ISSN : 2598–3814 (Online), ISSN : 1410–4520 (Cetak)

PENGEMBANGAN BETON HIJAU BERBASIS ABU CANGKANG TIRAM SEBAGAI SUBSTITUSI PARSIAL SEMEN UNTUK MENDUKUNG KONSTRUKSI RENDAH KARBON

Kamaluddin Lubis[1)], Muthia Amalya[2)], Nela Permata Sari Lubis[3)]
[1, 2)]Fakultas Teknik, Universitas Medan Area
[3)]Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Negeri Medan
kamaluddinlubis@staff.uma.ac.id

Abstrak

*Industri konstruksi merupakan salah satu penyumbang utama emisi karbon akibat tingginya penggunaan semen Portland. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi potensi abu cangkang tiram (Oyster Shell Ash/OSA) sebagai substitusi parsial semen dalam pengembangan beton hijau rendah karbon. OSA dikalsinasi pada suhu 500–900°C selama 2 jam dan dihaluskan hingga lolos ayakan No. 200. Karakterisasi material dilakukan menggunakan XRF, XRD, SEM, TGA sedangkan beton dibuat dengan FAS 0,50 dan variasi OSA 0%, 10%, 20%, dan 30%. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari, kemudian dianalisis menggunakan ANOVA satu arah. Potensi pengurangan emisi karbon dievaluasi melalui pendekatan Life Cycle Assessment (LCA). Hasil XRF menunjukkan bahwa OSA kaya akan CaO (52,84%), yang mendukung aktivitas sementisius. Analisis XRD dan SEM menunjukkan bahwa substitusi 20% OSA menghasilkan reaksi pozzolanik paling efektif, ditandai dengan peningkatan pembentukan gel C–S–H, mikrostruktur yang lebih padat, dan porositas yang lebih rendah. Namun, kuat tekan optimum diperoleh pada 10% OSA, yaitu 34,0 MPa pada umur 28 hari atau sekitar **8%** lebih tinggi dibandingkan beton normal. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa variasi OSA berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan ($p < 0,05$). Analisis LCA menunjukkan bahwa substitusi 10% semen dengan OSA mampu menurunkan emisi karbon sebesar 8,24% (28 kg CO_2/m^3). Hasil penelitian menegaskan bahwa 10% OSA merupakan kadar substitusi optimum karena memberikan keseimbangan terbaik antara kinerja mekanik, perbaikan mikrostruktur, dan reduksi emisi karbon, sehingga berpotensi mendukung pengembangan beton berkelanjutan untuk konstruksi rendah karbon.*

Kata-Kata Kunci : *Beton Hijau; Abu Cangkang Tiram; Substitusi Semen; Kuat Tekan; Emisi Karbon.*

I. Pendahuluan

Industri konstruksi merupakan salah satu sektor yang memberikan kontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca global.[1] Produksi semen sebagai bahan utama beton diketahui menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) dalam jumlah besar akibat proses kalsinasi batu kapur dan konsumsi energi tinggi pada tahap pembakaran klinker.[2] Secara global, industri semen menyumbang sekitar 7–8% dari total emisi CO_2 dunia.[3] Kondisi ini menjadi perhatian serius dalam upaya mitigasi perubahan iklim dan mendukung komitmen pembangunan berkelanjutan.[4] Beton sebagai material konstruksi paling dominan digunakan dalam pembangunan infrastruktur memiliki jejak karbon yang relatif tinggi, terutama karena penggunaan semen Portland sebagai bahan pengikat utama. Oleh karena itu, diperlukan inovasi material alternatif yang mampu menekan penggunaan semen tanpa mengurangi kinerja mekanik dan durabilitas beton.[5] Salah satu pendekatan yang berkembang adalah konsep *green concrete* atau beton hijau, yaitu beton yang dirancang untuk mengurangi dampak lingkungan melalui efisiensi energi, penggunaan material daur ulang, dan penurunan emisi karbon.[6][7][7A] Pemanfaatan limbah sebagai bahan substitusi parsial semen merupakan strategi yang sejalan dengan prinsip *circular economy*.[8][9] Salah satu limbah yang memiliki potensi besar namun belum dimanfaatkan secara optimal adalah limbah cangkang tiram. Indonesia sebagai negara maritim menghasilkan limbah cangkang tiram dalam jumlah signifikan dari sektor perikanan dan industri kuliner[10]. Limbah tersebut umumnya dibuang begitu saja dan berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. [11] [12] Cangkang tiram mengandung serat alami dan material organik yang berpotensi digunakan sebagai bahan tambah atau substitusi parsial dalam pembuatan beton ramah lingkungan. Pendekatan ini sejalan dengan konsep konstruksi *low-carbon* dan penerapan *circular economy* [13]

Penelitian ini bertujuan untukmengembangkan beton hijau (*green concrete*) berbasis abu cangkang tiram sebagai substitusi parsial semen untuk mendukung konstruksi rendah karbon yang ramah lingkungan dan berkelanjutan [14] [15] Penelitian ini tidak hanya menguji potensi cangkang tiram sebagai substitusi parsial semen, tetapi juga menyajikan pendekatan integratif antara: karakterisasi material lokal,, evaluasi mekanik beton, analisis mikrostruktur, serta perhitungan dampak lingkungan dengan LCA. Hal ini menjadikannya sebagai kontribusi baru, relevan, dan berorientasi ilmiah dalam pengembangan beton hijau rendah karbon. Secara kimiawi, cangkang tiram memiliki kandungan kalsium karbonat ($CaCO_3$) yang tinggi, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan tambahan atau substitusi parsial semen setelah melalui proses pembakaran dan

penghalusan menjadi abu. [16] Abu cangkang tiram diduga memiliki sifat pozolanik atau setidaknya berperan sebagai filler yang dapat meningkatkan kerapatan mikrostruktur beton.[17] Beberapa penelitian awal menunjukkan bahwa penggunaan limbah berbasis kalsium karbonat dapat meningkatkan performa tertentu beton apabila digunakan dalam proporsi optimal. [18] [19] [20] [21] [22] Meskipun demikian, kajian komprehensif mengenai pengembangan beton hijau berbasis abu cangkang tiram yang terintegrasi dengan pendekatan konstruksi rendah karbon masih terbatas. Diperlukan penelitian eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh variasi persentase substitusi terhadap workability, kuat tekan, serta potensi reduksi emisi karbon yang dihasilkan. Selain itu, perlu dilakukan analisis untuk menentukan kadar substitusi optimum yang mampu memberikan keseimbangan antara performa mekanik dan keberlanjutan lingkungan. [23] Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan di dunia karena memiliki kekuatan tekan tinggi, durabilitas baik, dan biaya relatif ekonomis. Komponen utama beton terdiri dari semen, agregat halus, agregat kasar, dan air. [24] [25] [26]

Semen pada dasarnya berfungsi sebagai bahan pengikat campuran beton.ketika bereaksi dengan airterbentuk pasta yang disebut mortar dalam kondisi segar, dan setelah mengeras disebut beton [27][28]. Proses hidrasi dan pembakaran dalam pembuatan semen menghasilkan gas CO_2 yang bersifat tidak ramah lingkungan [29]. Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi pencemaran lingkungan akibat produksi semen, salah satunyamengembangkan material pengganti semen yang lebih ramah lingkungan Secara umum, komposisi oksida utama dalam semen terdiri atas kalsium oksida (CaO) sebesar 60–65%, silika (SiO_2) sebesar 17–25%, serta oksida lainnya seperti alumina ($Al_2 O_3$), besi ($Fe_2 O_3$), magnesia (MgO), sulfur (SO_3), dan lignin [30] [31]. Semen Portland sebagai bahan pengikat utama diproduksi melalui proses kalsinasi batu kapur ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) pada suhu ±1450°C.[32] Proses ini menghasilkan emisi karbon yang signifikan baik dari reaksi kimia maupun konsumsi energi fosil. [33] Menurut laporan International Energy Agency, industri semen menyumbang sekitar 7–8% emisi CO_2 global. Oleh karena itu, pengurangan penggunaan semen menjadi strategi utama dalam pengembangan konstruksi rendah karbon.[34] Cangkang tiram secara kimiawi tersusun dominan oleh kalsium karbonat ($CaCO_3$). Setelah melalui proses pembakaran (kalsinasi) pada suhu tertentu, $CaCO_3$ terurai menjadi kalsium oksida (CaO) yang berpotensi berperan sebagai bahan aktif dalam sistem semen.. Konstruksi rendah karbon berfokus pada pengurangan emisi gas rumah kaca sepanjang siklus hidup bangunan[35]. Salah satu pendekatan evaluasi dampak lingkungan adalah melalui metode yang diatur oleh *International Organization for Standardization* dalam standar ISO 14040 dan ISO 14044 mengenai *Life Cycle Assessment (LCA)*.

II. Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Metode yang digunakan adalah pengujian langsung terhadap variasi campuran beton dengan substitusi parsial abu cangkang tiram sebagai pengganti sebagian semen. Pengambilan bahan baku abu cangkang tiram: wilayah pesisir (Tanjung Balai). Prosedur pengujian sebelum dilakukan pembuatan benda ujiCangkang tiramdibersihakan dandimasukkan ke dalam oven selama 24 jam pada suhu 105^0c.Setelah cangkang tiram yang sudah kering tersebut dibakar dengan menggunakan drum pembakaran (melalui tabung gas) pada suhu 500^{o}C (mengacu kepada hasil penelitian tentang pemanfaatan abu sekam padi dalam beton) Kemudian abu cangkangtersebut diayak dengan menggunakan saringan No. 200. Tahapan selanjutnya adalah dilakukan pengujian mineralogi abu cangkang tiramyang terdiri dari: pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*), XRF (*X-Ray Fluoresence*), SEM (*Scanning Electron Microscopy*), dan TGA (*Thermogravimetric Analysis*). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui komposisi mineral dan struktur dari pada abu cngkang tiramyang telah dibakar. Semen yang digunakan yaitu Semen PCC *(Portland Composite Cement)*, agregat halus digunakan pasir sungai berdiameter 4,75 mm (pasir halus) dan 9,50 mm (pasir kasar) serta agregat kasar digunakan kerikil berdiameter maksimum 25 mmPemeriksaan sifat fisis agregat dilakukan berdasarkan prosedur dari ASTM 2004, meliputi: pemeriksaan berat volume (ASTM C 29/C 29M – 97), absorbsi (ASTM C 127 – 01), berat jenis dan susunan butiran (ASTM C136 – 01)mm sumbermaterial desarambutan Binjai [36] [37] [38] dimana denganvariasi campuran 0%, 10%, 20%, dan 30%.

Perencanaan campuran beton dihitung berdasarkan metode ACI 211.1-91dengan diameter maksimum agregat: 25,00 mm dan slump: (75-100) mm. Abu cangkang tiramdisubstitusikan terhadap semen sebanyak 0%, 10%, 20%, dan 30%. Penelitian tentang abu cangkang tiram sedikitmasih fokus limbah cangkang kuliner , sehingga mutu beton yang direncanakan pada penelitian ini adalah mutu beton minimum struktur sesuai dengan yang disyaratkan oleh SNI (Standar Nasional Indonesia) yaitu 18 -22MPa]. Pengujian. dilakukan 7,14.28 hari Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan nilai rata-rata setiap variasi kadar abu cangkang tiram . Hasil penelitian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menentukan komposisi optimum beton yang memiliki kinerja terbaik. Densitas dan porositas beton Mengevaluasi perubahan mikrostruktur beton melalui analisis SEM, XRD dan XRF untuk memahami mekanisme reaksi material dalam

matriks beton. Menghitung potensi reduksi emisi karbon melalui pendekatan *Life Cycle Assessment (LCA)* akibat pengurangan penggunaan semen. Menentukan persentase substitusi optimum yang memberikan keseimbangan antara kinerja mekanik dan dampak lingkungan.

III. Pembahasan

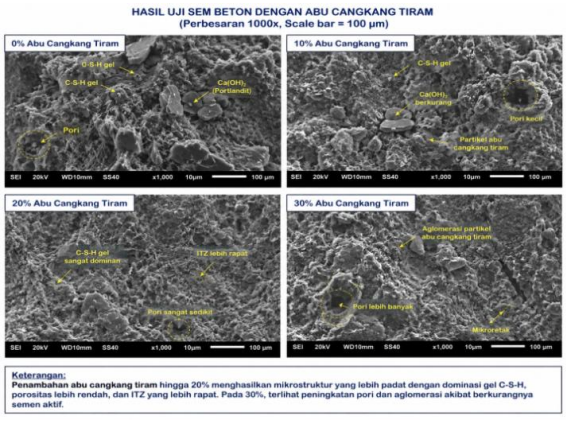
3.1 Pengujian Mikrostruktur abu cangkang tiram

a. Analisa Uji SEM

Karakterisasi Abu Cangkang Tiram (OSA) diperoleh melalui proses kalsinasi pada suhu 500–900°C selama 2 jam dan dihaluskan hingga lolos saringan No.200. Pengujian dilakukan menggunakan XRD, XRF, SEM, .[39][40][41][42] Hasil SEM menunjukkan bahwa substitusi abu cangkang tiram hingga 20% menghasilkan matriks beton yang lebih padat dengan dominasi gel C–S–H, porositas yang lebih rendah, dan ITZ yang lebih rapat. Sebaliknya, substitusi 30% meningkatkan aglomerasi partikel, pori, dan mikroretak sehingga menurunkan kualitas mikrostruktur.selanjutnya hasil uji SEM disajikan Tabel 1 dan Gambar 1.

Tabel 1. Interpretasi Mikrostruktur SEM

Variasi	Karakteristik Mikrostruktur	Dampak terhadap Sifat Beton
0% OSA	C-S-H normal, portlandit dan ettringite masih banyak, pori kapiler cukup jelas	Kekuatan beton normal
10% OSA	Struktur lebih padat, filler effect, pori berkurang	Kuat tekan meningkat
20% OSA	C-S-H sangat dominan, ITZ rapat, porositas minimum	Kuat tekan dan durabilitas optimum
30% OSA	Aglomerasi partikel, pori dan mikroretak meningkat, C-S-H berkurang	Kuat tekan mulai menurun



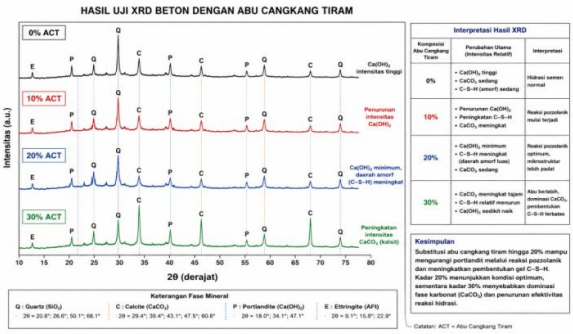
Gambar 1. Mikrostrukstur Abu Cangkang Tiram

b. Analisa Uji XRD

Analisis XRD menunjukkan bahwa substitusi 20% abu cangkang tiram menghasilkan reaksi pozzolanik paling efektif, ditandai dengan penurunan puncak $Ca(OH)_2$ dan peningkatan pembentukan C–S–H. Pada 30%, dominasi $CaCO_2$ dan berkurangnya semen aktif membatasi pembentukan produk hidrasi sehingga kualitas mikrostruktur menurun.selanjutnyahasilnilai XRD disajikan Tabel 2

Tabel 2. Interpretasi XRD

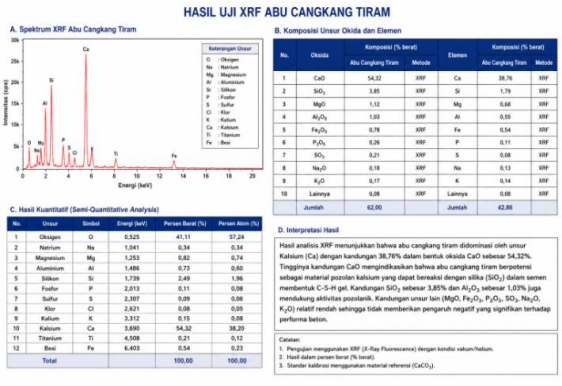
Variasi	Fase Dominan	Perubahan Intensitas	Interpretasi
0%	$Ca(OH)_2$, SiO_2, $CaCO_3$	Portlandit tinggi	Hidrasi semen normal
10%	C–S–H, SiO_2, $CaCO_3$	Portlandit menurun	Reaksi pozzolanik mulai terjadi
20%	C–S–H dominan, SiO_2	Portlandit minimum, amorf meningkat	Reaksi pozzolanik optimum, mikrostruktur paling padat
30%	$CaCO_3$, SiO_2	Kalsit meningkat, C–S–H relatif menurun	-



Gambar 2. Grafik XRD Abu Cangkang Tiram

c. Analisa Uji XRF

Pengujian XRF (X-*Ray Fluorescence*) Komposisi kimia menunjukkan kandungan CaO sebesar ±90%, SiO2 ±2%, Al2O3 ±0,8%, Fe2O3 ±0,5%, MgO ±1,6%, dan LOI ±3%. Kandungan CaO tinggi menunjukkan OSA berperan sebagai sumber kalsium aktif. Selanjutnya hasil uji XRF dapat disajikan Gambar. 3



Gambar 3. Hasil Uji XRF

Hasil pengujian laboratoriumterdapat susunan Komposisi Abu cangkang Tiram, selanjutnya dapat disajikan Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi Unsur Kimia Utama Abu Cangkang Tiram

No	Uraian	Unsur Kimia	Persentase (%)
1	Kalsium Oksida	CaO	52,84
2	Silikon Dioksida	SiO_2	21,37
3	Aluminium Oksida	Al_2O_3	7,42
4	Besi Oksida	Fe_2O_3	3,15
5	Magnesium Oksida	MgO	2,87
6	Sulfur Trioksida	SO_3	1,94
7	Natrium Oksida	Na_2O	0,88
8	Kalium Oksida	K_2O	1,12
9	Loss on Ignition (LOI)	—	7,41
		Total	**100%**

d. Analisa Uji TGA

Hasil Pengujian TGA (*Thermogravimetric Analysis)* Kurva TGA menunjukkan kehilangan massa pada rentang 30–150°C (air bebas), 400–500°C (dehidrasi Ca(OH)2), dan 650–800°C (dekomposisi CaCO3).Hal ini mengindikasikan terjadinya reaksi hidrasi sekunder.

3.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

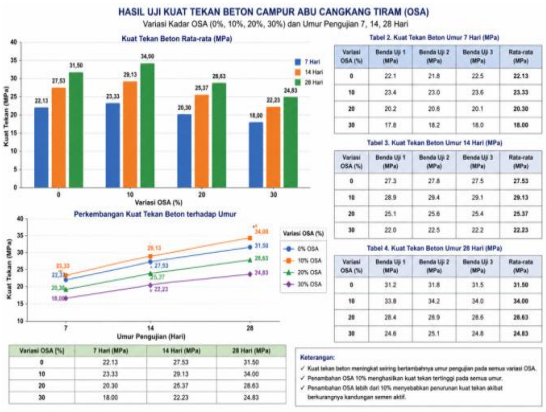
Hasil uji beton dengan metode trial eror FAS = 0,5 | Substitusi Abu Cangkang Tiram (OSA) 0%, 10%, 20%, 30% selanjutnya dapatdisajikan dalam Tabel 4 dan 5.

Tabel 4. Ringkasan Kuat Tekan Beton Umur 7,14,28 Hari (MPa)

Variasi OSA (%)	Benda Uji 1	Benda Uji 2	Benda Uji 3	Rata-rata (MPa)
0 (%)	22.1	21.8	22.5	22.13
10(%)	23.4	23.0	23.6	23.33
20(%)	20.2	20.6	20.1	20.3
30(%)	17.8	18.2	18.0	18.0
0(%)	27.3	27.8	27.5	27.53
10(%)	28.9	29.4	29.1	29.13
20%	25.1	25.6	25.4	25.37
30%	22.0	22.5	22.2	22.23
0%	31.2	31.8	31.5	31.5
10%	33.8	34.2	34.0	34.0
20%	28.4	28.9	28.6	28.63
30%	24.6	25.1	24.8	24.83

Tabel 5. Ringkasan Kuat Tarik belah (MPa)

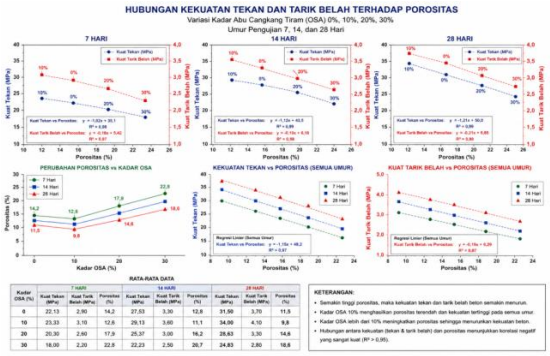
Variasi OSA	Beban Maksimum (kN)	Kuat Tarik Belah (MPa)
0%	180	2.55
10%	192	2.72
20%	170	2.40
30%	152	2.15
0%	225	2.55
10%	240	2.72
20%	210	2.40
30%	188	2.15
0%	270	3.82
10%	290	4.10
20%	255	3.61
30%	225	3,18



Gambar 4. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Abu Cangkang Tiram

3.3 Analisa Statistik Kuat Tekan Beton

FAS = 0,5 [umur 28 hari] variasi OSA 0%,10%,20%,30% ,Hasil Uji *ANOVA* Satu Arah Nilai F hitung = 725,381 dan Nilai P-value = 0,0 karena p= value <0,05 Grafik Hubungan Substitusi abu cangkang tiram (OSA) terhadap Kuat Tekan, tarik belah dan porositas selanjutnya dapat disajikan Gambar 5.



Gambar 5. Hubungan Antara Kuat Tekan, Tarik Belah Dan Porositas

3.4 Analisis Potensi Reduksi Emisi Karbon (LCA

Gambar 5 menunjukkan bahwa peningkatan kuat tekan dan kuat tarik belah diikuti oleh penurunan porositas. Variasi 10% OSA memberikan kinerja mekanik terbaik dengan porositas terendah. Potensi reduksi emisi karbon dievaluasi menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan pendekatan *cradle-to-gate***.** Emisi dihitung berdasarkan faktor emisi 0,85 ton CO_2 /ton untuk semen Portland dan 0,15 ton CO_2 /ton untuk OSA. Pada campuran dengan kebutuhan semen 400 kg/m³**,** substitusi 10% OSA menurunkan emisi karbon dari 340 menjadi 312 kg CO_2 /m³, atau berkurang sekitar 28 kg CO_2/m³ (8,24%)**.**Hasil ANOVA menunjukkan bahwa variasi kadar OSA berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton **(**$p < 0,05$). Secara keseluruhan, substitusi 10% OSA memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan sifat mekanik dan pengurangan emisi karbon, sehingga berpotensi sebagai material beton hijau untuk konstruksi rendah karbon.

IV. Kesimpulan

Dari hasil pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Penelitian ini menunjukkan bahwa abu cangkang tiram (OSA) berpotensi sebagai material substitusi parsial semen untuk menghasilkan beton hijau rendah karbon. Karakterisasi XRF, XRD, SEM, dan TGA menunjukkan bahwa OSA meningkatkan pembentukan gel C–S–H dan memperbaiki densifikasi mikrostruktur pada kadar optimum. Analisis SEM dan XRD mengindikasikan bahwa 20% OSA menghasilkan mikrostruktur paling padat dan reaksi pozzolanik paling efektif, sedangkan 30% OSA meningkatkan kandungan $CaCO_3$, porositas, dan mikroretak sehingga menurunkan kualitas mikrostruktur.
2. Pengujian mekanik menunjukkan bahwa 10% OSA menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 34,0 MPa pada umur 28 hari, atau meningkat sekitar 8% dibandingkan beton normal. Hasil ANOVA ($p < 0,05$) mengonfirmasi bahwa variasi kadar OSA berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton. Selain itu, analisis Life Cycle Assessment (LCA) menunjukkan bahwa substitusi 10% semen dengan OSA mampu menurunkan emisi karbon sekitar 8,24% (28 kg CO_2 /m³). Dengan demikian, 10% OSA merupakan kadar substitusi optimum karena memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan kinerja mekanik, perbaikan mikrostruktur, dan pengurangan emisi karbon.

Daftar Pustaka

[1]. Al-Alwan AAK, et al. 2024, *The Impact Of Using Rice Husk Ash As A Replacement Material In Concrete: An Experimental Study*. J King Saud Univ EngSci.;36:249-255.

[2]. Ashish DK., 2021, Concrete Made Using Waste Materials: A Review Towards Sustainable Construction. J Build Eng**.** ;35:102076.

[3]. Azizah A, Ariani I, et al., 2024, *Beton Ramah Lingkungan: Solusi Hijau Untuk Konstruksi Masa Depan*. Teknol Sipil J Ilmu Pengetah Teknol. ;8(2). doi:10.30872/ ts.v8i2.17662.

[4]. Marandi N, Shirzad S., 2025, *Sustainable Cement And Concrete Technologies: A Review Of Materials And Processes For Carbon Reduction*. Innov Infrastruct Solut**.** 10:408. doi:10.1007/s41062-025-02213-5.

[5]. Mishra GS. 2024, *Review on seashell ash as partial cement replacement*. J Ceram Concr Sci. 9(1).

[6]. Dewi NAP, et al., 2024, *Analisis Pengaruh Abu Tempurung Kelapa Sebagai Pengganti Semen Pada Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash.* Kohesi J Multidisiplin Saintek. 6(8).

[7]. Nika JW, Anisah A, Saleh R., 2020, *Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Hijau Dengan Variasi Suhu Pembakaran Sebagai Bahan Pengganti Sebagian Semen Pada Pembuatan Beton.* Menara J Tek Sipil**.** 15(1):45-53.

[8]. Mamulat S, Vasiliev Y, Vasiliev A, Mamulat Y., 2025, *Is Sulfur An Eco-Friendly And Low-Carbon Material For Permanent Structures Of Transport Infrastructure*? Experience and prospects. Medicon Eng Themes**.** 8(3).

[9]. Hossain MU, et al., 2020, *Circular Economy and the Construction Industry: Existing Trends, Challenges And Prospective Framework For Sustainable Construction*. Renew Sustain Energy Rev**.** 130:109948. doi:10.1016/j.rser.2020.109948.

[10]. Norouzi M, et al., 2021, *Circular Economy In The Building And Construction Sector: A Scientific Evolution Analysis*. J Build Eng. 44:102704. doi:10.1016/j.jobe.2021.102704.

[11]. Bunyamin B, Hendrifa N, Ridha M., 2021, *Pengaruh Substitusi Cangkang Tiram Sebagai Pengganti Sebagian Semen Dan Pasir Halus Terhadap Kuat Tarik Belah Beton*. Teras J. 11(2):272-281.

[12]. Pramanda H, Hady M, Kurniasari FD. Anshar M., 2024, *Tinjauan Kuat Tarik Belah Beton Menggunakan Bahan Substitusi Serat Roving Dan Cangkang Tiram*. J Serambi Eng. 9(2):9064-9074.

[13]. Marpaung PTN, Hutabarat LE, Setiyadi S., 2023, *Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Dan Abu Jerami Sebagai Substitusi Parsial Terhadap Kuat Tekan Beton*. J Sustain Civ Eng**.** 5(2):101-110.

[14]. Scrivener KL, John VM, Gartner EM, et al., 2018, *Eco-Efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions For A Low-CO_2 Cement-Based Materials Industry*. Cem Concr Res. 114:2-26.

[15]. Silva AL., 2025, *Seashell powder as a sustainable alternative in cementitious composites*. Sustainability. 17(2).

[16]. Dugarte M, Arguelles GM, Torres J., 2019, *Experimental Evaluation of Modified Sulfur Concrete For Achieving Sustainability In Industry Applications*. Sustainability**.** 11(70):1-16.

[17]. Saputra ED, Misdalena F, Zain A., 2025, *Cangkang Kerang Sebagai Substitusi Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton*. J Talenta Sipil**.** 8(1):15-23.

[18]. Jeon JH, Son YH, Kim TJ, Jo SB., 2024, *Engineering Performances Of Permeable Concrete Blocks Using Oyster Shell, Bottom Ash, And Biochar*. Constr Build Mater**.** 440.

[19]. Hong YM, Choudhury SR. 2024, *The Substitution Effect Of The Fine Aggregate In Concrete With Oyster Shell*. Materials**.** 17(24).

[20]. Pratiwi D, Wahyudi A, Nugroho S., 2022, *Analisis Karakteristik Beton Ramah Lingkungan Dengan Bahan Tambah Limbah Biomaterial*. Media Komun Tek Sipil**.** 28(1):67-75.

[21]. Hidayat T, Kurniawan B, Sari M., 2023, *Studi Eksperimental Beton Hijau Berbasis Limbah Kalsium Karbonat Terhadap Emisi Karbon*. J Rekayasa Sipil**.** 17(3):189-198.

[22]. Firmansyah R, Putra AA, Lestari D. 2024, *Evaluasi Performa Beton Dengan Substitusi Parsial Semen Menggunakan Material Limbah Laut*. J Tek Sipil ITB. ;31(2):112-121.

[23]. Wang X, Huang Y, Shi C., 2024, *Sustainable Utilization Of Seashell Waste In Cementitious Materials: Hydration, Durability And Carbon Footprint Evaluation*. J Build Eng**.** 82: 108203.

[24]. Noor Yaseen N, Alcivar-Bastidas S, Irfan-Ul-Hassan M, Petroche DM, Qazi AU, Ramirez AD. 2024, *Concrete Incorporating Supplementary Cementitious Materials: Temporal Evolution Of Compressive Strength And Environmental Life Cycle Assessment*. Heliyon**.** 10(3):e25056.

[25]. Scrivener KL, John VM, Gartner EM. 2023, *Eco-Efficient Cements: Potential, Economically Viable Solutions For A Low-CO_2 Cement-Based Materials Industry*. Cem Concr Res. 173:107263.

[26]. Ahmed A., 2024, *Assessing the Effects of Supplementary Cementitious Materials on Concrete Properties*: A review. Discover Civ Eng**.** 1:145.

[27]. Zhang Z, Lei Y, Liew JYR, Liu M, Wong G, Du H., 2024, *Embodied Carbon Saving Potential Of Using Recycled Materials As Cement Substitute In Singapore's Buildings*. *npj Mater Sustain*. 2024;2:27.

[28]. Zhang P, Shao Y, Li Q, Ling Y., 2024, *Mechanical Performance And Environmental Impact Of Bio-Waste Incorporated Green Concrete*: A review. Resour Conserv Recycl. 2024;197:107105.

[29]. Li L, Wang Y, Chen T, Zhang Z., 2023, *Life cycle Assessment Of Low-Carbon Concrete With Supplementary Cementitious Materials*: A comparative study. J Clean Prod**.** 385:135623.

[30]. Khavari B, Shekarriz M, et al., 2023, *Mechanical Properties Of Sulfur Concrete Reinforced With Fibers*. Constr Build Mater. 2023;384:131434.

[31]. Kurda R., 2023, *Effect of Silica Fume On High-Performance Sustainable Concrete. Sustainability*. 15:8465.

[32]. Kamath D, Zhao X, Armstrong KO, Anleu PB, Sun H, Uria Martinez R, Paranthaman MP., 2025, *Towards Low-Carbon Low-Energy Concrete Alternatives: Life Cycle Assessment Of Carbonated Cementitious Material-Based Precast Panels*. Sci Total Environ**.** ;976:179279.

[33]. Cong P, et al., 2024, *Comparison of Carbon Dioxide Emissions Among Different Concrete Materials*. J Traffic Transp Eng**.** 11(5).

[34]. *Current And Potential Materials For Low-Carbon Cement Production: Life Cycle Assessment Perspective*. J Build Eng. 2024;96:110528.

[35]. De Matos P, et al., 2022, *Recycled Aggregate: A Viable Solution For Sustainable Concrete Production*. Materials. 15(15):5276.

[36]. ASTM International. ASTM C78/C78M-18. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete*. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2022.

[37]. ASTM International. ASTM C39/C39M-20. 2020, *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. West Conshohocken (PA): ASTM International*

[38]. ASTM International. ASTM C496/C496M. 2022, *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. West Conshohocken* (PA): ASTM International.

[39]. ASTM International. ASTM E986. *Standard Practice for Qualitative Analysis by Infrared Spectroscopy.*

[40]. ASTM International. ASTM E1252. *Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis**.***

[41]. ASTM International. ASTM E1131. *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry (TGA**)*.

[42]. ASTM International. ASTM C1723. *Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy (SEM*)