

Optimalisasi Ukuran Maksimum Agregat terhadap Workability dan Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Tambahan Superplasticizer

Reza Farhandasi¹, Alpin Maulidin^{2,*}, Hanyta Khairunnisa³, Yuni Rahmadhani³

¹Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Pontianak, Jl. Jenderal Ahmad Yani, Pontianak, 78124, Indonesia

²Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Jln. B. Aceh Medan Km. 280, Bukit Rata, 24301, Indonesia

³Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Almuslim, Jl Almuslim, Matangglumpangdua, Paya Cut, Kec.

Peusangan, Kabupaten Bireuen

*E-mail: alpin.maulidin@pnl.ac.id

Abstract

Article history:

Received: 17-02-2026

Accepted: 15-03-2026

Published: 14-04-2026

Keywords:

compressive strength;
high-strength concrete;
interfacial transition zone;
maximum aggregate size;
superplasticizer.

The demand for High-Strength Concrete (HSC) in modern infrastructure necessitates the optimization of its constituent materials. This study investigates the effect of varying Maximum Aggregate Size (MAS) on the compressive strength of HSC, which was designed with a low water-cement ratio (0.4) and a target characteristic strength (f_c) of 40 MPa at 28 days, utilizing a superplasticizer to maintain workability. Three variations of coarse aggregate size were tested: 19.10 mm, 25.56 mm, and 31.50 mm. Twenty cube specimens (15×15×15 cm) were prepared and tested. The results showed a clear inverse correlation between MAS and compressive strength. The 19.10 mm aggregate produced the highest average strength of 30.269 MPa, followed by 29.110 MPa (25.56 mm) and 27.322 MPa (31.50 mm). This optimal performance is attributed to the superior gradation (lowest Fineness Modulus) and the resulting enhancement of the Interfacial Transition Zone (ITZ) quality, as smaller aggregates promote a denser and stronger bond with the cement paste. Although the target strength of 40 MPa was not achieved, the 19.10 mm aggregate demonstrated the highest potential for strength development, showing a 10.79% increase compared to the 31.50 mm aggregate. The study concludes that MAS 19.10 mm is the most optimal size among the variations tested for maximizing compressive strength under the given mix design.

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi di bidang konstruksi di Indonesia terus mengalami kemajuan seiring meningkatnya kebutuhan masyarakat akan infrastruktur modern, seperti jembatan bentang panjang, bangunan bertingkat tinggi, serta elemen-elemen struktur pracetak. Tuntutan terhadap efisiensi struktur dalam hal kekuatan, keawetan, dan masa layan menyebabkan semakin banyak digunakan beton mutu tinggi (*high-strength concrete - HSC*) dalam perencanaan infrastruktur tersebut[1].

Beton mutu tinggi umumnya didefinisikan sebagai beton yang memiliki karakteristik kuat tekan (f_c) lebih tinggi dari beton normal, dengan rentang yang bervariasi tergantung standar yang digunakan, namun seringkali berkisar antara 40 MPa hingga 80 MPa[2]. Dalam konteks penelitian ini, Beton Mutu Tinggi ditargetkan memiliki kuat tekan rencana sebesar 40 MPa pada umur 28 hari, yang memerlukan perhatian khusus pada kualitas material penyusun dan proporsi campuran. Penggunaan beton mutu tinggi memungkinkan perancangan elemen struktur dengan dimensi yang lebih kecil, sehingga

menghasilkan bangunan yang lebih ringan dan lebih hemat dari segi biaya konstruksi.

Salah satu karakteristik utama beton mutu tinggi adalah rendahnya nilai faktor air-semen (FAS), biasanya antara 0,20 hingga 0,40. Meskipun demikian, rendahnya FAS dapat menyebabkan beton memiliki tingkat kelecakan (*workability*) yang rendah. Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan bahan tambah kimia berupa *superplasticizer* yang dapat meningkatkan kelecakan tanpa menambah jumlah air pencampur[3]. *Superplasticizer* adalah jenis bahan tambah (*admixture*) berbasis polimer yang berfungsi untuk mengurangi viskositas beton segar, sehingga mampu meningkatkan kemampuan alir campuran beton dengan nilai FAS yang rendah[4].

Dalam campuran beton, agregat kasar merupakan komponen penyusun dengan proporsi volume terbesar. Gradasi agregat kasar, yaitu distribusi ukuran butiran agregat, memainkan peran penting dalam menentukan kepadatan dan kekuatan beton. Gradasi yang baik dengan variasi ukuran butir akan mengisi pori-pori secara lebih efisien, menghasilkan

beton yang lebih padat dan kuat[5]. Selain gradasi, ukuran maksimum agregat kasar (*maximum aggregate size - MAS*) juga sangat memengaruhi kualitas zona transisi antar-muka (*interfacial transition zone - ITZ*) antara agregat dan pasta semen, yang merupakan titik kritis dalam pencapaian kuat tekan tinggi[6]. Beberapa penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa semakin kecil MAS yang digunakan, semakin tinggi potensi kuat tekan yang dihasilkan[7-9]. Selain peningkatan kekuatan beton, pemilihan agregat yang tepat juga dapat meningkatkan stabilitas dan dapat mengurangi penyusutan beton[10].

Penelitian terdahulu seringkali berfokus pada pengaruh MAS atau *superplasticizer* secara terpisah, atau hanya mengukur kuat tekan tanpa analisis mendalam terhadap mekanisme fisik-kimia yang mendasarinya. Penelitian ini mengatasi kesenjangan tersebut dengan tidak hanya menguji variasi MAS, tetapi juga secara komprehensif mengintegrasikan data *workability*, berat jenis, absorpsi, dan gradasi agregat untuk menjelaskan secara mendalam mekanisme peningkatan kuat tekan. Pendekatan ini memberikan kebaruan dengan menyajikan analisis yang lebih holistik tentang bagaimana karakteristik agregat dan *superplasticizer* secara sinergis memengaruhi densitas dan kualitas ITZ, yang pada akhirnya menentukan kinerja mekanik BMT.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh variasi ukuran agregat maksimum (MAS) terhadap *workability*, potensi densitas, dan kuat tekan beton mutu tinggi dengan FAS 0,4 dan tambahan *superplasticizer*, menganalisis sinergi antara MAS dan *superplasticizer* dalam memengaruhi potensi densitas dan kualitas zona transisi antar-muka (ITZ) beton, serta mengidentifikasi ukuran agregat kasar yang paling optimal untuk mencapai kuat tekan dan potensi kepadatan maksimum pada BMT dengan desain campuran yang diberikan.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental di laboratorium untuk mengevaluasi pengaruh variasi ukuran agregat maksimum (MAS) terhadap kuat tekan beton mutu tinggi (BMT) dengan faktor air-semen (FAS) sebesar 0,4. Perencanaan campuran ini melibatkan pemilihan bahan yang tepat serta penentuan proporsi masing-masing material

agar diperoleh beton dengan kekuatan, keawetan, dan efisiensi ekonomi yang sesuai standar. Dalam penelitian ini, digunakan tiga variasi ukuran agregat kasar, yaitu 19,10 mm, 25,40 mm, dan 31,70 mm.

2.1 Material dan Karakteristik Material

Material penyusun beton yang digunakan meliputi semen Portland, agregat halus (pasir), agregat kasar (*split*), air, dan bahan tambah kimia berupa *superplasticizer*.

Proses pengumpulan data diawali dengan pemeriksaan karakteristik agregat halus dan kasar sebagai penyusun beton. Pengujian meliputi berat jenis sesuai SNI 1969:2016, daya serap berdasarkan SNI 03-1969-2008, berat volume mengacu pada SNI 03-4804-1998, serta analisis gradasi melalui uji saringan sesuai SNI ASTM C136:2012. Pengujian ini bertujuan memastikan kualitas agregat memenuhi spesifikasi teknis campuran beton.

Mekanisme kerja *superplasticizer* adalah dengan membungkus partikel-partikel semen dan menciptakan gaya tolak elektrostatis di antara mereka. Gaya tolak ini mencegah terjadinya penggumpalan (*flocculation*) dan memperlancar aliran campuran beton, memungkinkan pemadatan yang lebih efektif dan homogenitas yang lebih baik, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan kuat tekan[11, 12].

2.2 Perencanaan Campuran Beton (Mix Design)

Perencanaan campuran beton dilakukan menggunakan metode dari *American Concrete Institute* (ACI) dengan nilai faktor air-semen (FAS) sebesar 0,4. Perencanaan campuran ini melibatkan pemilihan bahan yang tepat serta penentuan proporsi masing-masing material agar diperoleh beton dengan kekuatan, keawetan, dan efisiensi ekonomi yang sesuai standar. Dalam penelitian ini, digunakan tiga variasi ukuran agregat kasar, yaitu 19,10 mm, 25,4 mm, dan 31,7 mm. Proporsi campuran beton ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Proporsi campuran beton

Material	Jumlah	Satuan
Semen portland	466,90	Kg
Air	186,76	Kg
Agregat halus (pasir)	783,87	Kg
Agregat kasar	958,07	Kg
Superplasticizer	2,8014	Kg

Tabel 1 menunjukkan proporsi campuran beton yang digunakan untuk setiap variasi ukuran agregat. Proporsi ini dihitung berdasarkan metode ACI untuk mencapai target 40 MPa dengan FAS 0,4.

2.3 Pembuatan dan Pengujian Benda Uji

Pembuatan benda uji dilakukan sebanyak 20 buah, masing-masing berbentuk kubus dengan dimensi 15 × 15 × 15 cm. Rincian jumlah benda uji untuk setiap variasi MAS disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rincian jumlah benda uji

Kode benda uji	Ukuran agregat kasar (mm)	Jumlah benda uji
BAK 1	19,10	5
BAK 2	25,40	5
BAK 3	31,70	5

Beton dituangkan ke dalam cetakan secara bertahap dan dipadatkan sesuai prosedur standar. Setelah proses pencetakan, benda uji dirawat (*curing*) dengan metode perendaman air hingga umur pengujian. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kelecakan (*slump test*), dilakukan pada beton segar untuk mengukur *workability* campuran dan uji kuat tekan yang dilakukan pada umur beton 28 hari menggunakan mesin uji tekan untuk mengetahui pengaruh variasi MAS terhadap kekuatan akhir beton.

2.4 Analisis Karakteristik Material dan Kuat Tekan

Data hasil pengujian kuat tekan dianalisis secara deskriptif dan komparatif. Analisis difokuskan pada perbandingan kuat tekan rata-rata dari ketiga variasi MAS dan evaluasi pencapaian kuat tekan terhadap target 40 MPa. Pembahasan juga mencakup korelasi antara sifat fisis agregat (termasuk Modulus Halus) dan hasil kuat tekan, dengan penekanan pada fenomena zona transisi antar-muka (ITZ).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Material Penyusun

Pemeriksaan awal terhadap sifat fisis agregat, meliputi berat jenis, penyerapan air, berat volume, serta analisa saringan, menunjukkan bahwa semua material memenuhi standar umum untuk campuran beton. Detail karakteristik fisik agregat kasar untuk masing-masing variasi MAS disajikan pada Tabel 3, dan

dan berat volume agregat individual disajikan pada Tabel 4.

Tabel 3. Karakteristik fisik agregat kasar

Ukuran agregat	Berat jenis (SSD)	Absorpsi (%)
19,10	2,623	1,662
25,40	2,608	1,738
31,71	2,596	1,777

Tabel 4. Berat volume agregat individual

Jenis Agregat	Berat Volume (g/cm ³)
Split (<i>coarse aggregate</i>)	1,526
Kerikil (<i>coarse aggregate</i>)	1,555
Sirtu (<i>coarse aggregate</i>)	1,585
Pasir (<i>fine aggregate</i>)	1,534

Nilai modulus halus (FM) untuk agregat kasar dengan ukuran 19,10 mm, 25,40 mm, dan 31,70 mm seperti yang diperlihatkan pada Tabel 5. Semakin tinggi nilai modulus halus (FM), maka semakin kasar tekstur agregat, yang berdampak pada tingkat kepadatan serta kekuatan beton yang dihasilkan.

Tabel 5. Nilai fineness modulus (FM) agregat kasar dan agregat halus

Jenis agregat	Nilai fine modulus agregat		
	19,10 mm	25,40 mm	31,70 mm
Split	6.787	7.705	7.709
Pasir	-	2.715	-

Nilai modulus halus (FM) gabungan antara pasir dan agregat kasar diperlihatkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Nilai *fineness modulus* (FM) agregat campuran

Jenis agregat	Nilai FM kombinasi agregat campuran		
Pasir split 19,10 mm	5.159	-	-
Pasir split 25,40 mm	-	5.199	-
Pasir split 31,70 mm	-	-	5.366

Dari Tabel 6 terlihat bahwa gradasi agregat 19,10 mm (FM 5,159) berada dalam rentang gradasi yang paling optimal dibandingkan dengan agregat 25,40 mm (FM 5,199) dan 31,70 mm (FM 5,366). Gradasi yang lebih baik ini mengindikasikan distribusi ukuran butiran yang lebih merata, yang secara teoritis

akan meminimalkan volume pori dan meningkatkan kepadatan beton[4].

3.2 Karakteristik *Workability* Beton Segar dan Potensi Densitas

Uji kelecakan (slump test) pada Tabel 7 menunjukkan bahwa semua variasi campuran menghasilkan tipe slump runtuh (*collapse slump*). Nilai slump tertinggi dicapai oleh campuran agregat 19,10 mm (23,5 cm), diikuti oleh 25,40 mm (22,5 cm), dan 31,70 mm (19 cm). Nilai slump yang tinggi ini merupakan hasil langsung dari penggunaan superplasticizer pada campuran beton dengan faktor air-semen (FAS) rendah (0,4). Superplasticizer bekerja dengan mendispersi partikel semen, mengurangi viskositas, dan meningkatkan kemampuan alir tanpa menambah air, yang merupakan karakteristik penting dalam produksi beton mutu tinggi (BMT)[13].

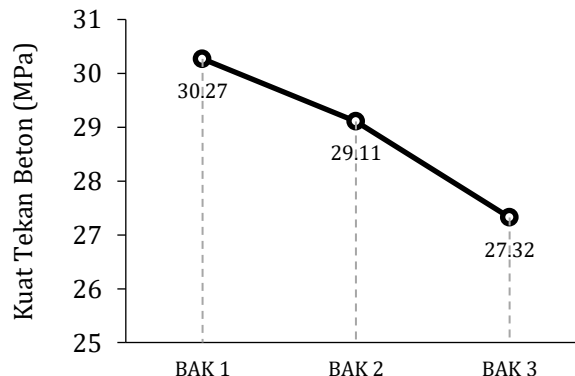
Tabel 7. Nilai slump adukan beton variasi ukuran maksimum agregat kasar

Jenis Beton	Nilai slump (cm)
Ukuran maks agregat 19,10 mm	23,5
Ukuran maks agregat 25,40 mm	22,5
Ukuran maks agregat 31,70 mm	19,0

Superplasticizer bekerja dengan mendispersi partikel semen, mengurangi viskositas, dan meningkatkan kemampuan alir tanpa menambah air, yang merupakan karakteristik penting dalam produksi beton mutu tinggi (BMT)[14]. Perbedaan nilai slump menunjukkan bahwa ukuran agregat yang lebih kecil (19,10 mm) memerlukan lebih sedikit energi untuk mengalir, yang berkorelasi dengan peningkatan *workability* dan potensi pemadatan yang lebih baik. Campuran dengan MAS 19,10 mm, yang memiliki berat jenis agregat tertinggi (2,623) dan absorpsi terendah (1,662%), secara teoritis berkorelasi dengan potensi kepadatan beton segar yang lebih tinggi. Kepadatan yang lebih tinggi ini secara langsung meminimalkan porositas dan meningkatkan resistensi beton terhadap tekanan[15]. Sinergi antara *superplasticizer* dan ukuran agregat terbukti dapat mengoptimalkan *workability* dan potensi densitas, sehingga menghasilkan campuran yang lebih homogen dan mudah diproses di lapangan[16].

3.3 Analisis Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan pada umur 28 hari menunjukkan tren yang jelas, di mana kuat tekan beton berbanding terbalik dengan ukuran maksimum agregat kasar (MAS) yang digunakan, seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik hubungan kuat tekan beton berdasarkan variasi benda uji

Kuat tekan tertinggi diperoleh dari campuran dengan agregat 19,10 mm (30,269 MPa), diikuti oleh 25,40 mm (29,110 MPa), dan terendah 31,70 mm (27,322 MPa). Fenomena ini konsisten dengan prinsip dasar BMT, di mana penggunaan agregat kasar dengan ukuran yang lebih kecil cenderung menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi[17]. Peningkatan kuat tekan pada agregat yang lebih kecil dapat dijelaskan melalui dua mekanisme utama, pertama peningkatan luas permukaan kontak dan efek (*Wall Effect*): Agregat yang lebih kecil memiliki luas permukaan total yang lebih besar untuk volume yang sama. Hal ini meningkatkan area kontak antara agregat dan pasta semen, yang pada gilirannya memperkuat ikatan kimia dan mekanis pada zona transisi antar-muka (ITZ)[18]. Kedua adalah peningkatan kualitas ITZ yang merupakan area terlemah dalam beton.

Pada BMT, penggunaan agregat yang lebih kecil menghasilkan ITZ yang lebih tipis dan lebih padat. Agregat yang lebih besar cenderung menahan air di bawahnya (*bleeding water*), yang menciptakan pori-pori besar dan ITZ yang lemah. Dengan MAS yang lebih kecil (19,10 mm), distribusi pasta semen menjadi lebih homogen, dan kualitas ITZ meningkat, sehingga meningkatkan kekuatan keseluruhan beton[7]. Data absorpsi agregat juga mendukung hal ini; agregat 19,10 mm dengan absorpsi terendah (1,662%) cenderung memiliki ITZ yang lebih kuat karena meminimalkan penyerapan air dari

pasta semen di sekitarnya, sehingga menjaga kualitas ITZ tetap padat dan kuat.

3.4 Evaluasi Mutu Beton dan Target Kuat Tekan

Meskipun agregat 19,10 mm menghasilkan kuat tekan tertinggi, nilai 30,269 MPa belum memenuhi kriteria umum beton mutu tinggi (BMT) yang sering didefinisikan sebagai beton dengan kuat tekan karakteristik ($f'c$) di atas 40 MPa atau 45 MPa[19]. Untuk mencapai beton mutu tinggi, diperlukan beberapa modifikasi signifikan pada desain campuran dibandingkan beton konvensional, terutama dengan penggunaan faktor air-semen (FAS) yang sangat rendah, biasanya berkisar antara 0,20 hingga 0,40[20].

Analisis kesenjangan, penelitian ini menggunakan FAS 0,4, yang secara teoritis dapat menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi. Kesenjangan antara hasil yang dicapai (30,27 MPa) dan potensi BMT menunjukkan adanya faktor pembatas. Faktor-faktor ini mungkin termasuk kekuatan intrinsik agregat (kekuatan batu) mungkin menjadi faktor pembatas, terutama pada beton dengan kuat tekan di atas 30 Mpa, meskipun sifat fisis agregat memenuhi standar. Perlu dikaji lebih lanjut apakah proporsi semen dan *superplasticizer* sudah optimal untuk mencapai $f'c$ target yang lebih tinggi.

3.5 Keterkaitan Gradasi, Potensi Kepadatan, dan Kuat Tekan

Agregat yang lebih besar cenderung menyebabkan penumpukan air (*bleeding water*) di bawahnya, menciptakan ITZ yang lemah dan berpori, yang menjadi titik awal kegagalan saat beton menerima beban tekan[18, 21].

Hasil FM gabungan yang diperlihatkan pada Tabel 6 menguatkan temuan kuat tekan. Agregat 19,10 mm memiliki FM terendah (5,159), yang menunjukkan gradasi yang paling baik dan menerus. Gradasi yang baik memungkinkan partikel agregat yang lebih kecil mengisi ruang kosong (*voids*) antara partikel yang lebih besar, menghasilkan beton yang lebih padat dan kuat[22]. Kepadatan yang lebih tinggi ini secara langsung meminimalkan porositas dan meningkatkan resistensi beton terhadap tekanan, yang tercermin dalam nilai kuat tekan tertinggi.

Hasil penelitian mengonfirmasi bahwa variasi ukuran agregat kasar memiliki pengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton, di mana ukuran 19,10 mm adalah yang paling optimal.

Keunggulan ini disebabkan oleh kombinasi gradasi yang lebih baik (FM lebih rendah) dan peningkatan kualitas ITZ karena MAS yang lebih kecil. Namun, perlu ditekankan bahwa nilai kuat tekan yang dicapai masih berada dalam kategori beton normal. Untuk mencapai mutu tinggi yang sesungguhnya, penelitian lanjutan harus fokus pada optimalisasi proporsi campuran, penggunaan bahan tambah mineral (*pozzolanic material*) yang terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas ITZ dan kuat tekan BMT[23], atau pemilihan agregat dengan kekuatan intrinsik yang lebih tinggi.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian eksperimental mengenai sinergi optimalisasi ukuran agregat maksimum (MAS) dan peran *superplasticizer* pada beton mutu tinggi dengan target $f'c$ 40 MPa dan FAS 0,4, dapat disimpulkan bahwa variasi ukuran agregat kasar berpengaruh signifikan terhadap *workability*, potensi densitas, dan kuat tekan beton, di mana penggunaan *superplasticizer* secara efektif mempertahankan nilai *slump* yang tinggi (19–23,5 cm) untuk mendukung pemadatan optimal.

Ukuran agregat 19,10 mm terbukti menghasilkan kinerja mekanik paling optimal dengan kuat tekan rata-rata tertinggi sebesar 30,269 MPa, yang didukung oleh karakteristik berat jenis tertinggi (2,623), absorpsi terendah (1,662%), serta gradasi yang paling rapat (FM 5,159) guna meningkatkan kualitas zona transisi antar-muka (ITZ).

Meskipun demikian, kuat tekan yang dicapai belum memenuhi target 40 MPa, sehingga untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan optimasi dosis *superplasticizer* yang lebih detail, menguji kekuatan intrinsik agregat lokal, serta mengintegrasikan bahan tambah mineral (*pozzolanic*) guna memperkuat struktur mikro ITZ dan mencapai mutu beton yang direncanakan secara konsisten.

Daftar Pustaka

- [1] Pujiyanto, A. a., 2011. *Beton mutu tinggi dengan admixture superplasticizer dan aditif silicafume*. Semesta Teknika, Vol. 14, No. 2, pp. 177-185.
- [2] *Report on high-strength concrete*, 2010 American Concrete Institute, Farmington Hills.
- [3] Irfansyah, M. H., Rakhmawati, A., & Arnandha, Y., 2021. *Studi analisis beton mutu tinggi SCC (self compacting concrete) menggunakan campuran limbah marmer*

- dan superplasticizer. Jurnal Rekayasa Infrastruktur Sipil, Vol. 2, No. 1, pp. 56-62.
- [4] Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M., 2006. *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. New York: McGraw-Hill.
- [5] Neville, A. M. & Brooks, J. J., 2010. *Concrete technology*. London: Pearson Education Ltd.
- [6] Nurtanto, D., Suyoso, H., Utami, N. M., Wahyuningtyas, W. T., & W, W. Y., 2020. *Perbandingan mix desain beton menurut sni dengan bina marga terhadap kuat tekan SCC*. Jurnal Aplikasi Teknik Sipil, Vol. 18, No. 2, pp. 351-356.
- [7] Anugrahrosah, M. R., A., & Novan, A., 2024. *Analisis karakteristik kuat tekan beton mutu tinggi dengan penggunaan satu fraksi agregat terhadap pesentase penambahan sikament nn*. Vokasi Manajemen dan Rekayasa Infrastruktur Sipil, Vol. 1, No. 1, pp. 17-24.
- [8] Putra, A. O. & Rosyad, F., 2024. *Analisis pengaruh bentuk dan ukuran agragat kasar terhadap sifat-sifat beton self compacting conrate (SCC)*. Ensiklopedia of Journal, Vol. 6, No. 4, pp. 8-17.
- [9] Hamakareem, M. I., Muhedin, D. A., Rash, A. J. H., Qadir, S. J., & Khodakarami, L., 2024. *Toward optimizing coarse aggregate types and sizes in high-strength concrete*. ARO : The Scientific Journal of Koya University, Vol. 12, No. 2, pp. 33-43.
- [10] Zhong, R. et al., 2025. *Effect of coarse aggregate on the stability and mechanical performance of ultra-high performance concrete (UHPC)*. Composites Part B: Engineering, Vol. 97.
- [11] Saraswati, A., W., & Safitri, E., 2024. *Kajian maturitas beton untuk memprediksi nilai kuat tekan dengan variasi kadar superplasticizer*. Sustainable Civil Building Management and Engineering, Vol. 1, No. 4, pp. 1-9.
- [12] Kuswiantoro, M. S. et al., 2024. *Optimalisasi penggunaan superplasticizer masterglenium ace 8595 dalam implementasi pekerjaan beton*. Jurnal Rab Construction Research, Vol. 9, No. 1, pp. 47-58.
- [13] Ramachandran, V. S., 1995. *Concrete admixtures handbook, properties, science and technology*. Park Ridge: Noyes Publications.
- [14] Irfansyah, M. H., Rakhmawati, A., & Arnandha, Y., 2021. *Studi analisis beton mutu tinggi SCC (self compacting concrete) menggunakan campuran limbah marmer dan superplasticizer*. Jurnal Rekayasa Infrastruktur Sipil, Vol. 2, No. 1, pp. 56-62.
- [15] Ardiansyah, P. P., Cahyani, R. A. T., & Rusdianto, Y., 2024. *Optimization of superplasticizer usage and water reduction for enhancing concrete performance*. Media Teknik Sipil, Vol. 22, No. 1, pp. 31-38.
- [16] Pujiyanto, A. a. & Cahyati, M. D., 2024. *Optimization of superplasticizer dosage on compressive performance in self-compacting concrete mixtures with silicafume as a cementitious material*. Bulletin of Civil Engineering, Vol. 4, No. 2, pp. 47-54.
- [17] , S., M., & K., 2019. *Pengaruh ukuran butir agregat kasar terhadap kapasitas kuat tekan dan nilai slump beton porous*. Karajata Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 124-127.
- [18] Sutandi, A. & Kushartomo, W., 2019. *Pengaruh ukuran butiran maksimum terhadap kuat tekan reactive powder concrete*. Muara Sains, Vol. 3, No. 1, pp. 1-10.
- [19] Oktavian, S., 2022. *Analisis kuat tekan beton mutu tinggi berbahan agregat lokal*. Jumatisi, Vol. 3, No. 1, pp. 200-210.
- [20] M, R. P. & Y. R., 2018. *Beton mutu tinggi dengan fly ash sebagai substitusi semen dan superplasticizer sebagai admixture dengan menggunakan fas 0,42 s.D 0,46*. Jurnal Unesa, pp. 1-9.
- [21] Hujiyanto, H., Lakawa, I., Hakiman, H., & Paembonan, M. Y., 2024. *Analisis pengaruh ukuran maksimum agregat kasar terhadap kuat tekan dan porositas pada beton normal*. Sultra Civil Engineering Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 384-339.
- [22] Salahuddin, M., 2014. *Studi perbandingan kuat tekan beton dengan agregat gradasi rapat dan gradasi menerus*. Jurnal Teknik Sipil, Vol. 13, No. 1, pp. 12-17.
- [23] Patrisia, Y., 2015. *Optimasi beton mutu tinggi*. Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan BALANGA, Vol. 3, No. 1, pp. 68-81.