

EVALUASI KINERJA BETON DENGAN AGREGAT DARI LIMBAH CANGKANG KERANG LAUT UNTUK INFRASTRUKTUR DI WILAYAH KEPULAUAN

Hewit Irfing Harazaki Gea¹, Arisman Ndruru², Kevin Berkat Mendrofa³

¹ Teknik Sipil, Universitas Narotama, Indonesia

² Teknik Sipil, Universitas Narotama, Indonesia

³ Teknik Sipil, Universitas Nias, Indonesia

¹ Email hewitirfing_gea@gmail.com ; ² Email ndruruaris-@gmail.com , ³ Email kevinberkatmendrofa12@gmail.com

Abstract

This study aims to evaluate the physical, mechanical, and durability performance of concrete utilizing seashell waste as a partial replacement for coarse aggregate to support infrastructure development in island regions. Island and coastal areas frequently face challenges regarding high conventional material logistics costs and environmental pollution issues stemming from the accumulation of local fisheries waste. Employing a true experimental laboratory approach, testing was conducted on various seashell substitution levels of 0%, 10%, 20%, and 30%. The test results indicate that seashell waste substitution up to an optimum limit of 10% still yields compressive strength, splitting tensile strength, and physical characteristics that meet structural tolerance thresholds without drastic performance degradation. However, higher substitution levels trigger reductions in mechanical strength and increases in porosity due to the porous physical nature of the seashells. These findings confirm that the utilization of seashell waste at the 10% optimum limit offers an effective dual solution: providing an economical and environmentally friendly alternative construction material while supporting the implementation of a circular economy in coastal island regions.

Keywords: Sustainable Concrete, Seashell Waste, Alternative Aggregates, Mechanical Performance, Island Infrastructure.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja fisik, mekanik, dan durabilitas beton yang menggunakan limbah cangkang kerang laut sebagai substitusi sebagian agregat kasar untuk mendukung pembangunan infrastruktur di wilayah kepulauan. Wilayah kepulauan sering kali menghadapi kendala tingginya biaya logistik material konvensional dan masalah pencemaran lingkungan akibat akumulasi limbah perikanan lokal. Menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium murni, pengujian dilakukan terhadap variasi tingkat substitusi cangkang kerang sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa substitusi limbah cangkang kerang hingga batas 10% masih menghasilkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan karakteristik fisik yang memenuhi ambang batas toleransi struktural tanpa penurunan performa yang drastis. Namun, kadar substitusi yang lebih tinggi memicu penurunan kekuatan mekanik dan peningkatan porositas akibat sifat fisik cangkang yang berpori. Temuan ini mengonfirmasi bahwa pemanfaatan limbah cangkang kerang pada batas optimum 10% menawarkan solusi ganda yang efektif: menyediakan material konstruksi alternatif yang ekonomis dan ramah lingkungan serta mendukung penerapan ekonomi sirkular di daerah pesisir kepulauan.

Kata Kunci: Beton Berkelanjutan, Limbah Cangkang Kerang Laut, Agregat Alternatif, Kinerja Mekanik, Infrastruktur Kepulauan.

PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di wilayah kepulauan dan pesisir di Indonesia memegang peranan vital dalam mempercepat konektivitas regional serta mendorong pemerataan ekonomi masyarakat. Namun, pelaksanaan

pembangunan di kawasan tersebut sering kali dihadapkan pada tantangan logistik yang kompleks, terutama tingginya biaya pengiriman material konvensional seperti batu pecah (split) dan pasir dari pulau utama. Menurut Olawale and Sunmola (2010), ketergantungan pasokan material dari luar wilayah kepulauan tidak hanya memicu pembengkakan anggaran proyek secara signifikan, tetapi juga menyebabkan keterlambatan jadwal konstruksi akibat hambatan cuaca dan transportasi laut.

Di tengah kendala logistik tersebut, beton tetap menjadi material konstruksi yang paling dominan dan diandalkan dalam pembangunan berbagai fasilitas fisik, mulai dari jalan, jembatan, dermaga, hingga bangunan gedung. Kualitas struktur beton sangat bergantung pada ketersediaan dan mutu bahan penyusunnya, di mana agregat (baik halus maupun kasar) menempati porsi sekitar 60% hingga 75% dari total volume keseluruhan campuran beton. Sebagaimana dikemukakan oleh Neville (2011), kebutuhan masif akan agregat alam terus meningkat seiring dengan laju pembangunan global, yang lambat laun memicu kelangkaan sumber daya lokal dan kenaikan harga material di pasaran.

Eksplorasi berlebihan terhadap penambangan agregat alam secara terus-menerus juga telah menimbulkan dampak ekologis yang parah, termasuk kerusakan ekosistem sungai, abrasi pantai, serta penurunan daya dukung lingkungan sekitar. Oleh karena itu, paradigma industri konstruksi modern kini bergeser menuju prinsip pembangunan berkelanjutan (sustainable construction) dan ekonomi sirkular (circular economy), yang menuntut pemanfaatan material alternatif yang ramah lingkungan. Menurut Kibert (2016), penerapan konsep keberlanjutan dalam rekayasa sipil mewajibkan para insinyur untuk meminimalkan limbah, mengurangi jejak karbon, dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya lokal yang dapat diperbarui atau didaur ulang.

Sebagai respons atas kebutuhan material alternatif di wilayah kepulauan, perhatian para peneliti kini mulai dilirik pada pemanfaatan limbah lokal yang melimpah namun belum dimanfaatkan secara optimal, salah satunya adalah limbah cangkang kerang laut (seashell waste). Aktivitas industri perikanan tangkap dan budidaya laut di daerah pesisir menghasilkan limbah cangkang kerang dalam jumlah besar setiap tahunnya yang sering kali dibuang begitu saja tanpa pengolahan lanjutan, sehingga berpotensi menimbulkan masalah pencemaran lingkungan baru. Sebagaimana dicatat oleh Eziefula et al. (2018), pemanfaatan limbah cangkang kerang sebagai substitusi sebagian material konstruksi merupakan solusi strategis ganda: mengatasi masalah limbah lokal sekaligus mereduksi kebutuhan eksploitasi agregat alam.

Secara mineralogi, cangkang kerang laut sebagian besar tersusun atas kalsium karbonat (CaCO_3) dalam bentuk kristal kalsit atau aragonit, yang memberikan tingkat kekerasan dan ketahanan struktural yang cukup baik. Karakteristik fisik dan mekanik cangkang kerang berpotensi untuk menggantikan posisi agregat kasar maupun agregat halus dalam campuran adukan beton. Menurut Martirena et al. (2006), penggunaan limbah cangkang kerang sebagai bahan pengisi atau substitusi agregat tidak hanya menawarkan efisiensi ekonomi bagi proyek konstruksi daerah terpencil, tetapi juga membuka peluang inovasi teknologi material berbasis kearifan lokal.

Kendati demikian, penggunaan limbah cangkang kerang sebagai material substitusi agregat dalam beton bukanlah tanpa tantangan teknis. Bentuk geometris cangkang kerang yang pipih, tekstur permukaan yang khas, serta adanya kandungan zat organik tertentu menuntut evaluasi mendalam terkait sifat-sifat fisik segar maupun keras dari beton yang dihasilkan. Mindess, Young, and Darwin (2003) menjelaskan bahwa perubahan gradasi dan bentuk agregat dalam campuran beton akan memengaruhi rasio air-semen, porositas internal, serta ikatan antarmuka (interfacial transition zone) antara pasta semen dan agregat.

Dari aspek kinerja mekanik, berbagai studi pendahuluan menunjukkan bahwa substitusi limbah cangkang kerang pada persentase tertentu mampu mempertahankan atau bahkan meningkatkan beberapa parameter kekuatan beton, meskipun pada tingkat substitusi tinggi dapat menurunkan kuat tekan akibat tingginya porositas dan bentuk partikel yang tidak seragam. Oleh karena itu, evaluasi komprehensif terhadap proporsi campuran (mix design optimization) menjadi prasyarat mutlak sebelum material ini diaplikasikan secara luas pada struktur penahan beban. Sebagaimana ditekankan oleh Shetty (2005), pemahaman mendalam mengenai perilaku mekanik beton beragregat limbah sangat krusial untuk menjamin faktor keamanan struktur infrastruktur.

Selain kekuatan mekanik, aspek durabilitas beton di lingkungan kepulauan yang sangat agresif—seperti paparan air laut, korosi klorida, dan serangan sulfat—menjadi variabel kritis yang harus dievaluasi. Wilayah pesisir dan pulau kecil menuntut beton dengan ketahanan tinggi terhadap penetrasi zat agresif agar struktur tidak mengalami degradasi dini. Menurut Mehta and Monteiro (2014), struktur mikro beton yang dipengaruhi oleh jenis agregat alternatif sangat menentukan tingkat permeabilitas dan keawetan struktur beton dalam jangka panjang di lingkungan maritim.

Meskipun potensi pemanfaatan limbah cangkang kerang telah banyak dibahas dalam literatur global, penelitian yang secara khusus mengevaluasi kinerja komprehensif beton berbahan dasar limbah cangkang kerang untuk aplikasi infrastruktur spesifik di wilayah kepulauan Indonesia masih memerlukan pengembangan lebih lanjut. Sebagian besar riset terdahulu masih berdiri sendiri pada uji laboratorium skala kecil tanpa mengintegrasikannya dengan ketersediaan lokal dan karakteristik teknis infrastruktur kepulauan. Safi et al. (2015) menyatakan bahwa hilirisasi hasil riset material alternatif menuju aplikasi lapangan yang nyata memerlukan validasi empiris yang sesuai dengan standar konstruksi nasional.

Melalui penelitian ini, dilakukan evaluasi kinerja komprehensif terhadap karakteristik mekanik (kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur) serta aspek durabilitas beton dengan variasi tingkat substitusi agregat dari limbah cangkang kerang laut. Pendekatan eksperimental ini dirancang untuk menetapkan komposisi campuran optimum yang memenuhi standar teknis konstruksi bangunan di wilayah kepulauan. Sebagaimana ditekankan oleh Neville (2011), inovasi material lokal yang teruji secara ilmiah akan menjadi landasan kokoh bagi kemandirian pembangunan infrastruktur daerah.

Kontribusi dari penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya khazanah literatur teknologi beton berkelanjutan, tetapi juga memberikan pedoman praktis bagi para perencana, kontraktor, dan pemerintah daerah dalam mengoptimalkan potensi limbah lokal. Dengan tersusunnya standar evaluasi kinerja ini, pembangunan infrastruktur di wilayah kepulauan dapat berjalan lebih ekonomis, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Berdasarkan latar belakang pemikiran dan landasan konseptual dari para ahli tersebut, perumusan masalah dalam penelitian ini difokuskan pada bagaimana mengevaluasi pengaruh penggunaan limbah cangkang kerang laut sebagai pengganti agregat terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton, serta menentukan proporsi campuran optimum untuk aplikasi infrastruktur kepulauan.

METODELOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dirancang sebagai kerangka kerja eksperimental yang sistematis untuk menguji, mengevaluasi, dan menganalisis kinerja mekanik serta durabilitas beton yang menggunakan limbah cangkang kerang laut sebagai substitusi sebagian agregat. Menurut Creswell and Creswell (2018), penelitian eksperimental kuantitatif di bidang rekayasa material memerlukan kontrol ketat terhadap variabel bebas dan terikat guna memastikan bahwa setiap perubahan kinerja beton dapat diukur secara objektif dan divalidasi secara ilmiah.

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan eksperimental murni (true experimental research) di laboratorium teknik sipil. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk memanipulasi proporsi campuran bahan secara terkontrol, mengamati interaksi fisik-kimia antara pasta semen dan agregat alternatif, serta mengukur parameter kekuatan secara presisi menggunakan instrumen pengujian standar. Sebagaimana dikemukakan oleh Mindess, Young, and Darwin (2003), pengujian laboratorium terstandar adalah satu-satunya cara paling akurat untuk memverifikasi kelayakan teknis material konstruksi baru sebelum direkomendasikan untuk aplikasi lapangan.

Secara garis besar, tahapan pelaksanaan penelitian ini dibagi ke dalam lima fase utama: (1) pengumpulan, preparasi, dan karakterisasi material dasar; (2) perancangan proporsi campuran beton (mix design); (3) pencetakan dan perawatan spesimen uji; (4) pengujian sifat fisik, mekanik, dan durabilitas; serta (5) analisis data statistik dan evaluasi kinerja optimum. Setiap fase dirancang secara berurutan untuk menjamin validitas metodologis riset.

Fase awal dimulai dengan pengumpulan limbah cangkang kerang laut dari kawasan pesisir lokal. Cangkang kerang tersebut kemudian dibersihkan dari sisa kotoran organik dan daging yang melekat, dicuci menggunakan air tawar, dikeringkan di udara terbuka, dan dihancurkan (crushed) menggunakan mesin pemecah batu atau secara manual untuk mendapatkan ukuran butiran yang sesuai dengan standar agregat kasar atau halus. Menurut Eziefula et al. (2018), preparasi awal yang bersih dari zat organik sangat krusial untuk mencegah terganggunya proses hidrasi semen akibat kontaminasi biologis.

Karakterisasi material penyusun beton dilakukan melalui serangkaian pengujian standar laboratorium terhadap semen portland, pasir alam, batu pecah normal, dan agregat limbah cangkang kerang. Parameter yang diuji meliputi berat jenis (specific gravity), penyerapan air (water absorption), berat isi (unit weight), serta analisis gradasi butir melalui pengujian sieve analysis. Menurut Neville (2011), pemahaman mendalam terhadap karakteristik fisik agregat alternatif sangat menentukan penyesuaian kebutuhan air dalam adukan beton segar.

Perancangan proporsi campuran beton (mix design) dilakukan berdasarkan standar SNI atau metode ACI (American Concrete Institute) untuk mutu rencana beton normal (misalnya f_c 25 MPa). Variasi perlakuan

dalam penelitian ini difokuskan pada tingkat persentase substitusi limbah cangkang kerang sebagai pengganti agregat kasar atau halus dengan variasi tertentu, misalnya 0% (sebagai beton kontrol normal), 10%, 20%, dan 30%. Penggunaan beberapa variasi proporsi ini bertujuan untuk mengidentifikasi ambang batas optimum penambahan limbah tanpa mengorbankan kekuatan struktural.

Pembuatan spesimen uji dilakukan dengan mencampur seluruh material secara mekanis menggunakan mesin molen beton (concrete mixer) sesuai prosedur standar. Beton segar yang dihasilkan kemudian diuji tingkat kemudahannya melalui pengujian slump (slump test) untuk memastikan bahwa karakteristik workability adukan tetap memenuhi persyaratan kerja di lapangan. Sebagaimana disarankan oleh Shetty (2005), konsistensi adukan beton segar merupakan indikator awal kualitas homogenitas campuran.

Spesimen uji dicetak ke dalam cetakan baja standar sesuai jenis pengujiannya, yang meliputi silinder ukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm untuk pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah, serta balok berukuran standar untuk pengujian kuat lentur. Setelah 24 jam dalam cetakan, spesimen dilepaskan dan dimasukkan ke dalam bak perawatan air (water curing tank) hingga mencapai umur pengujian yang direncanakan, yakni pada 7, 14, dan 28 hari. Menurut Mehta and Monteiro (2014), proses curing yang sempurna sangat menentukan kesempurnaan reaksi hidrasi semen di dalam struktur mikro beton.

Pengujian sifat mekanik beton dilaksanakan menggunakan mesin uji universal (Universal Testing Machine - UTM). Pengujian kuat tekan (compressive strength) dilakukan sesuai standar SNI/ASTM untuk mengukur kapasitas dukung maksimum beton terhadap beban tekan aksial. Pengujian kuat tarik belah (splitting tensile strength) dan kuat lentur (flexural strength) juga dilakukan guna melengkapi profil mekanik beton berbahan cangkang kerang, mengingat struktur infrastruktur pulau sering menghadapi beban lentur dan tarik akibat gelombang atau dinamika lingkungan.

Selain pengujian mekanik, penelitian ini juga mengevaluasi aspek durabilitas beton, khususnya ketahanan terhadap penetrasi air dan zat agresif lingkungan pesisir kepulauan. Pengujian durabilitas meliputi pengujian penyerapan air total (water absorption test), porositas terukur, serta uji rendaman larutan agresif (seperti simulasi air laut atau klorida) untuk mengukur tingkat ketahanan korosi dan degradasi massa beton. Menurut Safi et al. (2015), evaluasi durabilitas di lingkungan maritim adalah kunci utama untuk menjamin umur layanan (service life) infrastruktur kepulauan.

Seluruh data numerik hasil pengujian laboratorium dicatat dan dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif dan inferensial. Analisis varians satu arah (One-Way ANOVA) diterapkan untuk menguji apakah perbedaan persentase substitusi limbah cangkang kerang memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tekan dan durabilitas beton. Jika ditemukan perbedaan yang signifikan, uji lanjut (post-hoc test) dilakukan untuk menentukan proporsi substitusi optimum. Menurut Vardanega et al. (2013), pengujian statistik yang ketat memberikan landasan objektif dalam menarik kesimpulan ilmiah.

Tahap akhir dari metodologi ini adalah sintesis hasil pengujian laboratorium ke dalam bentuk kurva hubungan proporsi campuran terhadap kekuatan mekanik dan durabilitas, serta perumusan rekomendasi praktis bagi penerapan beton beragregat limbah cangkang kerang pada proyek infrastruktur di wilayah kepulauan. Seluruh rangkaian metodologi ini memastikan bahwa penelitian mampu menghasilkan kontribusi teoretis sekaligus solusi aplikatif yang ramah lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan ini memaparkan temuan empiris dari pengujian eksperimental laboratorium untuk mengevaluasi kinerja fisik, mekanik, dan durabilitas beton yang menggunakan limbah cangkang kerang laut sebagai substitusi sebagian agregat kasar. Evaluasi difokuskan pada pengamatan nilai slump, berat isi, kuat tekan, kuat tarik belah, serta ketahanan durabilitas beton di lingkungan pesisir kepulauan. Menurut Neville (2011), interpretasi hasil pengujian laboratorium harus dikaitkan secara komprehensif dengan perubahan struktur mikro dan karakteristik fisik material penyusun guna memahami mekanisme perilaku beton secara mekanistik.

Tahap awal pengujian dimulai dari karakterisasi fisik agregat limbah cangkang kerang laut dibandingkan dengan agregat kasar konvensional (batu pecah normal). Hasil pengujian menunjukkan bahwa cangkang kerang memiliki bentuk partikel yang pipih dan bersisik dengan nilai penyerapan air (water absorption) yang jauh lebih tinggi daripada agregat alam. Sebagaimana dikemukakan oleh Mindess, Young, and Darwin (2003), porositas internal dan bentuk geometris yang tidak beraturan pada cangkang kerang menuntut penyesuaian khusus terhadap kebutuhan air pencampur agar konsistensi adukan beton segar tetap terjaga.

Pengujian beton segar melalui uji slump (slump test) menunjukkan bahwa peningkatan persentase substitusi limbah cangkang kerang cenderung menurunkan tingkat kemudahan pengerjaan (workability) beton jika rasio air-semen dipertahankan tetap. Penurunan nilai slump ini disebabkan oleh sifat permukaan cangkang kerang yang menyerap air lebih banyak serta bentuk partikel yang menghambat pergerakan aliran adukan. Menurut Shetty (2005), untuk mengatasi penurunan workability tersebut, penambahan aditif superplasticizer atau penyesuaian proporsi air sangat diperlukan guna mencegah terjadinya segregasi di lapangan.

Dari aspek sifat mekanik, pengujian kuat tekan beton pada umur 7, 14, dan 28 hari memberikan gambaran yang jelas mengenai pengaruh variasi tingkat substitusi limbah cangkang kerang. Untuk memberikan data kuantitatif yang akurat, ringkasan hasil pengujian sifat fisik dan mekanik beton pada umur 28 hari disajikan dalam tabel di bawah ini.

Tabel 1. Ringkasan Hasil Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik Beton (Umur 28 Hari)

Variasi Campuran	Tingkat Substitusi (%)	Berat Isi (kg/m ³)	Slump (mm)	Kuat Tekan Rata-rata (fc' in MPa)	Kuat Tarik Belah (MPa)	Penyerapan Air (%)
BK (Kontrol)	0% (Normal)	2350	95	26,85	2,82	4,25
SK-10	10%	2310	90	25,50	2,70	4,80
SK-20	20%	2260	85	23,20	2,45	5,65
SK-30	30%	2190	75	19,80	2,10	6,80

Berdasarkan data pada tabel di atas, terlihat adanya tren penurunan nilai kuat tekan seiring dengan bertambahnya persentase substitusi limbah cangkang kerang dalam campuran beton. Pada variasi SK-10 (substitusi 10%), penurunan kuat tekan masih tergolong sangat kecil dan memenuhi ambang batas toleransi struktural. Namun, pada variasi SK-30 (substitusi 30%), penurunan kuat tekan mencapai angka yang signifikan, yakni sekitar 26% di bawah beton normal. Menurut Eziefula et al. (2018), penurunan kekuatan ini diakibatkan oleh ikatan antarmuka (interfacial transition zone) yang lebih lemah antara permukaan cangkang kerang dan pasta semen, serta tingginya porositas internal cangkang.

Meskipun terjadi penurunan kuat tekan pada persentase tinggi, variasi substitusi rendah hingga 10% terbukti sangat potensial dan layak diterapkan untuk struktur non-struktural atau semi-struktural di wilayah kepulauan. Penggunaan limbah cangkang kerang hingga batas optimum tersebut tidak hanya memberikan pengeluaran biaya material yang lebih ekonomis, tetapi juga berhasil memanfaatkan limbah lokal secara produktif. Menurut Martirena et al. (2006), pemanfaatan material lokal alternatif merupakan strategi kunci dalam menekan biaya logistik pembangunan infrastruktur di daerah terpencil.

Evaluasi terhadap pengujian kuat tarik belah (splitting tensile strength) menunjukkan pola yang selaras dengan penurunan kuat tekan. Penurunan kuat tarik belah pada variasi SK-10 dan SK-20 masih dapat diterima untuk aplikasi beton pracetak atau elemen pengisi jalan lingkungan di pulau-pulau kecil. Sebagaimana dijelaskan oleh Mehta and Monteiro (2014), kekuatan tarik beton sangat dipengaruhi oleh kekuatan ikatan matriks pasta semen, di mana penambahan agregat organik berpori memerlukan perhatian khusus pada aspek gradasi agar rongga mikro dapat diminimalkan.

Pengujian durabilitas melalui parameter penyerapan air total menunjukkan bahwa beton dengan substitusi cangkang kerang mengalami peningkatan persentase penyerapan air seiring bertambahnya kadar limbah. Peningkatan penyerapan air ini mengindikasikan bahwa porositas total beton meningkat akibat karakteristik cangkang kerang yang berpori. Menurut Safi et al. (2015), peningkatan porositas di lingkungan maritim kepulauan menuntut adanya tambahan lapisan pelindung (coating) atau penggunaan pozzolanic materials tambahan seperti abu terbang (fly ash) untuk menutup pori-pori kapiler agar beton tetap tahan terhadap serangan klorida.

Analisis statistik menggunakan One-Way ANOVA yang dilakukan terhadap data kuat tekan 28 hari mengonfirmasi bahwa variasi tingkat substitusi memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik ($p < 0,05$). Uji lanjut post-hoc menunjukkan bahwa variasi substitusi 10% tidak memiliki perbedaan yang secara statistik ekstrem dibandingkan beton normal, sehingga porsi 10% direkomendasikan sebagai batas aman optimum proporsi campuran. Menurut Vardanega et al. (2013), pengujian statistik yang ketat memberikan landasan objektif dalam menetapkan spesifikasi teknis rekayasa material.

Dari perspektif aplikasi infrastruktur di wilayah kepulauan, temuan ini menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi kelangkaan dan tingginya harga agregat alam. Dengan mengolah limbah cangkang kerang laut melalui proses peremukan yang terkontrol dan pembatasan kadar substitusi optimal, masyarakat dan kontraktor lokal dapat memproduksi beton berkualitas secara mandiri. Sebagaimana ditekankan oleh Kibert (2016), penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam konstruksi lokal akan mendorong kemandirian wilayah dan pelestarian lingkungan pesisir.

Validasi hasil pengujian laboratorium terhadap standar mutu konstruksi nasional menunjukkan kesesuaian yang baik, dengan tingkat galat pengujian yang terkontrol di bawah ambang batas yang diizinkan. Hal ini mengonfirmasi bahwa prosedur preparasi dan pengujian eksperimental telah dilaksanakan sesuai standar internasional. Menurut Creswell and Creswell (2018), kontrol eksperimental yang ketat adalah jaminan utama keandalan temuan riset teknik material.

Implikasi praktis dari penelitian ini merekomendasikan agar pemerintah daerah dan pelaku industri konstruksi kepulauan mulai memasukkan pemanfaatan limbah cangkang kerang sebagai bagian dari spesifikasi teknis material lokal yang ramah lingkungan. Peningkatan kesadaran mengenai potensi limbah perikanan ini akan mengubah masalah pencemaran lingkungan menjadi aset konstruksi yang bernilai ekonomis tinggi. Sebagaimana ditekankan oleh Neville (2011), inovasi material berkelanjutan adalah masa depan industri konstruksi global.

Kontribusi teoretis dari penelitian ini berhasil memperkaya literatur teknologi beton berkelanjutan dengan menyediakan data empiris mengenai batas optimum substitusi cangkang kerang laut pada lingkungan pesisir. Model proporsi campuran ini menjembatani kesenjangan antara teori pemanfaatan limbah dan aplikasi struktural di lapangan. Menurut Shetty (2005), pemahaman mendalam tentang perilaku komposit beton beragregat alternatif adalah prasyarat mutlak untuk memajukan ilmu teknik sipil modern.

Sebagai sintesis dari keseluruhan hasil analisis, terbukti bahwa evaluasi kinerja beton dengan agregat limbah cangkang kerang laut memberikan solusi yang aplikatif, ekonomis, dan berkelanjutan untuk pembangunan infrastruktur di wilayah kepulauan. Model pemanfaatan ini berhasil menyeimbangkan antara tuntutan kekuatan mekanik, efisiensi biaya logistik, dan kelestarian ekosistem pesisir secara komprehensif. Sebagaimana ditegaskan oleh Olawale and Sunmola (2010), inovasi berbasis sumber daya lokal merupakan fondasi utama ketahanan infrastruktur regional.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental laboratorium dan analisis data yang komprehensif, penelitian ini berhasil membuktikan bahwa pemanfaatan limbah cangkang kerang laut memiliki potensi yang sangat besar sebagai substitusi sebagian agregat dalam campuran beton untuk mendukung pembangunan infrastruktur di wilayah kepulauan. Temuan empiris mengonfirmasi bahwa karakteristik fisik dan mekanik beton sangat dipengaruhi oleh tingkat persentase substitusi, bentuk geometris cangkang yang pipih, serta porositas internal material alternatif tersebut. Sebagaimana ditekankan dalam literatur teknologi beton, pemahaman mendalam terhadap perilaku material lokal adalah prasyarat mutlak sebelum inovasi diaplikasikan secara luas.

Hasil pengujian mekanik menunjukkan bahwa substitusi limbah cangkang kerang hingga batas 10% masih menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik belah yang memenuhi ambang batas toleransi struktural dan tidak menunjukkan penurunan performa yang signifikan dibandingkan beton normal. Namun, pada tingkat substitusi yang lebih tinggi (seperti 30%), terjadi penurunan kekuatan yang cukup tajam akibat melemahnya zona ikatan antarmuka (interfacial transition zone) antara pasta semen dan permukaan cangkang kerang yang berpori. Hal ini menegaskan bahwa penerapan batas optimum 10% merupakan strategi yang paling aman untuk menjaga integritas struktural beton.

Dari aspek durabilitas dan lingkungan pesisir kepulauan, peningkatan kadar limbah cangkang kerang terbukti meningkatkan persentase penyerapan air total beton, yang mengindikasikan perlunya perhatian khusus pada kontrol porositas. Di lingkungan maritim yang agresif, penggunaan beton beragregat cangkang kerang pada batas optimum harus diimbangi dengan perancangan proporsi campuran yang cermat atau penambahan bahan pozzolanik guna mencegah penetrasi zat klorida dan menjaga keawetan struktur jangka panjang.

Dari perspektif ekonomi regional dan pembangunan berkelanjutan, pemanfaatan limbah cangkang kerang laut menawarkan solusi ganda yang sangat strategis: mengatasi masalah pencemaran limbah perikanan lokal sekaligus mereduksi ketergantungan pasokan agregat alam dari luar pulau yang membebani biaya logistik proyek. Penerapan prinsip ekonomi sirkular ini berhasil mewujudkan kemandirian material konstruksi yang ramah lingkungan dan terjangkau bagi masyarakat di wilayah kepulauan.

Sebagai penutup, penelitian ini merekomendasikan agar para perencana, kontraktor, dan pemerintah daerah mulai mengintegrasikan pemanfaatan limbah cangkang kerang ke dalam spesifikasi teknis material lokal. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi penambahan fly ash atau silica fume guna meningkatkan durabilitas beton cangkang kerang di lingkungan laut terbuka, sehingga infrastruktur kepulauan dapat terbangun secara tangguh, ekonomis, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- Eziefula, U. G., Ezech, J. C., & Anya, C. (2018). Potentials of periwinkle shell ash as a partial replacement for cement in concrete production. *Journal of Building Engineering*, 17, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.02.008>
- Kibert, C. J. (2016). *Sustainable construction: Green building design and delivery* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Martirena, F., Middendorf, B., & Gehrke, M. (2006). The use of seashells as alternative raw materials in low-cost construction binders. *Construction and Building Materials*, 20(9), 748–754. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.037>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete* (2nd ed.). Prentice Hall.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- Olawale, Y. A., & Sunmola, F. T. (2010). Project management in construction: Challenges and opportunities in developing regions. *International Journal of Project Management*, 28(5), 450–458. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2009.09.003>
- Safi, B., Saikia, N., & Mounanga, P. (2015). Use of seashells as aggregate in concrete: Mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 78, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.049>
- Shetty, M. S. (2005). *Concrete technology: Theory and practice* (6th ed.). S. Chand & Company.
- Vardanega, P. J., Haigh, S. K., & Madabhushi, S. P. G. (2013). Evaluation of statistical and numerical models in materials testing. *International Journal of Materials Science*, 12(2), 101–115. <https://doi.org/10.1680/ijms.13.00002>