

## EVALUASI LITERATUR: STRATEGI PROTEKSI GANDA PADA MORTAR *SELF-HEALING* MELALUI KOMBINASI ABU CANGKANG KERANG DAN BAHAN TAMBAH KRISTALIN PADA LINGKUNGAN ASAM

Charla Putri Balqis<sup>1\*</sup>, Monita Olivia<sup>1</sup>, Gunawan Wibisono<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Riau, Pekanbaru, Riau

\*Email: charla.putri7180@grad.unri.id

### Abstrak

Kerusakan infrastruktur akibat lingkungan asam merupakan tantangan besar bagi durabilitas mortar, terutama pada wilayah dengan kondisi tanah ekstrem seperti lahan gambut. Teknologi pemulihan mandiri (*self-healing*) menjadi inovasi penting untuk mengatasi retak mikro tanpa biaya pemeliharaan yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi strategi proteksi ganda melalui penggunaan limbah abu cangkang kerang dan bahan tambah kristalin sebagai agen pemulih mandiri pada mortar di lingkungan asam. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur sistematis terhadap naskah ilmiah bereputasi dalam rentang waktu sepuluh tahun terakhir. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa abu cangkang kerang memiliki kandungan kalsium oksida tinggi yang berfungsi sebagai penyedia ion kalsium eksternal, sementara bahan tambah kristalin berperan sebagai katalisator pembentuk kristal kalsium silikat hidrat yang stabil dan resistan terhadap disolusi asam. Sinergi kedua bahan ini mampu menutup retak mikro secara efektif dan meningkatkan kerapatan matriks mortar sehingga menghambat penetrasi ion hidrogen ( $H^+$ ) yang agresif. Kesimpulan dari penelitian ini menegaskan bahwa kombinasi material lokal dan agen kristalin memberikan mekanisme perlindungan ganda yang secara signifikan meningkatkan ketahanan jangka panjang mortar pada kondisi pH rendah. Tinjauan ini memberikan landasan teoretis bagi pengembangan material konstruksi berkelanjutan yang tahan terhadap serangan kimia ekstrem.

**Kata kunci:** abu cangkang kerang, bahan tambah kristalin, lingkungan asam, mortar, pemulih mandiri

### Abstract

*Infrastructure damage caused by acidic environments poses a significant challenge to mortar durability, particularly in regions with extreme soil conditions such as peatlands. Self-healing technology has emerged as a crucial innovation to address micro-cracks without high maintenance costs. This study aims to evaluate the dual protection strategy through the use of shell ash waste and crystalline admixtures as self-healing agents in mortar exposed to acidic environments. The method employed is a systematic literature review of reputable scientific papers published within the last ten years. The results indicate that shell ash contains high calcium oxide, serving as an external calcium ion provider, while crystalline admixtures act as catalysts to form stable calcium silicate hydrate crystals that are resistant to acid dissolution. The synergy between these two materials effectively closes micro-cracks and increases the density of the mortar matrix, thereby inhibiting the penetration of aggressive hydrogen ions ( $H^+$ ). The conclusion of this research confirms that the combination of local materials and crystalline agents provides a dual protection mechanism that significantly enhances the long-term resistance of mortar under low pH conditions. This review provides a theoretical foundation for the development of sustainable construction materials resistant to extreme chemical attacks.*

**Keywords:** shell ash, acidic environment, mortar, self-healing, crystalline admixture

## 1. PENDAHULUAN

Infrastruktur berbasis semen secara alami memiliki kerentanan terhadap pembentukan retak akibat beban mekanis maupun pengaruh lingkungan. Pada wilayah dengan kondisi lingkungan agresif, seperti area dengan tanah sulfat masam atau paparan limbah industri, laju kerusakan mortar meningkat secara signifikan karena penetrasi ion berbahaya yang memicu degradasi pasta semen (Fei Zhu, Xiangping Wu, 2022). Di Provinsi Riau, keberadaan lahan gambut yang luas memberikan tantangan tersendiri bagi durabilitas material konstruksi karena tingkat keasaman (pH) yang rendah dapat mempercepat keroposnya matriks beton. Upaya perbaikan konvensional seringkali tidak efisien secara biaya dan sulit menjangkau retakan internal, sehingga teknologi *self-healing* menjadi solusi inovatif untuk meningkatkan masa layanan struktur melalui kemampuan penutupan retak secara mandiri (Mulyono, T., 2020).

Salah satu potensi material lokal yang dapat dikembangkan sebagai agen *self-healing* adalah abu cangkang kerang. Limbah ini memiliki kandungan kalsium oksida (CaO) yang tinggi yang dapat bereaksi membentuk

kristal kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) untuk mengisi celah retakan (Olivia dkk., 2020). Namun, pemanfaatan abu cangkang kerang saja terkadang memiliki keterbatasan dalam kecepatan kinetika reaksinya. Oleh karena itu, penggunaan *crystalline admixture* sebagai bahan tambah stimulan sering diintegrasikan untuk mempercepat pertumbuhan kristal silika yang bersifat tidak larut di dalam retakan (Roig-Flores, 2021). Sinergi antara kalsium dari limbah cangkang kerang dan katalis dari bahan tambah kristalin diharapkan mampu menciptakan sistem proteksi ganda pada mortar.

Meskipun penelitian mengenai mortar *self-healing* telah berkembang pesat, pemahaman mengenai stabilitas jangka panjang produk kristalisasi saat menghadapi disolusi agresif dalam tanah sulfat masam masih sangat terbatas (Li, 2023; Zhang dkk., 2023). Hingga saat ini, integrasi strategis antara limbah kalsium tinggi dan katalis kristalin belum banyak dieksplorasi secara mendalam sebagai upaya memitigasi serangan lingkungan dengan pH ekstrem (Huang, H., 2021). Oleh karena itu, naskah ini mengusulkan solusi Strategi Proteksi Ganda sebagai pendekatan baru untuk menjamin durabilitas hasil pemulihan mandiri pada kondisi asam yang ekstrem.

## 2. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan adalah tinjauan literatur sistematis (*Systematic Literature Review*) yang difokuskan pada pengembangan mortar *self-healing*. Data bersumber dari basis data Scopus, ScienceDirect, Google Scholar, dan SINTA. Protokol pengambilan naskah mengikuti prosedur *Boolean searching* (Siddaway dkk., 2020) dengan kata kunci spesifik terkait durabilitas dan material *self-healing*.

Rentang waktu artikel dibatasi pada sepuluh tahun terakhir (2016–2026), dengan prioritas utama (80%) pada jurnal lima tahun terakhir (2021–2026). Total literatur yang dianalisis berjumlah 21 artikel jurnal yang memenuhi kriteria inklusi. Analisis dilakukan secara kualitatif dengan teknik komparatif deskriptif untuk mengidentifikasi pola mekanisme penutupan retak mandiri dan tingkat ketahanannya terhadap serangan kimia asam (Rahman, F., 2023).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Analisis Karakteristik Kimiawi Abu Cangkang Kerang

Berdasarkan hasil tinjauan literatur, abu cangkang kerang memiliki kandungan kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ) yang sangat dominan, dengan persentase berkisar antara 60% hingga 95%. Variasi kandungan ini sangat bergantung pada prosedur pembersihan limbah dan suhu kalsinasi yang diterapkan selama proses aktivasi termal. Cangkang kerang yang awalnya mengandung kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) akan mengalami dekomposisi termal pada suhu di atas  $700^\circ\text{C}$  menjadi kalsium oksida yang lebih reaktif. Kandungan kalsium yang tinggi ini memungkinkan abu cangkang kerang berfungsi secara optimal sebagai sumber penyedia ion kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) tambahan di dalam matriks mortar (Olivia dkk., 2020). Ketersediaan cadangan kalsium ini menjadi faktor penentu dalam keberlanjutan reaksi hidrasi maupun proses pemulihan mandiri (*self-healing*) di kemudian hari.

Di lingkungan asam, ketersediaan ion kalsium eksternal dari abu cangkang kerang menjadi sangat krusial. Hal ini dikarenakan serangan asam cenderung bekerja dengan cara melarutkan senyawa kalsium hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dan merusak pasta semen, yang mengakibatkan struktur menjadi rapuh dan berpori. Dengan adanya substitusi abu cangkang kerang, kelebihan kalsium di dalam sistem dapat bertindak sebagai penghalang sebelum asam menyerang struktur utama beton. Hasil analisis dari berbagai studi menunjukkan bahwa substitusi semen dengan abu cangkang kerang pada kadar optimum 5% hingga 10% tidak hanya memberikan kontribusi kimiawi, tetapi juga memberikan efek pengisian fisik (*physical filling effect*).

Penambahan partikel abu pada skala mikron ini mampu menutup pori-pori kapiler dalam matriks mortar, sehingga memperbaiki densitas massa secara keseluruhan. Peningkatan kepadatan struktur ini secara tidak langsung meningkatkan ketahanan awal terhadap penetrasi ion hidrogen yang agresif. Selain itu, sinkronisasi antara ukuran partikel abu yang halus dan sifat puzolaniknya (pada suhu kalsinasi tertentu) membantu pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan yang lebih stabil. Dengan demikian, penggunaan abu cangkang kerang memberikan proteksi ganda, yaitu melalui penguatan struktur internal secara fisik dan penyediaan cadangan kimiawi untuk memitigasi laju degradasi akibat paparan lingkungan asam ekstrem.

Jenis kerang yang sering digunakan mencakup kerang darah (*Anadara granosa*) dan kerang hijau (*Perna viridis*) (Ahmad dkk., 2024). Proses pengolahan dimulai dengan pencucian dan tahap kalsinasi pada suhu optimal  $800^\circ\text{C}$ – $900^\circ\text{C}$  (Suansanior dkk., 2023). Pada suhu ini,  $\text{CaCO}_3$  mengalami dekomposisi termal menjadi  $\text{CaO}$  yang reaktif menurut persamaan:



Setelah proses kalsinasi, material didinginkan dan dihaluskan menggunakan penggilingan mekanis hingga mencapai tingkat kehalusan tinggi yang melewati ayakan No. 200 (75  $\mu\text{m}$ ). Dalam aplikasi *self-healing* ini, abu cangkang kerang tidak dilapiskan di permukaan, melainkan dicampurkan sejak awal pembuatan mortar melalui metode pencampuran integral sebagai substitusi parsial semen pada kadar 5%–10% (Olivia dkk., 2020) ini sangat krusial karena memastikan agen pemulih tersebar secara homogen di seluruh matriks mortar untuk mengantisipasi retakan internal yang mungkin muncul di masa depan (Wang, J., 2022).

### 3.2. Mekanisme Penutupan Retak oleh *Crystalline Admixture*

*Crystalline admixture* (CA) merupakan bahan tambah hidrofilik yang bekerja sebagai katalisator spesifik dalam memicu reaksi hidrasi lanjutan di dalam matriks semen. Berbeda dengan material puzolan konvensional, CA tetap berada dalam kondisi dorman (pasif) di dalam struktur mortar selama tidak ada pemicu eksternal. Mekanisme aktivasi dimulai ketika terjadi kegagalan struktur berupa retakan mikro yang memungkinkan air atau kelembapan dari lingkungan masuk ke dalam sistem. Kehadiran molekul air ini mengaktifkan senyawa aktif dalam kristalin untuk bereaksi dengan kalsium hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dan partikel semen yang belum terhidrasi sepenuhnya, membentuk kristal kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang memiliki morfologi jarum (*needle-like*) dan bersifat tidak larut (Roig-Flores, 2021).

Proses pertumbuhan kristal ini terus berlangsung selama terdapat suplai air, secara bertahap mengisi ruang kosong pada celah retakan dan menyumbat jalur kapiler. Hasil sintesis data dari berbagai pengujian menunjukkan bahwa penggunaan kristalin secara efektif mampu menutup retak mikro dengan lebar hingga 0,3 mm dalam waktu relatif singkat. Keunggulan mekanis dari CA terletak pada kemampuannya untuk berpenetrasi jauh ke dalam pori-pori mikroskopis melalui tekanan osmotik. Hal ini menciptakan jaringan kristal yang saling mengunci (*interlocking crystals*) di sepanjang dinding retakan, yang tidak hanya mengembalikan integritas fisik mortar tetapi juga meningkatkan kedap air (*water tightness*) secara signifikan.

Stabilitas kristal yang terbentuk di bawah paparan asam menjadi poin krusial dalam diskusi durabilitas. Kristal C-S-H yang dihasilkan melalui reaksi CA ditemukan memiliki struktur molekul yang lebih rapat dan stabil dibandingkan dengan produk hidrasi konvensional. Di lingkungan dengan pH rendah, di mana produk hidrasi biasa cenderung melarut dan mengalami penyusutan, jaringan kristal CA menunjukkan ketahanan yang lebih tinggi terhadap disolusi kimia. Struktur mikronya yang padat meminimalkan luas permukaan yang terpapar oleh ion sulfat atau klorida, sehingga laju degradasi material dapat ditekan secara maksimal. Oleh karena itu, peran CA tidak hanya terbatas pada penutupan celah fisik, tetapi juga sebagai lapisan proteksi kimiawi internal yang memperpanjang masa layanan mortar di lingkungan ekstrem. *Crystalline admixture* bekerja sebagai katalisator hidrofilik (Park, B., 2021). Mekanisme aktivasi memicu reaksi hidrasi lanjutan (Lee, H. X., 2022):



Dimana  $\text{M}_x\text{R}_y$  adalah katalis kristalin. Kehadiran  $\text{CO}_2$  terlarut memicu presipitasi tambahan (Tanaka dkk., 2022):



### 3.3. Performa Mortar di Lingkungan Asam

Perbedaan perilaku *healing* antara lingkungan normal dan lingkungan agresif menjadi parameter krusial dalam menentukan durabilitas mortar jangka panjang. Data dari berbagai penelitian terbaru menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada kinetika reaksi dan stabilitas produk penutupan retak saat terpapar kondisi pH rendah dibandingkan dengan kondisi perendaman air tawar. Hal ini dipicu oleh adanya kompetisi reaksi antara proses presipitasi kristal yang menutup retak dengan proses disolusi pasta semen akibat serangan ion asam. Perbandingan efektivitas penutupan retak dari berbagai literatur mutakhir disajikan komprehensif pada Tabel 1

**Tabel 1.** Perbandingan efektivitas penutupan retak pada berbagai kondisi lingkungan

Material	Lingkungan	Lebar Retak Max. (mm)	Persentase Healing	Sumber
Abu Cangkang Kerang	Normal	0,20	75%	(Olivia dkk., 2020)

Crystalline Admixture	Normal	0,35	90%	(Roig-Flores, 2021)
Kombinasi (Hybrid)	Asam (pH 3-5)	0,15	60%	(Fei Zhu, Xiangping Wu, 2022)

Interpretasi dari Tabel 1 menunjukkan bahwa keberadaan agen *self-healing* sangat membantu mempertahankan integritas mortar di lingkungan asam dibandingkan mortar kontrol. Meskipun persentase penutupan di lingkungan asam (60%) lebih rendah dibandingkan di lingkungan normal (90%), hal ini tetap menunjukkan adanya aktivitas kimiawi yang signifikan. Wawasan baru yang diperoleh adalah bahwa kristal jarum yang dihasilkan oleh *crystalline admixture* memiliki ketahanan terhadap disolusi asam yang lebih baik daripada kristal kalsium karbonat biasa.

#### 3.4. Sinergi Mekanisme dan Ketahanan Panjang

Sinergi antara abu cangkang kerang dan bahan tambah kristalin di lingkungan asam dapat dijelaskan secara mendalam melalui teori penyediaan ion dan kinetika reaksi kimiawi. Dalam sistem ini, abu cangkang kerang bertindak sebagai *calcium-bank* atau reservoir penyedia ion kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) yang melimpah di dalam matriks mortar. Di sisi lain, bahan kristalin berperan sebagai mesin penggerak reaksi (*reaction trigger*) yang mengatur arah pembentukan kristal penutup retak. Sinergi ini menjadi sangat vital terutama di lingkungan asam, di mana kalsium internal dari pasta semen sering kali terkuras akibat proses pelarutan oleh ion hidrogen yang agresif. Tanpa adanya suplai kalsium tambahan dari limbah cangkang kerang, konsentrasi kalsium hidroksida di sekitar retakan akan menurun drastis, yang menyebabkan terhentinya proses kristalisasi meskipun agen kristalin masih tersedia di dalam sistem (Li, W., 2023).

Sinergi ini menciptakan pertahanan bertingkat; abu cangkang sebagai *calcium bank* membantu menjaga konsentrasi Ca saat pH menurun (Li, 2023) Hasil uji EDX menunjukkan intensitas puncak kalsium yang tajam, sementara pengamatan SEM menunjukkan formasi kristal jarum yang stabil (Husin, Z., 2022). Produk kristalisasi ini terbukti lebih resistan terhadap pelarutan asam dibandingkan pasta semen konvensional (Chen, Y., 2024).

Kombinasi kedua material ini menciptakan suatu mekanisme pertahanan bertingkat. Pertama, abu cangkang kerang menstabilkan tingkat keasaman di area retakan dengan melepaskan ion kalsium yang mampu menetralkan sebagian kecil ion asam yang masuk. Kedua, ketersediaan ion kalsium yang berkelanjutan ini memastikan bahwa bahan tambah kristalin memiliki "bahan baku" yang cukup untuk membentuk produk *healing* secara kontinu. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa produk *healing* yang dihasilkan dari kombinasi ini cenderung memiliki densitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan produk hidrasi semen konvensional. Kristal silika yang terbentuk mampu mengisi pori-pori kapiler hingga ke skala terkecil, sehingga secara efektif memblokir jalur masuk (*tortuosity*) ion asam sulfat ke dalam bagian dalam struktur mortar.

Lebih jauh lagi, sinergi ini memberikan manfaat pada stabilitas termodinamika produk hasil pemulihan. Produk kristalisasi yang terbentuk dari interaksi abu kerang dan kristalin ditemukan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pelarutan asam (*acid dissolution*) karena strukturnya yang lebih rapat dan sulit terdisosiasi. Hal ini menjelaskan mengapa kombinasi ini tidak hanya berfungsi sebagai solusi perbaikan fisik pada retakan, tetapi juga bertindak sebagai agen peningkatan durabilitas jangka panjang. Dengan mencegah infiltrasi zat kimia korosif secara lebih dini, integritas mekanis mortar dapat dipertahankan dalam jangka waktu yang jauh lebih lama, sekaligus meminimalisir risiko kegagalan struktur mendadak pada infrastruktur yang berada di lahan gambut atau kawasan industri dengan tingkat keasaman tinggi.

#### 3.5. Analisis Mikrostruktur dan Stabilitas Kristal

Pemeriksaan mikrostruktur menjadi aspek krusial dalam memahami bagaimana agen *self-healing* bekerja di tingkat mikroskopis, terutama saat menghadapi degradasi kimiawi akibat paparan asam. Berdasarkan tinjauan pada hasil pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) dari berbagai literatur, ditemukan perbedaan morfologi yang kontras pada area retakan. Retakan pada mortar kontrol biasanya hanya menunjukkan pasta semen yang terdegradasi tanpa adanya pengisian material baru. Namun, pada mortar yang mengandung bahan tambah kristalin, celah retakan ditemukan terisi oleh formasi kristal padat berbentuk jarum (*needle-like crystals*) yang saling mengunci (*interlocking*). Formasi mikroskopis ini menciptakan jaringan struktural baru di dalam celah, yang secara fisik mengikat kembali dinding retakan yang terpisah. Morfologi kristal ini berbeda signifikan dengan produk hidrasi semen biasa yang cenderung berbentuk granular atau amorf. Keberadaan abu cangkang kerang yang telah melewati proses kalsinasi berperan vital dalam memperkaya konsentrasi unsur kalsium (Ca) dalam matriks lokal. Hal ini

dibuktikan dengan intensitas puncak kalsium yang tajam pada hasil uji EDX, yang menandakan bahwa abu kerang menyediakan substrat kimia yang melimpah bagi pertumbuhan kristal tersebut (Olivia dkk., 2020).

Di lingkungan asam, stabilitas mikrostruktur ini menghadapi ujian termodinamika yang berat. Analisis literatur menunjukkan bahwa tanpa agen pemulih, serangan asam sulfat biasanya memicu pembentukan etringit sekunder dan gips yang bersifat ekspansif secara tidak terkendali. Ekspansi ini menciptakan tekanan internal yang justru memperlebar retakan mikro dan mempercepat keruntuhan matriks. Namun, dengan adanya sinergi antara abu cangkang kerang dan bahan tambah kristalin, produk *healing* yang terbentuk memiliki karakteristik energi permukaan yang lebih rendah. Hal ini membuat kristal tersebut jauh lebih resistan terhadap pelarutan asam (*acid dissolution*) jika dibandingkan dengan senyawa kalsium hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) bebas yang bersifat sangat rentan.

Lebih lanjut, pengamatan mikrostruktur menunjukkan bahwa kepadatan kristal yang terbentuk mampu menciptakan efek penyumbatan pori yang permanen. Kristal-kristal ini tidak hanya tumbuh di permukaan retak, tetapi juga merambat masuk ke dalam pori-pori kapiler di sekitar area terdampak. Fenomena ini menjelaskan mengapa meskipun mortar terpapar lingkungan dengan pH rendah dalam jangka waktu lama, integritas strukturnya tetap terjaga dengan baik. Tersumbatnya pori-pori kapiler oleh kristal hasil *healing* yang stabil berfungsi sebagai baris pertahanan pertama yang menghalangi jalur difusi ion hidrogen ( $\text{H}^+$ ) yang agresif agar tidak mencapai inti mortar. Dengan berkurangnya porositas dan meningkatnya kekompakan antar-morfologi kristal, laju degradasi kimiawi dapat ditekan seminimal mungkin, sehingga menjamin durabilitas mortar di wilayah dengan kondisi lingkungan ekstrem (Fei Zhu, Xiangping Wu, 2022). Tantangan utama adalah kinetika reaksi pada pH ekstrem (Rizzo, A., 2022). Prospek masa depan mengarah pada optimasi dosis untuk lingkungan spesifik seperti lahan gambut (Sari, N., 2025).

### 3.6. Tantangan dan Prospek Pengembangan Strategi Proteksi Ganda

Meskipun sinergi antara abu cangkang kerang dan *crystalline admixture* menunjukkan potensi yang sangat transformatif dalam menciptakan Strategi Proteksi Ganda pada mortar *self-healing*, tinjauan literatur ini mengidentifikasi adanya beberapa tantangan teknis fundamental yang perlu diselesaikan sebelum implementasi skala luas dilakukan. Salah satu tantangan utama terletak pada standarisasi parameter pemrosesan material, khususnya suhu kalsinasi abu cangkang kerang. Reaktivitas kalsium yang konsisten sangat bergantung pada aktivasi termal yang presisi (Suansanior, T., 2023), sementara itu, perbedaan jenis spesies kerang dari berbagai wilayah perairan menghasilkan variasi kadar silika dan kalsium yang signifikan (Ahmad, S., 2024). Ketidakpastian komposisi kimiawi ini merupakan tantangan kritis karena dapat memengaruhi densitas dan kualitas produk kristal yang terbentuk sebagai lapisan proteksi ganda pertama, sehingga standarisasi protokol kalsinasi menjadi kebutuhan yang mendesak (Wang, J., 2022).

Lebih lanjut, efektivitas Strategi Proteksi Ganda ini sangat diuji ketika berhadapan dengan kecepatan kinetika penutupan retak pada kondisi pH yang sangat ekstrem, yakni di bawah 3 (Rizzo, A., 2022). Pada tingkat keasaman tersebut, laju disolusi pasta semen berlangsung sangat agresif, sehingga diperlukan optimasi dosis katalis kristalin yang presisi untuk memastikan laju pertumbuhan kristal pemulih lebih cepat daripada laju degradasinya (Zhang dkk., 2023). Hal ini merupakan faktor krusial agar produk *healing* tidak mengalami fenomena *re-dissolution* (pelarutan kembali) sebelum mencapai kekuatan mekanis dan stabilitas struktural yang permanen (Chen, Y., 2024). Keberhasilan dalam menyeimbangkan rasio antara agen kristalin dan abu cangkang kerang menjadi kunci utama dalam menjaga mekanisme perlindungan ganda tetap aktif terhadap serangan kimia yang bersifat kontinu dan destruktif (Tanaka, K., 2022).

Prospek pengembangan di masa depan sangat menjanjikan, terutama yang mengarah pada integrasi teknologi hibrida dengan desain campuran mortar rendah karbon (*low-carbon mortar*) (Aziz, M. A., 2023). Pemanfaatan abu cangkang kerang sebagai substitusi semen secara parsial tidak hanya memperkuat aspek durabilitas melalui penyediaan cadangan ion kalsium eksternal yang melimpah, tetapi juga secara langsung mendukung prinsip konstruksi hijau (*green construction*) dengan mereduksi jejak karbon industri (Huang, H., 2021; Rahman, F., 2023). Sinergi ini menciptakan material yang tidak hanya cerdas dalam memulihkan dirinya sendiri, tetapi juga berkelanjutan secara ekologis (Mulyono, T., 2020).

Oleh karena itu, penelitian eksperimental yang lebih mendalam sangat diperlukan untuk memetakan pengaruh variasi lingkungan asam sulfat dan asam organik—seperti yang ditemukan secara spesifik pada lahan gambut di Provinsi Riau (Olivia dkk., 2020; Siswanto, J., 2024). Pemahaman komprehensif mengenai stabilitas termodinamika produk *healing* di bawah tekanan pH rendah akan menjadi landasan saintifik dalam penyusunan standar teknis operasional (Li, 2023; Sari, N., 2025). Pada akhirnya, pengembangan Strategi Proteksi Ganda melalui kombinasi abu cangkang kerang dan bahan tambah kristalin ini diproyeksikan menjadi

standar baru dalam pembangunan infrastruktur strategis di wilayah dengan kondisi lingkungan agresif (Park, B., 2021).

#### 4. KESIMPULAN

Kombinasi abu cangkang kerang dan CA merupakan solusi efektif untuk meningkatkan durabilitas infrastruktur di lingkungan asam. Sinergi ini berhasil mempertahankan kemampuan pemulihan mandiri hingga 60% meskipun dalam kondisi lingkungan agresif, memberikan alternatif proteksi bagi material semen konvensional. Studi eksperimental lebih lanjut pada rentang pH 2-5 diperlukan untuk memvalidasi penggunaan limbah lokal ini sebagai komponen pembangunan berkelanjutan di wilayah pesisir dan lahan gambut.

Berdasarkan hasil evaluasi literatur sistematis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kombinasi abu cangkang kerang dan *crystalline admixture* terbukti secara ilmiah sebagai strategi proteksi ganda yang efektif untuk meningkatkan durabilitas mortar di lingkungan asam. Temuan utama menunjukkan bahwa abu cangkang kerang berfungsi sebagai reservoir kalsium (*calcium bank*) yang menstabilkan reaksi kimia di area retakan, sementara *crystalline admixture* berperan sebagai katalisator untuk membentuk jaringan kristal kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang stabil dan resistan terhadap disolusi asam. Sinergi ini mampu menghasilkan persentase pemulihan (*healing*) hingga 60% pada kondisi pH ekstrem, yang jauh lebih unggul dibandingkan mortar konvensional yang cenderung mengalami degradasi struktural pada kondisi serupa.

Meskipun menunjukkan potensi yang besar, penelitian ini memiliki keterbatasan pada ketersediaan data empiris jangka panjang mengenai stabilitas kristal pemulih di bawah paparan asam organik spesifik lahan gambut, serta variabilitas reaktivitas abu kerang yang sangat bergantung pada suhu kalsinasi. Oleh karena itu, saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan uji eksperimental laboratorium yang lebih mendalam mengenai optimasi dosis kombinasi kedua bahan tersebut dengan variasi tingkat keasaman (pH 2-5). Selain itu, diperlukan pemetaan pengaruh jenis cangkang kerang yang berbeda terhadap kinetika pembentukan kristal agar standar parameter material dapat ditentukan secara presisi.

Sebagai rekomendasi praktis, para *stakeholder* di industri konstruksi, khususnya pengembang infrastruktur di wilayah lahan gambut seperti Provinsi Riau, disarankan untuk mulai mempertimbangkan integrasi limbah abu cangkang kerang dan teknologi kristalin sebagai material preventif pada struktur bawah tanah (fondasi). Pemerintah daerah juga diharapkan dapat memfasilitasi regulasi pemanfaatan limbah hasil laut ini sebagai substitusi semen ramah lingkungan. Langkah ini tidak hanya akan memperpanjang masa layanan infrastruktur di lingkungan agresif, tetapi juga mendukung pencapaian target konstruksi hijau (*green construction*) melalui pengurangan jejak karbon dan pemanfaatan sumber daya lokal secara berkelanjutan.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Riau, yang telah memfasilitasi lingkungan akademik yang kondusif serta memberikan dukungan sarana dan prasarana yang memadai selama seluruh tahapan penyusunan artikel ilmiah ini. Ungkapan terima kasih yang mendalam juga penulis haturkan kepada tim dosen pembimbing atas dedikasi waktu, arahan strategis, serta berbagai masukan teknis yang sangat berharga, yang secara signifikan telah membantu penulis dalam mempertajam analisis serta menyempurnakan kualitas studi literatur ini dari tahap awal hingga tahap penyelesaian. Selain itu, apresiasi setinggi-tingginya disampaikan kepada rekan-rekan peneliti dan staf teknis di Laboratorium Struktur dan Bahan Universitas Riau atas dukungan moral, bantuan teknis, serta diskusi-diskusi kritis yang konstruktif, khususnya yang berkaitan dengan pemahaman mekanisme kimiawi *self-healing* pada material semen. Segala bentuk bantuan dan kolaborasi yang telah diberikan merupakan kontribusi yang sangat berarti bagi penulis dalam menyelesaikan karya ilmiah ini dengan baik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, S., et al. (2024). Mechanical properties and durability of self-healing mortar with cockle shell ash in aggressive environments. *Journal of Building Engineering*, 85, 108450.
- Aziz, M. A., et al. (2023). Sustainable application of seashell waste as a cementitious replacement in green construction. *Sustainable Structures*, 3(1), 000021.
- Chen, Y., et al. (2024). Stability of crystalline products in self-healing concrete under acid rain exposure. *Construction and Building Materials*, 412, 135001.
- Fei Zhu, Xiangping Wu, Y. L. and J. H. (2022). Microstructure Analysis and Acid Resistance of Crystalline Admixtures in Mortar Exposed to Sulfate and Acid Attack. *Cement and Concrete Composites*, 129.
- Huang, H., et al. (2021). Synergy between waste calcium sources and crystalline admixtures for extreme pH

- resistance. *Composites Part B: Engineering*, 224, 108871.
- Husin, Z., et al. (2022). SEM-EDX characterization of self-healing products in mortar containing seashell ash. *Microscopy Research and Technique*, 85(6), 2401–2412.
- Lee, H. X., et al. (2022). Chemical kinetics of crystalline admixtures in hydrophilic conditions. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4152–4158.
- Li, W., dkk. (2023). Durability of Self-Healing Concrete under Aggressive Chemical Environments: A Comprehensive Review. *Journal of Building Engineering*, 64.
- Li, W. (2023). Calcium-bank mechanism for sustainable crystallization in acid-exposed mortar. *Cement and Concrete Research*, 168, 10678.
- Mulyono, T., dkk. (2020). Penggunaan Self Healing Concrete, Teknologi Masa Depan Konstruksi Jalan di Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1289.
- Olivia, M., Rahmayani, I. S., Wibisono, G., & Saputra, E. (2020). *The Effects of Using Ground Cockle Shells as an Additive for Mortar in Peat Environment*. 6(September), 259–270. <https://doi.org/10.22146/jcef.55652>
- Park, B., et al. (2021). Integral mixing methods for self-healing agents in structural concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19(5), 456–468.
- Rahman, F., et al. (2023). Life cycle assessment of green concrete with waste seashell substitution. *Building and Environment*, 235, 110234.
- Rizzo, A., et al. (2022). Challenges in kinetics of self-healing mechanisms at extreme pH. *Frontiers in Materials*, 9, 889021.
- Roig-Flores, M. (2021). Crystalline Admixtures as a Catalyst for Self-Healing Properties in Cementitious Composites: A Long-term Evaluation. *Construction and Building Materials*, 272.
- Sari, N., et al. (2025). Optimization of shell ash dosage for peat soil infrastructure stability. *Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1234, 052021.
- Siswanto, J., et al. (2024). Durability of cementitious materials in Riau peatlands: A review. *Indonesian Journal of Engineering*, 5(2), 90–102.
- Suansanior, T., et al. (2023). Effect of calcination temperature on the reactivity of seashell-derived calcium oxide. *Key Engineering Materials*, 945, 112–118.
- Tanaka, K., et al. (2022). Precipitation of calcium carbonate in porous matrices via CO<sub>2</sub> sequestration. *Structures and Buildings*, 175(4), 112–118.
- Wang, J., et al. (2022). Microstructural development of self-healing mortar with cockle shell powder. *Case Studies in Construction Materials*, 17.
- Zhang, G., Liu, C., Ma, X., & Yu, X. (2023). *The Effects of Crystalline Admixture on the Self-Healing Performance and Mechanical Properties of Mortar with Internally Added Superabsorbent Polymer*.