

PENGARUH MODIFIKASI AGREGAT HALUS DENGAN CANGKANG KERANG DARAH DAN PENAMBAHAN FILLER FLY ASH TERHADAP KINERJA BETON PADA LINGKUNGAN SULFAT

Nur Khotimah Handayani*, Alfayed Jezha Wijaya, Putra Ramadhan, Pramudya Aditya Anantatur

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan Kartasura 57102 Telp 0271 717417
Email: nur.k.handayani@ums.ac.id

Abstrak

Lingkungan sulfat merupakan salah satu penyebab utama degradasi beton, khususnya pada struktur yang terpapar tanah, air tanah, dan air laut. Serangan sulfat memicu pembentukan senyawa ekspansif yang merusak mikrostruktur beton dan menurunkan kinerja mekanik serta durabilitasnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh modifikasi agregat halus menggunakan cangkang kerang darah dan penambahan fly ash sebagai filler dalam upaya memperbaiki mikrostruktur material terhadap kinerja beton pada lingkungan sulfat. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan variasi substitusi agregat halus cangkang kerang darah sebesar 0%, 3%, 5%, dan 7%, sedangkan fly ash ditambahkan tetap sebesar 20% dari berat semen. Beton dirancang dengan kuat tekan rencana 25 MPa dan rasio air-semen 0,45. Benda uji silinder direndam dalam air biasa dan larutan sulfat hingga umur 28 hari, kemudian diuji sifat segar, berat isi, dan kuat tekan. Hasil menunjukkan bahwa modifikasi agregat halus menurunkan modulus halus butir namun masih memenuhi gradasi standar. Kombinasi cangkang kerang 5% dan fly ash 20% menghasilkan kepadatan beton tertinggi dan kuat tekan maksimum pada lingkungan sulfat, yaitu 14,8 MPa. Peningkatan kadar cangkang hingga 7% menyebabkan penurunan kinerja akibat meningkatnya porositas. Hasil ini menunjukkan bahwa substitusi cangkang kerang darah pada kadar moderat dengan penambahan fly ash efektif meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat.

Kata kunci : beton tahan sulfat, cangkang kerang darah, fly ash, agregat halus, kuat tekan.

Pendahuluan

Lingkungan agresif yang mengandung ion sulfat merupakan salah satu penyebab utama degradasi beton pada beton bertulang, terutama pada struktur yang terpapar tanah, air tanah, dan air laut dalam jangka panjang. Ion sulfat dapat berdifusi ke dalam beton melalui pori-pori dan retakan, kemudian bereaksi dengan produk hidrasi semen membentuk senyawa ekspansif seperti etringit dan gipsum, yang menyebabkan ekspansi volumetrik, retak, peningkatan permeabilitas, serta penurunan kekuatan dan durabilitas beton secara progresif (Çullu and Arslan, 2014; Atahan and Dikme, 2011; Al-Dulaijan et al., 2003). Kerusakan beton akibat serangan sulfat terbukti semakin dipercepat oleh keberadaan retakan awal dan tingginya konsentrasi sulfat, yang secara signifikan meningkatkan kehilangan massa dan penurunan kuat tekan beton (Qin et al., 2023; Han et al., 2019; Jiang and Niu, 2016).

Serangan sulfat tidak hanya memengaruhi material dan struktur matriks beton, tetapi juga menurunkan kualitas ikatan antarmuka dan kinerja elemen beton bertulang. Studi eksperimental menunjukkan bahwa serangan sulfat melemahkan ikatan antarmuka beton dan mempercepat penetrasi ion agresif (Gao et al., 2019), sedangkan kajian konseptual dan numerik melaporkan bahwa struktur beton bawah tanah, fondasi, dan elemen yang terpapar lingkungan sulfat–klorida mengalami penurunan kapasitas struktural dan kinerja seismik (Zhu et al., 2025; Yao and Li, 2019; Barr, 2003). Oleh karena itu, peningkatan ketahanan beton terhadap serangan sulfat menjadi isu krusial dalam pengembangan material beton yang andal untuk lingkungan agresif.

Ketahanan beton terhadap serangan sulfat sangat berkaitan dengan karakteristik mikrostruktur beton. Beton dengan struktur pori yang lebih rapat dan permeabilitas rendah cenderung mampu menghambat difusi ion sulfat dan memperlambat pembentukan produk reaksi ekspansif, sehingga menunjukkan durabilitas yang lebih baik (Elahi et al., 2021; Jiang and Niu, 2016). Retakan mikro yang terbentuk pada tahap awal diketahui mempercepat penetrasi sulfat dan memperparah degradasi beton, sebagaimana ditunjukkan melalui pengamatan mikrostruktur dan pemodelan difusi–reaksi (Yin et al., 2022; Han et al., 2019). Oleh karena itu, pengendalian mikrostruktur beton merupakan pendekatan utama dalam meningkatkan durabilitas beton pada lingkungan sulfat.

Salah satu strategi yang banyak dikembangkan untuk memperbaiki mikrostruktur beton adalah pemanfaatan material mineral berukuran sangat halus sebagai filler (pengisi). Fly ash memiliki ukuran partikel halus yang mampu mengisi rongga antar partikel semen dan agregat, memperhalus struktur pori, serta menurunkan permeabilitas beton. Peran fly ash sebagai filler telah dilaporkan mampu meningkatkan kepadatan mikrostruktur beton dan menurunkan

ekspansi serta kehilangan massa akibat paparan sulfat (Elahi et al., 2021; De la Varga et al., 2018; Jiang and Niu, 2016; Atahan and Dikme, 2011). Tinjauan mutakhir menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai *filler* pada kadar moderat, umumnya pada kisaran 10–30%, efektif dalam meningkatkan durabilitas beton tanpa harus berperan sebagai pengganti semen utama (Moolchandani, 2025).

Perbaikan mikrostruktur sebagai mekanisme utama peningkatan ketahanan sulfat juga diperkuat oleh penelitian pada beton dengan penambahan material mineral halus lainnya. Solikin et al., (2024) menunjukkan bahwa pemadatan mikrostruktur beton akibat penambahan bahan halus mampu menurunkan ekspansi dan kehilangan berat beton pada lingkungan sulfat. Temuan ini menegaskan bahwa strategi pengendalian mikrostruktur, baik melalui efek *filler* maupun penyempurnaan struktur pori, merupakan faktor kunci dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat.

Upaya dalam memperbaiki mikrostruktur beton pada penelitian ini dilakukan dengan memodifikasi gradasi agregat halus dengan memanfaatkan cangkang kerang darah untuk menggantikan sebagian pasir. Modifikasi agregat halus menggunakan cangkang yang telah dihancurkan dan diayak lolos saringan ukuran 1,18 mm, yang dipandang sebagai ukuran optimum karena mendekati gradasi agregat halus alami dan memungkinkan distribusi partikel yang lebih homogen dalam matriks beton. Ukuran ini membantu menjaga kontinuitas gradasi dan interaksi mekanis antara agregat dan pasta semen (Mo et al., 2018). Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan cangkang kerang darah pada kadar terbatas masih mampu menghasilkan kuat tekan beton yang memenuhi kebutuhan struktural, sementara berbagai studi melaporkan bahwa tingkat substitusi 5–15% memberikan kinerja beton yang relatif optimum; sebaliknya, kadar dan ukuran partikel yang lebih besar cenderung meningkatkan porositas dan menurunkan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif, termasuk lingkungan sulfat (Deng et al., 2025; Hasan et al., 2024; Nadiah Ruslan et al., 2024; Ruslan et al., 2022; Mo et al., 2018).

Peningkatan porositas akibat penggunaan agregat halus berbasis cangkang kerang ini dapat memperbesar jalur penetrasi ion sulfat dan mempercepat degradasi beton pada lingkungan sulfat. Oleh karena itu, diperlukan strategi pendamping untuk mengendalikan mikrostruktur beton berbasis cangkang kerang darah. Dalam hal ini, penggunaan *fly ash* sebagai *filler* fisik pada kadar moderat dipandang mampu mengimbangi peningkatan porositas tersebut melalui mekanisme pemadatan struktur pori dan penurunan permeabilitas beton (Moolchandani, 2025; Elahi et al., 2021; De la Varga et al., 2018).

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji *fly ash* dan cangkang kerang secara terpisah, penelitian yang secara khusus menginvestigasi kombinasi modifikasi agregat halus menggunakan cangkang kerang darah dibawah 10% dan penambahan *fly ash* sebesar 20% sebagai *filler* terhadap kinerja beton pada lingkungan sulfat masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kombinasi tersebut terhadap kinerja beton pada lingkungan sulfat sebagai upaya pengembangan beton berkelanjutan dengan durabilitas yang memadai.

Metode

a) Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium yang bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh modifikasi agregat halus menggunakan cangkang kerang darah dan penambahan *filler fly ash* terhadap kinerja beton pada lingkungan sulfat. Pendekatan eksperimental dipilih untuk memperoleh gambaran langsung mengenai perubahan kuat tekan beton akibat variasi material penyusun serta kondisi perendaman, sebagaimana umum diterapkan dalam kajian ketahanan beton terhadap serangan sulfat (Elahi et al., 2021; Jiang and Niu, 2016; Atahan and Dikme, 2011).

b) Material Penyusun Beton

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen portland, air, agregat kasar alami, agregat halus alami, cangkang kerang darah, dan *fly ash*. Cangkang kerang darah digunakan sebagai bahan substitusi agregat halus setelah melalui proses pembersihan, pengeringan, dan penghancuran hingga lolos saringan no. 10 (ukuran 1,18 mm). Ukuran partikel yang halus ini dipilih karena bentuk partikel cangkang yang tidak beraturan sehingga ukuran <2mm diharapkan mampu berperan sebagai agregat mikro sekaligus memengaruhi struktur pori beton (Mo et al., 2018). *Fly ash* didapatkan dari PLTU Tanjung Jati B Jepara yang memiliki ukuran butiran-butiran lolos melewati saringan no.200 (ukuran 0,075 mm) digunakan sebagai *filler* tambahan dengan kadar tetap sebesar 20% terhadap berat semen. Penambahan *fly ash* pada kadar moderat dipilih berdasarkan temuan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa *fly ash* berfungsi efektif sebagai *filler* fisik, sehingga mampu memperhalus mikrostruktur beton dan menurunkan permeabilitas, khususnya pada lingkungan sulfat (Moolchandani, 2025; Elahi et al., 2021; De la Varga et al., 2018; Atahan and Dikme, 2011).

c) Variasi Campuran Beton

Variasi penelitian dilakukan pada persentase substitusi agregat halus dengan cangkang kerang darah, yaitu sebesar 0%, 3%, 5%, 7%, dari total berat agregat halus (lihat Tabel 1). Rentang variasi ini dipilih untuk merepresentasikan kadar rendah, mengingat penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kinerja beton dengan agregat berbasis cangkang kerang darah cenderung optimum pada kadar rendah hingga menengah, sedangkan kadar tinggi

berpotensi meningkatkan porositas beton (Nadiah Ruslan et al., 2024; Shao et al., 2024; Ruslan et al., 2022; Mo et al., 2018). Kadar *fly ash* dipertahankan tetap pada seluruh variasi campuran untuk mengisolasi pengaruh substitusi agregat halus cangkang kerang terhadap kinerja beton pada lingkungan sulfat, serta untuk mengimbangi potensi peningkatan porositas akibat bentuk partikel cangkang yang tidak beraturan (De la Varga et al., 2018; Elahi et al., 2021).

d) Perancangan Campuran Beton

Perancangan campuran beton dilakukan berdasarkan metode SNI 03–2834–2000 dengan kuat tekan rencana sebesar 25 MPa dengan rasio air-semen sebesar 0,45. Nilai *slump* ditargetkan kurang dari 50 mm untuk merepresentasikan beton dengan kepadatan tinggi dan permeabilitas rendah, yang umumnya direkomendasikan untuk pekerjaan fondasi dan struktur yang terpapar lingkungan agresif sulfat (Çullu & Arslan, 2014; Jiang & Niu, 2016). Pengendalian *slump* juga dimaksudkan untuk membatasi rasio air-semen agar tidak memperbesar porositas beton. Kebutuhan bahan penyusun beton hasil perancangan dan variasi sampel uji ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan bahan penyusun beton per 1 m³

Kode Sampel	Rendaman	Filler Fly ash (%)	Cangkang Kerang (%)	Air (l/m ³)	Semen (kg/m ³)	Agregat Halus (kg/m ³)	Cangkang Kerang (kg/m ³)	Agregat Kasar (kg/m ³)	Fly Ash (kg/m ³)
BN	Air biasa	0	0	190	422,22	590,72	0	1097,1	0
BN-S	Larutan Sulfat	0	0	190	422,22	590,72	0	1097,1	0
BF-C3	Larutan Sulfat	20	3	190	422,22	573,00	17,72	1097,1	84,44
BF-C5	Larutan Sulfat	20	5	190	422,22	561,18	29,54	1097,1	84,44
BF-C7	Larutan Sulfat	20	7	190	422,22	549,37	41,35	1097,1	84,44

e) Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Benda uji yang digunakan berbentuk silinder beton dengan dimensi diameter 10 cm dan tinggi 20 cm. Proses pencampuran, pencetakan, dan pemadatan beton dilakukan sesuai prosedur standar laboratorium. Setelah proses pengecoran, benda uji dirawat awal dalam kondisi lembap dan dibuka bekistingnya pada umur 24 jam. Setelah itu dilakukan perendaman (*curing*) sesuai variasi lingkungan yang ditetapkan sampai 28 hari.

f) Kondisi Perendaman

Kondisi perendaman dengan larutan sulfat dilakukan untuk merepresentasikan pengaruh lingkungan sulfat. Benda uji beton normal digunakan sebagai kontrol dilakukan dalam dua kondisi perendaman, yaitu perendaman dalam air tawar dan perendaman dalam larutan sulfat berkadar 2,7 mg/L (2,7%) (Handayani and Trisnawan, 2023) sebagai simulasi lingkungan agresif. Pemilihan metode perendaman ini didasarkan pada pendekatan eksperimental yang umum digunakan untuk mengevaluasi degradasi beton akibat serangan sulfat dan pengaruhnya terhadap penurunan kuat tekan.



Gambar 1. Pengujian kuat tekan beton dengan UTM (kiri) dengan hasil pengujian pada komputer (kanan)

g) Pengujian Kuat Tekan

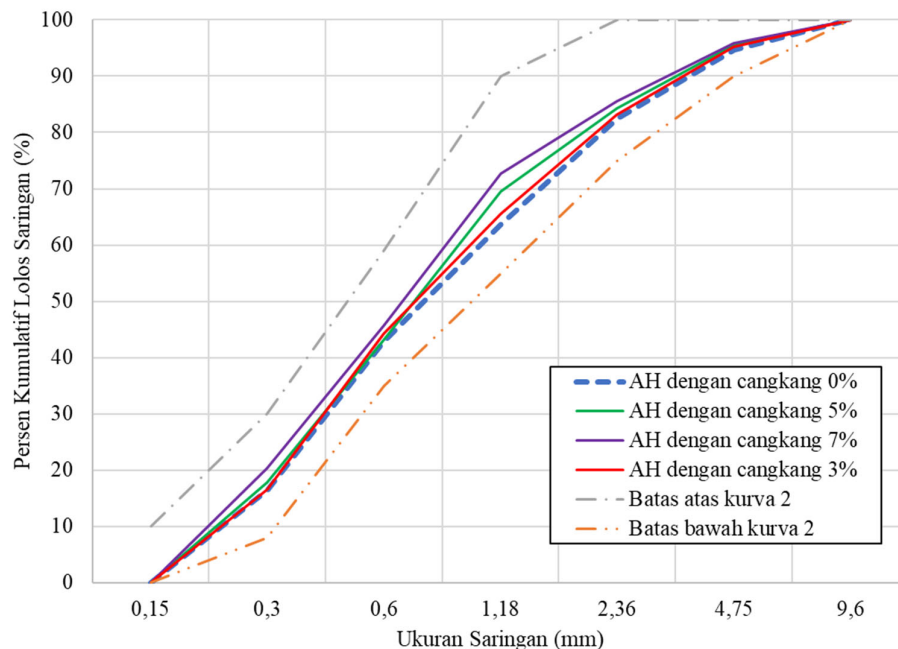
Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari. Umur ini dipilih karena kuat tekan pada usia 28 hari secara luas digunakan sebagai parameter utama evaluasi kinerja mekanik beton, serta cukup representatif untuk mengamati pengaruh awal serangan sulfat terhadap matriks beton (Elahi et al., 2021; Atahan and Dikme, 2011). Hasil pengujian kuat tekan dibandingkan antar variasi campuran dan kondisi perendaman untuk menganalisis efektivitas

kombinasi modifikasi agregat halus cangkang kerang dan penambahan fly ash dalam meningkatkan kinerja beton pada lingkungan sulfat. Pengujian dilaksanakan dengan alat *Universal Testing Machine* (UTM) pada saat beton berusia 28 hari dan benda uji mini silinder yang memiliki diameter 10 cm dan memiliki tinggi 20 cm. Data akhir dari output pengujian menggunakan alat UTM divisualisasikan dalam bentuk grafik (Gambar 1).

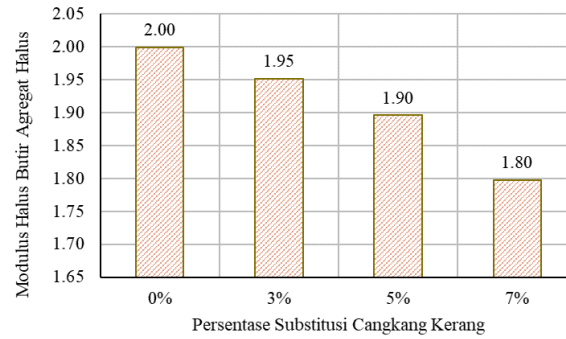
Hasil dan Pembahasan

a) Modifikasi Agregat Halus

Modifikasi agregat halus dilakukan dengan penambahan cangkang kerang yang hanya digunakan pada fraksi lolos saringan 1,18 mm dengan variasi kadar 0%, 3%, 5%, dan 7%. Hasil analisis gradasi pada Gambar 1 menunjukkan bahwa seluruh variasi agregat halus termodifikasi masih berada dalam batas gradasi standar, sehingga memenuhi persyaratan sebagai agregat halus untuk campuran beton. Pengaruh modifikasi terlihat jelas pada ukuran saringan $\leq 1,18$ mm, ditandai dengan meningkatnya persen kumulatif lolos saringan seiring bertambahnya kadar cangkang kerang, yang mengonfirmasi bahwa perubahan gradasi terjadi pada fraksi halus sesuai dengan metode penelitian. Sebaliknya, pada ukuran saringan $>1,18$ mm, seluruh kurva gradasi cenderung berimpit, menunjukkan bahwa modifikasi tidak memengaruhi distribusi butiran agregat yang lebih kasar. Pergeseran kurva gradasi ke arah atas pada fraksi halus mengindikasikan penurunan nilai modulus halus butir (Gambar 2) seiring meningkatnya kadar cangkang kerang, dengan perubahan paling signifikan pada kadar 7%. Secara teknis, modifikasi ini berpotensi meningkatkan kohesi campuran beton akibat bertambahnya fraksi halus, namun kadar cangkang yang berlebihan dapat meningkatkan kebutuhan air pencampur. Oleh karena itu, modifikasi agregat halus dengan cangkang kerang pada kisaran 3–7% dinilai memberikan perubahan gradasi yang terkendali dan masih mendekati agregat halus tanpa modifikasi.

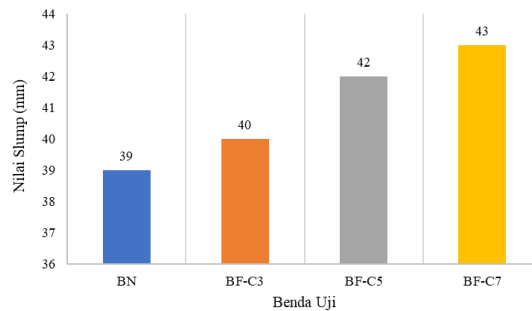


Gambar 1. Modifikasi gradasi agregat halus dengan substitusi cangkang kerang darah



Gambar 2. Diagram modulus halus butir agregat halus pada beberapa persentase variasi cangkang kerang darah
 b) Pengujian *Slump*

Grafik nilai *slump* pada Gambar 3 menunjukkan bahwa beton normal (BN) dan beton dengan penambahan cangkang kerang 3% (BF-C3) memiliki nilai *slump* sebesar 39 mm dan 40 mm, sedangkan peningkatan kadar cangkang menjadi 5% dan 7% meningkatkan nilai *slump* masing-masing menjadi 42 mm dan 43 mm. Nilai *slump* beton dengan penambahan cangkang kerang pada penelitian ini tidak menunjukkan penurunan, bahkan cenderung meningkat, meskipun secara umum penggunaan cangkang kerang sebagai agregat halus dilaporkan dapat menurunkan *workability* akibat bentuk partikel yang tidak beraturan, permukaan kasar, dan daya serap air yang relatif tinggi (Mo et al., 2018). Kondisi ini terutama disebabkan oleh adanya penambahan *fly ash* sebesar 20% yang berperan dominan dalam mengendalikan kelecakan beton segar. *Fly ash* memiliki ukuran partikel sangat halus dan morfologi cenderung bulat, sehingga mampu bertindak sebagai pelumas antar butiran, yang secara efektif mengurangi gesekan internal campuran dan meningkatkan kemampuan alir beton segar (Le et al., 2025). Selain itu, partikel *fly ash* berkontribusi dalam meningkatkan volume pasta efektif dan memperbaiki kontinuitas matriks semen, sehingga air pencampur dapat dimanfaatkan secara lebih efisien untuk menjaga *workability*.

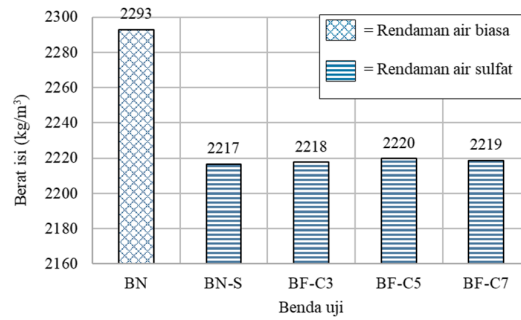


Gambar 3. Nilai rata-rata pengujian *slump test*

Mekanisme tersebut membuktikan bahwa *fly ash* mampu mengompensasi efek negatif cangkang kerang yang cenderung menyerap air dan memiliki tekstur permukaan kasar. (Deng et al., 2025) melaporkan bahwa kombinasi material berbasis kalsium karbonat dengan bahan berbutir sangat halus dapat menghasilkan *workability* yang stabil apabila proporsi dan distribusi ukuran partikel dikendalikan dengan baik. Oleh karena itu, pada penelitian ini penambahan cangkang kerang hingga 7% tidak menyebabkan penurunan nilai *slump*, karena pengaruh peningkatan *workability* akibat *fly ash* lebih dominan dibandingkan potensi penurunan kelecakan akibat karakteristik fisik cangkang kerang. Stabilitasnya nilai *slump* pada kisaran 40–43 mm menunjukkan bahwa kombinasi *fly ash* dan cangkang kerang menghasilkan peningkatan *workability* yang terkendali tanpa mengorbankan kestabilan campuran beton segar.

c) Pengujian Berat Isi Beton

Uji berat isi beton dilakukan pada umur 28 hari sebelum pengujian kuat tekan, dengan menimbang benda uji silinder kemudian mencatat dan menganalisis hasilnya. Beton BN yang direndam air biasa memiliki berat isi lebih tinggi (2293 kg/m³) dibandingkan beton BN-S yang direndam air sulfat dengan penurunan sekitar 76 kg/m³ (Gambar 4). Hal ini menunjukkan bahwa lingkungan sulfat menyebabkan beton menjadi kurang padat akibat peningkatan porositas dan terbentuknya rongga mikro pada mikrostruktur beton. Penurunan berat isi ini mencerminkan degradasi awal beton sebelum penurunan kuat tekan terjadi, sehingga berat isi dapat digunakan sebagai indikator awal penurunan durabilitas beton akibat paparan lingkungan agresif.



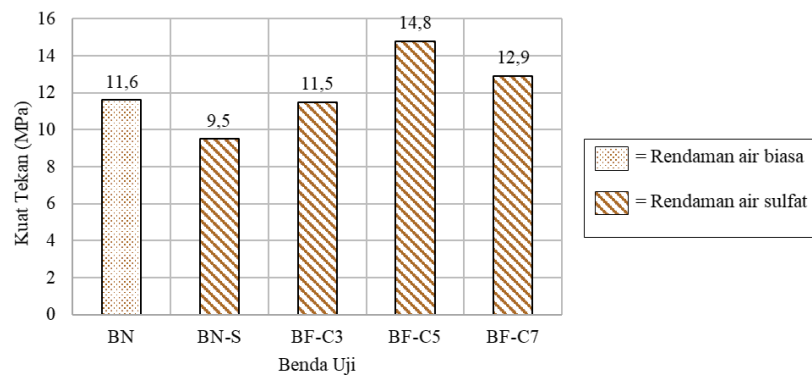
Gambar 4. Berat isi beton pada berbagai variasi substitusi cangkang kerang darah dan perendaman

Grafik berat isi pada Gambar 4 juga menunjukkan bahwa substitusi agregat cangkang kerang darah memengaruhi kepadatan beton, yang berkaitan dengan ketahanan terhadap serangan sulfat. Hasil pengujian menunjukkan berat isi beton meningkat dari 2217 kg/m³ pada beton normal menjadi 2218 kg/m³ (BF-C3) dan mencapai nilai tertinggi 2220 kg/m³ pada BF-C5, kemudian sedikit menurun menjadi 2219 kg/m³ pada BF-C7. Peningkatan berat isi hingga BF-C5 mengindikasikan bahwa penambahan cangkang kerang halus dan *fly ash* 20% mampu mengisi rongga antar butiran agregat sehingga beton menjadi lebih padat dan stabil, sejalan dengan hasil gradasi dan nilai *slump*. Namun, pada kadar cangkang yang lebih tinggi, kelebihan material halus mulai mengurangi efisiensi pengemasan butiran. Literatur melaporkan bahwa agregat kerang memiliki porositas dan daya serap air tinggi yang dapat mempercepat penetrasi ion sulfat dan degradasi mikrostruktur beton (Deng et al., 2025; J. Zhang et al., 2025), sementara penggunaan *fly ash* dapat memperbaiki kepadatan mikrostruktur pada kadar substitusi rendah hingga sedang (S. Zhang et al., 2025). Oleh karena itu, variasi BF-C5 menghasilkan kepadatan beton paling optimal dan menunjukkan potensi ketahanan sulfat yang lebih baik.

d) Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil kuat tekan beton hasil pengujian belum mencapai kuat tekan rencana 25 MPa, hal ini berkaitan dengan nilai *slump* yang tergolong rendah ($\pm 40-43$ mm). *Slump* rencana yang rendah berpotensi menimbulkan rongga mikro dan meningkatkan porositas internal karena beton lebih sulit ditempatkan dan dipadatkan secara optimal (Ma et al., 2023; Zhu et al., 2018). Literatur melaporkan bahwa beton dengan *slump* rendah (0–50 mm) cenderung mengalami penurunan kuat tekan akibat meningkatnya friksi internal dan distribusi agregat yang kurang merata. Selain itu, agregat cangkang kerang darah yang memiliki daya serap air dan bentuk tidak beraturan dapat mengurangi air bebas dalam campuran, sehingga menurunkan efektivitas hidrasi semen dan kekompakan beton (Youssif et al., 2018; Abo-El-Enein et al., 2014).

Upaya dalam meningkatkan kuat tekan beton agar mendekati atau mencapai kuat tekan rencana, dapat dilakukan dengan pendekatan terpadu yang berfokus pada perbaikan *workability* dan distribusi agregat. Literatur menunjukkan bahwa optimasi gradasi agregat halus sehingga mencapai modulus halus butir yang optimal dapat memperbaiki distribusi partikel, menurunkan porositas, dan meningkatkan kepadatan beton (Cao et al., 2025; Wang et al., 2021). Selain itu, penggunaan *superplasticizer* atau *water-reducing agent* direkomendasikan untuk meningkatkan *slump* tanpa menambah air, sehingga pematatan beton menjadi lebih efektif dan kuat tekan dapat tercapai (Hao et al., 2025; Wang et al., 2021).



Gambar 5. Nilai Kuat Tekan Beton

Gambar 5 juga menunjukkan bahwa beton normal (BN) yang direndam air biasa memiliki kuat tekan sebesar 11,6 MPa, sedangkan beton normal yang direndam larutan sulfat (BN-S) mengalami penurunan kuat tekan menjadi 9,5 MPa. Penurunan ini menunjukkan pengaruh agresif lingkungan sulfat terhadap beton, yang disebabkan oleh penetrasi ion sulfat ke dalam matriks beton dan reaksinya dengan produk hidrasi semen, terutama C_3A , membentuk etringit dan gipsum yang bersifat ekspansif sehingga merusak mikrostruktur beton dan menurunkan kekuatan tekan (Deng et al., 2025; S. Zhang et al., 2025).

Pada beton dengan modifikasi agregat halus cangkang kerang darah dan penambahan *fly ash* 20% (BF-C), kuat tekan meningkat dibandingkan BN-S, dengan nilai 11,5 MPa (BF-C3) dan mencapai maksimum 14,8 MPa (BF-C5), kemudian menurun menjadi 12,9 MPa (BF-C7). Peningkatan kuat tekan hingga BF-C5 menunjukkan peran *fly ash* dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat melalui reaksi pozzolanik yang menghasilkan gel C-S-H tambahan, memperkecil pori, dan menurunkan permeabilitas beton sehingga difusi ion sulfat terhambat (Le et al., 2025; Singh et al., 2022).

Penurunan kuat tekan pada BF-C7 mengindikasikan bahwa peningkatan kadar cangkang kerang menyebabkan efek negatif mulai dominan, seperti meningkatnya porositas dan daya serap air agregat kerang, yang sejalan dengan temuan bahwa substitusi agregat kerang dalam jumlah tinggi cenderung menurunkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat (Deng et al., 2025; Shao et al., 2024). Secara keseluruhan, hasil ini konsisten dengan literatur yang menyatakan bahwa kombinasi agregat cangkang kerang pada kadar terbatas dan penambahan *fly ash* memberikan kinerja optimum beton tahan sulfat pada tingkat substitusi menengah.

Penutup

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa kinerja beton dipengaruhi oleh interaksi antara nilai *slump*, modulus halus butir agregat halus, serta penggunaan cangkang kerang darah sebagai material substitusi dan *fly ash* sebagai *filler*. Nilai *slump* yang relatif rendah (± 40 – 43 mm) pada penelitian ini dipilih secara sengaja untuk merepresentasikan beton dengan *workability* rendah hingga sedang yang umum digunakan pada elemen struktur masif seperti pondasi, *sloof*, dan elemen bawah bangunan yang membutuhkan stabilitas bentuk, minim segregasi, dan ketahanan terhadap lingkungan agresif (termasuk serangan sulfat). Meskipun kuat tekan beton belum mencapai kuat tekan rencana 25 MPa, hasil menunjukkan bahwa modifikasi agregat halus dengan cangkang kerang darah dan penambahan *fly ash* 20% mampu meningkatkan kohesi, kepadatan, dan ketahanan beton terhadap serangan sulfat. Ketidaktercapaian kuat tekan rencana terutama disebabkan oleh keterbatasan pemadatan akibat *slump* rendah, perubahan distribusi butiran agregat, serta pengaruh *fly ash* terhadap kekuatan awal. Oleh karena itu, penelitian ini menegaskan pentingnya optimasi desain campuran untuk menyeimbangkan kebutuhan *workability* rendah dan kinerja durabilitas pada beton struktural tahan lingkungan sulfat.

Daftar Pustaka

- Abo-El-Enein, S. A., El-Sayed, H. A., Ali, A. H., Mohammed, Y. T., Khater, H. M. and Ouda, A. S. (2014) ‘Physico-mechanical properties of high performance concrete using different aggregates in presence of silica fume’, *HBRC Journal*, Taylor & Francis, vol. 10, no. 1, pp. 43–48 [Online]. DOI: 10.1016/j.hbrcj.2013.06.002.
- Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., Al-Zahrani, M. M., Sharif, A. M., Shameem, M. and Ibrahim, M. (2003) ‘Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to varying concentrations of sodium sulfate’, *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 4, pp. 429–437 [Online]. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00083-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00083-5).
- Atahan, H. N. and Dikme, D. (2011) ‘Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack’, *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 8, pp. 3450–3457 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.036>.
- Barr, B. I. G. (2003) ‘1.12 - Failure of Concrete Structures’, in Milne, I., Ritchie, R. O., and Karihaloo, B. (eds), *Comprehensive Structural Integrity*, Oxford, Pergamon, pp. 241–269 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-08-043749-4/01118-6>.
- Cao, P., Liang, G., Chai, X., Liu, Q. and Lv, M. (2025) ‘Effects of aggregate gradation, content, and size range on the mechanical and damping properties of polymer concrete for precision machine tool beds’, *Construction and Building Materials*, vol. 491, p. 142834 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.142834>.
- Çullu, M. and Arslan, M. (2014) ‘The effects of chemical attacks on physical and mechanical properties of concrete produced under cold weather conditions’, *Construction and Building Materials*, vol. 57, pp. 53–60 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.072>.

- Deng, Z., Lin, J. and Li, N. (2025) 'A review on recycling seashells as aggregates and binders for mortar and concrete in China: Production, engineering properties and new applications', *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 43, p. e01242 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01242>.
- Elahi, M. M. A., Shearer, C. R., Naser Rashid Reza, A., Saha, A. K., Khan, M. N. N., Hossain, M. M. and Sarker, P. K. (2021) 'Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review', *Construction and Building Materials*, vol. 281, p. 122628 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122628>.
- Gao, S., Jin, J., Hu, G. and Qi, L. (2019) 'Experimental investigation of the interface bond properties between SHCC and concrete under sulfate attack', *Construction and Building Materials*, vol. 217, pp. 651–663 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.121>.
- Han, T., Wang, X., Li, Dongfeng, Li, Dawang, Han, N. and Xing, F. (2019) 'Damage and degradation mechanism for single intermittent cracked mortar specimens under a combination of chemical solutions and dry-wet cycles', *Construction and Building Materials*, vol. 213, pp. 567–581 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.085>.
- Handayani, N. K. and Trisnawan, N. A. (2023) 'Pemanfaatan Steel Slag sebagai Substitusi Agregat Kasar pada Pembuatan Beton HVFA-SCC Tahan Serangan Sulfat', vol. 16, no. 2 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.23917/dts.v16i2.23273>.
- Hao, M., Li, Y., Chen, X., Ni, K. and Li, W. (2025) 'Optimization design method of C30/C40 fly ash concrete based on machine learning and elite retention genetic algorithm', *Advances in Engineering Software*, vol. 210, p. 104019 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2025.104019>.
- Hasan, K., Islam, Md. T., Ferdous, R. and Yahaya, F. M. (2024) 'Experimental study on environment-friendly concrete production incorporating palm oil clinker and cockle shell powder as cement partial replacement', *Materials Today: Proceedings*, vol. 107, pp. 254–262 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.150>.
- Jiang, L. and Niu, D. (2016) 'Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles', *Construction and Building Materials*, vol. 117, pp. 88–98 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.094>.
- De la Varga, I., Castro, J., Bentz, D. P., Zunino, F. and Weiss, J. (2018) 'Evaluating the hydration of high volume fly ash mixtures using chemically inert fillers', *Construction and Building Materials*, vol. 161, pp. 221–228 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.132>.
- Le, T. H., Mai, D. L. and Ta, T. H. (2025) 'Effects of fly ash and ground bottom ash from thermal power plants on workability, compressive strength and durability of high performance fine-grained concrete', *Applications in Engineering Science*, vol. 24, p. 100261 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appl.2025.100261>.
- Ma, Q., Mao, Z., Lei, M., Zhang, J., Luo, Z., Li, S., Du, G. and Li, Y. (2023) 'Experimental investigation of concrete prepared with waste rubber and waste glass', *Ceramics International*, vol. 49, no. 11, Part A, pp. 16951–16970 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.02.058>.
- Mo, K. H., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Lee, S. C., Goh, W. I. and Yuen, C. W. (2018) 'Recycling of seashell waste in concrete: A review', *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 751–764 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009>.
- Moolchandani, K. (2025) 'Industrial byproducts in concrete: A state-of-the-art review', *Next Materials*, vol. 8, p. 100593 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100593>.
- Nadiyah Ruslan, H., Muthusamy, K., Faizal Md Jaafar, M., Mohamad, N. and Farah Aziera Jamaludin, N. (2024) 'Compressive strength and fire resistance of mortar containing crushed cockle shell as fine aggregate replacement', *Materials Today: Proceedings*, vol. 109, pp. 48–52 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.320>.
- Qin, Y., Men, B., Liang, D., Geng, K., Zhang, X., Zhou, H. and Liu, R. (2023) 'Energy evolution of concrete with cold joint under the action of sulfate dry-wet cycles with loading', *Journal of Building Engineering*, vol. 68, p. 106098 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106098>.
- Ruslan, H. N., Muthusamy, K., Ariffin, N. F., Abdul Wahab, M. M. and Mohamad, N. (2022) 'Effect of crushed cockle shell as partial fine aggregate replacement on workability and strength of lightweight concrete', *Materials Today: Proceedings*, vol. 48, pp. 1826–1830 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.140>.

- Shao, S., Zhu, H., Guo, M. and Zhang, Y. (2024) ‘Application of waste oyster shells in construction: Overview, constitutive modeling, and life cycle assessment’, *Journal of Building Engineering*, vol. 87, p. 108965 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108965>.
- Singh, M., Siddique, R. and Singh, J. (2022) ‘1 - Coal fly ash’, in Siddique, R. and Belarbi, R. (eds), *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources*, Woodhead Publishing, pp. 1–29 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824050-2.00012-7>.
- Solikin, M., Setiawan, B., Afani, I. R., Rizki Perdana, H., Sabrina, N., Fatoni, R. and Pratiwi, D. I. (2024) ‘Analisis Serangan Sulfat pada Self Compacting Concrete (SCC) menggunakan Variasi Penambahan Silica fume dengan Metode Perubahan Panjang’, vol. 09, no. 01, pp. 115–126 [Online]. DOI: [10.29244/jsil.9.1.115-126](https://doi.org/10.29244/jsil.9.1.115-126).
- Wang, J., Sun, H., Yu, L., Liu, S., Geng, D., Yuan, L., Zhou, Z., Cheng, X. and Du, P. (2021) ‘Improvement of intrinsic self-healing ability of concrete by adjusting aggregate gradation and sand ratio’, *Construction and Building Materials*, vol. 309, p. 124959 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124959>.
- Yao, M. and Li, J. (2019) ‘Effect of the degradation of concrete friction piles exposed to external sulfate attack on the pile bearing capacity’, *Ocean Engineering*, vol. 173, pp. 599–607 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.038>.
- Yin, G.-J., Shan, Z.-Q., Miao, L., Tang, Y.-J., Zuo, X.-B. and Wen, X.-D. (2022) ‘Finite element analysis on the diffusion-reaction-damage behavior in concrete subjected to sodium sulfate attack’, *Engineering Failure Analysis*, vol. 137, p. 106278 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106278>.
- Youssf, O., Hassanli, R., Mills, J. E. and Abd Elrahman, M. (2018) ‘An experimental investigation of the mechanical performance and structural application of LECA-Rubcrete’, *Construction and Building Materials*, vol. 175, pp. 239–253 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.184>.
- Zhang, J., Xu, L., Wang, J., Yang, Y., Mao, W. and Zhang, Z. (2025) ‘15 - High-volume waste seashell blended cementitious materials’, in Tsang, D. C. W. and Zhu, X. (eds), *High-Volume Mineral Admixtures in Cementitious Binders*, Woodhead Publishing, pp. 293–317 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13498-2.00017-1>.
- Zhang, S., Wang, Y., Li, Z., Guo, B. and Niu, D. (2025) ‘Mechanism of concrete durability deterioration under the unidirectional coupling effect of temperature field and sulfate attack’, *Construction and Building Materials*, vol. 494, p. 143372 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143372>.
- Zhu, H., Rong, B., Xie, R. and Yang, Z. (2018) ‘Experimental investigation on the floating of rubber particles of crumb rubber concrete’, *Construction and Building Materials*, vol. 164, pp. 644–654 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.001>.
- Zhu, J.-J., Liu, J.-H. and Zuo, X.-B. (2025) ‘Numerical simulation on seismic performance of reinforced concrete structure subjected to chloride and sulfate attack’, *Structures*, vol. 80, p. 109882 [Online]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109882>.