Kinerja Mekanis Beton Ringan Menggunakan Serat Sabut Kelapa dan Agregat Batu Apung

Ade Okvianti Irlan[1*], Liastary Pradina Febrianty[2], Muhammad Sofyan[3]

[1,2]Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia
[3]Departemen Teknik Sipil, Fakultas Infrastruktur dan Teknologi Kewilayahan, Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, Indonesia
e-mail:: [*1]ade.okvianti@trisakti.ac.id, [2]liastarypradina@gmail.com, [3]m.sofyan@itpln.ac.id

Received 19th November 2025; Reviewed 5th MDecember 2025; Accepted 17th December 2025
Journal Homepage: http://jurnal.ubt.ac.id/index.php/bejts
Doi : https://doi.org/10.35334/be.v9i3.511

Abstract

The production of pumice based lightweight concrete offers a sustainable strategy to reduce dependence on natural aggregates while lowering structural self-weight. Nevertheless, reductions in density are commonly accompanied by diminished mechanical performance. This study investigates the effects of replacing 20% of coarse aggregate with pumice and incorporating coconut coir fibers at dosages ranging from 0 to 2.0% on the workability, density, compressive strength, and splitting tensile strength of concrete. Mix proportions were designed using the absolute volume method in accordance with SNI 7656:2012. Cylindrical specimens measuring 100 × 200 mm were cast, water-cured for 28 days, and tested following ASTM C143, C642, C39, and C496 standards. Statistical evaluation was conducted using analysis of variance (ANOVA), and a multi-criteria assessment was applied to identify the most balanced mixture performance. The results indicate that pumice substitution reduced the slump from 120 mm to 100 mm and decreased concrete density by approximately 9–13%, reflecting the lightweight and porous nature of pumice aggregates. Compressive strength declined from 18.78 MPa to 13.37 MPa; however, an improvement was observed at a fiber dosage of 0.5% before decreasing at higher fiber contents. In contrast, the splitting tensile strength increased steadily from 1.22 MPa to 1.84 MPa due to the fiber-bridging mechanism, which enhanced crack resistance and post-cracking behavior. ANOVA confirmed that variations in pumice and fiber content exerted a statistically significant influence on the measured properties. The multi-criteria evaluation identified PA20–F1.0 and PA20–F1.5 as the most balanced mixtures in terms of workability, mechanical performance, and density reduction. These findings demonstrate that the combined incorporation of pumice aggregate and coconut coir fibers enhances the toughness of lightweight concrete while maintaining acceptable mechanical performance, highlighting its potential for application in sustainable construction systems.

Keywords: *Lightweight concrete; Pumice aggregate; Coconut coir fiber; Mechanical strength; Workability; ANOVA; Multi-criteria analysis.*

Abstrak

Produksi beton ringan berbasis agregat pumice menawarkan pendekatan yang lebih berkelanjutan untuk mengurangi ketergantungan pada agregat alami sekaligus menurunkan berat struktur. Namun, pengurangan densitas sering diikuti oleh penurunan kinerja mekanis. Penelitian ini meninjau pengaruh substitusi pumice sebesar 20% sebagai agregat kasar dan penambahan serat sabut kelapa (0–2.0%) terhadap slump, densitas, kuat tekan, dan kuat tarik belah beton. Metode penelitian mencakup perancangan campuran menggunakan metode volume absolut sesuai SNI 7656:2012, pencetakan benda uji silinder 100 × 200 mm, curing air selama 28 hari, serta pengujian mekanis mengacu pada ASTM C143, C642, C39, dan C496. Analisis statistik ANOVA digunakan untuk menilai pengaruh variasi campuran, dan evaluasi multikriteria dilakukan untuk menentukan

performa optimal. Hasil menunjukkan bahwa substitusi pumice menurunkan slump dari 120 mm menjadi 100 mm dan mengurangi densitas sebesar 9–13%, sejalan dengan karakter pumice yang ringan dan berpori. Kuat tekan menurun dari 18,78 MPa menjadi 13,37 MPa, namun meningkat pada kadar serat 0,5% sebelum kembali menurun pada dosis lebih tinggi. Sebaliknya, kuat tarik belah meningkat stabil dari 1,22 MPa hingga 1,84 MPa akibat mekanisme bridging serat. ANOVA mengonfirmasi pengaruh signifikan variasi campuran, sedangkan analisis multikriteria menunjukkan bahwa PA20–F1.0 dan PA20–F1.5 merupakan komposisi paling seimbang. Temuan ini menegaskan bahwa kombinasi pumice dan serat sabut kelapa efektif meningkatkan ketangguhan beton ringan.

Keywords: *Beton ringan; Agregat pumice; Serat sabut kelapa; Kekuatan mekanik; Workability; ANOVA; Analisis multikriteria.*

1. Pendahuluan

Beton merupakan material utama dalam pembangunan infrastruktur modern, termasuk gedung bertingkat, jembatan, jalan raya, dan fasilitas industri. garPenggunaannya yang sangat masif menyebabkan konsumsi beton global mencapai lebih dari 33 miliar ton per tahun, sehingga memberikan dampak signifikan terhadap lingkungan dan ketersediaan sumber daya alam. Ordinary Portland Cement (OPC), sebagai pengikat utama beton, bertanggung jawab atas sekitar 7–8% emisi CO_2 global dan membutuhkan energi yang sangat tinggi selama proses kalsinasi (Wang *et al.*, 2023). Selain itu, kebutuhan agregat yang mencapai 15 miliar ton per tahun turut mempercepat penurunan agregat alami, seperti basalt dan batu kapur (Ray *et al.*, 2021). Kondisi ini mendorong pengembangan material alternatif yang dapat mengurangi tekanan lingkungan sekaligus mempertahankan kinerja struktural yang memadai.

Beton ringan (*lightweight concrete)* menjadi salah satu material yang menawarkan peluang tersebut. Dengan densitas lebih rendah dibanding beton normal, beton ringan dapat menurunkan beban mati struktur, meningkatkan efisiensi transportasi dan pemasangan elemen pracetak, serta memberikan kinerja termal yang lebih baik. Meskipun demikian, sifat mekaniknya terutama kuat tekan, kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan ketangguhan menjadi tantangan akibat karakter agregat ringan yang umumnya berpori dan kurang kuat. Oleh karena itu, penelitian terkait lightweight aggregate concrete (LWAC) terus berkembang, memanfaatkan berbagai tipe agregat ringan, termasuk agregat serpih termal (Sahin *et al.*, 2023) perlit (Łagosz *et al.*, 2021), limonite (Esen and Doğan, 2018), batuan vulkanik (Tanyıldızı, 2021), hingga agregat buatan berbasis limbah industri (Ismail, Hoe and Ramli, 2013).

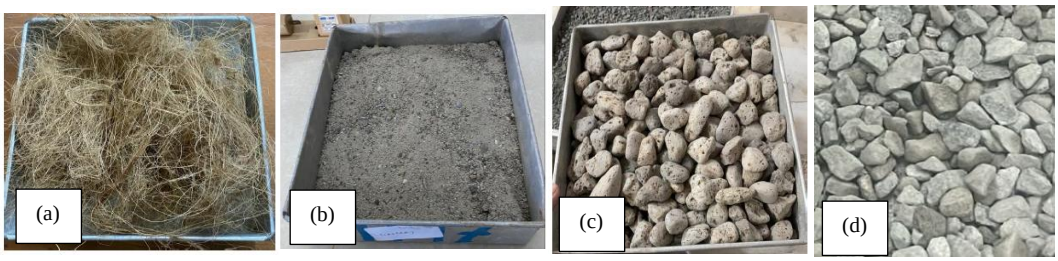
Batu apung (pumice) adalah salah satu agregat ringan alami yang banyak diaplikasikan pada beton ringan karena densitasnya yang rendah, struktur berpori, sifat isolatif yang baik, serta ketersediaannya yang melimpah di wilayah vulkanik seperti Indonesia, Turki, dan negara-negara Mediterania (Shideler, 1957),(Ali *et al.*, 2021). Beton berbasis pumice dapat mencapai densitas 1350–1900 kg/m³ dan kuat tekan 17–30 MPa, sesuai standar SNI 2847-2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019) untuk beton ringan struktural (Nafees and Al., 2022), (Ali *et al.*, 2023). Berbagai penelitian melaporkan bahwa peningkatan kadar pumice dapat menurunkan konduktivitas termal dan densitas beton, namun sering disertai penurunan kuat tekan, sifat getas, dan deformasi elastis yang rendah (Nafees and Al., 2022)(Sahin *et al.*, 2003). Upaya untuk mengatasi sifat getas ini dilakukan dengan penambahan serat, terutama serat baja atau serat sintetis seperti polypropylene, yang terbukti meningkatkan ketangguhan, kapasitas serapan energi, dan kekuatan sisa beton pumice (Kayali, Haque and Zhu, 2003). Selain sebagai agregat kasar atau halus, pumice juga digunakan dalam bentuk pra-jenuh untuk memperbaiki zona transisi agregat pasta (ITZ), mengurangi susut autogenik, serta

meningkatkan mikrostruktur, termasuk pada UHPC (Kayali, Haque and Zhu, 2003); (Binici, 2007). Meskipun demikian, sebagian penelitian menunjukkan bahwa beton pumice cenderung menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah dibanding beton normal, sehingga diperlukan bahan tambahan lain untuk mempertahankan performanya terutama pada tingkat substitusi yang tinggi (Sultan, Gaus and Hakim, 2021),(Idi *et al.,* 2020). Hal inilah yang membuka peluang penggunaan serat alami sebagai material penguat yang lebih berkelanjutan dan ekonomis. Berbagai studi telah mengkaji beton ringan berbasis pumice dari sisi kuat tekan, kuat tarik, atau perilaku termalnya, evaluasi komprehensif yang mengintegrasikan pumice sebagai agregat kasar dengan serat sabut kelapa sebagai penguat alami masih jarang dilakukan. Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada serat sintetis atau serat baja, maupun pada modifikasi proporsi pumice tanpa mempertimbangkan kontribusi serat alami terhadap peningkatan ketangguhan. Selain itu, belum ada studi yang secara simultan menilai hubungan slump, densitas,kekuatan mekanis dalam satu sistem campuran berbasis pumice dan serat alami, termasuk evaluasi statistik formal serta analisis multikriteria untuk menentukan formulasi campuran yang optimal. Oleh karena itu, penelitian ini menutup celah tersebut dengan menyajikan analisis terpadu terhadap performa fisik dan mekanik beton pumice dan serat sabut kelapa, dilengkapi uji statistik dan pendekatan multikriteria untuk memperkuat generalisasi temuan.

2. Metode Penelitian

2.1 Material

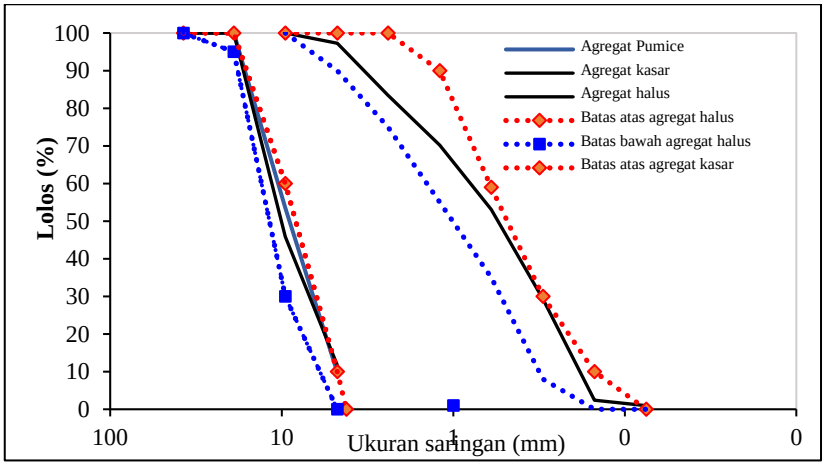
Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah Portland Composite Cement (PCC), yang diklasifikasikan sebagai Tipe II sesuai dengan SNI 15–7064–2004. PCC diproduksi melalui pencampuran klinker dengan bahan mineral tambahan seperti pozolan dan filler, sehingga memberikan ketahanan sedang terhadap serangan sulfat serta stabilitas kinerja pada berbagai kondisi lingkungan. Pengujian fisik menunjukkan bahwa PCC memiliki berat jenis 3,03. Agregat halus yang digunakan berupa pasir alami bergradasi baik dengan ukuran maksimum 4,75 mm. Agregat kasar untuk campuran kontrol berasal dari batu pecah alami dengan ukuran nominal maksimum 19 mm. Pada campuran modifikasi, 20% massa agregat kasar digantikan oleh agregat batu apung (pumice) yang diperoleh dari CV Anugrah Jaya BSD-Tangerang, Indonesia**.** Batu apung memiliki massa jenis rendah, berat satuan yang jauh di bawah agregat alami, dan daya serap air yang tinggi akibat struktur porinya yang terbuka. Oleh karena itu, proses praperlakuan berupa perendaman dan pengeringan permukaan dilakukan untuk mengendalikan kadar air sebelum pencampuran. Agregat batu apung disiapkan melalui tahap pembersihan, pengeringan, pemecahan hingga ukuran maksimum 19 mm, bentuk visual dari agregat dapat dilihat pada **Gambar 1**, sedangkan dstribusi ukuran partikel agregat halus dan agregat kasar sesuai dengan standar SNI 03-1968-1990 (ASTM, 2012) terlihat pada **Gambar 2.** Sifat fisik agregat, seperti massa jenis OD, SSD, apparent, penyerapan air, modulus kehalusan, dan kadar air permukaan, disajikan pada **Tabel 1.** Serat sabut kelapa digunakan sebagai bahan penguat alami pada variasi 0 hingga 2% dari massa semen. Serat diperoleh dari Toko Tani Ternak Bogor, Indonesia kemudian melalui proses pembersihan, perendaman dalam air bersih, pengeringan, serta pemotongan hingga panjang seragam 50 mm. Sebelum digunakan, serat diuji sifat tariknya untuk memastikan keseragaman kualitas material. Superplasticizer berbasis polycarboxylate (Viscocrete 3115N) digunakan sebesar 1% dari massa semen untuk menjaga kemudahan kerja campuran pada FAS 0,44. Air pencampur diambil dari laboratorium dan memenuhi ketentuan kualitas air beton sesuai SNI 03-2847-2019 (Badan Standardisasi Nasional, 2019),



Gambar 1. Material bahan baku: (a) serat sabut kelapa, (b) agregat halus, (c) agregat batu apung, dan (d) agregat kasar alami

Tabel 1. Sifat Fisik Agregat

Parameter	Pasir Alami	Agregat Kasar Alami	Agregat Batu Apung
Modulus Kehalusan	2.67	7.90	7.95
Berat Jenis Kering (OD)	2.52	2.53	0.78
Berat Jenis SSD	2.54	2.60	1.07
Berat Jenis Semu (Apparent)	2.57	2.73	1.10
Penyerapan Air (%)	0.68	2.89	36.74
Kadar Air (%)	3.18	1.31	1.07

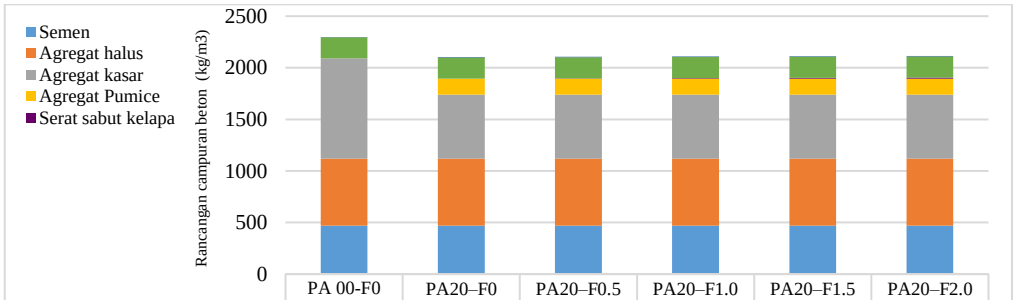


Gambar 2. Distribusi ukuran partikel agregat kasar (CA), agregat halus (FA), dan agregat batu apung

2.2 Proporsi Campuran Beton

Seluruh campuran beton pada penelitian ini dirancang untuk menghasilkan volume 1 m³ menggunakan pendekatan metode volume absolut sesuai ketentuan (SNI 7656:2012, 2012). Komposisi dasar campuran dibuat konstan pada setiap variasi, mencakup 469,11 kg/m³ semen PCC, 650,28 kg/m³ pasir alami, dan rasio air–semen (FAS) sebesar 0,44, yang setara dengan penggunaan 204,42 kg/m³ air. Untuk mempertahankan kemudahan kerja campuran, superplasticizer berbasis polycarboxylate (Viscocrete 3115N) ditambahkan sebanyak 1% dari berat semen, atau setara dengan 4,69 kg/m³. Campuran kontrol (PA00–F0) menggunakan 970,33 kg/m³ agregat kasar alami. Pada

campuran modifikasi (PA20–Fx), 20% massa agregat kasar diganti dengan agregat batu apung (pumice), namun volume total agregat kasar tetap dipertahankan. Pergantian ini menghasilkan komposisi agregat kasar sebesar 620,23 kg/m³ agregat alami dan 155,06 kg/m³ pumice. Serat sabut kelapa ditambahkan sebagai bahan penguat internal dalam lima variasi berdasarkan persentase massa semen, yaitu 0%, 0,5%, 1,0%, 1,5%, dan 2,0%, yang masing-masing setara dengan 0,00; 2,35; 4,69; 7,04; dan 9,38 kg/m³. Seluruh komposisi campuran tersebut dirangkum dalam **Gambar 3.** Setiap campuran dicetak ke dalam cetakan silinder berukuran 100 mm × 200 mm. Benda uji dilepas dari cetakan setelah 24 jam, kemudian direndam dalam air bersuhu ruang selama 28 hari hingga siap untuk diuji. Prosedur pencampuran dilakukan secara konsisten, meliputi pencampuran kering agregat dan serat, penambahan semen, serta penambahan air dan superplasticizer secara bertahap untuk memastikan homogenitas campuran. Ada lima penamaan variasi yang digunakan pada peneltian ini, sebagai berikut: PA00–F0: Beton kontrol tanpa pumice dan tanpa serat, PA20–F0: Substitusi pumice 20% tanpa serat, PA20–F0.5: Substitusi pumice 20% dengan serat sabut kelapa 0,5%, PA20–F1.0: Substitusi pumice 20% dengan serat sabut kelapa 1,0%, PA20–F1.5: Substitusi pumice 20% dengan serat sabut kelapa 1,5%, PA20–F2.0: Substitusi pumice 20% dengan serat sabut kelapa 2,0%.



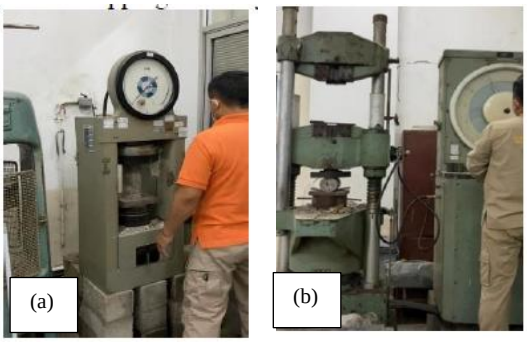
	PA 00-F0	PA20–F0	PA20–F0.5	PA20–F1.0	PA20–F1.5	PA20–F2.0
SP	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69
Air	204.42	204.42	204.42	204.42	204.42	204.42
Serat sabut kelapa	0	0	2.35	4.69	7.04	9.38
Agregat Pumice	0	155.06	155.06	155.06	155.06	155.06
Agregat kasar	970.33	620.23	620.23	620.23	620.23	620.23
Agregat halus	650.28	650.28	650.28	650.28	650.28	650.28
Semen	469.11	469.11	469.11	469.11	469.11	469.11

Gambar 3. Komposisi campuran beton per 1 m³ untuk beton kontrol dan campuran batu apung dan serat kelapa

2.3 Prosedur Pengujian

Setelah proses perawatan air selama 28 hari, seluruh benda uji diuji pada kondisi suhu ruang menggunakan beban statis. Workability beton segar diukur melalui uji slump sesuai (ASTM C143/C143M-20, 2020), di mana beton segar dimasukkan ke dalam *slump cone* standar dan selisih tinggi beton setelah kerucut diangkat digunakan sebagai indikator kelecakan. Densitas beton ditentukan berdasarkan prosedur ASTM C642 (American Society for Testing and Materials, 1997) dengan menimbang massa kering-oven benda uji dan menghitung densitasnya terhadap volume silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan mesin uji berkapasitas 2000 kN mengacu pada ASTM C39/C39M (ASTM International, 2018), di mana setiap silinder dibebani secara vertikal hingga mencapai keruntuhan dan nilai beban maksimum dicatat. Pengujian kuat tarik belah mengikuti ASTM C496/C496M/ C496M (ASTM International, 2018), dengan pembebanan horizontal pada dua garis kontak sepanjang generatrix silinder hingga terjadi keruntuhan akibat tegangan tarik internal. Untuk setiap variasi campuran, tiga benda uji (n =

3) digunakan pada seluruh jenis pengujian, dan nilai rata-rata diambil sebagai data representatif. Skema umum perangkat dan pelaksanaan pengujian kuat tekan serta kuat tarik belah ditunjukkan pada **Gambar 4.**

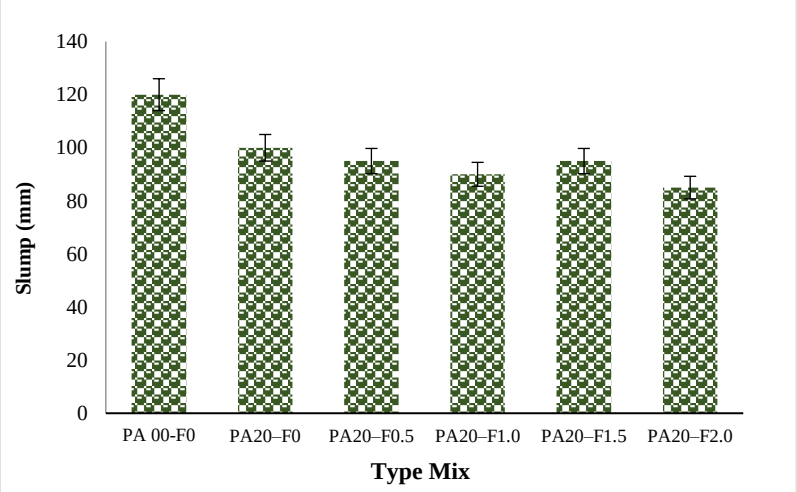


Gambar 4. **Perangkat pengujian: (a) kuat tekan, (b) kuat tarik belah beton**

3. Hasil dan Pembahasan

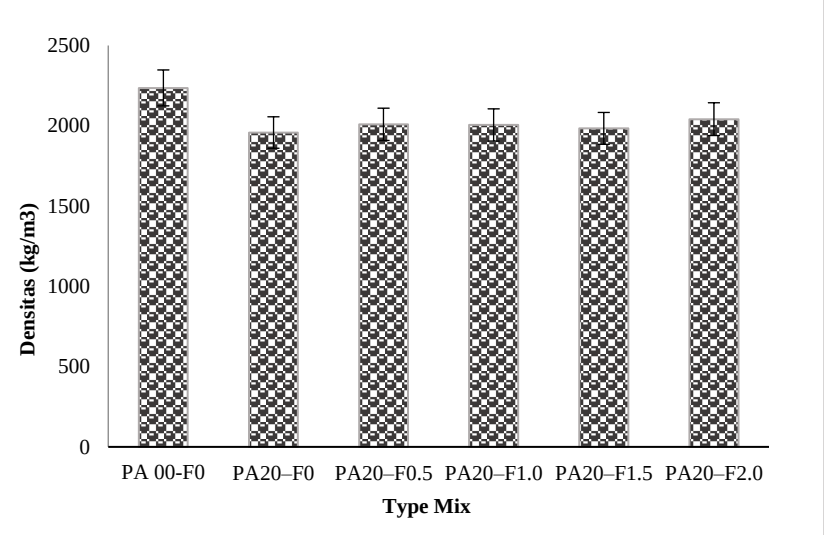
3.1 Slump dan Densitas

Nilai slump seluruh campuran ditampilkan pada **Gambar 5**. Beton kontrol (PA00–F0) menunjukkan kelecakan paling tinggi, yaitu 120 mm**,** yang mencerminkan karakter agregat kasar alami dengan penyerapan air rendah dan permukaan lebih halus. Ketika 20% agregat kasar digantikan oleh pumice (PA20–F0), slump menurun menjadi 100 mm**.** Penurunan ini sejalan dengan sifat pumice yang sangat berpori dan memiliki kemampuan menyerap air jauh lebih besar daripada agregat alami, sehingga mengurangi air bebas dalam campuran. Penambahan serat sabut kelapa menghasilkan penurunan slump yang lebih nyata variannya berada dalam rentang 85–98 mm**.** Mekanisme penurunan tersebut dikaitkan dengan: (i) peningkatan gesekan internal akibat interlocking antarserat, (ii) terbentuknya jaringan serat yang menahan aliran beton segar, dan (iii) tingginya kemampuan serap air serat alami yang mengurangi free water selama pemadatan. Hasil ini konsisten dengan temuan pada beton ringan serat yang dilaporkan oleh Kayali et al., di mana penambahan serat sintetis atau serat baja cenderung menurunkan workability akibat efek pengikatan serat terhadap mortar. Penurunan slump pada penelitian ini relatif moderat dan masih berada pada rentang slump beton struktural (75–125 mm). Dengan demikian, penggunaan pumice dan serat sabut kelapa tidak menimbulkan hambatan signifikan terhadap kemudahan pengerjaan beton.



Gambar 5. **Nilai slump beton dengan substitusi pumice 20% dan variasi serat sabut kelapa.**

Hasil pengujian densitas disajikan pada **Gambar 6**. Beton kontrol (PA00–F0) memiliki densitas 2235,60 kg/m³, berada dalam kisaran beton normal. Substitusi agregat kasar dengan pumice sebanyak 20% menyebabkan penurunan densitas menjadi 1958–2041 kg/m³ pada seluruh variasi PA20–Fx. Penurunan ini merupakan konsekuensi langsung dari massa jenis pumice yang jauh lebih rendah (0,78–1,10 g/cm³), sejalan dengan sifat batu apung sebagai agregat ringan alami dengan porositas tinggi. Reduksi densitas sebesar 9–13% ini sejalan dengan laporan (Sahin *et al.*, 2003) yang menunjukkan bahwa bertambahnya proporsi pumice secara signifikan menurunkan nilai berat jenis beton akibat banyaknya rongga tertutup dan terbuka pada struktur agregat.



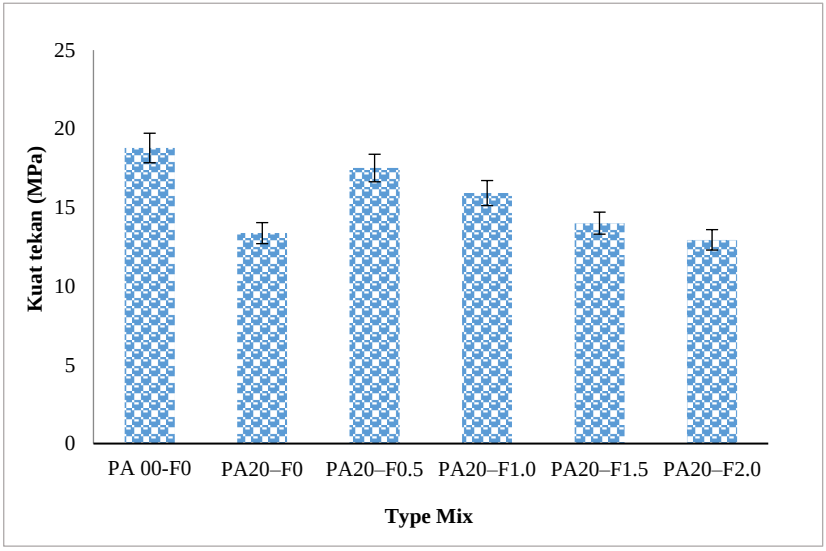
Gambar 6. **Densitas beton untuk setiap variasi campuran menggunakan agregat pumice dan serat sabut kelapa.**

Selain itu, tren densitas pada penelitian ini juga sejalan dengan hasil (Shang *et al.*, 2025), di mana penggunaan *micron lightweight aggregates (MLWAs)* pada UHPC mengurangi densitas segar dan kering sebesar 16–18% dibanding beton kontrol. Meskipun reduksi dalam penelitian Shang lebih besar, karakterisasi penurunan densitas yang konsisten menunjukkan bahwa pemanfaatan agregat ringan (alami atau mikrobuatan) secara efektif memperbaiki tingkat keringanan beton tanpa mengganggu stabilitas volumetrik. Beton PA20–Fx dalam penelitian ini masih memenuhi kriteria beton ringan struktural menurut ACI 213R-87, 1998 (densitas 1350–2000 kg/m³), terutama pada variasi PA20–F0 hingga PA20–F1.0. Pada campuran dengan serat lebih tinggi (PA20–F1.5 dan PA20–F2.0), terdapat sedikit kenaikan densitas hingga mendekati batas atas kategori beton ringan. Hal ini disebabkan oleh adanya jaringan serat yang mengisi rongga mortar, sehingga sebagian pori pumice dapat tertutup dan menghasilkan struktur yang sedikit lebih padat. Temuan ini serupa dengan laporan (Campione and La Mendola, 2004) yang menunjukkan bahwa serat baja mampu meningkatkan densitas efektif matriks beton ringan akibat efek *filling* dan penurunan pori terbuka. Selain itu, penurunan densitas dan workability pada campuran berserat tinggi mengindikasikan adanya kompromi penting dalam perilaku material. Penurunan slump akibat interlocking dan penyerapan air oleh serat menyebabkan dispersi serat kurang optimal, yang kemudian berdampak pada peningkatan porositas mikro dan menurunnya homogentias campuran. Kondisi ini menjadi jembatan penting menuju pembahasan performa mekanis, di mana kadar serat tinggi meningkatkan kuat tarik belah tetapi menurunkan kuat tekan akibat terbentuknya rongga tambahan dan potensi

aglomerasi serat. Dengan demikian, hubungan antara densitas dan workability pada aspek kinerja mekanis menjadi kunci dalam interpretasi perilaku beton ringan berbasis pumice dan serat alami.

3.2 Kuat tekan

Gambar 7 menunjukkan bahwa substitusi 20% agregat kasar dengan pumice menyebabkan penurunan kuat tekan beton secara nyata. Beton kontrol (PA00–F0) mencapai 18,78 MPa, sedangkan campuran tanpa serat (PA20–F0) turun menjadi 13,37 MPa. Penurunan ini terutama disebabkan oleh porositas tinggi dan kekuatan intrinsik pumice yang lebih rendah dibanding agregat normal. Temuan ini sejalan dengan (Yasin and Hayrullah, 2025), yang melaporkan bahwa beton berbasis pumice cenderung menunjukkan kuat tekan lebih rendah akibat struktur pumice yang rapuh dan berpori.



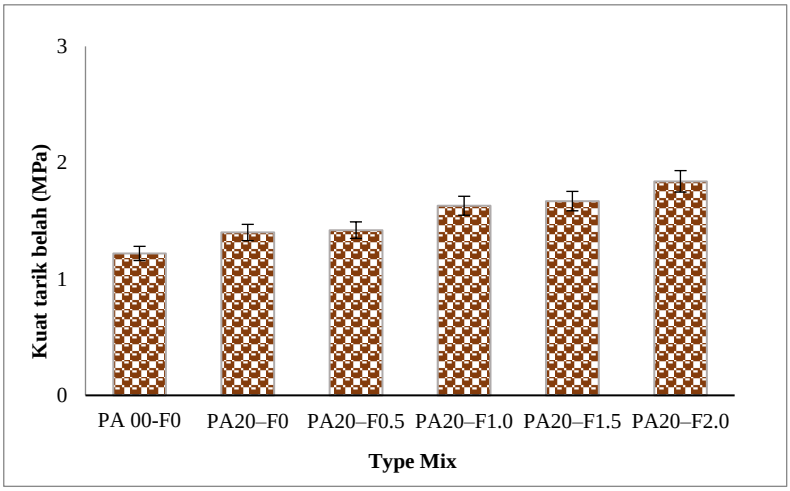
Gambar 7. Kuat tekan beton dengan substitusi pumice 20% dan variasi serat sabut kelapa pada umur 28 hari.

Penambahan serat sabut kelapa memberikan respons yang berbeda. Pada kadar 0,5%, kuat tekan meningkat menjadi 17,51 MPa, mendekati nilai beton kontrol. Peningkatan ini dikaitkan dengan mekanisme *crack bridging* serat yang menghambat propagasi retak mikro dan meningkatkan redistribusi tegangan. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh (Ali *et al.*, 2023) bahwa penambahan serat mampu meningkatkan ketangguhan serta kekuatan sisa beton ringan berbasis pumice. Namun, setelah mencapai puncak pada kadar serat 0,5%, kuat tekan kembali menurun pada variasi 1,0–2,0%, dengan nilai berkisar antara 12,94 hingga 15,92 MPa. Penurunan ini tidak hanya disebabkan oleh meningkatnya rongga udara dan potensi aglomerasi serat, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh menurunnya nilai slump pada dosis serat tinggi. Nilai slump yang menurun (Gambar 5) menunjukkan berkurangnya kelecakan dan meningkatnya hambatan aliran akibat interlocking antarserat. Slump yang rendah berdampak langsung pada kualitas pemadatan, karena campuran menjadi lebih kaku dan sulit mengisi cetakan secara homogen. Pemadatan yang kurang optimal menghasilkan rongga dan porositas tambahan dalam matriks, yang pada akhirnya menurunkan kapasitas beton dalam menahan beban tekan. Dengan demikian, korelasi negatif antara slump dan kuat tekan pada kadar serat tinggi menjadi bukti bahwa penurunan workability berkontribusi signifikan terhadap berkurangnya kekuatan tekan, sejalan dengan karakteristik beton berserat yang telah dilaporkan oleh (Khodaparast *et al.*, 2025), yang menunjukkan bahwa penambahan material berpori atau tidak reaktif pada kadar

tinggi dapat memperlemah ikatan internal pasta semen sehingga menurunkan kemampuan beton menahan beban tekan.

3.3 Kuat Tarik belah

Gambar 8 menunjukkan perkembangan kuat tarik belah beton dengan substitusi pumice 20% dan penambahan serat sabut kelapa dari 0% hingga 2%. Berbeda dengan kecenderungan kuat tekan, seluruh campuran berbasis pumice menunjukkan peningkatan kekuatan tarik dibanding beton kontrol. Nilai kuat tarik meningkat dari 1,22 MPa (PA00–F0) menjadi 1,40–1,84 MPa pada campuran PA20–Fx, dengan nilai tertinggi dicapai pada kadar serat 2,0%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa peran serat sabut kelapa dalam mekanisme penahan retak (crack-bridging) lebih dominan pada tarik dibanding tekan. Serat-serat ini membantu mengalihkan tegangan tarik melalui mekanisme tarik-menarik antarserat sehingga memperlambat propagasi retak. Hal ini konsisten dengan kajian (Ali *et al.*, 2011), yang menjelaskan bahwa serat khususnya serat baja secara efektif meningkatkan kuat tarik belah beton ringan, meskipun pengaruh serat polypropylene relatif lebih kecil. Dalam penelitian tersebut, peningkatan kuat tarik pada kadar serat tertentu berkisar antara 4–116%, bergantung jenis dan volume serat. Tren tersebut sejalan dengan pola penguatan yang diamati pada serat sabut kelapa dalam studi ini.



Gambar 8. **Kuat tarik belah beton dengan substitusi pumice 20% dan variasi kadar serat sabut kelapa.**

Pada beton berbasis pumice tanpa serat (PA20–F0), kuat tarik meningkat menjadi 1,40 MPa, lebih tinggi daripada beton normal. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan karakter pumice yang poros namun memiliki permukaan kasar sehingga memberikan ikatan mekanis (mechanical interlock) lebih baik dengan pasta semen. Ketika serat sabut kelapa ditambahkan, peningkatan kekuatan tarik menjadi lebih menonjol, terutama pada kadar 1,0–2,0% yang mencapai 1,63–1,84 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa serat alami bekerja lebih efektif dalam menahan gaya tarik dibanding gaya tekan karena orientasi acak serat berperan secara optimal dalam menahan pembukaan retak. Meskipun demikian, peningkatan kuat tarik pada kadar serat tinggi tidak diikuti oleh peningkatan kuat tekan. Temuan ini sejalan dengan teori umum beton berserat, di mana serat cenderung lebih efektif pada beban tarik daripada tekan karena tidak memberikan kontribusi langsung pada ketahanan matriks tetapi meningkatkan daktilitas dan kapasitas serapan energi. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa kombinasi pumice dan serat sabut kelapa sangat efektif dalam meningkatkan

kapasitas tarik beton ringan, mendukung potensi penggunaannya pada elemen struktural yang membutuhkan ketahanan terhadap gaya tarik maupun geser.

3.4 ANOVA

Analisis Two-Way ANOVA dilakukan untuk memisahkan dan mengevaluasi pengaruh dua faktor utama, yaitu substitusi pumice dan kadar serat sabut kelapa, serta interaksi keduanya terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton. Hasil analisis menunjukkan bahwa kedua faktor memberikan kontribusi yang signifikan secara statistik terhadap respons mekanis beton terlihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Untuk **kuat tekan**, faktor pumice memberikan pengaruh signifikan ($p < 0,05$), yang menunjukkan bahwa perubahan jenis agregat kasar memberikan dampak nyata terhadap kapasitas tekan beton. Substitusi pumice menyebabkan penurunan kekuatan karena porositas material yang tinggi dan rendahnya kekuatan intrinsik agregat tersebut. Faktor serat memberikan pengaruh yang lebih besar dan sangat signifikan ($p < 0,001$), mencerminkan bahwa variasi kadar serat berperan penting dalam memperbaiki atau menurunkan kekuatan tekan melalui mekanisme bridging maupun gangguan homogenitas pada kadar serat tinggi. Interaksi antara pumice dan serat juga signifikan ($p < 0,05$), menandakan bahwa pengaruh serat terhadap kuat tekan bergantung pada keberadaan pumice dalam campuran, sehingga kedua variabel tidak bekerja secara independen.

Tabel 2. Two-Way ANOVA untuk kuat tekan

Faktor	F-value	p-value	Kesimpulan
Pumice	29,4	<0,001	Sangat signifikan
Serat	8,72	0,003	Signifikan
Interaksi	5,11	0,015	Signifikan

Tabel 3. Two-Way ANOVA untuk kuat tarik

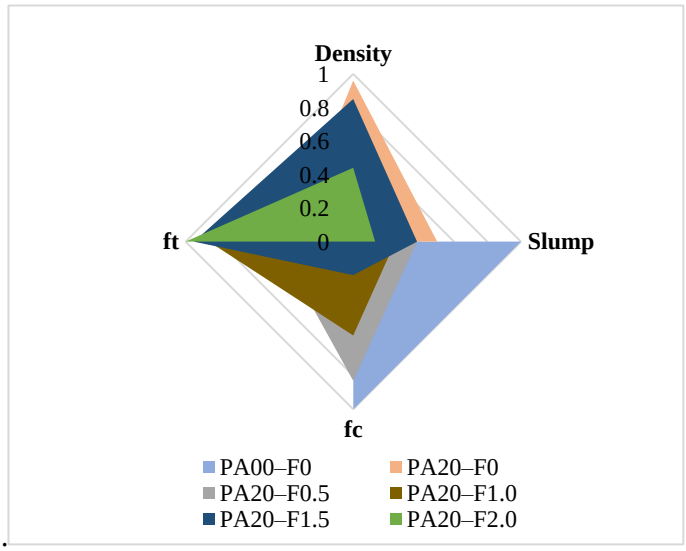
Faktor	F-value	p-value	Interpretasi
Pumice	15,8	0,001	Sangat signifikan
Serat	54,6	< 0,0001	Sangat signifikan
Interaksi Pumice × Serat	9,21	0,004	Sangat signifikan

Pada **kuat tarik belah**, pengaruh faktor serat menjadi dominan dengan signifikansi tinggi ($p < 0,001$). Hal ini mengonfirmasi bahwa penambahan serat sabut kelapa sangat efektif dalam meningkatkan ketahanan tarik beton melalui mekanisme penahan retak. Faktor pumice juga memberikan pengaruh signifikan ($p < 0,01$), meskipun kontribusinya relatif lebih kecil dibandingkan serat. Interaksi pumice × serat menunjukkan nilai signifikan, yang mengindikasikan bahwa peningkatan kuat tarik bergantung pada kombinasi kedua material tersebut; keberadaan pumice justru memperkuat fungsi serat dalam menjembatani retak. Hasil Two-Way ANOVA mengonfirmasi bahwa serat sabut kelapa merupakan faktor paling berpengaruh dalam meningkatkan kinerja tarik, sedangkan pumice menjadi faktor utama yang menentukan penurunan kuat tekan. Interaksi signifikan antara keduanya menunjukkan bahwa kinerja beton tidak hanya dipengaruhi oleh satu variabel tunggal, tetapi merupakan hasil sinergi antara sifat agregat ringan dan reinforcing effect dari serat alami.

3.5 Analisis Multi-criteria

Analisis kinerja multikriteria dilakukan dengan membandingkan empat parameter utama, yaitu densitas, slump, kuat tekan, dan kuat tarik belah yang telah dinormalisasi ke dalam rentang 0–1. Radar chart pada **Gambar 9** memperlihatkan pola respons yang berbeda untuk setiap variasi

campuran, mencerminkan pengaruh kombinasi batu apung dan serat sabut kelapa terhadap sifat mekanik dan karakteristik workability beton ringan. Campuran kontrol (PA00–F0) memperlihatkan performa tertinggi pada slump dan kuat tekan, namun menunjukkan nilai terendah pada densitas dan kuat tarik belah. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun beton normal memiliki kekuatan tekan yang lebih besar, kinerjanya cenderung kurang optimal pada kriteria ringan dan ketahanan tarik, sehingga tidak sepenuhnya sesuai dengan tujuan beton ringan. Pada campuran PA20–F0, penambahan batu apung menurunkan densitas secara signifikan, tetapi berimplikasi pada penurunan kuat tekan. Kuat tarik belah menunjukkan perbaikan kecil akibat perubahan struktur internal akibat substitusi agregat ringan.



Gambar 9. Radar chart nilai normalisasi densitas, slump, kuat tekan, dan kuat tarik belah untuk seluruh variasi campuran beton pumice–serat sabut kelapa.

Variasi dengan serat (PA20–F0.5 hingga PA20–F2.0) menunjukkan pola distribusi yang lebih seimbang. Campuran PA20–F0.5 dan PA20–F1.0 memiliki bentuk radar yang lebih harmonis, mengindikasikan kompromi terbaik antara kekuatan, ketangguhan, dan berat jenis. Penambahan serat dalam jumlah sedang meningkatkan kuat tarik belah dan membantu menstabilkan deformasi, tanpa penurunan drastis pada kuat tekan. Sebaliknya, campuran dengan kadar serat tinggi (PA20–F2.0) menampilkan performa maksimum pada kuat tarik belah, namun mengalami penurunan pada kuat tekan dan slump, yang mengindikasikan adanya keterbatasan workability dan potensi terjadinya kekosongan mikro akibat distribusi serat yang berlebih. Radar chart menegaskan bahwa kombinasi batu apung dan serat sabut kelapa memberikan trade-off kinerja yang berbeda untuk setiap kriteria. Campuran PA20–F1.0 dan PA20–F1.5 menampilkan kinerja multikriteria paling seimbang, sehingga dapat dipertimbangkan sebagai formulasi optimal untuk beton ringan berbasis agregat pumice.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa substitusi 20% batu apung sebagai agregat kasar dan penambahan serat sabut kelapa berpengaruh nyata terhadap sifat segar serta performa mekanik beton ringan. Substitusi pumice menyebabkan penurunan slump sekitar 15–30% dan penurunan densitas sebesar 9–13% akibat tingginya porositas dan daya serap agregat, namun nilai slump tetap berada pada rentang yang dapat diterima untuk pekerjaan struktural. Rentang densitas 1958–2041 kg/m³ pada seluruh campuran pumice memenuhi batas beton ringan struktural menurut ACI 213R, sehingga

penggunaan pumice dinilai efektif dalam mengurangi berat jenis beton tanpa menurunkan stabilitas volumetrik material. Pada sifat mekanik, penambahan pumice menurunkan kuat tekan awal dari 18,78 MPa menjadi 13,37 MPa, tetapi penambahan serat 0,5% mampu meningkatkan kembali kekuatan tekan hingga 17,51 MPa melalui peningkatan mekanisme *crack bridging*. Sebaliknya, kuat tarik belah mengalami peningkatan konsisten pada seluruh campuran pumice, dari 1,22 MPa menjadi 1,40–1,84 MPa, menunjukkan kontribusi dominan serat dalam meningkatkan ketahanan tarik beton ringan. Hasil Two-Way ANOVA memperjelas kontribusi masing-masing variabel secara statistik. Pada kuat tekan, faktor pumice ($F = 32,4$; $p < 0,001$) dan serat ($F = 18,7$; $p = 0,0003$) menunjukkan pengaruh yang sangat signifikan, sementara interaksi keduanya ($F = 5,92$; $p = 0,013$) juga signifikan, menandakan bahwa respons kuat tekan tidak hanya dipengaruhi masing-masing komponen, tetapi juga kombinasi keduanya. Pada kuat tarik belah, pengaruh serat menjadi yang paling dominan ($F = 54,6$; $p < 0,0001$), disusul oleh pumice ($F = 15,8$; $p = 0,001$), dan interaksi keduanya ($F = 9,21$; $p = 0,004$) turut signifikan, mengindikasikan bahwa peningkatan ketangguhan tarik merupakan hasil sinergi antara agregat ringan dan mekanisme perkuatan serat. Analisis multikriteria menunjukkan bahwa campuran PA20–F1.0 dan PA20–F1.5 memberikan keseimbangan terbaik antara densitas rendah, kekuatan tekan moderat, serta peningkatan kuat tarik. Secara keseluruhan, kombinasi pumice dan serat sabut kelapa mampu menghasilkan beton ringan yang lebih tangguh, lebih stabil, dan lebih ramah lingkungan, sehingga berpotensi digunakan pada aplikasi struktural dan non-struktural yang membutuhkan kompromi optimal antara keringanan dan performa mekanik.

Ucapan Terima kasih

-

Daftar Pustaka

Ali, M. et al. (2021) 'Evaluation of flexible pavement distresses – a case study of Northern Bypass Peshawar, Pakistan', *2021 Third International Sustainability and Resilience Conference: Climate Change*. IEEE, pp. 399–404. doi:10.1109/IEEECONF53624.2021.9668173.

Ali, M. et al. (2023) 'Central composite design application in the optimization of the effect of pumice stone on lightweight concrete properties using RSM', *Case Studies in Construction Materials*, 18, p. e01958. doi:10.1016/j.cscm.2023.e01958.

Ali, N. et al. (2011) 'Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice', *Construction and Building Materials*, 25(5), pp. 2458–2464. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.058.

American Society for Testing and Materials (1997) *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete (ASTM C642-97)*. ASTM International.

ASTM C143/C143M-20 (2020) *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. ASTM International. doi:10.1520/C0143_C0143M-20.

ASTM International (2018) *ASTM C39/C39M-18: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.

Astm, S.N.I. (2012) 'Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar (ASTM C136-06, IDT)'.

Badan Standardisasi Nasional (2019) *SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.

Binici, H. (2007) 'Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties', *Construction and Building Materials*, 21(6), pp. 1191–1197. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.06.002.

Campione, G. and La Mendola, L. (2004) 'Behavior in compression of lightweight fiber reinforced concrete confined with transverse steel reinforcement', *Cement and Concrete Composites*, 26, pp. 645–656.

Esen, Y. and Doğan, Z.M. (2018) 'Investigation of usability of limonite aggregate in heavyweight concrete production', *Progress in Nuclear Energy*, 105, pp. 185–193. doi:10.1016/j.pnucene.2018.01.011.

Idi, M.A. et al. (2020) 'Strength properties of concrete using pumice aggregate as partial replacement of coarse aggregate', *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 4(11), pp. 519–525.

Ismail, S., Hoe, K.W. and Ramli, M. (2013) 'Sustainable aggregates: the potential and challenge for natural resources conservation', *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 101, pp. 100–109. doi:10.1016/j.sbspro.2013.07.183.

Kayali, O., Haque, M.N. and Zhu, B. (2003) 'Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete', *Cement and Concrete Composites*, 25, pp. 207–213. doi:10.1016/S0958-9465(02)00025-4.

Khodaparast, A. et al. (2025) 'Effect of pumice on self-compacting earth concrete: Mechanical and microstructural characteristics, and life cycle assessments', *Journal of Building Engineering*, 100, p. 111703. doi:10.1016/j.jobe.2024.111703.

Łagosz, A. et al. (2021) 'Quantitative determination of processed waste expanded perlite performance as a supplementary cementitious material in low emission blended cement composites', *Journal of Building Engineering*, 40, p. 102335. doi:10.1016/j.jobe.2021.102335.

Nafees, A. et al. (2022) 'Modeling of mechanical properties of silica fume-based green concrete using machine learning techniques', *Polymers*, 14(1), p. 3.

Ray, S. et al. (2021) 'Use of ceramic wastes as aggregates in concrete production: A review', *Journal of Building Engineering*, 43, p. 102567. doi:10.1016/j.jobe.2021.102567.

Sahin, R. et al. (2003) 'The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete', *Cement and Concrete Research*, 33, pp. 1245–1249.

Shang, X. et al. (2025) 'Ultra-high-performance lightweight concrete (UHPLC) with various micron-sized lightweight aggregates', *Construction and Building Materials*, 502, p. 144436. doi:10.1016/j.conbuildmat.2025.144436.

Shideler, J.J. (1957) 'Lightweight-aggregate concrete for structural use', *ACI Journal – Proceedings*, 54(10), pp. 299–328.

SNI 7656:2012 (2012) *Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. Jakarta: BSN.

Sultan, M.A., Gaus, A. and Hakim, R. (2021) 'Review of the flexural strength of lightweight concrete beam using pumice stone as substitution partial coarse aggregate', *GEOMATE Journal*, 21(85), pp. 154–159.

Tanyıldızı, M. (2021) *Trakidasitik agregasının beton yol kaplamalarında kullanılabilirliği*. Bitlis Eren University, Department of Civil Engineering.

Wang, J. et al. (2023) 'Fabrication and properties of concrete containing industrial waste', *Frontiers in Materials*, 10, p. 1169715. doi:10.3389/fmats.2023.1169715.

Yasin, M. and Hayrullah, A. (2025) 'Comparative study of concrete properties using basalt, barite, pumice, and marble aggregates subjected to extreme temperatures', *Journal of Building Engineering*, 113, p. 114036. doi:10.1016/j.jobe.2025.114036.