

Penggunaan Cangkang Kemiri Sebagai Bahan Penambah Sebagian Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan Beton

*Much Jawahirul Umam Al Anwari, Rasio Hepiyanto & Edy Gardjito

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Lamongan

*)jawahirulumam0@gmail.com

Received: 22 Juni 2026, Revised: 04 Agustus 2026, Accepted: 05 Agustus 2026

Abstract

The continuously increasing demand for coarse aggregate in concrete construction impacts natural resource exploitation, necessitating eco-friendly material alternatives such as candlenut shell waste. This study aims to determine the effect of adding candlenut shell waste on the compressive strength of concrete with a target strength of 25 MPa and to identify the optimal mixture percentage. The research method applied was laboratory experimental. A total of 12 cylindrical specimens measuring 150 x 300 mm were utilized, divided into 4 mixture variations (0%, 2%, 4%, and 6% by weight of coarse aggregate) with 3 samples each. Compressive strength testing was conducted at 28 days according to SNI 03-1974-2011 standards. Data were analyzed using comparative descriptive analysis by comparing the mechanical properties of each variation against normal concrete. Results indicated that adding candlenut shells tended to decrease compressive strength as the mixture percentage increased. The 2% variation yielded an average compressive strength of 24,98 MPa, 4% yielded 24,70 MPa, and 6% yielded 23,97 MPa. Although candlenut shells did not increase compressive strength, the 2% proportion was most optimal, closely approaching normal concrete (25,24 MPa). The strength reduction was caused by the lightweight and porous nature of candlenut shells affecting concrete density.

Keywords: Concrete, Candlenut Shells, Compressive Strength, Coarse Aggregate, Experimental

Abstrak

Kebutuhan agregat kasar yang terus meningkat dalam konstruksi beton berdampak pada eksploitasi sumber daya alam, sehingga diperlukan alternatif material ramah lingkungan seperti limbah cangkang kemiri. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan limbah cangkang kemiri terhadap kuat tekan beton mutu rencana 25 MPa serta menentukan persentase campuran yang optimal. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental laboratorium. Sampel yang digunakan berjumlah 12 benda uji silinder berukuran 150 x 300 mm, yang terbagi dalam 4 variasi campuran (0%, 2%, 4%, dan 6% dari berat agregat kasar) dengan masing-masing 3 sampel. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari sesuai standar SNI 03-1974-2011. Data dianalisis secara deskriptif komparatif dengan membandingkan nilai mekanis setiap variasi terhadap beton normal. Hasil penelitian menunjukkan penambahan cangkang kemiri cenderung menurunkan kuat tekan beton seiring bertambahnya persentase campuran. Variasi 2% menghasilkan kuat tekan rata-rata 24,98 MPa, variasi 4% sebesar 24,70 MPa, dan variasi 6% sebesar 23,97 MPa. Penambahan cangkang kemiri tidak meningkatkan kuat tekan, namun persentase 2% merupakan campuran paling optimal karena menghasilkan nilai yang paling mendekati beton normal (25,24 MPa). Penurunan kekuatan disebabkan sifat cangkang kemiri yang ringan dan berpori sehingga memengaruhi kepadatan beton.

Kata kunci: Beton, Cangkang Kemiri, Kuat Tekan, Agregat Kasar, Eksperimental

Pendahuluan

Pesatnya pertumbuhan industri konstruksi di Indonesia berdampak langsung pada melonjaknya

permintaan material beton, khususnya agregat kasar yang mayoritas dieksploitasi dari sumber daya alam non-terbarukan (Fiorenzeza, 2025). Eksploitasi batu pecah secara masif ini

mengancam kelestarian lingkungan dan mempercepat penurunan cadangan material alam (Azizah et al., 2024). Menanggapi isu tersebut, inovasi teknologi beton kini dialihkan menuju konsep beton ramah lingkungan (*green concrete*) melalui pemanfaatan limbah industri maupun pertanian sebagai bahan substitusi parsial (Simanjuntak & Saragi, 2021; Tiyani et al., 2024)

Salah satu potensi limbah organik yang sangat melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal di sektor konstruksi adalah limbah cangkang kemiri (Cahyono et al., 2023; Marcellino et al., 2025). Karakteristik fisik cangkang kemiri yang keras, bertekstur kasar, serta memiliki ketahanan mekanis teoritis membuka peluang penggunaannya sebagai pengganti agregat kasar (Haris, 2020; Zuraidah et al., 2022). Namun, penggunaan limbah ini menghadapi tantangan pada ikatan antarmuka (*interfacial transition zone*) (Dahlan & Yogaswara, 2023). Sifat cangkang yang lebih berpori dan memiliki absorpsi air tinggi menyebabkan interaksi antar-material berbeda dibandingkan dengan agregat alami pada umumnya (Mulyati & Adman, 2019; Swandi & Muhammadiyah, 2025)

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengeksplorasi penggunaan cangkang kemiri dengan variasi persentase yang beragam, namun menunjukkan hasil yang belum konsisten. Penelitian oleh Hudori (2019) menguji substitusi cangkang kemiri dalam persentase tinggi, yaitu 0%, 10%, 15%, 20%, dan 25%, yang menghasilkan penurunan kuat tekan secara drastis sehingga beton hanya cocok untuk aplikasi non-struktural atau beton ringan. Di sisi lain, Mulyati & Adman (2019) menguji variasi rendah 0,25%, 0,5%, 0,75%, 1%, tetapi menggunakan bahan tambah kimia (*Sikacim concrete additive*), yang mana peningkatan kuat tekan dominan dipengaruhi oleh aditif kimia tersebut.

Melalui analisis dari penelitian-penelitian terdahulu tersebut, terlihat belum adanya kajian mendalam mengenai penggunaan cangkang kemiri murni pada rentang kadar rendah hingga sedang (2%, 4%, dan 6%) tanpa bantuan aditif kimia pada target mutu beton struktural menengah f_c' 25 MPa. Di sinilah letak kebaruan (*novelty*) penelitian ini, yaitu menguji signifikansi substitusi cangkang kemiri kadar rendah demi menemukan titik keseimbangan mekanis antara pemanfaatan limbah dan pemenuhan standar teknis SNI. Secara praktis, implikasi riset ini diproyeksikan dapat menekan ketergantungan industri terhadap agregat alami serta mengoptimalkan pengelolaan limbah pertanian lokal di wilayah Lamongan dan sekitarnya.

Mengacu pada premis dan celah penelitian tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menganalisis sifat mekanis beton beragregat cangkang kemiri. Tujuan yang ingin dicapai meliputi identifikasi dampak variasi kadar limbah (2%, 4%, dan 6%) terhadap nilai kuat tekan mutu rencana 25 MPa, serta penentuan persentase substitusi optimum agar beton tetap memenuhi spesifikasi teknis bangunan struktural.

Metode

Penelitian ini menerapkan pendekatan kuantitatif berbasis eksperimen murni (*true experiment*) yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Islam Lamongan. Pemilihan metode eksperimen murni didasari oleh kebutuhan untuk mengontrol seluruh variabel lingkungan dan material uji secara ketat, mengisolasi faktor-faktor pengganggu dari luar, serta mengukur secara presisi hubungan sebab-akibat antara tingkat substitusi cangkang kemiri terhadap performa mekanis beton. Melalui pendekatan ini, variasi kadar limbah dapat dimanipulasi secara terukur sehingga dampak langsungnya terhadap karakteristik beton segar maupun beton keras dapat dianalisis secara akurat dan objektif.

Fokus eksperimen diarahkan pada investigasi karakteristik mekanis beton, khususnya nilai kuat tekan, akibat pengaruh substitusi cangkang kemiri sebagai pengganti sebagian agregat kasar. Alur penelitian ini dirancang secara sistematis dan kronologis, dimulai dari analisis sifat fisik material penyusun, perancangan komposisi adukan (*mix design*), pencetakan benda uji, perawatan (*curing*), hingga pelaksanaan pengujian kuat tekan pada umur hidrasi 28 hari sesuai standar SNI 03-1974-2011 (Manganta et al., 2023; Sutanto et al., 2021).

Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan ukuran standar diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Total sampel dalam penelitian ini berjumlah 12 benda uji silinder, yang terbagi ke dalam 4 variasi campuran dengan masing-masing variasi terdiri dari 3 sampel untuk menjamin keterwakilan data (*repeatability*). Variasi campuran terdiri dari beton kontrol/normal 0% serta beton substitusi cangkang kemiri sebesar 2%, 4%, dan 6% dari berat total agregat kasar.

Dasar pemilihan variasi kadar 2%, 4%, dan 6% merujuk pada evaluasi riset-riset terdahulu (Hudori & Wijaya, 2019) yang menunjukkan bahwa penggunaan substitusi cangkang kemiri pada variasi 0%, 10%, 15%, 20%, dan 25%, mengakibatkan penurunan kuat tekan yang sangat drastis akibat sifat cangkang yang ringan dan

berpori. Oleh karena itu, rentang variasi rendah 2%, 4%, dan 6% ditetapkan sebagai upaya optimasi agar beton substitusi limbah masih mampu mempertahankan kepadatan struktur internal dan mencapai target mutu beton struktural $f_c' 25 \text{ Mpa}$.

Data pengujian mekanis dianalisis secara deskriptif komparatif dengan membandingkan nilai kuat tekan rata-rata setiap variasi substitusi terhadap beton normal (0%). Penurunan atau kenaikan kekuatan dihubungkan dengan sifat fisik cangkang kemiri dan pengaruhnya terhadap kepadatan struktur internal beton. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk menentukan persentase penggunaan limbah cangkang kemiri yang paling efisien dalam menghasilkan beton yang memenuhi persyaratan teknis struktural

Data dan Material Penelitian

Data yang dikumpulkan bersumber dari pengujian karakteristik bahan penyusun serta spesimen beton silinder berukuran standar 150 mm x 300 mm. Penelitian ini mengintegrasikan semen Portland, agregat kasar dan halus, air, serta pemanfaatan limbah cangkang kemiri. Ditinjau dari sifat fisiknya, cangkang kemiri memiliki massa yang lebih ringan dibandingkan dengan batuan pecah alami pada umumnya. Perbedaan densitas ini mengisyaratkan perlunya pengawasan intensif terhadap penentuan nilai faktor air semen (FAS) agar sifat kemudahan pengerjaan (*workability*) campuran beton tetap terjaga secara optimal.

Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi langsung terhadap hasil pengujian laboratorium. Proses pembuatan campuran beton mengacu pada standar mutu rencana 25 MPa dengan variasi penambahan cangkang kemiri sebesar 0% (beton normal), 2%, 4%, dan 6% dari berat agregat kasar. Penimbangan bahan dilakukan secara presisi untuk menjaga konsistensi campuran sesuai dengan perhitungan mix design yang telah ditetapkan. Setelah benda uji dicetak dan melewati masa perawatan selama 28 hari dengan cara perendaman, dilakukan pengujian beban tekan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) sesuai dengan prosedur standar nasional (SNI).

Analisa Data

Data hasil pengujian sifat mekanis dan kuat tekan beton dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif dan komparatif. Analisis dilakukan

dengan menghitung nilai rata-rata (*mean*), deviasi standar (*standard deviation*), serta persentase perubahan kuat tekan dari setiap variasi campuran (2%, 4%, dan 6%) terhadap beton kontrol (0%) dan mutu rencana 25 MPa pada umur 28 hari. Selain melihat pola tren kuantitatif, analisis komparatif dilakukan untuk mengevaluasi signifikansi perbedaan penurunan kuat tekan antarvariasi campuran guna menentukan persentase substitusi cangkang kemiri yang paling optimal.

Hasil dan Pembahasan

Pengujian material

Pengujian material dilakukan untuk mengetahui kualitas bahan penyusun beton sehingga campuran yang digunakan memenuhi persyaratan dalam perencanaan beton normal (Masherni, 2020). Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian semen, agregat halus, dan agregat kasar berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) (Firmanilah Kamil, 2023). Berdasarkan pengujian laboratorium yang dilakukan terhadap benda uji silinder pada umur 28 hari, diperoleh data kuat tekan beton untuk setiap variasi campuran. Data hasil pengujian dirangkum dalam tabel berikut:

Tabel 1. Pengujian material

Standar Pengujian	Hasil Pengujian	Keterangan
SNI 03-6826-2002	28,8%	Memenuhi (26% - 29%.)
SNI 15-2531-1991	3,01	Memenuhi (3,05 – 3,25 g/cm ³)
SNI 1971:2011	1,63%	Memenuhi (1%-3%,)
SNI 03-1968-1990	3,46%	Memenuhi (2,5% – 3,5 %.)
SNI 1970:2016	1,01%.	Memenuhi (<5%)
SNI 1970:2016	2,50	Memenuhi (2,3 – 2,9 gr/dm ³)
SNI 03-4804-1998	1,55	Memenuhi (1,2 – 1,75 kg/liter.)
SNI 03-1968-1990	6,26%,	Memenuhi (6% – 8 %.)
SNI 1971:2011	2%	Memenuhi

(0-2%)

SNI 1969:2016	2%	Memenuhi
(2,4 – 2,9 gr/dm ³)		
SNI 1969:2016 (< 3%)	2,13%	Memenuhi
SNI 03-4804-1998	1,52	Memenuhi
(1,4 – 1,9 kg/liter)	kg/liter	

Berdasarkan hasil pengujian material pada Tabel 1. Hasil tersebut menunjukkan bahwa material yang digunakan dalam penelitian ini layak digunakan dalam proses pencampuran beton mutu $f_c' 25$ MPa. Dengan terpenuhinya seluruh persyaratan material, maka hasil pengujian kuat tekan beton diharapkan dapat menggambarkan pengaruh penambahan cangkang kemiri secara lebih akurat tanpa dipengaruhi oleh kualitas bahan dasar yang tidak memenuhi standar.

Komposisi campuran beton

Perancangan campuran beton dilakukan berdasarkan mutu rencana $f_c' 25$ MPa dengan mengacu pada metode SNI 03-2834-2000 serta pedoman Kementerian PUPR (2022). Pada penelitian ini digunakan empat variasi campuran, yaitu beton normal tanpa penambahan cangkang kemiri serta beton dengan penambahan cangkang kemiri sebesar 2%, 4%, dan 6% dari berat agregat kasar. Variasi tersebut dibuat untuk mengetahui pengaruh penggunaan limbah cangkang kemiri terhadap karakteristik beton yang dihasilkan. Adapun komposisi bahan penyusun pada masing-masing variasi campuran disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi campuran beton benda uji berbentuk silinder

Kode	Semen (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)	Cangkang Kemiri (kg)	Air (kg)
BN	10.19	16.98	23.94	0.00	4.89
V1	10.19	16.98	23.94	0.48	4.89
V2	10.19	16.98	23.94	0.96	4.89
V3	10.19	16.98	23.94	1.43	4.89

Pada tabel 2 diperoleh komposisi dari setiap bahan dengan benda uji berbentuk tabung atau silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Perencanaan komposisi tersebut dilakukan dengan menggunakan pedoman dari SNI 03 – 2834 – 2000 Komposisi dari bahan tambah cangkang kemiri

yang diperoleh dengan metode menambah sesuai dengan kadar yang direncanakan terhadap komposisi dari berat agregat kasar yang sebelumnya didapatkan dari perhitungan.

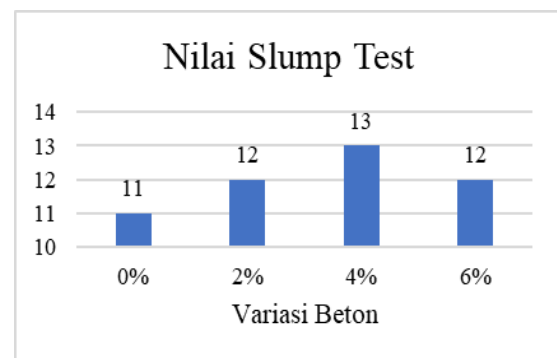
Pengujian slump

Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui tingkat kelecakan (*workability*) beton segar sebelum proses pencetakan benda uji. Nilai slump menunjukkan kemampuan campuran beton untuk dikerjakan dan dipadatkan tanpa mengalami segregasi. Pengujian ini penting dilakukan untuk memastikan bahwa penambahan cangkang kemiri tidak menyebabkan perubahan yang signifikan terhadap konsistensi campuran beton. Hasil pengujian slump untuk setiap variasi campuran dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Uji Slump

No	Variasi Beton	Nilai Slump Test (cm)
1	Beton Normal	11
2	Beton dengan Cangkang Kemiri 2%	12
3	Beton dengan Cangkang Kemiri 4%	13
4	Beton dengan Cangkang Kemiri 6%	12

Berdasarkan data pada Tabel 3, tingkat konsistensi paling kental berada pada beton normal yaitu sebesar 11 cm. Sementara itu, penambahan cangkang kemiri sebesar 2% dan 6% menghasilkan nilai slump 12 cm, serta variasi 4% mencapai nilai tertinggi yaitu 13 cm. Pola perubahan dan fluktuasi tingkat kelecakan beton segar antarvariasi campuran tersebut diperjelas secara visual melalui tren grafik pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil nilai slump

Nilai slump yang berada pada rentang 11–13 cm ini menunjukkan bahwa seluruh variasi adukan

beton masih memenuhi kriteria workabilitas yang baik dan mudah untuk diaplikasikan di lapangan

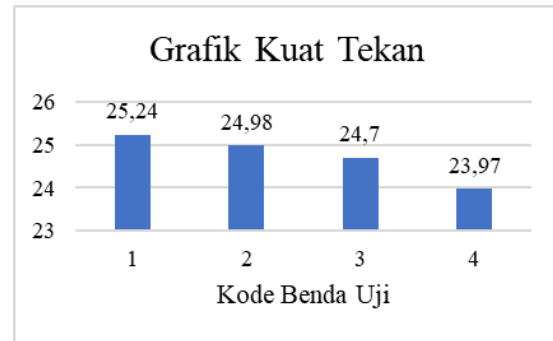
Pengujian kuat tekan beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari untuk mengetahui kemampuan beton dalam menahan beban tekan setelah proses perawatan (*curing*). Pengujian ini merupakan parameter utama dalam menentukan kualitas dan kekuatan beton sesuai mutu rencana yang ditetapkan. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan ukuran 150 mm × 300 mm dan diuji menggunakan mesin *Compression Testing Machine* (CTM). Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton pada masing-masing variasi campuran disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari

Kode Benda uji	Rata - Rata Tegangan Hancur (kg/cm ²)	Tegangan Hancur 28 hari (Mpa)	Rata - Rata Tegangan Hancur (Mpa)
N I		25.23	
N II	304.05	25.18	25.24
N III		25.29	
2% I		24.99	
2% II	300.96	24.97	24.98
2% III		24.98	
4% I		24.73	
4% II	297.53	24.73	24.70
4% III		24.62	
6% I		24.07	
6% II	288.74	23.89	23.97
6% III		23.93	

Pada Tabel 4 dapat diinterpretasikan bahwa pada umur 28 hari, kuat tekan beton normal mencapai rata-rata 304,05 kg/cm² (25,24 MPa). Sementara itu, beton dengan penambahan cangkang kemiri sebesar 2%, 4%, dan 6% menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata secara berturut-turut sebesar 300,96 kg/cm² (24,98 MPa), 297,53 kg/cm² (24,70 MPa), dan 288,74 kg/cm² (23,97 MPa). Gradien penurunan nilai kuat tekan silinder beton dari variasi kontrol hingga variasi 6% disajikan secara sistematis pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil uji kuat tekan

Gambar 2 memperlihatkan bahwa penambahan cangkang kemiri sebesar 2% menghasilkan kualitas yang paling optimal dan sangat mendekati beton normal (25,24 MPa) dibandingkan variasi lainnya. Variasi 2% masih mampu mempertahankan kuat tekan beton karena porsi substitusi cangkang kemiri (0,48 kg) tergolong sangat kecil jika dibandingkan dengan berat agregat kasar alami (23,94 kg). Pada kadar rendah ini, kerangka utama beton masih didominasi oleh batu pecah konvensional yang mampu menopang beban tekan utama secara efisien. Selain itu, kandungan silika pada cangkang kemiri dalam jumlah terbatas masih mampu bereaksi membentuk gel C-S-H sekunder tanpa mengganggu kepadatan matriks beton secara keseluruhan (Muziburrahman et al., 2023). Sebaliknya, pada variasi 4% dan 6%, jumlah cangkang yang semakin banyak memperbesar area berpori dan melemahkan ikatan antarmuka (*Interfacial Transition Zone*), sehingga penurunan kuat tekan menjadi lebih signifikan.

Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium, penambahan limbah cangkang kemiri sebagai substitusi sebagian agregat kasar memberikan pengaruh terhadap nilai kuat tekan beton mutu rencana 25 MPa pada umur 28 hari. Hasil pengujian menunjukkan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 25,24 MPa pada beton normal (0%), 24,98 MPa pada variasi 2%, 24,70 MPa pada variasi 4%, dan 23,97 MPa pada variasi 6%. Nilai kuat tekan mengalami penurunan secara bertahap seiring bertambahnya persentase cangkang kemiri dalam campuran. Penurunan ini dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik fisik antara cangkang kemiri dengan agregat kasar alami. Agregat kasar batu pecah konvensional memiliki berat jenis *Saturated Surface Dry* (SSD) sebesar 2,73 gr/cm³ dengan angka penyerapan air sebesar 2,13%, sedangkan cangkang kemiri memiliki bobot yang lebih ringan dan struktur yang lebih berpori. Sifat cangkang kemiri yang berpori dan ringan tersebut mengurangi kepadatan beton serta memperlemah

ikatan antara pasta semen dan agregat, sehingga menurunkan kemampuan beton dalam menahan beban tekan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Hudori, (2019), Mulyati & Adman (2019) yang menyatakan bahwa penggunaan cangkang kemiri sebagai pengganti agregat kasar menunjukkan tren penurunan kuat tekan. Persamaan ini disebabkan oleh karakteristik cangkang kemiri yang memang lebih ringan dan kurang padat dibandingkan agregat batu pecah konvensional. Namun demikian, terdapat perbedaan pada tingkat penurunan kekuatan yang dihasilkan. Pada penelitian terdahulu seperti Hudori, (2019) penurunan kuat tekan terjadi sangat besar karena menggunakan persentase substitusi yang tinggi, yaitu di atas 10% hingga 25%. Sementara dalam penelitian ini, penurunan kuat tekan yang terjadi relatif sangat kecil, yaitu dari 25,24 MPa menjadi 23,97 MPa. Perbedaan ini terjadi karena penelitian ini membatasi penggunaan cangkang kemiri pada persentase rendah (2%, 4%, dan 6%), sehingga kerangka utama beton masih didominasi oleh agregat alami yang mampu menopang beban tekan.

Meskipun terjadi penurunan, variasi campuran 2% menghasilkan kuat tekan sebesar 24,98 MPa yang relatif setara dengan beton normal (25,24 MPa) dan masih memenuhi mutu rencana 25 MPa. Hal ini memberikan implikasi praktis bahwa limbah cangkang kemiri pada kadar rendah (2%) sangat berpotensi dan layak diaplikasikan dalam pembuatan beton ramah lingkungan untuk konstruksi struktural gedung maupun komponen beton pra-cetak. Pemanfaatan limbah ini dapat memberikan nilai ekonomis, mengurangi penumpukan limbah organik di daerah Lamongan, serta menekan eksploitasi agregat batuan alam.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, yaitu pengujian mekanis yang dilakukan baru terbatas pada uji kuat tekan silinder umur 28 hari, serta belum dilakukannya perlakuan awal (*treatment*) fisik maupun kimiawi pada cangkang kemiri sebelum dicampur. Oleh karena itu, direkomendasikan untuk penelitian selanjutnya agar melakukan pengujian sifat mekanis lainnya seperti kuat tarik belah dan kuat lentur, menguji durabilitas beton, serta memberikan perlakuan awal (*pre-treatment*) atau penambahan bahan tambah (*admixture*) guna meningkatkan ikatan antara cangkang kemiri dan pasta semen.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental, pemanfaatan limbah cangkang kemiri sebagai substitusi parsial agregat kasar terbukti

berpengaruh signifikan terhadap nilai kuat tekan beton mutu rencana f_c' 25 MPa. Secara umum, peningkatan kadar cangkang kemiri menyebabkan penurunan kuat tekan beton secara bertahap akibat karakteristik fisiknya yang memiliki struktur berpori, massa jenis lebih ringan, dan daya serap air yang tinggi. Namun, persentase substitusi sebesar 2% terbukti menjadi kadar optimum yang memberikan nilai kuat tekan terbaik dan paling mendekati target mutu rencana, karena mikrostruktur matriks beton masih terikat cukup padat tanpa mengganggu kepadatan campuran secara signifikan.

Sebaliknya, peningkatan substitusi pada kadar 4% dan 6% memicu peningkatan rongga matriks serta melemahkan ikatan antaragregat (*interfacial transition zone*), sehingga terjadi penurunan mutu yang lebih besar. Dengan demikian, penggunaan cangkang kemiri hingga batas optimum 2% memiliki potensi besar untuk diaplikasikan sebagai material beton ramah lingkungan (*green concrete*) pada elemen konstruksi ringan maupun non-struktural, sekaligus menjadi solusi berkelanjutan dalam pengolahan limbah pertanian lokal.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Laboratorium Teknik Sipil Universitas Islam Lamongan yang telah memberikan fasilitas dan dukungan selama pelaksanaan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Azizah, A., Ariani, I., Fatima, K., Syafira, F., & Rahmat, A. M. (2024). *Beton Ramah Lingkungan: Solusi Hijau Untuk Konstruksi Masa Depan*. 8, 35–40.
- Cahyono, L., Riska, Y., Sinta, D., Jannah, N. R., Fikriyah, I. A., Anwar, N., Ramadona, D., & Putri, S. (2023). *Pemanfaatan limbah abu cangkang kemiri industri makanan sebagai substitusi agregat halus paving block*. 6(3), 677–684.
- Dahlan, A., & Yogaswara, D. (2023). *Studi Efektivitas Penambahan Cangkang Kemiri dan Superlasticizer pada Sifat Mekanik Beton*. 257–264.
- Fiorenteza, G. (2025). *Analisis kuat tekan dan lentur beton menggunakan cangkang kemiri sebagai pengganti agregat kasar dan penambahan serat jerami padi*. 01, 14–22.
- Firmanilah Kamil, N. K. (2023). *Pengujian Awal Agregat Kasar, Agregat Halus, Semen, Dan Air: Fondasi Penelitian Beton Berkualitas*. XI(2), 77–88.
- Haris. (2020). *Studi Kelayakan Penggunaan Cangkang Kemiri Sebagai Pengganti*

- Sebagian Agregat Kasar Terhadap Mutu Beton.* 41–46.
- Hudori, M. (2019). Desain Rancangan Percobaan Pada Pengujian Kuat Tekan Beton Berbahan Campuran Cangkang Kemiri. *Jurnal Univrab*, 4. <https://jurnal.univrab.ac.id/index.php/racic/article/view/749>
- Kementerian PUPR. (2022). *Pelaksanaan pekerjaan beton untuk jalan dan jembatan.*
- Manganta, M., Asik, J., Idris, M., & Salim, A. (2023). Pemanfaatan Kulit Kemiri Sebagai Bahan Substitusi Agregat Halus Dalam Pembuatan Paving Block *Utilization of Candlenut Shells as Substitutes for Fine.* 3(2).
- Marcellino, A., Sariman, S., & Yuniarto, E. (2025). Penggunaan Cangkang Kemiri Sebagai Pengganti Sebagian Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Beton Dengan Zat Tambah Silica Fume. 3(1), 113–122. <https://doi.org/10.56326/jptsk.v3i1.4283>
- Masherni, Y. A. (2020). Analisis Kuat Tekan Beton Menggunakan Bahan Lapangan Dengan Campuran Adiktif Dan. 10(1), 95–104.
- Mulyati, & Adman, A. (2019). Pengaruh Penambahan Cangkang Kemiri dan Sikacim Concrete Additive terhadap Kuat Tekan Beton Normal. 6(2), 38–45. <https://doi.org/10.21063/JTS.2019.V602.01>
- Muziburrahman, I., Anwar, H., & Lestari, A. T. (2023). Karakteristik Biopellet Dari Campuran Limbah Cangkang Kemiri (*Aleurites Moluccana*) Dengan Serbuk Kayu Jati (*Tectona Grandis* Linn). 13, 171–184.
- Simanjuntak, J. O., & Saragi, T. E. (2021). Pengujian kuat tekan beton terhadap penggunaan cangkang kemiri pada beton ramah lingkungan. 2–10.
- Sutanto, H., Abdi, F. N., & Kesuma, R. A. (2021). Pemanfaatan Cangkang Kemiri *Aleurites Moluccana* (Candlenut) Sebagai Agregat Kasar Terhadap Kuat Tekan Beton Ringan. 44–54.
- Swandi, M. D., & Muhammadiyah, M. J. (2025). Uji Mekanis Paving Block Sampah Plastik Dengan Campuran Cangkang Kemiri Ditinjau Dari Nilai Kuat Tekan. <https://doi.org/10.37253/jcep.v6i1.10196>
- Tiyani, L., Amalia, Sukarman, Nursin, A., & Riyadi, M. (2024). Pemanfaatan Limbah Saw, Limbah Beton, Limbah Keramik, Dan Limbah Karet Sebagai Substitusi Agregat. 11(1), 41–45.
- Zuraidah, S., Hastono, K. B., & Jehabut, M. A. (2022). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kemiri Sebagai Substitusi Agregat Kasar Pada Beton. 05(September), 93–98.