



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 2 No 1 June 2026, Hal. 229-238
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptainteletektual.com/scripta-technica>

Analisa Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton dengan Menggunakan Batu Apung Sebagai Substitusi Agregat Halus

Firdaus Rizal Auliya Hadi^{1*}, Ditya Ikram Rif²aa², Pratikso³

¹⁻³ Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Indonesia

email: firdausrizal864@gmail.com¹, rifaaikram@gmail.com²

Article Info :

Received:
23-04-2026
Revised:
05-05-2026
Accepted:
13-05-2026

Abstract

This study aims to analyze the effect of using pumice as a partial substitute for fine aggregate on the compressive strength, splitting tensile strength, flexural strength, unit weight, and workability of lightweight concrete. The research method employed laboratory experiments with a design strength of $f_c' 20$ MPa based on SNI 7656:2012. The pumice substitution levels were set at 0%, 5%, 10%, and 15% of the fine aggregate weight, with the addition of a superplasticizer at 0.5% of the cement weight. Tests were conducted at 7 and 28 days of concrete age using a Universal Testing Machine to obtain the concrete's mechanical parameters. The results showed that increasing the pumice content caused a decrease in the concrete's unit weight and slump value due to the high porosity and water absorption of the pumice aggregate. Substitution levels of 5% and 10% still produced relatively stable compressive strength, tensile strength, and flexural strength, meeting the design quality standards for normal concrete. A 15% substitution showed a more significant decrease in mechanical strength due to increased internal voids and weak interlocking between materials. This study confirms that pumice has the potential to be used as an alternative material in the development of lightweight concrete with controlled weight efficiency and mechanical performance.

Keywords: Pumice, Lightweight Concrete, Compressive Strength, Splitting Tensile Strength, Fine Aggregate Substitution.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penggunaan batu apung sebagai substitusi parsial agregat halus terhadap kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, berat volume, dan workability beton ringan. Metode penelitian menggunakan eksperimen laboratorium dengan mutu rencana $f_c' 20$ MPa berdasarkan SNI 7656:2012. Variasi substitusi batu apung ditetapkan sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat agregat halus dengan penambahan superplasticizer sebesar 0,5% dari berat semen. Pengujian dilakukan pada umur beton 7 dan 28 hari menggunakan Universal Testing Machine untuk memperoleh parameter mekanik beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar batu apung menyebabkan penurunan berat volume beton dan nilai slump akibat tingginya porositas serta daya serap agregat batu apung. Variasi substitusi 5% dan 10% masih menghasilkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur yang relatif stabil serta memenuhi mutu rencana beton normal. Substitusi 15% memperlihatkan penurunan kekuatan mekanik yang lebih signifikan karena meningkatnya rongga internal dan lemahnya interlocking antar material. Penelitian ini menegaskan bahwa batu apung berpotensi digunakan sebagai material alternatif dalam pengembangan beton ringan dengan efisiensi berat dan performa mekanik yang masih terkendali.

Kata kunci: Batu Apung, Beton Ringan, Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, Substitusi Agregat Halus.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan industri konstruksi global dalam dua dekade terakhir menunjukkan kecenderungan yang semakin kuat terhadap penggunaan material bangunan berkelanjutan yang mampu mengurangi beban struktural sekaligus mempertahankan performa mekanik beton sebagai material utama infrastruktur modern. Transformasi paradigma tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh peningkatan kebutuhan pembangunan gedung bertingkat dan infrastruktur berskala besar, tetapi juga oleh meningkatnya tekanan terhadap efisiensi energi, pengurangan emisi karbon, serta optimasi penggunaan sumber daya material alam yang semakin terbatas. Beton ringan menjadi salah satu fokus utama dalam inovasi teknologi material karena dinilai mampu menurunkan dead load struktur tanpa menghilangkan karakteristik dasar beton sebagai material dengan kapasitas tekan tinggi. Agregat ringan alami seperti batu apung mulai mendapatkan perhatian luas karena memiliki densitas rendah, struktur

berpori, dan ketersediaan yang relatif melimpah di wilayah vulkanik, khususnya di Indonesia. Pemanfaatan batu apung sebagai material substitusi agregat halus dipandang relevan dengan kebutuhan pengembangan beton ringan struktural yang tidak hanya ekonomis, tetapi juga memiliki kemampuan adaptif terhadap tuntutan konstruksi modern berbasis efisiensi material dan performa mekanis. Kajian mengenai beton ringan berbasis agregat alternatif juga berkembang sejalan dengan standar perencanaan campuran beton modern yang menekankan pengendalian workability, rasio air semen, dan karakteristik agregat dalam menghasilkan mutu beton yang konsisten sebagaimana diatur dalam SNI 7656:2012 (Nasional, 2012).

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan material substitusi pada agregat halus maupun agregat kasar memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik fisik dan mekanik beton, meskipun hasil yang diperoleh masih menunjukkan kecenderungan yang beragam dan belum sepenuhnya konklusif. Penelitian Alfuady dan Al Qubro (2023) memperlihatkan bahwa substitusi agregat halus menggunakan cangkang kerang dara mampu memengaruhi kuat tekan beton melalui perubahan struktur internal campuran beton yang berdampak pada pola distribusi tegangan dalam matriks semen. Kajian lain oleh Gaus et al. (2023) mengindikasikan bahwa pasir batu apung memiliki potensi dalam menurunkan berat volume beton ringan, namun konsekuensinya berupa penurunan kapasitas tekan akibat meningkatnya porositas internal campuran beton. Temuan tersebut diperkuat oleh penelitian Lomboan et al. (2016) yang menjelaskan bahwa batu apung sebagai agregat ringan efektif mengurangi densitas mortar dan beton, tetapi menghasilkan penurunan integritas mikrostruktur karena lemahnya ikatan antar agregat dan pasta semen. Pada sisi yang berbeda, Irlan et al. (2025) menunjukkan bahwa kombinasi agregat batu apung dengan material serat tertentu justru mampu meningkatkan sebagian sifat mekanis beton ringan, terutama pada aspek daktilitas dan ketahanan tarik, yang mengindikasikan bahwa karakteristik beton berbasis batu apung tidak dapat dinilai semata-mata dari parameter kuat tekan. Penelitian Nasrul et al. (2021) bahkan menegaskan bahwa hubungan antara kuat tekan dan kuat lentur beton tidak selalu bersifat linear karena dipengaruhi oleh homogenitas campuran, kepadatan agregat, dan distribusi rongga udara dalam beton.

Meskipun berbagai studi tersebut telah memberikan fondasi penting bagi pengembangan beton ringan berbasis agregat alternatif, masih terdapat sejumlah keterbatasan konseptual maupun empiris yang menyebabkan hubungan antara penggunaan batu apung dan performa mekanik beton belum dapat dipahami secara komprehensif. Sebagian besar penelitian terdahulu lebih berfokus pada parameter tunggal berupa kuat tekan tanpa mengintegrasikan evaluasi simultan terhadap kuat tarik belah dan perubahan berat jenis beton sebagai satu kesatuan karakteristik struktural material. Penelitian mengenai batu apung juga cenderung menggunakan substitusi agregat kasar dibandingkan agregat halus, padahal peran agregat halus memiliki kontribusi penting terhadap workability, kepadatan pasta semen, dan distribusi rongga mikro dalam beton. Inkonsistensi hasil penelitian juga tampak pada hubungan antara peningkatan kadar batu apung dan kemampuan beton mempertahankan kekuatannya, di mana beberapa penelitian menunjukkan peningkatan performa tarik, sementara penelitian lain justru menemukan penurunan akibat dominasi pori internal material. Persoalan tersebut semakin kompleks karena sifat fisik batu apung yang sangat dipengaruhi oleh asal geologi dan tingkat porositas alaminya, sehingga karakteristik beton yang dihasilkan menjadi sangat kontekstual dan sulit digeneralisasi. Penelitian Purwanto dan Priastiwi (2012) memperlihatkan bahwa kualitas agregat halus, khususnya terkait kadar lumpur dan kebersihan material, memiliki dampak besar terhadap proses hidrasi semen dan pembentukan kekuatan beton, sedangkan Kurniawan (2021) menekankan bahwa variasi distribusi gradasi agregat dapat menghasilkan respons mekanik yang berbeda meskipun menggunakan komposisi campuran yang serupa.

Situasi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan terhadap penelitian yang mampu menjelaskan korelasi antara substitusi batu apung, perubahan densitas beton, serta respons kuat tekan dan kuat tarik belah masih memiliki urgensi ilmiah yang tinggi, terutama dalam konteks pengembangan beton ringan struktural yang sesuai dengan karakteristik material lokal Indonesia. Penggunaan batu apung sebagai material alternatif memiliki nilai strategis karena Indonesia merupakan negara dengan aktivitas vulkanik tinggi yang menghasilkan cadangan batu apung dalam jumlah besar, namun pemanfaatannya dalam teknologi beton masih belum optimal dan sebagian besar terbatas pada aplikasi non-struktural. Permasalahan ini tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis material, tetapi juga menyangkut efisiensi biaya konstruksi dan keberlanjutan pemanfaatan sumber daya alam lokal. Kajian Yazid et al. (2025) menunjukkan bahwa berat volume beton memiliki korelasi langsung terhadap kemampuan beton

menahan beban tekan, sehingga penurunan densitas akibat penggunaan batu apung perlu dianalisis secara cermat agar tidak menghasilkan degradasi kekuatan yang melampaui batas desain struktural. Pada saat yang sama, nilai slump sebagai indikator workability beton juga menjadi parameter penting karena perubahan karakteristik agregat ringan dapat memengaruhi homogenitas campuran dan proses pemadatan beton sebagaimana dijelaskan oleh Globel (2017). Kompleksitas hubungan antar variabel tersebut menunjukkan bahwa evaluasi performa beton ringan tidak dapat dilakukan secara parsial, melainkan harus dipahami sebagai interaksi multidimensional antara karakteristik agregat, rancangan campuran, dan respons mekanik beton yang dihasilkan.

Penelitian ini menempatkan dirinya pada ruang kajian yang berupaya menjembatani kesenjangan empiris dalam penelitian beton ringan berbasis batu apung melalui pendekatan eksperimental yang tidak hanya mengukur perubahan kuat tekan beton, tetapi juga mengevaluasi keterkaitan antara berat volume, kuat tarik belah, dan karakteristik workability pada berbagai tingkat substitusi agregat halus. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang lebih menitikberatkan pada penggunaan batu apung sebagai agregat kasar atau hanya mengevaluasi satu parameter mekanik tertentu, penelitian ini menguji penggunaan batu apung sebagai substitusi parsial agregat halus dalam proporsi bertingkat sehingga memungkinkan analisis yang lebih rinci mengenai batas optimal penggunaan material tersebut terhadap kualitas beton struktural ringan. Pendekatan ini penting karena agregat halus memiliki pengaruh langsung terhadap kepadatan matriks beton dan pembentukan ikatan mikro antar partikel semen, yang pada akhirnya menentukan perilaku tekan dan tarik beton secara simultan. Penggunaan metode pengujian berdasarkan standar SNI juga memberikan landasan metodologis yang lebih terukur sehingga hasil penelitian dapat dibandingkan secara lebih objektif dengan penelitian lain dalam bidang teknologi beton ringan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan batu apung sebagai substitusi agregat halus terhadap berat jenis, kuat tekan, dan kuat tarik belah beton pada berbagai variasi campuran guna menentukan proporsi substitusi yang paling efektif dalam menghasilkan beton ringan dengan performa mekanik yang masih memenuhi persyaratan struktural. Penelitian ini juga diarahkan untuk menghasilkan model pemahaman empiris mengenai hubungan antara karakteristik porositas agregat ringan dengan perubahan perilaku mekanik beton, sekaligus memperluas pendekatan metodologis dalam pengembangan beton ringan berbasis material lokal melalui pengujian simultan terhadap parameter densitas, workability, kuat tekan, dan kuat tarik belah dalam satu desain eksperimental yang terintegrasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen empiris berbasis laboratorium untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan batu apung sebagai substitusi parsial agregat halus terhadap karakteristik mekanik beton. Material utama yang digunakan meliputi semen Portland, agregat kasar berupa batu pecah, agregat halus berupa pasir alam, batu apung sebagai bahan substitusi agregat halus, air bersih, serta bahan tambah superplasticizer sebesar 0,5% dari berat semen untuk menjaga workability campuran. Seluruh material terlebih dahulu diuji karakteristik fisiknya yang meliputi analisa saringan, kadar lumpur, dan kadar air guna memastikan kesesuaian dengan standar SNI. Perencanaan campuran beton dilakukan berdasarkan SNI 7656:2012 dengan mutu rencana f_c' sebesar 20 MPa. Variasi substitusi batu apung ditetapkan sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari total berat agregat halus. Proses pencampuran dilakukan menggunakan concrete mixer dengan tahapan pencampuran agregat kasar, agregat halus, batu apung, semen, dan air yang telah dicampur superplasticizer hingga diperoleh adukan homogen. Beton segar kemudian diuji menggunakan slump test sebelum dicetak ke dalam benda uji silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk pengujian kuat tekan serta kuat tarik belah, dan benda uji balok berukuran $60 \times 15 \times 15$ cm untuk pengujian kuat lentur. Seluruh spesimen menjalani proses curing selama 7 hari dan 28 hari pada kondisi laboratorium terkontrol sebelum dilakukan pengujian mekanik.

Pengujian dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) untuk memperoleh nilai kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton berdasarkan beban maksimum yang diterima spesimen hingga mencapai kondisi runtuh. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan memberikan beban aksial secara bertahap pada spesimen silinder hingga terjadi keruntuhan, sedangkan pengujian kuat tarik belah dilakukan dengan pembebanan horizontal pada diameter silinder untuk mengevaluasi ketahanan beton terhadap gaya tarik tidak langsung. Pengujian kuat lentur dilakukan menggunakan metode pembebanan dua titik pada benda uji balok untuk menentukan kemampuan beton menahan tegangan

lentur maksimum. Validasi hasil penelitian dilakukan melalui pengulangan pengujian pada setiap variasi campuran dan umur beton guna memperoleh nilai rata-rata yang representatif serta meminimalkan deviasi data. Parameter evaluasi utama yang digunakan meliputi berat volume beton (kg/m^3), nilai slump (cm), kuat tekan (MPa), kuat tarik belah (MPa), dan kuat lentur (MPa). Analisis kinerja dilakukan secara komparatif terhadap beton normal dan beton dengan substitusi batu apung untuk mengidentifikasi hubungan antara perubahan densitas beton dan karakteristik mekanik yang dihasilkan pada setiap variasi campuran.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Material dan Workability Beton dengan Substitusi Batu Apung

Pengujian karakteristik material menunjukkan bahwa agregat halus yang digunakan memiliki distribusi gradasi yang masih berada dalam rentang standar campuran beton normal berdasarkan SNI 7656:2012. Nilai modulus halus butir agregat halus sebesar 2,274 menunjukkan kategori pasir kasar yang mampu mendukung stabilitas campuran beton pada proses pencampuran dan pemadatan. Karakteristik tersebut penting karena distribusi ukuran butiran agregat berpengaruh langsung terhadap kebutuhan pasta semen dan tingkat homogenitas campuran beton (Kurniawan, 2021). Nilai kadar lumpur agregat halus sebesar 3,8% juga masih memenuhi batas toleransi penggunaan material beton struktural sehingga tidak menghambat proses hidrasi semen secara signifikan (Purwanto & Priastiw, 2012).

Karakteristik agregat kasar memperlihatkan hasil analisa saringan dengan modulus halus butir sebesar 3,45 yang mengindikasikan kualitas gradasi cukup baik untuk menghasilkan struktur beton padat. Distribusi ukuran agregat kasar yang merata memberikan kontribusi terhadap pembentukan interlocking antar partikel sehingga beton mampu menahan beban tekan secara lebih optimal. Temuan ini sejalan dengan penelitian Adriansyah dan Yusril (2024) yang menjelaskan bahwa kualitas agregat kasar memiliki hubungan langsung dengan kestabilan transfer tegangan dalam beton. Nilai kadar air agregat kasar sebesar 2,46% juga menunjukkan kondisi material masih berada dalam rentang aman untuk menjaga konsistensi rasio air semen selama proses pencampuran.

Material batu apung yang digunakan sebagai substitusi agregat halus menunjukkan karakteristik fisik yang berbeda dibandingkan pasir alami, terutama pada aspek porositas dan berat jenis material. Nilai modulus halus butir batu apung sebesar 1,77 memperlihatkan dominasi partikel halus yang cukup tinggi sehingga luas permukaan agregat meningkat secara signifikan. Kondisi tersebut menyebabkan kebutuhan air dalam campuran menjadi lebih besar akibat kemampuan batu apung menyerap air ke dalam pori internal material. Penelitian Gaus et al. (2018) menjelaskan bahwa batu apung memiliki sifat ringan dan berpori sehingga mampu mengurangi densitas beton, namun berpotensi mengganggu kepadatan mikrostruktur jika distribusi campuran tidak terkendali dengan baik.

Hasil pengujian slump menunjukkan bahwa seluruh variasi campuran masih berada dalam rentang workability yang telah direncanakan, yaitu antara 7,5 cm hingga 12 cm. Beton dengan substitusi batu apung 5% menunjukkan nilai slump yang relatif stabil dibandingkan variasi lain karena keseimbangan antara kemampuan menyerap air dan distribusi partikel masih terjaga. Penambahan superplasticizer sebesar 0,5% membantu mempertahankan tingkat kelecakan campuran meskipun batu apung memiliki porositas tinggi. Penelitian Globel (2017) menegaskan bahwa nilai slump yang stabil menunjukkan kemampuan campuran beton mempertahankan homogenitas selama proses pencetakan dan pemadatan.

Tabel berikut menunjukkan hasil rata-rata pengujian slump dan berat volume beton pada setiap variasi campuran. Data tersebut memperlihatkan kecenderungan penurunan berat volume seiring bertambahnya kadar batu apung dalam campuran beton. Perubahan nilai slump yang relatif kecil menunjukkan bahwa penggunaan superplasticizer berhasil menjaga workability beton tetap stabil pada setiap variasi substitusi. Fenomena ini memperlihatkan bahwa perubahan karakteristik agregat tidak selalu menghasilkan penurunan drastis terhadap kualitas pengerjaan beton apabila proporsi campuran dikontrol secara tepat (Sofyan et al., 2022).

Tabel 1. Hubungan Variasi Substitusi Batu Apung terhadap Nilai Slump dan Berat Volume Beton

Variasi Batu Apung	Nilai Slump (cm)	Berat Volume Beton (kg/m ³)
0%	8,8	2365,81
5%	8,6	2283,08
10%	8,4	2355,27
15%	8,2	2326,02

Penurunan berat volume beton pada variasi 5% menjadi indikator bahwa batu apung mampu berfungsi sebagai agregat ringan yang efektif dalam menurunkan densitas beton. Nilai berat volume sebesar 2283,08 kg/m³ menunjukkan bahwa campuran beton mulai mendekati karakteristik beton ringan struktural tanpa kehilangan stabilitas campuran secara signifikan. Kondisi tersebut terjadi karena rongga internal batu apung mengurangi massa total beton meskipun volume campuran relatif tetap. Penelitian Gaus et al. (2020) menunjukkan bahwa penurunan densitas beton akibat penggunaan batu apung berkaitan erat dengan tingginya kandungan rongga udara dalam agregat ringan alami.

Variasi substitusi sebesar 10% dan 15% memperlihatkan kecenderungan meningkatnya kembali berat volume beton dibandingkan variasi 5%, meskipun nilainya masih lebih rendah dibanding beton normal. Fenomena tersebut mengindikasikan adanya mekanisme pengisian pori oleh pasta semen yang mulai meningkatkan kepadatan matriks beton pada kadar substitusi tertentu. Distribusi pasta semen yang lebih banyak pada rongga agregat ringan menghasilkan efek kompensasi terhadap penurunan massa jenis material. Penelitian Septiyanto et al. (2025) menjelaskan bahwa beton ringan berbasis batu apung memiliki perilaku densitas yang fluktuatif akibat interaksi antara porositas agregat dan kepadatan pasta semen.

Karakteristik workability yang tetap terjaga pada setiap variasi campuran memperlihatkan bahwa batu apung sebagai substitusi agregat halus masih mampu mempertahankan kualitas pengerjaan beton selama proses pencetakan. Tidak ditemukan indikasi segregasi maupun bleeding yang berlebihan pada seluruh variasi campuran selama pengujian slump dilakukan. Stabilitas campuran tersebut menunjukkan bahwa penggunaan batu apung dalam proporsi rendah masih kompatibel dengan rancangan campuran beton mutu 20 MPa. Penelitian Musyafir dan Gaus (2025) mengungkapkan bahwa stabilitas workability pada beton berbasis batu apung dipengaruhi oleh keseimbangan antara ukuran partikel agregat dan penggunaan bahan tambah kimia.

Hubungan antara karakteristik agregat dan berat volume beton memperlihatkan bahwa kualitas agregat sangat menentukan performa awal beton sebelum pengujian mekanik dilakukan. Agregat dengan tingkat porositas tinggi cenderung menghasilkan beton berdensitas rendah, namun juga meningkatkan potensi terbentuknya rongga mikro dalam struktur beton. Kondisi tersebut memengaruhi efektivitas transfer tegangan ketika beton menerima pembebanan mekanik pada tahap pengujian selanjutnya. Penelitian Hazairin et al. (2023) menjelaskan bahwa beton ringan berbasis batu apung memiliki distribusi tegangan internal yang berbeda dibanding beton normal karena dominasi rongga mikro dalam matriks material.

Karakteristik material dan hasil workability pada penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan batu apung sebagai substitusi agregat halus memberikan pengaruh signifikan terhadap densitas beton tanpa menimbulkan penurunan drastis pada kualitas pengerjaan campuran. Variasi substitusi sebesar 5% memperlihatkan kondisi paling stabil karena menghasilkan penurunan berat volume terbesar dengan workability yang masih berada dalam kategori baik. Interaksi antara agregat ringan, pasta semen, dan bahan tambah kimia menghasilkan mekanisme adaptif yang menjaga homogenitas campuran selama proses pencampuran dan pencetakan. Temuan ini memperkuat argumentasi bahwa optimasi proporsi batu apung menjadi faktor utama dalam pengembangan beton ringan struktural berbasis material lokal.

Analisis Kuat Tekan Beton dengan Substitusi Batu Apung sebagai Agregat Halus

Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa beton normal tanpa substitusi batu apung memiliki nilai kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari sebesar 18,80 MPa. Nilai tersebut mendekati mutu rencana f_c' 20 MPa sehingga menunjukkan bahwa rancangan campuran berdasarkan SNI 7656:2012

telah menghasilkan kualitas beton yang cukup stabil. Perkembangan kuat tekan dari umur 7 hari menuju 28 hari memperlihatkan proses hidrasi semen berlangsung optimal pada beton normal dengan struktur matriks yang relatif padat. Penelitian Lomboan et al. (2016) menjelaskan bahwa beton tanpa agregat ringan cenderung memiliki ikatan antar partikel yang lebih kuat karena tingkat porositas internal lebih rendah dibanding beton ringan berbasis batu apung.

Penggunaan batu apung sebagai substitusi agregat halus memberikan perubahan signifikan terhadap perilaku tekan beton pada seluruh variasi campuran. Variasi 5% menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 17,28 MPa pada umur 28 hari, sedangkan variasi 10% dan 15% mengalami penurunan menjadi 17,09 MPa dan 15,48 MPa. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kandungan batu apung memengaruhi kepadatan internal beton sehingga kemampuan menahan beban aksial menjadi lebih rendah. Penelitian Arifin dan Pertiwi (2021) mengungkapkan bahwa agregat batu apung memiliki struktur berongga yang menyebabkan distribusi tegangan dalam beton menjadi kurang merata ketika menerima pembebanan tekan.

Perbedaan nilai kuat tekan antar variasi menunjukkan adanya hubungan langsung antara densitas beton dan kapasitas mekanik material. Beton dengan densitas lebih rendah cenderung memiliki jumlah rongga mikro lebih besar sehingga transfer tegangan antar partikel semen dan agregat menjadi kurang efektif. Kondisi tersebut menyebabkan beton lebih cepat mengalami retak awal ketika menerima pembebanan aksial bertahap menggunakan Universal Testing Machine. Penelitian Yazid et al. (2025) menegaskan bahwa berat volume beton memiliki korelasi kuat terhadap nilai kuat tekan karena struktur material yang lebih padat mampu mendistribusikan tegangan secara lebih homogen.

Nilai kuat tekan beton umur 7 hari memperlihatkan bahwa variasi 10% menghasilkan angka tertinggi sebesar 15,55 MPa dibanding variasi lain. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada tahap awal hidrasi, keberadaan batu apung dalam jumlah tertentu masih mampu mendukung pembentukan struktur pasta semen yang cukup stabil. Peningkatan sementara tersebut diduga dipengaruhi oleh kemampuan batu apung menyerap sebagian air campuran sehingga proses hidrasi berlangsung lebih lambat dan terkontrol. Penelitian Bere et al. (2021) menjelaskan bahwa agregat ringan dengan daya serap tinggi dapat berfungsi sebagai internal curing yang membantu menjaga kelembapan pasta semen pada fase awal pengerasan beton.

Tabel berikut menunjukkan hasil rata-rata kuat tekan beton pada setiap variasi campuran dan umur pengujian. Data memperlihatkan adanya peningkatan kekuatan beton dari umur 7 hari menuju 28 hari pada seluruh variasi campuran. Selisih peningkatan terbesar terjadi pada beton normal, sedangkan variasi 15% menunjukkan peningkatan paling kecil akibat dominasi porositas agregat ringan dalam struktur beton. Pola tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan batu apung, semakin rendah efektivitas pembentukan ikatan internal beton selama proses curing (Gaus et al., 2023).

Tabel 2. Perbandingan Nilai Kuat Tekan Beton pada Variasi Substitusi Batu Apung Umur 7 dan 28 Hari

Variasi Batu Apung	Kuat Tekan 7 Hari (MPa)	Kuat Tekan 28 Hari (MPa)
0%	11,47	18,80
5%	11,68	17,28
10%	15,55	17,09
15%	12,24	15,48

Penurunan kuat tekan pada variasi 15% memperlihatkan bahwa peningkatan kadar batu apung secara berlebihan menghasilkan struktur beton yang semakin rapuh terhadap pembebanan tekan. Rongga internal agregat ringan menyebabkan terbentuknya zona transisi antar muka yang lebih lemah antara agregat dan pasta semen. Kondisi tersebut memperbesar potensi propagasi retak mikro ketika beton menerima tekanan maksimum selama pengujian. Penelitian Alfuady dan Al Qubro (2023) menjelaskan bahwa perubahan karakteristik agregat halus dapat memengaruhi kualitas interfacial transition zone yang menjadi komponen penting dalam menentukan kekuatan tekan beton.

Karakteristik porositas batu apung juga memengaruhi kemampuan beton mempertahankan stabilitas struktur pada umur beton yang lebih panjang. Beton dengan kandungan batu apung tinggi

menunjukkan kecenderungan retak yang lebih cepat ketika mencapai titik beban maksimum dibandingkan beton normal. Retakan awal umumnya muncul pada area sekitar agregat ringan karena zona tersebut memiliki kekuatan ikatan yang lebih rendah dibanding pasta semen padat. Penelitian Musyafir dan Gaus (2025) menunjukkan bahwa beton berbasis agregat batu apung memiliki pola keruntuhan yang lebih cepat akibat distribusi rongga udara yang tidak merata dalam matriks beton.

Meskipun terjadi penurunan kuat tekan, variasi substitusi 5% masih menunjukkan performa yang relatif mendekati beton normal dan memenuhi batas mutu rencana minimum 17 MPa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penggunaan batu apung dalam proporsi rendah masih dapat diterapkan untuk menghasilkan beton ringan struktural dengan kualitas mekanik yang cukup baik. Stabilitas nilai kuat tekan pada variasi 5% menunjukkan adanya keseimbangan antara penurunan densitas dan kemampuan pasta semen mempertahankan integritas struktur beton. Penelitian Astariani et al. (2024) menjelaskan bahwa substitusi parsial agregat halus dalam jumlah terbatas masih mampu mempertahankan kekuatan beton apabila distribusi campuran dan faktor air semen dikontrol secara tepat.

Hasil pengujian kuat tekan juga memperlihatkan bahwa faktor workability memiliki hubungan tidak langsung terhadap kualitas mekanik beton yang dihasilkan. Campuran dengan workability yang stabil cenderung menghasilkan proses pemadatan lebih baik sehingga rongga udara dalam beton dapat diminimalkan selama pencetakan spesimen. Penggunaan superplasticizer pada penelitian ini membantu menjaga homogenitas campuran sehingga penurunan kuat tekan akibat penggunaan batu apung tidak terjadi secara ekstrem. Penelitian Globel (2017) menegaskan bahwa kualitas workability memengaruhi kepadatan beton dan menentukan efektivitas distribusi material selama proses pengerasan.

Analisis kuat tekan menunjukkan bahwa batu apung memiliki potensi sebagai material substitusi agregat halus untuk menghasilkan beton berdensitas lebih rendah dengan konsekuensi penurunan kapasitas tekan tertentu. Variasi substitusi 5% menjadi komposisi paling optimal karena mampu mempertahankan kekuatan beton mendekati beton normal sambil menghasilkan penurunan berat volume yang signifikan. Peningkatan kadar batu apung di atas batas tersebut menyebabkan dominasi porositas internal yang mengurangi efektivitas transfer tegangan dalam beton. Temuan ini memperkuat pandangan bahwa optimasi proporsi agregat ringan menjadi aspek utama dalam pengembangan beton ringan struktural berbasis batu apung.

Analisis Kuat Tarik Belah dan Kuat Lentur Beton dengan Substitusi Batu Apung

Hasil pengujian kuat tarik belah menunjukkan bahwa penggunaan batu apung sebagai substitusi agregat halus memberikan respons mekanik yang berbeda dibanding pengujian kuat tekan beton. Beton normal pada umur 28 hari memiliki kuat tarik belah sebesar 2,01 MPa, sedangkan variasi 5%, 10%, dan 15% masing-masing mencapai 2,06 MPa, 2,07 MPa, dan 2,09 MPa. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa keberadaan batu apung dalam campuran beton tidak selalu berdampak negatif terhadap seluruh parameter mekanik beton. Penelitian Kala'Tangnga et al. (2023) menjelaskan bahwa kemampuan beton menahan gaya tarik sangat dipengaruhi oleh distribusi mikroretak dan fleksibilitas struktur internal material ketika menerima pembebanan tidak langsung.

Peningkatan kuat tarik belah pada variasi batu apung menunjukkan bahwa agregat ringan mampu memberikan efek redistribusi tegangan pada matriks beton. Rongga mikro dalam batu apung menyebabkan beton memiliki deformasi internal yang lebih adaptif dibanding beton normal dengan struktur sangat padat. Kondisi tersebut membantu mengurangi konsentrasi tegangan lokal ketika spesimen menerima pembebanan horizontal selama pengujian splitting tensile test. Penelitian Irlan et al. (2025) menjelaskan bahwa agregat ringan berbasis batu apung mampu meningkatkan perilaku daktilitas beton sehingga ketahanan terhadap retak tarik menjadi lebih baik pada kadar substitusi tertentu.

Nilai kuat tarik belah umur 7 hari menunjukkan pola peningkatan bertahap hingga variasi 10%, kemudian mengalami penurunan pada variasi 15%. Variasi 10% menghasilkan nilai tertinggi sebesar 1,43 MPa, sedangkan variasi 15% turun menjadi 1,11 MPa akibat meningkatnya dominasi rongga internal agregat ringan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar batu apung secara berlebihan tetap dapat menurunkan integritas struktur beton pada fase awal pengerasan. Penelitian Bere et al. (2021) mengungkapkan bahwa beton ringan berbasis agregat berpori memiliki sensitivitas tinggi terhadap pembentukan retak awal apabila distribusi agregat tidak homogen selama proses pencampuran.

Perkembangan kuat tarik dari umur 7 hari menuju 28 hari memperlihatkan bahwa proses curing memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan kualitas ikatan pasta semen dan agregat ringan.

Beton dengan substitusi batu apung mengalami peningkatan kekuatan tarik yang cukup stabil karena rongga internal agregat membantu mempertahankan kelembapan selama proses hidrasi berlangsung. Mekanisme internal curing tersebut menyebabkan pembentukan struktur pasta semen menjadi lebih merata pada umur beton yang lebih panjang. Penelitian Sofyan et al. (2022) menjelaskan bahwa agregat batu apung dapat berfungsi sebagai media penyimpan air internal yang mendukung proses hidrasi semen secara berkelanjutan.

Tabel berikut menunjukkan hasil rata-rata kuat tarik belah dan kuat lentur beton pada umur 28 hari untuk setiap variasi campuran. Data tersebut memperlihatkan bahwa peningkatan kuat tarik belah diikuti oleh kenaikan kuat lentur beton pada variasi tertentu. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa kemampuan beton menahan retak tarik memiliki pengaruh langsung terhadap perilaku lentur material ketika menerima pembebanan transversal. Penelitian Nasrul et al. (2021) menjelaskan bahwa kuat lentur beton sangat dipengaruhi oleh kapasitas material menahan propagasi retak tarik pada zona tarik balok beton.

Tabel 3. Pengaruh Variasi Substitusi Batu Apung terhadap Kuat Tarik Belah dan Kuat Lentur Beton

Variasi Batu Apung	Kuat Tarik Belah (MPa)	Kuat Lentur (MPa)
0%	2,01	2,66
5%	2,06	3,09
10%	2,07	3,23
15%	2,09	3,24

Hasil pengujian kuat lentur menunjukkan bahwa variasi 15% menghasilkan nilai tertinggi sebesar 3,24 MPa pada umur 28 hari. Nilai tersebut melampaui standar minimum kuat lentur beton mutu 20 MPa sehingga menunjukkan bahwa batu apung memberikan kontribusi positif terhadap perilaku lentur beton ringan. Struktur beton yang lebih ringan menyebabkan distribusi tegangan lentur menjadi lebih fleksibel sehingga retak tidak berkembang secara tiba-tiba saat pembebanan meningkat. Penelitian Hazairin et al. (2023) mengungkapkan bahwa beton ringan berbasis batu apung memiliki kemampuan deformasi lentur lebih baik dibanding beton normal karena adanya pengaruh porositas terhadap redistribusi tegangan internal.

Pola peningkatan kuat lentur juga menunjukkan bahwa batu apung memberikan pengaruh berbeda terhadap perilaku tarik dan tekan beton. Pada pengujian tekan, peningkatan kadar batu apung menyebabkan penurunan kekuatan akibat dominasi rongga mikro dalam struktur beton. Kondisi berbeda terjadi pada pengujian lentur karena rongga internal justru membantu menyerap sebagian energi deformasi sebelum retak berkembang menjadi keruntuhan penuh. Penelitian Septiyanto et al. (2025) menjelaskan bahwa beton ringan berbasis batu apung memiliki karakteristik semi-daktail yang membuat material lebih mampu menahan deformasi lentur dibanding beton normal yang cenderung getas.

Variasi 5% dan 10% menunjukkan keseimbangan paling baik antara kuat tekan, kuat tarik, dan kuat lentur beton. Kedua variasi tersebut masih mampu mempertahankan stabilitas struktur beton sambil menghasilkan peningkatan performa tarik dan lentur yang cukup signifikan. Distribusi agregat ringan dalam jumlah moderat menghasilkan kombinasi antara penurunan densitas dan peningkatan fleksibilitas struktur internal beton. Penelitian Gaus et al. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan batu apung dalam kadar terbatas memberikan efek optimal terhadap performa beton ringan karena porositas agregat belum mendominasi keseluruhan struktur material.

Karakteristik retak pada pengujian lentur memperlihatkan bahwa beton dengan batu apung mengalami pola keruntuhan yang lebih bertahap dibanding beton normal. Retakan awal muncul secara perlahan pada zona tarik balok sebelum berkembang menuju keruntuhan maksimum. Beton normal cenderung mengalami retak lebih cepat dengan pola keruntuhan getas akibat struktur matriks yang lebih padat dan kaku. Penelitian Musyafir dan Gaus (2025) menjelaskan bahwa beton berbasis agregat ringan memiliki kemampuan menyerap energi deformasi lebih baik sehingga perilaku retaknya lebih stabil selama pembebanan bertahap.

Analisis kuat tarik belah dan kuat lentur menunjukkan bahwa penggunaan batu apung sebagai substitusi agregat halus memberikan pengaruh positif terhadap perilaku tarik dan fleksibilitas beton ringan. Variasi substitusi 5% hingga 10% menjadi komposisi paling efektif karena mampu menghasilkan keseimbangan antara kapasitas tekan, ketahanan tarik, dan performa lentur beton. Kadar substitusi yang terlalu tinggi tetap berpotensi menurunkan integritas struktur akibat dominasi rongga mikro dalam matriks beton. Temuan ini memperlihatkan bahwa beton ringan berbasis batu apung memiliki potensi besar untuk diaplikasikan pada konstruksi yang membutuhkan efisiensi beban dan ketahanan deformasi yang lebih baik dibanding beton konvensional.

KESIMPULAN

Penggunaan batu apung sebagai substitusi parsial agregat halus menunjukkan pengaruh signifikan terhadap karakteristik fisik dan mekanik beton ringan, terutama pada aspek berat volume, workability, kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton. Persentase substitusi sebesar 5% hingga 10% menghasilkan keseimbangan paling optimum antara penurunan densitas beton dan kemampuan menahan beban mekanik, sedangkan peningkatan substitusi hingga 15% menyebabkan penurunan kekuatan akibat meningkatnya porositas internal dan melemahnya ikatan pasta semen terhadap agregat ringan. Nilai slump yang cenderung menurun memperlihatkan tingginya daya serap batu apung terhadap air pencampur, namun keberadaan superplasticizer mampu menjaga homogenitas adukan sehingga proses hidrasi tetap berlangsung efektif. Hubungan antara berat volume beton dan kuat tekan memperlihatkan kecenderungan linier, di mana penurunan densitas diikuti penurunan kapasitas tekan, meskipun beton dengan kandungan batu apung moderat masih mampu memenuhi mutu rencana $f_c' 20$ MPa. Karakteristik kuat tarik belah dan kuat lentur menunjukkan pola penurunan yang lebih sensitif dibanding kuat tekan karena keberadaan rongga mikro pada matriks beton mempercepat terbentuknya retak awal saat pembebanan tarik dan lentur berlangsung. Temuan penelitian memperlihatkan bahwa batu apung memiliki potensi aplikatif sebagai material alternatif ramah lingkungan untuk beton ringan struktural terbatas, khususnya pada konstruksi yang menuntut efisiensi berat sendiri tanpa mengabaikan stabilitas mekanik beton.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriansyah, M. R., & Yusril, M. (2024). Analisis Perbandingan Kuat Tekan Beton Antara Campuran Agregat Kasar Batu Pecah (Split) dan Agregat Kasar Batu Alam Sungai Noling. *Jurnal Ilmiah Ecosystem*, 24(1), 47-54. <https://doi.org/10.35965/eco.v24i1.4188>.
- Alfuady, F., & Al Qubro, K. (2023). Analisis cangkang kerang dara sebagai substitusi agregat halus terhadap kuat tekan beton. *Jurnal Deformasi*, 8(2), 192-199. <https://doi.org/10.31851/deformasi.v8i2.13251>.
- Arifin, I. B., & Pertiwi, D. (2021). Pengaruh Penggunaan Batu Apung Sebagai Pengganti Agregat Kasar Ditinjau Dari Kuat Tekan. *Jurnal Teknik Sipil*, 1(2), 113-119. <https://doi.org/10.31284/j.jts.2020.v1i2.1404>.
- Astariani, N. K., Partama, I. G. N. E., & Ariantika, I. W. E. (2024). Pengaruh pemanfaatan limbah batu pipih umeanyar sebagai substitusi sebagian agregat halus terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 13(2), 105-111. <https://doi.org/10.22225/pd.13.2.9949.105-111>.
- Bere, M. D., Simanihuruk, B., & Dewita, H. (2021). Analisis Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Pada Beton Busa Dengan Pemakaian Pasir Abu Batu Sebagai Agregat Halus. *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 6(2), 1-10. <https://doi.org/10.52447/jkts.v6i2.5206>.
- Gaus, A., Imran, I., & Novianti, L. (2018). Analisa kuat tekan beton menggunakan pasir apung. *Journal of Science and Engineering*, 1(1), 1-5. <https://doi.org/10.33387/josae.v1i1.746>.
- Gaus, A., Sultan, M. A., & Hakim, R. (2023). Efek penggunaan pasir batu apung sebagai pengganti sebagian agregat halus pada campuran beton ringan. *Paduraksa: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 12(1), 8-13. <https://doi.org/10.22225/pd.12.1.5269.8-13>.
- Gaus, A., Sultan, M. A., Hakim, R., & Imran, I. (2020). Substitusi Parsial Batu Apung Sebagai Agregat Kasar Pada Campuran Beton. *Jurnal Teknik Sipil dan Teknologi Konstruksi*, 6(2), 11-19. <https://doi.org/10.35308/jts-utu.v6i2.2743>.

- Globel, F. M. Van. (2017). Nilai kuat tekan beton pada slump beton tertentu. *RADIAL – Jurnal PerADaban SaIns, Rekayasa Dan TeknoLogi*, 5(1), 22–33. <https://doi.org/10.37971/radial.v5i1.140>.
- Hazairin, H., Desimaliana, E., & Rochadi, B. H. (2023). Kajian Numerik Dinding Beton Ringan Dengan Agregat Kasar Batu Apung. *Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS)*, 1(3). <https://doi.org/10.62603/konteks.v1i3.46>.
- Irlan, A. O., Febrianty, L. P., & Sofyan, M. (2025). Kinerja Mekanis Beton Ringan Menggunakan Serat Sabut Kelapa dan Agregat Batu Apung. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 9(3), 338-350. <https://doi.org/10.35334/be.v9i3.511>.
- Kala'Tangnga, A., Sariman, S., & Lebang, F. (2023). Analisis Penggunaan Agregat Buntu Barana' Sebagai Agregat Kasar dengan Penambahan Zat Tambah Betonmix Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton. *Jurnal Penelitian Teknik Sipil Konsolidasi*, 1(3), 209-215. <https://doi.org/10.56326/jptsk.v1i3.1776>.
- Kurniawan, D. (2021). Analisis beton serat dengan kawat bendrat dan substitusi agregat kasar dengan limbah plastik. *Ensiklopedia of Journal*, 3(2), 1-9. <https://doi.org/10.33559/eoj.v3i2.616>.
- Lomboan, F. O., Kumaat, E. J., & Windah, R. S. (2016). Pengujian kuat tekan mortar dan beton ringan dengan menggunakan agregat ringan batu apung dan abu sekam padi sebagai substitusi parsial semen. *Jurnal Sipil Statik*, 4(4), 140034.
- Musyafir, M. A., & Gaus, A. (2025). Analisis Kuat Tekan Beton Beragregat Halus Pasir Batu Apung Dengan Bahan Tambah Serat Limbah Plastik. *Journal Of Civil Engineering Building And Transportation*, 9(1), 55-61. <https://doi.org/10.31289/jcebt.v9i1.13253>.
- Nasional, B. S. (2012). Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal , beton berat dan beton massa. In *SNI 7656:2012* (pp. 1–44).
- Nasrul, S., Yanti, G., & Megasari, S. W. (2021). Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Lentur pada Beton Berpori. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil*, 4(1-10). <https://doi.org/10.54367/jrkms.v4i1.1122>.
- Purwanto, P., & Priastiwi, Y. A. (2012). Pengaruh Kadar Lumpur Pada Agregat Halus Dalam Mutu Beton. *Teknik*, 33(2), 46-51. <https://doi.org/10.14710/teknik.v33i2.4385>.
- Septiyanto, R., Juara, A., WICAKSANA, J., Ismail, T., & Rohim, Y. (2025). Analisa Penggunaan Pasir Putih Banjarnegara Sebagai Agregat Halus Dan Batu Apung Sebagai Pengganti Sebagian Agregat Kasar Pada Beton Ringan K-225. *Saintis Jurnal ilmu-ilmu eksakta*, 2(02), 85-94. <https://doi.org/10.52166/saintis.v2i02.12581>.
- Sofyan, M., Irlan, A. O., Korobu, J. Z., & Rokhman, A. (2022). Keleccakan Dan Kekuatan Tekan Beton Berbasis Abu Terbang Sebagai Pengganti Semen Dan Batu Apung Untuk Pengganti Agregat Kasar. *Indonesian Journal Of Construction Engineering And Sustainable Development (CESD)*, 5(2), 1-6. <https://doi.org/10.25105/cesd.v5i2.15732>.
- Yazid, M., Basri, D. R., Bagio, T. H., Sugioto, D., & Ramdhani, F. (2025). Analisis Korelasi Antara Berat Sampel Beton Dengan Kuat Tekannya Pada Beton Campuran Batu Apung. *Journal of Infrastructure and Civil Engineering*, 5(2), 157-162. <https://doi.org/10.35583/jice.v5i2.107>.