

Pemanfaatan Limbah Cangkang *Scallop* sebagai Material Ramah Lingkungan untuk Konstruksi Berkelanjutan di Indonesia

Novik Kurohman

Kementerian Pekerjaan Umum Republik Indonesia Jakarta

* corresponding author: novik.kurohman@pu.go.id

Abstrak/Abstract

Beton merupakan material yang penting dalam konstruksi, namun sayangnya, proses produksi semen menyumbang emisi karbon dioksida (CO_2) ke atmosfer. Oleh sebab itu, diperlukan inovasi material alternatif pengganti semen yang lebih ramah lingkungan, serta mendukung konsep pembangunan berkelanjutan. Penelitian ini berfokus pada potensi pemanfaatan limbah cangkang kerang *scallop* (*Pecten maximus*) sebagai bahan substitusi parsial semen dalam pembuatan beton. Sampel limbah cangkang kerang dianalisis menggunakan berbagai instrumen mikroanalisis, antara lain XRD untuk mempelajari perubahan fase kristal CaCO_3 , TG-DTA untuk mengevaluasi stabilitas termal, serta SEM untuk mengamati morfologi permukaan cangkang kerang. Hasil mikroanalisis menunjukkan bahwa cangkang *scallop* mengandung kalsium karbonat (CaCO_3), yang melalui proses kalsinasi dapat diubah menjadi kalsium oksida (CaO) dengan sifat serupa semen. Selain itu, hasil analisis menunjukkan bahwa CaCO_3 dalam cangkang *scallop* berfase kalsit dan dapat terdekomposisi sempurna pada suhu kalsinasi optimum 740°C . Substitusi hingga 5% limbah cangkang kerang dalam campuran beton masih mampu mempertahankan kekuatan tekan yang memadai. Temuan ini menegaskan bahwa daur ulang limbah cangkang kerang *scallop* memiliki potensi besar sebagai bahan pengganti semen yang ramah lingkungan, sekaligus berkontribusi dalam mengurangi dampak negatif industri semen terhadap lingkungan. Pada akhirnya, pemanfaatan limbah *biowaste* ini dapat menjadi solusi penting dan inovatif untuk mendukung agenda pembangunan berkelanjutan, pencapaian target *Sustainable Development Goals* (SDGs) di Indonesia sekaligus mendorong penguatan STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*).

*Concrete is important materials in construction industry, yet the production of cement significantly contributes to carbon dioxide (CO_2) emissions. Hence, innovative and eco-friendly alternative materials are urgently needed to mitigate these negative impacts and support the concept of sustainable construction. This study investigates the potential utilization of scallop shell (*Pecten maximus*) waste as a partial cement substitute in concrete production. The shell samples were characterized using multiple microanalytical techniques, including XRD to examine phase transformations of CaCO_3 , TG-DTA for thermal stability evaluation, and SEM for surface morphology observation. The analytical results revealed that scallop shells contain calcium carbonate (CaCO_3), which can be converted into calcium oxide (CaO) through calcination, exhibiting properties like cement. Furthermore, CaCO_3 in the shells was identified predominantly in the calcite phase and was completely decomposed at an optimum calcination temperature of 740°C . Incorporating up to 5% scallop shell waste into concrete mixtures maintained adequate compressive strength. These findings demonstrate that recycling scallop shell waste holds significant potential as an environmentally friendly cement replacement material, while also reducing the ecological footprint of the cement industry. Ultimately, the utilization of this biowaste offers an innovative and sustainable solution to support eco-friendly construction practices and the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs) in Indonesia as well as promote the strengthening of STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*).*

This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Kata Kunci: Beton ramah lingkungan, Limbah kerang *scallop*, Kalsium Karbonat, Kalsinasi, Pembangunan berkelanjutan

Keywords: Sustainable concrete, Scallop shell waste, Calcium carbonate, Calcination, Sustainable construction

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Di seluruh dunia, beton merupakan material konstruksi yang sangat penting dalam pembangunan infrastruktur, baik untuk jalan, bangunan, irigasi, maupun jembatan. Semen sebagai bahan pengikat utama beton hingga kini masih menjadi material yang sangat sulit tergantikan. Namun demikian, produksi semen secara global menyumbang sekitar 7-8% emisi karbon dioksida (CO₂) dunia, yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil dan proses kalsinasi di dalam kiln klinker (Ujwal *et al.*, 2024). Proses kalsinasi pada suhu tinggi membutuhkan energi dalam jumlah besar, sehingga menimbulkan dampak serius terhadap ekosistem dan makhluk hidup. Kondisi ini memperparah pemanasan global (*global warming*) serta menjadi tantangan signifikan dalam upaya penurunan emisi global.

Dalam dekade terakhir, pembangunan infrastruktur di Indonesia menjadi prioritas pemerintah, sehingga kebutuhan semen sebagai bahan konstruksi utama menjadi perhatian yang serius. Oleh karena itu, langkah nyata diperlukan untuk mengurangi ketergantungan pada semen konvensional sekaligus memitigasi dampak negatif dari perubahan iklim.

Indonesia sebagai negara maritim menghasilkan limbah *biowaste* dalam jumlah besar, salah satunya berasal dari industri perikanan dan konsumsi masyarakat berupa limbah cangkang kerang. Limbah ini menjadi persoalan lingkungan karena penumpukan yang berlebihan dimungkinkan dapat menjadi media berkembangnya bakteri dan memicu penyakit menular. Selain itu, bau menyengat yang muncul terutama pada musim hujan, serta pembuangan limbah kerang ke sungai, menyebabkan sedimentasi dan menurunkan kualitas air sungai sebagai sumber air bersih. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah cangkang kerang menjadi solusi penting untuk mengatasi permasalahan lingkungan sekaligus meningkatkan nilai tambah dari limbah ini.

Dalam bidang konstruksi, pemanfaatan limbah kerang sebagai material alternatif telah menjadi fokus sejumlah penelitian. Varhen *et al.*, (2017) melaporkan bahwa penggunaan cangkang kerang scallop sebagai substitusi agregat halus hingga 60% dapat meningkatkan *workability* beton hingga 15%. Zhong dkk., (2021), menemukan bahwa penggunaan cangkang kerang tiram sebagai substitusi semen sebesar 5% mampu meningkatkan kuat tekan beton umur 28 hari sebesar 5%. Penelitian lain oleh Chiou dkk., (2014), mengeksplorasi potensi cangkang kerang laut sebagai sumber alami kalsium oksida (CaO) yang menjadi bahan utama pembuatan semen, dengan hasil bahwa kadar CaO meningkat seiring dengan kenaikan suhu kalsinasi: 64,89% pada 550 °C, 66,81% pada 650 °C, 73,45% pada 750 °C, 74,96% pada 950 °C, dan 78,56% pada 1050 °C.

Meskipun penelitian tentang pemanfaatan limbah kerang dalam material konstruksi sudah banyak dilakukan, sebagian besar masih berfokus pada jenis kerang tertentu. Pemanfaatan cangkang *scallop* (*Pecten maximus*) masih sangat terbatas, khususnya penelitian yang menitikberatkan pada substitusi semen dengan CaO hasil kalsinasi limbah *scallop*. Oleh karena itu, penelitian ini

dilakukan untuk mengkaji potensi limbah *scallop* sebagai sumber CaO yang bernilai tinggi sebagai bahan pengganti material semen.

Secara khusus, penelitian ini menerapkan berbagai metode mikroanalisis, antara lain XRD, TG-DTA, dan SEM, untuk mempelajari transformasi kristalisasi CaCO₃ pada cangkang scallop menjadi CaO. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan analisis yang komprehensif mengenai karakteristik kimia, mineralogi, dan morfologi limbah *scallop*, sekaligus menekankan potensinya sebagai bahan pengganti semen yang ramah lingkungan. Tidak kalah pentingnya, penentuan suhu optimum kalsinasi juga dianalisis menggunakan TG-DTA untuk mengetahui titik dekomposisi maksimum CaCO₃. Hasil ini menjadi acuan agar dalam praktik lapangan proses kalsinasi tidak melebihi suhu optimum, sehingga dapat menekan emisi CO₂ sekaligus mengurangi kebutuhan energi yang berlebihan. Pada akhirnya, penelitian ini menawarkan kontribusi penting bagi pengembangan material konstruksi yang ramah lingkungan, sejalan dengan fokus agenda pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*) di Indonesia.

2. Material & Metodologi

2.1 Material

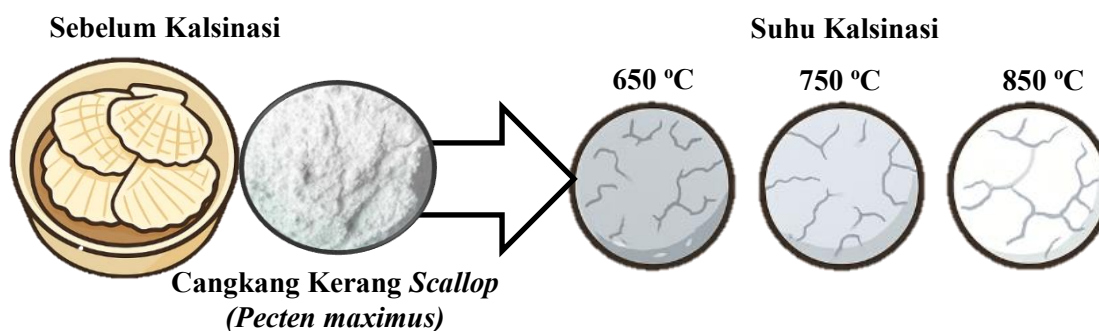
Limbah cangkang *scallop* (*Pecten maximus*) dicuci untuk menghilangkan kotoran dan garam, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 24 jam guna menguapkan sisa kelembapan dan bahan organik. Setelah itu, sampel disimpan dalam (*Vacuum chamber*) untuk mencegah kontaminasi dan penyerapan kelembapan hingga digunakan pada tahap berikutnya.

2.1.1 Penyiapan Serbuk Terkalsinasi (*Preparation of calcined powder*)

Cangkang kerang yang sudah dibersihkan dipanaskan dalam tungku listrik (Yamamoto, Jepang) pada suhu 650 °C, 750 °C, dan 850 °C selama 8 jam. Setelah pendinginan, cangkang digiling manual dengan penggiling keramik dan disaring menggunakan ayakan saringan berukuran 100 µm.

2.1.2 Penyiapan Serbuk Tidak Terkalsinasi (*Preparation of uncalcined powder*)

Cangkang yang tidak melalui proses kalsinasi digiling manual dengan penggiling keramik, kemudian diayak dengan ukuran yang sama (100 µm). Serbuk hasil gilingan disimpan rapat dalam ruang hampa (*Vacuum chamber*) untuk menjaga kemurnian dan mencegah masuknya uap air.



Gambar 1. Penyiapan Sampel

2.2 Metodologi

2.2.1 Analisis XRD

Struktur kristal dan perubahan kimia pada sampel sebelum dan sesudah kalsinasi dianalisis dengan *X-ray Diffractometer* (Ultima IV, Bruker, Jerman) menggunakan radiasi $\text{CuK}\alpha$ pada kondisi 40 kV dan 20 mA. Pemindaian dilakukan pada rentang 2θ sebesar 5° – 65° dengan kecepatan 2° per menit.

2.2.2 Analisis TG-DTA

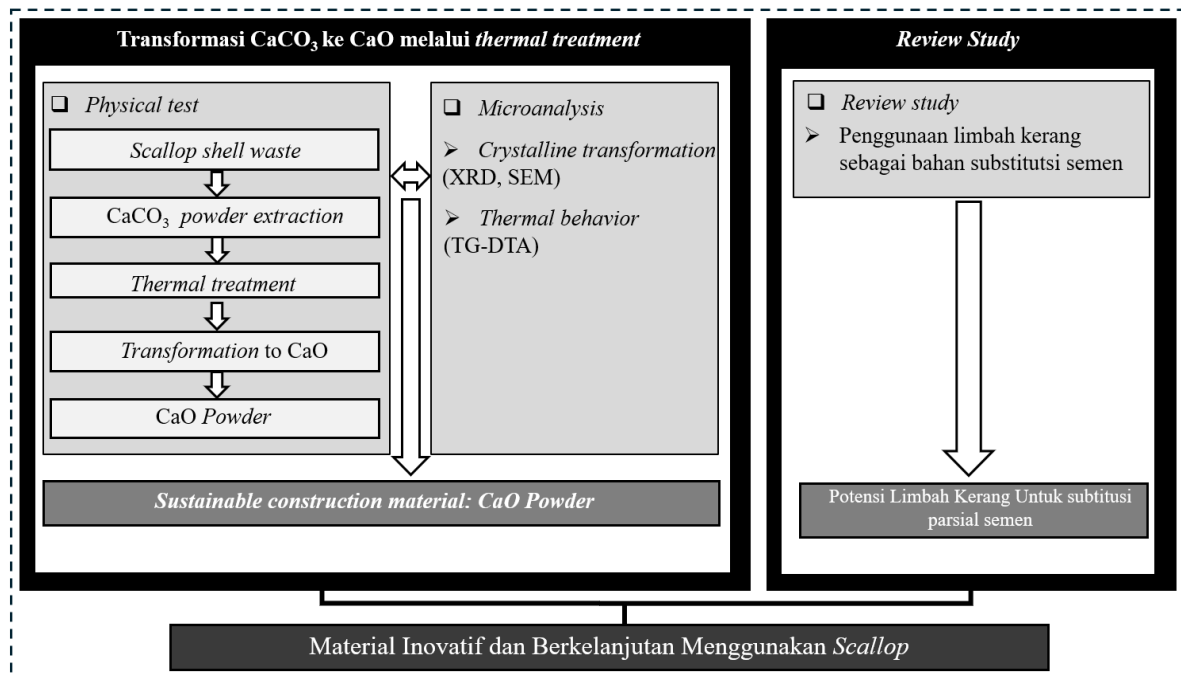
Sifat dekomposisi termal sampel diuji menggunakan sistem TG-DTA (Thermo Plus, Rigaku, Jepang) dalam atmosfer nitrogen (N_2) dengan laju pemanasan $10^\circ\text{C}/\text{menit}$. Setiap sampel, baik yang terkalsinasi maupun tidak, ditimbang sekitar 15 mg untuk pengujian. Analisis TG-DTA memberikan informasi detail mengenai pola penurunan berat, proses dekomposisi termal CaCO_3 menjadi CaO , serta pelepasan CO_2 .

2.2.3 Analisis SEM

Karakterisasi morfologi dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM, Hitachi TM-4000Plus) pada sampel sebelum dan sesudah kalsinasi untuk mengevaluasi perubahan struktur permukaan cangkang kerang.

2.2.4 Literature Review

Dalam penelitian ini tinjauan pustaka dilakukan melalui analisis sistematis terhadap artikel dan jurnal ilmiah bereputasi baik yang terindeks Scopus maupun jurnal nasional yang terakreditasi.



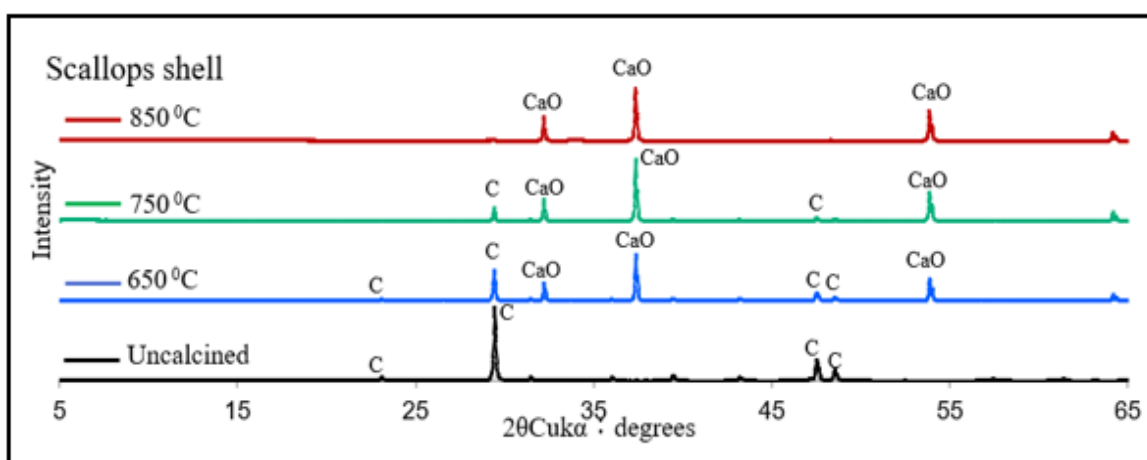
Gambar 2. Alur Penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil *microanalysis*

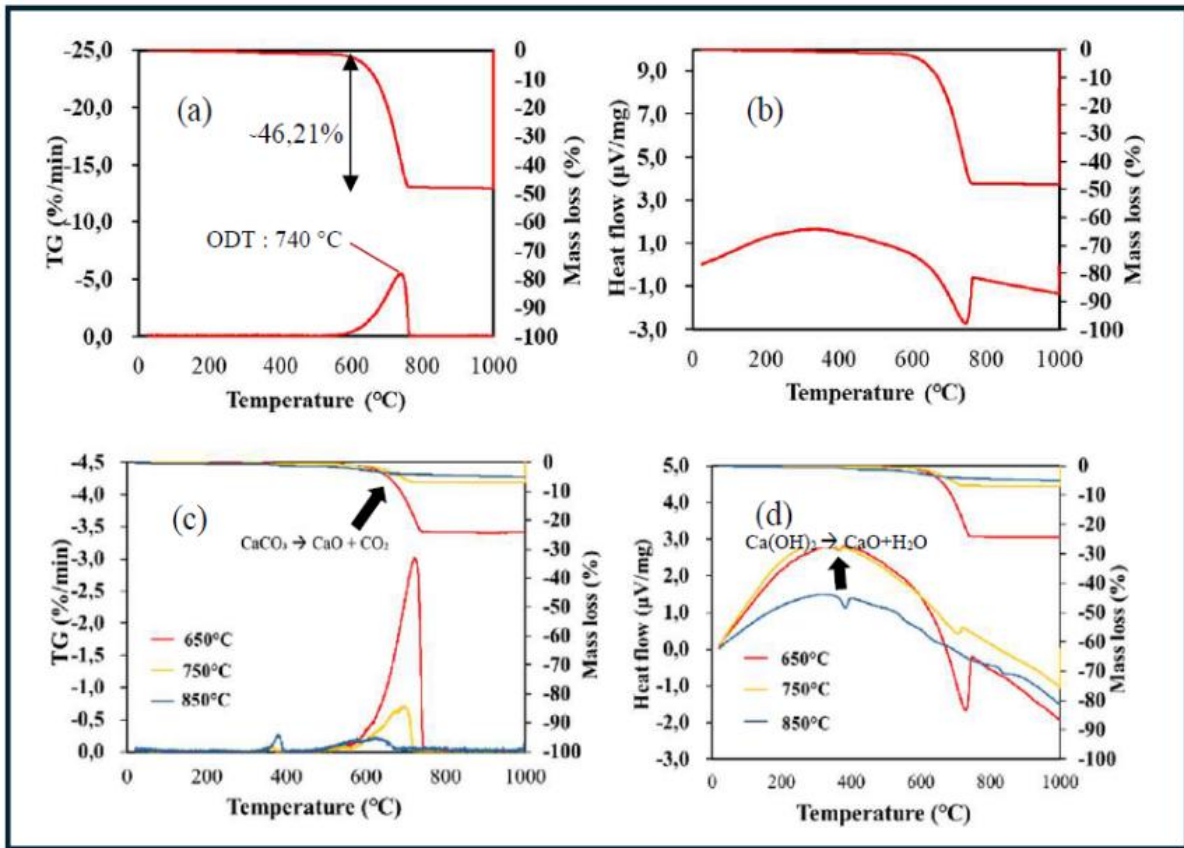
X-ray Diffraction (XRD), *Thermogravimetry–Differential Thermogravimetry* (TG-DTA), dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) merupakan metode mikro analisis yang memberikan informasi sangat penting dalam penelitian sebuah material. XRD berperan dalam mengidentifikasi atau memantau perubahan-perubahan fase kristal, sebagai contoh perubahan dari CaCO_3 ke CaO . TG-DTA dapat menganalisis perilaku termal suatu bahan sekaligus mendeteksi massa yang hilang akibat dekomposisi. Tidak kalah pentingnya SEM memungkinkan pengamatan morfologi permukaan dan mikro struktur suatu material tertentu. Diharapkan dengan mengkombinasikan seluruh pendekatan ini, menghasilkan pemahaman yang lebih mendalam dan komprehensif mengenai hubungan antara perubahan fase kristal, perilaku termal dan juga bentuk permukaan dari sampel yang menjadi dasar yang kuat dalam proses pengembangan material konstruksi yang inovatif dan juga ramah lingkungan.

Hasil analisis XRD pada gambar 3 menunjukkan bahwa sampel tanpa kalsinasi didominasi puncak kristal kalsit. Pada suhu $650\text{ }^\circ\text{C}$, puncak CaO mulai terbentuk meskipun kalsit masih dominan. Pada suhu $750\text{ }^\circ\text{C}$, intensitas kalsit sangat berkurang signifikan, menandakan dekomposisi parsial. Sedangkan pada suhu $850\text{ }^\circ\text{C}$, kalsit hampir sepenuhnya hilang dan digantikan oleh puncak CaO yang sangat tajam yang menandakan terbentuknya fase kalsium oksida yang lebih dominan.



Gambar 3. Hasil Analisis XRD, Sumber: Kurohman *et al.*, (2025)

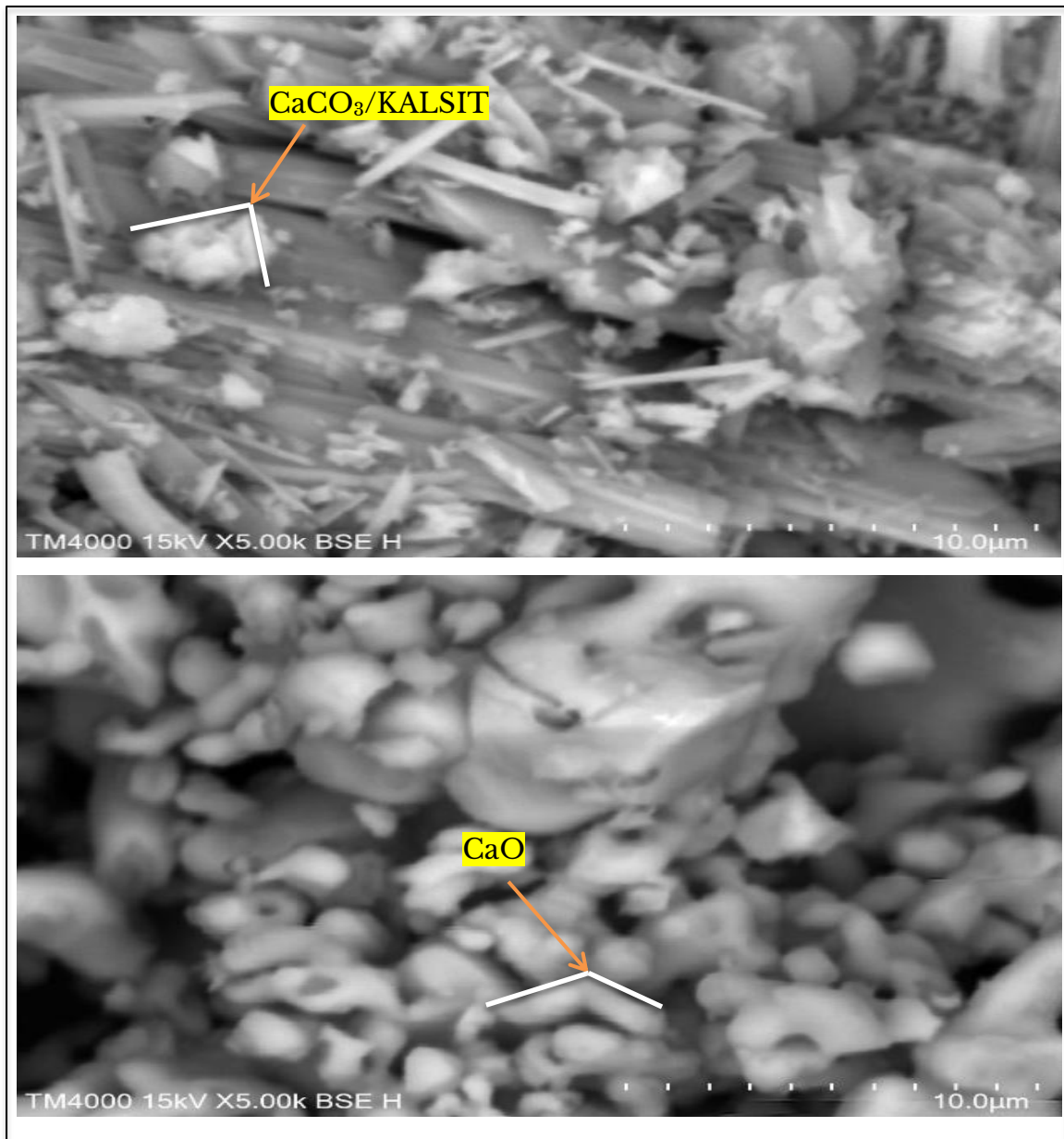
Hasil TG-DTA juga konsisten dengan temuan XRD. Pola termogravimetri menunjukkan tiga tahap utama penurunan berat: (i) pelepasan kelembapan dimulai pada suhu 20 hingga $125\text{ }^\circ\text{C}$, (ii) dekomposisi zat organik antara 125 – $550\text{ }^\circ\text{C}$, dan (iii) dekomposisi CaCO_3 menjadi CaO disertai pelepasan CO_2 pada rentang 550 – $795\text{ }^\circ\text{C}$. Tahap ketiga ini menghasilkan penurunan berat terbesar, sekitar $46,21\%$. Suhu degradasi optimum (ODT) teridentifikasi pada $740\text{ }^\circ\text{C}$, yang menandai titik dekomposisi tercepat dari CaCO_3 .



Gambar 4. Hasil Analisis TG-DTA, Sumber: Kurohman *et al.*, (2025)

Tabel 1. Kehilangan Berat pada *Scallop Uncalcined*,
Sumber: Kurohman *et al.*, (2025)

Sampel	Kehilangan berat			
	Kelembapan (%)	Material organik (%)	CO ₂ (%)	Total (%)
	20-125 °C	125-550 °C	550-795 °C	20-1000 °C
<i>Scallop</i>	0,1	1,8	46,21	48,20



Gambar 5. Transformasi CaCO_3 ke CaO hasil analisis SEM *scallop* pada sebelum proses kalsinasi (atas) dan setelah kalsinasi pada suhu 750°C (bawah)

Analisis SEM pada gambar 5 menunjukkan adanya perubahan permukaan sampel yang mengindikasikan transisi dari fase CaCO_3 menjadi CaO seiring dengan peningkatan suhu kalsinasi. Secara keseluruhan, integrasi hasil XRD, SEM, dan TG-DTA menunjukkan bahwa cangkang *scallop* memiliki potensi besar sebagai sumber alami CaO . Namun demikian, variasi karakteristik termal dan kristalinitas pada limbah cangkang laut perlu diperhatikan secara cermat, karena faktor tersebut sangat berpengaruh terhadap efektivitas dan konsistensi pemanfaatannya sebagai material pengganti semen yang berkelanjutan serta ramah lingkungan.

Tabel 2. Perubahan Fase CaCO₃ ke CaO pada Cangkang *Scallop* Berdasarkan XRD, dan TG-DTA

Metode	<i>Scallop (Pecten maximus)</i>
XRD	<ul style="list-style-type: none"> • Sampel awal: dominan kalsit (90,4%) • 650 °C: CaO mulai muncul (32,2°, 37,1°, 53,8°) • 750 °C: kalsit menurun signifikan • 850 °C: kalsit hilang → dominan CaO
TG-DTA	Tahap kehilangan berat: <ul style="list-style-type: none"> • <125 °C: pelepasan kelembapan (0,1%) • 125–550 °C: dekomposisi organik (1,8%) • 550–795 °C: dekomposisi CaCO₃ (46,21%) • ODT: 740 °C

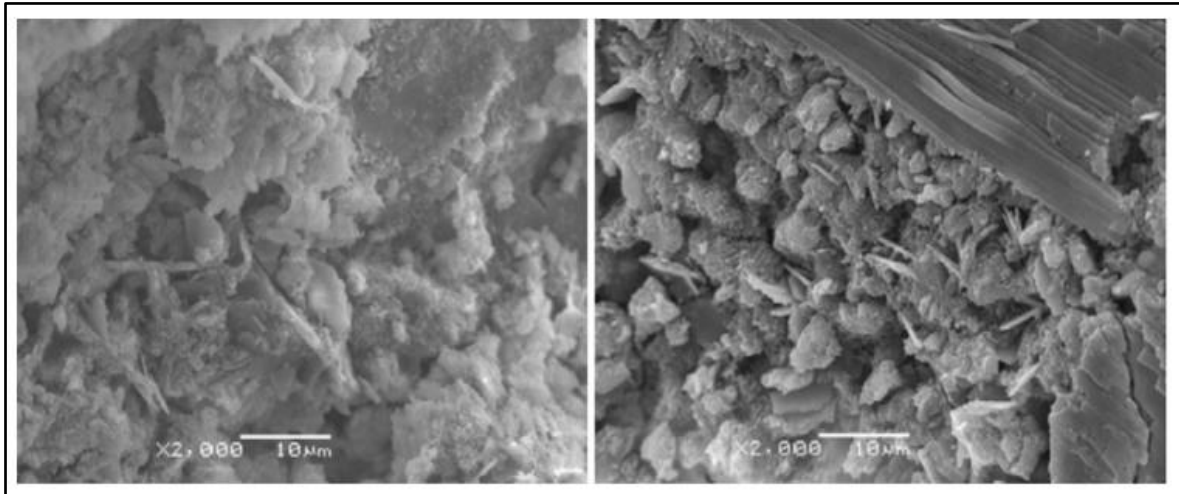
3.2 Kuat Tekan Beton yang Mengandung Cangkang Kerang

Kuat tekan beton merupakan sifat mendasar yang menentukan kualitas dan kelayakan beton sebagai material konstruksi. Parameter ini dipengaruhi oleh komposisi material, kondisi perawatan (*curing*), serta keberadaan bahan tambahan atau zat adiktif (Aitcin, *et al.*, 2019). Pengujian kuat tekan dapat dilakukan dengan metode destruktif maupun non-destruktif, dan kini didukung oleh model prediktif canggih yang meningkatkan akurasi serta efisiensi (Kesete, *et al.*, 2024). Kuat tekan beton menjadi faktor yang sangat penting dalam perancangan struktur, penilaian durabilitas, serta penerapan praktik konstruksi yang efektif dan ekonomis.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Moa *et al.*, (2018), pemanfaatan limbah kerang sebagai pengganti agregat maupun semen pada umumnya dapat menurunkan kuat tekan beton pada umur 28 hari, terutama pada tingkat substitusi yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya luas permukaan agregat cangkang kerang yang membutuhkan lebih banyak pasta semen, serta ikatan yang kurang baik antara pasta semen dengan agregat cangkang tersebut sebagaimana diilustrasikan pada gambar 6. Cuadrado-Rica *et al.*, (2016) melaporkan penurunan kuat tekan sebesar 27% pada beton dengan 60% substitusi agregat menggunakan cangkang scallop. Selain itu, Adegoke *et al.*, (2008) menemukan bahwa penggantian agregat kasar dengan cangkang siput laut hingga 50% dapat menurunkan kuat tekan sebesar 30%.

Sebaliknya, Zhong *et al.*, (2012) telah mengamati adanya *filler effect* dari serbuk cangkang tiram yang mampu memperbaiki distribusi partikel dan mengurangi pori. Pada kadar 5% penggantian semen, kuat tekan meningkat, namun jika penggantian melebihi 5% hingga 20%, kuat tekan kembali menurun akibat berkurangnya kandungan semen. Hasil ini diperkuat oleh Olivia *et al.*, (2017) yang menunjukkan bahwa penambahan 4% serbuk cangkang *cockle* dapat meningkatkan perkembangan kuat mortar. Edalat-Behbahani *et al.*, (2019) juga mengamati bahwa kuat tekan beton pada umur 28 hari meningkat sebesar 3,8%

ketika 100% agregat halus dalam beton digantikan dengan cangkang kerang yang dihancurkan. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa tingkat penggantian optimal adalah sekitar 20% untuk agregat dan 5% untuk semen agar beton maupun mortar tetap memenuhi standar kekuatan yang dipersyaratkan Zhu *et al.*, (2024).



Gambar 6. Perbandingan foto SEM antara beton tanpa *Oyster* (kiri) dan beton dengan penggantian 20% agregat halus menggunakan *Oyster* (kanan) sumber: Moa *et al.*, (2018) dan Kuo *et al.*, (2013)

Tabel 3. Ringkasan Studi Substitusi Cangkang Laut pada Beton dan Dampaknya terhadap Kuat Tekan

Peneliti	Jenis Cangkang	Metode substitusi	Kadar substitusi	Pengaruh terhadap kuat tekan
Cuadrado-Rica <i>et al.</i> , (2016)	<i>Scallop</i>	Agregat kasar	60%	- 27%
Adegoke <i>et al.</i> , (2008)	Siput laut	Agregat kasar	Hingga 50%	- 30%
Zhong <i>et al.</i> , (2012)	<i>Oysters</i>	Semen	5%	+ 5%
Edalat-Behbahani <i>et al.</i> , (2019)	<i>Cockle</i>	Agregat halus	4%	+ 3,8%

3.3 Penerapan Konstruksi Berkelanjutan di Indonesia

The Sustainable Development Goals (SDGs) merupakan 17 tujuan global yang telah ditetapkan organisasi Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) pada tahun 2015 dengan menargetkan di tahun 2030 terdapat penurunan yang signifikan terhadap isu-isu penting seperti kemiskinan, ketidaksetaraan, perubahan iklim, isu degradasi lingkungan, isu perdamaian dan keadilan sosial (Henrisken *et al.*, 2021). Setiap negara diharapkan memiliki tujuan dan indikator yang spesifik terhadap penerapan SDGs. Diharapkan bahwa penerapan SDGs ini dapat dilaksanakan secara maksimal baik ditingkat lokal atau global serta melibatkan peran serta aktif dari pemerintah pusat, pemerintah daerah maupun sektor swasta. Tingkat kesuksesan program SDGs itu juga sangat bergantung pada kerjasama ditingkat global dan keterlibatan yang intensif dari semua pemangku kebijakan guna memujudkan tercapainya target SDGs yang inklusif serta berkelanjutan di tahun 2030 (Swain *et al.*, 2025).



Gambar 7. Target SDGs Sumber ://www.hirosaki-u.ac.jp/en/about/sdgs/

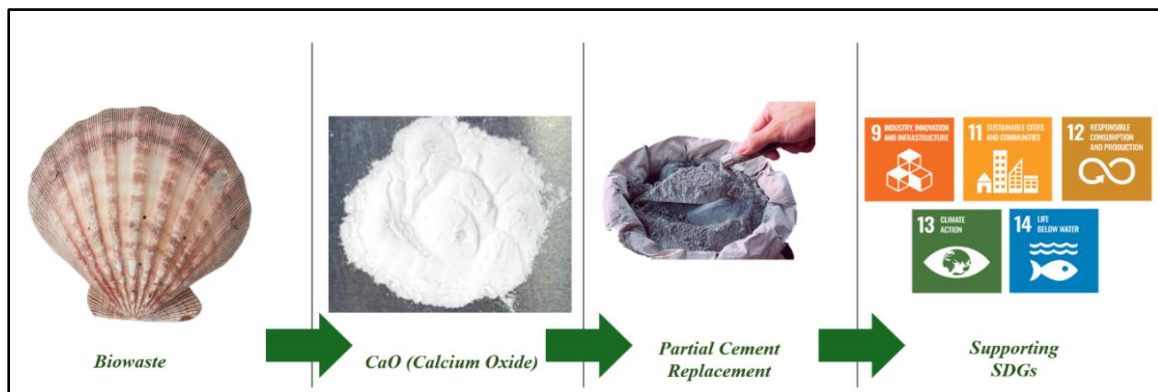
Sejalan dengan pencapaian target SDGs di Indonesia sekaligus untuk mendukung kesejahteraan sosial serta meningkatkan pertumbuhan ekonomi nasional, pemerintah terus membangun infrastruktur di seluruh pelosok negeri. Secara umum, pembangunan infrastruktur di Indonesia sangat bergantung pada semen Portland sebagai bahan pengikat utama beton. Pembangunan berskala masif ini tidak hanya menyebabkan degradasi lingkungan, tetapi juga berpotensi menurunkan kualitas kesehatan masyarakat. Kondisi ini diperburuk dengan polusi udara akibat proses produksi semen yang membutuhkan energi berintensitas tinggi serta melepaskan emisi karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer bebas.

Penelitian ini berfokus pada material ramah lingkungan dengan memanfaatkan limbah *biowaste scallop* sebagai salah satu langkah nyata dalam mengurangi penggunaan semen pada campuran beton. Limbah kerang yang kaya akan CaCO_3 dapat dikalsinasi menjadi CaO yang berfungsi sebagai salah satu bahan penyusun utama semen (Tabel 4.). Dengan demikian, CaO hasil kalsinasi berpotensi digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam beton. Hal ini juga diperkuat dengan hasil investigasi dengan menggunakan mikronalisis seperti XRD, SEM, dan TG-DTA yang menunjukkan bahwa cangkang *scallop* dapat terdekomposisi sempurna melalui proses kalsinasi menjadi sumber alami CaO yang berkelanjutan. Pendekatan ini tidak hanya berpotensi menurunkan konsumsi semen Portland, tetapi juga mengurangi limbah cangkang kerang yang selama ini menjadi permasalahan lingkungan seperti bau yang tidak sedap, sedimentasi serta penurunan kualitas air sungai.

Tabel 4. Daftar Komponen Utama Semen Sumber: MacLaren et al., (2003)

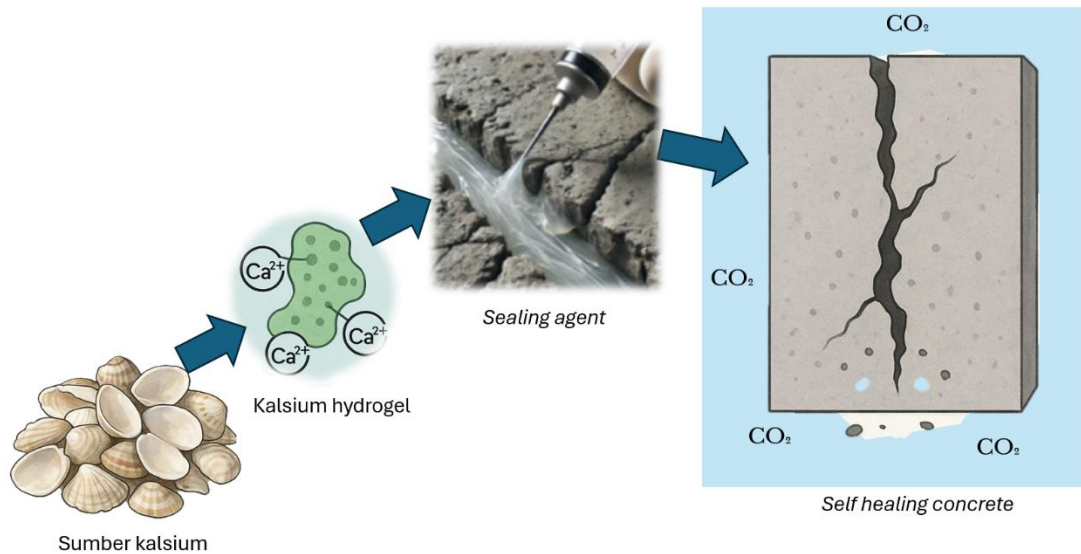
<i>Component Name</i>	<i>Composition</i>	<i>Empirical Formula</i>	<i>Abbreviation</i>
<i>Calcium oxide (lime)</i>	CaO	CaO	C
<i>Silicon dioxide (silica)</i>	SiO_2	SiO_2	S
<i>Aluminum oxide (alumina)</i>	Al_2O_3	Al_2O_3	A
<i>Iron(III) oxide</i>	Fe_2O_3	Fe_2O_3	F
<i>Dicalcium silicate</i>	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Ca_2SiO_4	C_2S
<i>Tricalcium silicate</i>	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Ca_3SiO_5	C_3S
<i>Tricalcium aluminate</i>	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	C_3A
<i>Tetracalcium aluminoferrate (Brownmillerite)</i>	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	C_4AF
<i>Calcium silicate hydrate gel</i>	$(\text{CaO})_x\cdot(\text{SiO}_2)_y\cdot\text{H}_2\text{O}$	Variable	CSH
<i>Calcium silicate (Wollastonite)</i>	$\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	CaSiO_3	CS
<i>Calcium silicate (Rankinite)</i>	$3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2$	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$	C_3S_2
<i>Calcium aluminum silicate (Gehlenite)</i>	$2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	C_2AS
<i>Aluminium silicate (Mullite)</i>	$3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$	$\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$	A_3S_2
<i>Calcium aluminum silicate (Anorthite)</i>	$\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	CAS_2
<i>Aluminium silicate</i>	$2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$	$\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}$	A_2S_2
<i>Calcium aluminate</i>	$\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	CaAl_2O_4	CA
<i>Calcium dialuminate</i>	$\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$	CaAl_4O_7	CA_2
<i>Dodecacalcium septaluminate</i>	$12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$	Cl_2A_7
<i>Calcium hexaluminate</i>	$\text{CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$	CA_6

Pemanfaatan limbah *scallop* sebagai pengganti semen sangat mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDGs) sekaligus mendorong penguatan STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*). Secara mendalam, penelitian ini memberikan andil pada SDGs 9 (*Industry, Innovation, and Infrastructure*) melalui pengembangan material inovatif, SDGs 11 (*Sustainable Cities and Communities*) dengan menghadirkan infrastruktur yang lebih berkelanjutan, serta SDGs 12 (*Responsible Consumption and Production*) melalui penerapan prinsip ekonomi sirkular. Selain itu, SDGs 13 (*Climate Action*) dapat tercapai dengan menurunkan intensitas energi dan emisi dari produksi semen. SDGs 14 (*Life Below Water*) dapat didukung melalui pengurangan limbah cangkang kerang di sungai dan laut. Pada akhirnya, penelitian ini diharapkan membawa solusi nyata bagi konstruksi berkelanjutan di Indonesia, yaitu melalui inovasi material pengganti semen berbasis limbah kerang yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga membantu mengurangi polusi limbah cangkang kerang serta menekan emisi CO₂ di atmosfer.



Gambar 8. Dukungan Pemanfaatan Limbah *Scallop* Terhadap Capaian SDGs di Indonesia

Selain itu, pemanfaatan limbah cangkang kerang *Scallop* sebagai sumber kalsium memberikan potensi yang besar dan berkelanjutan dalam teknologi beton *self-healing concrete*. Kandungan kalsium karbonat (CaCO₃) yang tinggi pada cangkang dapat diolah dan diproses sehingga menghasilkan ion Ca²⁺ yang kemudian diikat dalam matriks hidrogel. Hidrogel berfungsi sebagai media penyimpanan dan pelepas ion kalsium secara bertahap, sehingga mampu menyediakan penyediaan kalsium yang stabil di dalam retakan beton. Selanjutnya, penerapan CO₂ *nanobubbles* diprediksi mampu mempercepat reaksi antara ion Ca²⁺ dan CO₂ untuk membentuk endapan CaCO₃ yang mengisi celah atau retakan mikro. Mekanisme ini memungkinkan beton untuk memperbaiki dirinya secara mandiri, meningkatkan durabilitas, serta mendukung prinsip konstruksi ramah lingkungan melalui pemanfaatan limbah laut sekaligus memitigasi emisi karbon. Selain itu, penggunaan CO₂ didalam proses ini juga dapat diintegrasikan dengan teknologi CCUS (*Carbon Capture, Utilization, and Storage*) yang merupakan teknologi yang dirancang untuk mengurangi emisi CO₂ dari aktivitas industri maupun pembangkit energi atau listrik.



Gambar 9. Potensi Pemanfaatan Limbah *Scallop* Untuk *Self-Healing concrete*

3.4 Batasan Penelitian

Meskipun hasil penelitian menunjukkan prospek yang menjanjikan, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan sebagai berikut:

1. Pertama, penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium sehingga penerapannya pada skala industri perlu dibuktikan lebih lanjut.
2. Kedua, variasi sifat termal dan mineralogi limbah cangkang laut yang dapat berbeda menurut jenis kerang, asal tempat limbah, maupun faktor musiman, berpotensi memengaruhi konsistensi hasil produksi CaO .
3. Ketiga, walaupun suhu kalsinasi $740\text{ }^\circ\text{C}$ relatif lebih hemat energi dibanding suhu yang lebih tinggi, proses ini tetap membutuhkan input energi besar dan menghasilkan emisi CO_2 . Oleh karena itu, strategi yang lain seperti pengembangan metode transformasi bersuhu rendah/*cold sintering* perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan keberlanjutan secara menyeluruh.

Dengan mengkaji lebih dalam lagi mengenai keterbatasan penelitian ini dikemudian hari, diharapkan akan menjadi langkah penting guna memastikan kelayakan dan adopsi industri dari limbah cangkang scallop sebagai material alternatif semen dalam konstruksi berkelanjutan.

4. Kesimpulan & Rekomendasi

4.1. Kesimpulan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa limbah cangkang kerang yang mengandung CaCO_3 dapat terkalsinasi secara sempurna menjadi CaO pada suhu optimum $740\text{ }^\circ\text{C}$. Apabila suhu melebihi batas tersebut, proses kalsinasi berpotensi menyebabkan inefisiensi energi serta pelepasan CO_2 yang lebih besar. Selain itu, sebagai bahan substitusi semen, penggunaan hingga 5% limbah cangkang kerang dalam campuran beton masih mampu mempertahankan *workability* serta kekuatan tekan yang memadai.

Pemanfaatan limbah kerang sebagai material konstruksi yang berkelanjutan memberikan dua manfaat utama: pertama, mengurangi ketergantungan pada semen konvensional yang merupakan salah satu penyumbang emisi global CO₂; kedua, menjadi solusi pengelolaan limbah pesisir laut yang melimpah. Dengan demikian, hasil studi ini juga mendukung prinsip konstruksi berkelanjutan serta memberikan kontribusi nyata pada pencapaian target SDGs 9 (*Industry, Innovation, and Infrastructure*), SDGs 11 (*Sustainable Cities and Communities*), SDGs 12 (*Responsible Consumption and Production*), SDGs 13 (*Climate Action*) dan SDGs 14 (*Life Below Water*) sekaligus mendorong penguatan *STEM* (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*).

Namun demikian, penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pertama, penelitian masih dilakukan pada skala laboratorium sehingga penerapannya pada skala industri perlu dibuktikan lebih lanjut. Kedua, variasi sifat termal dan mineralogi limbah cangkang laut, yang dapat berbeda menurut jenis kerang, asal tempat limbah, maupun faktor musiman, berpotensi memengaruhi konsistensi hasil produksi CaO. Ketiga, walaupun suhu kalsinasi 740 °C relatif lebih hemat energi dibanding suhu yang lebih tinggi, proses ini tetap membutuhkan input energi besar dan menghasilkan emisi CO₂. Oleh karena itu, strategi lain seperti pengembangan metode transformasi bersuhu rendah atau *cold sintering* perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan keberlanjutan secara menyeluruh.

4.2. Rekomendasi

Penelitian lanjutan dimasa depan perlu difokuskan pada variasi kadar penggantian semen dengan CaO dari cangkang kerang untuk mengevaluasi sifat mekanik dan ketahanan jangka panjang beton. Selain itu, uji coba pada proyek konstruksi nyata serta dukungan regulasi dari pemerintah maupun industri konstruksi diperlukan agar potensi penggunaan limbah kerang ini dapat diimplementasikan secara luas dalam pembangunan infrastruktur berkelanjutan di Indonesia.

Ucapan Terima kasih

Penulis dengan hormat menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada supervisor Prof. Choi Heesup dari Kitami Institute of Technology, Japan atas arahan, bimbingan akademik, serta dukungan moral yang telah diberikan. Kontribusi beliau sangat membantu dalam pencapaian hasil yang bermakna dalam studi ini.

Referensi

- Adewuyi, A. P., & Adegoke, T. (2008). Exploratory study of periwinkle shells as coarse aggregates in concrete works. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(6), 1–5.
- Aïtcin, P.-C., & Lessard, J.-M. (2019). The composition and design of high-strength concrete and ultrahigh-strength concrete. In P.-C. Aïtcin (Ed.), *Developments in the formulation and reinforcement of concrete* (pp. 227–250). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102616-8.00008-3>
- Buasri, A., Chaiyut, N., Loryuenyong, V., Worawanitchaphong, P., & Trongyong, S. (2013). Calcium oxide derived from waste shells of mussel, cockle, and scallop as the heterogeneous catalyst for biodiesel production.

- The Scientific World Journal*, 2013, Article 460923, 7 pages. <https://doi.org/10.1155/2013/460923>
- Carrillo, S., Varhen, C., & Ruiz, G. (2017). Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 136, 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.024>
- Chiou, I., Chen, C., & Li, Y. (2014). Using oyster-shell foamed bricks to neutralize the acidity of recycled rainwater. *Construction and Building Materials*, 64, 480–487. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.066>
- Cuadrado-Rica, H., Sebaibi, N., Boutouil, M., & Boudart, B. (2016). Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells. *Materials and Structures*, 49(5), 1805–1816. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0626-8>
- Edalat-Behbahani, A., Soltanzadeh, F., Emam-Jomeh, M., & Soltan-Zadeh, Z. (2019). Sustainable approaches for developing concrete and mortar using waste seashell. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1607780>
- Henriksen, H. Z., Thapa, D., & Elbanna, A. (2021). Sustainable development goals in IS research: Opening the agenda beyond developing countries' research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 33(2), 97–102. <https://aisel.aisnet.org/sjis/vol33/iss2/3>
- Kesete, T., Kanali, C., Okumu, V., & Tekeste, G. (2024). Development of a machine learning-based model for predicting compressive strength of ordinary Portland cement. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 11(3), 94–103. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V11I3P107>
- Kurohman, N., Choi, H., Inoue, M., & Wang, M. (2025, June). *Optimizing calcination temperatures for energy-efficient calcium oxide production from scallop shell waste*. Paper presented at the Bridge Engineering Institute Conference, Paris, France.
- Kuo, W., Wang, H., Shu, C., & Su, D. (2013). Engineering properties of controlled low-strength materials containing waste oyster shells. *Construction and Building Materials*, 46, 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.024>
- MacLaren, D. C., & White, M. A. (2003). Cement: Its chemistry and properties. *Journal of Chemical Education*, 80(6), 623. <https://doi.org/10.1021/ed080p623>
- Moa, K. H., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Lee, S. C., Goh, W. I., & Yuen, C. W. (2018). Recycling of seashell waste in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 162, 751–764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009>
- Olivia, M., Oktaviani, R., & Ismeddiyanto. (2017). Properties of concrete containing ground waste cockle and clam seashells. *Procedia Engineering*, 171, 658–663. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.388>
- Rosli, S. A., et al. (2024, March). Simple thermal treatment of waste oyster (*Crassostrea belcheri*) shells for the production of calcium minerals in biomaterials application. *Nano Biomedicine and Engineering*. <https://doi.org/10.26599/nbe.2024.9290074>
- Swain, R. B., & Dobers, P. (2025). The sustainable development goals: Promise and beyond. In *Routledge handbook of the UN sustainable development goals: Research and policy* (pp. 15–35). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003285472-1>
- Ujwal, M. S., Rudresh, A. N., Sathya, T. P., Shiva Kumar, G., Vinay, A., Sridhar, H. N., & Ramaraju, H. K. (2024). Optimizing the properties of seashell ash powder based concrete using response surface methodology. *Asian Journal of Civil Engineering*, 25(8), 6021–6036. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01160->

- Zhong, B., Zhou, Q., Chan, C., & Yu, Y. (2012). Structure and property characterization of oyster shell cementing material. *Chinese Journal of Structural Chemistry*, *31*(1), 85–92.
- Zhu, Y., Chen, D., Yu, X., Liu, R., & Liao, Y. (2024). Properties of cementitious materials utilizing seashells as aggregate or cement: Prospects and challenges. *Materials*, *17*(5), 1222. <https://doi.org/10.3390/ma17051222>