

Terbit *online* pada laman:

SEMINAR NASIONAL INOVASI, RISET, DAN TEKNOLOGI (SINERGI)



Original/Literature Review

EFISIENSI *SELF-HEALING* MORTAR DENGAN ABU CANGKANG KERANG LOKAN DAN *SILICA FUME* TERHADAP PAPARAN ASAM SULFAT

Veronika Hidayatun, Monita Olivia*, Gunawan Wibisono

Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi : 16 September 2025

Revisi Akhir : 20 Oktober 2025

Diterbitkan *Online* : 27 Oktober 2025

KATA KUNCI

Mortar, efisiensi *self-healing*, kuat tekan, abu cangkang kerang lokan, *silica fume*, asam sulfat

*KORESPONDENSI

E-mail: monita.olivia@lecturer.unri.ac.id

A B S T R A K

Lingkungan asam seperti saluran drainase dan instalasi pengolahan air limbah terbentuk dari oksidasi gas H_2S menjadi asam sulfat (H_2SO_4), bereaksi dengan kalsium hidroksida (CH) membentuk gipsum dan etringit. Reaksi ini menyebabkan ekspansi, retak, dan dekalsifikasi C-S-H sehingga menurunkan durabilitas mortar. Teknologi self-healing menawarkan perbaikan retak secara mandiri sehingga mengurangi biaya pemeliharaan. Abu cangkang kerang lokan diperoleh dari limbah cangkang kerang lokan (Polymesoda expansa) yang dikalsinasi menghasilkan kalsium oksida (CaO). Kandungan CaO terbukti dapat meningkatkan mekanisme self healing seperti pada limestone. Silica fume berperan memperhalus pori dan meningkatkan densitas matriks sehingga keduanya dapat memperkuat mekanisme self-healing. Penelitian ini menguji kemampuan penutupan retak mortar dalam larutan H_2SO_4 pH 4 pada mortar kontrol (PCC) dan mortar dengan kombinasi 5% abu cangkang kerang lokan serta 10% silica fume (PCC-5CSA-10SF) terhadap berat semen. Benda uji direndam 28 hari, diberi retak terkontrol 0,1–0,3 mm, lalu direndam statis dalam larutan H_2SO_4 PH 4 selama 0, 7, dan 28 hari. Hasil menunjukkan bahwa mortar PCC-5SS-10SF memiliki efisiensi self-healing jauh lebih tinggi dibanding mortar kontrol. Mortar PCC hanya mencapai penutupan retak sebesar 4 % pada umur 7 hari dan 11 % pada umur 28 hari, sedangkan mortar PCC-5SS-10SF mencapai 69 % pada umur 7 hari dan meningkat hingga 91% pada umur 28 hari. Sedangkan, penurunan kuat tekan pada PCC-5CSA-10SF hanya 3% pada 28 hari, jauh lebih kecil dibanding PCC yang mencapai 7%, hal ini menunjukkan adanya kontribusi ganda: CaO dari abu cangkang kerang menghasilkan endapan kalsium karbonat yang mengisi retak, sementara silica fume meningkatkan densitas mikrostruktur melalui pembentukan C-S-H sekunder, sehingga menghambat penetrasi asam dan menjaga stabilitas produk hidrasi. Dengan demikian, kombinasi keduanya tidak hanya mempercepat penutupan retak, tetapi juga meningkatkan ketahanan terhadap serangan asam.

No ISSN 3124-7539 © 2025 The Authors. Dipublikasi oleh Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>)

Peer review under the responsibility of the scientific committee of the SINERGI

DOI: 10.21009/sinergi.v1i1.61383

1. PENDAHULUAN

Menurut SNI 03-6825-2002, mortar adalah campuran yang terdiri dari agregat halus (pasir), bahan perekat (seperti semen portland, kapur, atau tanah liat), dan air, dengan komposisi tertentu untuk digunakan sebagai pengikat dalam konstruksi [1] dan durabilitas mortar sangat menentukan umur layan struktur [2]. Retakan pada mortar mempercepat penetrasi ion agresif, kelembapan, dan asam, yang berakibat pada menurunnya kerapatan mikrostruktur serta memperbesar risiko degradasi [3]. Misalnya pada struktur seperti saluran drainase dan instalasi pengolahan air limbah (IPAL), paparan gas H₂S dari aktivitas mikrobiologis dapat teroksidasi menjadi asam sulfat (H₂SO₄) dan bereaksi dengan kalsium hidroksida (CH) menghasilkan gipsium, sedangkan interaksinya dengan fase aluminat membentuk etringit, keduanya memicu ekspansi dan mempercepat retakan, dekalsifikasi C–S–H melemahkan matriks mortar sehingga mempercepat kehilangan kekuatan [4] [5]. Metode konvensional seperti injeksi epoxy/grout, pelapisan polimer, CIPP, cementitious repair, sprayed FRCC, memiliki efektivitas teknik, tetapi seringkali memerlukan biaya material dan peralatan tinggi, persiapan permukaan ketat, tenaga ahli, serta quality control, khususnya di saluran drainase dan IPAL yang sering basah, berbau/terpapar H₂S, dan mengalami serangan mikroba/kimia [6] [4] [7] [8] [9]. Dengan demikian, dibutuhkan pendekatan alternatif yaitu metode *self-healing mortar*, yakni material yang dapat menutup retakan secara mandiri melalui mekanisme kimiawi maupun biologis, sehingga mampu memperpanjang umur layan struktur, meningkatkan resistensi terhadap lingkungan agresif, serta meminimalkan kebutuhan perawatan eksternal [10].

Mekanisme *self-healing* pada mortar dibedakan menjadi dua, yaitu *autogenous* dan *autonomous healing*. *Autogenous healing*, yaitu proses alami melalui hidrasi lanjutan, presipitasi CaCO₃, blocking partikel halus, dan ekspansi C–S–H yang efektif menutup retak mikro <100 µm. Penyembuhan *autogenous* hemat biaya dan ramah lingkungan, tetapi terbatas pada retakan kecil dan membutuhkan kelembapan yang konstan. Dapat ditingkatkan salah satunya dengan *Supplementary Cementitious Materials* (SCM), baik dari limbah industri (fly ash, silica fume, slag, GGBS) maupun sumber alami (abu vulkanik, tuff, metakaolin, calcined clay, etc) yang berperan menghasilkan C–S–H tambahan, mempercepat presipitasi kalsit, dan meningkatkan durabilitas mortar. Sementara itu, *autonomous healing* merupakan mekanisme penyembuhan retak yang melibatkan agen eksternal yang sengaja ditambahkan, seperti elektrodposisi, sistem vaskular, material memori bentuk, enkapsulasi, dan mikroorganisme bakteri, masing-masing dengan kelebihan dan keterbatasannya sendiri. Mekanisme ini efektif terutama pada retakan dengan lebar lebih besar dari 150–200 µm, yang umumnya sulit tertutup hanya oleh *self-healing* alami [11].

Di tengah upaya meningkatkan ketahanan beton dan mortar, isu lingkungan global terkait emisi karbon dari industri semen juga menjadi perhatian utama. Industri semen menyumbang sekitar 5-8% dari total emisi CO₂ global sehingga penggunaan material pengganti berbasis limbah, baik dari hasil samping industri maupun biomaterial, menjadi strategi penting dalam mewujudkan konstruksi berkelanjutan [12] [13]. *Silica fume* (SF) merupakan

produk sampingan inheren dari industri silikon dan ferrosilikon dikenal sebagai SCM yang paling reaktif karena derajat amorfisasi yang tinggi dan ukuran partikel yang kecil [14]. Penambahan *silica fume* (SF) terbukti meningkatkan kuat tekan beton, menurunkan porositas dan daya serap air efektif menahan penetrasi ion klorida pada dosis 10% serta serangan Na₂SO₄ namun kurang stabil terhadap MgSO₄ dan H₂SO₄ 5% masih bertahan pada kondisi asam pH 4–6 tetapi mengalami degradasi pada pH 2 [15]–[19]. Keunggulan *silica fume* tersebut mendorong berbagai penelitian yang mengevaluasi perannya dalam meningkatkan kemampuan *self healing* mortar.

Penelitian oleh Chandra Sekhara Reddy dkk mengkaji mortar *self-healing* berbasis OPC dengan penambahan *crystalline admixture* (CA) dan *silica fume* (SF) pada variasi 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat semen. Evaluasi dilakukan melalui uji durabilitas meliputi efisiensi penutupan retak, kuat tekan, permeabilitas klorida, absorpsi air, serta analisis mikrostruktur dengan SEM-EDS dan FTIR [20]. Hasilnya menunjukkan bahwa campuran dengan 10% *silica fume* (S10CA) memiliki performa terbaik, ditandai dengan pemulihan kuat tekan hingga 100% setelah 42 hari perendaman, efisiensi penutupan retak tinggi pada kondisi perendaman air dan siklus basah-kering, serta permeabilitas klorida paling rendah yang berkontribusi pada ketahanan beton terhadap ion klorida.

Penelitian oleh Maddalena dkk mengevaluasi potensi *self-healing* mortar dengan penggunaan *supplementary cementitious materials* (SCM) berupa *silica fume* 10%, *fly ash* 30%, dan GGBS 50% sebagai pengganti sebagian semen [21]. Pengujian dilakukan terhadap sorptivitas, densitas, porositas, ukuran pori, serta analisis mineral menggunakan metode ASTM C1585, difraksi sinar-X, termogravimetri, dan intrusi merkuri, dengan perendaman sampel mortar dalam air hingga 60 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan SCM, khususnya *silica fume* 10%, mampu meningkatkan pembentukan C-S-H, memperbaiki mikrostruktur, menurunkan porositas hingga 84%, serta mengurangi penyerapan air. Mekanisme ini mendorong penyembuhan *autogenous* melalui hidrasi berkelanjutan dan reaksi pozzolan, sehingga meningkatkan performa *self-healing* mortar

Penelitian oleh H. Chang dkk mengevaluasi kemampuan *self-healing* pada material berbasis semen dengan variasi penambahan mineral admixture seperti *fly ash* (30%), *slag* (30%), *silica fume* (10%), metakaolin (10%), dan *limestone* (10%). Parameter yang diuji mencakup penyembuhan retak, permeabilitas air, serta aktivitas pozzolanik melalui pelepasan C-S-H [22]. Hasilnya menunjukkan bahwa campuran dengan 10% *silica fume* (M4-SF10) memberikan penyembuhan retak paling efektif hingga 112 hari, yaitu mencapai 100% pada umur 3–7 hari, 66% pada 28 hari, dan 53% pada 112 hari. Selain itu, kombinasi metakaolin (M5-MK10) lebih efektif pada tahap awal, sedangkan *fly ash* (M2-FA30) dan *slag* (M3-SL30) menunjukkan efek pada umur menengah. Semua variasi campuran menurunkan permeabilitas air, namun pada beberapa campuran penyembuhan permukaan yang cepat berpotensi menghambat pemulihan mekanis.

Penelitian oleh Noor Azline dkk mengembangkan mortar *self-healing* berbasis OPC dengan penambahan silica fume (5%) dan magnesium oksida (5%) pada variasi tunggal maupun kombinasi [23]. Evaluasi dilakukan melalui uji kuat lentur, penyegelan retak, serta analisis mikrostruktur menggunakan mikroskop digital, SEM, dan FTIR. Hasilnya menunjukkan bahwa kombinasi silica fume dan MgO lebih efektif dibandingkan MgO tunggal, dengan pembentukan gel M-S-H yang memperbaiki mikrostruktur dan meningkatkan daya tahan. Penyegelan retak meningkat hingga 23,6% dalam 21 hari, lebih tinggi dibanding kontrol (19,8% dalam 14 hari), meskipun hanya mencapai 55% pada 28–56 hari. Selain itu, penambahan *silica fume* menurunkan alkalinitas, menghasilkan struktur lebih rapat, dan membatasi penyegelan retak akibat hidrasi berkelanjutan.

Madhu dkk. meneliti kemampuan *self-healing* mortar dengan penambahan silica fume pada variasi 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% dari berat semen, serta kombinasi dengan bakteri *Pseudomonas fluorescens* pada campuran mortar 1:3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan silica fume dan bakteri dapat meningkatkan kemampuan penyembuhan retakan, memperbaiki durabilitas mortar, serta meningkatkan ketahanan terhadap kerusakan lingkungan [24].

Penelitian oleh Buller dkk. mengkaji beton *self-healing* berbasis semen tipe I dengan penambahan serat PVA 0,5%, silica fume hingga 15%, serta dua jenis material penyembuh tambahan. Pengujian meliputi uji lentur, pemeriksaan mikroskopis, dan analisis kegagalan akhir untuk mengevaluasi kekuatan, perambatan retak, energi fraktur, serta dampak lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan silica fume mampu meningkatkan nilai FCPL, IFTR, dan IFER, mengendalikan perambatan retak, serta meningkatkan kapasitas beban puncak. Selain itu, penyembuhan penuh pada retakan berkontribusi dalam menurunkan jejak karbon dan energi tertanam, sehingga beton menjadi lebih tahan lama dan berkelanjutan [25].

Kerang lokan (*Polymesoda expansa*) banyak ditemukan di perairan payau Sumatera Barat dengan produksi tahunan mencapai 137,12 ton [26]. Saat ini, sebagian besar cangkang kerang tersebut hanya dimanfaatkan untuk kerajinan dan pupuk sawit oleh masyarakat setempat, sehingga jumlah limbah yang dihasilkan relatif besar. Berbagai kajian menunjukkan bahwa cangkang kerang memiliki potensi untuk digunakan dalam beton dan mortar, baik sebagai pengganti agregat kasar, pengganti agregat halus, pengganti sebagian semen, maupun sebagai aditif mineral [27]. Cangkang kerang mengandung 95%–97% kalsium karbonat (CaCO_3), dan setelah melalui proses kalsinasi akan menghasilkan CaO [28]. Dimana CaO pada abu kerang memiliki peran serupa dengan CaO pada semen Portland. Menurut Neville, kandungan CaO dalam semen Portland merupakan komponen yang penting karena menentukan proporsi fase-fase utama Bogue (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF). Fase C_3S berkontribusi besar terhadap kekuatan awal beton, C_2S terhadap kekuatan jangka panjang, C_3A memengaruhi laju hidrasi dan panas hidrasi, sedangkan C_4AF memberi warna pada semen [29].

Berbagai penelitian dengan menggunakan berbagai jenis kerang telah dilakukan. Penelitian oleh Olivia dkk, mengkaji

pemanfaatan cangkang kerang darah (*anadara granosa*) yang dibakar 500 °C sebagai bahan pengganti sebagian semen dengan variasi 2%, 4%, 6%, dan 8% dari berat semen. Hasilnya menunjukkan kuat tekan optimum diperoleh pada variasi 4% sebesar 32,24 MPa. Beton dengan abu kerang memperlihatkan kuat tarik belah dan modulus elastisitas lebih rendah dibanding beton OPC, namun nilai modulus elastisitas meningkat seiring bertambahnya usia beton [30].

Olivia dkk., meneliti mortar berbahan OPC dengan penggantian sebagian semen menggunakan abu kerang darah (4%) dan kerang rawa (4%) yang dibakar pada suhu 600 °C. Pengujian meliputi setting time, kepadatan, kuat tekan, dan kuat tarik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa abu kerang meningkatkan laju reaksi hidrasi sehingga mempercepat waktu ikat, mengurangi porositas, serta meningkatkan kepadatan. Kuat tekan beton OPC lebih tinggi dibandingkan campuran OPC–cockle [31].

Syafpoetri dkk. meneliti mortar dengan campuran abu kerang lokan sebanyak 0%, 5%, dan 10% yang direndam dalam larutan NaCl. Hasilnya menunjukkan peningkatan kekuatan tekan pada semua variasi, dengan nilai tertinggi pada M10% sebesar 32 MPa. Abu kerang lokan juga menurunkan porositas serta perubahan berat mortar, meskipun variasi 5% memperlihatkan hasil lebih stabil dibanding 0% dan 10% [32].

Olivia dkk. mengevaluasi mortar OPC dan OPC dengan tambahan abu kerang darah (variasi 4%) pada lingkungan air biasa dan air gambut. Hasil pengujian selama 28 hari menunjukkan bahwa kuat tekan mortar OPC meningkat 11,29% setelah perendaman, sementara mortar dengan abu kerang (OPCCS) menunjukkan penurunan berat dan kuat tekan yang lebih besar, terutama dalam air gambut, akibat kandungan CaO yang mudah terlarut. Hal ini menunjukkan keterbatasan penggunaan abu kerang pada lingkungan asam seperti gambut [33].

Tayeh dkk. meneliti mortar dengan penggantian sebagian semen menggunakan abu kerang bivalve sebesar 5%, 10%, 15%, dan 20%, kemudian diuji dalam larutan NaOH 5% dan MgSO_4 . Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kuat tekan pada variasi rendah (5%), dengan ketahanan terhadap serangan sulfat lebih baik dibanding OPC. Penambahan abu kerang juga meningkatkan pembentukan kalsium hidroksida dan ketahanan jangka panjang terhadap lingkungan agresif, meskipun pada kadar tinggi menyebabkan penurunan performa mekanik [34].

Penelitian *self-healing* berbasis material kapur, seperti *limestone*, telah menunjukkan efektivitas dalam mempercepat pembentukan endapan kalsium karbonat (CaCO_3) yang mampu menutup celah retakan serta memperbaiki mikrostruktur mortar [35]. Oleh karena itu, abu cangkang kerang lokan yang juga mengandung senyawa CaO dipandang memiliki potensi serupa, yakni berkontribusi terhadap mekanisme *self-healing* melalui proses karbonasi dan pembentukan CaCO_3 pada bidang retakan. Namun demikian, meskipun berbagai studi telah mengeksplorasi kinerja *self-healing* dengan kombinasi *silica fume* dan SCM lain seperti fly ash, GGBS, metakaolin, slag, maupun MgO, serta modifikasi menggunakan serat dan bakteri, hingga kini belum terdapat

penelitian yang secara khusus mengkaji kombinasi *silica fume* dengan limbah biomaterial berbasis kapur seperti abu cangkang kerang terlebih dalam paparan asam sulfat. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efisiensi *self-healing* mortar melalui pengukuran persentase penutupan celah retakan dan tingkat pemulihan kuat tekan. Pemanfaatan limbah lokal dan industri ini diharapkan dapat mengurangi jejak karbon semen Portland sekaligus mendukung SDG 11, SDG 12, dan SDG 13. Secara keseluruhan, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan material konstruksi ramah lingkungan berbasis limbah lokal serta kemajuan teknologi mortar *self-healing* untuk meningkatkan ketahanan pada lingkungan agresif.



Gambar 1. (a). Limbah cangkang kerang loker, (b). Cangkang kerang loker mentah, (c). Abu cangkang kerang loker setelah kalsinasi
(Sumber: Peneliti, 2025)

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Bahan Bangunan dan Laboratorium Struktur Universitas Riau. Abu cangkang kerang loker (*Clam Shell Ash*) diperoleh dari limbah kerang loker yang dibersihkan, dibakar menggunakan tungku bata tradisional pada suhu 500–800 °C selama tiga hari, lalu digiling hingga lolos ayakan No. 200 ($\leq 0,75$ mm). Bahan pengikat yang digunakan adalah PCC tipe I dari PT Semen Padang, sedangkan agregat halus berasal dari tambang lokal di Kampar, Riau. Selain itu, *silica fume* komersial dari PT Sika Indonesia digunakan sebagai bahan tambahan. Penelitian ini menggunakan 2 jenis campuran mortar, terdiri atas satu campuran kontrol (PCC) dan 1 campuran dengan variasi abu cangkang kerang loker (CSA) sebesar 5%, dan *silica fume* 10% terhadap berat semen. Perancangan campuran mengikuti SNI 03-6825-2002 dengan target kuat tekan 30 Mpa, faktor air semen 0,5 dan rasio sand-to-binder sebesar 3:1. Penelitian terdahulu menunjukkan kadar optimum *silica fume* 10% pada metode *self-healing* dan Abu cangkang kerang 5% pada penggantian sebagian semen, sehingga digunakan kombinasi tersebut dalam studi ini [20] [34] [36] [37] [38] [39]. Rincian komposisi campuran ditunjukkan pada Tabel 1. Sampel mortar disiapkan dengan menimbang seluruh material sesuai rancangan campuran. Kemudian dicampur menggunakan mortar mixer hingga homogen. Mortar dicetak dalam kubus $50 \times 50 \times 50$ mm, didiamkan 24 jam, lalu direndam air selama 28 hari. Spesimen dibagi menjadi dua: sampel utuh untuk uji kuat tekan (umur 0 hari *self-healing*) dan sampel pre-crack. Pre-crack dibuat dengan pembebanan tekan terkontrol sekitar 64% dari beban ultimit menggunakan batang baja berdiameter 0,3 mm sebagai pemicu retak, hingga diperoleh lebar retak 0,1–0,3 mm [40]. Benda uji pre-crack direndam dalam larutan H_2SO_4 pH 4 selama 28 hari. Uji kuat tekan dilakukan mengacu pada SNI 03-6825-2002 dengan enam sampel tiap variasi, yaitu pada umur 0, 7 dan

28 hari perendaman dalam larutan H_2SO_4 pH 4. Pengamatan visual retakan menggunakan mikroskop digital Dino-Lite dilakukan pada empat variasi mortar sebelum dan sesudah proses penyembuhan. Tiga sampel tiap variasi diamati pada tiga titik (DL0, DL1, DL2) untuk menghitung penyembuhan celah retak (CMH) dan persentase penyembuhan (% CMH) setelah 7, dan 28, hari perendaman asam sulfat. Pada penelitian ini % CMH dihitung dengan persamaan (1):

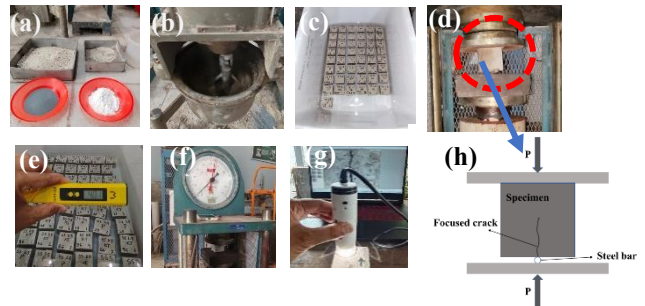
Tabel 1. Disain campuran mortar

Mix	Kuantitas (kg/ cm ³)				
	Semen	Pasir	Air	CSA	SF
PCC	514,06	1542,19	257,032	-	-
PCC-CSA 5- SF 10	436,95	1542,19	257,032	20,39	36,39

PCC= Semen Komposit Portland, CSA= Abu Cangkang Kerang Loker, SF= *Silica Fume*

$$\% \text{ CMH} = (A_i - A_h) / A_i \times 100\% \tag{1}$$

dimana, % CMH adalah *crack mouth healed* (penyembuhan celah retakan), A_i adalah lebar retakan awal (mm), A_h adalah lebar retakan pada umur pengamatan (mm).



Gambar 2. (a). persiapan material, (b). pencampuran, (c). curing, (d) pembuatan pre-crack, (e) perendaman dalam larutan asam sulfat, (f) uji kuat tekan, (g) pengamatan visual, (h). pre crack

(Sumber: (a-h) Peneliti, 2025, (h) Lie dkk. 2023 [40])

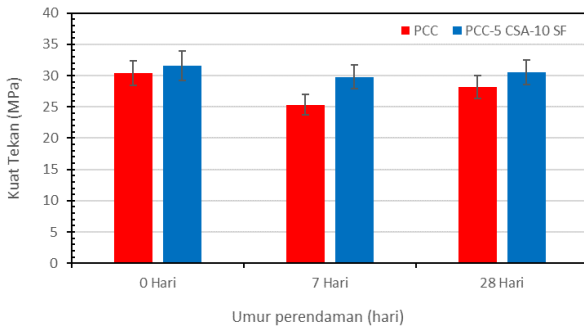
3. HASIL

3.1 Kuat tekan

Berdasarkan hasil uji kuat tekan pada Gambar 1, terlihat bahwa mortar dengan PCC (kontrol) mengalami penurunan kekuatan yang cukup signifikan setelah perendaman, di mana kuat tekan awal sebesar ± 30 MPa turun menjadi sekitar 25 MPa pada umur 7 hari (penurunan 17%) dan hanya sedikit pulih menjadi 28 MPa pada umur 28 hari dengan total penurunan 7%. Sebaliknya, campuran dengan penambahan 5% CSA dan 10% *silica fume* menunjukkan performa yang lebih stabil, dengan penurunan yang jauh lebih kecil, yakni hanya 5% pada umur 7 hari dan 3% pada umur 28 hari. Jika dibandingkan secara langsung, efek positif penambahan CSA dan *silica fume* tercermin pada peningkatan kuat tekan relatif terhadap PCC, yaitu sebesar 4% pada awal perendaman, meningkat signifikan hingga 18% pada 7 hari, dan tetap lebih tinggi 8% pada 28 hari. Temuan ini menegaskan bahwa penambahan CSA dan *silica fume* tidak hanya berfungsi sebagai bahan pengisi (filler) yang memperhalus pori-pori dan

memperbaiki densifikasi mikrostruktur, tetapi juga memberikan kontribusi pada peningkatan reaktivitas pozzolanik sehingga terbentuk lebih banyak produk hidrasi sekunder seperti C-S-H yang berperan dalam mempertahankan kekuatan pada kondisi lingkungan agresif. Hal ini sejalan dengan penelitian Noor Azline dkk yang menyatakan penambahan *silica fume* pada OPC meningkatkan pemulihan kekuatan, dengan M10 mencapai 19,92% dan pada penelitian Tayeh dkk dengan penggantian 5% abu cangkang kerang memberikan ketahanan terbaik terhadap serangan sulfat dan alkali, dengan penurunan berat dan kuat tekan tertinggi setelah perendaman dalam NaOH dan MgSO₄ [23].

Gambar 1. Kuat tekan mortar *self-healing* PCC, PCC-5 CSA- SF10 pada larutan asam sulfat PH 4



(Sumber: Peneliti, 2025)

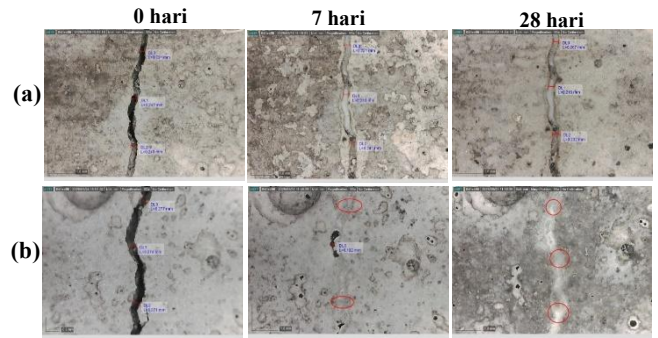
3.2 Pengamatan visual

Berdasarkan pengamatan visual pada Gambar 2, perkembangan penutupan retak menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara mortar kontrol (PCC) dan mortar dengan tambahan 5% abu cangkang lokan (CSA) serta 10% *silica fume* (SF). Pada mortar kontrol (Gambar 2a), retak masih terlihat jelas hingga umur 28 hari, dengan hanya sedikit endapan yang menutupi permukaan retakan. Sebaliknya, pada campuran PCC-CSA 5%-SF 10% (Gambar 2b), terlihat akumulasi material pengisi retakan yang semakin meluas seiring bertambahnya waktu perawatan, terutama pada umur 28 hari, di mana sebagian besar celah retakan telah tertutup oleh produk presipitasi berwarna putih. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan CSA dan SF mampu meningkatkan mekanisme penyembuhan autogenus melalui hidrasi lanjutan serta presipitasi kalsium karbonat yang mengisi celah retakan.

Hasil kuantifikasi penutupan retak pada Tabel 2 memperkuat temuan visual tersebut. Pada mortar kontrol (PCC), penutupan celah retakan (CMH) hanya meningkat dari 0,011 mm (hari 0–7) menjadi 0,027 mm (hari 0–28), dengan persentase penutupan sebesar 4% hingga 11%. Nilai ini relatif rendah dan menunjukkan keterbatasan kemampuan penyembuhan autogenus pada campuran tanpa bahan tambah pozzolan maupun sumber kalsium tambahan. Sebaliknya, pada campuran PCC-CSA 5%-SF 10%, CMH meningkat lebih signifikan, dari 0,156 mm (hari 0–7) menjadi 0,211 mm (hari 0–28), dengan persentase penutupan mencapai 69% pada 7 hari dan meningkat hingga 91% pada 28 hari. Data ini mengonfirmasi bahwa kombinasi CSA dan SF mampu mempercepat serta meningkatkan efisiensi penutupan retak, sejalan dengan mekanisme *self-healing* yang dipicu oleh

ketersediaan kalsium dari material berbasis kapur seperti *limestone* serta sifat pozzolanik *silica fume* [35].

Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa mortar dengan penambahan CSA dan SF memiliki performa *self-healing* yang jauh lebih baik dibandingkan mortar kontrol, baik secara visual maupun kuantitatif. Hal ini memperkuat potensi pemanfaatan limbah kerang lokan dan *silica fume* sebagai material ramah lingkungan untuk meningkatkan durabilitas mortar pada lingkungan agresif.



Gambar 2. Perkembangan visual penutupan retak mortar: (a) PCC, (b) PCC- 5 CSA- 10 SF dalam larutan asam sulfat
(Sumber: Peneliti, 2025)

Tabel 2. Perutupan celah retakan dan pesentase penutupan celah retakan

Campuran	CMH (mm)			
	CMH (mm)		% CMH	
	Hari 0-7	Hari 0-28	Hari 0-7	Hari 0-28
PCC	0,011	0,027	4%	11%
PCC-CSA 5-SF 10	0,156	0,211	69%	91%

4. PEMBAHASAN

Temuan pada Gambar 2 dan Tabel 2 memperlihatkan bahwa penggunaan kombinasi CSA 5% dan *silica fume* 10% mampu memberikan efek positif terhadap kemampuan *self-healing* mortar jika dibandingkan dengan PCC murni. Retakan pada PCC murni cenderung tetap terbuka hingga 28 hari, dengan tingkat penutupan yang relatif rendah, sedangkan pada campuran dengan CSA dan *silica fume* penutupan retakan berlangsung jauh lebih cepat dan dominan tertutup pada umur 28 hari. Hasil ini menunjukkan bahwa tambahan material tersebut berperan penting dalam memperkuat mekanisme penyembuhan diri mortar dan menjawab pertanyaan penelitian mengenai efektivitas kombinasi CSA–*silica fume* terhadap kinerja *self-healing*.

Secara teoritis, mekanisme perbaikan diri pada mortar dapat berlangsung melalui dua jalur, yaitu hidrasi lanjutan dari partikel semen yang belum bereaksi serta presipitasi kalsium karbonat (CaCO₃) di area retakan. Hasil penelitian ini mendukung kedua mekanisme tersebut. *Silica fume* dengan ukuran butir sangat halus berperan dalam reaksi pozzolanik dengan Ca(OH)₂ untuk menghasilkan tambahan C-S-H yang memperkuat mikrostruktur,

sementara CSA menyumbang ion kalsium yang kemudian bereaksi dengan karbonat terlarut untuk membentuk endapan CaCO_3 di permukaan retakan. Proses inilah yang menjelaskan munculnya endapan putih pada mortar dengan CSA–*silica fume*. Kontribusi penelitian ini terletak pada bukti bahwa limbah lokal berupa abu cangkang lokan dapat dioptimalkan sebagai material tambahan yang efektif bila dikombinasikan dengan *silica fume*. Pemanfaatan CSA tidak hanya meningkatkan kinerja teknis mortar melalui suplai kalsium, tetapi juga memiliki nilai keberlanjutan dengan mengurangi limbah perikanan. Faktor-faktor seperti lebar awal retakan, kondisi perendaman, serta interaksi kimia antar material diduga turut memengaruhi hasil, sehingga menjadi aspek yang perlu diperhatikan pada penelitian lanjutan. Keterbatasan penelitian ini adalah komposisi material yang diuji masih terbatas pada satu variasi, serta periode pengamatan hanya mencakup 28 hari sehingga efek jangka panjang belum tergambarkan secara menyeluruh.

Secara teoretis, hasil ini memperkuat konsep mekanisme *self-healing* berbasis hidrasi lanjutan dan presipitasi karbonat dengan penekanan pada peran material lokal kaya CaO seperti CSA. Dari sisi praktis, penggunaan kombinasi CSA dan *silica fume* dapat menjadi strategi untuk meningkatkan daya tahan struktur beton, khususnya pada infrastruktur yang sering terpapar lingkungan agresif seperti saluran drainase, IPAL dan konstruksi kawasan industri. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mendukung hipotesis awal, tetapi juga menawarkan kontribusi baru dalam pengembangan material konstruksi berkelanjutan yang lebih ramah lingkungan sekaligus memiliki performa durabilitas yang lebih baik.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa penambahan 5% abu cangkang lokan (CSA) dan 10% *silica fume* efektif meningkatkan efisiensi *self-healing* mortar, baik melalui pemulihan kuat tekan maupun persentase penutupan retakan. Mekanisme ini terjadi karena adanya hidrasi lanjutan dan presipitasi kalsium karbonat yang memperkuat mikrostruktur serta mempercepat proses penutupan retak. Dengan demikian, kombinasi CSA dan *silica fume* berpotensi menjadi strategi ramah lingkungan untuk meningkatkan durabilitas mortar, dan penelitian lanjutan disarankan untuk mengkaji kinerja jangka panjang serta variasi komposisi material.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] SNI 03-6825, “Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland Untuk Pekerjaan Sipil,” *Badan Stand. Nas.*, 2002.
- [2] E. Soldado, A. Antunes, H. Costa, R. do Carmo, and E. Júlio, “Durability of mortar matrices of low-cement concrete with specific additions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 309, p. 125060, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125060.
- [3] J. Lv *et al.*, “Chloride ion binding in cementitious materials: A review of influencing factors and control methods,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 22, p. e04201, Jul. 2025, doi: 10.1016/J.CSCM.2024.E04201.
- [4] P. Woyciechowski, P. Łukowski, E. Szmigiera, G. Adamczewski, K. Chilton, and S. Spodzieja, “Concrete corrosion in a wastewater treatment plant – A comprehensive case study,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 303, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124388.
- [5] S. K. Pramanik *et al.*, “Bio-corrosion in concrete sewer systems: Mechanisms and mitigation strategies,” *Sci. Total Environ.*, vol. 921, no. November 2023, p. 171231, 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.171231.
- [6] D. Merachtsaki *et al.*, “Study of Corrosion Protection of Concrete in Sewage Systems with Magnesium Hydroxide Coatings,” p. 27, 2020, doi: 10.3390/environsciproc2020002027.
- [7] P. Yuan *et al.*, “Application of polymer cement repair mortar in underground engineering: A review,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, no. May, p. e02555, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02555.
- [8] L. Zhang *et al.*, “Experimental Study on Water-Plugging Performance of Grouted Concrete Crack,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 7, pp. 1–16, 2024, doi: 10.3390/ma17071568.
- [9] S. Dong, D. Wang, E. Hui, C. Gao, H. Zhang, and Y. Tan, “An Overview of the Application of Fiber-Reinforced Cementitious Composites in Spray Repair of Drainage Pipes,” *Buildings*, vol. 13, no. 5, 2023, doi: 10.3390/buildings13051119.
- [10] S. Deeba and A. K. Ammasi, “State-of-the-art review on self-healing in mortar, concrete, and composites,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 20, no. February, p. e03298, 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03298.
- [11] K. Amoorezaei and T. Ghanbari-Ghazijahani, “A comprehensive review: Self-healing methods and cementitious composites,” *Structures*, vol. 72, no. January, p. 108038, 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2024.108038.
- [12] M. Z. Khaiyum, S. Sarker, and G. Kabir, “Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context,” *Sustain.*, vol. 15, no. 21, 2023, doi: 10.3390/su152115407.
- [13] S. Barbhuiya, B. B. Das, D. Adak, K. Kapoor, and M. Tabish, “Low carbon concrete: advancements, challenges and future directions in sustainable construction,” *Discov. Concr. Cem.*, vol. 1, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s44416-025-00002-y.
- [14] Y. C. Flores, G. C. Cordeiro, R. D. Toledo Filho, and L. M. Tavares, “Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 146, pp. 524–530, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.04.069.
- [15] H. M. Hamada *et al.*, “Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 24, pp. 8887–8908, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.147.
- [16] L. Mlinárik and K. Kopeckó, “The influence of combined application of two SCMs on the corrosion and acid attack durability of mortars,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 61, no. 2, pp. 313–321, 2017, doi: 10.3311/PPci.9352.
- [17] J. M. Ortega, M. D. Esteban, M. Williams, I. Sánchez, and M. A. Climent, “Short-term performance of sustainable silica fume mortars exposed to sulfate attack,” *Sustain.*, vol. 10, no. 7, 2018, doi: 10.3390/su10072517.
- [18] Y. Senhadji, G. Escadeillas, M. Mouli, H. Khelafi, and Benosman, “Influence of natural pozzolan, silica fume and limestone fine on strength, acid resistance and microstructure of mortar,” *Powder Technol.*, vol. 254, pp. 314–323, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.01.046.
- [19] M. R. Heyran Najafi, A. Saradar, M. Mohtasham Moein, and M. Karakouzian, “Investigation mechanical

- characteristics and permeability of concrete with pozzolanic materials: a sustainable approach,” *Multiscale Multidiscip. Model. Exp. Des.*, 2024, doi: 10.1007/s41939-024-00507-2.
- [20] T. Chandra Sekhara Reddy, A. Ravitheja, and C. Sashidhar, “Micromechanical Properties of Self-Healing Concrete with Crystalline Admixture and Silica Fume,” *ACI Mater. J.*, vol. 117, no. 3, pp. 63–74, 2020, doi: 10.14359/51722395.
- [21] R. Maddalena, H. Taha, and D. Gardner, “Self-healing potential of supplementary cementitious materials in cement mortars: Sorptivity and pore structure,” *Dev. Built Environ.*, vol. 6, no. January, 2021, doi: 10.1016/j.dibe.2021.100044.
- [22] H. Chang *et al.*, “The features of different mineral admixtures affecting the self-healing capacity of cementitious-based materials,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 297, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123822.
- [23] M. N. Noor Azline, A. B. Nabilah, S. Nor Azizi, M. Ernaleza, and A. A. Farah Nora Aznieta, “Enhanced autogenous self-healing of MgO blended composites incorporating with silica fume,” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 16, pp. 1–9, 2023, doi: 10.1016/j.clet.2023.100670.
- [24] B. E. Madhu, K. Shanthi Sri, T. S. Charan, and L. Sabat, “Self-healing of cement mortar with partial replacement of cement with silica fume,” *Mater. Today Proc.*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.116>.
- [25] A. S. Buller, F. ul R. Abro, M. Ali, T. Ali, and N. Bheel, “Effect of silica fume on fracture analysis, durability performance and embodied carbon of fiber-reinforced self-healed concrete,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 130, 2024, doi: 10.1016/j.tafmec.2024.104333.
- [26] “Kementerian Kelautan dan Perikanan,” KKP RI. Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://portaldata.kkp.go.id/datainsight/produksi-ikan-total/13>
- [27] K. Hasan *et al.*, “A review of the mechanical properties and durability of concrete containing recycled seashells as a partial cement replacement,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 25, no. 6, pp. 3192–3216, 2023, doi: 10.1007/s10163-023-01795-5.
- [28] H. M. Hamada, F. Abed, B. Tayeh, M. S. Al Jawahery, A. Majdi, and S. T. Yousif, “Effect of recycled seashells on concrete properties: A comprehensive review of the recent studies,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 376, no. March, p. 131036, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131036.
- [29] A. M. Neville, *Properties of concrete-5th edition*, 5th ed. Trans-Atlantic Publications, Inc., 2011.
- [30] M. Olivia, A. A. Mifshella, and L. Darmayanti, “Mechanical properties of seashell concrete,” *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 760–764, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.127.
- [31] M. Olivia, R. Oktaviani, and Ismeddiyanto, “Properties of Concrete Containing Ground Waste Cockle and Clam Seashells,” *Procedia Eng.*, vol. 171, pp. 658–663, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.404.
- [32] N. A. Syafpoetri, Z. Djauhari, and M. Olivia, “Karakteristik Mortar Dengan Campuran Abu Kerang Lokan Dalam Rendaman NaCl,” *J. Rekayasa Sipil*, vol. 14, no. 1, p. 63, 2018, doi: 10.25077/jrs.14.1.63-72.2018.
- [33] M. Olivia, I. S. Rahmayani, G. Wibisono, and E. Saputra, “The Effects of Using Ground Cockle Seashells as an Additive for Mortar in Peat Environment,” *J. Civ. Eng. Forum*, vol. 6, no. 3, p. 259, 2020, doi: 10.22146/jcef.55651.
- [34] B. A. Tayeh *et al.*, “Durability and mechanical properties of seashell partially-replaced cement,” *J. Build. Eng.*, vol. 31, no. March, p. 101328, 2020, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101328.
- [35] C. De Nardi, A. Cecchi, L. Ferrara, A. Benedetti, and D. Cristofori, “Effect of age and level of damage on the autogenous healing of lime mortars,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 124, pp. 144–157, 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.05.041.
- [36] R. Maddalena, H. Taha, and D. Gardner, “Self-healing potential of supplementary cementitious materials in cement mortars: Sorptivity and pore structure,” *Dev. Built Environ.*, vol. 6, no. June 2020, p. 100044, 2021, doi: 10.1016/j.dibe.2021.100044.
- [37] H. Chang *et al.*, “The features of different mineral admixtures affecting the self-healing capacity of cementitious-based materials,” ... *Build. Mater.*, 2021, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821015828>
- [38] X. Gu *et al.*, “Elucidating the reaction of seashell powder within fly ash cement: A focus on hydration products,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 428, no. March, p. 136331, 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136331.
- [39] Y. Sun, M. Alqurashi, and S. A. Mostafa, “Exploring the impact of seashell powder and nano-silica on ultra-high-performance self-curing concrete: Insights into mechanical strength, durability, and high-temperature resilience,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 63, no. 1, 2024, doi: 10.1515/rams-2024-0080.
- [40] H. F. Li, Q. Q. Yu, K. Zhang, X. Y. Wang, Y. Liu, and G. Z. Zhang, “Effect of types of curing environments on the self-healing capacity of mortars incorporating crystalline admixture,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, no. August 2022, p. e01713, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01713.