http://journal.uir.ac.id/index.php/saintis

Jurnal Saintis

ISSN (Print) : 1410-7783
ISSN (Online) : 2580-7110

Volume 26 Nomor 02, Oktober 2026 : 95-108

Pengaruh Porositas Beton Agregat Batu Apung Terhadap Kuat Tekan dan Permeabilitas Menggunakan Analisa X-ray CT

Effects of Porosity on the Compressive Strength and Permeability of Pumice Aggregate Lightweight Concrete Using X-ray Micro-CT

Ivan Sandi Darma [1,*], Dimas Agustiana Putra [2], Husnah [3]

[1,2] *Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No.10, Kota Bandung, Indonesia*

[3] *Program Studi Teknik Sipil, Universitas Abdurrab, Jalan Riau Ujung No.73, Kota Pekanbaru, Indonesia*

* Penulis korespondensi : ivansandi@itb.ac.id

Tel.: +62-82-251-005791

Diterima: Sep 25, 2026; Direvisi: Okt 01, 2026; Disetujui: Oktober 20, 2026.

DOI: 10.25299/saintis.2026.vol26(02).30343

Abstrak

Beton ringan dengan agregat batu apung memiliki struktur internal berpori yang dapat memengaruhi kuat tekan dan permeabilitas. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi hubungan antara distribusi porositas, kuat tekan, dan permeabilitas beton agregat batu apung melalui integrasi pengujian eksperimental dan analisis X-ray micro-computed tomography (micro-CT). Campuran beton dirancang dengan rasio air-semen (w/c) sebesar 0,35; 0,45; dan 0,60. Pengujian meliputi kuat tekan, penetrasi air bertekanan, serta karakterisasi porositas agregat dan mortar menggunakan X-ray micro-CT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sekitar 90% porositas terdeteksi berada di dalam agregat batu apung, dengan porositas total sebesar 17,68–18,62%. Peningkatan w/c dari 0,35 menjadi 0,60 menurunkan kuat tekan umur 28 hari sebesar 31,7%, dari 17,27 MPa menjadi 11,80 MPa, serta meningkatkan kedalaman penetrasi air dari 16,10 mm menjadi 19,88 mm. Estimasi koefisien permeabilitas menggunakan pendekatan Valenta dengan asumsi konektivitas pori menghasilkan rentang (1,18–1,30) × 10^{-12} m/s hingga (1,90–2,09) × 10^{-12} m/s. Pengamatan pola keruntuhan menunjukkan bahwa retak melintasi agregat batu apung, sedangkan evaluasi empiris berbasis porositas memperlihatkan keterbatasan penerapan model kuat tekan mortar pada beton ringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dominasi volume pori agregat tidak secara langsung merepresentasikan kontribusinya terhadap kuat tekan maupun permeabilitas. Oleh karena itu, evaluasi kinerja beton agregat batu apung perlu mempertimbangkan distribusi porositas pada masing-masing fase material, karakteristik mekanis agregat, dan konektivitas jaringan pori.

Kata Kunci: *Beton ringan, Batu apung, X-ray micro-CT, Porositas, Kuat tekan, Permeabilitas*

Abstract

Pumice aggregate lightweight concrete contains a highly porous internal structure that may influence its compressive strength and permeability. This study investigates the relationships among pore distribution, compressive strength, and permeability through an integrated experimental and X-ray micro-computed tomography (micro-CT) approach. Concrete mixtures with water-to-cement (w/c) ratios of 0.35, 0.45, and 0.60 were evaluated using compressive strength tests, pressurized water penetration tests, and X-ray micro-CT characterization of aggregate and mortar porosity. The results showed that approximately 90% of the detected pore volume was located within the pumice aggregates, while the total CT-detectable porosity ranged from 17.68% to 18.62%. Increasing the w/c ratio from 0.35 to 0.60 reduced the 28-day compressive strength by 31.7%, from 17.27 MPa to 11.80 MPa, and increased the water penetration depth from 16.10 mm to 19.88 mm. Permeability coefficients estimated using the Valenta approach with assumed pore connectivity ranged from (1.18–1.30) × 10^{-12} m/s to (1.90–2.09) × 10^{-12} m/s. Failure observations revealed cracks propagating through pumice aggregates, while porosity-based empirical analysis highlighted the limitations of applying mortar strength models to lightweight aggregate concrete. These findings indicate that the dominant pore volume within pumice aggregates does not directly represent their contribution to compressive strength or water permeability. Therefore, evaluating pumice aggregate concrete requires consideration of phase-specific pore distributions, aggregate mechanical characteristics, and pore network connectivity.

Keywords: *Lightweight concrete; Pumice aggregate; X-ray micro-CT; Porosity; Compressive strength; Permeability*

PENDAHULUAN

Beton ringan merupakan salah satu alternatif material konstruksi yang dikembangkan untuk mengurangi berat sendiri struktur tanpa mengabaikan persyaratan kinerja mekanis dan durabilitas. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah mengganti agregat konvensional dengan agregat ringan alami, seperti batu apung (*pumice*). Batu apung memiliki struktur internal berpori dan berat jenis relatif rendah sehingga berpotensi menghasilkan beton dengan berat isi yang lebih kecil dibandingkan beton normal. Namun, karakteristik porositas agregat yang tinggi juga dapat memengaruhi kekuatan mekanis dan kemampuan beton dalam menahan penetrasi air. [1] melalui

kajian komprehensif menunjukkan bahwa penggunaan agregat batu apung dapat menurunkan berat isi beton, tetapi umumnya disertai penurunan sifat mekanis serta perubahan karakteristik penyerapan air dan durabilitas.

Pengaruh agregat batu apung terhadap karakteristik mekanis dan durabilitas beton telah dikaji oleh sejumlah peneliti. [2] mengevaluasi beton ringan berbasis batu apung melalui pengujian kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, permeabilitas air, serta karakterisasi pori menggunakan *mercury intrusion porosimetry* (MIP). Penelitian tersebut menunjukkan pentingnya mempertimbangkan sifat mekanis dan durabilitas secara bersamaan dalam pengembangan beton agregat batu apung. Selanjutnya, [3] mengevaluasi pengaruh variasi proporsi agregat batu apung terhadap karakteristik mekanis dan pola keruntuhan beton ringan. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa peningkatan proporsi agregat batu apung dapat mengubah karakteristik keruntuhan dan menurunkan performa mekanis beton. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa karakteristik agregat ringan merupakan salah satu faktor penting dalam menentukan respons mekanis beton.

Hubungan antara porositas dan kekuatan material berbasis semen juga telah dikembangkan melalui pendekatan empiris. [4] mengevaluasi hubungan porositas terhadap kuat tekan dan kuat tarik mortar serta menunjukkan bahwa perubahan porositas dapat direpresentasikan menggunakan model empiris kekuatan material berpori. Namun, penerapan hubungan tersebut pada beton agregat batu apung memerlukan pertimbangan tambahan karena beton merupakan material komposit yang terdiri atas mortar dan agregat dengan karakteristik porositas serta kekakuan yang berbeda. Pada beton agregat batu apung, keberadaan pori tidak hanya ditemukan pada matriks mortar, tetapi juga terkonsentrasi di dalam agregat kasar. Oleh karena itu, distribusi porositas pada masing-masing komponen perlu dipertimbangkan untuk memahami hubungan antara struktur internal dan kuat tekan beton.

Selain memengaruhi kekuatan mekanis, karakteristik jaringan pori juga berperan dalam menentukan kemampuan material terhadap penetrasi air. [5] menunjukkan bahwa permeabilitas mortar dipengaruhi oleh distribusi ukuran pori, konektivitas, dan tortuositas jalur aliran. Temuan tersebut menunjukkan bahwa porositas total tidak selalu dapat digunakan secara langsung untuk menggambarkan kemampuan air mengalir melalui material. Pada beton agregat batu apung, mekanisme ini menjadi lebih kompleks karena pori pada agregat dan mortar dapat memiliki karakteristik serta tingkat konektivitas yang berbeda. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mampu mengidentifikasi distribusi porositas pada masing-masing komponen beton sebagai dasar interpretasi karakteristik permeabilitas.

Perkembangan teknologi *X-ray micro-computed tomography* (micro-CT) memungkinkan pengamatan struktur internal material secara tiga dimensi tanpa merusak benda uji. Melalui proses rekonstruksi dan segmentasi citra, distribusi agregat, mortar, dan pori dapat diidentifikasi secara kuantitatif berdasarkan perbedaan karakteristik atenuasi sinar-X. [6] menunjukkan potensi penggunaan micro-CT dan nano-CT dalam karakterisasi jaringan pori material berbasis semen. Meskipun demikian, kemampuan metode ini sangat dipengaruhi oleh resolusi pemindaian dan proses segmentasi citra. Pada material heterogen seperti beton agregat batu apung, variasi densitas serta distribusi pori di dalam agregat juga dapat menimbulkan kesulitan dalam membedakan fase agregat, mortar, dan rongga.

Berdasarkan penelitian terdahulu, hubungan antara penggunaan agregat batu apung dengan karakteristik mekanis dan durabilitas beton telah banyak dibahas. Demikian pula, hubungan porositas dengan kekuatan dan permeabilitas material berbasis semen telah dikembangkan melalui berbagai pendekatan eksperimental maupun empiris. Namun, kajian yang mengintegrasikan kuantifikasi porositas agregat dan mortar secara terpisah melalui X-ray micro-CT dengan evaluasi kuat tekan serta estimasi permeabilitas pada beton agregat batu apung masih memerlukan pengembangan lebih lanjut. Secara khusus, diperlukan pemahaman mengenai bagaimana dominasi porositas internal agregat memengaruhi interpretasi kontribusi mekanis agregat dan estimasi karakteristik transport air dalam beton ringan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi hubungan antara karakteristik porositas, kuat tekan, dan permeabilitas beton agregat batu apung dengan variasi rasio air-semen (w/c) sebesar 0,35; 0,45; dan 0,60. Analisis dilakukan melalui pengujian kuat tekan, pengujian penetrasi air bertekanan, serta pemindaian X-ray micro-CT yang dilanjutkan dengan segmentasi citra untuk mengidentifikasi porositas agregat dan mortar. Hasil karakterisasi porositas digunakan sebagai dasar evaluasi empiris hubungan porositas dengan kuat tekan dan estimasi koefisien permeabilitas. Kontribusi penelitian ini

terletak pada pendekatan integratif yang menghubungkan karakteristik mikrostruktur agregat batu apung dengan respons mekanis dan permeabilitas beton ringan, sehingga dapat memberikan dasar ilmiah bagi evaluasi serta pengembangan campuran beton ringan berbasis agregat berpori.

METODOLOGI

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang dikombinasikan dengan analisis mikrostruktur berbasis X-ray micro-computed tomography (micro-CT) untuk mengevaluasi hubungan antara porositas, kuat tekan, dan permeabilitas beton ringan menggunakan agregat batu apung. Penelitian difokuskan pada identifikasi distribusi porositas agregat dan mortar serta pengaruhnya terhadap respons mekanis dan karakteristik penetrasi air pada beton ringan.

Variabel utama penelitian adalah rasio air-semen (*water-to-cement ratio*, w/c), yang divariasikan sebesar 0,35; 0,45; dan 0,60. Parameter respons yang dievaluasi meliputi perkembangan kuat tekan beton pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari, kedalaman penetrasi air pada umur 28 hari, serta karakteristik porositas internal yang diperoleh melalui analisis citra X-ray CT. Hasil karakterisasi porositas selanjutnya digunakan sebagai dasar pendekatan empiris untuk mengevaluasi hubungan porositas dengan kuat tekan dan mengestimasi koefisien permeabilitas beton.

Material Penyusun Beton

Material penyusun beton terdiri atas semen, agregat halus berupa pasir, agregat kasar ringan berupa batu apung, dan air. Batu apung digunakan sebagai agregat kasar untuk menghasilkan beton dengan berat isi rencana kurang dari 1.800 kg/m^3.

Karakteristik fisik material diperoleh melalui pengujian berat jenis, penyerapan air, berat isi gembur, modulus kehalusan, kadar lumpur, serta porositas agregat batu apung. Hasil pengujian karakteristik material disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data material campuran

Data Material	Batu Apung	Pasir	Semen
Berat Jenis	1.23	2.43	3.14
Penyerapan (%)	67.31	2.35	-
Berat isi gembur kg/m^3	342	1280	-
Modulus kehalusan	7.68	3.51	-
Kadar lumpur (%)		4.0	-
Porositas (%)	45.26	-	-

Benda Uji

Perencanaan komposisi beton mengacu pada [7] untuk beton menggunakan agregat ringan. Campuran dirancang dengan mempertahankan jumlah air dan agregat kasar yang sama, sedangkan kadar semen dan pasir disesuaikan untuk menghasilkan tiga variasi rasio air-semen.

Agregat dinyatakan dalam kondisi saturated surface dry (SSD) pada perencanaan campuran. Nilai slump ditargetkan sebesar 9 ± 1 cm dengan bantuan bahan tambah *superplasticizer* untuk memperoleh tingkat kemudahan pengerjaan yang relatif seragam.

Komposisi campuran beton untuk setiap variasi w/c disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi campuran benda uji

Material (kg/m^3)	Rasio air-semen 0.35	0.45	0.6
Air	201.71	201.71	201.71
Semen	576.33	448.25	336.19
Agregat (SSD)	423.43	423.43	423.43
Pasir (SSD)	594.13	692.02	777.67
Superplasticizer	0.5% terhadap berat semen		
Berat total	**1795.59**	**1765.41**	**1739.0**

Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2, perubahan rasio air-semen dilakukan dengan mengubah kadar semen, sementara jumlah air dipertahankan konstan. Penyesuaian kadar pasir dilakukan untuk menjaga proporsi volumetrik campuran. Dengan demikian, pengaruh variasi w/c terhadap karakteristik beton perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan perubahan kadar semen dan rasio pasir-semen yang menyertainya.

Persiapan dan Perawatan Benda Uji

Pembuatan benda uji dilakukan menggunakan mesin pengaduk beton (concrete mixer) dengan kapasitas adukan yang disesuaikan terhadap jumlah benda uji. Setelah proses pencampuran, beton segar ditempatkan ke dalam cetakan sesuai jenis pengujian yang direncanakan.

Benda uji yang digunakan terdiri atas tiga kelompok, yaitu:

1. Silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm untuk pengujian kuat tekan.
2. Silinder berdiameter 45 mm dan tinggi 50 mm untuk pemindaian X-ray micro-CT, yang diperoleh melalui proses pengeboran inti (core drilling).
3. Benda uji berbentuk balok atau kubus untuk pengujian penetrasi air bertekanan.

Setelah pengecoran, benda uji dirawat melalui perendaman dalam air hingga mencapai umur pengujian yang ditentukan. Perawatan dilakukan

untuk menjaga ketersediaan kelembapan yang diperlukan selama proses hidrasi semen.

Uji Tekan

Pengujian kuat tekan beton dilakukan berdasarkan [8] menggunakan benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian dilaksanakan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari untuk setiap variasi rasio air-semen (w/c) sebesar 0,35; 0,45; dan 0,60, dengan tiga benda uji pada setiap kombinasi variasi campuran dan umur pengujian, sehingga total benda uji yang digunakan sebanyak 36 silinder. Kuat tekan ditentukan berdasarkan beban maksimum yang mampu ditahan benda uji hingga mengalami keruntuhan, kemudian dinyatakan sebagai nilai rata-rata dari tiga hasil pengujian. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi perkembangan kuat tekan terhadap umur beton serta pengaruh variasi rasio air-semen terhadap kinerja mekanis beton ringan agregat batu apung. Selain itu, pola keruntuhan diamati secara visual untuk mengidentifikasi kecenderungan kegagalan pada agregat batu apung maupun matriks mortar.

Pengujian Penetrasi Air Bertekanan

Pengujian penetrasi air dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan beton terhadap masuknya air akibat perbedaan tekanan. Pengujian mengacu pada EN 12390-8, *Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure* [9].

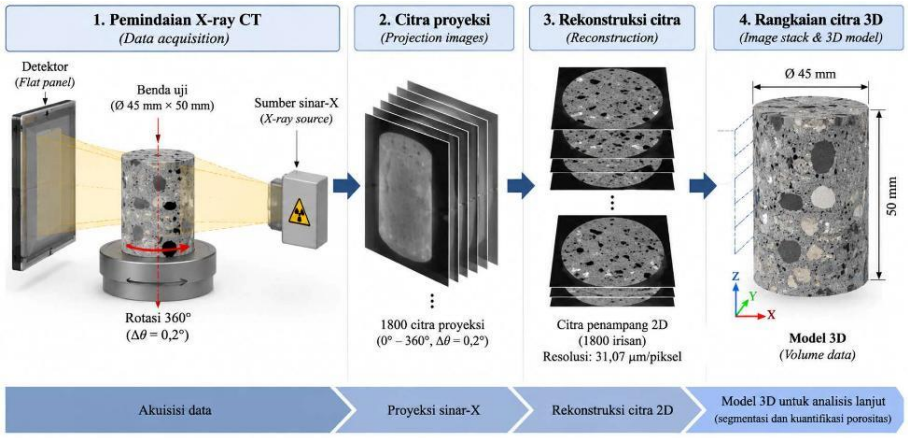
Pengujian dilakukan terhadap benda uji berumur 28 hari. Air bertekanan diaplikasikan pada salah satu permukaan benda uji sesuai prosedur standar pengujian. Setelah pengujian selesai, benda uji dibelah untuk mengamati kedalaman penetrasi air dari permukaan yang menerima tekanan.

Parameter utama yang diperoleh adalah kedalaman penetrasi air, yang dinyatakan dalam milimeter. Nilai tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh variasi rasio air-semen terhadap ketahanan penetrasi air dan sebagai parameter masukan dalam estimasi koefisien permeabilitas.

Pemindaian X-ray Micro-Computed Tomography

Karakterisasi mikrostruktur beton ringan agregat batu apung dilakukan menggunakan metode *X-ray micro-computed tomography (micro-CT)* untuk mengidentifikasi distribusi agregat, mortar, dan pori secara tiga dimensi tanpa merusak benda uji selama proses pemindaian. Benda uji berupa silinder beton berdiameter 45 mm dan tinggi 50 mm yang diperoleh melalui proses pengeboran inti (core drilling). Pemindaian dilakukan dengan memancarkan sinar-X melalui benda uji pada interval rotasi sebesar 0,2°, sehingga diperoleh serangkaian citra proyeksi dari berbagai sudut pengamatan. Data proyeksi tersebut kemudian direkonstruksi menjadi citra penampang dua dimensi (cross-sectional images) dengan resolusi spasial yang dilaporkan sebesar 31,07 µm.

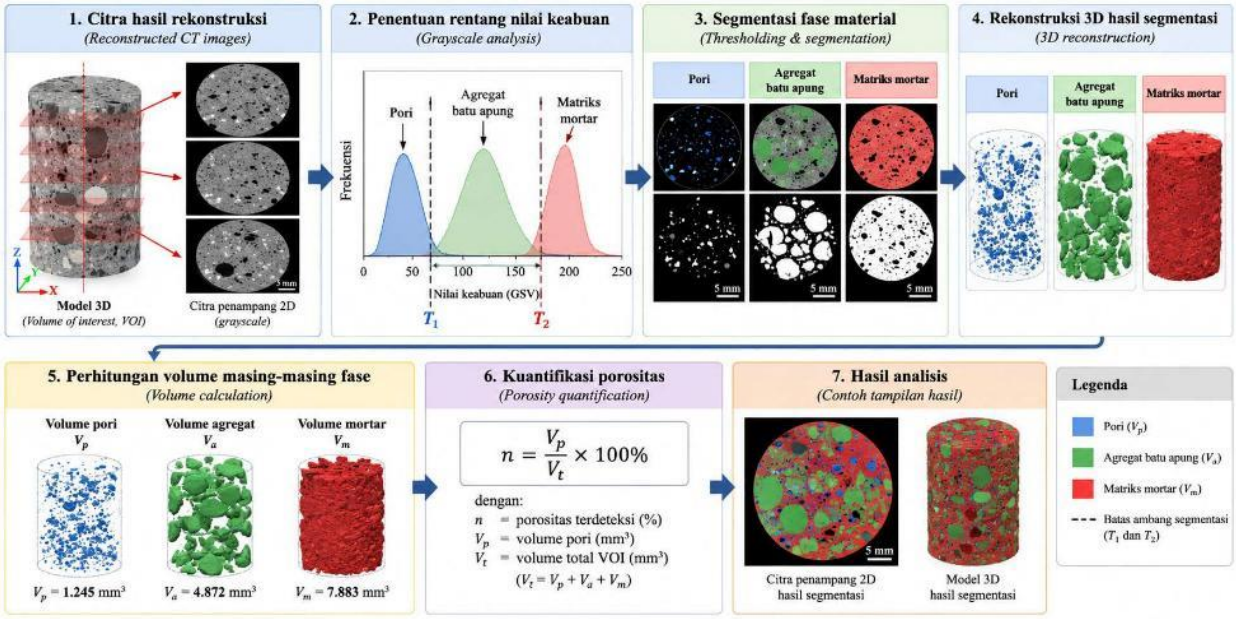
Sistematika perolehan data X-ray CT ditunjukkan pada Gambar 1, yang menggambarkan tahapan pemindaian benda uji, perolehan citra penampang, dan penyusunan rangkaian citra (image stack) untuk merepresentasikan struktur internal beton. Setiap citra penampang memperlihatkan variasi nilai keabuan (*grayscale value*) yang berkaitan dengan perbedaan karakteristik atenuasi sinar-X pada masing-masing komponen material. Rangkaian citra tersebut selanjutnya digunakan untuk membentuk model tiga dimensi sebagai dasar identifikasi distribusi agregat batu apung, matriks mortar, dan rongga internal. Data hasil rekonstruksi kemudian dianalisis melalui proses segmentasi citra untuk memperoleh informasi kuantitatif mengenai volume dan distribusi porositas pada masing-masing komponen beton.



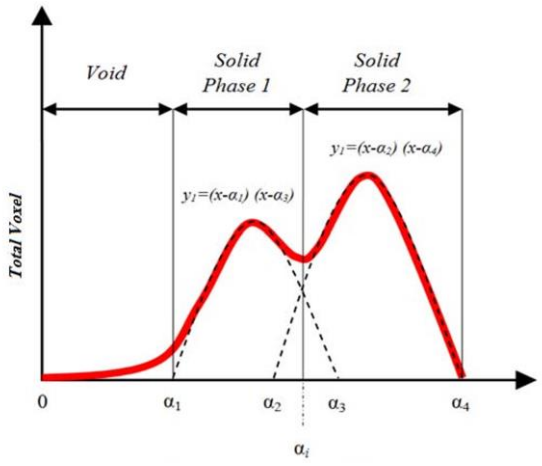
Gambar 1. Sistematika perolehan data *X-ray CT*

Pengolahan Citra dan Segmentasi Material

Tahapan pengolahan citra dan kuantifikasi porositas ditunjukkan pada Gambar 2. Dengan resolusi spasial pemindaian sebesar 31,07 µm, hasil analisis terbatas pada pori yang dapat diidentifikasi pada resolusi tersebut. Oleh karena itu, porositas hasil segmentasi dinyatakan sebagai porositas terdeteksi (*CT-detectable porosity*), bukan porositas total aktual material. Keterbatasan resolusi dan ketidakpastian segmentasi perlu diperhitungkan dalam interpretasi karakteristik mikrostruktur beton [6].



Gambar 2. Tahapan pengolahan citra X-ray micro-computed tomography (micro-CT) untuk segmentasi fase material dan kuantifikasi porositas beton agregat batu apung.



Gambar 3. Penentuan nilai ambang (*threshold*) untuk segmentasi fase material berdasarkan analisis histogram nilai keabuan (*grayscale value*, GSV).

Pengolahan citra X-ray *micro-computed tomography* (micro-CT) dilakukan untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi fase penyusun beton, meliputi agregat batu apung, matriks mortar, dan pori, berdasarkan distribusi nilai keabuan (*grayscale value*, GSV). Proses diawali dengan penentuan *volume of interest* (VOI), analisis histogram GSV, dan penetapan nilai ambang (*threshold*) untuk segmentasi fase material. Perbedaan GSV mencerminkan variasi atenuasi sinar-X yang dipengaruhi oleh densitas dan komposisi material. Ketepatan segmentasi menjadi faktor penting karena kesalahan klasifikasi dapat memengaruhi hasil kuantifikasi porositas [10].

Heterogenitas struktur internal agregat batu apung menyebabkan variasi GSV antarbutiran dan tumpang tindih intensitas dengan fase mortar maupun pori. Oleh karena itu, segmentasi agregat dilakukan secara individual pada setiap butiran untuk meminimalkan kesalahan klasifikasi akibat penggunaan *threshold* global [11]. Hasil segmentasi direkonstruksi menjadi model tiga dimensi untuk menentukan volume masing-masing fase serta distribusi pori pada agregat dan matriks mortar.

Identifikasi dan pemisahan fase material pada citra X-ray *micro-computed tomography* (micro-CT) dilakukan berdasarkan analisis distribusi nilai keabuan (*Grayscale Value*, GSV). Histogram GSV digunakan untuk mengidentifikasi tiga fase utama penyusun beton agregat batu apung, yaitu fase pori

(*void*), agregat batu apung (*solid phase 1*), dan matriks mortar (*solid phase 2*).

Penentuan nilai ambang (*threshold*) dilakukan dengan mengidentifikasi puncak-puncak distribusi histogram yang merepresentasikan masing-masing fase material. Distribusi pada fase padat didekati menggunakan dua persamaan polinomial orde dua. Titik perpotongan kedua kurva digunakan sebagai salah satu batas pemisahan fase padat, sedangkan batas fase pori ditentukan berdasarkan perubahan distribusi intensitas pada histogram.

Berdasarkan batas ambang tersebut, citra dikelompokkan menjadi tiga rentang GSV, yaitu fase pori pada rentang 0 hingga α_1, agregat batu apung pada rentang α_1 hingga α_i, dan matriks mortar pada rentang α_i hingga α_4, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.

Untuk meminimalkan pengaruh efek tepi (*edge effect*) dan mengurangi kebutuhan komputasi, ditentukan daerah pengamatan (*Region of Interest*, ROI) dan volume analisis (*Volume of Interest*, VOI). Ukuran VOI dibatasi sebesar 1000 × 1000 × 1000 voxel. Selanjutnya, hasil segmentasi digunakan untuk mengidentifikasi distribusi spasial dan menghitung volume masing-masing fase material.

Kuantifikasi Porositas

Porositas beton dikuantifikasi berdasarkan hasil segmentasi citra X-ray micro-CT melalui perbandingan volume pori teridentifikasi terhadap volume total yang dianalisis (*volume of interest, VOI*). Analisis dilakukan secara terpisah terhadap pori di dalam agregat batu apung dan matriks mortar untuk mengevaluasi kontribusi masing-masing fase terhadap porositas beton. Porositas terdeteksi dihitung menggunakan persamaan:

$$n_{CT} = \frac{V_p}{V_{VOI}} \times 100\% \quad (1)$$

dimana:
n_{CT} = Porositas melalui X-ray CT (%)
V_p = Volume pori hasil segmentasi (mm^3)
V_{VOI} = Volume daerah analisis (mm^3)

Kuantifikasi porositas mempertimbangkan keterbatasan resolusi pemindaian sebesar 31,07 μm, sehingga pori dan konektivitas antarrongga pada skala yang lebih kecil tidak seluruhnya teridentifikasi [6].

Pendekatan Analisis Permeabilitas

Koefisien permeabilitas beton diestimasi menggunakan pendekatan Valenta [12] berdasarkan kedalaman penetrasi air bertekanan dan porositas efektif yang diasumsikan berkontribusi terhadap aliran. Estimasi dilakukan menggunakan persamaan:

$$k = \frac{\alpha d^2}{2Ht} \quad (2)$$

dengan (k) adalah koefisien permeabilitas (m/s), (α) adalah porositas efektif terkoneksi dalam bentuk fraksi volume beton, (d) adalah kedalaman penetrasi air (m), (H) adalah tinggi tekanan hidraulik ekuivalen (m), dan (t) adalah durasi pengujian (s).

Karena konektivitas pori belum dapat diidentifikasi secara langsung melalui hasil pemindaian, nilai (α) diestimasi berdasarkan kontribusi porositas agregat dan mortar serta asumsi fraksi pori terkoneksi masing-masing sebesar 72–78% dan 32–52%. Pendekatan pembobotan tersebut menghasilkan estimasi fraksi pori terkoneksi relatif sebesar 68–75% dari porositas terdeteksi. Koefisien permeabilitas kemudian dihitung sebagai rentang nilai untuk setiap variasi campuran. Hasil perhitungan diperlakukan sebagai estimasi berbasis asumsi konektivitas pori, bukan hasil pengukuran permeabilitas langsung [2].

Pendekatan Evaluasi Kontribusi Agregat terhadap Kuat Tekan

Pengaruh karakteristik agregat batu apung terhadap kuat tekan beton dievaluasi secara tidak langsung menggunakan model empiris hubungan porositas dan kuat tekan mortar yang dikembangkan oleh [4]. Analisis dilakukan dengan membandingkan kuat tekan eksperimental terhadap kuat tekan prediksi berdasarkan porositas hasil X-ray CT, termasuk skenario hipotetis ketika volume agregat batu apung diperlakukan sebagai rongga (*void-equivalent approach*).

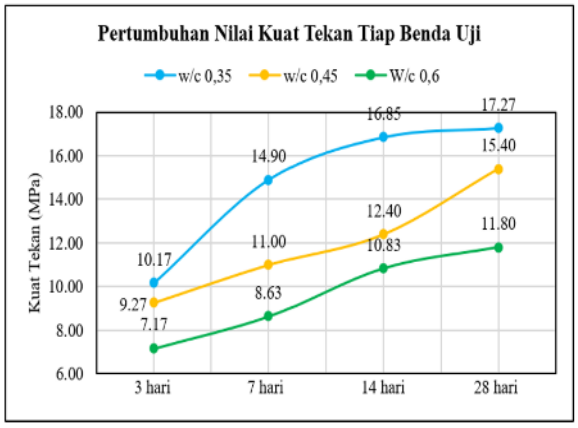
Perbandingan tersebut digunakan untuk mengevaluasi sensitivitas kuat tekan terhadap representasi porositas dan menginterpretasikan kemungkinan pengaruh agregat terhadap mekanisme keruntuhan beton. Mengingat model empiris dikembangkan untuk mortar dengan karakteristik campuran tertentu, hasil analisis digunakan sebagai pendekatan komparatif dan tidak ditafsirkan sebagai pengukuran langsung kontribusi mekanis agregat [4].

HASIL DAN DISKUSI

Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan sampel beton untuk masing-masing w/c disajikan pada Gambar 4. Dari Gambar 4, dapat dilihat bahwa kuat tekan beton ringan agregat batu apung meningkat seiring

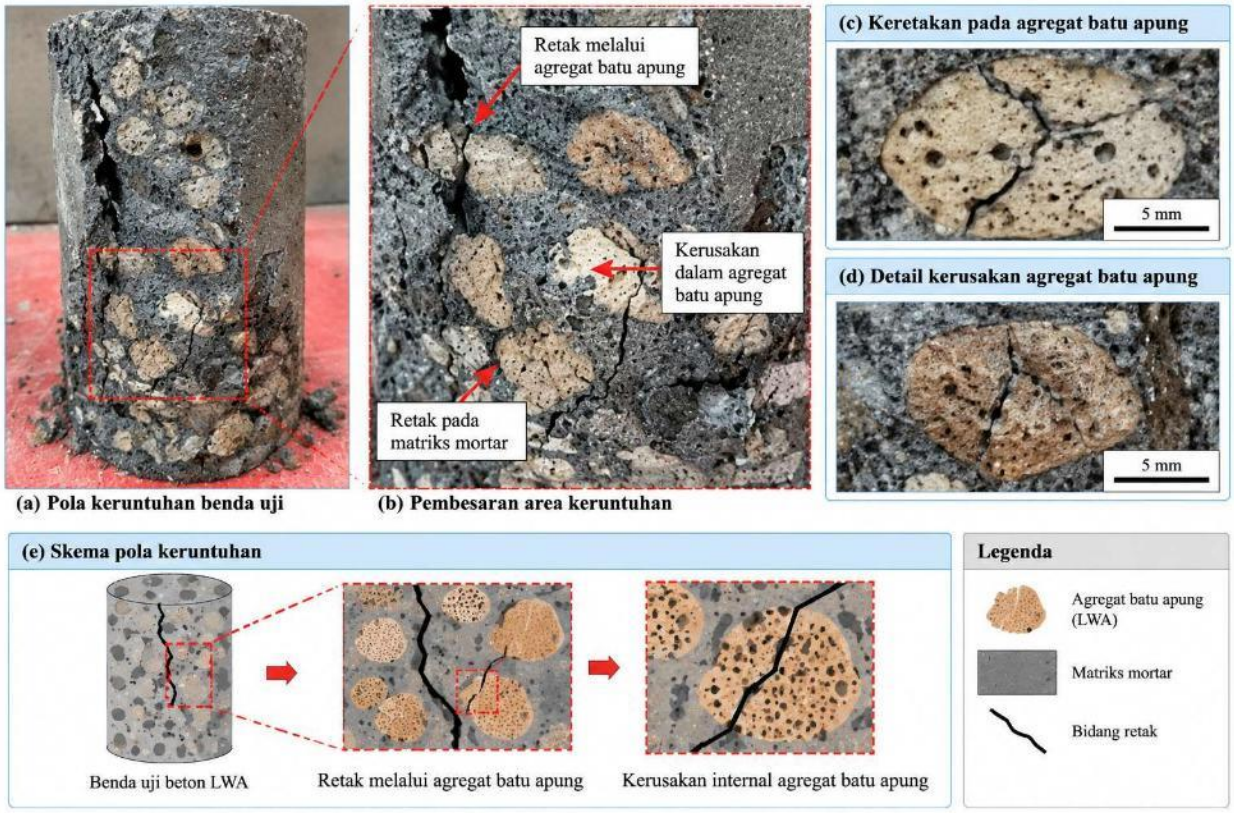
bertambahnya umur beton. Pada umur 3 hari, kuat tekan telah mencapai sekitar 60% dari kuat tekan umur 28 hari. Perkembangan tersebut mengindikasikan pembentukan kekuatan awal yang relatif besar, meskipun peningkatan kuat tekan masih berlangsung hingga umur pengujian 28 hari.



Gambar 4. Pertumbuhan nilai kuat tekan

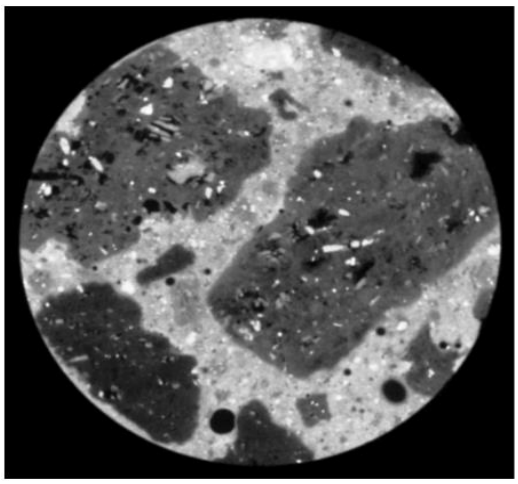
Pada umur 28 hari, kuat tekan rata-rata untuk rasio air-semen (w/c) 0,35; 0,45; dan 0,60 masing-masing sebesar 17,27 MPa; 15,40 MPa; dan 11,80 MPa. Penurunan w/c dari 0,60 menjadi 0,35 meningkatkan kuat tekan sebesar 46,4%. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa pengurangan rasio air-semen meningkatkan kinerja mekanis matriks mortar. Namun, peningkatan kuat tekan beton secara keseluruhan juga dipengaruhi oleh karakteristik mekanis agregat batu apung yang memiliki struktur internal berpori.

Pengamatan pola keruntuhan pada Gambar 5 memperlihatkan bahwa bidang retak cenderung melintasi dan menyebabkan kerusakan pada butiran agregat batu apung, bukan hanya berkembang di sepanjang zona transisi antarmuka (interfacial transition zone, ITZ). Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa kekuatan agregat berpotensi menjadi salah satu faktor pembatas kapasitas tekan beton. Dengan demikian, peningkatan kekuatan matriks akibat penurunan w/c tidak selalu menghasilkan peningkatan kuat tekan beton secara proporsional apabila keruntuhan didominasi oleh kerusakan agregat.



Gambar 5. Pola keruntuhan agregat pada benda uji

Analisis 2 Dimensi Citra X-ray



Gambar 6. Identifikasi fase void, agregat batu apung (LWA), dan matriks mortar pada citra penampang dua dimensi X-ray CT.

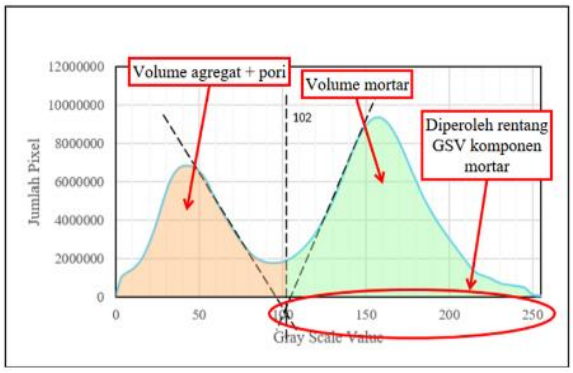
Gambar 6 menunjukkan tipikal citra 2D hasil X-ray CT. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, terdapat tiga fase utama penyusun beton, yaitu rongga (void), agregat batu apung (lightweight aggregate, LWA), dan matriks mortar. Fase void direpresentasikan oleh intensitas keabuan rendah (hitam), yang mencakup rongga udara terperangkap (*entrapped air void*) pada matriks mortar serta pori internal agregat batu apung. Fase LWA terlihat berwarna abu-abu gelap dengan distribusi pori internal yang heterogen, sedangkan matriks mortar memiliki intensitas keabuan relatif lebih tinggi (abu-abu terang).

Keberadaan pori internal pada LWA menunjukkan bahwa porositas total beton tidak hanya berasal dari rongga dalam matriks mortar, tetapi juga dipengaruhi oleh struktur berpori agregat batu apung. Dengan demikian, kuantifikasi porositas perlu membedakan kontribusi pori internal LWA dan pori matriks mortar terhadap volume pori keseluruhan. Perbedaan intensitas keabuan ketiga fase tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar segmentasi citra tiga dimensi untuk menentukan distribusi dan volume pori yang terdeteksi.

Analisis Histogram *Grey Scale Value (GSV)*

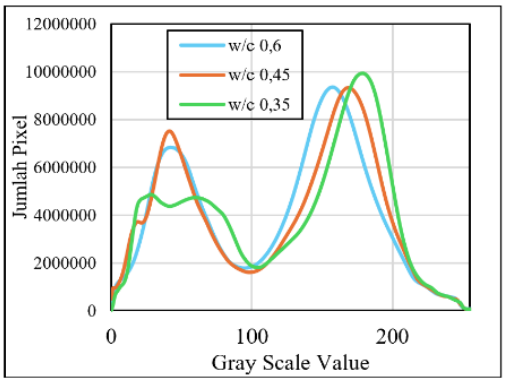
Analisis citra X-ray *micro-computed tomography* (micro-CT) dilakukan berdasarkan distribusi nilai keabuan (*grayscale value*, GSV) untuk mengidentifikasi tiga fase penyusun beton agregat batu apung, yaitu satu fase rongga (*void*) dan dua fase padat (*solid*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Fase void merepresentasikan pori yang terdapat di dalam matriks mortar maupun agregat ringan batu apung (*lightweight aggregate*, LWA), dengan karakteristik GSV relatif rendah akibat rendahnya atenuasi sinar-X. Fase padat pertama merupakan agregat batu apung yang memiliki densitas dan tingkat atenuasi lebih rendah dibandingkan mortar, sehingga umumnya berada pada rentang GSV menengah. Sementara itu, fase padat kedua merupakan matriks mortar yang memiliki tingkat atenuasi relatif lebih tinggi dan direpresentasikan oleh GSV yang lebih besar.

Perbedaan distribusi GSV tersebut digunakan sebagai dasar penentuan nilai ambang (*threshold*) untuk segmentasi ketiga fase material. Namun, tumpang tindih rentang GSV akibat heterogenitas dan porositas internal agregat batu apung menyebabkan pemisahan fase tidak dapat sepenuhnya dilakukan menggunakan satu nilai ambang global. Oleh karena itu, identifikasi agregat dilakukan secara individual untuk meningkatkan ketepatan pemisahan pori, agregat batu apung, dan matriks mortar.



Gambar 7. Identifikasi fase void, agregat batu apung, dan matriks mortar berdasarkan distribusi *grayscale value* (GSV) hasil X-ray CT

Gambar 8 menunjukkan perbandingan distribusi *grayscale value* (GSV) beton agregat batu apung pada variasi rasio air-semen (w/c) 0,35; 0,45; dan 0,60. Ketiga histogram memperlihatkan distribusi multimodal dengan dua kelompok puncak utama, yaitu pada rentang GSV sekitar 20–80 dan 140–200. Kelompok intensitas rendah terutama berkaitan dengan keberadaan agregat batu apung berpori, sedangkan kelompok intensitas tinggi didominasi oleh matriks mortar. Tumpang tindih distribusi GSV antarfase mengindikasikan adanya heterogenitas karakteristik atenuasi sinar-X, terutama pada agregat batu apung.



Gambar 8. Hasil histogram masing-masing variasi

Heterogenitas tersebut juga teridentifikasi melalui analisis citra tiga dimensi, yang menunjukkan bahwa butiran agregat batu apung dalam campuran yang sama memiliki rentang GSV yang bervariasi. Fenomena ini berkaitan dengan perbedaan densitas, komposisi mineral, serta karakteristik porositas internal agregat batu apung [13], [14] . Selain volume pori, distribusi spasial pori turut memengaruhi nilai GSV yang terukur. Agregat dengan pori yang tersebar merata cenderung menunjukkan intensitas keabuan lebih rendah dibandingkan agregat dengan pori yang terkonsentrasi secara lokal, terutama akibat efek volume parsial (*partial volume effect*) pada resolusi pemindaian yang digunakan. Variasi tersebut menyebabkan rentang GSV agregat berpotensi tumpang tindih dengan fase void maupun mortar, sehingga segmentasi berdasarkan satu nilai ambang (*global threshold*) dapat menghasilkan kesalahan klasifikasi fase material.

Selanjutnya, dari Gambar 8 dapat dilihat bahwa peningkatan w/c menyebabkan pergeseran puncak dominan matriks mortar menuju nilai GSV yang lebih rendah. Pada w/c 0,35, puncak mortar berada di sekitar GSV 178, kemudian bergeser menjadi sekitar 170 pada w/c 0,45 dan 157 pada w/c 0,60. Pergeseran tersebut mengindikasikan penurunan atenuasi sinar-X relatif pada matriks mortar seiring meningkatnya rasio air-semen. Secara mikrostruktural, kecenderungan ini konsisten dengan kemungkinan meningkatnya porositas dan menurunnya kerapatan matriks mortar pada campuran dengan w/c lebih tinggi.

Pada rentang GSV rendah, campuran w/c 0,35 memperlihatkan distribusi yang lebih lebar dan cenderung memiliki beberapa puncak lokal dibandingkan kedua variasi lainnya. Kondisi tersebut mengindikasikan variasi karakteristik atenuasi antarbutiran agregat batu apung, yang dapat dipengaruhi oleh heterogenitas struktur internal dan distribusi porinya. Sementara itu, kemiripan posisi puncak intensitas rendah pada w/c 0,45 dan 0,60 menunjukkan bahwa perbedaan respons GSV kedua campuran lebih menonjol pada fase mortar dibandingkan fase agregat.

Secara keseluruhan, pergeseran puncak mortar ke GSV yang lebih rendah sejalan dengan kecenderungan penurunan kuat tekan beton dari 17,27 MPa pada w/c 0,35 menjadi 11,80 MPa pada w/c 0,60. Hubungan ini mengindikasikan bahwa perubahan karakteristik matriks mortar berkontribusi terhadap respons mekanis beton.

Porositas

Hasil rekonstruksi dan segmentasi *citra X-ray micro-computed tomography* (micro-CT) menunjukkan distribusi pori tiga dimensi pada beton agregat batu apung untuk variasi rasio air-semen (w/c) 0,35; 0,45; dan 0,60, ditunjukkan pada Gambar 9. Secara visual, pori terdeteksi tersebar secara heterogen dengan konsentrasi yang relatif tinggi pada agregat batu apung. Analisis dibatasi oleh resolusi spasial pemindaian sebesar 31,07 µm, sehingga pori berukuran kecil dan saluran penghubung antarpori yang berada di bawah kemampuan resolusi sistem tidak seluruhnya dapat diidentifikasi.

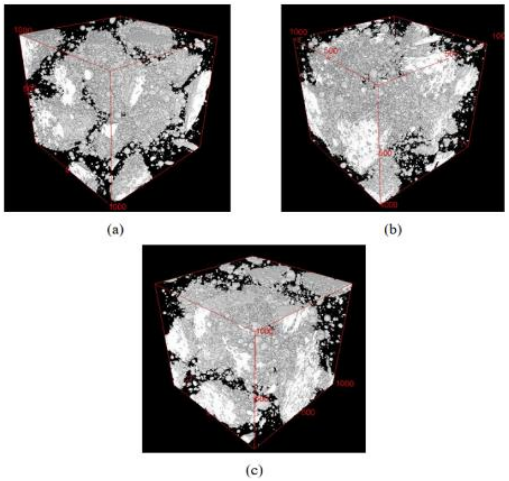
Kuantifikasi porositas pada Gambar 10 menunjukkan bahwa porositas total meningkat dari 17,68% pada w/c 0,35 menjadi 18,30% dan 18,62% masing-masing pada w/c 0,45 dan 0,60. Kontribusi pori internal agregat batu apung masing-masing sebesar 16,01%; 16,56%; dan 16,72%, atau sekitar 90% dari porositas total yang terdeteksi. Dominasi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik porositas beton ringan terutama dipengaruhi oleh struktur internal agregat batu apung.

Sementara itu, kontribusi porositas matriks mortar meningkat dari 1,67% pada w/c 0,35 menjadi 1,73% pada w/c 0,45 dan 1,89% pada w/c 0,60. Peningkatan sebesar 0,22 poin persentase tersebut menunjukkan kecenderungan bertambahnya volume pori mortar seiring peningkatan rasio air-semen. Fenomena ini konsisten dengan terbentuknya struktur matriks yang relatif lebih berpori pada campuran dengan w/c lebih tinggi, sebagaimana diindikasikan oleh pergeseran puncak *grayscale value* (GSV) mortar pada Gambar 8.

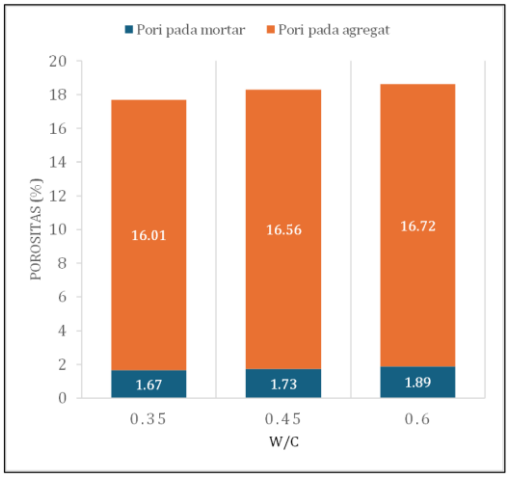
Meskipun porositas agregat batu apung relatif dominan, perubahan porositas total antarvariasi campuran tidak sepenuhnya ditentukan oleh matriks mortar. Kontribusi pori agregat juga mengalami variasi sebesar 0,71 poin persentase,

yang dapat berkaitan dengan heterogenitas internal agregat dan perbedaan distribusi butiran dalam volume citra yang dianalisis. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa porositas agregat menentukan sebagian besar volume pori terdeteksi, sedangkan peningkatan w/c berkaitan dengan perubahan porositas matriks mortar.

Perlu diperhatikan bahwa porositas terdeteksi tidak secara langsung merepresentasikan porositas efektif yang berkontribusi terhadap aliran air. Konektivitas dan geometri jaringan pori merupakan parameter tambahan yang menentukan karakteristik permeabilitas beton. Oleh karena itu, hubungan antara porositas hasil X-ray CT dan permeabilitas perlu dievaluasi dengan mempertimbangkan keterhubungan pori serta keterbatasan resolusi pemindaian.



Gambar 9. Visualisasi tiga dimensi distribusi pori terdeteksi pada beton agregat batu apung dengan variasi rasio air-semen (w/c): (a) 0,35; (b) 0,45; dan (c) 0,60



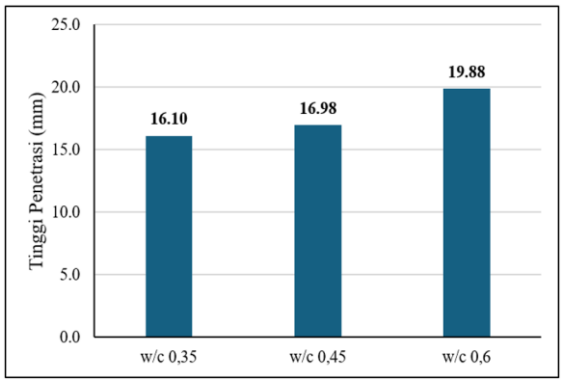
Gambar 10. Kontribusi porositas agregat batu apung dan matriks mortar terhadap porositas total beton berdasarkan analisis *X-ray micro*-CT pada berbagai rasio air-semen (w/c).

Permeabilitas

Gambar 11 menyajikan hasil pengujian penetrasi air bertekanan pada beton dengan agregat batu apung pada umur 28 hari. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11 peningkatan rasio air-semen (w/c) cenderung meningkatkan kedalaman penetrasi air. Kedalaman penetrasi rata-rata pada w/c 0,35; 0,45; dan 0,60 masing-masing sebesar 16,10 mm; 16,98 mm; dan 19,88 mm. Peningkatan w/c dari 0,35 menjadi 0,60 menghasilkan kenaikan kedalaman penetrasi sebesar 23,5%, yang mengindikasikan penurunan ketahanan beton terhadap masuknya air bertekanan.

Kecenderungan tersebut konsisten dengan peningkatan porositas matriks mortar hasil analisis X-ray micro-CT, yaitu dari 1,67% pada w/c 0,35 menjadi 1,89% pada w/c 0,60. Peningkatan rasio air-semen berpotensi menghasilkan struktur pori matriks yang lebih berkembang sehingga mempermudah penetrasi air. Meskipun demikian, karakteristik transport air tidak hanya ditentukan oleh volume pori, tetapi juga oleh konektivitas, ukuran, dan tortuositas jaringan pori [5].

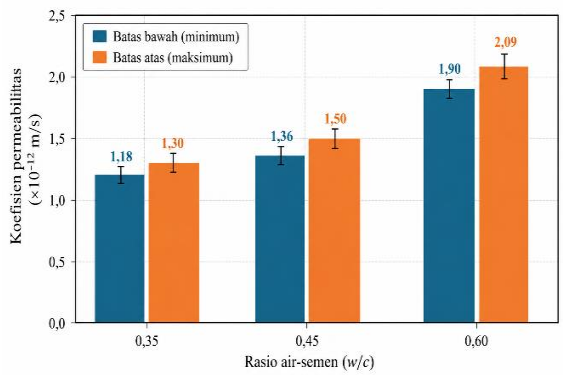
Estimasi koefisien permeabilitas dilakukan menggunakan pendekatan Valenta berdasarkan kedalaman penetrasi air dan porositas efektif yang diasumsikan berkontribusi terhadap aliran. Hasil analisis pada Gambar 12 menunjukkan bahwa koefisien permeabilitas meningkat dari (1,18–1,30) $\times 10^{-12}$ m/s pada w/c 0,35 menjadi (1,36–1,50) $\times 10^{-12}$ m/s pada w/c 0,45 dan (1,90–2,09) $\times 10^{-12}$ m/s pada w/c 0,60. Kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan rasio air-semen berkaitan dengan meningkatnya kemampuan air menembus struktur beton.



Gambar 11. Kedalaman penetrasi air rata-rata pada berbagai rasio air-semen

Hasil kuantifikasi X-ray CT menunjukkan bahwa sekitar 90% porositas terdeteksi berada di dalam agregat batu apung. Namun, dominasi volume

pori agregat tidak secara langsung menunjukkan kontribusi yang setara terhadap permeabilitas. Pori internal agregat yang terisolasi tidak membentuk jalur aliran kontinu, sedangkan pori yang terhubung melalui matriks mortar dan zona transisi antarmuka (interfacial transition zone, ITZ) berpotensi berkontribusi terhadap transport air. Oleh karena itu, estimasi permeabilitas mempertimbangkan asumsi konektivitas pori agregat sebesar 72–78% dan mortar sebesar 32–52% [5][15][16].



Gambar 12. Estimasi koefisien permeabilitas beton agregat batu apung menggunakan pendekatan Valenta pada berbagai rasio air-semen (w/c)

Untuk mengevaluasi kewajaran hasil perhitungan, koefisien permeabilitas pada w/c 0,45 dibandingkan dengan hasil penelitian Hossain et al. (2011). Nilai rata-rata estimasi penelitian ini sebesar $1{,}43 \times 10^{-12}$ m/s, sedangkan nilai pembanding dari [2] sebesar $3{,}00 \times 10^{-12}$ m/s. Hasil estimasi penelitian ini sekitar 52,3% lebih rendah dibandingkan penelitian terdahulu, meskipun keduanya berada pada orde besaran yang sama, yaitu 10^{-12} m/s. Perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik agregat, komposisi campuran, struktur jaringan pori, serta kondisi pengujian. Dengan demikian, perbandingan ini menunjukkan kewajaran awal orde besaran koefisien permeabilitas.

Secara keseluruhan, peningkatan rasio air-semen diikuti oleh peningkatan kedalaman penetrasi air dan koefisien permeabilitas estimasi. Meskipun sekitar 90% porositas terdeteksi berasal dari agregat batu apung, kontribusinya terhadap permeabilitas bergantung pada konektivitas pori dengan matriks mortar. Oleh karena itu, porositas total hasil X-ray CT tidak dapat secara langsung disamakan dengan porositas efektif yang mengendalikan aliran air. Mengingat konektivitas pori belum diukur secara langsung, koefisien permeabilitas yang diperoleh tetap diinterpretasikan sebagai hasil estimasi berdasarkan asumsi model.

Peran Agregat Batu Apung terhadap Kuat Tekan Beton

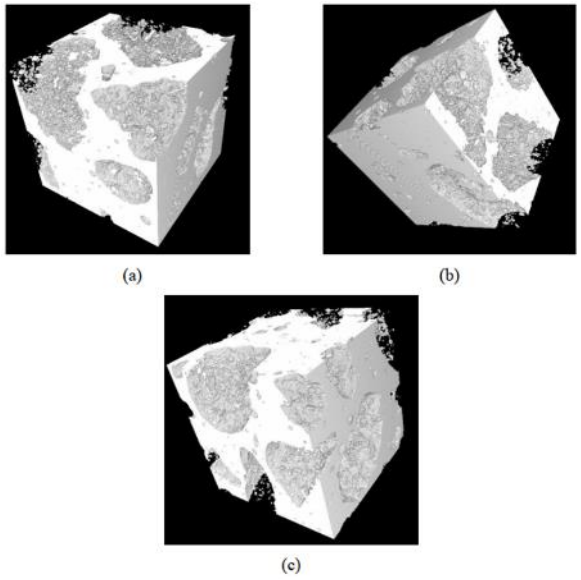
Pengamatan pola keruntuhan pada pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa retak tidak hanya berkembang pada matriks mortar dan zona transisi antarmuka (interfacial transition zone, ITZ), tetapi juga melintasi butiran agregat batu apung. Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa kekuatan agregat berpotensi menjadi salah satu faktor pembatas kapasitas tekan beton. Struktur internal batu apung yang berpori menyebabkan ketahanan mekanisnya berbeda dari agregat normal, sehingga peningkatan kekuatan matriks mortar akibat penurunan rasio air-semen (w/c) tidak selalu diikuti peningkatan kuat tekan beton secara proporsional.

Untuk mengevaluasi pengaruh keberadaan agregat terhadap respons kuat tekan, digunakan pendekatan empiris [4] yang menghubungkan porositas dengan kuat tekan mortar. Evaluasi dilakukan melalui skenario hipotetis dengan memperlakukan volume agregat batu apung sebagai rongga (*void-equivalent approach*). Berdasarkan hasil segmentasi X-ray CT, porositas ekuivalen pada *w/c* 0,35; 0,45; dan 0,60 masing-masing sebesar 36,70%; 37,80%; dan 38,56%, sebagaimana disajikan pada Tabel 3. Representasi tiga dimensi dari skenario tersebut ditunjukkan pada Gambar 13.

Tabel 3. Porositas masing-masing benda uji

w/c	Porositas (%)			
	Mortar	Agregat	Keseluruhan	Tanpa Agregat
0,35	1,67	16,01	17,68	36,70
0,45	1,73	16,56	18,30	37,80
0,6	1,89	16,72	18,62	38,56

Hasil penerapan persamaan Chen menghasilkan kuat tekan prediksi sekitar 18,20 MPa; 17,07 MPa; dan 16,30 MPa, sedangkan kuat tekan eksperimental masing-masing sebesar 17,27 MPa; 15,40 MPa; dan 11,80 MPa. Perbandingan pada Gambar 13 menunjukkan bahwa nilai prediksi lebih tinggi daripada hasil pengujian, dengan selisih yang meningkat seiring bertambahnya w/c. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa model berbasis porositas ekuivalen belum sepenuhnya merepresentasikan respons mekanis beton agregat batu apung.



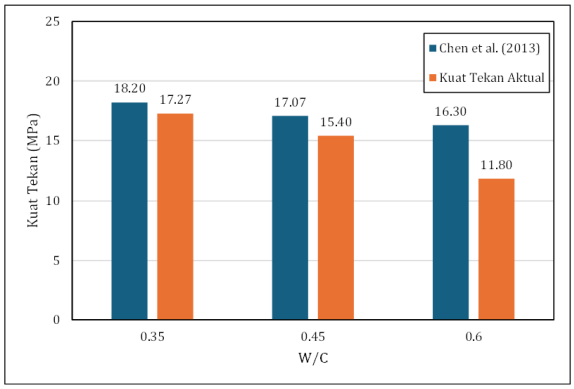
Gambar 13. Model 3D mortar w/c 0,35 (a); w/c 0,45 (b); & w/c 0,6 (c)

Ketidaksesuaian tersebut perlu ditinjau dengan mempertimbangkan karakteristik material dan batas penerapan model. Persamaan [4] dikembangkan untuk mortar dengan rasio pasir-semen sebesar 1,20, sedangkan campuran dalam penelitian ini memiliki rasio pasir-semen masing-masing sebesar 1,03; 1,54; dan 2,31. Selain itu, pendekatan yang memperlakukan agregat sebagai rongga mengabaikan kekakuan agregat, transfer tegangan antara agregat dan mortar, serta karakteristik ITZ. Oleh karena itu, selisih antara kuat tekan prediksi dan eksperimental tidak dapat diinterpretasikan secara langsung sebagai besarnya kontribusi mekanis agregat.

Secara keseluruhan, hasil pengujian kuat tekan, pengamatan pola keruntuhan, dan karakterisasi X-ray CT mengindikasikan bahwa agregat batu apung berperan penting dalam menentukan karakteristik mekanis beton ringan. Penggunaannya memungkinkan pengurangan berat isi beton, tetapi struktur agregat yang berpori berpotensi membatasi peningkatan kuat tekan. Dengan demikian, pengembangan beton agregat batu apung perlu mempertimbangkan keseimbangan antara berat isi, kekuatan matriks mortar, dan karakteristik mekanis agregat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis mikrostruktur menggunakan X-ray micro-computed tomography (micro-CT), diperoleh kesimpulan sebagai berikut:



Gambar 14. Hasil pendekatan kuat tekan dengan persamaan regresi Chen [4]

1. Peningkatan rasio air-semen (w/c) dari 0,35 menjadi 0,60 menyebabkan penurunan kuat tekan beton agregat batu apung sebesar 31,7%, dari 17,27 MPa menjadi 11,80 MPa, disertai peningkatan kedalaman penetrasi air. Hasil ini menunjukkan bahwa rasio air-semen tetap berperan penting dalam menentukan kinerja mekanis dan ketahanan penetrasi air beton ringan, meskipun agregat memiliki struktur internal berpori.
2. Hasil X-ray micro-CT menunjukkan bahwa sekitar 90% porositas terdeteksi berasal dari agregat batu apung, dengan porositas total sebesar 17,68–18,62% dan kontribusi porositas mortar sebesar 1,67–1,89% terhadap volume beton. Temuan ini menegaskan bahwa karakteristik porositas beton agregat batu apung terutama didominasi oleh mikrostruktur internal agregat, sehingga evaluasi porositas perlu membedakan kontribusi agregat dan matriks mortar.
3. Dominasi porositas agregat tidak secara langsung menunjukkan dominasi kontribusinya terhadap permeabilitas. Koefisien permeabilitas estimasi meningkat dari (1,18–1,30) × 10^{-12} m/s pada w/c 0,35 menjadi (1,90–2,09) × 10^{-12} m/s pada w/c 0,60. Hasil ini mengindikasikan bahwa karakteristik transport air tidak hanya ditentukan oleh volume pori, tetapi juga oleh konektivitas jaringan pori. Namun, karena konektivitas belum diukur secara langsung, interpretasi permeabilitas tetap bergantung pada asumsi model Valenta.
4. Pengamatan pola keruntuhan menunjukkan bahwa retak berkembang melintasi agregat batu apung, yang mengindikasikan bahwa karakteristik mekanis agregat berpotensi membatasi kuat tekan beton. Pendekatan empiris Chen et al. (2013) menghasilkan perbedaan

prediksi terhadap kuat tekan eksperimental sebesar 5,4–38,1%. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan porositas–kuat tekan yang dikembangkan untuk mortar belum dapat secara langsung merepresentasikan respons mekanis beton agregat batu apung tanpa mempertimbangkan interaksi agregat dan matriks.

5. Integrasi hasil karakterisasi mikrostruktur X-ray micro-CT dengan pengujian kuat tekan dan penetrasi air menunjukkan bahwa evaluasi kinerja beton agregat batu apung tidak cukup hanya didasarkan pada porositas total. Distribusi pori pada masing-masing fase material perlu dipertimbangkan bersama karakteristik mekanis agregat dan keterhubungan jaringan pori. Pendekatan ini memberikan dasar bagi pengembangan desain campuran beton ringan yang mempertimbangkan keseimbangan antara berat isi, kuat tekan, dan ketahanan terhadap penetrasi air.

REFERENSI

[1] M. Tanyıldızı and İ. Gökalp, "Utilization of pumice as aggregate in the concrete: A state of art," May 09, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131102.

[2] K. M. A. Hossain, S. Ahmed, and M. Lachemi, "Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 3, pp. 1186–1195, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.036.

[3] Muhtar, "Performance-based experimental study into quality zones of lightweight concrete using pumice aggregates," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e01960.

[4] X. Chen, S. Wu, and J. Zhou, "Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 40, pp. 869–874, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.072.

[5] J. Yu, H. Wang, X. Sun, Z. Chen, and W. Dong, "Characterizing connectivity and tortuosity of pore network based on LF-NMR method to assess the water permeability of white cement mortar," *Journal of Building Engineering*, vol. 93, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109862.

[6] N. Bossa *et al.*, "Micro- and nano-X-ray computed-tomography: A step forward in the characterization of the pore network of a leached cement paste," *Cem. Concr. Res.*, vol. 67, pp. 138–147, 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.08.007.

[7] ACI Committe, "ACI 211.2-98, reapproved 2004," *ACI Committee*, vol. 211, 2004.

[8] SNI 1974:2011, "SNI 1974:2011".

[9] European Committee for Standardization, "EN 12390–8. Testing hardened concrete—Part 8: Depth of penetration of water under pressure," 2009.

[10] J. Liu, H. H. Khieu, M. Van Tran, and P. Tran, "Advancing microstructural insights in 3D-Printed cementitious materials via X-ray micro-computed tomography," Aug. 01, 2025, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jobe.2025.112675.

[11] D. F. T. Razakamandimby R., H. T. Kim, T. S. Han, Y. H. Lee, and K. Park, "Recursive aggregate segmentation by erosion and reconstitution (RASER) to characterize concrete microstructure using complementarity of X-ray and neutron computed tomography," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 148, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105437.

[12] O. Valenta, "The permeability and durability of concrete in aggressive conditions," in *Proceedings 10th International Congress on Large Dams*, 1970, pp. 103–117.

[13] A. Hammal and A. Sulaiman, "Green synthesis of Fe2O3-MnO2 nano-hybrids on pumice for complete degradation of pharmaceutical pollutants," *PLoS One*, vol. 20, no. 10 October, Oct. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0334324.

[14] H. Paulick and G. Franz, "The color of pumice: case study on a trachytic fall deposit, Meidob volcanic field, Sudan," Springer-Verlag, 1997.

[15] H. M. N. Wright, J. J. Roberts, and K. V. Cashman, "Permeability of anisotropic tube pumice: Model calculations and measurements," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 33, no. 17, Sep. 2006, doi: 10.1029/2006GL027224.

[16] R. Noviandi, T. Gomi, H. S. Kharismalatri, R. C. Sidle, R. P. Ritonga, and K. Shiraki, "The Mobility of Landslides in Pumice: Insights from a Flume Experiment," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/w14193083.

This page is intentionally blank