



## Pengaruh Substitusi Abu Ketel dan Penambahan Sikacim Terhadap Kuat Tekan Beton Normal Setelah Perendaman Air Laut

Sigit Maulana Yusuf<sup>a</sup>, Laksmi Irianti<sup>b</sup>, Suyadi<sup>b</sup>, Masdar Helmi<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Mahasiswa Sarjana Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

<sup>b</sup> Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

### HIGHLIGHTS

- Kombinasi 5% abu ketel dan 0,7% Sikacim meningkatkan kuat tekan beton dibanding beton normal
- Ion agresif dalam air laut menurunkan efektivitas reaksi pozzolanik abu ketel
- Sikacim meningkatkan workability beton tanpa menambah air

### INFO ARTIKEL

#### Kata kunci:

abu ketel, Sikacim, perendaman air laut, kuat tekan

### ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis pengaruh substitusi abu ketel 5% dan penambahan Sikacim 0,7% terhadap kuat tekan beton normal dengan dua metode curing, yaitu air tawar dan air laut. Hasil uji menunjukkan bahwa kombinasi abu ketel dan Sikacim meningkatkan kuat tekan beton dibanding beton normal. Beton yang direndam dalam air tawar mencapai kuat tekan 31,99 MPa pada umur 28 hari dan meningkat menjadi 34,71 MPa pada umur 56 hari, atau 11,38% lebih tinggi dibandingkan beton normal. Namun, curing menggunakan air laut hanya menghasilkan kenaikan 3,35% dari umur 28 ke 56 hari dan 6,55% lebih rendah dibandingkan curing air tawar. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi abu ketel dan Sikacim efektif meningkatkan kuat tekan beton, tetapi efektivitasnya berkurang di lingkungan air laut akibat ion agresif, sehingga lebih direkomendasikan untuk aplikasi pada lingkungan non-agresif."

Diterbitkan oleh Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung

### 1. Pendahuluan

Produksi semen berkontribusi besar terhadap emisi karbon global, dan diperkirakan mengalami peningkatan signifikan hingga 260% dari tahun 1990 hingga 2050 jika tidak ada perubahan dalam proses produksinya [1]. Salah satu upaya mengurangi ketergantungan terhadap semen adalah dengan memanfaatkan abu ketel sebagai material pozzolanik. Kandungan silika yang tinggi menjadikan abu ketel mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) hasil hidrasi semen untuk membentuk senyawa *Calcium Silicate Hydrate* (C-S-H), yaitu produk pengikat utama yang berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan dan densifikasi mikrostruktur beton [2]. Selain itu, penggunaan *superplasticizer* seperti Sikacim dapat meningkatkan kepadatan dan menurunkan permeabilitas beton, yang berpotensi memperbaiki performa beton pada lingkungan dengan risiko korosi [3].

Durabilitas beton pada lingkungan laut masih menjadi persoalan penting. Ion klorida dan sulfat dalam air laut mempercepat korosi tulangan dan memperburuk kualitas

mikrostruktur beton melalui pembentukan *ettringite* dan gypsum yang bersifat destruktif [4]. Studi terbaru menunjukkan bahwa paparan lingkungan laut dapat menurunkan kuat tekan beton sebesar 2% pada zona atmosfer pantai, 11% pada zona pasang surut, dan hingga 19% pada kondisi perendaman penuh, meskipun *curing* air laut hingga 28 hari dapat menghasilkan kuat tekan yang masih mendekati beton yang dirawat di air tawar [5]. Temuan ini menegaskan perlunya inovasi material yang mampu mempertahankan kekuatan beton pada tahap awal sekaligus memiliki ketahanan jangka panjang pada lingkungan agresif.

\* Penulis koresponden.

Alamat E-mail: [Sigitmaulanay@gmail.com](mailto:Sigitmaulanay@gmail.com) (Sigit).

Peer review dibawah tanggung-jawab Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.

Sejumlah studi melaporkan peningkatan kuat tekan akibat bahan pozzolan dan superplasticizer, namun kajian yang secara simultan membandingkan pengaruh variasi media curing terhadap beton abu ketel-Sikacim masih terbatas. Penelitian sebelumnya umumnya hanya menilai beton dengan abu ketel pada air tawar atau mengevaluasi campuran superplasticizer tanpa melihat interaksi lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan evaluasi terintegrasi terhadap dua kondisi curing untuk menilai efektivitas kombinasi material tersebut secara praktis, terutama dalam konteks aplikasi infrastruktur pesisir yang berpotensi terpapar ion agresif.

**2. Metodologi Penelitian**

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Bahan dan Konstruksi, Universitas Lampung, menggunakan benda uji berbentuk kubus 15×15×15 cm. Campuran beton dirancang sesuai SNI, dengan empat variasi yaitu beton normal (BN), beton dengan substitusi abu ketel 5% (BAK), serta beton abu ketel 5% dengan penambahan Sikacim 0,7% yang direndam dalam air tawar (BAKS-T) dan air laut (BAKS-L). Seluruh bahan diuji mutu awalnya sesuai standar, kemudian proses pencampuran dan pengujian slump dilakukan untuk memastikan workability.

Spesimen kemudian menjalani curing menggunakan dua media, yaitu air tawar dan air laut, hingga umur 3, 7, 14, 28, dan 56 hari. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan Compression Testing Machine (CTM), dan hasilnya dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh substitusi abu ketel dan penambahan Sikacim terhadap perkembangan kuat tekan beton pada lingkungan curing berbeda, dengan beton normal berfungsi sebagai kontrol.

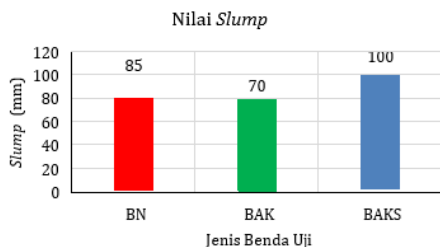
Tiga benda uji digunakan untuk setiap variasi dan setiap umur pembebanan, dan nilai rata-rata digunakan sebagai basis analisis untuk meningkatkan reliabilitas statistik. Karakteristik fisik abu ketel seperti kadar air dan morfologi diuji terlebih dahulu untuk memvalidasi sifat pozzolaniknya. Sikacim diaplikasikan berdasarkan dosis optimum pabrikan sebagai superplasticizer berbasis SNF untuk memastikan pengaruhnya pada modifikasi mikrostruktur beton.

**3. Hasil dan Pembahasan**

*3.1 Keleccakan Adukan Beton (Workability)*

**Tabel 1**  
Nilai slump adukan beton

No	Kode Benda Uji	Hasil Slump (mm)
1	BN	85
2	BAK	70
3	BAKS	100



**Gambar 1** Nilai Slump

Nilai slump menunjukkan respons berbeda pada tiap variasi campuran. Beton normal (BN) menghasilkan slump sebesar 85 mm, sedangkan substitusi abu ketel 5% tanpa aditif (BAK) menurunkan workability menjadi 70 mm.

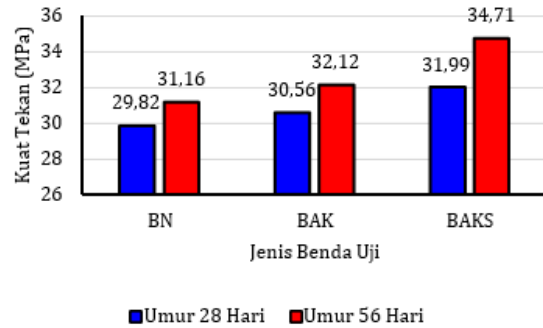
Penurunan ini berkaitan dengan morfologi abu ketel yang kasar dan kemampuan serap air yang tinggi, sehingga mengurangi air bebas dalam campuran dan meningkatkan viskositas adukan. Karakteristik tersebut konsisten dengan temuan sebelumnya yang menyatakan bahwa penambahan abu ketel cenderung menurunkan kelecakan beton [6]. Sebaliknya, campuran BAKS dengan abu ketel 5% dan Sikacim 0,7% menunjukkan kenaikan slump hingga 100 mm. Efek ini mencerminkan peran Sikacim sebagai superplasticizer yang mendispersi partikel semen, meningkatkan mobilitas campuran tanpa penambahan air [7]. Temuan ini mengindikasikan bahwa penambahan abu ketel menurunkan workability, namun dapat dikompensasi secara efektif melalui penggunaan aditif Sikacim.

Perbedaan nilai slump ini mengindikasikan bagaimana desain campuran mempengaruhi kelayakan konstruksi. Nilai slump terlalu rendah mempersulit pemadatan dan meningkatkan risiko honeycombing, sedangkan slump terlalu tinggi berpotensi menurunkan densitas. Oleh karena itu, kenaikan slump pada BAKS mengindikasikan bahwa Sikacim memberi margin kerja lebih aman tanpa meningkatkan water-cement ratio, yang penting untuk konstruksi lapangan terutama pada pekerjaan pengecoran di lokasi dengan akses terbatas.

*3.2 Kuat Tekan Beton*

**Tabel 2**  
Hasil uji kuat tekan beton normal

No	Kode Benda Uji	Kuat tekan (MPa)	
		Umur 28 hari	Umur 56 hari
1	BN	29,82	31,16
2	BAK	30,56	32,12
3	BAKS	31,99	34,71



**Gambar 2** Diagram Batang Kuat Tekan Beton Umur 28 dan 56 Hari

Hasil pengujian menunjukkan peningkatan kuat tekan pada seluruh variasi campuran seiring bertambahnya umur beton. Pada umur 28 hari, beton abu ketel + Sikacim (BAKS) mencatat nilai tertinggi sebesar 31,99 MPa, diikuti BAK sebesar 30,56 MPa, dan beton normal (BN) sebesar 29,82 MPa. Peningkatan BAKS sebesar 7,28% dibanding BN menunjukkan bahwa kombinasi abu ketel dan Sikacim lebih efektif dibanding substitusi abu ketel saja yang hanya meningkatkan kuat tekan 2,48%.

Pada umur 56 hari, peningkatan kekuatan semakin jelas. Nilai kuat tekan BAKS mencapai 34,71 MPa atau 11,38% lebih tinggi dari BN, sedangkan BAK hanya meningkat 3,08%. Tren ini mengindikasikan bahwa reaktivitas pozzolanik abu ketel membutuhkan umur yang lebih panjang untuk berkontribusi terhadap pembentukan C-S-H

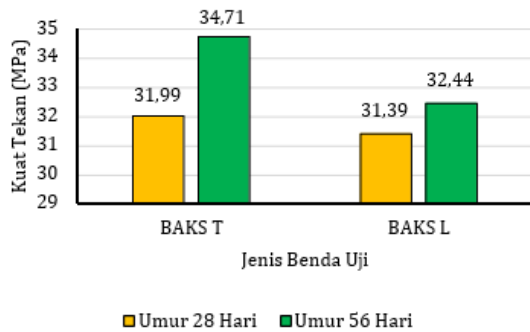
tambahan [8]. Sementara peran Sikacim mendukung densifikasi struktur beton sejak tahap awal melalui peningkatan homogenitas dan pengurangan porositas. Kombinasi keduanya memberikan penguatan berkelanjutan hingga umur lanjut [9].

Peningkatan kuat tekan yang lebih besar pada umur lanjut konsisten dengan sifat reaktif lambat dari abu ketel sebagai bahan pozzolan. Hal ini menegaskan bahwa pemanfaatan abu ketel lebih relevan untuk desain struktur dengan umur layan panjang, sementara penguatan awal dapat dipertahankan oleh peran Sikacim yang memperbaiki ikatan partikel sejak tahap awal hidrasi. Kombinasi mekanisme ini menghasilkan profil penguatan bertahap yang lebih ideal dibanding beton normal atau beton abu ketel tanpa aditif.

### 3.3 Pengaruh Curing

**Tabel 3**  
Hasil uji kuat tekan beton normal

No	Kode Benda Uji	Kuat tekan (MPa)	
		Umur 28 hari	Umur 56 hari
1	BAKS T	31,99	34,71
2	BAKS L	31,39	32,44



**Gambar 3** Diagram Batang Kuat Tekan Umur 28 dan 56 Hari pada perbedaan curing.

Variasi BAKS menunjukkan perbedaan respons kuat tekan ketika direndam dalam dua media curing. Pada umur 28 hari, kuat tekan beton dalam air tawar (BAKS-T) mencapai 31,99 MPa, sedangkan perendaman air laut (BAKS-L) menghasilkan nilai sedikit lebih rendah yaitu 31,39 MPa. Selisih ini semakin besar pada umur 56 hari, di mana BAKS-T mencapai 34,71 MPa sementara BAKS-L hanya 32,44 MPa atau sekitar 6,55% lebih rendah dibandingkan curing air tawar. Tren ini mengindikasikan bahwa media air laut menghambat perkembangan kekuatan dibandingkan lingkungan perawatan netral

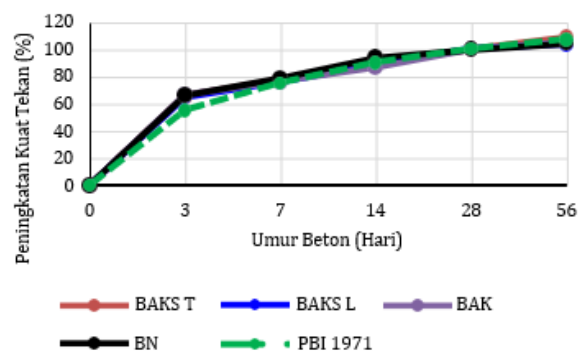
Perbedaan tersebut dikaitkan dengan komposisi kimia media curing. Air tawar memberikan kondisi hidrasi yang stabil sehingga reaksi pozzolanik abu ketel berkembang optimal dan menghasilkan pembentukan C-S-H tambahan, yang meningkatkan densitas beton secara progresif. Sebaliknya, ion agresif dalam air laut dapat mengganggu mekanisme hidrasi dan menyebabkan terbentuknya fase ekspansif yang menurunkan kerapatan matriks. Efek ini terlihat pada laju pertumbuhan kuat tekan BAKS-L yang lebih rendah dibandingkan BAKS-T [4].

Proses deteriorasi dimulai ketika ion sulfat dari berbagai senyawa, terutama  $K_2SO_4$  dan  $MgSO_4$ , berinteraksi dengan kalsium hidroksida ( $Ca(OH)_2$ ) hasil reaksi hidrasi semen menghasilkan ettringite yang bersifat ekspansif, yang kemudian mempercepat timbulnya korosi. Selain sulfat, ion klorida juga berperan besar dalam proses degradasi beton. Ketika ion klorida masuk ke dalam pasta semen, sebagian berikatan secara kimia atau fisik dengan gel C-S-H melalui mekanisme chloride binding. Ikatan kimia paling dominan adalah pembentukan garam Friedel ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ), yaitu senyawa kalsium kloroaluminate hasil reaksi antara ion klorida dengan  $Ca(OH)_2$  dan fase aluminat ( $C_3A$ ) dalam semen. Pada tahap awal, kristal Friedel mengisi rongga-rongga beton sehingga tampak memampatkan struktur, namun pada perendaman jangka panjang kristal ini berkembang dan memberikan tekanan pada dinding pori, memicu retakan mikro serta meningkatkan jalur transportasi ion-agresif lain. Kondisi ini mempercepat korosi tulangan dan memperburuk durabilitas beton [11].

Secara praktis, penurunan kuat tekan sekitar 6–7% pada curing air laut dapat dikategorikan sebagai degradasi ringan dan masih berada dalam toleransi desain untuk struktur zona percikan dan lingkungan laut ringan. Namun apabila beton diarahkan untuk struktur dermaga atau pelabuhan yang terendam permanen, modifikasi tambahan seperti peningkatan dosis pozzolan reaktif, penggunaan silika fume, atau pelapisan permukaan dapat diperlukan untuk mengurangi penetrasi ion klorida. Hal ini membuka peluang penelitian lanjutan terkait ketahanan ion klorida dan permeabilitas beton pada sistem abu ketel-Sikacim.

Meskipun demikian, nilai kuat tekan BAKS-L tetap lebih tinggi dibanding beton normal, menunjukkan bahwa kombinasi abu ketel dan Sikacim tetap efektif pada lingkungan agresif. Peran Sikacim dalam meningkatkan homogenitas campuran dan mengurangi porositas memungkinkan beton mempertahankan kinerja struktural meskipun berada di media korosif. Temuan ini menegaskan bahwa kombinasi material tersebut layak dipertimbangkan untuk aplikasi struktural pada wilayah pesisir, meskipun hasil terbaik diperoleh pada curing air tawar.

### 3.4 Laju Peningkatan



**Gambar 4** Grafik Laju Peningkatan

Seluruh variasi beton menunjukkan peningkatan kekuatan yang konsisten dari umur 3 hingga 56 hari, sejalan dengan mekanisme pembentukan gel C-S-H selama hidrasi semen. Pada umur 3 hari, kuat tekan seluruh campuran telah

mencapai 64–67% dari target rencana, lebih tinggi dari acuan PBI 1971 untuk semen Portland biasa (40%) dan bahkan melebihi semen kekuatan awal tinggi (55%). Hal ini mengindikasikan bahwa perancangan campuran dan densitas awal beton sudah cukup baik untuk pengembangan kekuatan awal. Namun, pada umur muda (3–14 hari), beton normal (BN) dan beton abu ketel tanpa aditif (BAK) menunjukkan pertumbuhan yang lebih cepat dibanding beton dengan Sikacim. Hal ini memperlihatkan bahwa kontribusi pozzolanik abu ketel belum signifikan di tahap awal — sebuah karakteristik umum bahan pozzolan yang membutuhkan waktu untuk bereaksi.

Pada umur 28 hari, seluruh variasi memenuhi target 100% PBI, namun pola pertumbuhan berubah pada fase lanjut. Pada rentang umur 28–56 hari, beton abu ketel + Sikacim yang direndam air tawar (BAKS-T) menunjukkan peningkatan paling signifikan sebesar 8,51% (+2,72 MPa), serta mencapai 108,51%, mendekati standar pertumbuhan umur 90 hari menurut PBI (109%). Ini mengindikasikan bahwa reaksi pozzolanik abu ketel baru bekerja efektif pada fase hidrasi lanjutan, didukung peran Sikacim yang memperbaiki mikrostruktur dan meminimalkan porositas, sehingga mempercepat pembentukan C-S-H sekunder.

Perendaman dalam air laut memperlambat pertumbuhan kekuatan. BAKS-L hanya meningkat 3,35% (+1,00 MPa) pada rentang 28–56 hari, paling rendah di antara variasi lain. Hal ini menunjukkan adanya inhibisi hidrasi akibat ion agresif seperti  $\text{Cl}^-$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$  yang memicu pembentukan senyawa mengembang (misalnya etringite) dan mengganggu densifikasi matriks beton. Daya hambat ini tidak meniadakan kontribusi bahan pozzolan, namun membatasi pencapaian kekuatan maksimum [4].

Secara komparatif, laju pertumbuhan kuat tekan dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

- pertumbuhan cepat umur awal (3–14 hari) → didominasi oleh hidrasi semen.
- pertumbuhan menengah (14–28 hari) → seluruh variasi menyatu mengikuti target standar.
- pertumbuhan lanjut (28–56 hari) → variasi pozzolan + Sikacim memperlihatkan keunggulan paling signifikan, khususnya pada curing air tawar.

Dengan demikian, kombinasi abu ketel dan Sikacim memberikan dampak paling nyata bukan pada fase awal, tetapi pada umur lanjut, dan efektivitas tertinggi dicapai pada lingkungan curing non-agresif. Ini menegaskan bahwa teknologi campuran ini bukan hanya meningkatkan kuat tekan akhir tetapi juga mengubah profil pertumbuhan kekuatan beton.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa substitusi abu ketel 5% dan penambahan Sikacim 0,7% mampu meningkatkan kuat tekan beton secara signifikan, di mana beton BAKS mencapai 31,99 MPa pada umur 28 hari dan 34,71 MPa pada umur 56 hari, atau 11,38% lebih tinggi dari beton normal. Media curing berpengaruh nyata terhadap perkembangan kekuatan, dengan peningkatan sebesar 8,51% pada BAKS-T, jauh lebih tinggi dibandingkan BAKS-L yang hanya meningkat 3,35% dan memiliki kuat tekan 6,55% lebih rendah pada umur 56 hari akibat pengaruh ion klorida dan sulfat yang menghambat hidrasi dan memperbesar porositas. Secara keseluruhan, laju pertumbuhan kuat tekan tertinggi dicapai oleh campuran abu ketel–Sikacim dengan curing air tawar, menunjukkan adanya sinergi positif antara

material pozzolan dan superplasticizer pada lingkungan non-agresif. Kombinasi ini direkomendasikan untuk aplikasi umum, sementara penggunaan pada lingkungan pesisir memerlukan perlindungan tambahan terhadap ion agresif.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi peningkatan performa beton pada lingkungan laut melalui penambahan bahan aditif pelindung seperti waterproofing agent serta menguji variasi komposisi abu ketel dan Sikacim yang lebih luas untuk memperoleh formulasi yang optimal.

Pengujian umur beton perlu diperpanjang hingga 90 hari atau lebih, disertai penambahan parameter uji seperti kuat tarik belah, modulus elastisitas, porositas, dan ketahanan penetrasi ion klorida. Kajian pada beton bertulang di lingkungan air laut juga penting dilakukan untuk menilai pengaruh kombinasi abu ketel dan Sikacim terhadap korosi tulangan dan durabilitas struktur secara menyeluruh.

#### 5. Pustaka

- [1] *Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M.* Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, (2018). 2–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- [2] *Golewski, G. L.* The Role of Pozzolanic Activity of Siliceous Fly Ash in the Formation of the Structure of Sustainable Cementitious Composites. *Sustainable Chemistry*, 3(4), (2022). 520–534. <https://doi.org/10.3390/suschem3040032>
- [3] *Capacchione, C., Picariello, D., Della Sala, P., Talotta, C., Neri, P., Bruno, I., Pauciulo, A., Bartiromo, A. R., Gliubizzi, R., & Gaeta, C.* Dispersing and Retarding Properties of Water-Soluble Tetrasulfonate Resorcin arene and Pyrogallol [4]arene Macrocycles in Cement-Based Mortar. *ACS Omega*, 5(29), (2020). 18218–18225
- [4] *Wedhanto, S.* Pengaruh air laut terhadap kekuatan tekan beton yang terbuat dari berbagai merk semen yang ada di kota malang. *Jurnal Bangunan*, 22(2), 2017, 21–30.
- [5] *Helmi, M., Alami, F., Isneini, M., Mayang Sari, R., & Zikrillah M. D.* Effect of Sea Water, Coastal Sand, and Clam Shell Powder on Compressive Strength of Normal Concrete. *Jurnal Teknologi*, 86(3), (2024). 205–213. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v86.21484>
- [6] *Irianti, L., Freddi, & Virmaryah.* (1998). *Pengaruh Kadar Abu Ketel Terhadap Perilaku Beton Mutu Tinggi*. Laporan Penelitian. Lampung: LPIU DUE Universitas Lampung
- [7] *Herwani, H., Imran, I., Budiono, B., Pane, I., Zulkifli, E., & Elvira, E.* Efektivitas Superplasticizer Terhadap Workabilitas Dan Kuat Tekan Beton Geopolimer. *Portal: Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), (2018). 12–18.

- [8] *Irianti, L., Helmi, M., Widyawati, R., Abdullah, H. I., & Hidayatullah, H.* Pemanfaatan Limbah Industri Berupa Abu Ketel dan Silica Fume Untuk Peningkatan Kuat Tekan Beton. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 15(2), (2025). 253–264. <https://doi.org/10.29103/tj.v15i2.1247>
- [9] *Bediako, M., & Ametefe, T.* Effect of sulphonated naphthalene formaldehyde superplasticizer on the mechanical and durability properties of concrete produced using locally sourced fine aggregate from Ghana. (2024)
- [10] *Wang, X., Shi, C., He, F., Yuan, Q., Wang, D., HUANG, Y., & Qingling, L.* Chloride Binding and Its Effects on Microstructure of Cement-based Materials. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 41. (2013). <https://doi.org/10.7521/j.issn.0454-5648.2013.02.11>