UNITECH: Jurnal Universal Technic
Volume 5, Nomor 1, April 2026
e-ISSN: 2962-6897; p-ISSN: 2962-6900, Hal. 141-167
DOI: https://doi.org/10.58192/unitech.v5i1.5014
Available online at: https://journal.unimar-amni.ac.id/index.php/UNITECH

Optimasi *Mix Design* Beton Berpori Untuk Lantai Ruang Terbuka Hijau Kabupaten Trenggalek

Mohammad Ali Mahfud Efendi[1*], Arie Wardhono[2], Bambang Sabariman[3]
[1-3]Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia
Alamat: Jl. Raya Kampus Unesa, Lidah Wetan, Kec. Lakarsantri, Surabaya, Jawa Timur
**Korespondensi penulis: 25052185006@mhs.unesa.ac.id*

Abstract*. Increasing urban development often leads to a reduction in rainwater infiltration areas, thereby increasing surface runoff and the potential for waterlogging. One construction technology that can be used to address this issue is pervious concrete, a type of concrete with an open void structure that allows rainwater* to *infiltrate directly into the ground. This study aimed to analyze the optimal mixture composition of pervious concrete for pavement applications in green open space (RTH) areas in Trenggalek Regency. The research employed an experimental approach with variations in coarse aggregate sizes, namely 5–10 mm, 10–20 mm, and 20–30 mm, as well as different aggregate proportion combinations. The analyzed parameters included concrete compressive strength, porosity, and permeability. The results showed that a combination of 10–20 mm and 5–10 mm aggregates at a 50%:50% proportion produced the most optimal pervious concrete performance, with a compressive strength of 22.40 MPa at 28 days, a porosity of 16.25%, and a permeability of 1.16 cm/s. These values met the quality requirements for concrete used in light pavement applications, such as parking areas and pedestrian pathways, in accordance with national standards. Variations in aggregate size showed a tendency to affect the balance between the mechanical and hydraulic properties of pervious concrete. The main contribution of this study is the identification of the 10–20 mm and 5–10 mm aggregate combination at a 50%:50% proportion as an alternative mixture composition that can serve as a basis for developing pervious concrete designs using local materials for pavement applications in green open spaces. With these characteristics, pervious concrete has the potential to be used as a pavement material in green open spaces to improve rainwater infiltration capacity and support sustainable infrastructure development in Trenggalek Regency.*

Keywords*: Pervious Concrete, Green Open Space, Permeability, Sustainable Drainage*

Abstrak. Peningkatan pembangunan kawasan perkotaan sering kali menyebabkan berkurangnya area resapan air hujan sehingga meningkatkan limpasan permukaan dan potensi genangan. Salah satu teknologi konstruksi yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah beton berpori (*pervious concrete*), yaitu jenis beton dengan struktur rongga terbuka yang memungkinkan air hujan meresap langsung ke dalam tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis komposisi campuran beton berpori yang optimal untuk aplikasi perkerasan pada kawasan ruang terbuka hijau (RTH) di Kabupaten Trenggalek. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dengan variasi ukuran agregat kasar, yaitu 5–10 mm, 10–20 mm, dan 20–30 mm, serta kombinasi proporsi agregat yang berbeda. Parameter yang dianalisis meliputi kuat tekan, porositas, dan permeabilitas beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi agregat berukuran 10–20 mm dan 5–10 mm dengan komposisi 50%:50% menghasilkan kinerja beton berpori yang paling optimal, dengan kuat tekan sebesar 22,40 MPa pada umur 28 hari, porositas sebesar 16,25%, dan permeabilitas sebesar 1,16 cm/s. Nilai tersebut memenuhi persyaratan mutu beton untuk aplikasi perkerasan ringan, seperti area parkir dan jalur pedestrian, sesuai dengan standar nasional. Variasi ukuran agregat menunjukkan kecenderungan memengaruhi keseimbangan antara sifat mekanik dan sifat hidrolik beton berpori. Kontribusi utama penelitian ini adalah mengidentifikasi kombinasi ukuran agregat 10–20 mm dan 5–10 mm dengan proporsi 50%:50% sebagai alternatif komposisi yang dapat dijadikan dasar pengembangan desain beton berpori berbahan material lokal untuk aplikasi perkerasan pada kawasan ruang terbuka hijau. Dengan karakteristik tersebut, beton berpori berpotensi digunakan sebagai material perkerasan pada kawasan RTH untuk meningkatkan kemampuan infiltrasi air hujan serta mendukung pembangunan infrastruktur yang berkelanjutan di Kabupaten Trenggalek.

Kata Kunci: *Pervious Concrete*, Ruang Terbuka Hijau, Permeabilitas, Drainase Berkelanjutan

Received: Mar01, 2026; Revised: Mar 30, 2026; Accepted: Apr 26, 2026; Online available: Apr 28, 2026

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan kawasan perkotaan yang pesat telah mendorong peningkatan penggunaan permukaan kedap air seperti beton konvensional dan aspal, yang secara signifikan mengurangi kemampuan infiltrasi air hujan ke dalam tanah. Kondisi ini berdampak pada meningkatnya limpasan permukaan (*surface runoff*), potensi genangan, serta penurunan pengisian ulang air tanah (*groundwater recharge*), khususnya di wilayah perkotaan berkembang. Permasalahan ini menjadi semakin kompleks seiring dengan peningkatan intensitas curah hujan akibat perubahan iklim, sehingga diperlukan pendekatan infrastruktur yang tidak hanya berfungsi secara struktural, tetapi juga mampu mendukung keseimbangan hidrologi kawasan.

Dalam konteks tersebut, beton berpori (*pervious concrete*) menjadi salah satu alternatif material yang banyak dikembangkan dalam sistem drainase berkelanjutan (*sustainable urban drainage systems/SUDS*). Beton berpori memiliki struktur rongga terbuka yang memungkinkan air hujan mengalir melalui lapisan beton dan meresap ke dalam tanah di bawahnya. Dengan karakteristik tersebut, beton berpori tidak hanya berfungsi sebagai material perkerasan, tetapi juga sebagai media infiltrasi yang efektif dalam mengurangi limpasan permukaan serta meningkatkan kapasitas resapan air tanah.

Penelitian lima tahun terakhir menunjukkan bahwa kinerja beton berpori sangat dipengaruhi oleh ukuran dan gradasi agregat, tingkat pemadatan, serta hubungan antara struktur pori dan sifat mekanik-hidrolik. Hung et al. (2021) menguji beberapa proporsi agregat berukuran berbeda dan menunjukkan bahwa kombinasi agregat 5–10 mm, 2–5 mm, dan pasir dapat meningkatkan keseimbangan kuat tekan dan permeabilitas; namun, peningkatan proporsi agregat halus cenderung menurunkan porositas dan permeabilitas. Temuan ini memperlihatkan bahwa kombinasi ukuran agregat dapat menghasilkan kompromi antara kekuatan dan kemampuan aliran air, tetapi penelitian tersebut masih terbatas pada kombinasi ukuran agregat tertentu dan belum mempertimbangkan karakteristik agregat lokal Kabupaten Trenggalek.

Mulu et al. (2022) menguji dua rentang agregat berukuran kecil, yaitu 2,36–4,75 mm dan 4,75–6,30 mm, dan mengukur kuat tekan, porositas, permeabilitas, serta kecenderungan penyumbatan. Hasilnya menunjukkan bahwa agregat yang lebih besar menghasilkan permeabilitas lebih tinggi, sedangkan agregat yang lebih kecil lebih rentan terhadap penyumbatan. Penelitian ini penting karena menunjukkan bahwa ukuran agregat tidak hanya menentukan sifat awal beton berpori, tetapi juga memengaruhi kinerja hidrolik dalam kondisi penyumbatan. Namun, penelitian tersebut menggunakan dua gradasi sempit dan belum

mengembangkan optimasi kombinasi multi-ukuran agregat untuk memperoleh keseimbangan sifat mekanik dan hidrolik.

Pada penelitian Ferić et al. (2023), ukuran agregat dan tingkat pemadatan dianalisis terhadap sifat mekanik dan hidrolik. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan agregat yang lebih kecil, yaitu 4/8 mm, meningkatkan kuat tekan tetapi sedikit menurunkan konduktivitas hidrolik dibandingkan agregat 8/16 mm. Hal ini kembali memperlihatkan adanya trade-off antara kuat tekan dan kemampuan aliran air. Sementara itu, Zhang et al. (2023) menguji lima gradasi agregat yang dibentuk dari tiga kelompok ukuran, yaitu 4,75–9,5 mm, 9,5–19 mm, dan 19–31,5 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan proporsi agregat berukuran lebih besar meningkatkan porositas dan permeabilitas tetapi menurunkan kuat tekan, dan salah satu kombinasi gradasi memberikan kinerja optimum untuk material lapisan dasar perkerasan permeabel. Penelitian tersebut lebih dekat dengan tujuan penelitian ini karena telah menggunakan kombinasi multi-ukuran agregat dan mengevaluasi sifat mekanik serta hidrolik secara bersamaan. Namun, material yang digunakan terutama berupa agregat beton daur ulang dan agregat basalt, sehingga belum menjawab karakteristik agregat lokal Kabupaten Trenggalek maupun kebutuhan spesifik perkerasan RTH daerah tersebut.

Kajian yang lebih mutakhir juga menunjukkan bahwa optimasi beton berpori semakin diarahkan pada pendekatan multi-parameter. Wijekoona et al. (2024) menggunakan metode Taguchi untuk mengevaluasi pengaruh bentuk dan ukuran agregat, rasio agregat-semen, serta tingkat pemadatan terhadap kuat tekan dan porositas. Hasilnya menunjukkan bahwa bentuk agregat, pemadatan, dan rasio agregat-semen dapat lebih dominan daripada ukuran agregat terhadap beberapa parameter kinerja. Temuan ini penting karena menunjukkan bahwa ukuran agregat tidak dapat dipandang sebagai satu-satunya faktor pengendali, sehingga optimasi campuran perlu mempertimbangkan interaksi beberapa parameter. Penelitian terbaru juga memperlihatkan bahwa ukuran dan bentuk agregat dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap porositas dan kuat tekan, sehingga hasil penelitian pada satu jenis agregat tidak dapat langsung digeneralisasi ke material lainnya. Dengan demikian, masih diperlukan penelitian yang secara spesifik menguji kombinasi ukuran agregat pada material lokal dan menghubungkan hasilnya dengan kebutuhan aplikasi tertentu.

Kesenjangan tersebut menjadi semakin relevan ketika dikaitkan dengan kebutuhan ruang terbuka hijau di Kabupaten Trenggalek. Pemerintah Kabupaten Trenggalek menyediakan dataset RTH melalui Trenggalek Satu Data yang memuat informasi lokasi, jenis RTH, status tanah, luas, dan titik koordinat. Dataset tersebut dipublikasikan pada 5 Juni 2024 dan dimutakhirkan pada 20 Januari 2025, sehingga menunjukkan bahwa pengelolaan dan

pemantauan RTH merupakan bagian dari sistem data pembangunan daerah. Data tersebut juga memperlihatkan keberagaman bentuk RTH, antara lain taman bermain dan fasilitas olahraga, yang membutuhkan elemen perkerasan pendukung. Oleh karena itu, penggunaan beton berpori pada lantai atau jalur pedestrian RTH berpotensi mendukung fungsi infiltrasi air sekaligus memenuhi kebutuhan struktural perkerasan.Dengan demikian, research gap penelitian ini dapat dirumuskan secara lebih spesifik. Penelitian Hung et al. (2021) telah menunjukkan bahwa kombinasi ukuran agregat dapat meningkatkan keseimbangan kuat tekan dan permeabilitas, tetapi belum menggunakan material lokal Trenggalek. Mulu et al. (2022) menguji dua ukuran agregat dan menunjukkan perbedaan kinerja hidrolik serta risiko penyumbatan, tetapi belum mengembangkan kombinasi multi-ukuran yang dioptimasi untuk aplikasi perkerasan. Ferić et al. (2023) telah menguji sifat mekanik dan hidrolik secara bersamaan, tetapi fokusnya pada pengaruh ukuran agregat dan pemadatan. Zhang et al. (2023) telah mengembangkan beberapa gradasi multi-ukuran dan menemukan gradasi optimum, tetapi menggunakan material agregat yang berbeda dengan material lokal yang akan digunakan dalam penelitian ini. Wijekoona et al. (2024) bahkan telah menerapkan metode optimasi, tetapi parameter yang dikaji lebih luas dan belum diarahkan pada agregat lokal serta kebutuhan perkerasan RTH Kabupaten Trenggalek. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa belum terdapat pendekatan yang secara spesifik mengintegrasikan agregat lokal Kabupaten Trenggalek, kombinasi multi-ukuran agregat, dan optimasi simultan kuat tekan, porositas, serta permeabilitas untuk aplikasi perkerasan RTH.

Dengan demikian, kebaruan penelitian ini tidak hanya berupa penggunaan agregat lokal, tetapi terletak pada pengembangan komposisi beton berpori berbasis agregat lokal Kabupaten Trenggalek melalui kombinasi multi-ukuran agregat dan evaluasi simultan kuat tekan, porositas, serta permeabilitas untuk menghasilkan formulasi yang sesuai dengan kebutuhan perkerasan lantai ruang terbuka hijau. Kebaruan tersebut diperkuat oleh posisi penelitian yang secara eksplisit menjembatani hasil penelitian laboratorium mengenai desain gradasi agregat dengan kebutuhan material perkerasan pada konteks RTH daerah. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan formulasi yang lebih kontekstual, terukur, dan relevan untuk implementasi infrastruktur hijau di Kabupaten Trenggalek.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kombinasi multi-ukuran agregat lokal Kabupaten Trenggalek terhadap karakteristik beton berpori, khususnya kuat tekan, porositas, dan permeabilitas, serta menentukan komposisi campuran yang memberikan keseimbangan optimal antara sifat mekanik dan hidrolik. Hasil

penelitian selanjutnya diarahkan untuk menentukan kelayakan beton berpori sebagai material perkerasan lantai ruang terbuka hijau di Kabupaten Trenggalek, sehingga penelitian tidak hanya memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu material konstruksi, tetapi juga menyediakan dasar teknis bagi penerapan material perkerasan yang mendukung prinsip pembangunan infrastruktur hijau dan berkelanjutan.

2. KAJIAN TEORITIS

Beton Berpori

Beton berpori (*pervious concrete*) merupakan material beton yang dirancang dengan kandungan agregat kasar yang relatif tinggi, pasta semen yang cukup untuk melapisi permukaan agregat, serta kandungan agregat halus yang rendah atau bahkan tanpa agregat halus. Komposisi tersebut menghasilkan jaringan rongga yang saling terhubung sehingga air dapat mengalir melalui struktur beton. Karakteristik utama beton berpori berbeda dengan beton konvensional karena kinerja material tidak hanya ditentukan oleh kekuatan mekanik, tetapi juga oleh struktur pori dan kemampuan infiltrasi air. Oleh karena itu, desain campuran beton berpori harus mempertimbangkan keseimbangan antara kekuatan, porositas, dan permeabilitas. AlShareedah dan Nassiri (2021) menjelaskan bahwa optimasi komposisi campuran merupakan aspek penting dalam pengembangan beton berpori karena peningkatan kemampuan infiltrasi umumnya diikuti oleh penurunan kekuatan mekanik.

Beton berpori banyak digunakan pada perkerasan yang membutuhkan kemampuan infiltrasi air, seperti trotoar, jalur pejalan kaki, area parkir, dan ruang terbuka. Dalam konteks pengelolaan air hujan, keberadaan rongga yang saling terhubung memungkinkan air permukaan masuk ke dalam lapisan perkerasan dan selanjutnya meresap ke lapisan tanah. Dengan demikian, beton berpori dapat berfungsi sebagai bagian dari sistem infrastruktur hijau untuk mengurangi limpasan permukaan. Namun, efektivitas fungsi hidrolik tersebut sangat dipengaruhi oleh karakteristik jaringan pori yang terbentuk selama proses pencampuran, pemadatan, dan pengerasan beton.

Mekanisme Pembentukan Rongga pada Beton Berpori

Rongga pada beton berpori terbentuk terutama karena susunan agregat kasar tidak sepenuhnya terisi oleh pasta semen dan agregat halus. Pada beton konvensional, ruang antarbutir agregat umumnya diisi oleh pasta dan agregat halus sehingga struktur menjadi lebih padat, sedangkan pada beton berpori jumlah pasta dan agregat halus dikendalikan agar sebagian ruang antaragregat tetap kosong dan membentuk jaringan rongga yang saling terhubung.

Pembentukan rongga dipengaruhi oleh interaksi antara *granular skeleton*, volume pasta semen, gradasi agregat, dan tingkat pemadatan. Apabila pasta terlalu sedikit, ikatan antaragregat menjadi lemah dan kekuatan mekanik menurun, sedangkan pasta yang berlebihan dapat mengisi atau menutup saluran pori sehingga porositas efektif dan permeabilitas berkurang. Claudino et al. (2022) menunjukkan bahwa optimasi *cement paste* dan *granular skeleton* diperlukan untuk menyeimbangkan kekuatan mekanik dan permeabilitas. Selain itu, rongga terbuka dan saling terhubung lebih berperan dalam aliran air dibandingkan rongga tertutup, sehingga konektivitas pori dan *tortuosity* turut menentukan kemampuan infiltrasi. Shan et al. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan porositas yang disertai peningkatan konektivitas dan penurunan *tortuosity* dapat meningkatkan permeabilitas. Proses pemadatan juga perlu dikontrol karena pemadatan berlebihan dapat mengurangi volume serta konektivitas rongga, sedangkan pemadatan yang terlalu rendah dapat menurunkan stabilitas struktur.

Hubungan Ukuran Agregat terhadap Interlocking

Agregat kasar merupakan komponen utama pembentuk kerangka struktural beton berpori, sedangkan interaksi antarbutir menghasilkan mekanisme *interlocking* berupa saling mengunci secara geometris yang berperan dalam menahan beban. Kualitas *interlocking* dipengaruhi oleh ukuran, bentuk, tekstur permukaan, gradasi, dan proporsi agregat. Agregat berukuran lebih besar cenderung menghasilkan ruang antarbutir dan saluran aliran yang lebih besar sehingga berpotensi meningkatkan permeabilitas, sedangkan agregat berukuran lebih kecil dapat meningkatkan jumlah titik kontak dan kepadatan sehingga *interlocking* serta kekuatan mekanik meningkat, tetapi ruang aliran menjadi lebih terbatas. Xiong et al. (2025) menunjukkan bahwa ukuran agregat berpengaruh terhadap *effective porosity*, ukuran pori median, dan koefisien permeabilitas beton berpori. Di sisi lain, kombinasi beberapa ukuran agregat dapat memperbaiki *packing* dan jumlah titik kontak, tetapi proporsi agregat berukuran kecil yang terlalu tinggi dapat mengisi rongga dan mengurangi konektivitas pori. Oleh karena itu, ukuran dan proporsi agregat perlu dioptimalkan untuk memperoleh *interlocking* yang cukup tanpa menghilangkan jaringan pori yang diperlukan untuk infiltrasi.

Pengaruh Ketebalan Pasta Semen

Pasta semen pada beton berpori berfungsi sebagai lapisan perekat yang menyelimuti permukaan agregat dan membentuk ikatan antarpartikel, tetapi tidak dimaksudkan untuk mengisi seluruh ruang antaragregat. Ketebalan lapisan pasta perlu dikontrol karena pasta yang terlalu tipis menyebabkan permukaan agregat tidak terlapisi secara memadai sehingga ikatan

dan kekuatan mekanik menurun, sedangkan pasta yang terlalu tebal dapat memperkecil ukuran rongga, mengurangi konektivitas pori, dan menghambat aliran air. Claudino et al. (2022) menunjukkan bahwa ketebalan pasta, ukuran agregat, dan komposisi *granular skeleton* perlu dioptimalkan secara bersamaan untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan dan permeabilitas. Selain jumlah pasta, rasio air terhadap bahan pengikat dan metode pemadatan juga memengaruhi distribusi pasta; pasta yang terlalu encer atau berlebihan dapat mengalami *paste sagging* sehingga porositas tidak seragam pada bagian beton. Dengan demikian, terdapat ketebalan pasta optimum yang mampu memberikan ikatan agregat yang memadai sekaligus mempertahankan jaringan pori yang terbuka dan saling terhubung.

Hubungan Porositas dengan Permeabilitas Beton Berpori

Porositas menunjukkan proporsi ruang kosong terhadap volume total beton, sedangkan permeabilitas menunjukkan kemampuan air mengalir melalui jaringan pori. Secara umum, peningkatan porositas cenderung meningkatkan permeabilitas karena menyediakan ruang dan jalur aliran yang lebih besar, tetapi hubungan keduanya tidak hanya ditentukan oleh jumlah rongga, melainkan juga oleh ukuran, bentuk, distribusi, konektivitas, dan *tortuosity* pori. *Effective porosity* yang mewakili rongga yang saling terhubung lebih relevan terhadap aliran air dibandingkan porositas total. Shan et al. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan porositas yang disertai peningkatan konektivitas dan penurunan *tortuosity* dapat meningkatkan permeabilitas. Sebaliknya, pori yang banyak tetapi tertutup atau tidak terhubung tidak memberikan kontribusi yang besar terhadap aliran. Peningkatan porositas juga umumnya menurunkan kekuatan mekanik karena mengurangi volume material padat yang menahan beban, sehingga desain beton berpori perlu mencari kondisi optimum antara porositas, permeabilitas, dan kekuatan. Dengan demikian, evaluasi kinerja beton berpori tidak cukup hanya berdasarkan nilai porositas, tetapi harus mempertimbangkan karakteristik jaringan pori dan kemampuan aliran air secara keseluruhan.

Sintesis Kajian Teoritis

Berdasarkan kajian teoritis, kinerja beton berpori terbentuk melalui interaksi beberapa komponen utama, yaitu ukuran dan proporsi agregat kasar, *interlocking* antarbutir, volume dan ketebalan pasta semen, serta karakteristik jaringan pori. Agregat kasar membentuk *granular skeleton*, sedangkan pasta semen mempertahankan ikatan antaragregat tanpa sepenuhnya menutup ruang antarbutir. Kombinasi keduanya menentukan volume dan konektivitas rongga yang selanjutnya memengaruhi porositas dan permeabilitas.

Secara konseptual, peningkatan ukuran agregat cenderung menghasilkan rongga yang lebih besar dan meningkatkan kemampuan aliran air, sedangkan peningkatan proporsi agregat berukuran kecil dapat memperbaiki kepadatan dan *interlocking* tetapi berpotensi mengurangi volume serta konektivitas rongga. Demikian pula, peningkatan pasta semen dapat memperbaiki ikatan dan kekuatan sampai batas tertentu, tetapi pasta yang berlebihan dapat menutup jaringan pori. Dengan demikian, tidak terdapat satu faktor tunggal yang menentukan kinerja beton berpori, melainkan terdapat interaksi antara kerangka agregat, pasta semen, struktur pori, dan tingkat pemadatan.

Sintesis tersebut menjadi dasar bahwa optimasi campuran beton berpori perlu dilakukan dengan mempertimbangkan dua kelompok kinerja secara bersamaan, yaitu kinerja mekanik dan kinerja hidrolik. Kinerja mekanik terutama berkaitan dengan kualitas *interlocking* dan ikatan pasta-agregat, sedangkan kinerja hidrolik berkaitan dengan volume, ukuran, konektivitas, dan *tortuosity* pori. Oleh karena itu, variasi ukuran dan proporsi agregat kasar dalam penelitian ini menjadi dasar eksperimental untuk memperoleh komposisi campuran yang menghasilkan keseimbangan optimal antara kekuatan dan permeabilitas.

Kerangka teoritis tersebut mendukung tujuan penelitian untuk menganalisis dan menentukan komposisi campuran beton berpori yang optimal berdasarkan variasi ukuran dan proporsi agregat kasar guna menghasilkan material yang memenuhi kriteria mekanik dan hidrolik untuk aplikasi perkerasan ruang terbuka hijau di Kabupaten Trenggalek.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan eksperimen laboratorium menggunakan Portland Composite Cement (PCC) sesuai SNI 15-7064-2004, agregat kasar lokal Kabupaten Trenggalek berukuran 5–10 mm, 10–20 mm, dan 20–30 mm, air tawar, serta superplasticizer. Karakteristik agregat meliputi kadar lumpur 0,55%, kadar organik No. 2, berat jenis 2,62, kadar air 0,64%, penyerapan 0,64%, dan modulus kehalusan 7,82%. Pengujian karakteristik agregat mengacu pada SNI 03-1968-1990, sedangkan kadar air agregat digunakan untuk koreksi air pencampuran.

Desain eksperimen menggunakan satu faktor, yaitu ukuran dan proporsi agregat kasar. Agregat 5–10 mm diberi kode S, 10–20 mm kode K, dan 20–30 mm kode B. Terdapat dua kelompok campuran, yaitu S–K dan B–K, masing-masing dengan proporsi 100:0%, 75:25%, 50:50%, 25:75%, dan 0:100%. Campuran agregat tunggal digunakan sebagai kontrol. Variabel bebas adalah ukuran dan proporsi agregat, sedangkan variabel terikat meliputi kuat tekan,

densitas, porositas, dan permeabilitas/laju infiltrasi. Variabel kontrol meliputi jenis dan jumlah semen, FAS, dosis superplasticizer, kadar air agregat, metode pencampuran dan pemadatan, ukuran benda uji, umur pengujian, serta kondisi curing.

Mix design mengacu pada prinsip ACI 522R untuk beton berpori dan disesuaikan melalui trial mix untuk memperoleh campuran dengan pasta semen yang mampu melapisi agregat tanpa menutup rongga. Faktor air-semen (FAS) ditetapkan sebesar 0,35 karena berada dalam rentang yang direkomendasikan untuk beton berpori dan dipertimbangkan mampu memberikan keseimbangan antara workability, kuat tekan, dan permeabilitas. FAS 0,35 dipertahankan konstan pada seluruh variasi sehingga pengaruh ukuran dan proporsi agregat dapat dianalisis secara lebih terkontrol.

Setiap variasi dibuat sebanyak tiga benda uji independen (n=3) untuk setiap pengujian. Bahan ditimbang menggunakan prosedur yang sama, kadar air agregat diperiksa sebelum pencampuran, sedangkan waktu pencampuran, metode dan energi pemadatan, ukuran benda uji, serta umur pengujian dibuat konstan. Urutan pembuatan dan pengujian benda uji dilakukan secara acak untuk mengurangi bias akibat urutan, operator, dan posisi benda uji. Setelah pencetakan, benda uji ditutup untuk mengurangi kehilangan air dan dilakukan curing pada kondisi yang sama dengan temperatur 23 ± 2 °C hingga umur pengujian yang ditentukan.

Pengujian dilakukan terhadap kuat tekan, densitas, porositas, dan permeabilitas/laju infiltrasi sesuai standar pengujian yang digunakan. Data disajikan dalam bentuk rata-rata ± standar deviasi. Uji normalitas dilakukan menggunakan Shapiro–Wilk dan homogenitas varians menggunakan Levene’s test. Apabila asumsi parametrik terpenuhi, perbedaan antarvariasi dianalisis menggunakan one-way ANOVA pada tingkat signifikansi 5% (α=0,05), kemudian dilanjutkan dengan Tukey HSD apabila terdapat perbedaan signifikan ($p<0,05$). Apabila asumsi parametrik tidak terpenuhi, digunakan uji Kruskal–Wallis dan uji lanjut yang sesuai. Pengendalian kualitas dilakukan melalui pemeriksaan kadar air agregat, konsistensi penimbangan, pencampuran, pemadatan, kondisi curing, dan kalibrasi alat uji.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil



Gambar 1. Agregat kasar ukuran 1-2 cm (K) 0.5-1 cm (S), 2-3 cm (B)

Proporsi campuran ditunjukkan pada Tabel 3 Faktor air semen (FAS) yang digunakan adalah 0.35. Dimensi benda uji dengan ukuran diameter 10 cm dan panjang 20 cm. Total benda uji yaitu 90 selinder (Tabel 4).

Tabel 1. Proporsi Campuran Beton Berpori

FAS	Air	Semen	Kerikil
35	180	514	1698

Tabel 2. Jumlah Benda Uji

Kode	Variasi			Jumlah Specimen
	A	B	C	
Variasi 1				
K100S0	100	0	-	9
K75S25	75	25	-	9
K50S50	50	50	-	9
A25S75	25	75	-	9
K0S100	0	100	-	9
Variasi 2				
B100K0	0	-	100	9
B75K25	25	-	75	9
B50K50	50	-	50	9
B25K75	75	-	25	9
B0K100	100	-	0	9

Metode Test

Pada penelitian ini dilakukan pengujian kuat tekan beton, porositas dan permeabilitas beton. Kuat tekan beton diuji pada hari ke 7 dan 28 dengan menggunakan mesin uji tekan sesuai dengan SNI 1974:2011. Setelah periode tertentu, benda uji dikompresi dengan laju seragam 4,0 kN/detik (tanpa kejut) sampai mencapai beban maksimum dan terjadi keruntuhan. Kuat tekan beton rata-rata dari tiga benda uji ditentukan untuk setiap campuran beton. Rumus yang digunakan untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton dapat dilihat pada Persamaan (1). Menurut ACI 522R-10, kuat tekan beton berpori antara 2.8-28 MPa. Kuat tekan beton berpori pada penelitian ini mengacu pada SNI 03-0691-2022 tentang bata beton.

$$fC' = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

f'c = Kuat tekan (Mpa)

P = Beban tekan (N)

A = Luas penampang benda uji (mm^2)




Gambar a etak beton berpori

Porositas adalah ukuran dari proporsi total volume yang ditempati oleh pori-pori, dan biasanya dinyatakan sebagai persentase dari volume sampel. Porositas dapat dihitung dengan menggunakan rumus pada Persamaan (2). Menurut ACI 522R-10 mengenai porositas beton berpori berkisar antara 15-35%.

$$n = \frac{T - D}{T} \times 100$$

Keterangan:

N = porositas (%)

T = volume total beton (ml)

D = volume yang dipindahkan (ml)

Pengujian permeabilitas pada penelitian ini dimaksudkan apakah mix design beton berpori benar-benar berfungsi mengalirkan air secara baik. Pengujian permeabilitas dilakukan setelah benda uji berumur 28 hari. Adapun rumus pengujian permeabilitas/ infiltrasi dapat dilihat pada persamaan (3). Menurut ACI 522R-10, nilai permeailitas adalah minimal 0.14 cm/s dan maksimal 1.22 cm/s.

$$I = \frac{k \cdot M}{D^2 \cdot t}$$

Keterangan:

I = Laju infiltrasi (cm/s)

D = Diameter bagian dalam ring (30 mm)

t = Waktu untuk meloloskan air (m3)

K = nilai 4.583.666.000 ((mm2detik)/(kg.jam))

Pembahasan

Slump dan Karakteristik Workability Beton Berpori

Nilai slump beton berpori yang mendekati nol menunjukkan bahwa campuran memiliki konsistensi yang sangat kaku, yang merupakan karakteristik umum beton berpori dengan kandungan pasta semen dan air yang dikontrol secara ketat. Kondisi ini penting karena beton berpori tidak dirancang untuk menghasilkan workability tinggi seperti beton konvensional, melainkan untuk mempertahankan kerangka agregat yang memungkinkan terbentuknya jaringan rongga yang saling terhubung. Pada penelitian ini, faktor air-semen (FAS) dipertahankan sebesar 0,35 sehingga perbedaan kinerja antarvariasi terutama dapat dikaitkan dengan perubahan ukuran dan proporsi agregat. Konsistensi yang terlalu cair berpotensi menyebabkan pasta semen bergerak ke bagian bawah benda uji dan menutup rongga, sedangkan campuran yang terlalu kering dapat menyebabkan agregat tidak terikat secara memadai. Dengan demikian, slump yang mendekati nol menunjukkan bahwa campuran berada pada kondisi yang sesuai untuk mempertahankan granular skeleton, meskipun pengaruh tingkat pemadatan terhadap distribusi rongga tetap perlu diperhatikan.

Pengaruh Kombinasi Ukuran Agregat terhadap Kuat Tekan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi agregat 10–20 mm dan 5–10 mm dengan proporsi 50%:50% (K50S50) menghasilkan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari, yaitu 22,40 MPa. Nilai ini jauh lebih tinggi dibandingkan campuran K100S0 sebesar 7,38 MPa, K75S25 sebesar 13,90 MPa, K25S75 sebesar 8,24 MPa, dan K0S100 sebesar 12,01 MPa. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kuat tekan beton berpori tidak hanya ditentukan oleh ukuran agregat secara individual, tetapi terutama oleh kemampuan kombinasi ukuran agregat dalam membentuk kerangka granular yang stabil.

Secara mekanistik, keunggulan K50S50 dapat dijelaskan melalui peningkatan *interlocking* antarbutir. Agregat berukuran 10–20 mm membentuk kerangka utama yang relatif kaku, sedangkan agregat 5–10 mm mengisi sebagian ruang antarbutir tanpa sepenuhnya menutup jaringan pori. Kondisi tersebut meningkatkan jumlah titik kontak antaragregat sehingga beban tekan dapat ditransfer melalui jaringan agregat dan ikatan pasta semen secara lebih merata. Pada campuran K100S0 yang hanya menggunakan agregat 10–20 mm, jumlah titik kontak antarbutir relatif lebih terbatas sehingga struktur lebih bergantung pada ikatan pasta semen. Sebaliknya, proporsi agregat kecil yang terlalu tinggi seperti K25S75 dan K0S100 dapat mengubah konfigurasi rongga dan distribusi pasta sehingga tidak menghasilkan kombinasi optimal antara kepadatan struktur dan ruang pori.

Mekanisme tersebut sejalan dengan Yang dan Jiang yang menunjukkan bahwa ukuran agregat yang lebih kecil dapat meningkatkan kekuatan beton berpori melalui peningkatan kualitas kontak antara agregat dan pasta semen. Temuan penelitian ini juga konsisten dengan Ferić et al. yang melaporkan bahwa agregat berukuran lebih kecil dapat meningkatkan kuat tekan, tetapi dengan konsekuensi terhadap kemampuan hidrolik. Namun, hasil penelitian ini memberikan nuansa yang lebih spesifik karena kuat tekan tertinggi tidak diperoleh dari agregat berukuran kecil secara tunggal, melainkan dari kombinasi dua ukuran agregat pada proporsi 50%:50%. Dengan demikian, hasil ini memperkuat konsep bahwa optimasi gradasi lebih penting daripada sekadar memperkecil ukuran agregat.

Hasil tersebut juga dapat dibandingkan dengan Zhang et al. yang menunjukkan bahwa peningkatan proporsi agregat berukuran besar cenderung meningkatkan porositas dan permeabilitas tetapi menurunkan kuat tekan. Pola tersebut secara umum sesuai dengan penelitian ini, terutama pada campuran yang menggunakan agregat 20–30 mm. Akan tetapi, K50S50 menunjukkan bahwa penggunaan dua fraksi agregat dengan ukuran berbeda dapat menghasilkan kondisi optimum yang tidak selalu mengikuti hubungan linear antara ukuran agregat dan kekuatan. Perbedaan tersebut kemungkinan disebabkan oleh jenis agregat, bentuk dan tekstur permukaan agregat, rasio pasta-agregat, serta kondisi pemadatan yang berbeda antarpenelitian. Oleh karena itu, hasil penelitian ini memperkuat temuan terdahulu mengenai adanya *trade-off* antara sifat mekanik dan hidrolik, tetapi menunjukkan bahwa *trade-off* tersebut dapat dikendalikan melalui optimasi proporsi agregat lokal.

Selain *interlocking*, ketebalan lapisan pasta semen pada antarmuka agregat juga berperan penting. Pasta semen harus cukup tebal untuk membentuk ikatan antarbutir, tetapi tidak boleh terlalu tebal hingga mengisi rongga yang seharusnya berfungsi sebagai jalur air. Pada K50S50, distribusi ukuran agregat yang lebih baik diduga menghasilkan distribusi pasta yang lebih merata sehingga terbentuk kontak agregat-pasta yang cukup tanpa kehilangan jaringan rongga secara berlebihan. Claudino et al. menegaskan bahwa optimasi *cement paste* dan *granular skeleton* secara simultan diperlukan untuk memperoleh keseimbangan antara kekuatan mekanik dan permeabilitas. Dengan demikian, kuat tekan K50S50 sebesar 22,40 MPa dapat dipahami sebagai hasil interaksi antara peningkatan *interlocking*, distribusi titik kontak, kecukupan lapisan pasta, dan tetap terpeliharanya struktur pori.

Peningkatan kuat tekan dari umur 7 hari ke 28 hari pada K50S50, yaitu dari 10,40 MPa menjadi 22,40 MPa, juga menunjukkan kontribusi proses hidrasi semen terhadap perkembangan kekuatan. Namun, besarnya peningkatan tersebut tidak dapat semata-mata dikaitkan dengan umur beton karena seluruh campuran mengalami proses curing yang sama.

Perbedaan antarcampuran tetap menunjukkan bahwa konfigurasi agregat memengaruhi efektivitas pembentukan struktur internal beton. Dengan demikian, kombinasi K50S50 memberikan kondisi yang paling menguntungkan bagi perkembangan ikatan pasta-agregat sekaligus pembentukan kerangka granular yang mampu mentransfer tegangan secara efektif.

Hubungan Porositas terhadap Kuat Tekan

Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan penting antara porositas dan kuat tekan. K50S50 memiliki porositas 16,25% dengan kuat tekan 22,40 MPa, sedangkan K0S100 memiliki porositas tertinggi pada variasi 1, yaitu 18,11%, tetapi kuat tekannya hanya 12,01 MPa. Sebaliknya, K100S0 memiliki kuat tekan paling rendah, yaitu 7,38 MPa, meskipun porositasnya tidak paling tinggi, yaitu 15,52%. Temuan ini menunjukkan bahwa kuat tekan tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan nilai porositas total.

Secara teoritis, peningkatan porositas cenderung menurunkan kuat tekan karena volume material padat yang berfungsi menahan beban menjadi lebih kecil. Namun, hasil K100S0 menunjukkan bahwa porositas total yang relatif sedang belum tentu menghasilkan kekuatan tinggi. Hal tersebut menunjukkan pentingnya memperhatikan struktur pori, distribusi kontak agregat, dan kualitas ikatan pasta-agregat. Dua campuran dapat mempunyai porositas total yang relatif serupa tetapi memiliki distribusi pori dan jaringan transfer tegangan yang berbeda.

Temuan ini mendukung penelitian Deo dan Neithalath yang menunjukkan bahwa perilaku tekan beton berpori sangat dipengaruhi karakteristik struktur pori, bukan hanya jumlah rongga. Dengan demikian, K50S50 dapat dianggap memiliki kondisi mikrostruktur yang lebih efektif karena sebagian rongga tetap dipertahankan untuk fungsi hidrolik, sementara jaringan padat dan titik kontak antaragregat cukup untuk mentransfer tegangan. Hal tersebut menjelaskan mengapa K50S50 mampu menghasilkan kombinasi porositas yang relatif tinggi dan kuat tekan yang jauh lebih besar dibandingkan beberapa campuran lainnya.

Hubungan Porositas terhadap Permeabilitas

Porositas dan permeabilitas pada beton berpori memiliki hubungan yang erat, tetapi tidak bersifat identik. Porositas menunjukkan jumlah ruang kosong, sedangkan permeabilitas menunjukkan kemampuan jaringan rongga tersebut dalam mengalirkan air. Oleh karena itu, rongga yang saling terhubung lebih menentukan kemampuan infiltrasi dibandingkan rongga tertutup.

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa K50S50 mempunyai porositas 16,25% dan permeabilitas 1,16 cm/s. Nilai tersebut menunjukkan bahwa campuran tidak mempunyai porositas maksimum, tetapi tetap menghasilkan kemampuan aliran air yang memadai.

Sebaliknya, K100S0 memiliki permeabilitas sangat tinggi, yaitu 2,03 cm/s, tetapi kuat tekannya hanya 7,38 MPa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kemampuan aliran air dapat terjadi ketika struktur rongga menjadi lebih terbuka, tetapi konsekuensinya adalah berkurangnya luas penampang material padat yang berperan dalam menahan beban.

Temuan tersebut sejalan dengan Shan et al. yang menjelaskan bahwa permeabilitas dipengaruhi oleh porositas efektif, konektivitas rongga, ukuran pori, dan *tortuosity*. Dengan demikian, peningkatan porositas tidak selalu menghasilkan peningkatan permeabilitas yang proporsional apabila rongga yang terbentuk tidak saling terhubung. Hasil penelitian ini memperkuat pandangan tersebut karena campuran dengan porositas lebih tinggi tidak secara otomatis menjadi campuran dengan performa keseluruhan terbaik.

Penelitian Hung et al. juga menunjukkan bahwa ukuran agregat dan komposisi gradasi dapat memengaruhi permeabilitas sekaligus kuat tekan. Mulu et al. selanjutnya menunjukkan bahwa agregat berukuran lebih besar cenderung memberikan jalur aliran yang lebih besar, sedangkan agregat lebih kecil dapat meningkatkan risiko penyumbatan. Hasil penelitian ini konsisten dengan kedua penelitian tersebut, tetapi memberikan tambahan bahwa kombinasi 10–20 mm dan 5–10 mm pada proporsi 50%:50% mampu menghasilkan titik keseimbangan antara ruang aliran dan stabilitas struktur.

Pengaruh Ukuran Agregat terhadap Struktur Rongga

Ukuran agregat berpengaruh langsung terhadap geometri ruang antarbutir. Agregat 20–30 mm cenderung menghasilkan ruang antarbutir yang lebih besar sehingga dapat membentuk saluran aliran yang lebih terbuka. Hal ini terlihat dari nilai permeabilitas B0K100 sebesar 2,03 cm/s. Namun, ruang antarbutir yang besar juga mengurangi jumlah titik kontak dan menyebabkan struktur granular menjadi kurang rapat, sehingga kemampuan transfer tegangan dapat menurun.

Agregat 5–10 mm memiliki perilaku yang berbeda. Ukuran yang lebih kecil memungkinkan terbentuknya lebih banyak titik kontak antarbutir dan meningkatkan kepadatan kerangka granular. Akan tetapi, jika agregat kecil digunakan secara dominan, sebagian ruang antarbutir dapat terisi sehingga konektivitas pori menurun atau pola pori menjadi kurang optimal. Hal tersebut tercermin pada K0S100 yang memiliki porositas 18,11%, tetapi tidak menghasilkan kuat tekan setinggi K50S50.

Dengan demikian, penggunaan dua ukuran agregat pada K50S50 memberikan keuntungan berupa *packing* yang lebih baik. Agregat 5–10 mm mengisi sebagian ruang yang terbentuk di antara agregat 10–20 mm, tetapi tidak seluruhnya. Konfigurasi tersebut

memungkinkan terbentuknya struktur yang lebih stabil dengan jumlah titik kontak lebih banyak, sementara sebagian rongga tetap terbuka. Secara konseptual, kondisi ini menghasilkan struktur kompromi antara *load-bearing skeleton* dan *hydraulic pore network*.

Temuan ini memperkuat penelitian Zhang et al. mengenai pentingnya gradasi multi-ukuran, tetapi berbeda dalam konteks material dan komposisi optimal. Zhang et al. menggunakan material agregat yang berbeda, sedangkan penelitian ini menggunakan agregat lokal Kabupaten Trenggalek. Perbedaan karakteristik agregat, termasuk bentuk, tekstur permukaan, dan distribusi ukuran aktual, dapat menyebabkan proporsi optimum yang berbeda. Oleh karena itu, hasil K50S50 tidak dapat langsung digeneralisasi untuk semua jenis agregat, tetapi menunjukkan pentingnya optimasi lokal.

Hubungan Struktur Rongga dengan Performa Beton

Ketiga parameter utama penelitian menunjukkan bahwa performa beton berpori merupakan hasil interaksi antara struktur padat dan struktur rongga. Struktur padat terutama menentukan kemampuan beton dalam menahan beban melalui *interlocking* agregat dan ikatan pasta-agregat, sedangkan struktur rongga menentukan kemampuan air untuk melewati beton. Peningkatan volume rongga dapat meningkatkan permeabilitas, tetapi pada saat yang sama mengurangi volume material yang tersedia untuk mentransfer tegangan.

K50S50 menunjukkan keseimbangan tersebut secara paling jelas. Campuran ini menghasilkan kuat tekan 22,40 MPa, porositas 16,25%, dan permeabilitas 1,16 cm/s. Artinya, campuran tidak dipilih hanya karena menghasilkan kuat tekan tertinggi, tetapi karena mampu mempertahankan fungsi hidrolik tanpa mengorbankan kemampuan struktural. Berdasarkan rentang yang digunakan dalam penelitian, nilai porositas dan permeabilitas tersebut berada pada rentang yang sesuai untuk beton berpori, sementara kuat tekan memenuhi kebutuhan perkerasan ringan.

Dalam perspektif desain material, hasil ini menunjukkan bahwa optimasi beton berpori sebaiknya tidak menggunakan satu parameter sebagai indikator keberhasilan. Campuran dengan permeabilitas sangat tinggi, seperti K100S0 atau B0K100, belum tentu optimal karena kekuatan tekannya rendah. Sebaliknya, campuran yang terlalu padat dapat menghasilkan kekuatan lebih tinggi tetapi mengurangi fungsi infiltrasi. Oleh sebab itu, pendekatan multi-parameter yang digunakan dalam penelitian ini lebih relevan untuk menentukan campuran yang sesuai dengan fungsi perkerasan RTH.

Hasil tersebut juga sejalan dengan Wijekoona et al. yang menunjukkan bahwa performa beton berpori dipengaruhi secara simultan oleh bentuk dan ukuran agregat, rasio agregat-

semen, serta tingkat pemadatan. Dengan demikian, ukuran agregat merupakan salah satu faktor penting, tetapi bukan satu-satunya faktor pengendali. Hasil penelitian ini perlu dipahami sebagai kondisi optimum untuk kombinasi material, FAS, metode pemadatan, dan curing yang digunakan dalam penelitian, bukan sebagai proporsi universal untuk seluruh beton berpori.

Implikasi Praktis terhadap Perkerasan Ruang Terbuka Hijau

Secara praktis, hasil K50S50 menunjukkan bahwa agregat lokal Kabupaten Trenggalek dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan beton berpori dengan keseimbangan antara kekuatan mekanik dan kemampuan infiltrasi. Pemanfaatan material lokal berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap material dari wilayah lain serta dapat meningkatkan efisiensi rantai pasok apabila sumber agregat berada relatif dekat dengan lokasi pekerjaan. Namun, efisiensi tersebut tetap perlu dikaji melalui analisis biaya, jarak angkut, ketersediaan agregat, dan konsistensi mutu material sebelum diterapkan dalam proyek skala lapangan.

Nilai permeabilitas K50S50 sebesar 1,16 cm/s menunjukkan bahwa lapisan perkerasan dapat memberikan jalur bagi air hujan untuk masuk melalui permukaan. Secara hidrologis, karakteristik tersebut berpotensi mengurangi volume limpasan permukaan dibandingkan permukaan kedap air, terutama apabila lapisan dasar dan tanah di bawah perkerasan memiliki kapasitas infiltrasi yang memadai. Dengan demikian, beton berpori dapat berfungsi tidak hanya sebagai material struktural, tetapi juga sebagai bagian dari sistem drainase berkelanjutan.

Untuk aplikasi trotoar dan jalur pedestrian, kuat tekan 22,40 MPa memberikan indikasi bahwa K50S50 memiliki kapasitas yang sesuai untuk perkerasan dengan beban relatif ringan. Pada area parkir kendaraan ringan, karakteristik tersebut juga menunjukkan potensi penggunaan, tetapi desain lapisan, ketebalan perkerasan, kondisi tanah dasar, beban lalu lintas, dan drainase bawah permukaan tetap harus diperhitungkan. Hasil laboratorium tidak dapat langsung digunakan sebagai dasar desain konstruksi tanpa verifikasi terhadap kondisi lapangan.

Pada taman kota dan ruang terbuka hijau, beton berpori K50S50 berpotensi digunakan pada jalur pedestrian, area akses, area parkir ringan, serta bagian tertentu dari ruang publik yang membutuhkan kombinasi fungsi perkerasan dan infiltrasi. Penggunaan tersebut dapat mendukung konsep infrastruktur hijau karena air hujan tidak seluruhnya dialihkan melalui saluran drainase permukaan, tetapi sebagian dapat diteruskan melalui struktur perkerasan menuju lapisan tanah.

Dengan demikian, implikasi utama penelitian ini bukan hanya menemukan campuran dengan kuat tekan tertinggi, tetapi menunjukkan bahwa desain beton berpori dapat diarahkan

untuk memenuhi dua fungsi sekaligus, yaitu fungsi struktural dan hidrologis. K50S50 dapat diposisikan sebagai kandidat campuran untuk pengembangan perkerasan RTH Kabupaten Trenggalek, khususnya pada area dengan tuntutan beban ringan sampai sedang dan kebutuhan infiltrasi air hujan.

Keterbatasan Penelitian dan Arah Penelitian Selanjutnya

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil dan melakukan generalisasi. Pertama, penelitian hanya menggunakan satu jenis semen, yaitu Portland Composite Cement (PCC), sehingga pengaruh jenis semen lain terhadap pembentukan pasta, perkembangan kekuatan, dan struktur pori belum dapat diketahui. Kedua, faktor air-semen ditetapkan secara konstan sebesar 0,35. Penggunaan satu nilai FAS memang diperlukan untuk mengisolasi pengaruh ukuran dan proporsi agregat, tetapi belum memberikan gambaran mengenai interaksi antara FAS dan gradasi agregat.

Ketiga, penelitian belum mengevaluasi durabilitas beton berpori dalam jangka panjang. Beton berpori pada kondisi lapangan dapat mengalami abrasi, penyumbatan pori, degradasi permukaan, penetrasi material halus, dan perubahan kinerja akibat siklus lingkungan. Oleh karena itu, pengujian durabilitas diperlukan untuk memastikan bahwa kinerja hidrolik dan mekanik K50S50 dapat dipertahankan selama masa layanan.

Keempat, penelitian belum melakukan pengujian *freeze-thaw*. Meskipun kondisi ini mungkin tidak menjadi faktor dominan pada iklim tropis seperti Indonesia, pengujian tersebut tetap penting apabila formulasi material akan diterapkan pada wilayah dengan kondisi temperatur ekstrem atau dibandingkan dengan standar internasional yang mempertimbangkan siklus pembekuan dan pencairan.

Kelima, penelitian hanya mengevaluasi kuat tekan, densitas, porositas, dan permeabilitas, sedangkan kuat lentur belum diuji. Parameter kuat lentur penting karena perkerasan menerima beban yang dapat menghasilkan tegangan lentur, terutama pada sistem perkerasan dengan beban berulang. Oleh karena itu, penelitian berikutnya perlu memasukkan kuat lentur, ketahanan abrasi, dan perilaku kelelahan agar evaluasi kelayakan struktural menjadi lebih komprehensif.

Keenam, seluruh pengujian dilakukan pada benda uji laboratorium sehingga belum merepresentasikan seluruh kondisi lapangan. Kondisi pemadatan, variasi kadar air agregat, karakteristik tanah dasar, intensitas hujan, sedimentasi, penyumbatan pori, serta beban lalu lintas aktual dapat memengaruhi kinerja beton berpori. Oleh karena itu, penerapan K50S50 di RTH Kabupaten Trenggalek perlu dilanjutkan melalui pembuatan *full-scale pavement* atau

field trial untuk mengevaluasi infiltrasi, perubahan permeabilitas, kerusakan permukaan, dan kapasitas struktural selama periode layanan.

Secara keseluruhan, keterbatasan tersebut menunjukkan bahwa K50S50 sebaiknya dipandang sebagai formulasi optimum pada kondisi eksperimen penelitian ini, bukan sebagai formulasi universal. Penelitian lanjutan dengan variasi jenis semen, FAS, tingkat pemadatan, ketebalan perkerasan, pengujian kuat lentur dan durabilitas, serta validasi lapangan akan memperkuat dasar teknis penerapan beton berpori berbasis agregat lokal untuk infrastruktur ruang terbuka hijau.

Uji Slump

Pengujian slump dilakukan pada setiap pengecoran untuk mendapatkan nilai slump. Nilai slump beton berpori yang didapatkan mendekati nol (Gambar 3). Pengujian ini bertujuan untuk menghindari segregasi dan penumpukan pasta di dasar beton. Segregasi dan penumpukan pasta menurunkan kinerja beton tembus air, terutama permeabilitas. Beton berpori pada umumnya menggunakan w/c berkisar 0.28-0.48 (Haselbach, L. M., & Gaither, A.,2008). Jika kandungan air berlebih akan menyebabkan pasta semen akan mencair dan menumpuk pada bagian bawah, namun disisi lain jika terlalu sedikit kandungan air juga memberikan pengaruh pada perkembangan kuat tekan dan menyebabkan pengikisan permukaan secara prematur (Yahia, A., & Kabagire, K. D., 2014).



Gambar 3. Agregat Kasar Ukuran 1-2 cm dan 2-3 cm

Kuat Tekan

Kuat tekan dan modulus elastisitas beton dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan Variasi 1 pada umur 7 hari, nilai kuat tekan maksimum sebesar 11,48 MPa diperoleh pada sampel K75S25, sedangkan nilai minimum sebesar 6,76 MPa diperoleh pada sampel K100S0. Pada umur 28 hari, nilai kuat tekan maksimum meningkat menjadi 22,40 MPa pada sampel K50S50, sedangkan nilai minimum sebesar 7,38 MPa tetap diperoleh pada sampel K100S0. Peningkatan kuat tekan pada umur 28 hari menunjukkan bahwa proses hidrasi semen yang berlangsung lebih lama berkontribusi terhadap pembentukan dan penguatan ikatan antarpartikel dalam matriks beton.

Perbedaan nilai kuat tekan antarvariasi juga menunjukkan bahwa komposisi material berpengaruh terhadap perkembangan struktur internal beton. Sampel K100S0 yang memiliki kuat tekan paling rendah menunjukkan bahwa struktur pori yang terbentuk cenderung kurang efektif dalam menghasilkan matriks yang mampu menahan beban tekan. Sebaliknya, kombinasi material pada K75S25 dan terutama K50S50 pada umur 28 hari menghasilkan interaksi antarbutir yang lebih baik sehingga transfer tegangan dalam matriks menjadi lebih efektif. Dengan demikian, peningkatan kuat tekan tidak hanya berkaitan dengan bertambahnya umur beton, tetapi juga dipengaruhi oleh tingkat kepadatan matriks dan karakteristik distribusi pori yang terbentuk selama proses pengerasan.

Hasil pengujian modulus elastisitas pada Tabel 5 memperlihatkan kecenderungan yang sejalan dengan perubahan kuat tekan. Secara umum, campuran dengan kuat tekan yang lebih tinggi menunjukkan modulus elastisitas yang lebih besar, yang mengindikasikan bahwa matriks beton menjadi lebih kaku dan memiliki kemampuan lebih baik dalam mempertahankan deformasi ketika menerima pembebanan. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan mekanis tidak hanya mencerminkan kemampuan beton dalam menahan beban hingga terjadi keruntuhan, tetapi juga berkaitan dengan peningkatan kekakuan material pada kondisi pembebanan elastis.

Pada beton berpori, hubungan antara kuat tekan dan modulus elastisitas sangat dipengaruhi oleh struktur pori. Keberadaan pori yang lebih banyak atau pori yang saling terhubung menyebabkan luas penampang efektif untuk meneruskan beban menjadi lebih kecil dan meningkatkan konsentrasi tegangan di sekitar rongga. Kondisi tersebut menyebabkan deformasi yang lebih besar ketika beton menerima beban, sehingga modulus elastisitas dan kuat tekan cenderung menurun. Sebaliknya, struktur pori yang lebih terkontrol, distribusi rongga yang lebih homogen, serta terbentuknya matriks semen yang lebih padat dapat meningkatkan efektivitas transfer tegangan dan menghasilkan beton dengan kekakuan serta kuat tekan yang lebih tinggi.

Hasil pada K50S50 umur 28 hari yang menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 22,40 MPa dapat mengindikasikan bahwa komposisi tersebut memberikan keseimbangan yang lebih baik antara pembentukan matriks pengikat dan keberadaan pori. Struktur internal yang lebih stabil memungkinkan beban didistribusikan secara lebih merata sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada area lemah. Sebaliknya, rendahnya kuat tekan pada K100S0 menunjukkan bahwa karakteristik pori dan kontinuitas matriks pada campuran tersebut belum memberikan kondisi yang optimal untuk transfer beban. Oleh karena itu, modulus elastisitas

dapat digunakan sebagai parameter pelengkap untuk menjelaskan perubahan perilaku mekanis beton, karena parameter ini memberikan informasi mengenai kekakuan material yang tidak sepenuhnya dapat dijelaskan hanya melalui nilai kuat tekan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan dan modulus elastisitas memiliki keterkaitan dengan perkembangan struktur mikro beton selama proses hidrasi dan dengan karakteristik sistem porinya. Semakin efektif matriks mengikat partikel dan semakin baik distribusi serta konektivitas pori dikendalikan, semakin besar kemampuan beton untuk mentransfer tegangan dan menahan deformasi. Temuan ini menegaskan bahwa evaluasi kinerja mekanis beton berpori sebaiknya tidak hanya didasarkan pada kuat tekan, tetapi juga mempertimbangkan modulus elastisitas sebagai indikator kekakuan dan kualitas struktur internal beton.

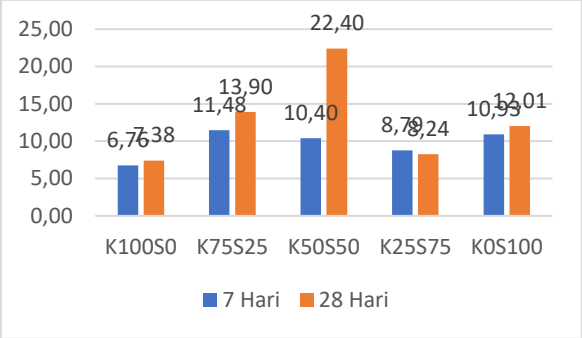
Berdasarkan Tabel 5 hasil dari kuat tekan Variasi 2 pada umur 7 hari, kuat tekan maksimum dan minimum adalah 8.92 MPa dan 6.76 MPa untuk masing-masing sampel B75S25 dan B0S100. Sedangkan hasil uji kuat tekan Variasi 2 pada umur 28 hari, kuat tekan maksimum dan minimum adalah 15.23 MPa dan 7.38 MPa untuk masing-masing sampel B50K50 dan K100S0.

Tabel 3.. Kuat Tekan dan Modulus Elastis

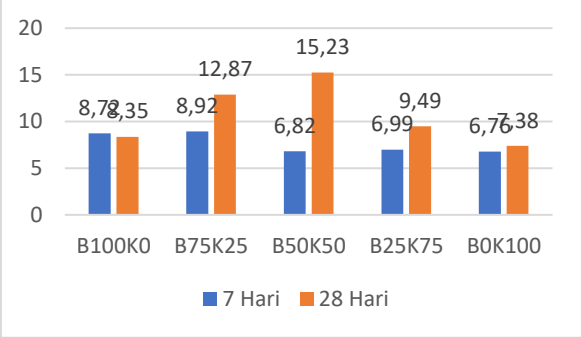
Kode	7 Hari		28 Hari	
	Fc	Ec	Fc	Ec
Variasi 1				
K100S0	6.76	12219	7.38	12765
K75S25	11.48	15924	13.90	17525
K50S50	10.40	15160	22.40	22242
K25S75	8.79	13937	8.24	13489
K0S100	10.93	15538	12.01	16288
Variasi 2				
B100K0	8.72	13875	8.35	13581
B75K25	8.92	14035	12.87	16861
B50K50	6.82	12275	15.23	18342
B25K75	6.99	12427	9.49	14475
B0K100	6.76	12219	7.38	12765

Perbandingan kuat tekan variasi 1 dan variasi 2 dapat dilihat Tabel 5, didapatkan bahwa kombinasi 50% : 50% (K50S50) pada penggunaan ukuran agregat 10-20 mm dan 5-10 mm memiliki kekuatan beton paling tinggi yaitu 22.40 MPa. Kuat tekan tertinggi kedua yaitu 15.23 MPa adalah kombinasi 50% : 50% (B50K50) pada penggunaan ukuran agregat 10-20 mm dan 20- 30 mm. Terlihat dengan jelas bahwa kuat tekan beton berpori relatif rendah karena

banyaknya kandungan pori. Ketika proporsi campuran dan rata-rata densitas diestimasi sama, mengurangi ukuran agregat dapat berkontribusi dalam meningkatkan kuat tekan beton berpori. Hal ini kemungkinan terjadi karena faktanya semakin kecil ukuran agregat memberikan dukungan peningkatan kuat tekan pada antarmuka agregate and pasta semen (Yang, J., & Jiang, G., 2003). Saat kandungan pori total menurun, kekuatan tekan meningkat. Peningkatan kadar pasta semen meningkatkan ketebalan penutup pasta agregat dan menurunkan angka pori total, akibatnya kuat tekan meningkat (Zaetang, Y., Wongsa, A., Sata, V., & Chindaprasirt, P., 2013). Kuat tekan minimum umur 28 hari menurut SNI 03-0691-2022 adalah 17 MPa, 12,5 MPa, dan 8,5 MPa untuk masing-masing Kelas B (tempat parkir), Kelas C (pedestrian/trotoar), dan Kelas D (aplikasi taman). Benda uji K50S50 memenuhi persyaratan untuk aplikasi ruang terbuka hijau, dan benda uji B50K50 memenuhi persyaratan untuk aplikasi trotoar.



Grafik 1. Perbandingan kuat tekan beton variasi 1 umur 7 hari dan umur 28 hari



Grafik 2. Perbandingan kuat tekan beton variasi 2 umur 7 hari dan umur 28 hari

Porositas

Tabel 6 menunjukkan hasil porositas beton berpori. Berdasarkan Tabel 6, nilai porositas terendah didapatkan pada B100K0 dengan nilai 13.88% pada variasi 2. Sedangkan nilai porositas tertinggi yaitu 18.11% didapatkan pada benda uji K0S100. B100K0 dengan ukuran agregat 20-30mm menyebabkan terciptanya banyak ruang antar muka agregat. Hal ini

menyebabkan ruang-ruang antar muka agregat diisi oleh pasta semen. Dengan meningkatnya ketebalan pasta semen menyebabkan menurunnya rongga aktif porositas (Torres, A., Hu, J., & Ramos, A., 2015).. Hal sebaliknya ditunjukkan pada K0S100 dengan ukuran agregat 5-10 mm. Ruang antar muka agregat kecil dikarena satu jenis ukuran agregat, menyebabkan ketebalan pasta semen semakin kecil. Hal ini mendorong terciptanya rongga-rongga aktif yang saling terkoneksi.

Table 4. Porositas Beton Berpori

Kode	Porositas (%)
Variasi 1	
K100S0	15.52
K75S25	16.07
K50S50	16.25
K25S75	15.67
K0S100	18.11
Variasi 2	
B100K0	13.88
B75K25	15.02
B50K50	14.20
B25K75	14.20
B0K100	15.52

Permeabilitas

Tabel 7 menunjukkan hasil permeabilitas beton berpori. Berdasarkan Tabel 7, nilai permeabilitas pada variasi 1 benda uji K100S0, K25S75 dan K0S100 yang tidak memenuhi standar ACI 522R-10 dengan nilai maksimum permeabilitas adalah 1.22 cm/s. Untuk variasi 2, hanya benda uji B100K0 yang memenuhi standar ACI 522R-10. Karena ketebalan pasta semen meningkatkan permeabilitas benda uji beton berpori menurun. Hal ini serupa dengan porositas, permeabilitas beton berpori menurun dengan ketebalan pasta semen yang lebih besar. Hasil ini disebabkan rongga aktif semakin mengecil seiring dengan semakin besarnya pasta semen (Torres, A., Hu, J., & Ramos, A., 2015). Hasil ini seperti yang diprediksi karena tren yang terekam dengan porositas versus permeabilitas berbanding terbalik (Gaedicke, C., Marines, A., & Miankodila, F., 2014), oleh karena itu tren serupa diharapkan untuk ketebalan dan permeabilitas pasta semen.

Table 5. Permeabilitas beton berpori

Kode	Permeabilitas (cm/s)
Variasi 1	
K100S0	2.03
K75S25	0.61
K50S50	1.16
K25S75	1.74
K0S100	
Variasi 2	1.43
B100K0	1.21
B75K25	1.37
B50K50	1.77
B25K75	1.77
B0K100	2.03

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Komposisi campuran agregat kasar berpengaruh terhadap karakteristik beton berpori, khususnya kuat tekan, porositas, dan permeabilitas. Kombinasi agregat berukuran 10–20 mm dan 5–10 mm dengan proporsi 50%:50% menghasilkan kinerja paling optimal, dengan kuat tekan sebesar 22,40 MPa pada umur 28 hari, porositas 16,25%, dan permeabilitas 1,16 cm/s. Kombinasi tersebut menunjukkan keseimbangan antara kemampuan beton dalam menahan beban dan mempertahankan struktur pori yang memungkinkan infiltrasi air, sehingga berpotensi diterapkan sebagai material perkerasan ringan pada ruang terbuka hijau di Kabupaten Trenggalek.

Secara ilmiah, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan mix design beton berpori berbasis agregat lokal dengan menunjukkan bahwa pengaturan proporsi dan gradasi agregat kasar merupakan parameter penting dalam mengendalikan keseimbangan antara kekuatan mekanis dan karakteristik hidraulik beton berpori. Proporsi agregat 50%:50% antara ukuran 10–20 mm dan 5–10 mm dapat menjadi salah satu pendekatan desain campuran untuk memperoleh struktur pori yang tetap terhubung tanpa menyebabkan penurunan kuat tekan yang berlebihan. Temuan ini memperluas pemahaman mengenai pemanfaatan material lokal dalam perancangan beton berpori yang tidak hanya memenuhi kebutuhan kinerja teknis, tetapi juga dapat disesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan aplikasi perkerasan ringan di daerah.

Penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada evaluasi kinerja jangka panjang beton berpori melalui pengujian durability, abrasion resistance, dan clogging resistance untuk mengetahui kestabilan sifat mekanis dan hidrauliknya selama masa pelayanan. Selain itu, life cycle assessment (LCA) perlu dilakukan untuk mengevaluasi dampak lingkungan dan keberlanjutan penggunaan agregat lokal. Optimasi pasta semen, termasuk pengendalian

volume, rasio air-semen, dan karakteristik pasta yang mengikat agregat, juga diperlukan untuk memperoleh keseimbangan yang lebih baik antara kuat tekan dan permeabilitas. Pengembangan berikutnya dapat diarahkan pada penggunaan bahan tambah yang lebih ramah lingkungan, seperti material substitusi semen atau bahan berbasis limbah, sehingga dihasilkan beton berpori yang memiliki kinerja teknis memadai sekaligus lebih berkelanjutan secara lingkungan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada instansi dan laboratorium yang telah memfasilitasi proses pembuatan benda uji serta pengujian karakteristik beton berpori. Apresiasi juga diberikan kepada para dosen pembimbing, rekan peneliti, dan seluruh pihak yang telah memberikan masukan, bantuan teknis, serta dukungan selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi beton berpori sebagai material perkerasan yang ramah lingkungan dan mendukung pembangunan infrastruktur berkelanjutan, khususnya pada kawasan Ruang Terbuka Hijau di Kabupaten Trenggalek.

DAFTAR REFERENSI

ACI Committee 522. (2010). *Report on pervious concrete (ACI 522R-10).* American Concrete Institute.

AlShareedah, O., & Nassiri, S. (2021). Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review. *Journal of Cleaner Production, 288*, 125095.

Aoki, Y., Sudo, T., & Hasegawa, S. (2012). Performance evaluation of pervious concrete pavement for urban drainage systems. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 720–728.

Chandrappa, A. K., & Biligiri, K. P. (2016). Pervious concrete as a sustainable pavement material – Research findings and future prospects: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 111, 262–274.

Chopra, M., Wanielista, M., & Ballock, C. (2007). Hydraulic performance of pervious concrete pavements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(6), 583–592.

Claudino, G. O., Rodrigues, G. G. O., Rohden, A. B., et al. (2022). Mix design for pervious concrete based on the optimization of cement paste and granular skeleton to balance mechanical strength and permeability. *Construction and Building Materials, 347*, 128620. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128620

Cosic, K., Korat, L., Ducman, V., & Netinger, I. (2015). Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 78, 69–76.

Deo, O., & Neithalath, N. (2010). Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features. *Materials Science and Engineering* A, 528(1), 402–412.

Ferić, K., Kumar, V. S., Romić, A., & Gotovac, H. (2023). Effect of aggregate size and compaction on the strength and hydraulic properties of pervious concrete. *Sustainability, 15*(2), 1146. https://doi.org/10.3390/su15021146

Gaedicke, C., Marines, A., & Miankodila, F. (2014). A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 494–503.

Ghafoori, N., & Dutta, S. (1995). Building and nonpavement applications of no-fines concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering, 7*(4), 286–289. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1995)7:4(286)

Haselbach, L. M., & Gaither, A. (2008). *Preliminary field testing: Urban heat island impacts and pervious concrete*. Concrete Technology Forum – Focus on Sustainable Development. National Ready Mixed Concrete Association.

Ho, H. L., Ngo, T., & Li, X. (2018). Waste-based pervious concrete for climate-resilient pavements. *Materials*, 11(6), 900.

Hung, V. V., Seo, S.-Y., Kim, H.-W., & Lee, G.-C. (2021). Permeability and strength of pervious concrete according to aggregate size and blocking material. *Sustainability, 13*(1), 426. https://doi.org/10.3390/su13010426

Kevern, J. T., Schaefer, V. R., & Wang, K. (2008). *Pervious concrete mixture proportioning*. National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University.

Liu, R., Xiao, H., Liu, J., & Li, H. (2018). Investigation of the porosity distribution, permeability, and mechanical performance of pervious concretes. *Processes*, 6(7), 78.

Mahalingam, R., & Mahalingam, S. V. (2016). Analysis of pervious concrete properties. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineering*, 68(6), 493–501.

Montes, F., Valavala, S., & Haselbach, L. M. (2005). A new test method for porosity measurements of Portland cement pervious concrete. *Journal of ASTM International, 2*(1), 1–13.

Mulu, A., Jacob, P., & Dwarakish, G. S. (2022). Hydraulic performance of pervious concrete based on small size aggregates. *Advances in Materials Science and Engineering, 2022*, Article 2973255. https://doi.org/10.1155/2022/2973255

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete (5th ed.).* Pearson Education Limited.

Özel, B. F., Sakallı, Ş., & Şahin, Y. (2022). The effects of aggregate and fiber characteristics on the properties of pervious concrete. *Construction and Building Materials, 356*, 129294. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129294

Pemerintah Kabupaten Trenggalek. (2024). *Data ruang terbuka hijau*. Trenggalek Satu Data. https://satudata.trenggalekkab.go.id/dataset/336/0/data-ruang-terbuka-hijau

Schaefer, V. R., Wang, K., Suleiman, M. T., & Kevern, J. T. (2006). *Mix design development for pervious concrete in cold weather climates*. National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University.

Shan, J., Zhang, Y., Wu, S., Lin, Z., Li, L., & Wu, Q. (2022). Pore characteristics of pervious concrete and their influence on permeability attributes. *Construction and Building Materials, 327*, 126874. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126874

Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). *Pervious concrete pavements*. Portland Cement Association.

Torres, A., Hu, J., & Ramos, A. (2015). The effect of the cementitious paste thickness on the performance of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 95, 850–859.

Wijekoona, S. H. B., Sathiparan, N., & Subramaniam, D. N. (2024). Optimisation of pervious concrete performance by varying aggregate shape, size, aggregate-to-cement ratio, and compaction effort by using the Taguchi method. *International Journal of Pavement Engineering, 25*(1), Article 2380523. https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2380523

Xiong, B., Wu, X., Liu, W., Lu, X., Gao, H., & Lv, W. (2025). Influence of different aggregate characteristics on pervious concrete. *Construction and Building Materials*, *460*, 139789. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139789

Yang, J., & Jiang, G. (2003). Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials. *Cement and Concrete Research*, 33(3), 381–386.

Yu, F., Sun, D., Wang, J., & Hu, M. (2019). Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 209, 463–475.

Zaetang, Y., Wongsa, A., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2013). Use of lightweight aggregates in pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 585–59

Zhang, J., Sun, H., Shui, X., & Chen, W. (2023). Experimental investigation on the properties of sustainable pervious concrete with different aggregate gradation. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, *17*, Article 64. https://doi.org/10.1186/s40069-023-00625-0