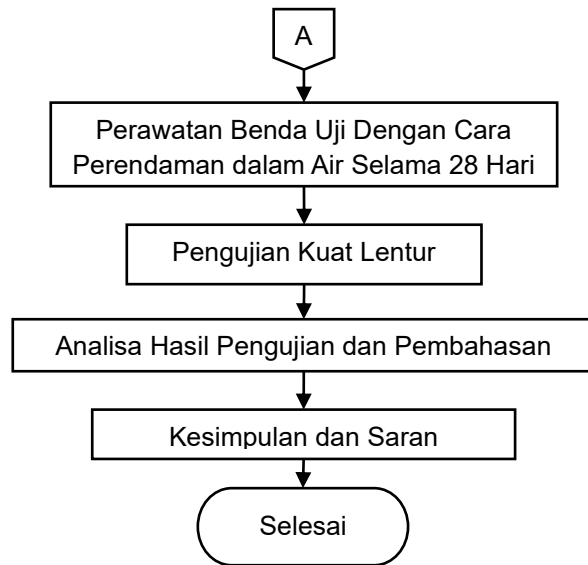
Berdasarkan pendekatannya, penelitian ini termasuk dalam penelitian eksperimental (*experimental research*). Penelitian eksperimental dilakukan dengan cara membuat benda uji beton di laboratorium dengan variasi penggunaan abu terbang sebagai bahan pengganti sebagian semen, kemudian dilakukan pengujian kuat lentur serta analisis dampak lingkungan beton yang dihasilkan.

Sumber data dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer, yaitu data yang diperoleh secara langsung dari hasil pengujian laboratorium. Data primer meliputi data hasil pengujian kuat lentur beton pada umur 28 hari serta data kuantitas material penyusun beton (semen, agregat, air, dan abu terbang) berdasarkan *mix design* yang digunakan. Sementara data sekunder yaitu data pendukung yang diperoleh dari literatur, standar, dan referensi ilmiah. Data sekunder meliputi faktor dampak lingkungan (seperti *Global Warming Potential*, *Acidification Potential*, dan parameter lingkungan lainnya), standar pengujian beton, serta hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan penggunaan abu terbang pada beton.

2.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini dilaksanakan secara sistematis untuk mencapai tujuan penelitian. Penelitian diawali dengan studi literatur, dilanjutkan dengan persiapan material dan peralatan, perencanaan campuran beton (*mix design*) dengan variasi penggunaan abu terbang, serta pembuatan dan perawatan benda uji hingga umur 28 hari. Selanjutnya dilakukan pengujian kuat lentur beton dan analisis dampak lingkungan berdasarkan komposisi material dan faktor dampak lingkungan, yang hasilnya digunakan sebagai dasar analisis dan penarikan kesimpulan penelitian.





Gambar 3. Bagan alir penelitian

2.4 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 4** terdiri dari:

1. UTM (*Universal Testing Machine*) kapasitas 1000 kN
2. *Load Cell* kapasitas 500 kN
3. *Data logger* dan satu set komputer
4. *Stopwatch*
5. Timbangan
6. Mesin pencampur bahan beton (*mixer*)
7. Alat *Slump Test*
8. *Vibrator*
9. Cetakan balok 30 cm x 10 cm x 10 cm



1



2



3



4



5



6



7



8



9

Gambar 4. Alat yang digunakan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 5** yaitu:

1. Abu terbang (FA)
2. Agregat Halus
3. Agregat Kasar, merupakan batu pecah dengan ukuran 10 – 20 mm
4. Semen Portland Komposit (PCC)
5. Air



1



2



3



Gambar 5. Material campuran beton

2.5 Pengujian Karakteristik Agregat

Pengujian karakteristik agregat dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat fisik dan mekanik agregat yang akan digunakan dalam campuran beton. Data dari pengujian ini sangat penting untuk merancang campuran beton yang memenuhi persyaratan kekuatan, keawetan, dan *workability*. Semua pengujian mengacu pada standar nasional (SNI) atau internasional (ASTM, AASHTO) yang berlaku. Dalam penelitian ini, jenis agregat yang akan diuji meliputi agregat kasar dan agregat halus. Rincian pengujian untuk kedua jenis agregat tersebut dapat dilihat pada **Tabel 5** dan **Tabel 6** berikut.

Tabel 5. Standar pengujian karakteristik agregat kasar

No	Karakteristik Agregat	Spesifikasi SNI	Interval
1	Modulus Kehalusan	SNI 03-1968-1990	5,5 – 8,5
2	Kadar Air	SNI 1971:2011	0,5% – 2,0%
3	Berat Volume Padat	SNI 03-4804-1998	1,6 – 1,9
4	Berat Volume Lepas	SNI 03-4804-1998	1,6 – 1,9
5	Penyerapan Air	SNI 1969:2016	Maks 4%
6	Berat jenis SSD	SNI 1969:2016	1,6 – 3,2
7	Berat jenis semu	SNI 1969:2016	1,6 – 3,2
8	Berat jenis kering	SNI 1969:2016	1,6 – 3,2
9	Kadar Lumpur	SNI 03-4141-1996	Maks 1%
10	Keausan	SNI 2417:2008	Maks 40%

Tabel 6. Standar pengujian karakteristik agregat halus

No	Karakteristik Agregat	Spesifikasi SNI	Interval
1	Modulus Kehalusan	SNI 03-1968-1990	2,3 – 3,1
2	Kadar Air	SNI 1971:2011	3% – 5%
3	Berat Volume Padat	SNI 03-4804-1998	1,4 – 1,9
4	Berat Volume Lepas	SNI 03-4804-1998	1,4 – 1,9
5	Penyerapan Air	SNI 1970:2016	Max 2%
6	Berat jenis SSD	SNI 1970:2016	1,6 – 3,2
7	Berat jenis semu	SNI 1970:2016	1,6 – 3,2
8	Berat jenis kering	SNI 1970:2016	1,6 – 3,2
9	Kadar Lumpur	SNI 03-4142-1996	Maks 6%
10	Kadar Organik	SNI 2816:2014	< No. 3

2.6 Pengujian Sifat Kimia *Fly ash*

Pengujian kandungan *fly ash* dilakukan untuk mengetahui karakteristik kimia abu terbang yang digunakan sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam campuran beton. Analisis komposisi kimia *fly ash* dilakukan menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF). Pengujian ini menghasilkan data kandungan senyawa oksida utama seperti silikon dioksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), sulfur trioksida (SO_3). Berdasarkan standar ASTM C618, jumlah kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimal sebesar 70% untuk *fly ash* kelas F dan minimal 50% untuk *fly ash* kelas C. Kandungan kimia ini menunjukkan kemampuan *fly ash* sebagai bahan pozolan dalam campuran beton.

2.7 Komposisi Bahan Campuran Beton

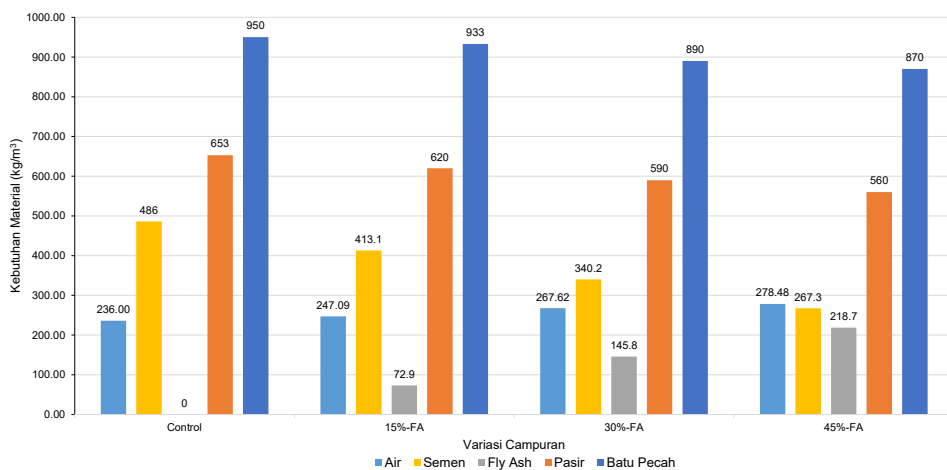
Rasio campuran dirancang berdasarkan metode yang telah ditentukan dalam (Badan Standardisasi Nasional, 2012), dengan mempertimbangkan faktor air-semen yang optimal untuk menghasilkan beton yang kuat dan tahan lama. Hasil *trial mix* untuk komposisi campuran beton dengan tambahan abu terbang sebagai pengganti semen PCC dapat dilihat pada **Tabel 7**, **Tabel 8**, dan **Gambar 6**.

Tabel 7. Komposisi campuran beton

Mix	Air (kg/m ³)			Semen (kg/m ³)	<i>Fly ash</i> (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)	Batu Pecah (kg/m ³)	Volume (kg/m ³)	W/B	Hasil Slump (cm)
	Awal	Tambahan	Total							
Kontrol	236	0	236	486	0	653	950	2325	0,49	7
15%-FA	236	11,09	247,09	413,1	72,9	620	933	2286,09	0,51	9
30%-FA	236	31,62	267,62	340,2	145,8	590	890	2233,62	0,55	11
45%-FA	236	42,48	278,48	267,3	218,7	560	870	2194,48	0,57	11

Tabel 8. Komposisi volume campuran beton per 1 m³

<i>Mix</i>	Air			Semen	<i>Fly ash</i>	Pasir	Batu Pecah	Volume
	Awal	Tambahan	Total					
Kontrol	0,236	0	0.236	0.154	0	0.251	0.358	1,000
15%-FA	0,236	0.011	0.247	0.131	0.031	0.238	0.352	1,000
30%-FA	0,236	0.032	0.268	0.108	0.062	0.227	0.336	1,000
45%-FA	0,236	0.042	0.278	0.085	0.093	0.215	0.328	1,000

**Gambar 6.** Grafik komposisi campuran beton (kg/m³)

2.8 Pembuatan Benda Uji

Benda uji yang akan dibuat meliputi balok dengan ukuran yang sesuai standar (Badan Standardisasi Nasional, 2011) tentang Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji di Laboratorium. Benda uji balok berukuran 400 mm x 100 mm x 10 mm dengan jumlah benda uji ditunjukkan pada **Tabel 8**. Proses pembuatan benda uji harus dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan bahwa tidak ada rongga atau kekurangan campuran, yang dapat mempengaruhi hasil pengujian.

1. Metode pencampuran material beton

- Persiapan material dengan komposisi campuran yang telah ditentukan.
- Memasukkan agregat kasar, semen, abu terbang, dan agregat halus secara berurutan ke dalam *mixer*.
- Menghidupkan mesin untuk memulai proses pencampuran.
- Membiarkan bahan dalam *mixer* tercampur hingga homogen selama 30 detik.

- e. Menambahkan air secara bertahap sambil memperhatikan tingkat *workability* beton.
 - f. Setelah 2 menit, mesin dimatikan dan campuran diaduk manual untuk memastikan tidak ada material yang tertinggal atau tidak tercampur merata.
 - g. Menyalakan kembali *mixer*, menambahkan air tambahan, dan melanjutkan pengadukan selama 1 menit.
 - h. Setelah campuran beton homogen, mesin dimatikan dan dilakukan pemeriksaan awal campuran.
2. Metode pengujian slump
- a. Membasahi kerucut terpancung serta pelat datar sebelum pengujian dilakukan.
 - b. Menempatkan kerucut terpancung pada posisi stabil di atas pelat datar.
 - c. Memasukkan beton segar ke dalam kerucut dalam tiga tahap pengisian, di mana setiap tahap dipadatkan dengan 25 kali tusukan.
 - d. Meratakan bagian atas beton setelah kerucut terisi penuh, kemudian mengangkat cetakan secara perlahan dan tegak lurus.
 - e. Mengukur tinggi penurunan beton menggunakan rol meter atau mistar baja.
3. Pencetakan benda uji
- a. Mengisi adukan beton ke dalam cetakan (yang telah di lapisi oli) secara bertahap dalam beberapa lapisan sesuai tinggi cetakan.
 - b. Memadatkan setiap lapisan beton menggunakan alat pemadat atau batang penusuk untuk menghilangkan rongga udara.
 - c. Meratakan permukaan beton setelah cetakan terisi penuh agar diperoleh permukaan yang halus dan rata.
 - d. Memberi penandaan atau kode pada setiap benda uji untuk memudahkan identifikasi sesuai variasi campuran dan umur pengujian.
 - e. Menyimpan benda uji yang telah dicetak di tempat yang aman dan terlindung dari getaran hingga beton mengeras awal.

Tabel 9. Jumlah benda uji

Variasi	Waktu Pengujian	Dimensi Benda Uji	Jumlah Sampel
Kontrol	28 Hari	400 mm x 100 mm x 100 mm	3
15% FA		400 mm x 100 mm x 100 mm	3
30% FA		400 mm x 100 mm x 100 mm	3
45% FA		400 mm x 100 mm x 100 mm	3

2.9 Perawatan Benda Uji (*Curing*)

Benda uji yang telah dilepas dari cetakan kemudian direndam di dalam bak perendaman berisi air bersih dengan suhu ruang ($27\pm 2^{\circ}\text{C}$) hingga satu hari sebelum pengujian pada umur beton 28 hari. Metode perawatan basah (*wet curing*) ini dilakukan sesuai standar SNI 2493:2011 tentang Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium, untuk memastikan proses hidrasi

berlangsung optimal, terutama pada beton yang mengandung bahan pozolanik seperti *fly ash* yang memerlukan waktu hidrasi lebih lama.

2.10 Pengujian Benda Uji

2.10.1 Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur dilakukan untuk menentukan kemampuan beton dalam menahan tegangan tarik akibat pembebanan lentur hingga mencapai titik keruntuhan, yang menjadi parameter penting dalam mengevaluasi kinerja variasi campuran beton yang diteliti yang diperlihatkan pada **Gambar 7**. Pengujian ini menggunakan benda uji berbentuk balok berukuran 400 mm x 100 mm x 100 mm yang telah melalui proses perawatan (*curing*) hingga mencapai umur 28 hari. Untuk setiap variasi campuran, disiapkan minimal tiga balok uji guna memperoleh hasil yang representatif, dimana nilai akhir yang digunakan adalah rata-rata dari ketiganya. Pelaksanaan pengujian mengacu pada standar SNI 4431:2011 dengan menggunakan Mesin Uji Universal (*Universal Testing Machine*) berkapasitas 1000 kN, dimana beban yang bekerja divalidasi oleh sebuah *load cell* berkapasitas 500 kN. Prosedurnya dimulai dengan mengukur dimensi aktual penampang balok, kemudian balok diletakkan di atas dua tumpuan dengan jarak antar tumpuan (bentang) sebesar 20 cm. Beban diberikan secara bertahap dan terkontrol pada titik tengah bentang (sistem *center-point loading*) dengan laju tertentu hingga benda uji retak dan runtuh. Seluruh proses dan perhitungan ini mengacu pada standar SNI 4431:2011 dan ASTM C78, sehingga hasil yang diperoleh berupa nilai kuat lentur (dalam MPa).



Gambar 7. Pengujian kuat lentur beton

2.10.2 Environment Performance dari Beton

Kinerja lingkungan dari beton, khususnya dalam konteks substitusi semen dengan *fly ash*, memerlukan analisis mendalam terhadap dampak ekologi dari penggunaan material ini. Penelitian ini berfokus pada penilaian dampak lingkungan yang melibatkan parameter seperti *Global Warming Potential* (GWP), *Abiotic Depletion Potential* (ADP), *Acidification Potential* (AP), *Eutrophication Potential* (EP), *Ozone Depletion Potential* (ODP), dan *Photochemical Ozone Creation Potential* (POCP). Setelah diperoleh nilai untuk setiap parameter dampak lingkungan dari berbagai komposisi beton dengan variasi persentase substitusi semen oleh *fly ash*, analisis dilanjutkan dengan membandingkannya secara komparatif dengan perkembangan kuat lentur yang dihasilkan.

Penilaian performa lingkungan (*environmental performance*) dari beton yang mengandung *fly ash* dalam penelitian ini dilakukan untuk mengukur dan membandingkan dampak ekologis dari berbagai tingkat substitusi semen. Dalam penelitian ini menyediakan beberapa faktor simultan yang mencakup kuat lentur dengan parameter lingkungan (GWP, ADP, AP, dan EP) seperti pada persamaan 3 - 8.

$$EP_{GWP-fr} = \frac{f_r}{GWP_{mix}} \quad (3)$$

$$EP_{ADP-fr} = \frac{f_r}{ADP_{mix}} \quad (4)$$

$$EP_{AP-fr} = \frac{f_r}{AP_{mix}} \quad (5)$$

$$EP_{EP-fr} = \frac{f_r}{EP_{mix}} \quad (6)$$

$$EP_{ODP-fr} = \frac{f_r}{ODP_{mix}} \quad (7)$$

$$EP_{POCP-fr} = \frac{f_r}{POCP_{mix}} \quad (8)$$

Dimana:

EP_{GWP-fr} = total nilai GWP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur (MPa/kgCO₂).

GWP_{mix} = GWP diperoleh dari desain mix yang digunakan (kgCO₂).

EP_{ADP-fr} = total nilai ADP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur (MPa/kgSb).

ADP_{mix} = ADP diperoleh dari desain mix yang digunakan (kgSb).

EP_{AP-fr} = total nilai AP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur (MPa/kgSO₂).

AP_{mix} = AP diperoleh dari desain mix yang digunakan (kgSO_2).

EP_{EP-fr} = total nilai EP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur (MPa/kgPO_4).

EP_{mix} = EP diperoleh dari desain mix yang digunakan (kgPO_4).

EP_{ODP-fr} = total nilai ODP_{mix} yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur (MPa/kgCFC_{11}).

ODP_{mix} = ODP diperoleh dari desain mix yang digunakan (kgP/CFC_{11}).

$EP_{POCP-fr}$ = total nilai $POCP_{mix}$ yang diperoleh dari desain campuran yang digunakan dibagi dengan kuat lentur ($\text{MPa/kgC}_2\text{H}_4$).

$POCP$ = $POCP$ diperoleh dari desain mix yang digunakan (kgC_2H_4).