

Pengaruh Penggunaan Serbuk Canggang Ale-Ale Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi Paving Block

Muhammad Rafli Mahendra¹, Suratmin², Firmanilah Kamil^{3*}

^{1,2,3*}Teknologi Rekayasa Konstruksi Jalan dan Jembatan, Teknik Sipil dan Pertambangan, Politeknik Negeri Ketapang

³firmanilahkamil@politap.ac.id*

Abstract

Ketapang Regency is widely known for its ale-ale clam (*Meretrix sp.*) commodity, yet high consumption rates generate a massive amount of hard shell waste that remains underutilized and pollutes the environment. Concurrently, conventional paving block production continuously exploits natural fine aggregates on a massive scale. This experimental study aims to analyze the effect of utilizing ale-ale shell waste as a partial substitution for fine aggregate on the compressive strength and water absorption characteristics of paving blocks based on the SNI 03-0691-1996 standard. The reference mixture proportion used was 1 Cement : 4 Sand (by volume) with variation rates of ale-ale shell substitution at 0% (normal), 5% (Variation I), 10% (Variation II), and 15% (Variation III). A total of 48 samples were tested to evaluate the compressive strength at 7, 14, and 28 days, as well as water absorption at 28 days. The results indicated that the optimum compressive strength growth was achieved by Variation II (10% ale-ale shell), reaching 17.23 MPa at 28 days, which significantly increased compared to the normal sample at only 14.06 MPa. Conversely, increasing the shell content to 15% in Variation III drastically reduced the compressive strength to 10.78 MPa. In terms of physical testing, Variation II (10%) recorded the lowest and most dense water absorption percentage of 9.83%. The water absorption characteristics of other variations exceeded the threshold, measuring at 10.32% (normal), 10.75% (Variation I), and 11.26% (Variation III). Based on the SNI 03-0691-1996 specification, only Variation II (10%) was declared to satisfy all physical and mechanical feasibility parameters for Grade D paving block classification (non-structural/garden).

Keywords: Ale-Ale Shell, Fine Aggregate, Paving Block, Compressive Strength, Water Absorption.

Abstrak

Kabupaten Ketapang terkenal dengan komoditas kerang ale-ale (*Meretrix sp.*), namun tingginya konsumsi menghasilkan limbah cangkang yang belum dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi mencemari lingkungan. Di sisi lain, produksi paving block secara konvensional masih menggunakan agregat halus alami dalam jumlah besar. Penelitian eksperimental ini bertujuan menganalisis pengaruh penggunaan limbah cangkang ale-ale sebagai substitusi sebagian agregat halus terhadap kuat tekan dan penyerapan air (absorpsi) paving block berdasarkan SNI 03-0691-1996. Proporsi campuran acuan menggunakan perbandingan 1 semen : 4 pasir berdasarkan volume, dengan substitusi serbuk cangkang ale-ale terhadap volume agregat halus sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Sebanyak 48 benda uji digunakan untuk pengujian kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari serta penyerapan air pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Variasi II dengan substitusi 10% cangkang ale-ale menghasilkan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari, yaitu 17,23 MPa, dibandingkan campuran normal sebesar 14,06 MPa. Variasi II juga menghasilkan penyerapan air terendah sebesar 9,83%, sedangkan campuran normal, Variasi I, dan Variasi III masing-masing sebesar 10,32%, 10,75%, dan 11,26%. Berdasarkan hasil pengujian dan kriteria SNI 03-0691-1996 yang digunakan dalam penelitian, Variasi II menunjukkan kinerja terbaik dan memenuhi persyaratan yang ditetapkan untuk paving block Mutu D, sedangkan variasi lainnya tidak memenuhi seluruh persyaratan.

Kata kunci: Canggang Ale-Ale, Agregat Halus, Paving Block, Kuat Tekan, Penyerapan Air.

Diterima Redaksi : 20-07-2026 | Selesai Revisi : 09-08-2026 | Diterbitkan Online : 25-08-2026

1. Pendahuluan

Pesatnya perkembangan pembangunan infrastruktur di Indonesia, khususnya pada sektor penataan kawasan urban dan fasilitas publik, berbanding lurus dengan meningkatnya kebutuhan material bangunan yang efisien dan ramah lingkungan [1] [2]. Salah satu material konstruksi yang paling populer digunakan untuk

perkerasan permukaan tanah adalah paving block atau bata beton [3] [4]. Paving block banyak dipilih karena memiliki berbagai keunggulan, seperti kemudahan dalam proses pemasangan, kemudahan perawatan, variasi estetika bentuk dan warna yang beragam, serta kemampuannya dalam menjaga keseimbangan drainase lingkungan dengan mengizinkan air hujan meresap ke dalam tanah melalui celah sambungannya [5]. Namun,

tingginya volume produksi paving block secara masif memicu lonjakan eksploitasi material tambang galian golongan C, terutama agregat halus berupa pasir alami [6]. Jika eksploitasi pasir sungai atau pasir darat dilakukan secara terus-menerus tanpa adanya kendali, hal tersebut dipastikan akan memicu degradasi lingkungan yang parah, seperti penurunan dasar sungai, erosi daerah aliran sungai, hingga kerusakan ekosistem perairan lokal [7].

Di sisi lain, wilayah pesisir seperti Kabupaten Ketapang di Provinsi Kalimantan Barat memiliki potensi komoditas laut yang sangat melimpah, salah satunya adalah kerang ale-ale (*Meretrix* sp.) yang telah menjadi ikon kuliner khas daerah tersebut [8]. Konsumsi masyarakat dan industri pengolahan makanan terhadap ale-ale menghasilkan produk sampingan berupa limbah keras cangkang kerang dalam jumlah tonase yang sangat besar setiap tahunnya. Selama ini, limbah cangkang ale-ale belum dimanfaatkan secara optimal dan umumnya hanya dibuang begitu saja di tempat pembuangan akhir (TPA) atau ditumpuk di sekitar kawasan pemukiman nelayan. Akumulasi limbah padat ini tidak hanya mengganggu estetika lingkungan kota dan menimbulkan bau yang tidak sedap, tetapi juga berpotensi mencemari ekosistem tanah dan perairan di sekitarnya karena sifat material cangkang yang sangat sulit terdegradasi secara biologi oleh alam.

Melihat adanya dua permasalahan yang kontradiktif tersebut—yaitu tingginya kebutuhan akan material agregat halus untuk industri paving block dan melimpahnya limbah padat cangkang ale-ale—muncul sebuah gagasan solutif untuk mengintegrasikan kedua aspek ini melalui konsep ekonomi sirkular dan material bangunan hijau (*green building material*) [8]. Secara ilmiah, cangkang kerang ale-ale memiliki kandungan kimia yang didominasi oleh kalsium karbonat (CaCO_3) [9]. Karakteristik senyawa ini memiliki kemiripan fisis dengan batuan kapur yang jamak digunakan sebagai bahan pengisi dalam campuran beton atau mortar [10]. Dengan melakukan pemrosesan awal berupa pembersihan, pengeringan, dan penghancuran mekanis, limbah cangkang ale-ale dapat diubah menjadi partikel halus yang berpotensi menggantikan sebagian fungsi pasir alami sebagai agregat halus dalam pembuatan semen-mortar paving block [11].

Meskipun pemanfaatan limbah cangkang kerang untuk campuran beton telah banyak diteliti, karakteristik spesifik dari cangkang ale-ale asal Kabupaten Ketapang yang dikombinasikan dengan pasir lokal seperti pasir Sungai Pawan memerlukan kajian eksperimental yang lebih mendalam [12]. Pengaruh bentuk partikel cangkang yang cenderung pipih dan tajam serta kandungan kimianya terhadap performa hidrasi semen dan ikatan mekanis mortar harus diuji secara terukur [13]. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengujian laboratorium untuk menganalisis performa

mekanis berupa kuat tekan dan sifat fisis berupa daya serap air pada produk paving block komposit ini. Target kualifikasi mutu yang dibidik dalam penelitian ini merujuk pada spesifikasi SNI 03-0691-1996 Mutu D, yang secara fungsional diaplikasikan khusus untuk area non-struktural seperti perkerasan taman kota, jalur pejalan kaki (*pedestrian*), halaman rumah, dan infrastruktur lanskap perkotaan [14].

Formulasi permasalahan utama dalam penelitian ini dititikberatkan pada ketidakpastian efek mekanis dan fisis yang muncul akibat penggantian sebagian agregat halus menggunakan material alternatif berupa limbah cangkang ale-ale. Secara spesifik, masalah yang dikaji diarahkan untuk mengidentifikasi sejauh mana variasi persentase substitusi cangkang ale-ale mampu mempengaruhi fluktuasi nilai kuat tekan paving block ketika diuji pada berbagai fase umur perawatan, yakni pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Di samping parameter kekuatan mekanis, tingginya porositas material akibat bentuk partikel cangkang yang pipih juga memunculkan permasalahan terkait efektivitasnya dalam menahan laju infiltrasi air, sehingga perlu dianalisis pengaruh variasi campuran tersebut terhadap nilai persentase penyerapan air produk pada umur 28 hari [15]. Melalui akumulasi data dari kedua parameter tersebut, permasalahan mendasar yang harus dipecahkan dalam eksperimen ini adalah menentukan titik atau kadar persentase optimum dari substitusi cangkang ale-ale yang mampu menghasilkan performa struktural dan durabilitas terbaik, serta memastikan apakah karakteristik produk akhir tersebut dapat sepenuhnya lulus uji kelayakan teknis yang dipersyaratkan dalam regulasi SNI 03-0691-1996 khususnya untuk klasifikasi Mutu D [16] [17].

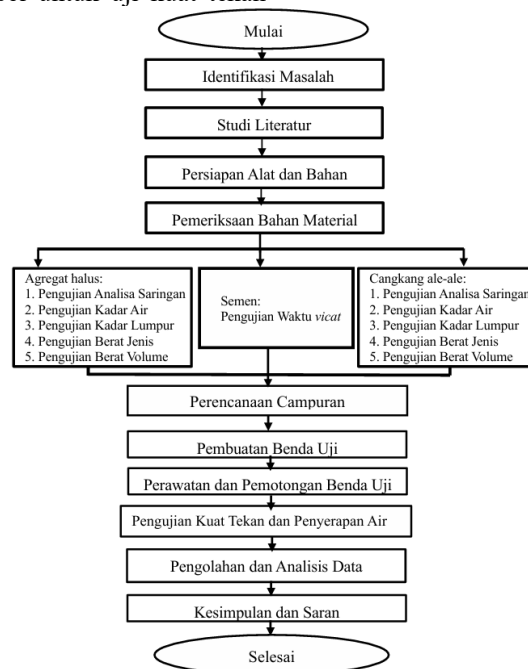
Selaras dengan pokok permasalahan yang telah dirumuskan, tujuan utama dari pelaksanaan penelitian eksperimental laboratorium ini adalah untuk mengukur, menganalisis, dan mengevaluasi secara komprehensif dampak fisis-mekanis dari pemanfaatan limbah cangkang ale-ale sebagai bahan substitusi sebagian pasir alami pada campuran paving block. Secara mendetail, penelitian ini bertujuan untuk memetakan perilaku perkembangan kuat tekan paving block dari waktu ke waktu pada fase umur pengetesan 7, 14, dan 28 hari guna memahami kontribusi senyawa cangkang terhadap proses hidrasi semen [18]. Selain itu, eksperimen ini bertujuan untuk menguji kapabilitas fisis benda uji dalam mereduksi penyerapan air pada umur 28 hari agar durabilitas jangka panjang material dapat diprediksi secara akurat [19]. Melalui komparasi menyeluruh terhadap data laboratorium, sasaran akhir dari penelitian ini adalah untuk menetapkan formula campuran optimum yang paling ideal, sehingga inovasi pemanfaatan limbah cangkang ale-ale ini tidak hanya bernilai ekologis tetapi juga sah secara hukum industri konstruksi karena memenuhi standar nasional SNI 03-0691-1996 Mutu D [20].

2. Metode Penelitian

Penelitian eksperimental ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Politeknik Negeri Ketapang untuk menguji pemanfaatan limbah cangkang kerang ale-ale (*Meretrix sp.*) sebagai substitusi sebagian agregat halus pada pembuatan paving block Mutu D berdasarkan SNI 03-0691-1996. Bahan utama yang digunakan meliputi Semen Portland, air bersih, pasir Sungai Pawan dengan karakteristik Gradasi Daerah 2 (kadar lumpur 0,97% dan kadar air 2,54%), serta cangkang ale-ale yang telah dibersihkan dan dihancurkan lolos saringan pasir. Proporsi campuran acuan yang digunakan adalah perbandingan volume 1 Semen : 4 Pasir, dengan variasi substitusi cangkang ale-ale sebesar 0% (normal), 5% (Variasi I), 10% (Variasi II), dan 15% (Variasi III). Dari variasi ini, diproduksi total 48 sampel berbentuk balok dimensi $20 \times 10 \times 8 \text{ cm}$, yang dialokasikan menjadi 36 sampel untuk uji kuat tekan

(umur 7, 14, dan 28 hari) dan 12 sampel untuk uji penyerapan air pada umur 28 hari.

Proses pembuatan diawali dengan pengadukan kering seluruh material hingga homogen sebelum ditambahkan air, dicetak manual, dan dikeluarkan dari cetakan setelah 24 jam untuk menjalani perawatan (curing) melalui perendaman air. Sebelum pengujian kuat tekan menggunakan Compression Testing Machine, sampel balok dipotong terlebih dahulu menjadi bentuk kubus ukuran $8 \times 8 \times 8 \text{ cm}$. Nilai kuat tekan dihitung berdasarkan rasio beban maksimum terhadap luas penampang benda uji ($f_c = P/A$). Sementara itu, pengujian penyerapan air dilakukan dengan membandingkan selisih berat kondisi jenuh kering permukaan (Saturated Surface Dry/SSD) setelah perendaman 24 jam terhadap berat kering mutlak sampel setelah dikeringkan di dalam oven. Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

a. Karakteristik Fisis Agregat Halus dan Bahan Substitusi

Sebelum melangkah pada proses pencampuran dan pencetakan paving block, dilakukan pengujian karakteristik fisis terhadap agregat halus berupa pasir yang diperoleh dari Sungai Pawan, Kabupaten Ketapang, serta karakteristik awal limbah cangkang ale-ale (*Meretrix sp.*). Pengujian ini sangat krusial untuk memastikan bahwa material yang digunakan memenuhi spesifikasi standar baku konstruksi, mengingat kualitas agregat menyumbang volume terbesar dalam mortar paving block. Berdasarkan hasil analisis saringan (gradasi butiran) yang dilakukan di laboratorium, pasir

Sungai Pawan diklasifikasikan ke dalam Gradasi Daerah 2, yang berarti memiliki karakteristik sebagai pasir agak kasar. Karakteristik gradasi ini dinilai sangat baik untuk campuran beton atau mortar karena variasi ukuran butirannya mampu saling mengisi kekosongan rongga antar-partikel secara optimal.

Selain pengujian gradasi butiran, parameter fisis lain dari pasir Sungai Pawan juga diuji secara ketat. Hasil laboratorium menunjukkan nilai kadar air rata-rata agregat halus adalah sebesar 2,54%. Nilai kadar air ini masuk dalam rentang ideal standar SNI untuk agregat halus, yaitu antara 2,0% hingga 5,0%, sehingga tidak akan mengganggu rasio air-semen yang telah direncanakan. Pengujian kadar lumpur menghasilkan angka sebesar 0,97%, yang mana nilai ini jauh di bawah batas maksimal yang diizinkan oleh SNI sebesar 5%.

Kandungan lumpur yang rendah ini sangat menguntungkan karena lumpur yang berlebihan dapat menyelimuti butiran agregat dan melemahkan ikatan hidrasi antara semen dan pasir.

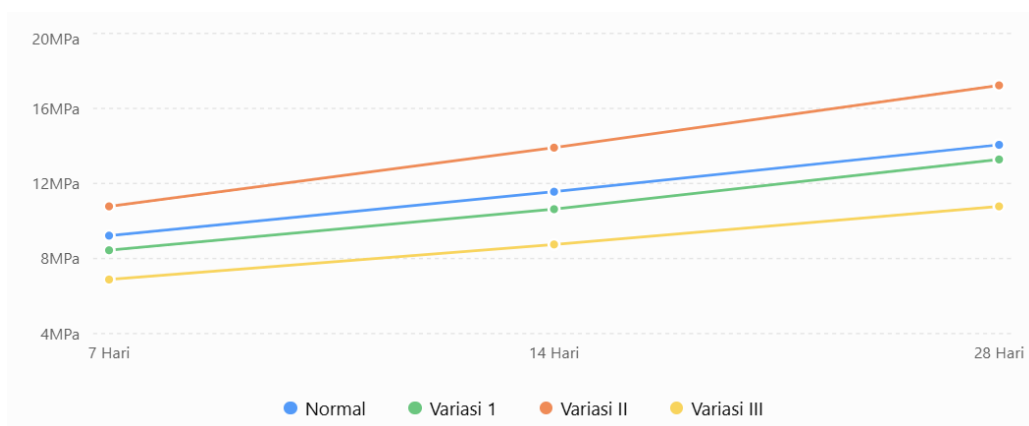
Lebih lanjut, pengujian berat jenis Saturated Surface Dry (SSD) pasir menghasilkan nilai sebesar 2,66 dengan persentase penyerapan air pasir alami sebesar 1,58%. Nilai berat volume rata-rata pasir tercatat sebesar 1,585 kg/liter. Sementara itu, pengujian terhadap Semen Portland yang digunakan menunjukkan waktu ikat awal (initial setting time) berada pada rentang menit ke-105 hingga menit ke-120, yang memberikan waktu pengerjaan (workability) yang cukup bagi mortar sebelum mulai mengeras. Karakteristik dari cangkang ale-ale yang telah dihancurkan juga disesuaikan agar menyerupai gradasi pasir alami, meskipun bentuk

partikelnya cenderung lebih pipih dan memiliki tekstur permukaan yang berbeda dibandingkan dengan pasir sungai.

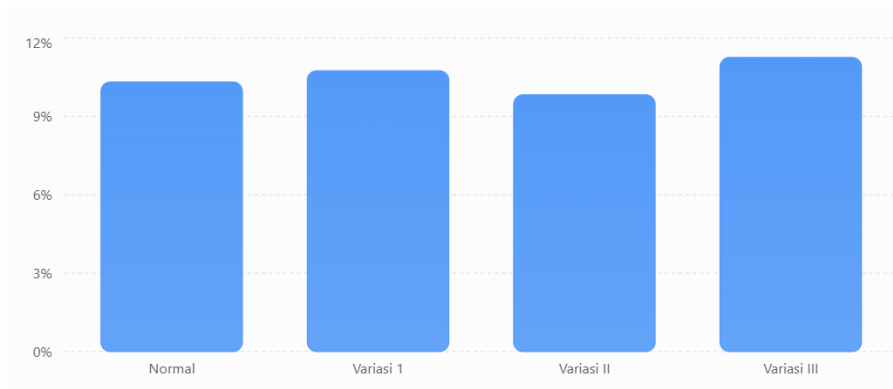
b. Rekapitulasi Data Mekanis dan Fisis Paving Block
Seluruh data hasil pengujian mekanis berupa kuat tekan pada variasi umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari, serta data pengujian fisis penyerapan air (water absorption) pada umur 28 hari telah dirangkum secara sistematis. Data komparatif dari empat variasi campuran, mulai dari sampel kontrol (0%) hingga variasi substitusi cangkang ale-ale sebesar 5%, 10%, dan 15%, disajikan secara terperinci pada Tabel 1. Perbandingan kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 1, sedangkan perbandingan penyerapan air dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 1. Data Hasil Laboratorium Kuat Tekan dan Penyerapan Air Paving Block

Variasi Campuran	Kuat Tekan Rata-rata (Mpa)			Penyerapan Air Rata-rata Umur 28 Hari (%)	Keterangan Standar SNI 03-0691-1996 (Mutu D)
	Umur 7 Hari	Umur 14 Hari	Umur 28 Hari		
Normal	9,22	11,56	14,06	10,32	Tidak memenuhi standar
Variasi I	8,44	10,63	13,28	10,75	Tidak memenuhi standar
Variasi II	10,78	13,91	17,23	9,83	Memenuhi syarat mutu D
Variasi III	6,88	8,75	10,78	11,26	Tidak memenuhi standar



Gambar 1. Perbandingan Kuat Tekan

**Gambar 2.** Perbandingan Penyerapan Air

c. Hasil Pengujian Kuat Tekan Berdasarkan Umur Perawatan (10%), di mana kuat tekan paving block berhasil menyentuh angka 17,23 MPa. Angka ini menunjukkan peningkatan kekuatan sebesar 22,5% jika dibandingkan dengan sampel normal. Namun, penambahan cangkang ale-ale yang lebih masif pada Variasi III (15%) justru berdampak buruk pada kualitas mekanis produk, dengan nilai kuat tekan yang jatuh ke angka 10,78 MPa.

Berdasarkan data yang tertera pada Tabel 1, perkembangan kuat tekan paving block diamati secara berkala pada tiga fase umur beton yang berbeda, yaitu 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Fase ini penting untuk melihat sejauh mana kontribusi serbuk cangkang ale-ale mempengaruhi kecepatan reaksi hidrasi semen. Pada pengujian awal di umur 7 hari, sampel dengan variasi normal (0%) menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 9,22 MPa. Pada variasi substitusi awal yaitu Variasi I (5%), terjadi sedikit penurunan nilai kuat tekan menjadi 8,44 MPa. Namun, lonjakan kekuatan yang signifikan terjadi pada Variasi II (10%), di mana kuat tekan awal pada umur 7 hari mampu mencapai nilai tertinggi sebesar 10,78 MPa. Sebaliknya, pada Variasi III dengan kandungan cangkang ale-ale sebesar 15%, nilai kuat tekan justru merosot tajam ke angka 6,88 MPa, yang merupakan nilai terendah pada fase awal ini.

Memasuki pengujian fase kedua pada umur 14 hari, seluruh variasi benda uji menunjukkan adanya tren peningkatan kekuatan, yang menandakan bahwa proses hidrasi semen berjalan dengan baik selama masa perendaman (curing). Sampel dengan campuran normal (0%) mencatatkan kenaikan kuat tekan menjadi 11,56 MPa. Untuk Variasi I (5%), kuat tekan meningkat menjadi 10,63 MPa, meskipun nilainya masih berada di bawah sampel normal. Hasil yang sangat positif kembali ditunjukkan oleh Variasi II (10%) yang melesat hingga mencapai kuat tekan rata-rata sebesar 13,91 MPa. Pada sisi lain, Variasi III (15%) tetap menunjukkan performa yang tertinggal dengan nilai kuat tekan yang hanya merangkak naik ke angka 8,75 Mpa.

Puncak dari pengujian mekanis ini dilakukan pada masa akhir perawatan benda uji, yaitu pada umur 28 hari, di mana kekuatan semen dianggap telah mencapai kekuatan penuhnya. Pada fase final ini, benda uji normal (0% cangkang ale-ale) menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 14,06 MPa. Penurunan kekuatan terlihat pada Variasi I (5%) yang menghasilkan nilai kuat tekan sebesar 13,28 MPa. Hasil eksperimen yang paling optimal secara definitif ditunjukkan oleh Variasi II

d. Hasil Pengujian Penyerapan Air (Water Absorption) Selain parameter kekuatan tekan, pengujian karakteristik fisis yang sangat menentukan kelayakan komersial dan durabilitas paving block adalah uji penyerapan air (water absorption) yang dilaksanakan tepat pada saat benda uji berumur 28 hari. Pengujian ini mengukur volume pori terbuka yang dapat diakses oleh air dalam struktur paving block. Data laboratorium menunjukkan bahwa sampel paving block dengan variasi normal (0% cangkang ale-ale) memiliki nilai penyerapan air rata-rata sebesar 10,32%. Nilai penyerapan ini mengalami peningkatan yang linier pada Variasi I (5%) yang mencatatkan angka penyerapan air sebesar 10,75%. Kenaikan persentase penyerapan air ini mengindikasikan adanya peningkatan volume rongga pada struktur mortar akibat substitusi material cangkang pada kadar rendah.

Fenomena yang menarik terjadi pada Variasi II, di mana substitusi cangkang ale-ale pada kadar tepat yaitu 10% justru berhasil menekan laju penyerapan air hingga mencapai titik terendah dan paling optimal, yaitu sebesar 9,83%. Penurunan angka penyerapan air ini menjadi bukti konkrit bahwa pada kadar 10%, partikel cangkang ale-ale mampu berdistribusi secara merata dan menutup pori-pori kapiler di dalam paving block. Namun, ketika kadar substitusi ditingkatkan lebih lanjut hingga mencapai 15% pada Variasi III, kemampuan menahan laju air ini hilang sama sekali. Variasi III mencatatkan nilai penyerapan air tertinggi dan paling buruk, yaitu mencapai 11,26%.

Bila hasil pengujian fisis penyerapan air ini dikomparasikan secara langsung dengan regulasi yang tertuang dalam standar nasional SNI 03-0691-1996, batas maksimal penyerapan air yang diizinkan untuk

klasifikasi paving block Mutu D (non-struktural/taman) adalah sebesar 10%. Berdasarkan ambang batas hukum tersebut, maka sampel dengan komposisi normal (10,32%), Variasi I (10,75%), dan Variasi III (11,26%) secara yuridis teknis diklasifikasikan tidak memenuhi standar mutu D karena melebihi ambang batas serapan air yang diizinkan. Dengan demikian, melalui data-data penyerapan air ini, didapatkan kesimpulan bahwa hanya Variasi II (10%) satu-satunya variasi campuran substitusi yang dinyatakan lulus dan memenuhi spesifikasi standar fisik penyerapan air SNI 03-0691-1996.

3.2 Pembahasan

a. Analisis Pengaruh Substitusi Cangkang Ale-Ale terhadap Kuat Tekan

Berdasarkan data eksperimen yang telah disajikan, terlihat jelas adanya korelasi non-linier antara persentase substitusi cangkang ale-ale dengan performa mekanis paving block. Pada dasarnya, peningkatan kuat tekan yang sangat signifikan pada Variasi II (kadar 10%) hingga mencapai nilai maksimal 17,23 MPa dapat dijelaskan melalui dua fenomena fisikokimia. Pertama, cangkang kerang ale-ale (*Meretrix* sp.) secara alami kaya akan kandungan senyawa kalsium karbonat (CaCO_3). Ketika cangkang ini dihancurkan menjadi partikel halus, senyawa tersebut tidak hanya bertindak sebagai pengisi mekanis biasa, tetapi juga dapat memicu efek mikro-filler (pore-filling effect). Partikel-partikel mikro dari cangkang ale-ale mampu menyusup dan mengisi rongga-rongga kapiler atau pori-pori mikroskopis yang terbentuk di antara semen dan agregat kasar (pasir). Terutupnya pori-pori ini meningkatkan densitas atau kepadatan internal dari struktur mortar, yang pada akhirnya meningkatkan kemampuan paving block dalam menahan beban tekan dari luar.

Kedua, bentuk dan tekstur permukaan partikel cangkang ale-ale yang telah dihaluskan memberikan kontribusi unik pada penguncian mekanis (mechanical interlocking) di dalam matriks mortar. Pada kadar optimum 10%, distribusi partikel cangkang tersebar secara homogen, sehingga menciptakan ikatan antarmuka yang kokoh dengan pasta semen. Namun, fenomena penurunan kuat tekan yang drastis pada Variasi III (kadar 15%) menunjukkan adanya batas ambang kejenuhan campuran. Ketika volume cangkang ale-ale terlalu besar, sifat fisik partikel cangkang yang pipih, tajam, dan memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah (lebih rapuh) dibandingkan pasir alami mulai mendominasi campuran. Akibatnya, terjadi penurunan homogenitas adonan, di mana pasta semen tidak lagi mampu menyelimuti seluruh permukaan agregat secara sempurna. Hal ini memicu terbentuknya zona transisi antarmuka (interfacial transition zone) yang lemah dan rentan mengalami keretakan dini saat menerima beban uji tekan.

b. Analisis Mekanisme Porositas dan Penyerapan Air

Karakteristik penyerapan air (water absorption) pada produk mortar seperti paving block merupakan indikator langsung dari tingkat porositas atau keberadaan rongga udara di dalam struktur material tersebut. Hasil pengujian menunjukkan pola yang konsisten dan berbanding terbalik dengan nilai kuat tekan, di mana Variasi II (10%) memiliki tingkat penyerapan air terendah (9,83%) sekaligus kekuatan tertinggi. Keberhasilan Variasi II dalam menekan laju penyerapan air di bawah ambang batas maksimal SNI (10%) membuktikan bahwa pada proporsi ini, cangkang ale-ale bekerja efektif memutus kontinuitas saluran kapiler di dalam beton. Sedikitnya jumlah pori yang saling terhubung (interconnected pores) membuat air sulit mengintrusi ke dalam bagian terdalam paving block, sehingga meningkatkan durabilitasnya terhadap cuaca ekstrem maupun kelembaban.

Sebaliknya, pada sampel kontrol (0%), Variasi I (5%), dan Variasi III (15%), tingkat penyerapan airnya melampaui batas standar 10%. Pada kadar substitusi yang terlalu rendah (5%), jumlah mikro-filler dari cangkang ale-ale belum cukup untuk menutup pori-pori alami yang terbentuk akibat penguapan air bebas saat proses pengerasan. Sementara itu, pada kadar substitusi yang terlalu tinggi (15%), struktur internal paving block justru menjadi sangat porus. Hal ini disebabkan oleh penurunan tingkat pengerjaan (workability) adonan mortar. Bentuk partikel cangkang ale-ale yang pipih cenderung menyerap air campuran lebih banyak pada saat pengadukan fasa basah. Ketika paving block mengering dan menjalani proses curing, air yang terjebak di dalam partikel cangkang tersebut menguap dan meninggalkan rongga-rongga udara makro (macro-pores). Keberadaan rongga-rongga berskala besar inilah yang menjadi jalur cepat bagi air eksternal untuk meresap kembali, sehingga nilai penyerapan air meningkat tajam hingga mencapai 11,26%.

c. Relevansi Terhadap Standar SNI 03-0691-1996 Mutu D

Apabila seluruh hasil pengujian dikonformasikan dengan regulasi teknis SNI 03-0691-1996, paving block contoh uji ini dirancang untuk target kualifikasi Mutu D. Berdasarkan acuan normatif tersebut, spesifikasi teknis minimal untuk Mutu D adalah memiliki nilai kuat tekan rata-rata minimal sebesar 8,5 MPa (dengan nilai minimal mutlak per sampel sebesar 7,5 MPa) dan persentase penyerapan air maksimal sebesar 10%. Penggunaan paving block Mutu D ini secara fungsional ditujukan untuk area non-struktural yang tidak dilewati kendaraan bermotor, seperti perkerasan jalur pejalan kaki (pedestrian), taman kota, halaman rumah, dan infrastruktur lanskap sejenisnya.

Jika ditinjau hanya dari aspek kuat tekan, seluruh variasi campuran pada umur 28 hari sebenarnya telah melampaui batas minimum 8,5 MPa, di mana Variasi III sebagai nilai terendah sekalipun masih berada di angka

10,78 MPa. Namun, pengujian fisis penyerapan air bertindak sebagai parameter eliminasi yang ketat. Sampel normal (10,32%), Variasi I (10,75%), dan Variasi III (11,26%) secara hukum industri dinyatakan gugur atau tidak layak diaplikasikan sebagai Mutu D karena strukturnya yang terlalu porus akan membuat paving block cepat berlumut, rapuh, dan hancur akibat pelapukan air dalam jangka panjang. Oleh sebab itu, ketepatan formulasi Variasi II (10%) menjadi temuan krusial dalam penelitian ini, karena mampu menyeimbangkan parameter mekanis (kuat tekan 17,23 MPa) dan parameter fisis (penyerapan air 9,83%) secara simultan agar sepenuhnya legal dan aman digunakan sesuai standar nasional.

d. Nilai Keberlanjutan Lingkungan dan Potensi Aplikasi Lokal

Dari perspektif ekologis dan ekonomi sirkular, pemanfaatan limbah cangkang kerang ale-ale dalam industri manufaktur bahan bangunan berskala lokal memiliki prospek yang sangat menjanjikan. Kabupaten Ketapang yang secara geografis memiliki wilayah pesisir menghasilkan limbah cangkang ale-ale dalam jumlah tonase yang masif dari sektor domestik maupun industri kuliner. Selama ini, limbah keras tersebut hanya berakhir di tempat pembuangan akhir atau mencemari estetika lingkungan pesisir karena sifatnya yang sulit terdegradasi secara alami.

Dengan mengadopsi teknologi substitusi agregat sebesar 10% ini, industri pembuatan paving block lokal tidak hanya dapat menekan biaya pengadaan bahan baku pasir sungai Pawan, tetapi juga berkontribusi langsung pada reduksi limbah padat daerah. Produk paving block berbasis edisi cangkang ale-ale ini menawarkan solusi material bangunan hijau (green building material) yang bernilai ekonomis tinggi, estetis, dan memiliki ketahanan mekanis yang bersaing untuk penataan kawasan ruang terbuka hijau (RTH) di wilayah Kabupaten Ketapang.

4. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh rangkaian hasil pengujian laboratorium dan analisis mendalam yang telah dilakukan terhadap paving block dengan campuran limbah cangkang kerang ale-ale (*Meretrix* sp.) sebagai pengganti sebagian agregat halus, maka dapat diambil beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

Penambahan limbah cangkang ale-ale memberikan pengaruh yang fluktuatif namun signifikan terhadap karakteristik mekanis kuat tekan paving block seiring dengan bertambahnya umur perawatan (curing) dari 7, 14, hingga 28 hari. Nilai kuat tekan tertinggi pada semua umur pengujian secara konsisten dicapai oleh Variasi II dengan kadar substitusi cangkang ale-ale sebesar 10%, yang menghasilkan kuat tekan puncak sebesar 17,23 MPa pada umur 28 hari. Nilai ini menunjukkan peningkatan kekuatan mekanis yang nyata dibandingkan

dengan sampel paving block normal (0% cangkang ale-ale) yang hanya mencapai 14,06 MPa. Sebaliknya, penambahan cangkang ale-ale pada kadar yang lebih tinggi seperti pada Variasi III (15%) justru menurunkan performa mekanis secara drastis hingga menyentuh angka 10,78 MPa, akibat penurunan homogenitas campuran dan melemahnya zona transisi antarmuka mortar.

Karakteristik fisis penyerapan air (water absorption) paving block pada umur 28 hari menunjukkan tren yang berbanding terbalik dengan nilai kuat tekannya, di mana variasi optimum kembali ditunjukkan oleh Variasi II (10% cangkang ale-ale) dengan persentase penyerapan air terendah sebesar 9,83%. Pada proporsi optimum ini, partikel cangkang ale-ale berfungsi efektif sebagai micro-filler yang menutup pori-pori kapiler dalam mortar. Sebaliknya, pada variasi lainnya, nilai penyerapan air meningkat melebihi batas yang diizinkan, yaitu sebesar 10,32% pada sampel normal, 10,75% pada Variasi I (5%), dan mencapai titik tertinggi sebesar 11,26% pada Variasi III (15%) akibat terbentuknya rongga-rongga udara makro di dalam struktur bata beton.

Ditinjau dari aspek kelayakan terhadap regulasi nasional SNI 03-0691-1996 untuk kualifikasi paving block Mutu D (perkerasan non-struktural/taman), hanya Variasi II (substitusi 10% cangkang ale-ale) yang secara yuridis dan teknis dinyatakan lulus dan memenuhi seluruh parameter standar. Walaupun seluruh variasi campuran berhasil melampaui ambang batas minimum kuat tekan Mutu D (8,5 MPa), namun sampel normal, Variasi I, dan Variasi III dinyatakan gugur karena gagal memenuhi syarat fisis penyerapan air yang diwajibkan berada di bawah batas maksimal 10%. Oleh karena itu, komposisi substitusi sebesar 10% merupakan kadar paling ideal untuk menghasilkan material bangunan hijau yang awet dan kokoh.

Daftar Rujukan

- [1] Baihaqi, M. G., Kusuma, R. S. B. G., Ozora, F. A., & Ajesbiah, T. R. (2025). Transformasi penataan ruang daerah: Tantangan dan peluang menuju pembangunan berkelanjutan. *Jurnal Regional Planning*, 7(2), 82-91.
- [2] Sutjipto, P. B., Al Mauludy, Y. R., Aulia, A. Z., & Susanti, W. D. (2023). Study Of Implementation Of Sustainable Architecture Concept In Surabaya Intiland Tower Office Building. *ADBE*, 3(1), 26-38.
- [3] Yudistira, F. D., Annisa, A., & Ilham, I. (2024). Penggunaan Limbah Masker Sebagai Campuran Bahan Pembuatan Paving Block. *Jurnal Daur Lingkungan*, 7(1).
- [4] Arifky, M. I. (2025). Pengaruh Intensitas Curah Hujan Tinggi Terhadap Infiltrasi Air Pada Lahan Dengan Tutupan Permeable. *Journal of Syntax Literate*, 10(11).
- [5] Amir, A., Idris, F., Syafriani, M., & Febrianti, D. (2024). Inovasi Paving Block Menggunakan Limbah Plastik dan Fly Ash Menuju Kabupaten Aceh Barat Sustainable Goals. *SULUAH BENDANG: JURNAL ILMIAH PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT* Учредител: Universitas Negeri Padang, 24(3), 262.

- [6] Azuga, N. A., Zahra, Z. A., Andini, A. S., Fauzan, I., Khaira, A. U., Ilahi, I., ... & Nur, M. I. (2025). Review dampak penambangan pasir laut terhadap dinamika abrasi garis pantai di kawasan pesisir Indonesia. *Jurnal Riset Kelautan Tropis (Journal Of Tropical Marine Research)(J-Tropimar)*, 7(1), 53-67.
- [7] Salsabil, R., Wibowo, R. B., & Rahayu, R. (2024). Kerusakan ekosistem akibat penambangan pasir di kawasan Gunung Merapi Kabupaten Sleman, Yogyakarta. *Jurnal Ekologi, Masyarakat dan Sains*, 5(1), 122-129.
- [8] Assrorudin, A., Fitriarni, D., Indriawan, R., & Dwiyantri, A. P. (2024). Strategi Pemasaran Stik Ale-Ale (Meretrix Spp) Produksi Kub Wida Mantolo Sebagai Produk Unggulan Kabupaten Ketapang. *Jurnal Teknologi Pangan dan Industri Perkebunan (LIPIDA)*, 4(2), 31-40.
- [9] Lele, I. S. T., Maliwemu, E. U., & Adoe, D. G. (2022, April). Karakterisasi Biomaterial Hidroksiapatit Dari Cangkang Kerang Ale-Ale Pantai Oesapa Kota Kupang. In *Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia* (Vol. 1, No. 1, pp. 56-62).
- [10] Aliviyanti, D., Setyawan, F. O., Fadhillianto, M. F., Balqis, T. H. A., Achmad, G., Winanda, N. F., ... & Ratri, A. T. D. N. (2026). Greenshellution: Inovasi Pengolahan Limbah Cangkang Kerang Berbasis Ekonomi Sirkular Di Desa Pasinan, Kabupaten Pasuruan, Indonesia: Greenshellution: Innovation In Environmentally Shellwheat Waste Processing Based On A Circular Economy In Pasinan, Pasuruan Regency, INDONESIA. *Jurnal Pengabdian Perikanan dan Kelautan: Piskarias Ministerium*, 4(1), 40-52.
- [11] Alio, L., Hasim, H., & Baderan, D. W. K. (2025). Literature Review Pemanfaatan Cangkang Kerang Sebagai Absorben Limbah Kimia: Pendekatan Ekologi Lingkungan Untuk Pengelolaan Sumber Daya Alam yang Berkelanjutan. *Jurnal Media Administrasi*, 10(1), 29-41.
- [12] Jamal, M., Sari, A. P., & Haryanto, B. (2024). Analisis Kuat Tekan Beton Dengan Menggunakan Limbah Kulit Kerang Sebagai Substitusi Agregat Kasar Pada Campuran Beton Dengan Menggunakan Bahan Tambah Superplasticizer. *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, 12(2), 107-113.
- [13] Rahmadani, R., Olivia, M., & Wibisono, G. (2026, June). Potensi Abu Cangkang Kerang Lokan dan Crystalline Admixture sebagai Agen Self-Healing pada Mortar: Narrative Review. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS* (pp. 306-312).
- [14] Rahmi, S. A., Lydia, E. N., Purwandito, M., & Lisa, N. P. (2022). Analisis perbandingan mutu eco paving block berbahan baku limbah plastik. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 395.
- [15] Anggreana, V., Alwiyah, S. S., & Rahmadi, Y. (2025). Analisis Kuat Tekan Paving Block Menggunakan Limbah Cangkang Kerang Gonggong Sebagai Substitusi Agregat Halus. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 21(3), 225-236.
- [16] Arafah, S., Bahri, S., Muarif, A., & Islami, N. (2023). Kajian Paving Block Campuran Limbah Plastik Pet Terhadap Kuat Tekan Dengan Standard Sni 03-0691-1996. *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology*, 73(2), 115-119.
- [17] Amran, Y., Permana, A. W., & Kurniawan, S. (2024). Pemanfaatan Limbah Plastik Jenis Polypropylene Sebagai Bahan Utama Paving Block Plastik Dengan Campuran Arang Sekam Padi Mengacu Pada Sni 03-0691-1996. *TAPAK [Teknologi Aplikasi Konstruksi]: Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 13(2), 97-109.
- [18] Rande, Y. S., & Lapian, F. E. (2025, July). Pengaruh Penggunaan Suhu Air Dingin Sebagai Campuran Beton Terhadap Nilai Kuat Tekan Beton Normal. In *Prosiding: Seminar Nasional Teknik Sipil Universitas Yapis Papua* (Vol. 4, No. 1, pp. 395-402).
- [19] Rizky, A. F., Alkhaly, Y. R., Azhari, M., & Rachman, A. (2026). Kuat Tekan dan Absorpsi Air Paving Block Bermaterial Pasir Mutiara Limbah Beton. *Jurnal Rekayasa Sipil dan Teknologi*, 2(1), 75-80.
- [20] Wicaksono, T. M., Mukhlisin, M., Abdillah, R. A., Hudaya, D. W. S., & Setiawan, A. (2026, July). Implementasi Komposisi Dan Mix Desain Mutu Campuran Paving Blok Berdasar Sni 03-0691-1996 Sebagai Perkerasan Diarea Rumah Keranda Makam Kelurahan Ngadigro Kecamatan Mijen Kota Semarang. In *Prosiding Seminar Hasil Penelitian dan Pengabdian Masyarakat* (Vol. 8, No. 01, pp. 139-147).