

Kinerja Mekanik Beton Campuran Abu Cangkang Telur dan Silika Fume dalam Lingkungan Asam Sulfat

Azzahra Aqilla¹, Silviana Ayu Puspandari¹, Ermiyati²,
Gunawan Wibisono¹, Monita Olivia^{1*}

¹Program Studi S1 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²Program Studi D3 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

*Penulis korespondensi, e-mail: monita.olivia@lecturer.unri.ac.id

Abstrak

Penggunaan material alternatif berbasis limbah sebagai substitusi semen merupakan salah satu upaya untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja mekanik dan ketahanan beton dengan substitusi parsial abu cangkang telur (eggshell ash, ESA) serta penambahan silika fume (SF) dalam lingkungan asam sulfat. Beton dirancang dengan variasi substitusi ESA sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% terhadap berat semen, dengan penambahan silika fume tetap sebesar 10%. Benda uji direndam dalam larutan asam sulfat dengan pH sekitar 4 pada umur perendaman tertentu. Parameter yang diuji meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, kecepatan rambat gelombang ultrasonik (UPV), dan susut beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran beton dengan substitusi ESA sebesar 5% dan penambahan SF sebesar 10% memberikan kinerja optimum, ditandai dengan peningkatan kuat tekan, kuat tarik belah, dan nilai UPV, serta nilai susut yang lebih rendah dibandingkan dengan beton kontrol dan variasi dengan kadar ESA yang lebih tinggi. Peningkatan kadar ESA di atas 5% cenderung menurunkan ketahanan beton akibat meningkatnya kerentanan terhadap serangan asam. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi ESA dan silika fume pada kadar optimum berpotensi menghasilkan beton ramah lingkungan dengan ketahanan yang lebih baik pada lingkungan asam sulfat.

Kata kunci: Abu cangkang telur, asam sulfat, beton berkelanjutan, durabilitas, silika fume.

Abstract

The use of waste-based materials as partial cement replacement has become an important approach to reducing the environmental impact of the construction industry. This study investigates the mechanical performance and durability of concrete incorporating eggshell ash (ESA) and silica fume (SF) under sulfuric acid exposure. Concrete mixtures were prepared with ESA replacement levels of 0%, 5%, 10%, and 15% by weight of cement, while silica fume content was fixed at 10%. Specimens were immersed in a sulfuric acid solution at approximately pH 4 for specified exposure periods. The evaluated parameters included compressive strength, splitting tensile strength, ultrasonic pulse velocity (UPV), and concrete shrinkage. The results indicate that concrete containing 5% ESA and 10% SF exhibited the best performance, characterised by higher mechanical strength, higher internal density, and lower shrinkage than control concrete and mixtures with higher ESA content. Increasing ESA content beyond 5% led to reduced durability due to increased vulnerability to acid attack. These findings suggest that the combined use of eggshell ash and silica fume at an optimum proportion can produce sustainable concrete with enhanced resistance to sulfuric acid environments.

Keywords: Eggshell ash, durability, silica fume, sustainable concrete, sulfuric acid.

1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi merupakan salah satu penyumbang emisi karbon terbesar di dunia, terutama akibat produksi semen Portland yang memerlukan konsumsi energi tinggi dan eksploitasi batu kapur secara masif (Griffiths et al., 2023). Produksi semen diperkirakan menyumbang sekitar 7–8% dari total emisi CO₂ global, sehingga pengembangan material beton yang lebih berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak dalam upaya mitigasi perubahan iklim (Scrivener et al., 2018). Proses produksi semen Portland menghadapi tantangan lingkungan yang signifikan, terutama terkait emisi karbon dioksida (CO₂). Emisi CO₂ dalam produksi semen terutama berasal dari dua sumber utama. Sekitar 50–60% dihasilkan dari proses kalsinasi, yaitu reaksi kimia dekomposisi batu kapur pada suhu tinggi yang secara alami melepaskan CO₂. Sementara itu, sekitar 30–40% emisi berasal dari pembakaran bahan bakar fosil yang digunakan untuk mencapai suhu pembakaran tersebut. Sisanya dihasilkan dari aktivitas pendukung, seperti proses penggilingan dan transportasi bahan baku maupun produk (Moradikhrou & Ravanshadnia, 2021). Proses produksi semen juga membutuhkan energi yang sangat besar, dengan konsumsi energi termal rata-rata sekitar 3–4 GJ per ton semen, yang hingga saat ini sebagian besar masih bergantung pada bahan bakar fosil (Volaity et al., 2025). Selain itu, kegiatan penambangan batu kapur dalam skala besar menimbulkan berbagai dampak lingkungan, seperti degradasi lahan, hilangnya habitat alami, erosi tanah, serta pencemaran air dan udara akibat debu dan limbah hasil penambangan (Ganapathi & Phukan, 2020).

Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan limbah industri dan limbah biomaterial sebagai substitusi parsial semen. Material berbasis kalsium, seperti abu cangkang telur (eggshell ash), memiliki potensi besar karena kandungan kalsium karbonatnya yang tinggi dan komposisi kimianya yang mendekati batu kapur alami. Kalsinasi cangkang telur berguna untuk menghilangkan senyawa organik, kadar air, serta karbon dioksida melalui reaksi dekomposisi CaCO₃ yang terdapat dalam cangkang telur (Zahara et al., 2020). Setelah melalui proses kalsinasi, cangkang telur menghasilkan kalsium oksida (CaO) yang bersifat reaktif dan berkontribusi terhadap pembentukan produk hidrasi semen (Hamada et al., 2020). Selain mengurangi limbah padat, pemanfaatan abu cangkang telur juga berpotensi menekan penggunaan bahan baku alam dalam industri semen.

Namun demikian, penggunaan material berbasis kalsium dalam beton menghadapi tantangan serius ketika diaplikasikan dalam lingkungan agresif, khususnya yang bersifat asam. Beton bersifat alkalis dan rentan mengalami degradasi apabila terpapar larutan asam, terutama asam sulfat yang menggabungkan mekanisme serangan asam dan serangan sulfat secara bersamaan. Serangan asam sulfat dapat melarutkan kalsium hidroksida serta merusak struktur kalsium silikat hidrat (C-S-H), sehingga menyebabkan penurunan mekanik dan ketahanan jangka panjang beton (Lv et al., 2020; Olivia & Nikraz, 2009).

Untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan korosif, penggunaan material pozzolan seperti silika fume telah banyak dilaporkan efektif. Silika fume atau micro silica merupakan material yang dihasilkan dari produk samping industri ferrosilikon (Jo et al., 2019). Silika fume memiliki ukuran partikel sangat halus dan kandungan SiO₂ yang tinggi, sehingga mampu bereaksi secara pozzolanik dengan Ca(OH)₂ dan membentuk gel C-S-H tambahan yang

lebih padat. Mekanisme ini dapat menurunkan porositas dan permeabilitas beton, sehingga membatasi penetrasi ion agresif ke dalam matriks beton (Wan et al., 2023).

Secara umum, terdapat tiga rekomendasi beton untuk mencegah terjadinya serangan sulfat, yaitu membatasi kandungan C3 dalam semen seperti yang telah ditentukan dalam ASTM C159, mengurangi kandungan kalsium hidroksida (CH), dan mengurangi permeabilitas beton dengan menurunkan rasio pengikat air (Mehta & Ashish, 2020). Meskipun penelitian mengenai abu cangkang telur dan silika fume telah berkembang secara terpisah, kajian mengenai kombinasi keduanya dalam beton yang terpapar langsung lingkungan asam sulfat masih relatif terbatas, khususnya dalam konteks beton ramah lingkungan berbasis limbah biomaterial (Golewski, 2021). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja mekanik dan ketahanan beton dengan substitusi parsial semen menggunakan abu cangkang telur dan silika fume pada kondisi perendaman asam sulfat. Parameter yang dikaji meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, kecepatan rambat gelombang ultrasonik (UPV), dan susut beton sebagai indikator kinerja mekanik dan durabilitas beton pada lingkungan agresif.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Material Penyusun Beton

Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari semen *Portland Composite Cement* (PCC) sebagai pengikat utama, agregat kasar dan agregat halus yang memenuhi SNI 03-2834-2000, abu cangkang telur, silika fume sebagai bahan tambah pozzolan, air pencampur yang bersih, dan larutan asam sulfat.

Abu cangkang telur diperoleh dari limbah cangkang telur ayam yang telah dibersihkan, dikeringkan, dan dikalsinasi pada suhu sekitar 900°C hingga diperoleh abu berwarna putih dengan kandungan CaO yang berfungsi untuk mempercepat waktu pengerasan dalam pasta semen dan mempercepat laju hidrasi (Pliya & Cree, 2015). Menurut Hilal et al., (2021), waktu pengerasan semen dipengaruhi oleh hidrasi selektif senyawa semen. Selama hidrasi, C₃S dan C₂S mendominasi proses hidrasi tahap awal. Sifat polimineral semen memengaruhi efek *Egg Shell Ash* (ESA) terhadap hidrasi semen. Ketika ESA dicampur dengan semen dan air, CaO di ESA akan bereaksi dengan senyawa semen, menghasilkan produk hidrasi yang mendukung percepatan hidrasi semen.

Silika fume digunakan sebagai bahan tambah pozzolan dengan kandungan silika amorf tinggi yang bereaksi secara pozzolanik dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)₂) hasil hidrasi semen (dan dari ESA) untuk membentuk gel C-S-H tambahan (Uzbas & Aydin, 2020). Reaksi ini tidak hanya meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton melalui pengisian pori-pori mikro, tetapi juga secara signifikan mengurangi porositas dan permeabilitas matriks, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi ion agresif, seperti sulfat, dalam lingkungan asam sulfat (Khan et al., 2023). Kombinasi ESA dan silika fume pada proporsi yang tepat diharapkan memberikan sinergi antara efek filler/nukleasi dari ESA dan efek pozzolanik yang intensif dari silika fume, yang mendukung peningkatan durabilitas beton.

2.2 Variasi Campuran Beton

Penelitian ini menggunakan empat variasi campuran beton, yaitu beton kontrol tanpa substitusi (PCC 100) dan beton dengan substitusi abu cangkang telur (ESA) sebesar 5%, 10%, dan 15% terhadap berat semen. Pada seluruh variasi beton dengan substitusi ESA, silika fume ditambahkan sebesar 10% dari berat semen sebagai bahan pozzolan.

Perancangan campuran beton dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kadar abu cangkang telur terhadap kinerja mekanik dan ketahanan beton pada lingkungan asam sulfat. Komposisi campuran beton untuk setiap variasi ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Campuran Beton

Material	PCC (kg)	ESA5SF10 (kg)	ESA10SF10 (kg)	ESA15SF10 (kg)
Agregat Kasar	130,07	130,07	130,07	130,07
Agregat Halus	74,47	74,47	74,47	74,47
Air	22,95	22,95	22,95	22,95
ESA	0	2,46	4,92	7,38
Semen	49,21	41,83	39,37	36,91
Silika Fume	0	4,92	4,92	4,92

2.3 Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 108 buah dengan dua jenis bentuk benda uji sesuai dengan perencanaan campuran variasi berdasarkan *job mix*. Benda uji beton silinder berdiameter 10,5 cm dan tinggi 21 cm sebanyak 48 sampel digunakan untuk pengujian kuat tekan dan UPV, sedangkan benda uji beton silinder berukuran 15 × 30 cm sebanyak 60 sampel digunakan untuk pengujian kuat tarik belah dan susut. Variasi campuran yang digunakan terdiri atas 0%, 5%, 10%, dan 15% abu cangkang telur dengan penambahan silika fume sebesar 10% sebagai pengganti parsial semen. Untuk setiap variasi campuran dan umur pengujian digunakan tiga benda uji. Nilai yang disajikan pada hasil pengujian merupakan nilai rata-rata dari tiga benda uji untuk masing-masing parameter yang diuji. Rincian jumlah benda uji pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rincian Jumlah Benda Uji

Jenis Sampel	Kuat Tekan dan UPV				Kuat Tarik				Susut			
	Umur Perendaman di Larutan Asam Sulfat (Hari											
	0*	7	28	56	0*	7	28	56	0*	7	28	56
PCC	3	3	3	3	3	3	3	3				3
ESA5SF10	3	3	3	3	3	3	3	3				3
ESA10SF10	3	3	3	3	3	3	3	3				3
ESA15SF10	3	3	3	3	3	3	3	3				3
Jumlah	48				48				12			
Total							108					

*=Sebelum Perendaman di Larutan Asam Sulfat

Benda uji beton dicetak sesuai dengan standar pengujian untuk masing-masing parameter mekanik. Setelah proses *mixing*, seluruh benda uji dirawat dalam air pada suhu ruang selama 28 hari untuk memastikan hidrasi berlangsung secara optimal. Setelah perawatan 28 hari selesai, benda uji dimasukkan ke dalam air rendaman asam sulfat.

Pengenceran larutan asam sulfat dilakukan dengan menambahkan larutan asam sulfat murni dengan konsentrasi 98% secara perlahan ke dalam kontainer yang telah berisi air suling, sambil terus diaduk untuk mengendalikan panas eksotermik yang dihasilkan dari reaksi pengenceran. Proses ini dilanjutkan secara bertahap hingga pH larutan dalam kontainer mencapai nilai sekitar 4, yang dipantau menggunakan pH meter (Nabighods et al., 2024). Setelah perawatan awal, benda uji direndam dalam larutan asam sulfat selama 7, 28, dan 56 hari untuk mensimulasikan kondisi lingkungan yang agresif. Pada saat perendaman, air asam sulfat pada beton diganti setiap 7 hari selama masa perendaman. Penggantian larutan dilakukan karena terjadi peningkatan nilai pH akibat proses netralisasi antara larutan asam sulfat dan senyawa alkali yang terlarut dari matriks beton. Oleh karena itu, larutan diperbarui secara berkala agar tingkat keasaman tetap berada pada pH sekitar 4 dan kondisi serangan asam yang diberikan kepada seluruh benda uji tetap konsisten.

2.4 Metode Pengujian

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas mekanik beton setelah perendaman asam sulfat. Pengujian kuat tarik belah dilakukan untuk menilai ketahanan beton terhadap retak. Selain itu, pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) digunakan sebagai metode non-destruktif untuk mengevaluasi kepadatan dan integritas internal beton, sedangkan pengujian susut beton dilakukan untuk menilai stabilitas dimensi beton akibat proses hidrasi dan pengaruh lingkungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian Karakteristik Semen, Silika Fume, dan Abu Cangkang Telur

Semen Portland Composite Cement (PCC) yang digunakan sebagai pengikat utama dalam penelitian ini telah diuji karakteristik kimia dan fisiknya sesuai dengan standar SNI 2049:2015, yang menetapkan persyaratan mutu, metode pengambilan contoh, serta pengujian untuk semen PCC. Hasil pengujian XRF menunjukkan kandungan utama CaO sebesar 52,96% diikuti SiO₂ 25,06%, Al₂O₃ 4,13%, Fe₂O₃ 3,12%, serta unsur minor seperti P₂O₅ 0,028%, yang semuanya memenuhi batas standar SNI dan sejalan dengan rentang komposisi tipikal PCC dari berbagai produsen (SiO₂ 20–26%, Al₂O₃ 4–7%, Fe₂O₃ 3–4%, CaO 50–65%, MgO 1–4%, SO₃ 1,2–2,2%). Pengujian serupa dilakukan pada abu cangkang telur (*eggshell ash*, ESA) di Laboratorium Kimia Instrumen FMIPA Universitas Negeri Padang, di mana hasil XRF mengindikasikan kandungan dominan CaO 44,4%, SiO₂ 11%, Al₂O₃ 3%, Fe₂O₃ 6,1%, serta Na₂O dan MnO₂ masing-masing 12,1% dan 20,2%; komposisi ini mendukung peran ESA sebagai sumber CaO reaktif yang berkontribusi pada proses hidrasi dan pembentukan matriks C-S-H₂). Silika fume dari PT. Sika Indonesia dianalisis menggunakan XRF sesuai ASTM D6349-2001, memperoleh kandungan SiO₂ tertinggi 91,457%, diikuti P₂O₅ 3,626% dan CaO 2,827%; kandungan SiO₂ yang tinggi ini

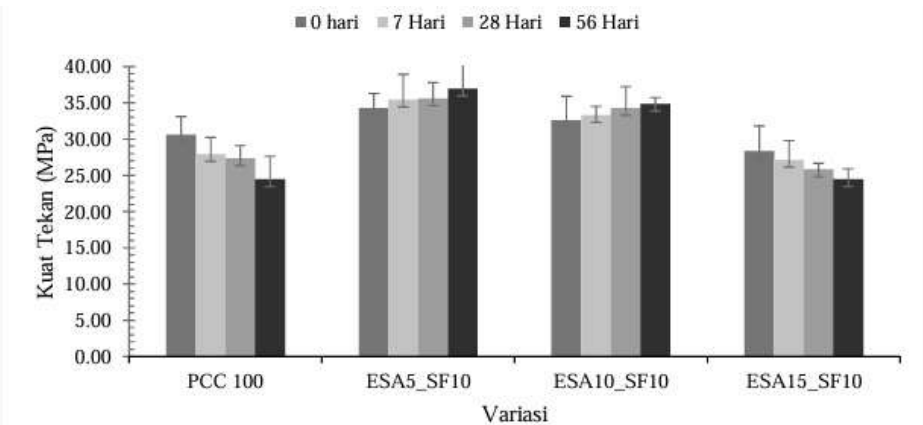
memungkinkan reaksi pozzolanik optimal dengan Ca(OH)_2 dari hidrasi semen dan ESA, sehingga mengurangi kerentanan terhadap serangan sulfat melalui pembentukan C-S-H tambahan yang lebih padat dan rendah permeabilitas (Khudair & Faleh, 2025). Hasil komposisi kimia ketiga material dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 3. Karakteristik Material

Parameter Uji	Hasil Pengujian (%)		
	PCC	ESA	SF
Na₂O	0,255	12,1	-
K₂O	0,452	2	1,06
MgO	1,25	1	-
CaO	52,96	44,4	2,827
Fe₂O₃	3,12	6,1	0,141
Al₂O₃	4,13	3	0,27
SiO₂	25,06	11,1	91,457
LOI	10,79	-	-
Kadar Air	0,614	-	-
SO₃	1,91	-	-
P₂O₃	0,028	-	-
MnO₂	0,097	20,2	-
P₂O₅	-	-	3,626

3.2 Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan abu cangkang telur dan silika fume terhadap ketahanan beton terhadap serangan asam sulfat. Seluruh benda uji terlebih dahulu dirawat dalam air biasa selama 28 hari untuk memastikan proses hidrasi semen berlangsung optimal sebelum dilakukan perendaman dalam larutan asam sulfat. Pendekatan ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi beton yang telah mencapai kekuatan awal sebelum terpapar lingkungan agresif. Hasil pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Berdasarkan Gambar 1, beton kontrol 100PCC menunjukkan penurunan kuat tekan yang konsisten seiring bertambahnya waktu perendaman dalam asam sulfat. Penurunan kuat tekan sebesar 8,8% pada umur 7 hari meningkat menjadi 20,1% pada umur 56 hari. Penurunan ini mengindikasikan rendahnya ketahanan beton PCC terhadap lingkungan asam, yang disebabkan oleh reaksi antara kalsium hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasil hidrasi semen dengan asam sulfat, yang membentuk senyawa gipsum $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dan *ettringite*. Produk reaksi tersebut bersifat ekspansif dan menyebabkan kerusakan mikrostruktur beton berupa retak dan pelemahan matriks, yang pada akhirnya menurunkan kuat tekan beton (Alla et al., 2020).

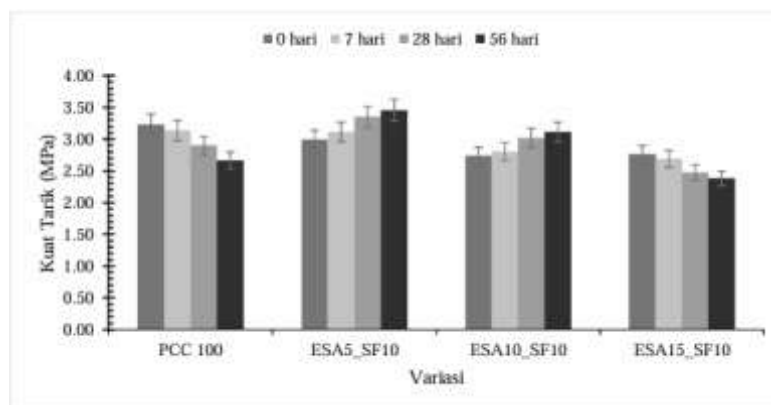
Sebaliknya, beton dengan variasi ESA5SF10 dan ESA10SF10 menunjukkan tren peningkatan kuat tekan setelah direndam dalam asam sulfat. Variasi ESA5SF10 mencapai kuat tekan tertinggi sebesar 36,9 MPa pada umur 56 hari, dengan peningkatan sebesar 51,1% dibandingkan beton kontrol. Peningkatan ini menunjukkan bahwa kombinasi abu cangkang telur sebesar 5% dan silika fume sebesar 10% mampu meningkatkan densitas matriks beton serta mengurangi jumlah kapur bebas yang rentan terhadap serangan asam.

Peningkatan kuat tekan pada beton ESA5SF10 dan ESA10SF10 disebabkan oleh reaksi pozzolan antara kandungan SiO_2 dalam silika fume dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang berasal dari semen serta abu cangkang telur. Reaksi ini menghasilkan gel C-S-H sekunder yang mengisi pori-pori beton dan memperkuat ikatan antarpartikel, sehingga beton menjadi lebih padat dan lebih tahan terhadap penetrasi larutan asam. Hasil ini sejalan dengan penelitian Olivia dan Indrawan (2013) yang menyatakan bahwa penggunaan silika fume secara optimal dapat meningkatkan kekuatan dan durabilitas beton dalam lingkungan yang agresif.

Pada variasi ESA15SF10, kuat tekan beton justru menunjukkan penurunan signifikan setelah perendaman asam sulfat. Kandungan abu cangkang telur yang terlalu tinggi menyebabkan *workability* beton menurun dan menghasilkan struktur beton yang lebih berpori. Hal ini sejalan dengan penelitian Afolayan (2017) yang menyimpulkan bahwa abu cangkang telur memiliki kadar CaO sebesar 50,7%, mendekati kadar CaO pada semen Portland. Dengan perbandingan rasio air semen sebesar 0,5 didapat nilai kuat tekan tertinggi terdapat pada substitusi parsial 10% abu cangkang telur ke dalam campuran beton. Semakin tinggi persentase abu cangkang telur yang ditambahkan, nilai setting time beton segar akan menurun dan pengerasan beton segar akan semakin cepat. Pori-pori yang lebih besar memudahkan penetrasi ion sulfat ke dalam beton, sehingga mempercepat pembentukan gipsum dan *ettringite* dalam matriks beton. Kondisi ini menyebabkan beton ESA15SF10 memiliki ketahanan sulfat yang rendah dibandingkan variasi lainnya.

3.3 Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

Nilai kuat tarik belah beton menunjukkan tren yang sejalan dengan hasil kuat tekan. Campuran dengan ESA 5% dan SF 10% menunjukkan performa terbaik dibandingkan dengan beton kontrol maupun variasi dengan kadar ESA lebih tinggi. Beton dengan kadar ESA 10% dan 15% mengalami penurunan kuat tarik belah yang lebih besar setelah direndam dalam asam sulfat, yang mengindikasikan meningkatnya potensi retak mikro akibat degradasi pasta semen. Hasil pengujian kuat tarik belah beton dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Beton

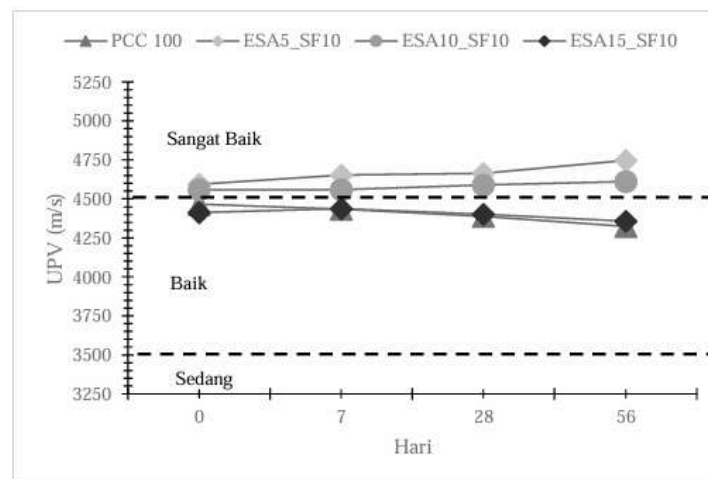
Beton variasi ESA5SF10 dan ESA10SF10 menunjukkan peningkatan kuat tarik belah setelah perendaman dalam larutan asam sulfat, dengan nilai tertinggi masing-masing mencapai 3,23 MPa dan 3,11 MPa pada umur 56 hari. Peningkatan ini dikaitkan dengan pembentukan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan melalui reaksi pozzolanik antara silika fume (SF) dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yang berasal dari hidrasi semen serta kontribusi CaO dari abu cangkang telur (ESA) pada kadar optimum (Zhu et al., 2024). Gel C-S-H sekunder ini berfungsi mengisi pori-pori mikro dan memperbaiki zona transisi antarmuka (*interfacial transition zone*, ITZ) antara agregat dan pasta semen, sehingga menghasilkan ITZ yang lebih rapat, homogen, dan kuat dalam menahan tegangan tarik. Pada kadar ESA yang rendah hingga sedang (5–10%), pengaruh antara efek pengisian pori dari partikel halus ESA dan reaksi pozzolanik dari silika fume meminimalkan kerentanan terhadap degradasi asam, karena mengurangi jumlah $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bebas yang rentan terhadap pelarutan oleh asam sulfat serta membatasi penetrasi ion agresif ke dalam matriks beton. Hasil pengujian ini mengonfirmasi bahwa kadar ESA optimum memungkinkan pemanfaatan kontribusi CaO secara efektif tanpa secara signifikan meningkatkan kerentanan terhadap serangan asam sulfat, berbeda dengan kadar lebih tinggi yang cenderung menurunkan performa akibat peningkatan porositas (Assi et al., 2021; Syamsul et al., 2022).

Beton variasi ESA15SF10 menunjukkan nilai kuat tarik belah yang lebih rendah dibandingkan beton kontrol (100PCC) serta variasi ESA5SF10 dan ESA10SF10 setelah perendaman dalam larutan asam sulfat. Kondisi ini teramati pada benda uji yang telah mencapai kuat tarik belah tertinggi setelah perawatan awal dalam air biasa selama 28 hari, diikuti oleh penurunan performa secara bertahap seiring durasi perendaman dalam asam sulfat. Penurunan tersebut disebabkan oleh *workability* campuran yang kurang baik pada kadar substitusi abu cangkang telur (ESA) yang tinggi, sehingga menghasilkan beton dengan porositas yang lebih besar dan banyak (Noui et al., 2025). Porositas yang meningkat memudahkan penetrasi ion sulfat dan asam ke dalam matriks beton, mempercepat degradasi mikrostruktur melalui pembentukan senyawa ekspansif seperti gipsum dan *ettringite*, yang pada akhirnya menurunkan ketahanan terhadap tegangan tarik (Metalssi et al., 2023). Hal ini sejalan dengan penelitian Tavli & Artan (2025), di mana kadar pengganti semen berbasis *eggshell powder* yang tinggi cenderung meningkatkan porositas dan mengurangi durabilitas terhadap serangan asam sulfat akibat kurangnya kepadatan matriks serta reaktivitas pozzolanik yang tidak optimal pada dosis berlebih. Oleh karena itu, kadar ESA 15% dengan SF 10% tidak memberikan hasil yang efektif untuk

ketahanan tarik pada kondisi agresif, berbeda dengan variasi kadar yang lebih rendah yang mempertahankan kondisi internal dengan lebih baik.

3.4 Pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*)

Hasil pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) menunjukkan bahwa beton dengan kombinasi ESA 5% dan SF 10% memiliki nilai UPV tertinggi dibandingkan dengan variasi lainnya setelah perendaman asam sulfat. Nilai UPV yang lebih tinggi mengindikasikan beton dengan kepadatan internal yang lebih baik dan tingkat kerusakan mikrostruktur yang lebih rendah. Hasil pengujian UPV dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Hasil Pengujian UPV

Gambar 3 memperlihatkan nilai cepat rambat gelombang beton normal PCC dan beton variasi abu cangkang telur dan silika fume pada umur 0, 7, 28, dan 56 hari perendaman dalam air larutan asam sulfat. Nilai kecepatan rambat gelombang beton 100PCC dan ESA15SF10 mengalami penurunan pada 56 hari perendaman asam sulfat. Sedangkan beton ESA5SF10 dan ESA10SF10 mengalami peningkatan nilai cepat rambat gelombang pada 56 hari perendaman dalam asam sulfat.

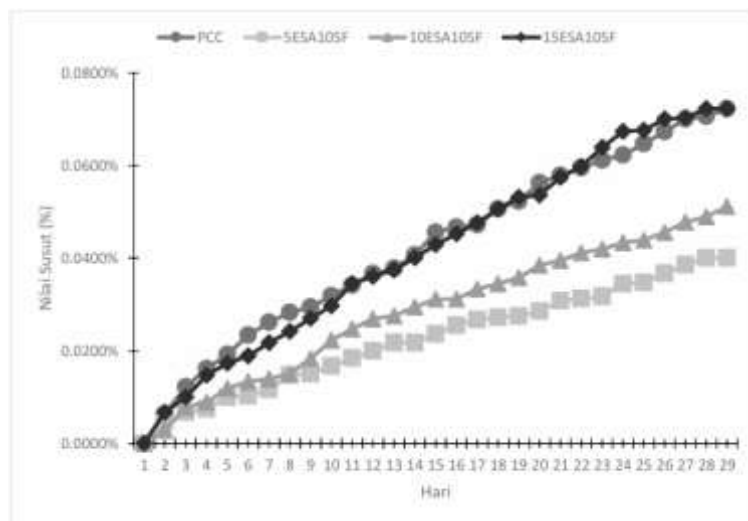
Peningkatan ini mencerminkan perbaikan kepadatan matriks dan integritas internal beton, yang disebabkan oleh efek kombinasi dari reaksi pozzolanik silika fume dengan kalsium hidroksida (dari hidrasi semen dan kontribusi CaO ESA), sehingga menghasilkan gel C-S-H tambahan yang lebih padat, mengisi pori-pori mikro, serta mengurangi permeabilitas terhadap ion agresif (Li et al., 2025).

Temuan ini sejalan dengan penelitian-penelitian yang menunjukkan bahwa nilai UPV dapat digunakan sebagai metode non-destruktif untuk menilai tingkat degradasi maupun peningkatan durabilitas beton pada lingkungan asam sulfat. Beberapa studi melaporkan bahwa penggunaan material pengganti semen berbasis limbah kalsium, seperti eggshell ash, yang dikombinasikan dengan pozzolan seperti silika fume pada kadar yang tepat, mampu mempertahankan bahkan meningkatkan kepadatan internal beton setelah terpapar lingkungan agresif (Jo et al., 2019; Ndagi et al., 2019; Pooja & Venkatesh, 2024). Hasil ini menegaskan

pentingnya penentuan proporsi ESA yang optimal untuk memaksimalkan efek kombinasi dengan silika fume dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan asam sulfat.

3.5 Pengujian Susut Beton

Pengujian susut dilakukan untuk mengkaji perubahan volume yang terjadi pada beton dalam kondisi suhu ruang. Pengujian dilakukan selama 28 hari setelah *rest period* dengan pembacaan dial gauge setiap hari dan menghasilkan nilai negatif, yang berarti bahwa diperoleh kondisi susut. Nilai tersebut di mutlakkan pada perhitungan sehingga diperoleh nilai positif. Nilai susut untuk kondisi dry curing dipaparkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Pengujian Susut Beton

Gambar 4 memperlihatkan perubahan nilai susut beton pada campuran kontrol (100PCC) serta beton dengan substitusi abu cangkang telur (ESA) dan penambahan silika fume (SF) selama perawatan pada suhu ruang hingga umur 28 hari. Seluruh variasi campuran menunjukkan peningkatan nilai susut seiring waktu, namun laju peningkatan tersebut semakin melambat pada umur perawatan yang lebih lanjut. Hal ini menunjukkan bahwa penguapan air berlangsung lebih cepat pada tahap awal perawatan beton, ketika kandungan air bebas dalam beton masih tinggi dan proses hidrasi semen masih berlangsung secara intensif.

Penambahan material pozzolan seperti silika fume umumnya meningkatkan kemampuan beton dalam menyerap air, terutama pada tahap awal pencampuran. Kombinasi abu cangkang telur dan silika fume juga dapat memperlambat waktu ikat beton, karena panas hidrasi yang relatif tinggi serta sifat kedua material tersebut yang mudah menyerap air (Ma et al., 2022). Pada campuran dengan kadar substitusi abu cangkang telur yang lebih tinggi, seperti ESA15SF10, jumlah air yang terserap menjadi lebih besar. Akibatnya, air yang menguap selama perawatan pada suhu ruang juga meningkat, sehingga menimbulkan tarikan internal yang lebih kuat pada beton dan menyebabkan nilai susut yang lebih tinggi dibandingkan campuran dengan kadar substitusi yang lebih rendah (Uddin et al., 2024). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan penggunaan material pozzolan berukuran sangat halus, seperti silika fume, dapat meningkatkan risiko susut pengeringan apabila tidak diimbangi dengan desain campuran yang tepat. Risiko ini

menjadi lebih besar ketika silika fume dikombinasikan dengan material berbasis kalsium yang bersifat higroskopis, seperti abu cangkang telur (Wan et al., 2023). Oleh karena itu, penentuan proporsi substitusi abu cangkang telur yang optimal menjadi faktor penting untuk menekan nilai susut, sekaligus tetap memanfaatkan pengaruh gabungan silika fume dalam meningkatkan kepadatan dan durabilitas beton secara keseluruhan.

3.6 Impikasi Beton ESA Sebagai Substitusi Parsial Semen

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa abu cangkang telur (ESA) dapat digunakan secara efektif sebagai substitusi parsial semen pada kadar tertentu, terutama jika dikombinasikan dengan silika fume (SF) pada proporsi yang sesuai. Kombinasi ESA 5% dan SF 10% memberikan kinerja paling optimal, tidak hanya dalam meningkatkan sifat mekanik beton, seperti kuat tekan dan kuat tarik belah, tetapi juga dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan asam sulfat. Peningkatan kinerja ini berkaitan dengan perbaikan struktur mikro beton, penurunan porositas, serta peningkatan kepadatan internal, yang tercermin dari nilai UPV yang lebih tinggi dan nilai susut yang lebih rendah.

Pendekatan ini mendukung konsep beton berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah biomaterial, di mana limbah cangkang telur yang tersedia dalam jumlah besar dapat digunakan untuk mengurangi konsumsi semen Portland, menekan emisi karbon, serta mengurangi volume limbah padat yang dibuang ke lingkungan. Temuan ini menegaskan bahwa strategi substitusi semen sebaiknya tidak hanya berfokus pada peningkatan kekuatan mekanik awal, tetapi juga mempertimbangkan durabilitas jangka panjang beton dalam lingkungan yang agresif. Hal ini relevan untuk aplikasi pada infrastruktur sanitasi, sistem drainase, instalasi pengolahan limbah, serta kawasan industri yang sering terpapar larutan asam atau larutan sulfat. Dengan demikian, kombinasi ESA dan SF berpotensi menjadi solusi praktis dan ramah lingkungan untuk meningkatkan umur layan struktur beton pada kondisi korosif, sekaligus berkontribusi pada upaya pengurangan dampak lingkungan melalui pengembangan material konstruksi berbasis limbah lokal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai kinerja mekanik dan ketahanan beton dengan substitusi abu cangkang telur (*eggshell ash*, ESA) dan penambahan silika fume (SF) dalam lingkungan asam sulfat, dapat disimpulkan bahwa campuran ESA5SF10 menghasilkan performa terbaik dibandingkan variasi lainnya. Pada umur perendaman 56 hari, campuran tersebut mencapai kuat tekan sebesar 36,9 MPa atau meningkat sekitar 51,1% dibandingkan beton kontrol (PCC). Selain itu, campuran ESA5SF10 juga menunjukkan nilai kuat tarik belah dan *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) yang lebih tinggi, serta nilai susut yang lebih rendah dibandingkan beton kontrol maupun variasi dengan kadar ESA yang lebih tinggi.

Peningkatan kadar ESA hingga 10% masih memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan beton kontrol, namun efektivitasnya cenderung menurun seiring bertambahnya umur perendaman dalam larutan asam sulfat. Sebaliknya, penggunaan ESA sebesar 15%

menyebabkan penurunan kinerja mekanik dan durabilitas akibat meningkatnya porositas beton dan kerentanan terhadap serangan asam sulfat.

Penambahan silika fume terbukti berperan dalam meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton melalui reaksi pozzolanik dan efek pengisian (*filler effect*), sehingga mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap lingkungan asam sulfat. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi ESA dan SF pada proporsi optimum berpotensi menjadi alternatif material beton yang lebih berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah biomaterial dan pengurangan penggunaan semen Portland.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena evaluasi durabilitas beton hanya dilakukan berdasarkan parameter kuat tekan, kuat tarik belah, UPV, dan susut beton. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan pengujian kehilangan massa, penetrasi ion sulfat, porositas beton, serta karakterisasi mikrostruktur menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Selain itu, pengujian dengan periode perendaman yang lebih panjang dan tingkat keasaman yang berbeda perlu dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai ketahanan jangka panjang beton berbasis abu cangkang telur dan silika fume pada lingkungan agresif.

DAFTAR PUSTAKA

- Afolayan, J. O. (2017). Experimental Investigation of the Effect of Partial Replacement of Cement with Eggshell Ash on the Rheological Properties of Concrete. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 4(12), 1–7.
- Alla, S., Jayaram, M., & Asadi, S. S. (2020). An experimental investigation for replacements of river sand and cement with Robosand, fly-ash and silica fume in concrete to evaluate the influence in durability properties. *Materials Today: Proceedings*, 43(xxxx), 954–961. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.340>
- Assi, L.N. et al. (2021) ‘Observations of Supplementary Cementitious Materials Effects on the Performance of Concrete Foundation’, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 856(1). : <https://doi.org/10.1088/1755-1315/856/1/012020>.
- Ganapathi, H. and Phukan, M. (2020) *Environmental Hazards of Limestone Mining and Adaptive Practices for Environment Management Plan*. Springer International Publishing. : https://doi.org/10.1007/978-3-030-38152-3_8.
- Golewski, G.L. (2021) ‘Green concrete based on quaternary binders with significant reduced of co2 emissions’, *Energies*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/en14154558>.
- Griffiths, S. et al. (2023) ‘Decarbonizing the cement and concrete industry : A systematic review of socio-technical systems , technological innovations , and policy options AMP RCA’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180 (September 2022), p. 113291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113291>.
- Hamada, H. M., Tayeh, B. A., Al-Attar, A., Yahaya, F. M., Muthusamy, K., & Humada, A. M. (2020). Sustainable concrete incorporating eggshell powder as partial replacement of cement. *Construction and Building Materials*, 262, 120630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120630>
- Hilal, N., Al Saffar, D. M., & Ali, T. K. M. (2021). Effect of egg shell ash and strap plastic waste on properties of high strength sustainable self-compacting concrete. *Arabian Journal of* <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06654-x> *Geosciences*, 14(4).

- Khan, M.I., Abbas, Y.M. and Fares, G. (2023) 'Enhancing Cementitious Concrete Durability and Mechanical Properties through Silica Fume and Micro-Quartz', *Sustainability* (Switzerland), 15(22). : <https://doi.org/10.3390/su152215913>.
- Khudair, J.A.S. and Faleh, S.K. (2025) 'Sulphate Resistance of Concrete Containing Silica-Fume', 1st Basrah International Civil Engineering Conference (BICCE-01), 10(38), pp. 2574–2600. : <https://doi.org/10.65405/9g2evt78>.
- Li, H. et al. (2025) 'Research on the influence of silica fume on the long-term strength development of lightweight cement', *Petroleum* [Preprint], (xxxx). : <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2025.12.002>.
- Lv, S., Ma, Y., Qiu, C., Zhou, Q., & Liu, J. (2020). Effect of sulfuric acid attack on the properties of concrete with different binders. *Construction and Building Materials*, 235, 117447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117447>
- Ma, X. et al. (2022) 'Hydration reaction and compressive strength of small amount of silica fume on cement-fly ash matrix', *Case Studies in Construction Materials*, 16(March), pp. 1–15. : <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00989>.
- Mehta, A., & Ashish, D. K. (2020). Silica fume and waste glass in cement concrete production: A review. *Journal of Building Engineering*, 29(March), 100888. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100888>
- Metalssi, O.O. et al. (2023) 'Effect of an Early-Age Exposure on the Degradation Mechanisms of Cement Paste under External Sulfate Attack', *Materials*, 16(17). : <https://doi.org/10.3390/ma16176013>.
- Moradikhrou, A.B. and Ravanshadnia, M. (2021) 'Evaluation of CO₂ emissions reduction strategies in the Iranian cement industry', *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 5(3), pp. 107–114. : <https://doi.org/10.22034/jcema.2021.281049.1054>.
- Nabighods, K. et al. (2024) Evaluation of self-compacting concrete containing pozzolan (zeolite, metakaolin & silica fume) and polypropylene fiber against sulfate attacks with different PH: an experimental study, *Innovative Infrastructure Solutions*. Springer International Publishing. : <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01309-0>.
- Ndagi, A. et al. (2019) 'Non-destructive assessment of concrete deterioration by ultrasonic pulse velocity: A review', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1). : <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012015>.
- Noui, A. et al. (2025) 'Modeling and optimization of Multi-Waste foam geopolymers using central composite design and neural networks', *Scientific Reports*, 15(1), pp. 1–19. : <https://doi.org/10.1038/s41598-025-24058-9>.
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2009). Properties of concrete exposed to sulfuric acid attack. *Materials & Design*, 30(9), 3749–3756. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.01.026>
- Olivia, Monita, Wulandari, C., Sitompul, I. R., Darmayanti, L., & Djauhari, Z. (2016). Study of fly ash (FA) and palm oil fuel ash (POFA) geopolymer mortar resistance in acidic peat environment. *Materials Science Forum*, 841(May 2017), 126–132. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.841.126>
- Pliya, P., & Cree, D. (2015). Limestone derived eggshell powder as a replacement in Portland cement mortar. *Construction and Building Materials*, 95, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.103>
- Pooja, S.M. and Venkatesh, S. V (2024) 'Durability Testing Of Geopolymer Concrete Against Acidic And Sulphuric Environments Using Ultrasonic Pulse Wave Velocity Test', *Nanotechnology Perceptions*, 20(S11), pp. 917–934. : <https://doi.org/10.62441/nano-ntp.v20is11.69>.

- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Syamsul, M. et al. (2022) ‘the Effect of Utilizing Silica Fume and Eggshell Ash on the Geotechnical’, *Jurnal Teknologi*, 1(84), pp. 159–170.
- Tavli, E. and Artan, R. (2025) ‘Utilization of Eggshell Powder in Cement Mortars: Enhancing Mechanical and Thermal Properties for Sustainable Construction’, pp. 1–23. : <https://doi.org/10.2174/0118748368445575251210172203>.
- Uddin, M.A. et al. (2024) ‘Effect of Silica Fume on Compressive Strength and Water Absorption of the Portland Cement–Silica Fume Blended Mortar’, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(4), pp. 4803–4811. : <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08204-x>.
- Uzbas, B. and Aydin, A.C. (2020) ‘Microstructural Analysis of Silica Fume Concrete with Scanning Electron Microscopy and X-Ray Diffraction’, *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 10(3), pp. 5845–5850. : <https://doi.org/10.48084/etasr.3288>.
- Volaity, S.S. et al. (2025) ‘Towards decarbonization of cement industry: a critical review of electrification technologies for sustainable cement production’, *npj Materials Sustainability*, 3(1). : <https://doi.org/10.1038/s44296-025-00068-6>.
- Wan, Z. et al. (2023) ‘Effect of silica fume on shrinkage of cement-based materials mixed with alkali accelerator and alkali-free accelerator’, *Journal of Materials Research and Technology*, 22, pp. 825–837. : <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.110>.
- Zahara, A., Bhernama, B. G., & Harahap, M. R. (2020). Pengaruh Suhu Kalsinasi Terhadap Sintesis Katalis Heterogen CaO dari Cangkang Telur. *Amina*, 2(2), 85–91.
- Zhu, F. et al. (2024) ‘Strength Reduction Due to Acid Attack in Cement Mortar Containing Waste Eggshell and Glass: A Machine Learning-Based Modeling Study’, *Buildings*, 14(1). : <https://doi.org/10.3390/buildings14010225>.