

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur yang pesat mendorong peningkatan kebutuhan terhadap material konstruksi, terutama beton. Beton konvensional yang menggunakan semen Portland secara penuh memiliki dampak lingkungan signifikan karena proses produksinya menghasilkan emisi karbon yang tinggi (Szcześniak et al., 2025). Industri konstruksi merupakan salah satu sektor yang memberikan kontribusi besar terhadap emisi karbon global. Produksi semen portland sebagai bahan utama beton diketahui menyumbang sekitar 8–10% dari total emisi CO₂ antropogenik dunia (Keintjem et al., 2024). Kondisi ini menjadi tantangan serius, mengingat kebutuhan beton terus meningkat seiring dengan pesatnya pembangunan infrastruktur, terutama di negara berkembang seperti Indonesia.

Pada tingkat nasional, emisi dari industri semen masih cukup tinggi. Studi *life cycle inventory* terbaru menunjukkan bahwa produksi semen dan beton siap-pakai di Indonesia menghasilkan emisi karbon yang signifikan dibandingkan negara maju, sehingga perlu adanya strategi mitigasi yang lebih agresif (Agustiningtyas et al., 2025). Bahkan, penelitian di salah satu perusahaan semen terbesar Indonesia menunjukkan bahwa emisi gas rumah kaca spesifik masih tinggi dan diperlukan penerapan teknologi serta material alternatif untuk mendukung target carbon neutral industri semen nasional (Harijanto et al., 2024). Salah satu pendekatan yang banyak dikaji adalah substitusi sebagian semen dengan material tambahan berbasis pozzolan, seperti *fly ash* dan mikrosilika (*Silica fume*). *Fly ash* merupakan limbah padat hasil pembakaran batubara yang mengandung silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃), yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida untuk membentuk senyawa yang memperkuat beton. Penggunaan *fly ash* terbukti dapat menurunkan emisi sekaligus meningkatkan durabilitas dan kepadatan beton pada jangka panjang (Mubarak et al., 2023).

Kadar *fly ash* sekitar 20% merupakan komposisi optimum karena masih mempertahankan dominasi hidrasi semen sekaligus memberikan efek filler dan reaksi pozzolan maksimum, sehingga menghasilkan kuat tekan umur 28 hari yang paling tinggi. Pada beton dengan kuat tekan rencana (f'_c) 30 MPa diperoleh kuat tekan rata-rata sebesar 33,6 MPa, yang menunjukkan peningkatan kuat tekan sebesar 68% (Ali & Qazwan,

2024). Selain itu, berbagai penelitian lain menunjukkan bahwa penggantian sebagian semen dengan *fly ash* memberikan pengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton, dimana hasil pengujian beton mutu M-25 dengan variasi kadar 0%, 3%, 6%, 9%, dan 12% menunjukkan kuat tekan tertinggi berada pada kisaran 9% hingga 12%. Secara umum, kadar sekitar 10% masih dianggap sebagai komposisi optimum karena mampu menghasilkan kuat tekan maksimum tanpa mengurangi hidrasi awal semen, pada kondisi ini terjadi keseimbangan antara reaksi hidrasi semen dan reaksi pozzolan *fly ash* sehingga terbentuk struktur beton yang lebih rapat dan kuat, serta workability meningkat stabil akibat bentuk partikel *fly ash* yang lebih halus dan bulat dibandingkan semen (Singh Bhati et al., 2017).

Penggunaan material tambahan pada beton bertujuan meningkatkan kinerja mekanis tanpa menambah kadar air campuran. Salah satu pozzolan efektif adalah *silica fume*, dimana substitusi 10% dapat meningkatkan kuat tekan hingga 67 MPa pada umur 28 hari atau naik sekitar 12,8% dibanding beton normal karena partikel sangat halusnya mengisi rongga mikro dan membentuk tambahan gel C-S-H (Amarkhail, 2015). Namun penggunaan material pozzolan cenderung menurunkan workability akibat meningkatnya luas permukaan partikel, sehingga diperlukan *superplasticizer* untuk meningkatkan kelecakan tanpa menaikkan rasio air-semen. Penelitian dengan variasi kadar *superplasticizer* 0–1,5% menunjukkan bahwa penambahan bahan tambah ini meningkatkan *workability* dan kuat tekan beton, dimana beton normal memiliki kuat tekan 16,58 MPa dan mencapai nilai maksimum 35,29 MPa pada kadar 1%, sedangkan pada kadar lebih tinggi kekuatan kembali menurun karena campuran menjadi terlalu cair dan mengganggu proses ikatan material (Husin, 2022). Hal tersebut menunjukkan adanya kadar optimum sekitar 1% yang mampu mendispersikan partikel pengikat secara efektif sehingga porositas berkurang dan kekuatan meningkat. Dengan demikian kombinasi *silica fume* 10% dan *superplasticizer* 1% berpotensi menghasilkan beton dengan performa mekanis lebih baik dibanding beton normal maupun penggunaan bahan tambah di luar kadar optimum.

Dengan demikian, berdasarkan penelitian sebelumnya, belum banyak penelitian yang mengkombinasikan *fly ash* kadar 0–20% dengan *silica fume* konstan 10% dan *superplasticizer* 1% pada mutu beton 30 MPa. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi *fly ash* terhadap kuat tekan beton hybrid dan menentukan komposisi optimum. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi

pada pengembangan material konstruksi ramah lingkungan, mendukung program dekarbonisasi industri semen nasional, serta menghasilkan beton dengan performa mekanis yang optimal untuk mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh substitusi sebagian semen dengan *fly ash* 0%, 10% dan 20%, *Silica fume* 10%, dan penambahan *Superplasticizer* 1% terhadap kuat tekan beton?
2. Berapa komposisi optimum dari kombinasi *fly ash*, *silica fume*, dan *Superplasticizer* untuk memperoleh kekuatan tekan maksimum?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis pengaruh substitusi sebagian semen dengan *fly ash* sebesar 0%, 10% dan 20%, *silica fume* sebesar 10%, serta penambahan *superplasticizer* sebesar 1% terhadap kuat tekan beton hybrid.
2. Menentukan komposisi optimum kombinasi *fly ash*, *silica fume*, dan *superplasticizer* yang mampu menghasilkan kuat tekan maksimum pada beton hybrid.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mengetahui dan menganalisis pengaruh substitusi sebagian semen dengan *fly ash* 0%, 10%, dan 20%, penggunaan *Silica fume* 10%, serta penambahan *Superplasticizer* 1% terhadap kuat tekan beton.
2. Menentukan komposisi optimum kombinasi *fly ash*, *mikro silika (silica fume)*, dan *Superplasticizer* yang menghasilkan kuat tekan beton maksimum.

1.5 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini lebih terarah, maka ditetapkan beberapa batasan sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya membahas kuat tekan beton sebagai parameter utama untuk menilai kinerja beton hybrid. Sifat mekanis lainnya seperti kuat tarik belah, modulus elastisitas, maupun aspek durabilitas tidak dibahas.
2. Substitusi semen dibatasi pada penggunaan *fly ash* sebesar 0%, 10% dan 20% serta sebesar 10% dari berat semen.
3. Penambahan bahan aditif kimia berupa *superplasticizer* dibatasi sebesar 1% dari berat semen.
4. Metode perencanaan campuran beton mengacu pada standar SNI 7656:2012 – Tata Cara Pemilihan Campuran Beton Normal, Beton Berat, dan Beton Massa.
5. Pengujian kuat tekan dilakukan terhadap benda uji berbentuk silinder berukuran $\varnothing 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ pada umur tertentu sesuai ketentuan SNI.
6. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium, sehingga hasil yang diperoleh hanya berlaku dalam lingkup penelitian ini dan tidak langsung mewakili kondisi lapangan secara keseluruhan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini disusun untuk memberikan gambaran yang jelas dan terstruktur mengenai isi penelitian yang dilakukan. Penulisan tugas akhir ini dibagi ke dalam lima bab dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang penelitian yang menjelaskan alasan dan urgensi dilakukannya penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan penelitian, serta sistematika penulisan sebagai gambaran umum struktur laporan tugas akhir.

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini memuat landasan teori dan kajian pustaka yang relevan dengan penelitian. Pembahasan meliputi pengertian beton, beton hybrid, material penyusun beton, mekanisme reaksi *fly ash* dan *silica fume*, pengujian agregat, perencanaan campuran beton (mix design), serta penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penggunaan *fly ash*, *silica fume*, dan *superplasticizer* pada beton.

BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi jenis dan lokasi penelitian, variabel penelitian, bahan dan alat yang digunakan, tahapan pelaksanaan penelitian, pembuatan dan perawatan benda uji, prosedur pengujian kuat tekan beton, teknik pengumpulan data, serta metode analisis data yang digunakan dalam penelitian.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan hasil pengujian material, hasil perencanaan campuran beton, serta hasil pengujian kuat tekan beton normal dan beton hybrid untuk setiap variasi campuran. Selain itu, pada bab ini juga dilakukan analisis dan pembahasan terhadap hasil pengujian untuk mengetahui pengaruh substitusi sebagian semen dengan *fly ash* dan *silica fume* serta penambahan *superplasticizer* terhadap kuat tekan beton.

BAB V Penutup

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran-saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya dan penerapan hasil penelitian di bidang konstruksi.