

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan ekonomi Indonesia mendorong percepatan pembangunan infrastruktur dan perumahan, yang pada gilirannya meningkatkan permintaan material konstruksi. Kenaikan permintaan ini berkontribusi terhadap tekanan biaya produksi di sektor konstruksi. IHPB Harga Bahan Kontruksi 2026 menunjukkan tren kenaikan harga material konstruksi selama lima tahun terakhir, meskipun dengan variasi tingkat pertumbuhan tiap tahunnya. Pada Desember 2023, IHPB Bahan Bangunan/Konstruksi meningkat 0,54% (*year-on-year*), dibandingkan periode yang sama pada tahun sebelumnya, sedangkan pada Desember 2024, kenaikan tercatat 0,72%. Tren tersebut mencerminkan bahwa peningkatan biaya material berlangsung secara bertahap dan bukan fenomena musiman semata Badan Pusat Statistik (BPS). Secara lebih mutakhir, pada Januari 2026, IHPB Kelompok Bangunan/Konstruksi tercatat mengalami kenaikan 2,90% (*year-on-year*) dibandingkan Januari 2025. Kenaikan tersebut dipengaruhi oleh peningkatan harga beberapa material utama penyusun beton, di antaranya pasir sebesar 3,53%, kerikil sebesar 12,65%, dan batu pecahan sebesar 6,81%, yang merupakan komponen dominan dalam campuran beton.

Di antara komponen penyusun beton, agregat halus berupa pasir lebih sering dipilih sebagai objek substitusi dalam campuran beton dibandingkan semen maupun agregat kasar karena perannya yang bersifat “*filler*” (pengisi) dan pengontrol sifat kerja beton, sehingga lebih fleksibel untuk dimodifikasi tanpa mengganggu fungsi utama komponen lain dalam struktur beton. Dalam sistem beton, semen berfungsi sebagai bahan pengikat utama yang mengalami reaksi hidrasi untuk membentuk pasta keras yang menentukan kekuatan utama beton. Oleh karena itu, substitusi sebagian semen dengan material lain memiliki risiko yang lebih tinggi terhadap penurunan kualitas ikatan dan kekuatan awal beton apabila tidak memiliki sifat pozzolanik yang baik (Ke dkk., 2016).

Sebaliknya, agregat kasar berfungsi sebagai kerangka utama (*load-bearing skeleton*) yang menahan beban tekan dan memberikan stabilitas struktural beton. Perubahan pada agregat kasar akan sangat memengaruhi distribusi tegangan dan mekanisme keruntuhan beton. Ghabezloo dkk. (2016) menunjukkan bahwa ukuran dan volume agregat kasar berpengaruh signifikan terhadap retak mikro dan peningkatan permeabilitas beton, yang berarti perubahan pada agregat kasar dapat berdampak besar terhadap durabilitas struktur. Karena perannya yang dominan sebagai elemen struktural utama, agregat kasar umumnya tidak mudah disubstitusi kecuali dengan material yang memiliki kekuatan dan bentuk yang sangat setara. Selain itu, secara teknis, ukuran butir agregat halus yang relatif seragam dengan banyak material limbah menjadikannya lebih kompatibel untuk substitusi dibandingkan semen yang bersifat reaktif kimia atau agregat kasar yang bersifat struktural (Kencanawati dkk., 2023). Oleh karena itu, fokus substitusi pada agregat halus dinilai lebih aman secara mekanis, lebih ekonomis, dan lebih berkelanjutan dalam pengembangan material beton modern.

Kondisi tersebut mendorong perlunya upaya untuk menekan biaya konstruksi tanpa mengurangi kinerja material bangunan. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah pemanfaatan limbah sebagai material alternatif. Meskipun berbagai material limbah telah banyak diteliti sebagai bahan alternatif dalam campuran beton, tidak semua material memiliki fungsi yang sama dalam sistem beton, sehingga pemilihan jenis substitusi harus mempertimbangkan kesesuaian peran material tersebut. Misalnya, limbah kaca dan cangkang telur umumnya bersifat *inert* dan lebih berfungsi sebagai *filler* atau bahkan berpotensi meningkatkan kerapuhan apabila tidak diolah dengan baik, sehingga pemanfaatannya pada beton masih memiliki keterbatasan terutama terkait kestabilan sifat mekanik jangka panjang (Muharram & Walujodjati, 2022).

Selain itu, limbah industri pembakaran batubara juga menjadi perhatian dalam pengembangan beton berkelanjutan, khususnya *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan dari pembangkit listrik tenaga uap. *Fly ash* merupakan abu halus yang terbawa gas buang dan bersifat pozzolanik, sehingga lebih umum dimanfaatkan sebagai substitusi sebagian semen. Namun, penggunaannya berpengaruh langsung terhadap reaksi hidrasi dan perkembangan kuat tekan awal beton. Penelitian Sofian

dkk. (2019), menunjukkan bahwa substitusi semen dengan *fly ash* dapat meningkatkan ketahanan terhadap lingkungan agresif, tetapi menurunkan kuat tekan pada umur awal dan memerlukan pengendalian desain campuran yang lebih kompleks. Namun, luasnya penelitian dan penerapan *fly ash* menyebabkan ruang pengembangan (*research gap*) menjadi semakin terbatas, karena karakteristik, mekanisme reaksi, serta pengaruhnya terhadap sifat mekanik beton telah relatif mapan dan dapat diprediksi, sehingga urgensi penelitian lanjutan terhadap *fly ash* menjadi lebih kecil, khususnya dalam konteks eksplorasi permasalahan material.

Berbeda dengan *fly ash*, *bottom ash* memiliki karakteristik fisik yang lebih kompleks, terutama porositas dan daya serap air yang relatif tinggi, sehingga pemanfaatannya dalam beton masih menghadapi berbagai tantangan teknis. Sifat tersebut berpotensi memengaruhi *workability*, homogenitas campuran, serta kerapatan mikrostruktur beton apabila tidak dikendalikan dengan baik.

Berbeda dengan *fly ash* yang berupa abu halus dan terbawa bersama gas buang pada proses pembakaran batubara, *bottom ash* merupakan limbah padat yang dihasilkan dari sisa pembakaran batubara dan terkumpul di bagian dasar (*bottom*) tungku pembakaran pada pembangkit listrik tenaga uap (Ramesh dkk., 2021). Penggunaan material limbah sebagai bahan alternatif diharapkan mampu menekan ketergantungan terhadap sumber daya konvensional sekaligus mendukung prinsip pembangunan yang berkelanjutan. Dalam hal ini, *bottom ash* yang berasal dari sisa proses pembakaran batubara mulai dimanfaatkan sebagai salah satu bahan campuran beton (Dewi & Prasetyo, 2021).

Bottom ash memiliki ukuran partikel yang lebih kasar dan mendekati gradasi pasir, sehingga secara fungsi lebih sesuai digunakan sebagai substitusi parsial agregat halus. Secara fisik, Muhardi (2016) menjelaskan *bottom ash* memiliki ukuran partikel yang lebih kasar, bentuk tidak beraturan, serta tekstur berpori, sehingga karakteristiknya lebih mendekati agregat halus dibandingkan *fly ash* yang bersifat sangat halus dan reaktif secara kimia. Perbedaan posisi pembentukan dan karakteristik fisik tersebut menyebabkan *bottom ash* memiliki peran yang berbeda dalam campuran beton, terutama dari sisi fungsi mekanisnya.

Selain itu, Qomaruddin dkk. (2019) melaporkan bahwa penggunaan *bottom ash* sebagai pengganti sebagian pasir dapat diterapkan hingga kadar tertentu tanpa

penurunan kuat tekan yang signifikan, meskipun diperlukan penyesuaian kadar air akibat sifat porositasnya yang lebih tinggi dibandingkan pasir alami. Hamdani (2024) melaporkan bahwa penggunaan *bottom ash* sebagai substitusi agregat halus menghasilkan nilai serapan air yang masih dapat dikendalikan pada kadar rendah, sedangkan peningkatan kadar hingga 30% mulai menunjukkan peningkatan serapan air yang signifikan akibat sifat porositas material. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Putri dkk. (2019) menunjukkan kuat tekan optimum terdapat pada campuran 20% sebesar $71,34 \text{ kg/cm}^2$ dan mengalami penurunan pada campuran 30% sebesar $52,13 \text{ kg/cm}^2$, karena meningkatnya kadar *bottom ash* tanpa pengendalian sifat fisisnya dapat menyebabkan penurunan kuat tekan beton akibat tingginya daya serap air dan lemahnya ikatan pasta semen dan agregat. Mirajhusnita dkk. (2020) juga menyimpulkan bahwa kadar optimum *bottom ash* sebagai substitusi agregat halus berada pada 10–15%, di mana pada rentang tersebut beton masih menunjukkan kinerja mekanik yang dapat diterima. Pada penelitian Dewi & Prasetyo (2021) menemukan bahwa campuran dengan kadar *bottom ash* persentase 9% memberikan kombinasi kuat tekan yang paling optimal dibandingkan variasi kadar lainnya sebesar 29,21 MPa. Namun juga menegaskan bahwa tanpa penyesuaian kadar air atau perlakuan awal, beton dengan substitusi *bottom ash* cenderung mengalami penurunan performa mekanik pada umur awal akibat ketidakseimbangan rasio air–semen.

Lebih lanjut, penelitian Darwis dkk. (2015) menunjukkan bahwa variasi perlakuan awal pada material berpori, seperti pengeringan dan pemanasan, berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kuat tekan beton. Perlakuan tersebut mampu mengurangi kadar air terserap awal dan memperbaiki homogenitas campuran. Sejalan dengan itu, Dewi & Prasetyo menegaskan bahwa tanpa penyesuaian kadar air atau perlakuan awal, beton dengan substitusi *bottom ash* cenderung mengalami penurunan performa mekanik pada umur awal akibat ketidakseimbangan rasio air–semen. Berdasarkan kondisi tersebut, penerapan perlakuan awal terhadap *bottom ash* menjadi langkah yang penting untuk mengendalikan sifat porositas, daya serap air, serta kebersihan partikel sebelum digunakan sebagai substitusi agregat halus. Dengan adanya *treatment* awal, diharapkan *bottom ash* pada kadar substitusi 10% tidak hanya mampu

mempertahankan kuat tekan beton, tetapi juga menghasilkan campuran beton yang lebih stabil, homogen, dan layak diaplikasikan secara struktural.

Berdasarkan keterkaitan hal di atas, perbedaan kondisi perlakuan awal pada *bottom ash* menjadi aspek penting yang memengaruhi kinerja beton, khususnya terkait kadar air, porositas, dan interaksi antara partikel agregat dengan pasta semen. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan *bottom ash* dalam kondisi alami tanpa perlakuan dapat menurunkan kuat tekan beton dibandingkan beton normal, akibat tingginya porositas dan daya serap air yang mengganggu keseimbangan air semen (Putri dkk., 2019). Untuk mengurangi pengaruh tersebut, berbagai metode perlakuan awal telah dikembangkan, salah satunya pengeringan sederhana dengan metode diangin-anginkan pada suhu ruang yang terbukti mampu meningkatkan kestabilan material dan memperbaiki mutu beton (Hardiana dkk., 2019). Selain itu, perlakuan termal seperti sangrai juga dilaporkan dapat meningkatkan kepadatan material sehingga menghasilkan kuat tekan yang lebih baik dibandingkan kondisi alami (Keulen dkk., 2016). Bahkan, penggunaan oven sebagai metode pengeringan dengan pengendalian suhu yang lebih stabil menunjukkan hasil paling optimal karena mampu menurunkan kadar air secara lebih efektif sehingga menghasilkan kuat tekan beton tertinggi dibanding variasi perlakuan lainnya (Tohir dkk., 2024). Berdasarkan hal tersebut, variasi perlakuan awal *bottom ash* mulai dari kondisi alami, pengeringan udara, sangrai, hingga oven dipilih dalam penelitian ini untuk mengevaluasi pengaruh tingkat pengeringan terhadap peningkatan kinerja beton, khususnya pada kuat tekan dan kestabilan campuran beton.

Berdasarkan keterkaitan antara kenaikan harga material, keterbatasan sumber daya alam, serta permasalahan pengelolaan limbah industri, pemanfaatan *bottom ash* sebagai material pengganti merupakan alternatif yang menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan terhadap agregat konvensional. Kondisi ini mendorong perlunya pemanfaatan material alternatif yang lebih ekonomis dan berkelanjutan, salah satunya melalui pemanfaatan limbah industri berupa *bottom ash* yang memiliki karakteristik fisik menyerupai pasir sehingga berpotensi digunakan sebagai substitusi parsial agregat halus. Namun demikian, penggunaan *bottom ash* masih menghadapi kendala utama berupa sifat fisis yang berpori dan memiliki daya

serap air tinggi, yang dapat memengaruhi kualitas campuran beton apabila tidak dikendalikan dengan baik. Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan upaya peningkatan kualitas material melalui perlakuan awal (*treatment*) seperti kondisi alami, pengeringan udara, sangrai, hingga oven untuk mengurangi kadar air dan memperbaiki karakteristik fisiknya sebelum digunakan dalam campuran beton. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi perlakuan awal *bottom ash* sebagai substitusi parsial agregat halus terhadap kinerja beton yang ditinjau melalui pengujian kuat tekan beton, sehingga diharapkan dapat diperoleh metode perlakuan yang paling optimal dalam menghasilkan beton yang lebih stabil, ekonomis, dan layak diaplikasikan secara struktural.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian permasalahan yang telah dijelaskan pada latar belakang, dapat dirumuskan beberapa permasalahan penelitian sebagai berikut :

1. Penerapan *bottom ash* sebagai pengganti sebagian agregat halus dengan persentase 10% pada beton normal memerlukan kajian lebih lanjut untuk mengetahui apakah penggunaannya dapat dilakukan tanpa mengurangi kuat tekan beton yang dihasilkan.
2. Metode perlakuan awal *bottom ash* sebelum digunakan sebagai substitusi parsial agregat halus pada kadar 10% perlu dikaji untuk mengevaluasi perbedaan kuat tekan beton normal yang dihasilkan serta menentukan kondisi perlakuan awal yang paling optimal dalam menghasilkan beton dengan kuat tekan tinggi yang tetap memenuhi persyaratan beton normal.
3. Mengetahui substitusi agregat halus dengan *bottom ash* diduga berdampak pada biaya material beton, sehingga perlu dilakukan analisis perbandingan biaya antara beton dengan *bottom ash* dan beton konvensional.

1.3 Maksud dan Tujuan

Berdasarkan perumusan masalah, penelitian ini menganalisis pengaruh *bottom ash* sebagai bahan substitusi parsial agregat halus dalam pembuatan beton normal, dengan meninjau pengaruh metode perlakuan awal *bottom ash* terhadap kinerja beton yang dihasilkan. Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui apakah *bottom ash* dengan kadar substitusi tetap sebesar 10% terhadap agregat halus (pasir) dapat dimanfaatkan dalam pembuatan beton normal tanpa menurunkan kinerja beton.
2. Mengetahui pengaruh metode perlakuan awal *bottom ash* terhadap kuat tekan beton normal serta menentukan metode perlakuan awal yang paling optimal pada kadar substitusi 10%, dengan kondisi perlakuan sebagai berikut:
 - a. *Bottom ash* dalam kondisi alami (BA-A),
 - b. *Bottom ash* dalam keadaan hanya di angin-anginkan dengan udara didalam ruangan (BA-U).
 - c. *Bottom ash* yang dikeringkan dengan cara di sangrai (BA-S),
 - d. *Bottom ash* yang dikeringkan menggunakan oven (BA-O).
3. Menganalisis dampak penggunaan *bottom ash* sebagai substitusi parsial agregat halus terhadap biaya material beton dibandingkan dengan beton normal.

1.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan lebih fokus dan selaras dengan tujuan penelitian, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada beberapa hal tertentu. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini menggunakan *bottom ash* yang bersumber dari PT Pura Barutama, Kabupaten Kudus.
2. Penelitian hanya menggunakan satu tingkat substitusi *bottom ash*, yaitu sebesar 10% dari kebutuhan agregat halus. Oleh sebab itu, analisis yang dilakukan tidak mencakup variasi persentase penggunaan *bottom ash* dalam campuran beton. Variabel utama yang ditinjau dalam penelitian ini adalah metode perlakuan awal *bottom ash*, yang dibatasi pada:
 - a. *Bottom ash* dalam kondisi alami (BA-A),
 - b. *Bottom ash* dalam keadaan hanya di angin-anginkan dengan udara didalam ruangan (BA-U).
 - c. *Bottom ash* yang dikeringkan dengan cara di sangrai (BA-S),
 - d. *Bottom ash* yang dikeringkan menggunakan oven (BA-O).
3. Pengujian sifat beton dalam penelitian ini fokus hanya pada kuat tekan.

4. Umur pengujian beton dibatasi pada 7 dan 28 hari sesuai standar, sehingga tidak membahas perkembangan sifat beton pada umur jangka panjang.
5. Seluruh proses pembuatan benda uji dan pengujian beton dilakukan di laboratorium Teknik Infrastruktur Sipil dan Perancangan Arsitektur Sekolah Vokasi dengan prosedur pengujian yang seragam, sehingga hasil yang diperoleh dapat dibandingkan secara objektif.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan serta penerapannya di bidang konstruksi, yaitu sebagai berikut:

1. Memberikan alternatif pemanfaatan limbah *bottom ash* sebagai substitusi parsial agregat halus pada beton normal guna mengurangi dampak pencemaran lingkungan.
2. Menyediakan informasi awal mengenai potensi penggunaan *bottom ash* dengan perlakuan awal tertentu sebagai alternatif material beton, yang dapat menjadi pertimbangan dalam upaya efisiensi penggunaan material konvensional.
3. Menyusun rekomendasi metode perlakuan awal *bottom ash* yang optimal guna memperoleh beton normal dengan kualitas yang memenuhi persyaratan teknis dan layak diaplikasikan pada pekerjaan konstruksi.