

STUDI EKSPERIMENTAL PENGGUNAAN CANGKANG TELUR SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN DAN AGREGAT HALUS TERHADAP KINERJA LENTUR BALOK BETON

Muhammad Zaimiel¹

Bunyamin Bunyamin^{1*}

Heru Pramanda¹

Muhammad Ridha¹

Rafiqa Muhnita Yusputri²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Iskandar Muda
Jl. Kampus Unida, Surien, Kec. Meuraxa, Kota Banda Aceh, Aceh 23234, INDONESIA

²Program Studi D-3 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Syech Abdurrauf No.7 Darussalam, Kota Banda Aceh, Aceh 23111, INDONESIA

Abstract

Excessive cement consumption can increase natural resource exploitation and environmental impacts. Eggshell waste, which is rich in calcium carbonate, has potential as a partial substitute for cement and fine aggregate. However, studies examining its influence on the flexural strength of concrete beams remain limited. This research aims to evaluate the flexural strength of concrete beams incorporating eggshell waste at substitution levels of 0%, 5%, 10%, and 15%. An experimental method was employed using beam specimens measuring $15 \times 15 \times 60$ cm, with five samples for each variation, cured for 28 days. The mix design followed ACI 211.1-91 with a target compressive strength of 17 MPa. The results show that normal concrete achieved a flexural strength of 4.11 MPa, whereas substitutions of 5%, 10%, and 15% resulted in reduced values of 3.12 MPa, 2.57 MPa, and 2.32 MPa, respectively. The decline in flexural strength was most significant at 15% substitution, falling below the minimum standard requirement. Therefore, the use of eggshell waste as a partial substitute for cement and fine aggregate is only recommended up to a 10% substitution level for flexural structural elements, with a note that further research is needed to confirm its long-term environmental benefits.

Keywords:

Eggshell waste; concrete beam; partial substitution; flexural strength; sustainable material.

Abstrak

Penggunaan semen berlebih dapat meningkatkan eksploitasi sumber daya alam dan dampak lingkungan. Limbah cangkang telur yang kaya kalsium karbonat berpotensi dimanfaatkan sebagai substitusi parsial semen dan agregat halus. Namun, kajian terkait pengaruhnya terhadap kuat lentur balok beton masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kuat lentur balok beton dengan variasi substitusi cangkang telur sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan benda uji balok berukuran $15 \times 15 \times 60$ cm sebanyak lima sampel untuk setiap variasi, yang dirawat selama 28 hari. Perancangan campuran mengacu pada ACI 211.1-91 dengan kuat tekan rencana 17 MPa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat lentur beton normal sebesar 4,11 MPa, sedangkan variasi 5%, 10%, dan 15% mengalami penurunan masing-masing menjadi 3,12 MPa, 2,57 MPa, dan 2,32 MPa. Penurunan kuat lentur paling signifikan terjadi pada substitusi 15%, yang berada di bawah batas persyaratan standar. Dengan demikian, pemanfaatan limbah cangkang telur sebagai substitusi parsial semen dan agregat halus hanya direkomendasikan hingga kadar 10% untuk elemen struktur yang bekerja terhadap lentur, dengan catatan diperlukan penelitian lanjutan untuk mengonfirmasi manfaat lingkungan jangka panjangnya.

Kata Kunci: Limbah cangkang telur; balok beton; substitusi parsial; kuat lentur; material berkelanjutan.

DOI: [10.38038/vocatech.v8i2.327](https://doi.org/10.38038/vocatech.v8i2.327)

Received: 28 April 2026; Accepted: 14 October 2026; Published: 20 October 2026

Citation in APA Style: Zaimiel, M., Bunyamin, B., Pramanda, H., Ridha, M., & Yusputri R. M. (2026). Studi eksperimental penggunaan cangkang telur sebagai bahan substitusi semen dan agregat halus terhadap kinerja lentur balok beton. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 8(2), 114-132.

***Corresponding author:**

Bunyamin Bunyamin, Universitas Iskandar Muda, Jl. Kampus Unida, Surien, Kec. Meuraxa, Kota Banda Aceh, Aceh 23234, Indonesia
Email: bunyamin@unida-aceh.ac.id

1. PENDAHULUAN

Beton adalah salah satu material komposit yang paling luas pemanfaatannya dalam bidang konstruksi. Hal ini disebabkan oleh keunggulannya dalam hal kekuatan, fleksibilitas dalam proses pembentukan, serta ketersediaan bahan baku penyusunnya yang relatif mudah diperoleh (Yang & Wang, 2025). Pada dasarnya, beton terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu semen yang berfungsi sebagai bahan pengikat, agregat halus, agregat kasar, air, serta bahan tambahan yang digunakan bila diperlukan untuk meningkatkan sifat atau kinerja tertentu (Zhu et al., 2024). Di antara komponen tersebut, semen memegang peranan utama dalam proses hidrasi yang menentukan kekuatan dan durabilitas beton. Namun demikian, produksi semen Portland membutuhkan konsumsi energi yang tinggi dan eksploitasi sumber daya alam yang besar, khususnya batu kapur dan tanah liat (Ahmed et al., 2023; Mehdizadeh et al., 2021). Di samping itu, proses produksi semen yang melibatkan pembakaran pada suhu tinggi menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah besar. Emisi tersebut menjadi salah satu faktor yang berkontribusi terhadap meningkatnya pemanasan global serta menurunnya kualitas udara akibat pencemaran (Guo et al., 2024; Li et al., 2023; N. Li et al., 2022). Sejalan dengan pesatnya perkembangan pembangunan infrastruktur, penggunaan semen pun mengalami peningkatan yang signifikan. Oleh karena itu, diperlukan berbagai inovasi untuk mengurangi ketergantungan terhadap semen, salah satunya melalui pemanfaatan material alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Bunyamin, Herwandi, et al., 2026; Bunyamin, Mahasin, et al., 2026; Bunyamin, Pramanda, et al., 2026).

Salah satu strategi yang dapat diterapkan adalah memanfaatkan limbah yang memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan pengganti sebagian dalam campuran beton (Bunyamin et al., 2024; Bunyamin, Hady, et al., 2023; Bunyamin, Munirwan, et al., 2021; Hady et al., 2022). Limbah cangkang telur merupakan salah satu jenis limbah organik yang jumlahnya cukup melimpah, terutama berasal dari aktivitas rumah tangga dan industri makanan seperti pedagang kuliner (Imani et al., 2025). Hingga saat ini, limbah cangkang telur belum banyak dimanfaatkan secara maksimal dan masih sering dipandang sebagai sisa buangan yang memiliki nilai ekonomi rendah (Ibeabuchi et al., 2023; Vasudevan & Chan Wei, 2020). Namun demikian, dari sisi komposisi kimia, cangkang telur sebagian besar tersusun atas kalsium karbonat (CaCO₃), yang juga menjadi salah satu bahan utama dalam semen Portland. Di samping itu, cangkang telur turut mengandung unsur lain, seperti magnesium dan besi, meskipun dalam kadar yang relatif kecil (Diningsih & Rohmawati, 2022; Therdthai et al., 2023). Kandungan tersebut menunjukkan adanya kemiripan karakteristik dengan bahan penyusun semen, sehingga membuka peluang untuk dimanfaatkan sebagai bahan substitusi parsial dalam beton. Selain itu, lapisan membran pada cangkang telur diketahui memiliki kemampuan untuk menyerap karbon dioksida, sehingga berpotensi turut berperan dalam menekan emisi gas rumah kaca (Mahmood et al., 2022).

Sejumlah studi terdahulu telah mengkaji penggunaan serbuk cangkang telur sebagai bahan pengganti sebagian semen, khususnya dalam hubungannya dengan kuat tekan dan kuat tarik belah beton (Bunyamin, Pramanda, et al., 2023; Tan et al., 2018). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada kadar tertentu, penggunaan cangkang telur masih dapat menghasilkan kekuatan beton yang memenuhi persyaratan, meskipun cenderung mengalami penurunan pada kadar substitusi yang lebih tinggi (Bunyamin, Pramanda, et al., 2023; Xuan et al., 2023; Zhang et al., 2024). Meskipun demikian, kajian mengenai pengaruh penggunaan cangkang telur terhadap kuat lentur beton, khususnya pada elemen struktural berupa balok, masih relatif terbatas. Padahal, kuat lentur merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi kinerja struktur terhadap beban layan, terutama pada elemen yang mengalami momen lentur. Di samping itu, studi yang mengintegrasikan pemanfaatan cangkang telur sebagai pengganti sebagian semen sekaligus agregat halus masih relatif terbatas. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk memperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai pengaruhnya.

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, fokus permasalahan dalam penelitian ini adalah menganalisis pengaruh pemanfaatan limbah cangkang telur sebagai pengganti sebagian semen dan agregat halus terhadap nilai kuat lentur balok beton. Variasi substitusi yang digunakan meliputi 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat bahan yang digantikan. Penelitian ini juga berupaya untuk membandingkan kinerja lentur antara beton normal dan beton dengan substitusi cangkang telur, sehingga dapat diketahui tingkat efektivitas penggunaannya dalam meningkatkan atau mempertahankan performa struktur.

Tujuan utama penelitian ini adalah untuk menganalisis kuat lentur balok beton yang menggunakan limbah cangkang telur sebagai bahan substitusi sebagian semen dan agregat halus pada berbagai variasi kadar substitusi. Di samping itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pola perubahan kinerja lentur beton akibat penambahan cangkang telur, sekaligus menentukan kadar optimum penggunaannya berdasarkan tinjauan kekuatan lentur. Dengan demikian, hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi landasan ilmiah dalam pemanfaatan limbah cangkang telur sebagai bahan alternatif pada campuran beton.

Penelitian ini akan dilakukan dengan pendekatan eksperimental yang pelaksanaannya berlangsung di laboratorium material konstruksi. Campuran dirancang dengan mutu rencana sebesar 17 MPa dengan mengacu pada metode perancangan campuran yang berlaku (Bunyamin et al., 2022; Bunyamin, Hendrifa, et al., 2021). Limbah cangkang telur yang digunakan terlebih dahulu melalui proses pembersihan, pengeringan, kemudian digiling hingga menjadi serbuk agar dapat tercampur secara merata dalam adukan beton. Serbuk tersebut selanjutnya dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian semen dan agregat halus sesuai dengan variasi yang telah ditetapkan. Benda uji yang digunakan berupa balok beton, dengan jumlah sampel yang sama pada setiap variasi guna menjamin konsistensi dan keandalan data. Setelah proses pengecoran selesai, seluruh benda uji dirawat dengan metode perendaman selama 28 hari agar mencapai kekuatan optimal sebelum dilakukan pengujian kuat lentur. Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara komparatif untuk menilai pengaruh variasi substitusi terhadap kinerja lentur balok beton.

Berdasarkan penelusuran literatur, sebagian besar penelitian terdahulu mengenai pemanfaatan cangkang telur dalam beton lebih banyak difokuskan pada pengaruhnya terhadap kuat tekan, kuat tarik belah, atau sifat fisik beton. Kajian yang secara khusus mengevaluasi kinerja lentur balok beton dengan cangkang telur sebagai substitusi parsial semen sekaligus agregat halus masih sangat terbatas. Padahal, kuat lentur merupakan parameter kritis untuk elemen struktur balok yang menerima beban lentur. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi komprehensif pengaruh substitusi simultan cangkang telur terhadap kuat lentur balok beton, yang belum banyak diteliti sebelumnya. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis kuat lentur balok beton dengan variasi substitusi cangkang telur sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%, serta menentukan kadar optimum yang masih memenuhi persyaratan standar.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan sumbangan terhadap pengembangan teknologi beton yang berkelanjutan, khususnya melalui pemanfaatan limbah sebagai material alternatif dalam bidang konstruksi. Dari aspek lingkungan, penggunaan limbah cangkang telur dapat membantu mengurangi volume limbah organik yang terbuang ke lingkungan, sehingga mendukung upaya pengelolaan limbah yang lebih efektif. Dari sisi akademis, penelitian ini dapat memperkaya kajian ilmiah terkait perilaku beton dengan bahan substitusi alternatif, khususnya dalam aspek kuat lentur. Dari aspek praktis, temuan penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi para praktisi konstruksi dalam mengembangkan inovasi material yang lebih efisien dan berwawasan lingkungan. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan mampu memberikan nilai tambah bagi masyarakat melalui pemanfaatan limbah yang sebelumnya belum dikelola secara optimal.

2. STUDI PUSTAKA

Sejumlah studi literatur yang disajikan berikut ini digunakan sebagai landasan teoritis dan referensi pendukung dalam pelaksanaan penelitian. Kajian-kajian tersebut dipilih berdasarkan relevansinya terhadap topik yang diteliti serta kontribusinya dalam memperkuat kerangka pemikiran penelitian ini.

2.1. Beton

Beton adalah material komposit yang terdiri atas semen, agregat halus, agregat kasar, air, serta bahan tambahan apabila diperlukan. Material ini banyak digunakan dalam konstruksi karena memiliki kuat tekan yang tinggi, kemudahan dalam proses pengerjaan, serta ketahanan yang baik terhadap berbagai kondisi lingkungan. Karakteristik dan performa beton sangat dipengaruhi oleh mutu setiap bahan penyusunnya serta perbandingan campuran yang diterapkan dalam perencanaannya (Wembe et al., 2023).

Semen berfungsi sebagai bahan pengikat hidrolis yang bereaksi dengan air melalui proses hidrasi, sehingga menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang menjadi komponen utama pembentuk kekuatan beton. Sementara itu, agregat halus dan agregat kasar berperan sebagai material pengisi yang memberikan kestabilan, sekaligus mempengaruhi kekuatan dan daya tahan beton. Gradasi agregat yang baik akan menghasilkan susunan partikel yang lebih rapat, sehingga dapat mengurangi rongga dan meningkatkan efisiensi penggunaan semen. Air dalam campuran beton berfungsi untuk memicu reaksi hidrasi dan mempengaruhi kemudahan pengerjaan, namun penggunaannya harus dikontrol agar tidak menimbulkan porositas berlebih yang dapat menurunkan kekuatan (Wang et al., 2019).

Karakteristik mekanik beton umumnya dievaluasi melalui kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur. Kuat tekan menjadi parameter utama dalam penentuan mutu beton, sedangkan kuat lentur memiliki peranan penting pada elemen struktur seperti balok yang menerima beban lentur. Performa beton sendiri dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya perbandingan air terhadap semen, mutu agregat, teknik pencampuran, serta metode perawatan yang diterapkan. Perawatan yang tepat memungkinkan proses hidrasi berlangsung optimal sehingga beton dapat mencapai kekuatan yang direncanakan serta memiliki durabilitas yang baik (Mindess & Young, 2002).

2.2. Semen Portland

Semen Portland merupakan bahan pengikat hidrolis yang paling luas digunakan dalam konstruksi, terutama sebagai komponen utama dalam pembuatan beton. Material ini diperoleh dari hasil penggilingan klinker yang terbentuk melalui pembakaran campuran bahan baku berupa batu kapur dan material berlempung pada suhu tinggi di dalam kiln. Setelah proses pembakaran, klinker didinginkan dan digiling bersama sejumlah kecil gipsium yang berfungsi untuk mengatur waktu pengikatan. Proses ini menghasilkan semen dengan sifat reaktif terhadap air dan mampu membentuk massa padat yang kuat.

Secara kimia, semen Portland terdiri atas beberapa oksida utama, yaitu kalsium oksida, silika, alumina, dan oksida besi. Perpaduan oksida-oksida tersebut menghasilkan senyawa utama penyusun klinker, antara lain trikalsium silikat, dikalsium silikat, trikalsium aluminat, dan tetrakalsium aluminoferrit. Masing-masing senyawa memiliki peran berbeda terhadap perkembangan sifat beton. Trikalsium silicate berkontribusi terhadap kekuatan awal, sedangkan dikalsium silicate berperan dalam peningkatan kekuatan pada umur yang lebih panjang. Sementara itu, trikalsium aluminat mempengaruhi reaksi awal yang cepat, dan tetrakalsium aluminoferrite berkontribusi dalam proses pembentukan klinker serta memberikan warna khas pada semen (Wei et al., 2020).

Sifat utama semen Portland ditentukan oleh kemampuannya bereaksi dengan air melalui proses hidrasi. Reaksi ini menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat yang menjadi penyusun utama struktur mikro beton dan berperan dalam memberikan kekuatan serta kekakuan. Selain itu, terbentuk pula kalsium hidroksida sebagai produk samping. Proses hidrasi berlangsung secara bertahap dan dipengaruhi oleh rasio air, suhu, serta kehalusan partikel semen. Semakin halus ukuran partikel, maka luas permukaan reaksi meningkat sehingga mempercepat proses hidrasi.

Selain aspek kimia, sifat fisik semen seperti kehalusan, berat jenis, dan waktu ikat juga memegang peranan penting. Waktu ikat awal dan akhir harus berada dalam rentang tertentu agar proses pengecoran dan pemadatan dapat dilakukan dengan baik. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik semen Portland menjadi sangat penting dalam menghasilkan beton yang memiliki kinerja optimal dan sesuai dengan kebutuhan struktur (Wilson et al., 2022).

2.3. Material Substitusi

Material substitusi dalam beton merujuk pada penggunaan bahan alternatif untuk menggantikan sebagian semen atau agregat dengan tujuan untuk mengatasi kelangkaan dari semen. Bahan-bahan ini tidak hanya meningkatkan sifat mekanik tertentu, tetapi juga dapat memperbaiki ketahanan beton terhadap serangan kimia, mengurangi permeabilitas, serta meningkatkan umur layan struktur.

Selain bahan yang memiliki sifat pozzolanik, terdapat pula material substitusi yang berperan sebagai pengisi (*filler*), seperti serbuk batu atau limbah berbasis mineral, termasuk cangkang telur. Material jenis ini umumnya tidak bereaksi secara kimia signifikan, tetapi dapat memperbaiki struktur mikro beton dengan mengisi rongga antar partikel sehingga menghasilkan beton yang lebih padat. Efek pengisian ini dapat meningkatkan kekompakan dan mengurangi porositas, meskipun pengaruhnya terhadap kekuatan sangat bergantung pada proporsi penggunaannya (Elavarasan et al., 2023; Vasudevan & Chan Wei, 2020; D. Yang et al., 2022).

Penggunaan material substitusi juga memiliki implikasi terhadap sifat beton segar dan beton keras. Pada beton segar, substitusi dapat mempengaruhi workability, waktu ikat, dan kebutuhan air. Di sisi lain, pada kondisi beton yang telah mengeras, perubahan sifat dapat terlihat pada kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, maupun tingkat durabilitasnya. Oleh karena itu, penentuan kadar substitusi harus dilakukan secara hati-hati melalui pengujian eksperimental untuk mendapatkan komposisi yang optimal.

2.4. Limbah Cangkang Telur

Cangkang telur termasuk salah satu limbah organik yang dihasilkan dalam jumlah cukup besar, baik dari kegiatan rumah tangga maupun industri pengolahan makanan. Secara umum, cangkang telur tersusun atas lapisan keras yang didominasi oleh kalsium karbonat (CaCO_3) dengan persentase yang tinggi, serta mengandung sejumlah kecil senyawa lain seperti magnesium karbonat dan fosfat. Selain itu, pada bagian

dalam cangkang terdapat membran tipis yang bersifat organik (Rux et al., 2025; Sathvik et al., 2019; Xuan et al., 2023). Komposisi kimia tersebut menunjukkan bahwa cangkang telur memiliki kesamaan tertentu dengan bahan baku penyusun semen, khususnya dari sisi kandungan kalsium, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai material alternatif dalam campuran beton.

Dari sisi sifat fisik, cangkang telur memiliki struktur yang relatif keras namun rapuh, sehingga mudah dihancurkan menjadi partikel halus melalui proses pengeringan dan penggilingan. Setelah diolah menjadi serbuk, ukuran partikel cangkang telur dapat disesuaikan agar mendekati kehalusan semen atau agregat halus. Kehalusan partikel ini berperan penting dalam menentukan distribusi dalam campuran beton serta mempengaruhi kemampuan material dalam mengisi rongga di antara butiran agregat. Dengan ukuran yang lebih halus, serbuk cangkang telur dapat meningkatkan kerapatan struktur mikro beton melalui efek pengisian (*filler effect*), yang berpotensi mengurangi porositas (Nivedha J et al., 2025).

Dari aspek reaktivitas, cangkang telur umumnya tidak memiliki sifat pozzolanik yang signifikan seperti bahan substitusi lain, karena kandungan silika reaktifnya relatif rendah. Namun demikian, keberadaan kalsium karbonat dalam jumlah besar dapat memberikan kontribusi tidak langsung terhadap proses hidrasi semen, misalnya dengan mempercepat pembentukan produk hidrasi pada tahap awal.

2.5. Kuat Lentur Beton

Kuat lentur beton adalah salah satu parameter utama yang digunakan untuk menilai kemampuan beton dalam menahan beban yang menimbulkan momen lentur. Parameter ini sering dinyatakan sebagai modulus of rupture, yaitu tegangan maksimum yang dapat ditahan beton sebelum terjadi keruntuhan akibat pembebanan lentur. Pada elemen struktur seperti balok, beton mengalami distribusi tegangan yang tidak merata, di mana bagian atas umumnya mengalami tekan, sedangkan bagian bawah mengalami tarik. Karena beton memiliki kekuatan tarik yang relatif rendah, kegagalan lentur biasanya diawali oleh munculnya retak pada serat tarik (Tayeh et al., 2019).

Perilaku beton terhadap beban lentur dipengaruhi oleh sifat heterogen material penyusunnya. Pada tahap awal pembebanan, beton masih berperilaku elastis dan tegangan sebanding dengan regangan. Namun, seiring bertambahnya beban, tegangan tarik pada bagian bawah balok akan mencapai batas kekuatan tarik beton, sehingga retak mulai terbentuk. Setelah retak terjadi, kemampuan beton dalam menahan beban bergantung pada distribusi tegangan yang tersisa serta kontribusi material penyusun dalam mempertahankan integritas struktur. Oleh karena itu, kuat lentur sering kali dijadikan indikator ketahanan beton terhadap retak. Kuat lentur beton (Badan Standarisasi Nasional, 2011) dapat dikalkulasi dengan rumus sebagai berikut:

1. Pada pengujian, apabila bidang patah terjadi di bagian tengah bentang (yakni pada sepertiga daerah pusat di antara titik perletakan), maka nilai kuat lentur beton dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$f_r = \frac{P.L}{b.h^2} \quad (1)$$

2. Pada kondisi pengujian ketika bidang patah terjadi di luar daerah pusat (di luar sepertiga bentang tengah), namun jarak antara titik pusat dan lokasi patah masih kurang dari 5% terhadap jarak antar perletakan, maka nilai kuat lentur beton dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$f_r = \frac{P.a}{b.h^2} \quad (2)$$

Di mana :

- f_r = Nilai kuat lentur pada benda uji (MPa)
- P = Nilai beban tertinggi pada mesin uji
- L = Jarak antara 2 garis perletakan (mm)
- b = Lebar tampang lintang patah pada arah horizontal (mm)
- h = Lebar tampang lintang patah pada arah vertikal (mm)
- a = Jarak rata-rata antara penampang patahan dengan tumpuan luar terdekat (mm)

Besarnya kuat lentur beton dipengaruhi oleh sejumlah faktor, seperti mutu beton, perbandingan air terhadap semen, kualitas agregat, serta kondisi perawatan yang diterapkan. Beton dengan mutu yang lebih tinggi umumnya memiliki kuat lentur yang lebih besar, meskipun peningkatannya tidak selalu sebanding dengan kenaikan kuat tekan. Selain itu, ukuran dan bentuk benda uji, serta metode pengujian yang digunakan, juga dapat mempengaruhi hasil pengukuran kuat lentur. Metode pengujian yang lazim digunakan meliputi pembebanan dua titik (*third-point loading*) maupun satu titik (*center-point loading*), yang masing-masing memiliki karakteristik distribusi momen yang berbeda (Hasan et al., 2020).

2.6. Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Lentur

Hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur beton merupakan aspek penting dalam memahami perilaku mekanik beton secara menyeluruh. Kuat tekan sering digunakan sebagai parameter utama dalam penentuan mutu beton karena pengujiannya relatif mudah dan hasilnya konsisten. Sementara itu, kuat lentur menggambarkan kemampuan beton dalam menahan tegangan tarik tidak langsung yang terjadi akibat pembebanan lentur, khususnya pada elemen struktur seperti balok dan pelat. Meskipun keduanya mengukur respons beton terhadap jenis tegangan yang berbeda, terdapat hubungan empiris yang menunjukkan bahwa peningkatan kuat tekan umumnya diikuti oleh peningkatan kuat lentur.

Secara teoritis, keterkaitan antara kuat tekan dan kuat lentur beton tidak bersifat linier, karena material ini menunjukkan respons yang berbeda terhadap gaya tekan dan tarik. Beton dikenal memiliki kemampuan tinggi dalam menahan beban tekan, namun relatif lemah terhadap gaya tarik, sehingga peningkatan kuat tekan yang besar tidak selalu diikuti oleh kenaikan kuat lentur yang sebanding. Hubungan kedua parameter tersebut umumnya dinyatakan dalam bentuk persamaan empiris yang diperoleh dari hasil pengujian eksperimental, di mana kuat lentur berkorelasi dengan akar kuadrat dari kuat tekan beton. Dalam penerapannya, standar yang digunakan memberikan nilai rasio tertentu, seperti pada SNI yang menetapkan perbandingan sekitar 0,70, sedangkan menurut ACI berkisar 0,60 (Handayani, 2019).

Dalam praktik perencanaan, nilai konstanta k berbeda tergantung pada standar yang digunakan, seperti standar nasional maupun internasional. Perbedaan ini dipengaruhi oleh metode pengujian, jenis material, serta kondisi lingkungan saat pengujian dilakukan. Hubungan empiris ini memberikan kemudahan dalam memperkirakan kuat lentur beton tanpa harus melakukan pengujian langsung, sehingga efisien dalam tahap desain awal.

2.7. Perawatan Beton

Perawatan beton (*curing*) merupakan tahapan penting setelah proses pengecoran yang bertujuan untuk menjaga kondisi kelembapan dan suhu agar reaksi hidrasi semen dapat berlangsung secara optimal. Proses hidrasi membutuhkan ketersediaan air yang cukup; oleh karena itu, kehilangan air akibat penguapan harus dicegah, terutama pada umur awal beton. Tanpa perawatan yang memadai, beton berpotensi mengalami penurunan kekuatan, peningkatan porositas, serta munculnya retak awal yang dapat mempengaruhi kinerja jangka panjang.

Tujuan utama perawatan beton adalah memastikan perkembangan kekuatan sesuai dengan mutu rencana serta meningkatkan durabilitas beton terhadap pengaruh lingkungan. Selain itu, *curing* juga berperan dalam mengurangi risiko retak susut plastis maupun retak akibat perubahan suhu. Beton yang dirawat dengan baik akan memiliki struktur mikro yang lebih rapat, sehingga lebih tahan terhadap penetrasi air dan zat agresif yang dapat menyebabkan kerusakan.

Metode perawatan beton dilakukan melalui berbagai cara, yaitu: perendaman dalam air, penyiraman secara berkala, penutupan permukaan dengan bahan yang dapat menahan kelembapan, atau penggunaan bahan kimia khusus (*curing compound*). Perendaman dalam air merupakan metode yang paling efektif karena mampu menjaga kelembapan secara merata pada seluruh permukaan beton. Lama perawatan umumnya dilakukan hingga 28 hari, mengingat sebagian besar perkembangan kekuatan beton terjadi dalam periode tersebut (Mulyati & Arkis, 2020).

3. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian merupakan urutan tahapan yang dirancang secara terstruktur untuk mengarahkan pelaksanaan penelitian dari awal hingga selesai. Pada studi ini, proses diawali dengan identifikasi, pengumpulan, dan evaluasi material yang akan digunakan, kemudian dilanjutkan dengan penyusunan rancangan campuran beton. Setelah itu dilakukan pembuatan spesimen uji beserta proses *curing*, yang selanjutnya diikuti dengan pengujian untuk mengetahui karakteristik yang dihasilkan. Tahap akhir mencakup pengolahan serta analisis data berdasarkan hasil pengujian guna memperoleh kesimpulan yang relevan.

3.1. Peralatan yang digunakan

Peralatan yang diterapkan merupakan fasilitas yang tersedia di laboratorium. Peralatan utama meliputi timbangan, seperangkat saringan, oven, cetakan benda uji, mesin pengaduk beton (*concrete mixer*), kerucut Abrams, serta mesin uji tekan. Selain itu, sejumlah peralatan penunjang turut dimanfaatkan guna memastikan kelancaran dan efektivitas pelaksanaan proses penelitian.

Timbangan dimanfaatkan untuk mengukur massa setiap bahan penyusun beton berdasarkan komposisi campuran yang telah ditetapkan sebelumnya. Selanjutnya, seperangkat saringan dimanfaatkan

untuk menganalisis gradasi agregat, baik agregat halus maupun agregat kasar, sehingga nilai modulus kehalusan dapat diketahui. Susunan saringan diatur secara berurutan dari ukuran bukaan terbesar hingga terkecil. Oven digunakan untuk mengeringkan material yang memerlukan kondisi kering pada saat pengujian, dengan rentang suhu operasional antara 100°C hingga 115°C.

Dalam proses pembuatan benda uji, digunakan cetakan berbahan baja yang berbentuk balok dengan ukuran: 15 cm x 15 cm x 60 cm. Pencampuran bahan beton dilakukan menggunakan mesin pengaduk (*concrete mixer*) berkapasitas 50 liter, yang berfungsi untuk menghasilkan campuran yang homogen sesuai dengan standar pelaksanaan. Bahan-bahan yang digunakan dalam proses pencampuran terdiri atas agregat halus, agregat kasar, semen, air, serta material aditif yang diterapkan dalam penelitian.

Untuk menilai karakteristik beton segar, digunakan kerucut Abrams yang dilengkapi pelat dasar dan batang pemadat dalam pelaksanaan uji slump. Peralatan ini memiliki dimensi berupa diameter bawah 200 mm, diameter atas 100 mm, serta tinggi 300 mm. Di sisi lain, pengujian kuat lentur beton dilaksanakan menggunakan mesin uji berkapasitas 10 ton yang mampu memberikan pembebanan hingga benda uji mencapai kondisi runtuh.

Selain peralatan utama, penelitian ini juga menggunakan berbagai alat bantu seperti sendok semen, ember, wadah penampung, palu karet, gerobak sorong, sekop, jangka sorong, kuas, dan oli bekas. Perangkat penunjang tersebut memiliki fungsi penting dalam menunjang tahapan persiapan, proses pencampuran, hingga pelaksanaan pengujian benda uji sehingga seluruh rangkaian kegiatan dapat berjalan secara optimal dan efisien.

3.2. Material yang digunakan

Bahan yang dimanfaatkan dalam penelitian ini terdiri atas semen Portland, agregat halus, agregat kasar, air, serta limbah cangkang telur sebagai material substitusi. Agregat halus dan agregat kasar berperan sebagai bahan pengisi dalam campuran beton yang berasal dari proses pelapukan alami batuan dan diperoleh dari Sungai Krueng Aceh di wilayah Kota Jantho, Kabupaten Aceh Besar. Limbah cangkang telur dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian semen dan agregat halus dengan variasi kadar sebesar 5%, 10%, dan 15% dari berat material yang disubstitusi. Persentase substitusi 5%, 10%, dan 15% diterapkan secara terpisah terhadap berat semen dan berat pasir halus pada campuran kontrol. Dengan demikian, setiap variasi menggunakan persentase penggantian yang sama pada kedua material, sedangkan air, kerikil, dan pasir kasar dipertahankan tetap. Abu cangkang telur digunakan sebagai pengganti semen, sedangkan butiran halus cangkang telur digunakan sebagai pengganti pasir halus.

Dalam penelitian ini digunakan semen Portland tipe umum yang diproduksi oleh PT. Semen Andalas Indonesia. Pengujian karakteristik semen di laboratorium tidak dilakukan secara khusus karena produk tersebut telah dinyatakan memenuhi standar yang ditetapkan dalam SNI 15-2049-1994. Oleh karena itu, pemeriksaan hanya dilakukan secara visual, yaitu dengan memastikan kemasan dalam kondisi baik dan butiran semen tidak mengalami penggumpalan. Adapun air yang digunakan berasal dari suplai air bersih (PDAM) yang tersedia di Laboratorium Bahan Bangunan dan Transportasi, Program Studi Teknik Sipil Universitas Iskandarmuda. Air tersebut digunakan baik untuk pencampuran maupun perawatan beton, dengan kriteria tidak mengandung minyak, tidak berbau, serta bebas dari zat-zat yang berpotensi mengganggu proses hidrasi semen.

Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan kerikil sebagai agregat kasar yang telah memenuhi standar ASTM berdasarkan hasil pengujian kadar air, berat jenis, gradasi, dan berat isi. Agregat tersebut merupakan material yang lolos saringan berukuran 25 mm dan telah disediakan di laboratorium. Di sisi lain, pasir halus dan pasir kasar digunakan sebagai agregat halus, yang masing-masing lolos saringan 4,75 mm dan 9,50 mm. Sebelum dimanfaatkan dalam campuran beton, agregat halus tersebut telah diuji dengan prosedur yang serupa seperti pada agregat kasar untuk memastikan bahwa material tersebut layak digunakan sebagai komponen penyusun beton.

Pada penelitian ini, limbah cangkang telur berasal dari sisa aktivitas masyarakat, khususnya dari pedagang makanan. Proses pengolahan dimulai dengan pengumpulan cangkang telur, kemudian dilakukan pembersihan untuk menghilangkan kotoran dan sisa bahan organik yang menempel. Cangkang telur direndam dalam air selama 24 jam guna memastikan seluruh lemak dan kotoran terlepas secara optimal (Bunyamin et al., 2025). Setelah proses perendaman, cangkang telur dikeringkan menggunakan oven selama 24 jam hingga mencapai kondisi kering sempurna.

Tahap selanjutnya adalah proses penghancuran cangkang telur menggunakan mesin Los Angeles hingga diperoleh butiran dengan ukuran yang bervariasi. Material hasil penghancuran kemudian dipisahkan berdasarkan ukuran dan fungsi penggunaannya. Sebagian hasil penghancuran digunakan sebagai pengganti agregat halus dengan cara diayak menggunakan saringan berukuran 4,75 mm. Sementara itu, sebagian lainnya diproses lebih lanjut melalui pembakaran untuk menghasilkan bentuk serbuk halus menyerupai

abu, yang kemudian diayak menggunakan saringan halus untuk digunakan sebagai substitusi parsial semen (Bunyamin, Hendrifa, et al., 2021; Bunyamin & Mukhlis, 2020; Hady et al., 2022). Proses ini dilakukan untuk memperoleh material dengan ukuran dan karakteristik yang sesuai sehingga dapat tercampur secara homogen dalam campuran beton. Dengan tahapan pengolahan tersebut, limbah cangkang telur diharapkan dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai bahan alternatif yang mendukung keberlanjutan dalam teknologi beton.

3.3. Sifat-Sifat Fisis Agregat

Pengujian berat jenis (American Society for Testing and Materials, 2019) dan absorpsi (American Society for Testing and Materials, 2001) agregat dalam penelitian ini mengacu pada metode ASTM. Berat jenis didefinisikan sebagai perbandingan antara berat agregat dalam suatu volume tanpa rongga udara terhadap berat air pada volume yang sama. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik fisik agregat yang mempengaruhi kualitas beton. Peralatan yang digunakan meliputi gelas Thaulow's beserta pelat kaca, timbangan, oven, sisir besi, ember, saringan No. 4, bak perendam, dan keranjang kawat.

Peneliti mengambil sampel agregat secara acak dari tempat penyimpanan, lalu merendamnya dalam air selama 24 jam hingga kondisi jenuh tercapai. Setelah proses perendaman, pengeringan dilakukan sampai agregat mencapai kondisi jenuh kering permukaan (Saturated Surface Dry/SSD) dengan cara menghamparkan material dan membaliknya secara berkala menggunakan sisir besi agar pengeringan berlangsung merata. Pada agregat kasar, pengujian dilakukan dengan menimbang keranjang kawat kosong, kemudian agregat dimasukkan ke dalamnya, direndam, dan ditimbang dalam kondisi terendam. Sementara itu, pada agregat halus digunakan gelas Thaulow's, di mana gelas dan pelat kaca ditimbang terlebih dahulu, kemudian diisi agregat kondisi SSD dan ditimbang kembali. Setelah itu, air ditambahkan hingga penuh, ditutup, dan digoyangkan untuk mengeluarkan udara sebelum dilakukan penimbangan akhir.

Nilai berat jenis agregat dihitung pada kondisi SSD dan kering oven (OD) menggunakan persamaan yang berlaku. Penentuan nilai absorpsi agregat dilakukan dengan menghitung persentase perbandingan antara massa air yang terserap pada kondisi jenuh kering permukaan (SSD) dan massa agregat dalam keadaan kering oven. Dalam pelaksanaannya, pengujian dilakukan pada tiga sampel, kemudian hasil yang digunakan ditetapkan sebagai nilai rata-rata dari keseluruhan pengujian tersebut.

Selain itu, dilakukan pula pemeriksaan berat volume agregat dengan mengacu pada metode ASTM (American Society for Testing and Materials, 2010), menggunakan agregat dalam kondisi kering oven. Dalam pengujian ini digunakan wadah berkapasitas 1,552 liter sebagai media pengisian agregat. Proses pengisian dilakukan secara bertingkat dalam tiga lapisan, di mana setiap lapisan dipadatkan dengan batang besi berdiameter 16 mm sebanyak 25 kali penumbukan. Setelah wadah terisi penuh, permukaan agregat disesuaikan hingga rata dengan tepi wadah, lalu dilakukan penimbangan untuk mendapatkan nilai berat volume agregat. Prosedur ini dilakukan secara cermat untuk memastikan hasil pengujian yang akurat dan representatif. Pengujian lainnya yaitu susunan butiran agregat dilakukan berdasarkan ASTM dengan melihat nilai *fineness modulus* (FM) (American Society for Testing and Materials, 2019).

3.4. Perencanaan Campuran Beton

Dalam penelitian ini, penentuan komposisi campuran beton dilakukan dengan mengacu pada metode yang direkomendasikan oleh American Concrete Institute, khususnya berdasarkan standar ACI 211.1-91 (American Concrete Institute, 2022). Penentuan kebutuhan air untuk setiap 1 m³ beton didasarkan pada nilai slump rencana, yaitu berkisar antara 75 hingga 100 mm, sehingga diperoleh tingkat kelecakan campuran yang sesuai dengan kebutuhan pekerjaan. Peneliti menentukan faktor air semen (FAS) dengan mengacu pada ketentuan dalam standar ACI, yang didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah air dan jumlah semen dalam campuran beton. Dalam perhitungan tersebut, ditetapkan target mutu beton rencana sebesar 17,00 MPa. Nilai FAS kemudian disesuaikan oleh peneliti agar kekuatan yang direncanakan dapat tercapai, sekaligus tetap menjaga kemudahan pengerjaan (*workability*) pada campuran beton. Dalam setiap variasi campuran, FAS ditentukan berdasarkan komposisi akhir bahan penyusun beton setelah substitusi, sedangkan target mutu beton digunakan sebagai dasar perencanaan awal campuran.

Dalam penelitian ini, diameter maksimum agregat kasar yaitu 25 mm, sedangkan karakteristik agregat halus diperhitungkan melalui nilai *fineness modulus* yang berada pada rentang 2,4 hingga 3,0. Berdasarkan parameter tersebut, dilakukan penentuan proporsi agregat halus dan agregat kasar sehingga diperoleh komposisi campuran yang optimal. Setelah proporsi masing-masing material ditetapkan, dilakukan perhitungan berat setiap bahan penyusun beton untuk mendapatkan perbandingan campuran dalam satuan berat.

Tahapan berikutnya adalah penyusunan analisis gradasi agregat dengan membuat tabel distribusi ukuran butiran. Dari hasil analisis ini diperoleh persentase kumulatif agregat yang tertahan pada setiap ukuran saringan, yang digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian gradasi terhadap standar yang berlaku. Peneliti memanfaatkan limbah cangkang telur sebagai bahan substitusi sebagian semen dan agregat halus dalam penelitian ini. Variasi kadar substitusi yang diterapkan ditetapkan sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat masing-masing material yang digantikan. Variasi 0% digunakan sebagai campuran kontrol, sedangkan variasi 5%, 10%, dan 15% ditetapkan secara bertahap untuk mengevaluasi pengaruh peningkatan kadar substitusi cangkang telur terhadap karakteristik dan kinerja beton. Persentase substitusi diterapkan secara terpisah berdasarkan berat material yang digantikan, yaitu abu cangkang telur sebagai substitusi sebagian semen dan bubuk cangkang telur sebagai substitusi sebagian agregat halus. Dengan demikian, pada setiap variasi, jumlah semen dan agregat halus dihitung berdasarkan persentase penggantian terhadap masing-masing material pada campuran kontrol, kemudian komposisi akhir campuran digunakan untuk menentukan FAS dan proporsi bahan penyusun. Pendekatan ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh penggunaan limbah cangkang telur terhadap karakteristik campuran dan kinerja beton yang dihasilkan.

3.5. Pembuatan Benda Uji

Tahapan pelaksanaan bermula dari penyiapan seluruh material penyusun beton, yang mana ditakar berdasarkan proporsi hasil perancangan campuran. Cetakan benda uji dipersiapkan dengan pemberian lapisan pelumas pada permukaan dalamnya guna mempermudah proses pelepasan setelah beton mengeras. Seluruh peralatan, termasuk molen dan perangkat pengujian, dibersihkan serta dibasahi terlebih dahulu untuk menghindari melekatnya adukan pada alat. Peneliti melakukan proses pencampuran dengan cara memasukkan agregat kasar, agregat halus, semen, air, serta limbah cangkang telur secara bertahap hingga diperoleh campuran yang homogen, dengan durasi pengadukan sekitar 10 menit. Setelah itu, peneliti memeriksa konsistensi campuran melalui uji slump untuk memastikan tingkat kelecakan telah sesuai dengan perencanaan.

Adukan yang telah homogen kemudian dituangkan ke dalam cetakan balok dalam tiga lapisan. Setiap lapisan dipadatkan menggunakan batang baja dengan jumlah tumbukan yang sama guna memperoleh kepadatan yang merata. Setelah cetakan terisi penuh, dilakukan pengetukan pada bagian sisi untuk mengurangi rongga udara dalam beton. Benda uji dibiarkan selama 24 jam hingga cukup mengeras, selanjutnya dilepaskan dan diberi kode identifikasi sesuai variasi campuran yang digunakan, termasuk variasi dengan penambahan limbah cangkang telur sebagai bahan substitusi.

3.6. Pengujian Kuat Lentur Beton

Pengujian kekuatan lentur balok beton dilakukan apabila benda uji mencapai umur 28 hari, mengacu pada prosedur yang telah ditetapkan ([Badan Standarisasi Nasional, 2011](#)). Pengujian dilakukan dengan metode dua titik pembebanan. Untuk balok $15 \times 15 \times 60$ cm, jarak antar tumpuan ditetapkan 450 mm dan dua titik pembebanan ditempatkan pada sepertiga bentang, yaitu masing-masing 150 mm dari tumpuan. Sebelum pengujian dimulai, mesin uji terlebih dahulu dioperasikan dan dibiarkan beberapa saat hingga siap digunakan. Benda uji kemudian ditempatkan pada tumpuan dengan posisi yang tepat agar kondisi pembebanan sesuai dengan ketentuan. Proses pembebanan diatur secara bertahap untuk menghindari terjadinya benturan, dengan kecepatan yang dikendalikan sehingga peningkatan beban berlangsung secara stabil dalam kisaran tertentu.

Menjelang terjadinya keruntuhan, laju pembebanan dikurangi guna mencegah efek kejutan yang dapat memengaruhi hasil pengujian. Setelah balok mengalami patah, pembebanan dihentikan dan besarnya beban maksimum yang tercapai dicatat sebagai data utama. Benda uji yang telah selesai diuji kemudian dikeluarkan dari alat dengan menyesuaikan posisi pelat penumpu atau sistem pembebanan. Selanjutnya, dilakukan pengukuran dimensi penampang pada bagian patahan, meliputi lebar dan tinggi, pada beberapa titik untuk mendapatkan nilai rata-rata beserta tingkat ketelitian yang memadai. Selain itu, jarak antara lokasi patahan dan tumpuan terdekat juga diukur pada beberapa titik di daerah tarik sepanjang bentang, kemudian dirata-ratakan. Prosedur ini diterapkan pada seluruh variasi benda uji, termasuk yang menggunakan substitusi limbah cangkang telur, untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap kapasitas lentur beton.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian mencakup evaluasi karakteristik fisis agregat yaitu meliputi berat volume, berat jenis, daya serap, serta distribusi ukuran butiran. Selain itu, penelitian ini juga membahas tahapan

perencanaan campuran beton sebagai dasar dalam menentukan proporsi material penyusun. Pengujian terhadap beton segar dilakukan melalui uji slump untuk mengetahui tingkat kelecakan, serta pengukuran berat volume. Sementara itu, pada beton keras dilakukan pengujian kuat lentur guna menilai kemampuan material dalam menahan gaya tarik lentur secara tidak langsung.

4.1. Hasil Pemeriksaan Sifat-Sifat Fisis Agregat

Setelah dilakukan analisis, peneliti memperoleh nilai rata-rata berat volume untuk setiap jenis agregat yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil tersebut kemudian disajikan pada Tabel 1 sebagai acuan dalam penilaian karakteristik material.

Tabel 1. Hasil pemeriksaan berat volume agregat

No	Jenis Agregat	Berat Volume (Kg/L)	Batas Ijin Troxell
1	Pasir Halus	1,712	> 1,4 Kg/L
2	Pasir Kasar	1,765	
3	Kerikil	1,794	

Berdasarkan Tabel 1, peneliti menemukan bahwa hasil pemeriksaan menunjukkan berat volume agregat halus berupa pasir halus sebesar 1,712 kg/L, pasir kasar sebesar 1,765 kg/L, serta agregat kasar (kerikil) sebesar 1,794 kg/L. Nilai-nilai tersebut diketahui telah melampaui batas minimum yang ditetapkan dalam kriteria Troxell, yaitu lebih dari 1,4 kg/L. Kondisi ini mengindikasikan bahwa agregat yang digunakan memiliki kepadatan yang baik sehingga telah memenuhi persyaratan sebagai bahan penyusun beton (Shetty & Jain, 2019).

Perbedaan nilai berat volume antar jenis agregat dipengaruhi oleh ukuran butiran dan tingkat kekasaran permukaan. Agregat yang lebih kasar seperti kerikil cenderung memiliki berat volume yang lebih tinggi dibandingkan agregat yang lebih halus, karena rongga antar butir relatif lebih kecil. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, peneliti menyimpulkan bahwa seluruh agregat yang digunakan telah memenuhi kriteria yang ditetapkan sehingga dinyatakan layak untuk dimanfaatkan dalam campuran beton. Kondisi ini juga menunjukkan bahwa material yang digunakan berpotensi memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kualitas beton yang dihasilkan.

Nilai rata-rata berat jenis dari setiap jenis agregat (pasir halus, pasir kasar, dan keirkil) yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3 berikut sebagai hasil perhitungan yang telah dilakukan.

Tabel 2. Hasil pemeriksaan berat jenis agregat

No	Jenis Agregat	Berat Jenis		Bata Ijin Troxell
		SG (SSD)	SG(OD)	
1	Pasir Halus	2,70	2,64	2,00 - 2,70
2	Pasir Kasar	2,71	2,65	2,00 - 2,70
3	Kerikil	2,83	2,81	2,50 - 2,80

Berdasarkan Tabel 2, peneliti memperoleh hasil pengujian yang menunjukkan bahwa berat jenis pasir halus sebagai agregat halus bernilai 2,70 pada kondisi jenuh kering permukaan (SSD) dan 2,64 pada kondisi kering oven (OD). Nilai tersebut masih berada dalam rentang yang diizinkan menurut kriteria Troxell, yaitu 2,00–2,70, sehingga peneliti menyatakan bahwa material tersebut telah memenuhi persyaratan. Selain itu, pasir kasar juga menunjukkan berat jenis sebesar 2,71 (SSD) dan 2,65 (OD), yang masih berada pada kisaran yang sama, sehingga peneliti menilai bahwa material tersebut memiliki karakteristik yang baik untuk digunakan sebagai agregat dalam campuran beton (American Society for Testing and Materials, 2019).

Peneliti menemukan bahwa agregat kasar berupa kerikil memiliki berat jenis sebesar 2,83 pada kondisi jenuh kering permukaan (SSD) dan 2,81 pada kondisi kering oven (OD). Nilai tersebut sedikit melampaui batas atas yang direkomendasikan, yaitu antara 2,50 hingga 2,80. Hal ini menunjukkan bahwa kerikil yang digunakan memiliki tingkat kepadatan yang relatif lebih tinggi dibandingkan agregat pada umumnya. Secara keseluruhan, peneliti menyimpulkan bahwa hasil pemeriksaan berat jenis menunjukkan kualitas agregat yang cukup baik, namun pada agregat kasar perlu dilakukan perhatian lebih lanjut karena nilainya sedikit berada di atas batas yang disarankan.

Tabel 3. Hasil pemeriksaan absorpsi agregat

No	Jenis Agregat	Absorpsi (%)	Batas Ijin (Teori)	
			Troxell	Orchard
1	Pasir Halus	2,44	0,00% - 2,00%	
2	Pasir Kasar	2,48	0,00% - 2,00%	0,40% - 1,90%
3	Kerikil	0,98	0,05% - 1,00%	

Berdasarkan Tabel 3. hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai absorpsi agregat halus berupa pasir halus sebesar 2,44%. Nilai ini melebihi batas yang direkomendasikan menurut teori Troxell (0,00%–2,00%) maupun Orchard (0,40%–1,90%). Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa pasir halus memiliki kemampuan penyerapan air yang cukup tinggi, yang dapat dipengaruhi oleh tekstur permukaan butir yang relatif kasar atau porositas material yang besar. Hal ini perlu diperhatikan dalam perencanaan campuran beton karena dapat memengaruhi kebutuhan air pencampur.

Pasir kasar memiliki nilai absorpsi sebesar 2,48%, yang juga berada di atas batas yang disarankan oleh Troxell. Nilai ini menunjukkan kecenderungan serupa dengan pasir halus, yaitu kemampuan menyerap air yang relatif tinggi. Dengan demikian, penggunaan agregat ini memerlukan penyesuaian kadar air dalam campuran agar tidak memengaruhi workability dan kekuatan beton yang dihasilkan.

Sementara itu, agregat kasar berupa kerikil memiliki nilai absorpsi sebesar 0,98%, yang masih berada dalam rentang yang diizinkan, yaitu 0,05% hingga 1,00% ([American Society for Testing and Materials, 2001](#)). Hal ini menunjukkan bahwa kerikil memiliki tingkat penyerapan air yang relatif rendah dan stabil, sehingga lebih sedikit memengaruhi kebutuhan air dalam campuran beton. Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa agregat kasar memenuhi persyaratan, sedangkan agregat halus memerlukan perhatian khusus dalam pengaturan kadar air pada proses pencampuran.

Pengujian saringan dilakukan untuk mengevaluasi sebaran ukuran butir agregat yang akan digunakan dalam campuran beton atau mortar. Berdasarkan data yang diperoleh, selanjutnya dihitung komposisi gradasi agregat serta nilai modulus kehalusan (*fineness modulus*) sebagai indikator karakteristik butiran. Hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Nilai *finenes modulus* (FM) dari analisa saringan

No	Jenis Agregat	<i>Finenes Modulus</i> (FM)
1	Pasir Halus	2,80
2	Pasir Kasar	3,55
3	Kerikil	6,49

Berdasarkan hasil perhitungan yang disajikan pada Tabel 4.4, peneliti menyimpulkan bahwa agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini memenuhi persyaratan sebagai material penyusun beton. Hal tersebut didasarkan pada nilai fineness modulus (FM) yang berada pada kisaran 2,3 hingga 3,1, sesuai dengan ketentuan ASTM International C-33. Kisaran nilai tersebut menunjukkan bahwa peneliti menemukan distribusi ukuran butiran agregat halus telah sesuai dengan standar yang dipersyaratkan.

Di sisi lain, peneliti memperoleh bahwa agregat kasar berupa kerikil memiliki nilai fineness modulus (FM) pada rentang 5,5 hingga 8,0 berdasarkan acuan ASTM yang disesuaikan dengan PBI 1979. Untuk pasir halus, peneliti mendapatkan nilai FM berkisar antara 1,50 hingga 3,80 sesuai ketentuan SK SNI S-04-1989 F. Sementara itu, pasir kasar menunjukkan nilai fineness modulus pada rentang 2,90 hingga 3,20 yang juga mengacu pada standar ASTM dengan penyesuaian PBI 1979. Secara umum, peneliti menyimpulkan bahwa seluruh nilai fineness modulus yang diperoleh menunjukkan gradasi agregat dalam penelitian ini telah memenuhi standar yang berlaku sehingga layak digunakan dalam campuran beton ([American Society for Testing and Materials, 2003](#)).

4.2. Hasil Perencanaan Campuran Beton

Peneliti merancang komposisi campuran beton dalam penelitian ini dengan mengacu pada metode yang direkomendasikan oleh American Concrete Institute, dengan target kuat tekan rencana sebesar 17 MPa. Proses pengecoran kemudian dilakukan dalam lima tahap, dan pada setiap tahap dihasilkan lima benda uji. Peneliti menggunakan spesimen berbentuk balok dengan ukuran 15 cm × 15 cm × 60 cm, sehingga jumlah total benda uji yang dibuat mencapai 20 buah. Hasil perhitungan komposisi campuran beton tersebut selanjutnya disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perencanaan campuran beton

Material	Jumlah (Kg/m ³)			
	Beton Normal	Beton substitusi 5%	Beton substitusi 10%	Beton substitusi 15%
Air	193,00	193,00	193,00	193,00
Semen	310,70	295,17	279,63	264,09
Abu Cangkang Telur	0,00	15,53	31,07	46,61
Kerikil	1165,87	1165,87	1165,87	1165,87
Pasir Kasar	118,11	118,11	118,11	118,11
Pasir Halus	522,32	496,20	470,09	443,97
Butiran Halus Cangkang Telur	0,00	26,12	52,23	78,35
Total	2380,00	2380,00	2380,00	2380,00

Tabel 5 menunjukkan bahwa variasi substitusi limbah cangkang telur memberikan pengaruh langsung terhadap komposisi material dalam campuran beton, khususnya pada semen (Nandhini & Karthikeyan, 2022) dan pasir halus. Pada beton normal (0%), seluruh kebutuhan bahan dipenuhi oleh material konvensional. Seiring dengan peningkatan persentase substitusi sebesar 5%, 10%, hingga 15%, terjadi penurunan jumlah semen dan pasir halus yang diimbangi dengan penambahan abu cangkang telur sebagai pengganti semen serta butiran halus cangkang telur sebagai pengganti pasir halus dalam proporsi yang sama. Sementara itu, jumlah air, kerikil, dan pasir kasar tetap konstan pada setiap variasi, sehingga perubahan komposisi hanya terfokus pada material pengikat dan agregat halus. Hal ini menunjukkan bahwa penelitian dirancang untuk mengisolasi pengaruh limbah cangkang telur terhadap karakteristik beton tanpa mengubah parameter utama lainnya.

Dari sisi total berat campuran, seluruh variasi tetap dipertahankan sebesar 2380,00 kg/m³, yang menandakan adanya keseimbangan massa dalam setiap komposisi campuran. Penambahan limbah cangkang telur sebagai material substitusi berpotensi memengaruhi sifat beton, baik pada kondisi segar maupun keras, terutama terkait dengan workability dan kekuatan mekanis. Penurunan kadar semen dapat berdampak pada berkurangnya kemampuan pengikatan, namun hal ini diharapkan dapat dikompensasi oleh kontribusi abu cangkang telur yang memiliki kandungan kalsium tinggi (Kumar Das et al., 2023). Demikian pula, penggantian sebagian pasir halus dengan butiran cangkang telur dapat memengaruhi struktur mikro dan kepadatan campuran. Oleh karena itu, variasi ini penting untuk dianalisis lebih lanjut guna mengetahui sejauh mana substitusi limbah cangkang telur dapat digunakan sebagai alternatif material yang efektif dan berkelanjutan dalam campuran beton.

4.3. Hasil Pengujian Slump Test

Uji slump merupakan metode pengujian beton segar yang digunakan untuk menilai tingkat kelecakan atau kemudahan alir adukan. Nilai slump diperoleh dari selisih tinggi beton sebelum dan setelah cetakan kerucut diangkat, yang mencerminkan konsistensi campuran serta kemudahan dalam proses pengerjaan di lapangan. Nilai slump test ditunjukkan dengan jelas pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Hasil Pengujian *slump test* untuk pengecoran benda uji balok sebanyak 20 buah

No.	Jenis Beton	Tinggi Nilai Slump (mm)	Tinggi Nilai Slump Rata-Rata (mm)	Workability ($\pm$ FAS) (%)	Nilai Tinggi Slump Yang direncanakan (mm)
1	BN	79,00 dan 81,00	80,00	0,00%	75 - 100
2	BCT-5	92,00 dan 89,00	90,50	-8,00%	
3	BCT-10	85,00 dan 83,00	84,00	-13,00%	
4	BCT-15	79,00 dan 83,00	81,00	-16,00%	

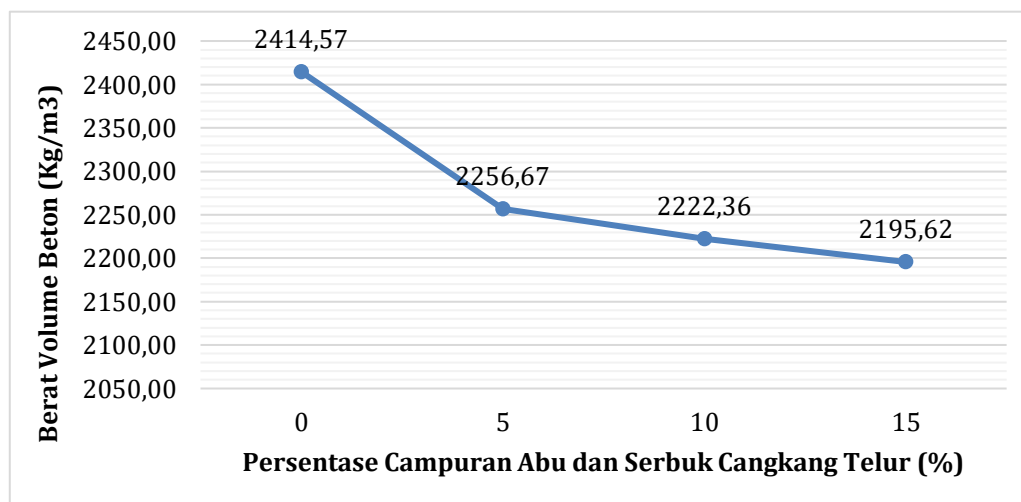
Berdasarkan Tabel 6, nilai slump rata-rata untuk beton normal (BN) sebesar 80 mm, yang berada dalam rentang slump rencana yaitu 75–100 mm. Hal ini menandakan bahwa jenis beton normal memiliki tingkat kelecakan yang sesuai dengan perencanaan dan mudah untuk dikerjakan (*workable*). Pada variasi beton dengan substitusi limbah cangkang telur (BCT), yaitu BCT-5, BCT-10, dan BCT-15, diperoleh nilai slump rata-rata masing-masing sebesar 90,50 mm, 84,00 mm, dan 81,00 mm. Seluruh nilai tersebut masih berada dalam rentang slump rencana, yaitu 75–100 mm, sehingga secara umum campuran tergolong *workable*.

Nilai slump tertinggi justru diperoleh pada BCT-5, kemudian menurun pada BCT-10 dan BCT-15. Dengan demikian, pola yang teramati bukanlah penurunan monotonik, melainkan fluktuasi yang dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain variasi kadar air efektif, karakteristik fisik cangkang telur, dan interaksi awal antara partikel substitusi dengan pasta semen. Cangkang telur yang telah digiling memiliki partikel yang relatif halus dan berpori. Porositas ini meningkatkan luas permukaan spesifik dan kapasitas penyerapan air, sehingga sebagian air bebas dalam campuran terserap ke dalam pori partikel. Akibatnya, air yang tersedia untuk melumasi agregat dan menjaga fluiditas pasta semen berkurang. Fenomena ini sejalan dengan temuan penelitian terdahulu (Lakhiar & Kong, 2022) yang menyatakan bahwa penambahan abu cangkang telur dapat menurunkan workability karena sifat higroskopisnya. Namun, pada kadar substitusi rendah (5%), efek penyerapan air tersebut belum cukup dominan untuk menurunkan slump secara signifikan; bahkan nilai slump dapat lebih tinggi dari beton normal akibat variasi kadar air awal atau faktor pengadukan. Pada kadar yang lebih tinggi (10% dan 15%), pengurangan air bebas menjadi lebih terasa sehingga slump menurun, meskipun masih dalam batas yang diizinkan. Penelitian lainnya menyebutkan bahwa partikel cangkang telur yang lebih halus dan berpori cenderung memerlukan air lebih banyak untuk mencapai kondisi jenuh, sehingga mengurangi ketersediaan air bebas dalam campuran yang berperan terhadap kemudahan alir beton. Selain itu, proses interaksi antara partikel cangkang telur dengan semen tidak berlangsung secepat reaksi hidrasi semen, sehingga dapat memengaruhi konsistensi awal campuran (Ghaffar et al., 2021).

Jadi, workability tidak hanya ditentukan oleh nilai slump, tetapi juga oleh kohesivitas, segregasi, dan bleeding. Meskipun nilai slump seluruh variasi memenuhi syarat, campuran dengan kadar cangkang telur yang lebih tinggi cenderung lebih kaku dan kurang mudah mengalir. Oleh karena itu, kami menyimpulkan bahwa penggunaan limbah cangkang telur hingga 15% masih dapat diterapkan, tetapi memerlukan perhatian pada pengendalian air dan kemungkinan penggunaan admixture penambah workability pada penelitian lanjutan.

4.4. Hasil Pengujian Berat Volume Beton

Peneliti menghitung berat volume berdasarkan berat serta dimensi benda uji yang diperoleh dari hasil pengukuran di laboratorium. Hasil perhitungan berat volume beton tersebut kemudian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik perbandingan berat volume beton normal dengan beton campuran cangkang telur

Sesuai dengan grafik hasil pengujian, beton normal menunjukkan nilai berat volume sebesar 2414,57 kg/m³, yang masih berada dalam kisaran beton normal sesuai dengan perencanaan, yaitu sekitar 2200–2500 kg/m³. Seiring dengan penambahan variasi substitusi abu yang dikombinasikan dengan serbuk cangkang telur sebesar 5%, 10%, dan 15%, terjadi penurunan berat volume secara bertahap menjadi 2256,67 kg/m³, 2222,36 kg/m³, dan 2195,62 kg/m³. Tren penurunan ini memperlihatkan adanya hubungan yang konsisten antara peningkatan kadar substitusi dengan berkurangnya berat jenis beton, yang menunjukkan bahwa material cangkang telur memberikan kontribusi signifikan terhadap perubahan sifat fisik beton.

Fenomena penurunan berat volume ini dapat dijelaskan melalui karakteristik material penyusun yang digunakan. Cangkang telur, baik dalam bentuk abu maupun serbuk, memiliki berat jenis yang nilainya lebih rendah jika dibandingkan semen maupun agregat halus konvensional. Selain itu, tekstur butiran yang cenderung berpori menyebabkan peningkatan rongga internal dalam campuran beton. Kondisi ini

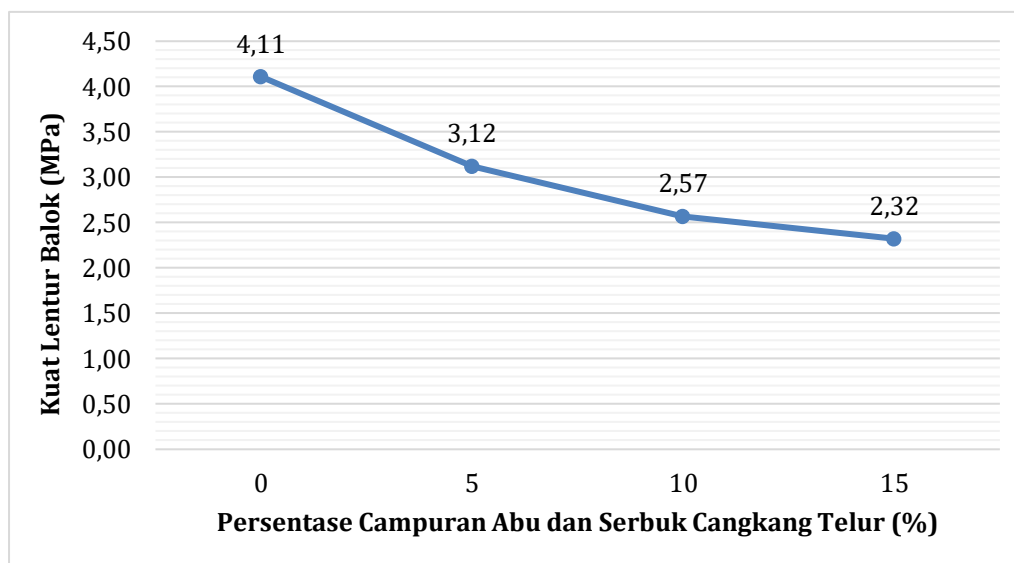
mengakibatkan berkurangnya kepadatan massa beton secara keseluruhan (Kumar Das et al., 2023). Di sisi lain, penggantian sebagian semen dengan abu cangkang telur juga dapat memengaruhi proses hidrasi, karena kandungan kimia dan reaktivitasnya tidak sepenuhnya setara dengan semen, sehingga berpotensi mempengaruhi pembentukan struktur mikro beton yang lebih padat (Xuan et al., 2023).

Jika ditinjau dari aspek klasifikasi berat volume, beton dengan variasi 0%, 5%, dan 10% masih termasuk ke dalam kelas beton normal karena nilainya masih berada dalam ketentuan berlaku. Namun, pada variasi 15%, berat volume beton mengalami penurunan hingga mendekati atau sedikit di bawah batas bawah beton normal, sehingga dapat dikategorikan sebagai beton ringan atau semi ringan. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan limbah cangkang telur dalam kadar tertentu dapat dimanfaatkan sebagai alternatif untuk menghasilkan beton dengan berat yang lebih ringan (Nandhini & Karthikeyan, 2022).

Secara keseluruhan, hasil pengolahan data ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi jumlah persentase substitusi cangkang telur, maka semakin besar pula penurunan berat volume beton yang terjadi. Kondisi ini berpotensi memberikan keuntungan dalam aplikasi konstruksi yang memerlukan pengurangan beban struktur, seperti pada elemen non-struktural atau bangunan bertingkat. Namun demikian, penurunan berat volume juga perlu dikaji lebih lanjut terhadap pengaruhnya terhadap sifat mekanis beton (kuat tekan dan kuat lentur), agar keseimbangan antara berat dan kekuatan tetap dapat dipertahankan sesuai dengan kebutuhan perencanaan.

4.5. Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton

Peneliti melaksanakan pengujian kuat lentur balok setelah proses perawatan benda uji mencapai umur 28 hari. Selanjutnya, peneliti mengeluarkan benda uji dari bak rendaman dan membiarkannya mengering selama 12 hingga 24 jam. Setelah itu, pengujian dilakukan di laboratorium dengan menggunakan Mesin Kuat Lentur “Hydraulic Concrete Beam Machine 10 Ton”. Dalam pelaksanaannya, peneliti memberikan beban secara perlahan dengan arah tegak lurus terhadap benda uji balok hingga mencapai kondisi kuat lentur maksimum. Nilai kuat lentur dihitung dan diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik perbandingan kuat lentur beton normal dengan beton campuran cangkang telur

Berdasarkan hasil pengujian kuat lentur pada Gambar 4.2, maka dapat dibuatkan faktor korelasi antara kuat tekan beton yang direncanakan dengan nilai kuat lentur yang diperoleh pada setiap variasi. Adapun nilai faktor korelasi tersebut diperlihatkan pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Faktor korelasi antara kuat tekan rencana dengan kuat lentur

No.	Jenis Beton	Kuat Tekan Rencana, f_c (MPa)	Kuat Lentur, f_r (MPa)	Persamaan Faktor Korelasi	Nilai Faktor Korelasi
1	BN	17,00	4,11	$f_r/(\sqrt{f_c})$	0,99
2	BCT-5	17,00	3,12	$f_r/(\sqrt{f_c})$	0,76
3	BCT-10	17,00	2,57	$f_r/(\sqrt{f_c})$	0,62
4	BCT-15	17,00	2,32	$f_r/(\sqrt{f_c})$	0,56

Berdasarkan hasil pengujian kuat lentur yang ditampilkan pada Gambar 4.2 dan Tabel 7, peneliti memperoleh bahwa kuat lentur balok beton normal pada umur 28 hari mencapai 4,11 MPa dengan nilai faktor korelasi sebesar 0,99. Nilai ini menunjukkan kinerja lentur yang baik dan telah memenuhi ketentuan standar, baik menurut Standar Nasional Indonesia maupun American Concrete Institute, yang masing-masing mensyaratkan nilai minimum sekitar 0,70 dan 0,60 dalam hubungan empiris antara kuat lentur dan kuat tekan. Hal ini mengindikasikan bahwa beton normal memiliki kualitas yang memadai dalam menahan tegangan tarik akibat pembebanan lentur.

Peneliti menemukan bahwa pada variasi beton dengan substitusi abu dan serbuk cangkang telur sebesar 5% dan 10%, terjadi penurunan kuat lentur masing-masing menjadi 3,12 MPa dengan faktor korelasi 0,76 dan 2,57 MPa dengan faktor korelasi 0,62. Meskipun nilai tersebut lebih rendah dibandingkan beton normal, peneliti menilai bahwa kedua hasil tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima berdasarkan ketentuan standar yang berlaku. Hal ini menunjukkan bahwa pada tingkat substitusi tertentu, yaitu hingga 10%, penggunaan limbah cangkang telur masih dapat ditoleransi dalam elemen beton yang bekerja terhadap lentur, meskipun dengan penurunan kapasitas dibandingkan beton konvensional.

Namun demikian, pada variasi substitusi sebesar 15%, kuat lentur balok kembali menurun menjadi 2,32 MPa dengan faktor korelasi 0,56, yang berada di bawah batas persyaratan. Peneliti menilai bahwa kondisi tersebut menunjukkan penggunaan cangkang telur pada proporsi yang lebih tinggi mulai memberikan pengaruh negatif yang cukup signifikan terhadap kemampuan beton dalam menahan beban lentur (Yerramala, 2014). Penurunan ini secara umum menunjukkan adanya hubungan berbanding terbalik antara persentase substitusi dan kuat lentur beton, di mana semakin tinggi kadar penggantian material, semakin rendah kekuatan yang dihasilkan.

Secara mekanisme, penurunan kuat lentur ini dapat dijelaskan melalui perubahan sifat mikrostruktur beton akibat penambahan material cangkang telur (Kumar Das et al., 2023). Peneliti menjelaskan bahwa cangkang telur memiliki kandungan utama berupa kalsium karbonat (CaCO_3) yang setelah melalui proses pembakaran berubah menjadi kalsium oksida (CaO). Senyawa tersebut tidak sepenuhnya menunjukkan aktivitas yang sama seperti komponen dalam semen Portland pada proses hidrasi. Akibatnya, peneliti menemukan bahwa pembentukan produk hidrasi seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berperan sebagai pengikat utama tidak berlangsung secara optimal. Selain itu, sifat partikel cangkang telur yang cenderung lebih ringan dan berpori juga dapat meningkatkan jumlah rongga dalam beton, sehingga menurunkan kepadatan dan kekuatan struktur internalnya (Zhang et al., 2024).

Secara keseluruhan, peneliti menyimpulkan bahwa penggunaan limbah cangkang telur sebagai bahan substitusi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat lentur beton yang dihasilkan. Substitusi pada kadar rendah hingga sedang (5%–10%) masih memungkinkan untuk digunakan dengan mempertimbangkan penurunan kekuatan yang terjadi. Namun, pada kadar yang lebih tinggi ($\geq 15\%$), terjadi penurunan kinerja yang cukup signifikan sehingga penggunaannya perlu dibatasi atau dikombinasikan dengan upaya perbaikan, seperti penambahan bahan pozzolan lain atau penggunaan bahan tambah kimia untuk meningkatkan kinerja beton.

Hasil pengujian kuat lentur yang diperoleh, dapat dihitung nilai standar deviasinya, guna melihat tingkat variasi hasil antar benda uji. Pengujian kuat lentur ini menggunakan benda uji balok dengan 4 variasi (0%, 5%, 10%, dan 15%), masing-masing variasi terdiri dari 5 benda uji, sehingga total benda uji berjumlah 20. Hasil nilai standar deviasi dapat dilihat pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Hasil analisis kuat lentur

No.	Jenis Beton	Substitusi Kulit Telur dalam Semen dan Pasir Halus	Kuat Lentur (MPa)	n	Kuat Lentur Rata-Rata (MPa)	Standar Deviasi (MPa)	COV (%)
1	BN	0%	4,54	5	4,11	0,36	8,64
2			3,84				
3			4,44				
4			3,94				
5			3,78				
6	BCT-5	5%	2,99	5	3,12	0,13	4,28
7			3,33				
8			3,02				
9			3,13				

10			3,14				
11			2,35				
12			2,70				
13	BCT-10	10%	2,58	5	2,57	0,18	6,89
14			2,77				
15			2,43				
16			2,26				
17			2,10				
18	BCT-15	15%	2,22	5	2,32	0,19	8,04
19			2,56				
20			2,46				

Selain nilai rata-rata, analisis kuat lentur juga dilengkapi dengan nilai standar deviasi untuk menunjukkan tingkat variasi hasil pengujian pada setiap variasi campuran. Berdasarkan hasil perhitungan, beton normal (BN) memiliki nilai standar deviasi sebesar 0,36 MPa, sedangkan pada variasi BCT-5, BCT-10, dan BCT-15 masing-masing sebesar 0,13 MPa, 0,18 MPa, dan 0,19 MPa. Nilai standar deviasi tersebut menunjukkan bahwa penyebaran data pada setiap variasi relatif kecil dibandingkan dengan nilai rata-ratanya, sehingga hasil pengujian dapat dikatakan cukup konsisten. Variasi terkecil terjadi pada BCT-5, yang mengindikasikan bahwa pada kadar substitusi rendah, campuran beton cenderung lebih homogen dan menghasilkan nilai kuat lentur yang lebih seragam. Sebaliknya, nilai standar deviasi yang lebih besar pada beton normal dan BCT-15 menunjukkan adanya variasi hasil yang sedikit lebih tinggi antar benda uji, yang dapat dipengaruhi oleh faktor heterogenitas material, distribusi partikel, serta interaksi antara pasta semen dan agregat.

Jika ditinjau dari koefisien variasi (COV), seluruh variasi berada dalam kisaran sekitar 4% hingga 9%, yang masih tergolong rendah dan menunjukkan bahwa proses pencampuran, pengecoran, dan pengujian telah dilakukan dengan tingkat ketelitian yang baik. Dengan demikian, perbedaan nilai kuat lentur antar variasi tidak hanya signifikan secara rata-rata, tetapi juga didukung oleh tingkat penyebaran data yang relatif terkendali. Secara keseluruhan, hasil ini memperkuat bahwa tren penurunan kuat lentur akibat peningkatan kadar substitusi cangkang telur merupakan fenomena yang konsisten dan dapat dipercaya, bukan disebabkan oleh fluktuasi data pengujian semata.

Berdasarkan nilai standar deviasi pada Tabel 8, maka hasil pengujian kuat lentur diperkuat dengan menghitung nilai statistiknya. Oleh karena itu, digunakan One-Way ANOVA (*Analysis of Variance*) untuk menghitung nilai statistiknya dan diperlihatkan pada Tabel 9 berikut.

Tabel 9. Hasil analisis statistik One-Way ANOVA

Sumber Variasi	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig. (p)
Antar kelompok	9,450	3	3,150	59,992	<0,001
Dalam kelompok	0,840	16	0,053		
Total	10,290	19			

Tabel 9 digunakan untuk mengetahui apakah perbedaan kuat lentur antarvariasi beton memiliki signifikansi statistik. Hasil analisis menghasilkan nilai F sebesar 59,992 dengan nilai signifikansi $p < 0,001$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan kuat lentur yang sangat signifikan secara statistik antarvariasi beton. Dengan demikian, penurunan kuat lentur yang terjadi seiring dengan peningkatan kadar substitusi cangkang telur tidak hanya terlihat secara numerik, tetapi juga didukung oleh hasil analisis statistik.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penggunaan limbah cangkang telur sebagai substitusi sebagian semen dan agregat halus menyebabkan penurunan kuat lentur balok seiring dengan peningkatan kadar substitusi. Pada umur 28 hari, kuat lentur beton normal sebesar 4,11 MPa, sedangkan substitusi 5%, 10%, dan 15% menghasilkan kuat lentur masing-masing sebesar 3,12 MPa, 2,57 MPa, dan 2,32 MPa. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, substitusi hingga 10% masih menunjukkan nilai kuat lentur yang berada dalam batas yang digunakan dalam penelitian, sedangkan substitusi 15% menunjukkan kinerja yang lebih rendah. Dengan demikian, kadar substitusi hingga 10% dapat dipertimbangkan sebagai batas awal berdasarkan parameter kuat lentur umur 28 hari, namun belum dapat dinyatakan memenuhi seluruh persyaratan untuk VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal 8, 2 (2026): hal. 114-132

aplikasi struktural karena parameter mekanis dan durabilitas lainnya belum dievaluasi. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji kuat tekan, durabilitas, perkembangan kekuatan pada berbagai umur, serta kinerja elemen struktural dengan pembebanan yang lebih representatif untuk memperoleh dasar yang lebih kuat dalam menentukan kelayakan penggunaan cangkang telur pada beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, A., Abubakr, P., & Salih Mohammed, A. (2023). Efficient models to evaluate the effect of C3S, C2S, C3A, and C4AF contents on the long-term compressive strength of cement paste. *Structures*, 47, 1459–1475. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.114>
- American Concrete Institute. (2022). ACI PRC-211.1-22: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete. *ACI PRC-211.1-22, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*, 1–38.
- American Society for Testing and Materials. (2001). Standard test method for specific gravity and water absorption of coarse aggregate (ASTM Standard No. C127-01). *ASTM International*, 04(Reapproved), 1–5.
- American Society for Testing and Materials. (2003). Standard specification for concrete aggregates (ASTM Standard No. C33-03). *ASTM International*.
- American Society for Testing and Materials. (2010). Standard test method for bulk density (“unit weight”) and voids in aggregate (ASTM Standard No. C29/C29M-97). *ASTM International*.
- American Society for Testing and Materials. (2019). Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates (ASTM Standard No. C136/C136M-19). *ASTM International*, 3–7.
- Badan Standarisasi Nasional. (2011). Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan. *Badan Standar Nasional Indonesia*, 4431, 1–16.
- Bunyamin, B., Hady, M., Hendrifa, N., & Syakir, A. (2023). Analisis kuat tekan beton menggunakan bahan substitusi serat roving dan cangkang tiram. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(3). <https://doi.org/10.32672/jse.v8i3.6073>
- Bunyamin, B., Hady, M., Munirwan, R. P., & Putra Jaya, R. (2024). Cymbopogon nardus leaf ash as an alternative material for enhancing concrete strength. *Advances in Civil Engineering*, 2024, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2024/4997651>
- Bunyamin, B., Hendrifa, N., & Ridha, M. (2021). Pengaruh substitusi cangkang tiram sebagai pengganti sebahagian semen dan pasir halus terhadap kuat tarik belah beton. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 272–281. <https://doi.org/10.29103/tj.v11i2.486>
- Bunyamin, B., Herwandi, H., Pramanda, H., Munirwan, R. P., Putra Jaya, R., & Albar, N. (2026). Effect of waste oyster shell substitution on the compressive strength of high-strength concrete. *Progress in Engineering Science*, 3(1), 100228. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2026.100228>
- Bunyamin, B., Kurniasari, F. D., Munirwan, R. P., & Putra Jaya, R. (2022). Effect of coral aggregates of blended cement concrete subjected to different water immersion condition. *Advances in Civil Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2919167>
- Bunyamin, B., Mahasin, A., Djafar, T., Sulaiman, S., & Jaya, R. P. (2026). The effect of Cymbopogon nardus leaf ash on the setting time of cement paste. *Next Materials*, 11, 101657. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.101657>
- Bunyamin, B., & Mukhlis, A. (2020). Utilization of oyster shells as a substitute part of cement and fine aggregate in the compressive strength of concrete. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 9(3), 150–156. <https://doi.org/10.13170/aijst.9.3.17761>
- Bunyamin, B., Munirwan, R. P., Ridha, M., & Hendrifa, N. (2021). Utilization of wood processing dust as a substitute for a part of cement in concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1087(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1087/1/012004>
- Bunyamin, B., Pramanda, H., Yusputri, R. M., & Gea, W. B. D. (2026). Effects of snail shell waste on compressive strength of concrete with partial cement and fine aggregate replacement. *Proceedings of International Conference on Multidisciplinary Research*, 8(1), 156–169.
- Bunyamin, B., Saidi, T., Sugiarto, S., & Hasan, M. (2025). Calcination analysis of CaCO₃ from waste oyster shells for partial cement replacement. *SDHM Structural Durability and Health Monitoring*, 19(5), 1089–1109. <https://doi.org/10.32604/sdhm.2025.066887>
- Bunyamin, Pramanda, H., Hendrifa, N., & Afdhal. (2023). Limbah cangkang telur sebagai inovasi material pengganti agregat halus beton. *Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil*, 6(1), 17–30. <https://doi.org/10.30737/jurmateks.v6i1.4583>
- Diningsih, C., & Rohmawati, L. (2022). Synthesis of calcium carbonate (CaCO₃) from eggshell by

- calcination method. *Indonesian Physical Review*, 5(3), 208–215. <https://doi.org/10.29303/ipr.v5i3.174>
- Elavarasan, S., Priya, A. K., Elango, K. S., & Shahithya, S. (2023). A review on addition of egg shell powder to CSEB blocks. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.718>
- Ghaffar, F. S. A., Mohd Zuki, S. S., Shahidan, S., Mohamed Nazri, F., Abdul Rahim, M., Mohammad Azmi, M. A., Abdul Rahman, N., & Ibrahim, M. H. W. (2021). Mechanical properties of concrete containing untreated palm oil fuel ash and egg shell powder. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 157 LNCE, 259–270. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2187-1_23
- Guo, Y., Luo, L., Liu, T., Hao, L., Li, Y., Liu, P., & Zhu, T. (2024). A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 136, 682–697. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.021>
- Hady, M., Bunyamin, B., Darwin, D., Rahman, A., & Satria, A. (2022). Pemanfaatan cangkang keong sawah sebagai substitusi sebahagian semen dan agregat halus terhadap kuat tekan beton. *Jurnal Teknik Sipil Dan Teknologi Konstruksi*, 8(1). <https://doi.org/10.35308/jts-utu.v8i1.5198>
- Handayani, T. (2019). Memprediksi kuat lentur berdasarkan kuat tekan beton normal. *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi*, 18(2), 197–211. <https://doi.org/10.35760/dk.2019.v18i2.2699>
- Hasan, M., Riski, A. D. D., Saidi, T., Husaini, & Rahman, P. N. (2020). Flexural and splitting tensile strength of high strength concrete with diatomite micro particles as mineral additive. *Defect and Diffusion Forum*, 402 DDF, 50–55. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.402.50>
- Ibeabuchi, V. T., Akosubo, I. S., Chukwuemeka, B., & Eneh, S. S. (2023). Valorization and utilization of nano-CaO from eggshell waste in concrete composites for sustainable structures. *African Scientific Research and Innovation Council*, 2023, 4(1), 283–289.
- Imani, R., Nasmirayanti, R., Suandi, R., & Oktavani, D. L. (2025). The improvement of self-compacting concrete strength with ESP-glass powder as a substitute for concrete admixture. *International Journal of Engineering Technology and Natural Sciences*, 7(1), 87–94. <https://doi.org/10.46923/ijets.v7i1.479>
- Kumar Das, M., Singh, P., & Bishnoi, S. (2023). Influence of eggshell powder in ordinary concrete for sustainable environment. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.220>
- Lakhari, M. T., & Kong, S. Y. (2022). Strength and workability of concrete incorporating silica fume and egg shell powder as cement replacement. *Proceedings of 2021 4th International Conference on Civil Engineering and Architecture*, 201, 171–180. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6932-3_15
- Li, L., Liu, Q., Dao, V., & Wu, M. (2023). Dimensional change of cement paste subjected to carbonation in CO₂ sequestration and utilization context: a critical review on the mechanisms. *Journal of CO₂ Utilization*, 70, 102444–102457. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2023.102444>
- Mahmood, L., Rafiq, S., & Mohammed, A. (2022). A review study of eggshell powder as cement replacement in concrete. *Sulaimani Journal for Engineering Sciences*, 9(1), 25–38. <https://doi.org/10.17656/sjes.10150>
- Mehdizadeh, H., Jia, X., Mo, K. H., & Ling, T. C. (2021). Effect of water-to-cement ratio induced hydration on the accelerated carbonation of cement pastes. *Environmental Pollution*, 280, 116914. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116914>
- Mindess, S., & Young, J. F. (2002). *Concrete*. Prentice Hall.
- Mulyati, M., & Arkis, Z. (2020). Pengaruh metode perawatan beton terhadap kuat tekan beton normal. *Jurnal Teknik Sipil ITP*, 7(2), 78–84. <https://doi.org/10.21063/jts.2020.v7i2.05>
- N. Li, L. Mo, & C. Unluer. (2022). Emerging CO₂ utilization technologies for construction materials: A review. *Journal of CO₂ Utilization*, 65, 1–2.
- Nandhini, K., & Karthikeyan, J. (2022). Sustainable and greener concrete production by utilizing waste eggshell powder as cementitious material – a review. *Construction and Building Materials*, 335, 127482. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127482>
- Nivedha J, K., Mallik, M., Priya M, G., & Dubey, S. (2025). Performance and microstructural evaluation of sustainable self-compacting concrete incorporating eggshell powder and fly ash as environmentally sustainable cement replacements. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 48, 102182. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.102182>
- Rux, K., Tuen, M., & Suraneni, P. (2025). Utilization of common shell wastes as a limestone alternative in cementitious materials. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 58(9), 1–15. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02832-5>
- Sathvik, S., Edwin, A., Basnett, A., Sharma, P., & Carmicheal, J. (2019). Experiment of partial replacement of egg shell powder and coconut fibre in concrete. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(6 Special Issue 4), 1034–1038. <https://doi.org/10.35940/ijitee.F1213.0486S419>
- Shetty, M. S., & Jain, A. K. (2019). *Concrete technology (theory and practice)*, 8e. S. Chand Publishing.
- VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal 8, 2 (2026): hal. 114-132

- Tan, Y. Y., Doh, S. I., & Chin, S. C. (2018). Eggshell as a partial cement replacement in concrete development. *Magazine of Concrete Research*, 70(13), 662–670. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00003>
- Tayeh, B. A., Hasaniyah, M. W., Zeyad, A. M., & Yusuf, M. O. (2019). Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117723.
- Therdthai, N., Soontrunnarudrungsri, A., & Khotchai, W. (2023). Modified eggshell powder using thermal treatment and its application in Ca-fortified dog biscuits. *Heliyon*, 9(2), 13093–13103. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13093>
- Vasudevan, G., & Chan Wei, S. (2020). Utilisation of eggshell powder (ESP) as partial replacement of cement incorporating superplasticizer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 840(1), 12016–12022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/840/1/012016>
- Wang, J., Liu, E., & Li, L. (2019). Characterization on the recycling of waste seashells with Portland cement towards sustainable cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 220, 235–252. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.122>
- Wei, C. B., Othman, R., Ying, C. Y., Jaya, R. P., Ing, D. S., & Mangi, S. A. (2020). Properties of mortar with fine eggshell powder as partial cement replacement. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1574–1581. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.240>
- Wembe, J. T., Ngueyep, Luc Leroy Mambou Moukete, E. E. A., Eslami, J., Pliya, P., Ndjaka, J. M. B., & Noumowe, A. (2023). Physical, mechanical properties and microstructure of concretes made with natural and crushed aggregates: Application in building construction. *Cleaner Materials*, 7, 100173–100189. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100173>
- Wilson, W., Gonthier, J. N., Georget, F., & Scrivener, K. L. (2022). Insights on chemical and physical chloride binding in blended cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 156, 106747. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106747>
- Xuan, M. Y., Lin, R. S., Min, T. B., & Wang, X. Y. (2023). Carbonation treatment of eggshell powder concrete for performance enhancement. *Construction and Building Materials*, 377, 130814. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130814>
- Yang, B., & Wang, X. Y. (2025). Analysis of hydration strength and CO₂ emissions of cement–quartz powder binary blends considering the effects of water/binder ratios and quartz contents. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/app15041923>
- Yang, D., Zhao, J., Ahmad, W., Nasir Amin, M., Aslam, F., Khan, K., & Ahmad, A. (2022). Potential use of waste eggshells in cement-based materials: a bibliographic analysis and review of the material properties. *Construction and Building Materials*, 344, 128143. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128143>
- Yerramala, A. (2014). Properties of concrete with eggshell powder as cement replacement. *Indian Concrete Journal*, 88(10), 94–102.
- Zhang, G. Y., Oh, S., Han, Y., Meng, L. Y., Lin, R., & Wang, X. Y. (2024). Influence of eggshell powder on the properties of cement-based materials. *Materials*, 17(7), 1705–1722. <https://doi.org/10.3390/ma17071705>
- Zhu, Y., Chen, D., Yu, X., Liu, R., & Liao, Y. (2024). Properties of cementitious materials utilizing seashells as aggregate or cement: prospects and challenges. *Materials*, 17(5), 1222. <https://doi.org/10.3390/ma17051222>