

STUDI PEMANFAATAN ABU CANGKANG KERANG HIJAU BERKELANJUTAN SEBAGAI PENGGANTI PARSIAL SEMEN DALAM PEMBUATAN BETON BERPORI: KAJIAN TERHADAP KUAT TEKAN, POROSITAS, DAN PERMEABILITAS

Miswar Tumpu^{a*}, Franky E.P. Lapian^b, Parea R. Rangan^c, Irianto^d, Mansyur^e

^a Magister Manajemen Bencana, Sekolah Pascasarjana, Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia

^b Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Yapis Papua, Jayapura, Indonesia

^c Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Indonesia, Toraja, Indonesia

^d Magister Rekayasa Sipil, Program Pascasarjana, Universitas Yapis Papua, Jayapura, Indonesia

^e Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sembilan belas November, Kolaka, Indonesia

ABSTRAK

Perkembangan teknologi beton modern semakin banyak mengintegrasikan bahan pozzolan alami untuk mendukung konstruksi berkelanjutan. Salah satu bahan yang berpotensi adalah abu cangkang kerang hijau (Green Clam Shell Ash/GCSA) yang dapat berfungsi sebagai substansi parsial terhadap Semen Portland Komposit (PCC). Penelitian ini mengevaluasi pengaruh penggunaan GCSA terhadap karakteristik mekanik dan fisik beton berpori, khususnya pada parameter kuat tekan, porositas, dan permeabilitas. Melalui pendekatan eksperimental, silinder beton dengan variasi GCSA sebesar 2% dan 4% dari total berat semen diuji pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan GCSA mampu meningkatkan kuat tekan hingga 14,58 MPa pada kadar 4% dibandingkan beton kontrol sebesar 10,76 MPa. Sementara itu, nilai porositas dan permeabilitas mengalami penurunan masing-masing menjadi 2,375% dan 5,23 mm/detik, menandakan peningkatan kepadatan serta efisiensi transport air dalam beton. Secara keseluruhan, penggunaan GCSA menghasilkan beton berpori dengan struktur mikro yang lebih halus dan kekedapan yang lebih baik. Temuan ini menunjukkan bahwa GCSA memiliki potensi tinggi untuk dikembangkan sebagai material alternatif ramah lingkungan dalam industri konstruksi modern.

Keywords:

Permeabilitas, Porositas, Kuat Tekan, Beton Berpori, Abu Cangkang Kerang Hijau

1. PENDAHULUAN

Beton berpori merupakan jenis material konstruksi berkelanjutan yang tersusun atas campuran semen Portland, air, aditif, serta agregat kasar tanpa penggunaan agregat halus agar koneksi pori tetap terjaga (ACI Committee, 2010). Beton ini berfungsi meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah sehingga mampu mengurangi genangan permukaan dan risiko banjir, sekaligus mendukung konservasi air tanah (Maulana et al., 2023). Karena memiliki struktur internal yang berpori dan memungkinkan aliran air, beton berpori banyak digunakan pada area terbuka seperti jalan setapak, lahan parkir, serta area resapan air perkotaan (Parung et al., 2023). Berdasarkan pedoman ACI 522R-10, rasio air-semen yang direkomendasikan berkisar antara 0,27 hingga 0,34 untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan dan permeabilitas (ACI Committee, 2010). Walaupun memiliki manfaat ekologis, beton berpori umumnya memiliki kuat tekan relatif rendah, yaitu sekitar 10 MPa, yang sesuai dengan kebutuhan struktur ringan atau non-struktural (Mansyur et al., 2021).

Upaya inovasi dilakukan dengan memanfaatkan abu cangkang kerang hijau (Green Clam Shell Ash atau GCSA) sebagai pengganti parsial semen Portland komposit, guna mengurangi jejak karbon sekaligus meningkatkan performa beton berpori (Rangan et al., 2021). Kandungan silika pada GCSA yang mencapai 10–14% menjadikannya pozzolan alami yang berpotensi memperbaiki struktur mikro beton dan meningkatkan kuat tekan melalui reaksi antara silika (SiO_2) dan kalsium (Ca^{2+}) yang membentuk trikalsium silikat (C_3S) sebagai senyawa pengikat utama (Tumpu & Mabui, 2022). Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan pozzolan alami seperti abu sekam padi, fly ash, atau bahan berbasis tanah laterit dapat memberikan peningkatan signifikan terhadap durabilitas dan kekuatan tekan mortar maupun beton geopolimer (Rangan et al., 2023; Rangan et al., 2021). Studi sebelumnya juga menegaskan bahwa kombinasi GCSA sebesar 3–4% mampu meningkatkan kuat tekan beton secara bertahap setelah perawatan selama 28 hari, menunjukkan potensi material ini sebagai pengganti sebagian semen komersial (Parea et al., 2023).

Selain meningkatkan aspek mekanik, pemanfaatan GCSA memberikan nilai tambah dari sisi lingkungan dan ekonomi sirkular. Limbah cangkang kerang hijau yang sebelumnya menjadi polutan pesisir dapat diolah menjadi bahan tambahan konstruksi yang bernilai tinggi dan ramah lingkungan (Irianto et al., 2023). Pendekatan ini sejalan dengan upaya global untuk mengurangi ketergantungan terhadap sumber daya non-terbarukan serta mendukung praktik konstruksi rendah emisi karbon (Rangan et al., 2023; Mansyur et al., 2021). Integrasi GCSA dalam beton berpori tidak

hanya memperbaiki karakteristik porositas dan permeabilitas material, tetapi juga memperkuat kontribusi sektor konstruksi terhadap pembangunan berkelanjutan dan mitigasi dampak lingkungan (Tumpu & Mabui, 2022). Dengan demikian, pemanfaatan abu cangkang kerang hijau dapat menjadi salah satu strategi konkret untuk mewujudkan material konstruksi hijau di masa depan.

2. MATERIAL DAN METODE

Agregat

Secara sederhana, agregat merupakan komponen utama dalam campuran beton yang menempati porsi terbesar dari total volume material (Rangan et al., 2023). Agregat kasar atau kerikil adalah batu pecah dengan ukuran butir antara 4,76 mm hingga 150 mm yang berfungsi sebagai pengisi utama dalam struktur beton (Parung et al., 2023). Bahan ini dapat berasal dari batuan alami yang mengalami pelapukan atau dari hasil pemecahan batu menggunakan mesin penghancur (Tumpu & Mabui, 2022). Dalam penelitian ini, agregat diperoleh dari tambang yang berlokasi di aliran Sungai Sa'dan, tepatnya di Desa Lampan, Kecamatan Sa'dan, Kabupaten Toraja Utara.

Karakteristik fisik agregat yang digunakan diuji di laboratorium dengan mengacu pada metode pengujian yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk memastikan kesesuaian material terhadap syarat teknis beton struktural (ACI Committee, 2010). Pengujian meliputi pemeriksaan gradasi, berat jenis, penyerapan air, dan kebersihan agregat kasar yang menjadi faktor penentu mutu beton (Mansyur et al., 2021). Hasil uji karakteristik menunjukkan bahwa semua parameter agregat kasar memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan untuk bahan pembentuk beton berkualitas tinggi (Rangan et al., 2021; Irianto et al., 2023). Hal ini menegaskan bahwa material agregat lokal dari Sungai Sa'dan layak digunakan sebagai komponen utama dalam pembuatan beton berpori yang berkelanjutan.

Tabel 1. Sifat fisik agregat kasar

No.	Jenis pengujian	Standar	Hasil pengujian
1	Kadar lumpur	SNI 03-2847-2002	1,23%
	<u>Berat volume</u>		
2	Berat volume kondisi padat	SNI 03-4804-1998	1,58 kg/m ³
	Berat volume kondisi gembur	SNI 03-4804-1998	1,43 kg/m ³
3.	Kadar air	SNI 03-1971-1990	0,94%
4	Berat jenis curah (Bulk)	SNI 1737-1989	2,55
5	Berat jenis SSD	SNI 1737-1989	2,61
6	Berat jenis nyata (Apparent)	SNI 1737-1989	2,69
7	Absorption	SNI 1737-1989	1,87%

Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada *Tabel 1*, kadar lumpur agregat kasar yang diperoleh dari pabrik pemecah batu di Desa Lampan adalah sebesar 1,23%, masih berada dalam rentang 0,2% hingga 2% sebagaimana ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) (ACI Committee, 2010). Nilai berat isi agregat dalam kondisi padat tercatat sebesar 1,58 g/cm³, sedangkan dalam kondisi lepas sebesar 1,43 g/cm³, keduanya sesuai dengan kisaran standar 1,2–1,9 g/cm³ yang direkomendasikan (Mansyur et al., 2021).

Selain itu, hasil uji terhadap daya serap air, kadar air, berat jenis curah, berat jenis permukaan jenuh kering (SSD), serta berat jenis semu (apparent) juga menunjukkan nilai yang memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh SNI (Rangan et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa agregat kasar yang digunakan memiliki kualitas fisik yang baik dan konsisten dengan spesifikasi bahan untuk campuran beton struktural (Tumpu & Mabui, 2022). Kesesuaian seluruh parameter uji ini memperkuat validitas penggunaan agregat asal Lampan dalam pengembangan beton berpori yang ramah lingkungan dan berdaya tahan tinggi (Parung et al., 2023; Rangan et al., 2021).

Semen

Dalam campuran beton, semen berfungsi sebagai agen pengikat yang menyatukan agregat agar tidak terpisah satu sama lain. Daya lekat yang dihasilkan akan semakin kuat seiring dengan meningkatnya mutu dan kekuatan semen yang digunakan (Neville, 2011). Jenis semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah Semen Portland Tipe I, yang umum dipakai untuk pekerjaan beton struktural karena sifatnya yang serbaguna dan mudah didapat di pasaran (Mehta & Monteiro, 2014). Bahan semen yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari salah satu produsen semen di Indonesia yang telah memenuhi persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI).

Berdasarkan ketentuan SNI 7064:2014 (Badan Standardisasi Nasional, 2014b), Portland Composite Cement (PCC) didefinisikan sebagai semen hidrolik yang dihasilkan melalui penggilingan klinker semen Portland dan gipsum bersama berbagai bahan anorganik tambahan seperti batu kapur, pozzolan, terak tanur tinggi, serta senyawa silikat, dengan total kandungan bahan anorganik berkisar antara 6–35% dari massa total semen komposit. Komposisi tersebut bertujuan untuk meningkatkan daya tahan, kemampuan pengerasan, dan kinerja lingkungan semen dalam berbagai

aplikasi beton berpori maupun beton konvensional (Thomas, 2013; Mindess et al., 2003).

Dengan demikian, karakteristik fisik dan mekanik semen yang digunakan telah sepenuhnya memenuhi standar mutu nasional dan mendukung pencapaian kualitas campuran beton yang diinginkan. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis semen serta pemenuhan persyaratan SNI menjadi langkah awal penting dalam memastikan kinerja material beton yang berkelanjutan dan andal (Kosmatka & Wilson, 2016).

Abu Cangkang Kerang Hijau (GCSA)

Komponen campuran beton pada dasarnya terdiri dari tiga bahan utama, yaitu air, semen, dan agregat, namun dalam praktiknya sering ditambahkan bahan tambahan (additives atau supplementary materials) untuk memodifikasi sifat beton, baik pada kondisi segar maupun setelah mengeras (Mehta & Monteiro, 2014). Salah satu bahan tambahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu cangkang kerang hijau (Green Clam Shell Ash/GCSA) yang kaya akan unsur silika (SiO_2). Abu ini berpotensi berperan sebagai pozzolan alami, karena mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) yang dihasilkan selama proses hidrasi semen untuk membentuk senyawa trikalsium silikat (C_3S), yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan ketahanan beton (Thomas, 2013; Neville, 2011). Analisis kimia menunjukkan bahwa abu cangkang kerang hijau (*Perna viridis* L.) memiliki kandungan silika sebesar 10%–14%, nilai yang sebanding dengan kandungan silika pada mikrosilika buatan (manufactured micro silica), sehingga material ini dapat dimanfaatkan sebagai pengganti sebagian semen (partial cement substitution) dalam pembuatan beton berpori (Mindess et al., 2003). Selain kandungan silika, material ini juga mengandung senyawa titanium silikat yang berfungsi sebagai perekat tambahan dalam pembentukan struktur C_3S yang lebih stabil pada matriks semen (Kosmatka & Wilson, 2016).

Dari sisi lingkungan, pemanfaatan limbah cangkang kerang hijau memberikan nilai tambah ekonomi sekaligus solusi terhadap permasalahan limbah di daerah pesisir. Pertumbuhan populasi kerang yang pesat di kawasan penangkapan ikan berpotensi meningkatkan pendapatan masyarakat lokal, namun limbah cangkang yang menumpuk sering kali mengganggu estetika lingkungan (Ismail et al., 2018). Oleh karena itu, penelitian ini berupaya memanfaatkan abu cangkang kerang sebagai bahan tambahan ramah lingkungan dalam beton berpori, guna mengantikan sebagian semen dan mengurangi jejak karbon dalam industri konstruksi (Chandra & Berntsson, 2002; Mehta, 2001).

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui eksperimen laboratorium yang bertujuan untuk meningkatkan sifat-sifat beton berpori melalui penambahan abu cangkang kerang hijau (Green Clam Shell Ash/GCSA) sebagai bahan tambahan parsial bersama dengan agregat, semen, dan air (Rangan et al., 2023). Setelah seluruh peralatan dan bahan tersedia, dilakukan pemeriksaan awal terhadap karakteristik bahan untuk memastikan kesesuaian dengan standar yang berlaku (ACI Committee, 2010; SNI 7064:2014). Apabila hasil pemeriksaan memenuhi syarat teknis, maka proses dilanjutkan ke tahap perancangan campuran beton (mix design), sedangkan jika tidak, dilakukan pengujian ulang secara lebih rinci guna memperoleh kualitas material yang diinginkan (Rangan et al., 2021).

Proses persiapan abu cangkang kerang hijau (*Perna viridis* L.) diawali dengan pembersihan menyeluruh guna menghilangkan sisa bahan organik, kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari hingga kadar air berkurang (Irianto et al., 2023). Setelah itu, cangkang dibakar pada suhu sedang hingga berubah warna menjadi putih, menunjukkan terjadinya dekomposisi kalsium karbonat ($CaCO_3$) menjadi kalsium oksida (CaO). Proses ini diikuti dengan penumbukan manual atau penggilingan menggunakan grinding mill, kemudian pengayakan menggunakan saringan 200 mesh agar diperoleh ukuran partikel halus yang seragam (Tumpu & Mabui, 2022). Abu hasil pembakaran ini selanjutnya digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton dengan variasi kadar 0%, 2%, dan 4% terhadap berat semen (Rangan et al., 2023).

Setelah proses pencampuran, campuran beton dicetak ke dalam silinder uji berukuran 15 cm × 30 cm. Spesimen uji yang telah mengeras kemudian direndam dalam air untuk proses perawatan (curing) selama 3, 7, 14, 21, dan 28 hari guna memastikan reaksi hidrasi berlangsung optimal (Parung et al., 2023). Total 40 benda uji beton berpori dihasilkan dari tahapan ini. Setelah periode perendaman selesai, spesimen dikeringkan selama 24 jam sebelum dilakukan pengujian kuat tekan (compressive strength test) menggunakan mesin tekan hidrolik (Mansyur et al., 2021). Data hasil pengujian kemudian diolah secara kuantitatif untuk menentukan nilai rata-rata kuat tekan beton pada setiap variasi campuran GCSA, yang selanjutnya digunakan untuk menganalisis hubungan antara kadar abu cangkang kerang hijau dan performa mekanik beton berpori (Rangan et al., 2021).

Kuat Tekan

Kuat tekan (compressive strength) beton didefinisikan sebagai besarnya beban per satuan luas yang, ketika diterapkan melalui mesin tekan, menyebabkan spesimen beton mengalami kerusakan atau pecah (Rangan et al., 2021). Di antara berbagai sifat beton, kuat tekan merupakan indikator paling penting untuk menilai mutu dan kinerja material beton (Neville, 2011). Untuk mencapai kuat tekan yang diinginkan, komposisi campuran beton—termasuk proporsi semen, agregat halus, agregat kasar, dan air—disesuaikan secara optimal (Mehta & Monteiro, 2014).

Kuat tekan beton dipengaruhi secara signifikan oleh rasio air-semen (water-to-cement ratio); peningkatan rasio ini awalnya dapat meningkatkan kelenturan dan kemudahan penggerjaan beton, namun jika terlalu tinggi akan menurunkan kekuatan akhir beton (Mindess et al., 2003). Beton memerlukan jumlah air yang cukup untuk menjalani proses hidrasi kimia dengan sempurna, sehingga terbentuk matriks semen yang kuat dan padat (Kosmatka & Wilson, 2016). Nilai kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan persamaan tertentu, yang memperhitungkan dimensi dan beban maksimum spesimen selama pengujian (Rangan et al., 2023). Gambar 1 menunjukkan peralatan uji kuat tekan yang digunakan dalam penelitian ini untuk menilai kemampuan beton berpori yang menggunakan abu cangkang kerang hijau (GCSA) sebagai bahan tambahan.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Persamaan ini digunakan untuk menghitung kuat tekan beton dengan membagi gaya aksial maksimum (P) terhadap luas penampang (A), sehingga diperoleh nilai $f'c$ yang merepresentasikan kemampuan beton menahan tekanan sebelum terjadi kerusakan (Neville, 2011; Mindess et al., 2003).



Gambar 1. Alat pengujian kuat tekan

Porositas

Salah satu faktor utama yang memengaruhi kekuatan beton adalah porositas, yaitu proporsi rongga atau jumlah isi pori dalam material (Rangan et al., 2023). Beton memiliki struktur kapiler yang tersusun dari pori-pori kecil, yang biasanya terisi oleh air atau udara. Struktur kapiler ini akan tetap ada meskipun air yang digunakan selama pencampuran telah menguap, sehingga menurunkan densitas beton akhir (Neville, 2011). Rongga terbentuk akibat gelembung udara yang muncul selama atau setelah proses pencetakan beton.

Penggunaan air berlebih dibandingkan jumlah yang diperlukan untuk reaksi kimia dengan semen akan menghasilkan adukan yang lebih mudah dikerjakan, namun berpotensi meningkatkan porositas. Proses pengeringan dan reaksi kimia secara alami mengurangi volume semen dan air absolut, sehingga pasta semen kering menempati ruang lebih sedikit dibandingkan pasta yang masih basah (Mindess et al., 2003).

Nilai porositas beton berpori dapat dihitung menggunakan Persamaan 2, yang mengaitkan volume total rongga dengan volume keseluruhan spesimen beton (ACI Committee, 2010; Rangan et al., 2021).

$$P = \left(\frac{Wb - Wk}{vb} \right) \times \left(\frac{1}{\rho_{water}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

P = Porositas (%), yaitu persentase rongga dalam beton

Wb = Massa basah spesimen setelah perendaman (gr)

Wk = Massa kering spesimen (gr)

vb = Volume spesimen beton (cm^3)

ρ_{water} = Massa jenis air (gr/cm^3)

Persamaan ini menghitung proporsi rongga dalam beton dengan membandingkan perbedaan massa basah dan kering spesimen terhadap volume total, sehingga diperoleh nilai porositas yang merefleksikan kemampuan beton berpori menahan atau menghantarkan air (ACI Committee, 2010; Rangan et al., 2021).

Permeabilitas

Permeabilitas beton merujuk pada kemampuan pori-pori dalam beton ringan untuk mengalirkan air (Rangan et al.,

2023). Pasta semen yang mengeras tersusun dari banyak permukaan yang saling terhubung, meskipun jumlah partikel lebih sedikit dibandingkan total luas permukaan partikel. Meskipun viskositas pasta tinggi, air tetap dapat mengalir melalui pori-pori yang saling terhubung. Permeabilitas beton tidak dapat ditentukan secara teoretis, sehingga perlu dilakukan pengujian, salah satunya melalui uji aliran, yang mengukur sejauh mana air dapat melewati sampel beton (ACI Committee, 2010).

Porositas beton menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi permeabilitas. Pemahaman terhadap permeabilitas penting karena beton tidak hanya menahan tekanan tekan dan tarik, tetapi juga melindungi tulang besi dari paparan langsung, yang dapat memicu oksidasi dan korosi (Rangan et al., 2021). Faktor utama yang memengaruhi permeabilitas beton adalah rasio air-semen; rasio tinggi menandakan kelebihan air dalam campuran. Kelebihan air ini meningkatkan kelenturan dan kemudahan pencetakan, namun sebagian akan menguap karena hanya sedikit air yang dibutuhkan untuk proses hidrasi.

Saat air menguap atau keluar dari beton, poro-poro mulai terbentuk dan saling terhubung, membentuk jalur bagi air atau gas dari luar untuk meresap ke dalam beton. Beton dengan permeabilitas tinggi memiliki lebih banyak pori yang saling terhubung, sehingga menurunkan rasio air-semen akan menurunkan permeabilitas dan memperpanjang umur beton (Mindess et al., 2003; Neville, 2011). Selain itu, kondisi lingkungan seperti kelembaban dan suhu juga memengaruhi permeabilitas beton. Gambar 2 memperlihatkan peralatan yang digunakan untuk pengujian permeabilitas dalam penelitian ini.

$$k = 2.3 \frac{aL}{At} \times \left[\log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \right] \quad (3)$$

Keterangan simbol yang digunakan dalam pengujian permeabilitas beton adalah sebagai berikut:

k = Koefisien permeabilitas air (cm/s)

a = Luas penampang tabung (cm²)

L = Tebal spesimen beton (cm)

A = Luas penampang tabung (cm²)

t = Waktu yang dibutuhkan untuk mengalirkan air dari tinggi h_1 ke h_2 (detik)

h_1 = Tinggi permukaan atas pada tabung (cm)

h_2 = Tinggi permukaan bawah pada tabung (cm)

Persamaan ini digunakan untuk menghitung koefisien permeabilitas air beton dengan mengaitkan volume air yang mengalir, waktu, dan dimensi spesimen, sehingga diperoleh indikator kemampuan beton berpori dalam mengantarkan air (ACI Committee, 2010; Rangan et al., 2021).



Gambar 1. Alat uji permeabilitas

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perencanaan Campuran Beton Berpori

Kuat tekan yang diinginkan untuk beton berpori dalam penelitian ini adalah 10 MPa, sesuai dengan pedoman ACI 522R-2010, yang menetapkan bahwa beton berpori memiliki rentang kuat tekan antara 2,8 MPa hingga 28 MPa (ACI Committee, 2010). Dalam perancangan campuran beton berpori ini, tidak digunakan agregat halus, sehingga proporsi agregat halus sebesar 0%. Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan abu cangkang kerang hijau (GCSA) sebagai substitusi parsial semen, dengan penambahan sebesar 2% dan 4% dari berat semen, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2. Spesifikasi bahan yang digunakan dalam campuran beton berpori adalah sebagai berikut:

1. Agregat yang digunakan adalah Tipe 67, tertahan pada ayakan 3/4, 1/2, 3/8, dan 4 inci (Rangan et al., 2023).
2. Berat volume agregat dalam keadaan padat = 1,578 gr/cm³ (1578 kg/m³).
3. Berat volume agregat dalam keadaan longgar = 1,429 gr/cm³ (1429 kg/m³).
4. Absorpsi agregat = 1,23%.
5. Berat jenis agregat = 2,61.
6. Berat jenis semen = 3,65 (Rangan et al., 2021).

Informasi ini menjadi dasar untuk perancangan campuran beton berpori yang konsisten, baik untuk spesimen kontrol maupun untuk spesimen dengan penambahan GCSA, sehingga dapat dianalisis efek substitusi parsial terhadap kuat tekan, porositas, dan permeabilitas beton.

Tabel 2. Rancangan campuran beton berpori

No.	Material	Berat (kg)		
1	Agregat kasar	9,09	9,09	9,09
2	Semen Portland komposit	1,86	1,82	1,79
3	Air	0,56	0,56	0,56
4	Abu cangkang kerring hijau (GCSA)	0%	2%	4%
		0,000	0,037	0,074

Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton berpori dengan dan tanpa tambahan abu cangkang kerang hijau (GCSA) dilakukan menggunakan spesimen silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm (Rangan et al., 2023). Uji kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, dan nilai yang diperoleh merupakan rata-rata dari tiga spesimen untuk setiap perlakuan. Hasil pengujian kuat tekan untuk seluruh variasi spesimen disajikan pada Tabel 3.

Berdasarkan data, beton berpori tanpa tambahan memiliki kuat tekan rata-rata sebesar 9,06 MPa, 9,34 MPa, 10,33 MPa, 10,62 MPa, dan 10,76 MPa pada umur 3, 7, 14, 21, dan 28 hari, menunjukkan peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur perawatan (Rangan et al., 2021). Sementara itu, beton berpori dengan penambahan 4% GCSA menunjukkan kuat tekan rata-rata 10,76 MPa, 11,04 MPa, 11,61 MPa, 12,88 MPa, dan 14,58 MPa pada umur yang sama, yang juga meningkat hingga 28 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan GCSA meningkatkan kuat tekan beton berpori dibandingkan dengan spesimen kontrol tanpa tambahan.

Tabel 3. Hasil uji kuat tekan beton berpori

Tipe beton	Kuat tekan (MPa)				
	3 hari	7 hari	14 hari	21 hari	28 hari
Tanpa GCSA	9,06	9,34	10,33	10,62	10,76
Dengan GCSA 2%	10,56	10,76	11,04	12,18	12,88
Dengan GCSA 4%	10,76	11,04	11,61	12,88	14,58

Berdasarkan Tabel 3, kuat tekan rata-rata beton berpori pada umur 28 hari sebesar 9,16 MPa untuk spesimen tanpa penambahan abu cangkang kerang hijau (GCSA) (Rangan et al., 2023). Untuk beton berpori yang ditambahkan 2% GCSA, kuat tekan rata-rata meningkat menjadi 10,2 MPa, sedangkan untuk penambahan 4% GCSA, nilai rata-rata mencapai 10,95 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa setelah 28 hari, penambahan 2% dan 4% GCSA meningkatkan kuat tekan beton berpori sebesar 33,33% dan 20,20% dibandingkan spesimen kontrol tanpa GCSA. Temuan ini menegaskan bahwa GCSA sebagai substitusi parsial semen memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan performa mekanik beton berpori (Rangan et al., 2021; Mansyur et al., 2021).

Porositas

Pengujian porositas beton berpori dilakukan menggunakan spesimen silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, baik untuk beton tanpa maupun dengan tambahan abu cangkang kerang hijau (GCSA) (Rangan et al., 2023). Prosedur pengujian porositas dijelaskan pada Tabel 4. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton tanpa penambahan GCSA memiliki porositas rata-rata 3,185% pada umur 28 hari. Dengan penambahan 2% GCSA, porositas rata-rata menurun menjadi 2,435%, sedangkan penambahan 4% GCSA menghasilkan porositas 2,375%.

Penurunan nilai porositas ini menunjukkan bahwa semakin tinggi fraksi bahan tambahan yang digunakan, semakin sedikit jumlah pori dalam beton berpori. Hal ini terjadi karena interaksi beton dengan abu cangkang kerang hijau memperbaiki struktur pori, sehingga meningkatkan kepadatan beton dan mengurangi rongga internal (Rangan et al., 2021; Mansyur et al., 2021). Temuan ini menegaskan bahwa GCSA tidak hanya meningkatkan kekuatan beton, tetapi juga memperbaiki karakteristik fisik internal dengan menurunkan porositas.

Tabel 4. Hasil uji porositas beton berpori dengan GCSA pada umur 28 hari

Kode benda uji	Umur beton (Hari)	Kandungan GCSA (%)	Porositas (%)	Rata-rata porositas (%)
BN 1	28	0	3,53	3,185
BN 2			2,84	
BN 1		2	2,29	2,435

BN 2			2,58	
BN 1			2,34	
BN 2		4	2,41	2,375

Permeabilitas

Pengujian permeabilitas beton berpori dilakukan menggunakan spesimen silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm, baik tanpa tambahan maupun dengan penambahan abu cangkang kerang hijau (GCSA) yang hasil pengujinya diperlihatkan pada Tabel 5 (Rangan et al., 2023). Uji dilakukan pada spesimen yang telah dirawat selama 28 hari, dan hasil pengujian laboratorium disajikan pada Tabel 5. Hasil menunjukkan bahwa beton berpori tanpa penambahan GCSA memiliki permeabilitas rata-rata 6,06 mm/detik. Dengan penambahan 2% GCSA, nilai permeabilitas menurun menjadi 5,62 mm/detik, dan dengan 4% GCSA, menurun lebih lanjut menjadi 5,23 mm/detik.

Perbandingan hasil uji menunjukkan penurunan permeabilitas yang konsisten seiring peningkatan fraksi GCSA, yaitu 6,74%, 13,70%, dan 15,35% dibandingkan beton kontrol tanpa tambahan. Penurunan ini terjadi karena interaksi beton berpori dengan abu cangkang kerang hijau mengurangi jumlah dan keterhubungan pori, sehingga mengurangi laju aliran air melalui beton (Rangan et al., 2021; Mansyur et al., 2021). Temuan ini menegaskan bahwa penggunaan GCSA tidak hanya meningkatkan kekuatan beton, tetapi juga memperbaiki karakteristik fisik internal dengan menurunkan porositas dan permeabilitas.

Tabel 5. Hasil uji permeabilitas beton berpori dengan GCSA pada umur 28 hari

Kode benda uji	Umur beton (Hari)	Kandungan GCSA (%)	Permeabilitas (mm/second)	Rata-rata permeabilitas (mm/second)
BN 1	28	0	5,60	6,06
BN 2			6,52	
BN 1	28	2	5,90	5,62
BN 2			5,33	
BN 1	28	4	5,38	5,23
BN 2			5,08	

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan beberapa hal terkait kelayakan **abu cangkang kerang hijau (GCSA)** sebagai substansi parsial semen:

1. Kuat tekan beton berpori meningkat seiring bertambahnya umur perawatan dan penambahan GCSA. Beton tanpa penambahan GCSA memiliki kuat tekan rata-rata 9,06 MPa pada umur 3 hari, 9,34 MPa pada 7 hari, 10,33 MPa pada 14 hari, 10,62 MPa pada 21 hari, dan 10,76 MPa pada 28 hari (Rangan et al., 2023). Penambahan 2% GCSA meningkatkan kuat tekan rata-rata menjadi 10,56 MPa pada 3 hari, 10,76 MPa pada 7 hari, 11,04 MPa pada 14 hari, 12,18 MPa pada 21 hari, dan 12,88 MPa pada 28 hari. Selanjutnya, beton yang ditambahkan 4% GCSA menunjukkan peningkatan kuat tekan lebih signifikan, yaitu 10,76 MPa pada 3 hari, 11,04 MPa pada 7 hari, 11,61 MPa pada 14 hari, 12,88 MPa pada 21 hari, dan 14,58 MPa pada 28 hari (Rangan et al., 2021; Mansyur et al., 2021).
2. Porositas dan permeabilitas beton berpori menurun seiring peningkatan persentase GCSA. Beton tanpa penambahan GCSA memiliki porositas rata-rata 3,185% pada 28 hari. Dengan penambahan 2% GCSA, porositas menurun menjadi 2,435%, sedangkan dengan 4% GCSA, porositas lebih rendah lagi, yaitu 2,375% (Rangan et al., 2023). Permeabilitas beton berpori pada umur 28 hari tanpa tambahan GCSA rata-rata 6,06 mm/detik, sedangkan dengan 2% GCSA, nilai rata-ratanya menurun menjadi 5,62 mm/detik, dan dengan 4% GCSA, menurun lebih lanjut menjadi 5,23 mm/detik (Rangan et al., 2021; Mansyur et al., 2021). Penurunan porositas dan permeabilitas ini menunjukkan bahwa penambahan GCSA meningkatkan kepadatan beton berpori dan mengurangi jalur aliran air melalui material.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee (2010) *ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete*. American Concrete Institute, USA.
 Badan Standardisasi Nasional (BSN) (2014b) *SNI 7064:2014 – Semen Portland Komposit*. Jakarta: BSN.
 Chandra, S. & Berntsson, L. (2002) *Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications*. Norwich: Noyes Publications.
 Irianto, T., Tumpu, M., Mabui, D.S., Rochmawaty, R. & Sila, A.A. (2023) ‘Potential of Pyrolyzing Mixed Polyethylene Terephthalate and Polypropylene Plastic Wastes for Utilization in Asphalt Binder’, *Annales de*

- Chimie - Science des Matériaux*, 47(3), pp. 133–140.
- Ismail, M.A., Jaya, R.P., Ahmad, K.A. & Majid, Z.A. (2018) ‘Potential use of waste seashells as a partial cement replacement in concrete’, *Construction and Building Materials*, 190, pp. 672–682.
- Kosmatka, S.H. & Wilson, M.L. (2016) *Design and Control of Concrete Mixtures*. 16th ed. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Mansyur, Amiruddin, A. A., Parung, H., Tjaronge, M. W. & Tumpu, M. (2021) ‘Utilization of sea water to production of concrete in terms of mechanical behavior’, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 921, 012068.
- Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M. (2014) *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education.
- Mehta, P.K. (2001) *Reducing the Environmental Impact of Concrete*. Concrete International, 23(10), pp. 61–66.
- Mindess, S., Young, J.F. & Darwin, D. (2003) *Concrete*. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- Neville, A.M. (2011) *Properties of Concrete*. 5th ed. Harlow: Pearson Education.
- Parung, H., Tumpu, M., Tjaronge, M. W., Amiruddin, A. A., Walenna, M. A. & Mansyur (2023) ‘Crack pattern of lightweight concrete under compression and tensile test’, *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, 47(1), pp. 35–41.
- Rangan, P. R., Tumpu, M., Caroles, L. & Mansyur (2021) ‘Compressive strength of high-strength concrete with cornice adhesive as a partial replacement for cement’, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 871, 012064.
- Rangan, P. R., Tumpu, M., Mansyur & Mabui, D. S. (2023) ‘Assessment of fly ash-rice straw ash-laterite soil based geopolymer mortar durability’, *Civil Engineering Journal*, 9(6).
- Rangan, P.R., Irmawaty, R., Tjaronge, M.W., Amiruddin, A.A., Bakri, B. & Tumpu, M. (2021) ‘The Effect of Curing on Compressive Strength of Geopolymer Mortar Made Rice Straw Ash, Fly Ash and Laterite Soil’, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 921, 012009.
- Rangan, P.R., Tumpu, M., Mansyur & Mabui, D.S. (2023) ‘Assessment of Fly Ash-Rice Straw Ash-Laterite Soil Based Geopolymer Mortar Durability’, *Civil Engineering Journal*, 9(6).
- Thomas, M.D.A. (2013) *Supplementary Cementing Materials in Concrete*. Boca Raton: CRC Press.
- Tumpu, M. & Mabui, D. S. (2022) ‘Effect of hydrated lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) to compressive strength of geopolymer concrete’, *AIP Conference Proceedings*, 2391, 070011.