

# JURNAL KONSTRUKSI DAN INFRASTRUKTUR

## Teknik Sipil dan Perencanaan

---

### PENGGUNAAN BATTOM ASH SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT HALUS TERHADAP KUAT TEKAN BETON DENGAN MUTU K-175

Dian Wahyuni<sup>1</sup>, Harsusani<sup>2</sup>, Firmanilah Kamil<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3\*</sup>) Program Studi Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Ketapang, Ketapang.  
Email Penulis Korespondensi : [firmanilahkamil@politap.ac.id](mailto:firmanilahkamil@politap.ac.id)  
Nomor HP Penulis Korespondensi : 082332979897

#### ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the potential of bottom ash as a fine aggregate substitute in K-175 concrete and determine the optimum percentage that produces the best compressive strength. Mining of sand as fine aggregate for concrete has caused environmental damage, so an alternative material that is more environmentally friendly is needed. Bottom ash, a solid waste from coal combustion in PLTU, has physical and chemical characteristics that support its use in concrete mixtures. This study used variations of bottom ash substitution of 5%, 12.5%, and 17.5% of the total weight of fine aggregate. Compressive strength tests were conducted at 7, 14, and 28 days of concrete age. The results showed that 5% bottom ash substitution produced the most optimal concrete compressive strength, equivalent to normal concrete at an estimated age of 28 days at 186.86 kg/cm<sup>2</sup>. Meanwhile, 12.5% and 17.5% substitution showed a significant decrease in compressive strength compared to normal concrete. The physical characteristics of bottom ash, such as higher content weight and coarse texture, contribute positively to mechanical bonding in concrete. However, the high silt content of bottom ash requires further treatment to improve its quality. This research is in line with previous studies supporting the utilization of industrial waste in concrete construction, but provides a new focus on K-175 grade concrete for lightweight construction applications. In conclusion, bottom ash can be used as an alternative fine aggregate in concrete, with an optimal substitution of 5%. The utilization of bottom ash not only supports environmental sustainability, but also offers an innovative solution for industrial waste management in construction.

**Keyword:** *bottom ash, fine aggregate, industrial waste.*

#### 1. PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu bahan konstruksi yang paling banyak digunakan di seluruh dunia karena memiliki kekuatan tinggi, durabilitas, dan kemampuan untuk dibentuk sesuai kebutuhan [1]. Namun, peningkatan kebutuhan beton juga berdampak pada tingginya konsumsi material alami, seperti pasir, yang digunakan sebagai agregat halus [2]. Penambangan pasir secara berlebihan telah menyebabkan berbagai permasalahan lingkungan, termasuk erosi, kerusakan ekosistem, dan penurunan kualitas lingkungan hidup [3]. Oleh karena itu, diperlukan alternatif material yang dapat menggantikan agregat halus tanpa mengurangi kualitas beton.

Bottom ash, yang merupakan limbah padat hasil pembakaran batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai substitusi agregat halus [4]. Material ini memiliki karakteristik fisik seperti berat jenis yang mendekati pasir alami, serta tekstur yang relatif kasar, yang dapat memberikan ikatan mekanis yang baik dalam campuran beton [5]. Selain itu, secara

kimia, bottom ash mengandung senyawa seperti silika dan alumina yang berkontribusi pada sifat pozzolanik, sehingga dapat meningkatkan performa beton [6].

Penggunaan bottom ash juga memberikan manfaat tambahan dalam pengelolaan limbah industri. Limbah ini, yang sebelumnya hanya menjadi bahan buangan, dapat diolah menjadi material konstruksi yang bernilai tambah. Dengan demikian, pemanfaatan bottom ash tidak hanya mengurangi dampak lingkungan akibat penimbunan limbah, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang tidak terbarukan, seperti pasir. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa penggunaan bottom ash dalam beton dapat meningkatkan beberapa sifat mekanis beton, seperti kekuatan tekan, jika digunakan dalam proporsi yang tepat [7]. Namun, masih diperlukan studi lebih lanjut untuk memahami pengaruh substitusi bottom ash terhadap kekuatan tekan beton dengan mutu tertentu, khususnya mutu K-175 yang banyak digunakan untuk konstruksi ringan seperti trotoar, lantai kerja, dan bangunan sederhana.

Kebaruan dari penelitian ini terletak pada fokus pengujian pengaruh substitusi bottom ash terhadap beton mutu K-175, yang akna terlihat dari nilai kuat tekan beton yang belum banyak dieksplorasi dalam penelitian sebelumnya. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik bottom ash jika dimanfaatkan menjadi agregat halus pada beton, serta untuk mengetahui persentase campuran yang menghasilkan kuat tekan beton paling optimal. Selain itu, penelitian ini juga mengintegrasikan pendekatan berkelanjutan dalam pemanfaatan limbah industri dengan spesifikasi teknis beton untuk aplikasi konstruksi ringan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi inovatif dalam pengelolaan limbah industri sekaligus mendukung praktik konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Beton adalah material komposit yang terdiri dari pasta semen, agregat halus, agregat kasar, dan air. Fungsi agregat halus dalam beton adalah untuk mengisi rongga di antara agregat kasar, sehingga menghasilkan campuran yang lebih padat dan mengurangi kebutuhan akan pasta semen. Substitusi agregat halus dengan material alternatif telah menjadi salah satu fokus penelitian untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi [8]. Bottom ash, sebagai produk sampingan dari pembakaran batubara, memiliki potensi untuk digunakan sebagai agregat halus dalam beton. Karakteristik fisik bottom ash, seperti berat jenis yang relatif rendah dan tekstur yang kasar, memberikan keuntungan dalam meningkatkan daya lekat antara pasta semen dan agregat. Studi oleh Ollii, et al menunjukkan bahwa substitusi parsial bottom ash hingga 10,5% dapat meningkatkan workability beton tanpa mengorbankan kekuatan tekan [9].

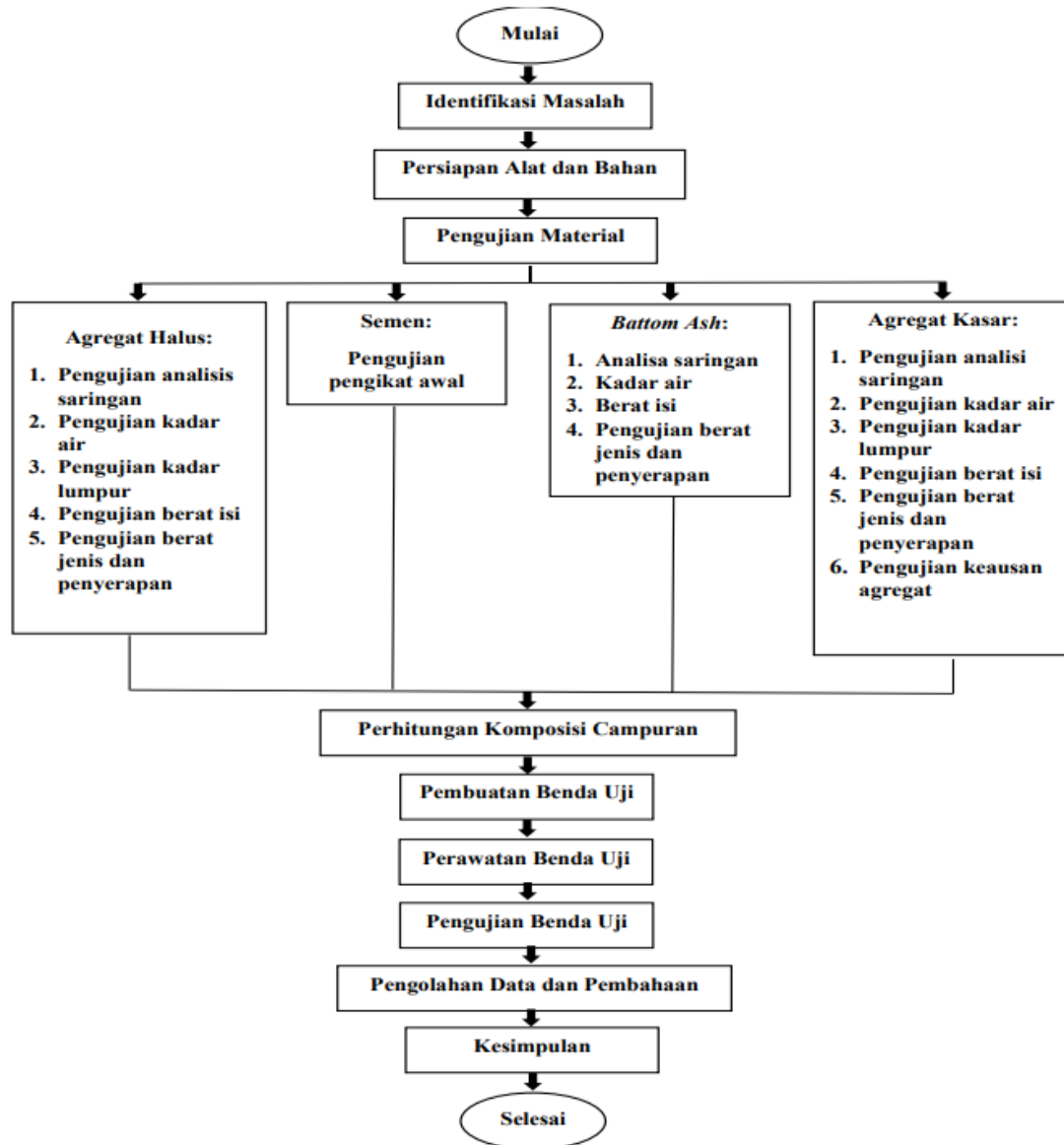
Secara kimia, bottom ash mengandung senyawa-senyawa pozzolanik seperti silika amorf dan alumina, yang berkontribusi dalam reaksi hidrasi sekunder. Reaksi ini dapat meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton dan memberikan sifat mekanis yang lebih baik. Menurut penelitian oleh Jaelani & Abriantoro, penggunaan material pozzolanik dalam beton juga dapat meningkatkan durabilitas terhadap serangan sulfat dan penurunan porositas [10]. Penggunaan bottom ash dalam beton juga memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan. Limbah ini, yang biasanya ditimbun tanpa pemanfaatan lebih lanjut, dapat diolah menjadi material konstruksi yang bernilai ekonomis. Studi oleh Tajunnisa, et al mencatat bahwa pemanfaatan limbah industri seperti bottom ash mampu mengurangi biaya produksi beton, terutama untuk proyek konstruksi skala besar [11].

Namun, ada beberapa tantangan dalam penggunaan bottom ash sebagai agregat halus. Salah satu isu utama adalah kandungan karbon yang tidak terbakar, yang dapat memengaruhi workability dan proses hidrasi semen. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengolahan awal seperti pencucian atau pengayakan untuk memastikan kualitas material sebelum digunakan dalam campuran beton [12].

Dalam konteks beton mutu K-175, yang umumnya digunakan untuk konstruksi ringan, studi mengenai pengaruh substitusi bottom ash terhadap kekuatan tekan masih terbatas. Penelitian ini

mencoba menjawab celah tersebut dengan mengevaluasi karakteristik mekanis beton mutu K-175 menggunakan variasi proporsi bottom ash sebagai agregat halus. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat memperkaya literatur mengenai aplikasi material limbah dalam konstruksi modern.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menguji pengaruh substitusi bottom ash sebagai agregat halus terhadap kuat tekan beton mutu K-175. Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, pengujian material, perhitungan komposisi campuran, pembuatan sampel, pengujian, dan analisis data sesuai dengan bagan alir pada Gambar 1.

Penelitian menggunakan bahan utama berupa semen Portland, agregat kasar (batu pecah), agregat halus (pasir alami dan bottom ash), serta air bersih. Bottom ash diperoleh dari limbah PLTU Kabupaten Ketapang, kemudian diolah melalui proses pencucian dan pengayakan untuk menghilangkan kotoran serta partikel berukuran besar. Semua material ditimbang sesuai proporsi campuran yang telah ditentukan. Perhitungan kebutuhan substitusi bottom ash sebagai agregat halus sebesar 12,5%, 15%, dan 17,5% dari total berat agregat halus, dengan setiap variasi memiliki tiga sampel uji.

Desain campuran beton mengikuti standar SNI untuk mutu K-175. Material kering seperti semen, pasir, dan bottom ash dicampur terlebih dahulu hingga merata, kemudian ditambahkan air secara perlahan sambil terus diaduk hingga homogen. Campuran beton kemudian dituangkan ke dalam cetakan kubus berukuran 15 cm x 15 cm x 15 cm dan dipadatkan. Setelah 24 jam, beton dilepas dari cetakan dan direndam dalam air hingga waktu pengujian.

Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan mesin uji tekan pada umur beton 7 hari dan 14 hari. Data hasil pengujian material dan kuat tekan beton dianalisis menggunakan perangkat lunak untuk mengetahui persentase paling optimal.

## 4. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Penelitian

**Tabel 1.** Hasil Uji Material

Pengujian	Agregat Halus	Agregat Kasar	Bottom Ash
Kadar Air	3,23 %	1,76%	0,64
Berat Isi	1,59	1,32	1,68
Berat Jenis	2,93 gr/cm <sup>3</sup>	2,98 gr/cm <sup>3</sup>	2,83
Penyerapan Air	4,60 %	2,04 %	0,2
Modulus Kehalusan	4,02	3,83	4,07
Kadar Lumpur	9,49%	2,83 %	-
Keausan	-	31,28 %	-

Sumber: Hasil Analisis, 2024.

Hasil pengujian material pada Tabel 1 menunjukkan karakteristik fisik dari agregat halus, agregat kasar, dan bottom ash yang digunakan dalam penelitian. Berdasarkan pengujian kadar air, agregat halus memiliki kadar air tertinggi sebesar 3,23%, diikuti oleh agregat kasar sebesar 1,76%, dan bottom ash sebesar 0,64%. Hal ini menunjukkan bahwa bottom ash memiliki tingkat kelembapan yang lebih rendah dibandingkan kedua material lainnya.

Dari segi berat isi, bottom ash memiliki nilai tertinggi sebesar 1,68 gr/cm<sup>3</sup>, yang lebih besar dibandingkan agregat halus (1,59 gr/cm<sup>3</sup>) dan agregat kasar (1,32 gr/cm<sup>3</sup>). Nilai ini menunjukkan bahwa bottom ash memiliki kerapatan material yang lebih tinggi dibandingkan agregat lainnya. Namun, berat jenis bottom ash (2,83 gr/cm<sup>3</sup>) sedikit lebih rendah dibandingkan agregat halus (2,93 gr/cm<sup>3</sup>) dan agregat kasar (2,98 gr/cm<sup>3</sup>), yang mengindikasikan perbedaan komposisi mineral dalam masing-masing material.

Pada pengujian penyerapan air, agregat halus memiliki nilai tertinggi sebesar 4,60%, diikuti oleh agregat kasar (2,04%), sedangkan bottom ash hanya memiliki penyerapan air sebesar 0,2%. Rendahnya penyerapan air pada bottom ash menunjukkan potensi material ini untuk mengurangi kebutuhan air dalam campuran beton.

Modulus kehalusan bottom ash adalah yang tertinggi, yaitu 4,07, sedikit lebih besar dibandingkan agregat halus (4,02) dan agregat kasar (3,83). Hal ini mengindikasikan bahwa bottom ash memiliki butiran yang relatif kasar dan seragam, yang berkontribusi pada ikatan mekanis yang baik dalam campuran beton.

Pada pengujian kadar lumpur, agregat halus memiliki kadar lumpur tertinggi sebesar 9,49%, diikuti oleh agregat kasar sebesar 2,83%, sedangkan bottom ash tidak mengandung kadar lumpur yang terdeteksi. Ini menunjukkan bahwa bottom ash merupakan material yang lebih bersih dibandingkan agregat alami.

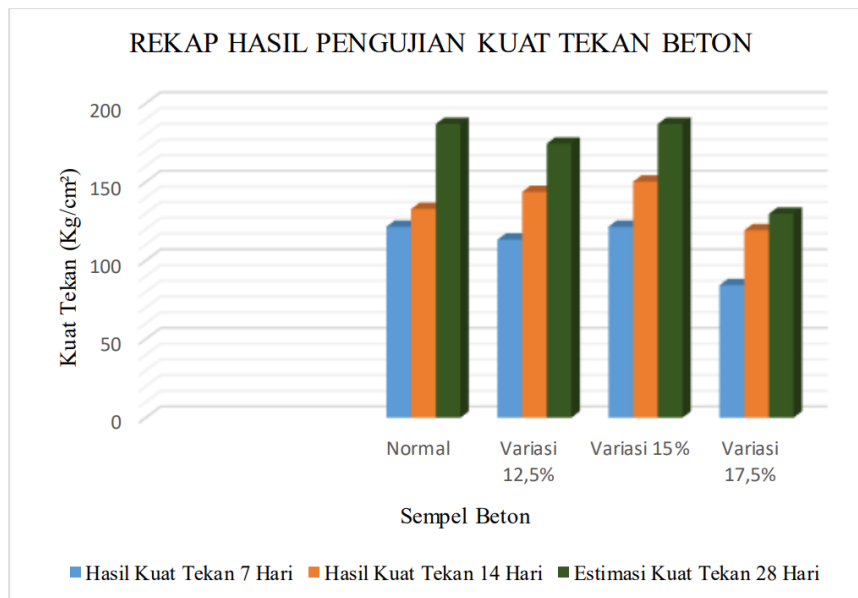
Pengujian keausan hanya dilakukan pada agregat kasar, dengan hasil keausan sebesar 31,28%. Nilai ini masih dalam batas toleransi untuk penggunaan agregat dalam beton, menunjukkan bahwa agregat kasar memiliki ketahanan yang cukup terhadap abrasi.

Secara keseluruhan, bottom ash menunjukkan potensi sebagai pengganti agregat halus, mengingat karakteristik fisiknya yang kompetitif, seperti berat isi yang tinggi, kadar lumpur yang tidak terdeteksi, dan penyerapan air yang rendah, meskipun berat jenisnya sedikit lebih rendah dibandingkan agregat alami. Analisis lebih lanjut akan menentukan pengaruhnya terhadap sifat mekanis campuran beton.

**Tabel 2.** Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

No	Sampel	Hasil Kuat Tekan 7 Hari	Hasil Kuat Tekan 14 Hari	Estimasi Kuat Tekan 28 Hari
1	Normal	121,46	132,79	186,86
2	Variasi 12,5%	113,29	143,66	174,31
3	Variasi 5%	121,46	150,24	186,86
4	Variasi 17,5%	84,29	119,19	129,69

Sumber: Hasil Analisis, 2024.



Sumber: Hasil Analisis, 2024.

**Gambar 2.** Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan beton dari Tabel 2 dan Gambar 2 menunjukkan pengaruh penggunaan variasi material terhadap perkembangan kuat tekan pada usia 7 hari, 14 hari, dan estimasi kuat tekan pada 28 hari. Beton normal menunjukkan hasil yang stabil dengan kuat tekan 7 hari sebesar 121,46 kg/cm<sup>2</sup>, meningkat menjadi 132,79 kg/cm<sup>2</sup> pada 14 hari, dan estimasi kuat tekan pada 28 hari mencapai 186,86 kg/cm<sup>2</sup>. Hal ini menandakan performa yang baik dalam hal perkembangan kekuatan beton normal seiring waktu.

Pada variasi 5%, kuat tekan beton mencapai nilai yang sama dengan beton normal pada usia 7 hari (121,46 kg/cm<sup>2</sup>). Namun, pada usia 14 hari, variasi ini menunjukkan peningkatan lebih signifikan dengan kuat tekan sebesar 150,24 kg/cm<sup>2</sup>, dan estimasi kuat tekan pada 28 hari tetap berada pada 186,86 kg/cm<sup>2</sup>. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi 5% mampu menghasilkan performa yang setara dengan beton normal.

Sebaliknya, beton dengan variasi 12,5% memiliki kuat tekan awal yang lebih rendah dibandingkan beton normal, yaitu 113,29 kg/cm<sup>2</sup> pada 7 hari. Namun, pada usia 14 hari, terjadi peningkatan signifikan menjadi 143,66 kg/cm<sup>2</sup>. Meskipun demikian, estimasi kuat tekan pada 28 hari berada pada nilai yang lebih rendah dibandingkan beton normal, yaitu 174,31 kg/cm<sup>2</sup>. Hal ini mengindikasikan

bahwa penambahan material pada variasi 12,5% cenderung menurunkan kekuatan jangka panjang beton.

Beton dengan variasi 17,5% menunjukkan performa yang paling rendah di antara semua sampel. Kuat tekan pada 7 hari hanya mencapai 84,29 kg/cm<sup>2</sup>, dengan peningkatan pada usia 14 hari menjadi 119,19 kg/cm<sup>2</sup>, dan estimasi kuat tekan 28 hari sebesar 129,69 kg/cm<sup>2</sup>. Nilai ini menunjukkan bahwa penggunaan material dengan variasi 17,5% berdampak signifikan terhadap penurunan kekuatan beton, baik pada tahap awal maupun jangka panjang.

Secara keseluruhan, variasi 5% menunjukkan hasil yang paling optimal, setara dengan beton normal dalam hal kuat tekan. Variasi 12,5% dan 17,5% cenderung mengurangi performa beton, terutama dalam estimasi kuat tekan pada 28 hari, yang penting untuk aplikasi struktural.

## 4.2 Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa variasi penggunaan material tambahan dalam campuran beton, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2, memiliki pengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton. Beton normal menunjukkan performa konsisten pada semua tahapan pengujian, dengan estimasi kuat tekan pada usia 28 hari sebesar 186,86 kg/cm<sup>2</sup>. Beton dengan variasi 5% juga memiliki hasil yang setara dengan beton normal, menunjukkan bahwa proporsi ini dapat menjadi alternatif material yang efektif tanpa mengurangi kualitas beton. Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya oleh Ulum et al yang menunjukkan bahwa penambahan material tambahan dalam jumlah kecil dapat meningkatkan kekuatan beton karena perbaikan sifat mekanik material [13].

Namun, variasi 12,5% dan 17,5% menunjukkan penurunan kuat tekan, terutama pada estimasi usia 28 hari, dengan masing-masing sebesar 174,31 kg/cm<sup>2</sup> dan 129,69 kg/cm<sup>2</sup>. Temuan ini mengindikasikan bahwa jumlah material tambahan yang terlalu besar dapat mengganggu ikatan matriks semen dan agregat, yang berperan penting dalam kekuatan beton. Penurunan ini sejalan dengan hasil penelitian oleh Sandika & Desimaliana, yang menunjukkan bahwa penggunaan material substitusi dalam jumlah besar dapat mengurangi kohesi campuran, meningkatkan porositas, dan mengurangi kekuatan beton secara signifikan [14].

Penelitian terdahulu juga mendukung temuan ini, seperti yang dilaporkan oleh Astariani et al yang menemukan bahwa variasi material tambahan yang optimal berkisar antara 5-10% dari total volume agregat [15]. Pada rentang ini, material tambahan dapat mengisi celah antar partikel agregat tanpa mengganggu struktur beton. Namun, pada kadar yang lebih tinggi, distribusi material menjadi tidak merata, menyebabkan segregasi dan penurunan kekuatan. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa variasi 5% merupakan batas optimal untuk menjaga performa beton.

Dari perspektif perkembangan konstruksi, implikasi hasil penelitian ini cukup signifikan. Beton dengan variasi material tambahan 5% dapat menjadi alternatif beton konvensional, terutama dalam upaya mengurangi ketergantungan pada bahan baku alam seperti pasir dan batu pecah. Hal ini relevan dengan kebutuhan industri konstruksi modern yang semakin mengedepankan prinsip keberlanjutan. Penggunaan material tambahan dalam jumlah kecil dapat mengurangi dampak lingkungan dari eksploitasi agregat alam sekaligus memanfaatkan limbah industri.

Di sisi lain, hasil penelitian ini juga menunjukkan batasan penggunaan material tambahan, terutama pada variasi 12,5% dan 17,5%, yang menunjukkan penurunan signifikan dalam kekuatan beton. Ini menekankan pentingnya pengujian dan analisis mendalam sebelum material tambahan diterapkan dalam skala besar.

Selain itu, penelitian ini memperkuat konsep bahwa variasi campuran beton tidak hanya berdampak pada kekuatan beton tetapi juga pada aspek lainnya, seperti durabilitas dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan. Penelitian sebelumnya oleh Jaelani & Abriantoro menunjukkan bahwa beton dengan material tambahan dalam kadar optimal cenderung memiliki ketahanan lebih baik terhadap retak mikro, yang dapat memperpanjang umur struktur [16]. Hal ini memberikan dasar untuk aplikasi beton

berbasis material tambahan pada konstruksi berkelanjutan, seperti jembatan dan bangunan tahan gempa.

Hasil penelitian ini juga memberikan implikasi praktis bagi perencanaan konstruksi, khususnya dalam menentukan proporsi material campuran yang tepat. Dengan mengetahui bahwa variasi 5% memberikan hasil yang optimal, kontraktor dan insinyur dapat mengadopsi formula ini untuk proyek yang membutuhkan beton berkualitas tinggi dengan efisiensi material. Selain itu, pendekatan ini dapat mengurangi biaya material tanpa mengorbankan performa struktural.

Lebih lanjut, temuan ini relevan dalam konteks standar beton nasional maupun internasional. Misalnya, SNI 2847:2020 menekankan pentingnya pengendalian mutu dalam campuran beton untuk memastikan keamanan dan durabilitas struktur. Penelitian ini dapat menjadi referensi untuk memperbarui standar tersebut dengan memasukkan panduan penggunaan material tambahan pada kadar tertentu untuk mendukung keberlanjutan industri konstruksi.

Dari sudut pandang penelitian masa depan, hasil ini membuka peluang untuk eksplorasi lebih lanjut mengenai kombinasi material tambahan dengan bahan lain, seperti fly ash atau abu sekam padi. Penelitian terdahulu oleh Darwis et al menunjukkan bahwa kombinasi beberapa material tambahan dapat memberikan efek sinergis dalam meningkatkan kuat tekan dan durabilitas beton [17]. Dengan demikian, pengembangan formulasi beton inovatif dapat menjadi langkah strategis untuk menjawab tantangan konstruksi masa depan.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam memahami pengaruh variasi material tambahan terhadap kuat tekan beton. Dengan menghubungkan temuan ini dengan penelitian sebelumnya dan dampaknya terhadap industri konstruksi, penelitian ini memberikan wawasan yang bermanfaat untuk mendukung praktik konstruksi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa bottom ash memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai agregat halus pada beton, dengan karakteristik yang mendukung, seperti berat jenis sebesar 2,83 gr/cm<sup>3</sup>, berat isi 1,68 gr/cm<sup>3</sup>, dan modulus kehalusan 4,07. Namun, kadar air dan penyerapan airnya yang relatif rendah, masing-masing 0,64% dan 0,2%, mengindikasikan sifat yang kurang menyerap, sehingga memengaruhi pengikatan material dalam campuran beton. Berdasarkan variasi campuran yang diuji, persentase campuran bottom ash sebesar 5% menunjukkan hasil kuat tekan yang paling optimal, setara dengan beton normal, dengan estimasi kuat tekan pada 28 hari mencapai 186,86 kg/cm<sup>2</sup>. Hal ini mengonfirmasi bahwa bottom ash dapat dimanfaatkan secara efektif sebagai agregat halus pengganti sebagian, selama penggunaannya dibatasi pada proporsi yang optimal untuk menjaga kualitas dan kekuatan beton.

## 5. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini menunjukkan bahwa bottom ash memiliki karakteristik fisik yang mendukung penggunaannya sebagai agregat halus pada beton.
2. Substitusi 5% bottom ash menghasilkan kuat tekan beton paling optimal, setara dengan beton normal pada estimasi umur 28 hari sebesar 186,86 kg/cm<sup>2</sup>

## REFERENSI

- [1] R. Yulismawati and E. Saputra, "Durabilitas Beton Sekat Kanal Terpapar Air Gambut dan Air Laut," *Jurnal Teknik*, vol. 15, no. 2, pp. 137-147, 2021.
- [2] I. C. F. Qwensi, Y. A. Yanuar, and R. S. Alifen, "Direct Waste dan Indirect Waste Material pada Pekerjaan Struktur Beton dan Dinding Bata (Studi Kasus: Proyek Gedung Apartemen di Surabaya)," *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, vol. 10, no. 1, pp. 98-105, 2021.
- [3] D. K. Ainia, "Analisis Deep Ecology Arne Naess terhadap Aktivitas Penambangan Pasir

- Merapi Studi Kasus: Penambangan Pasir Merapi di Sekitar Sungai Gendol Cangkringan Kabupaten Sleman," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 19, no. 1, pp. 98-106, 2021.
- [4] I. Ibrahim, J. Fikri, D. Y. Wiranata, T. Amanah, M. Mahmuda, and S. Sumiati, "Pemanfaatan Kombinasi Limbah Fly Ash dan Bottom Ash Dalam Campuran Mortar Untuk Paving Block," *Jurnal Talenta Sipil*, vol. 7, no. 1, pp. 414-420, 2024.
- [5] N. Rabbani, "Pengaruh Penggunaan Abu Bawah Sebagai Substitusi Pasir Dalam Pembuatan Bata Beton," *Pena: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, vol. 35, no. 2, pp. 51-56, 2021.
- [6] S. Sunarti, "Sintesis Zeolit A dari Abu Dasar Batubara (Coal Bottom Ash) dengan Metode Peleburan dan Hidrotermal," *Molluca Journal of Chemistry Education (MJoCE)*, vol. 11, no. 1, pp. 8-16, 2021.
- [7] S. U. Dewi and F. Prasetyo, "Analisa Penambahan Bottom Ash Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton," *Journal of Infrastructural in Civil Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 31-45, 2021.
- [8] O. R. Satria, E. Septiandini, and A. Purnomo, "Pengaruh Pemanfaatan Pecahan Botol Sebagai Substitusi Agregat pada Campuran Beton (Literature Review)," *Jurnal Pendidikan Tambusai*, vol. 7, no. 3, pp. 31732-31741, 2023.
- [9] F. Nuraziz, W. Wibowo, and E. Safitri, "Kajian Keuletan pada Beton Variasi Limbah Granit Sebagai Substitusi Parsial Agregat Kasar," *Ocean Engineering: Jurnal Ilmu Teknik dan Teknologi Maritim*, vol. 3, no. 3, pp. 12-19, 2024.
- [10] B. Jaelani and A. P. Abriantoro, "Studi Eksperimental Substitusi Fly Ash 30%, 35% dan 40% Pada Beton SCC Terhadap Waktu Ikut, Flowability, Porositas dan Kuat Tekan Beton dalam Resistensi Asam Sulfat," *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, vol. 10, no. 2, pp. 75-88, 2024.
- [11] Y. Tajunnisa, A. A. Cahyani, H. Masrafat, I. R. Hariyanto, Y. N. Wibowo, M. R. Alfayet, and V. N. Halisah, "FABAKO: Program Pemanfaatan Limbah Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) sebagai Paving Jalan untuk Meningkatkan UMKM Masyarakat Paiton," *Sewagati*, vol. 8, no. 5, 2024.
- [12] A. A. F. Arif, A. Putu, I. G. N. P. Darmayasa, and K. A. Ariana, "Pemanfaatan Limbah Keramik Sebagai Bahan Alternatif Campuran Agregat Kasar Pada Beton," *Reinforcement Review in Civil Engineering Studies and Management*, vol. 2, no. 2, pp. 74-86, 2023.
- [13] M. B. Ulum, S. Diah, and M. A. Rudiyanto, "Analisis pengaruh penambahan serbuk kayu terhadap kuat tekan beton dengan bahan tambah geopolimer," *Doctoral dissertation, Universitas Islam Majapahit*, 2024.
- [14] F. G. Sandika and E. Desimaliana, "Kekuatan mortar geopolimer akibat pengaruh substitusi limbah kaca sebagai agregat halus," *Prosiding FTSP Series*, pp. 294-297, 2024.
- [15] N. K. Astariani, I. G. N. E. Partama, and I. W. E. Ariantika, "Pengaruh pemanfaatan limbah batu pipih meanyar sebagai substitusi sebagian agregat halus terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton," *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, vol. 13, no. 2, pp. 105-111, 2024.
- [16] B. Jaelani and A. P. Abriantoro, "Studi eksperimental substitusi fly ash 30%, 35% dan 40% pada beton SCC terhadap waktu ikat, flowability, porositas dan kuat tekan beton dalam resistensi asam sulfat," *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, vol. 10, no. 2, pp. 75-88, 2024.
- [17] Z. Darwis, H. B. B. Kuncoro, and J. Sitorus, "Perencanaan beton mutu tinggi menggunakan superplasticizer ligno C-491 dan kombinasi ordinary portland cement (OPC) dengan semen slag," *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 11, no. 2, pp. 179-188, 2022.