MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL
Jurnal Ilmu dan Terapan Bidang Teknik Sipil
Website : mkts.sipil.undip.ac.id
e-ISSN : 2549 - 6778
doi: 10.14710/mkts.v32i1.75065

Penerapan Serat Kulit Pinang dan Superplastisizer Untuk Meningkatkan Kuat Tekan dan Workability Beton Dengan Rasio Air-Semen Rendah

Teuku Farizal[1*], Teuku Budi Aulia[2], Dewi Purnama Sari[1], Mohd. Iqbal[3]
[1]Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar, Aceh Barat
[2]Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh
[3]Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh
[*)]Email corresponding author: teukufarizal@utu.ac.id

Received: 25 Juni 2025 Revised: 11 Agustus 2026 Accepted: 14 Agustus 2026

Abstract

Concrete with a low water-to-cement ratio (W/C 0.35) enhances compressive strength and environmental durability, but it often faces challenges related to workability, which can affect casting quality. This study aims to evaluate the impact of adding Areca nut husk fiber and superplasticizer on the compressive strength and workability of concrete at 7 and 28 days of curing. The experiment involved variations in concrete mixtures: normal concrete, concrete with 2.1% superplasticizer without fiber, and concrete with 2%, 2.5%, and 3% Areca nut husk fiber combined with 2.1% superplasticizer. Compressive strength tests followed ASTM C39 standards, while workability was measured using the slump test (ASTM C143). The results showed that adding 2% Areca nut husk fiber with 2.1% superplasticizer increased the compressive strength by 33.56% at 7 days and 23.14% at 28 days compared to normal concrete. This combination also resulted in the highest slump value of 9,8 cm, indicating improved workability. However, adding more than 2.5% fiber reduced compressive strength, suggesting an optimal fiber usage point. This study concludes that combining Areca nut husk fiber and superplasticizer improves low W/C ratio concrete performance without compromising workability, supporting the development of high-performance and environmentally friendly concrete.

Keywords: *Low water-cement ratio (w/c), areca nut husk fiber, superplasticizer, compressive strength, workability*

Abstrak

Beton dengan rasio air-semen rendah (W/C 0,35) meningkatkan kekuatan tekan dan ketahanan terhadap kerusakan lingkungan, namun sering menghadapi tantangan dalam workability yang dapat mempengaruhi kualitas pengecoran. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat kulit pinang dan superplastisizer terhadap kuat tekan dan workability beton pada umur 7 dan 28 hari. Eksperimen dilakukan dengan variasi campuran beton: beton normal, beton dengan superplastisizer 2,1% tanpa serat, dan beton dengan serat kulit pinang 2%, 2,5%, dan 3% yang dikombinasikan dengan superplastisizer 2,1%. Pengujian kuat tekan mengikuti standar ASTM C39, sementara workability diukur melalui uji slump (ASTM C143). Hasil menunjukkan bahwa penambahan serat kulit pinang 2% dengan superplastisizer 2,1% meningkatkan kuat tekan sebesar 33,56% pada umur 7 hari dan 23,14% pada umur 28 hari dibandingkan beton normal. Kombinasi ini juga menghasilkan nilai slump tertinggi 9,8 cm, menunjukkan peningkatan workability. Namun, penambahan serat lebih dari 2,5% mengurangi kuat tekan, mengindikasikan titik optimal penggunaan serat. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kombinasi serat kulit pinang dan superplastisizer meningkatkan kinerja beton dengan rasio air-semen rendah tanpa mengorbankan workability, serta mendukung pengembangan beton berkinerja tinggi dan ramah lingkungan.

Kata kunci: *Rasio air-semen rendah (w/c), serat kulit pinang, superplastisizer, kuat tekan, workability*

Pendahuluan

Beton berkinerja tinggi dengan rasio air-semen rendah (W/C) menjadi salah satu fokus dalam teknologi konstruksi modern karena mampu meningkatkan kuat tekan dan ketahanan mekanis beton secara signifikan (Huang *et al*., 2015; Sundararasan, 2023). Penurunan rasio W/C menghasilkan mikrostruktur yang lebih rapat dan porositas yang lebih rendah sehingga meningkatkan ketahanan beton terhadap kerusakan lingkungan (Zulu *et al*., 2019). Namun, W/C yang rendah juga menurunkan *workability*, dan dapat menghambat proses pencampuran, pemadatan, dan pengecoran serta memengaruhi homogenitas dan kualitas akhir beton (Alsadey & Omran, 2022; Salain, 2021; Ibrahim *et al*., 2024). Oleh karena itu, diperlukan modifikasi campuran yang mampu mempertahankan *workability* tanpa mengurangi kinerja mekanik beton.

Salah satu pendekatan yang berkembang adalah penggunaan serat alami sebagai material penguat sekaligus sebagai bagian dari upaya meningkatkan keberlanjutan material konstruksi (Amalia, *et al*., 2023; Dodai *et al*., 2023). Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penambahan serat alami dapat meningkatkan kapasitas penyerapan energi, ketangguhan, dan ketahanan terhadap perambatan retak melalui mekanisme *crack bridging* dan peningkatan kohesi matriks semen (Shamsudin *et al*., 2021; Xia & Xian, 2019; Zhou *et al*., 2018).

Pada serat sabut pinang *(Areca Nut Husk Fiber)*, karakteristik mekanik dan kekasaran permukaan serat dilaporkan dapat memperkuat ikatan dalam matriks beton sehingga mendukung peningkatan ketangguhan dan kinerja mekanik (Amalia, *et al*., 2023; Carrillo & Díaz, 2020; Zhang *et al*., 2020). Meskipun demikian, sifat *higroskopis* serat alami meningkatkan kebutuhan air dan viskositas campuran sehingga berpotensi menurunkan *workability* apabila kadar serat dan komposisi campuran tidak dirancang secara tepat (Amalia, *et al*., 2023; Carrillo & Díaz, 2020). Dengan demikian, *state of the art* menunjukkan bahwa serat alami berpotensi meningkatkan kinerja mekanik beton, tetapi penggunaannya pada beton dengan W/C rendah masih menghadapi kendala terkait sifat segar dan kemudahan pengerjaan.

Penggunaan *superplastisizer* menjadi salah satu strategi untuk mengatasi keterbatasan tersebut karena mampu meningkatkan fluiditas beton segar tanpa penambahan air berlebih sehingga kuat tekan beton dengan W/C rendah dapat dipertahankan atau ditingkatkan (Mohammed *et al*., 2023; Silva *et al*., 2021; Verma *et al*., 2023). *Superplastisizer* bekerja dengan mendispersikan partikel semen dan mengurangi gaya tarik antarpartikel, sehingga meningkatkan homogenitas dan kemudahan pengerjaan campuran (Bitouri *et al*., 2022; Kanthe, 2024; Selvam *et al*., 2023). Kombinasi serat alami dan *superplastisizer* juga dilaporkan memiliki potensi sinergis dalam meningkatkan kinerja mekanik sekaligus mempertahankan *workability* beton (Kanthe, 2024; Rabehi *et al*., 2023).

Selain memberikan manfaat teknis, penggunaan serat sabut pinang juga relevan dalam konteks keberlanjutan industri konstruksi. Pemanfaatan limbah sabut pinang sebagai material penguat dapat mengurangi limbah pertanian sekaligus membuka peluang untuk mengurangi ketergantungan material konvensional melalui peningkatan kohesi matriks, ketangguhan, dan pengendalian perambatan retak (Garcia *et al*., 2022; Raheem *et al*., 2021).

Pemanfaatan material alternatif tersebut juga berpotensi menekan dampak lingkungan yang berkaitan dengan eksploitasi dan transportasi agregat serta mendukung desain campuran beton yang lebih efisien (Megahed *et al*., 2017). Dengan demikian, penggunaan limbah serat sabut pinang mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dan ekonomi sirkular dalam pengembangan beton berkinerja tinggi dengan ketergantungan yang lebih rendah terhadap sumber daya alam tak terbarukan (Rashwan *et al*., 2020; Zebari, 2019).

Meskipun serat alami dan *superplastisizer* telah banyak diteliti, kajian yang secara sistematis mengevaluasi kombinasi keduanya pada beton W/C rendah, khususnya dengan variasi dosis serat sabut pinang dan dosis *superplastisizer* yang dipertahankan konstan, masih terbatas (Kos *et al*., 2023; Kroviakov *et al*., 2022). Sebagian besar penelitian terdahulu mengevaluasi serat dan *superplastisizer* secara terpisah atau memvariasikan keduanya secara simultan, sehingga kontribusi spesifik variasi dosis serat terhadap respons beton sulit dipisahkan dari pengaruh perubahan dosis *superplastisizer*. Padahal, pada beton dengan W/C rendah, perubahan komposisi campuran sangat menentukan *workability*, pemadatan, dan kinerja mekanik beton (Alsadey & Omran, 2022; Ibrahim *et al*., 2024).

Penetapan dosis *superplastisizer* pada nilai yang konstan dan variasi hanya pada dosis serat sabut pinang memberikan pendekatan yang lebih terkontrol untuk mengidentifikasi kontribusi spesifik serat terhadap sifat segar dan kinerja mekanik beton. Pendekatan ini sekaligus melengkapi keterbatasan rancangan multifaktor yang berpotensi mengaburkan pengaruh aktual masing-masing komponen. Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengkaji

pengaruh variasi dosis serat sabut pinang terhadap kuat tekan beton W/C rendah dan kemampuan *superplastisizer* dengan dosis konstan dalam mempertahankan *workability* beton berserat. Hipotesis yang diajukan adalah bahwa penambahan serat sabut pinang pada dosis tertentu dengan dosis *superplastisizer* yang sama dapat meningkatkan kuat tekan beton W/C rendah dibandingkan beton tanpa bahan tambah atau beton yang hanya menggunakan *superplastisizer*, tanpa menyebabkan penurunan *workability* yang signifikan (Alsadey & Omran, 2022; Ibrahim *et al*., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi dosis serat sabut pinang terhadap kuat tekan beton W/C rendah pada umur 7 dan 28 hari, menganalisis kemampuan *superplastisizer* dengan dosis konstan dalam mempertahankan *workability* beton berserat alami, serta membandingkan kuat tekan beton normal, beton dengan *superplastisizer*, dan beton dengan kombinasi serat sabut pinang dan *superplastisizer*.

Penelitian dibatasi pada beton dengan W/C sebesar 0,35 yang terdiri atas beton normal, beton dengan *superplastisizer* sebesar 2,1%, serta beton dengan serat sabut pinang sebesar 2%, 2, 5%, dan 3% yang masing-masing dengan dosis *superplastisizer* 2,1%. Parameter yang dievaluasi meliputi kuat tekan beton berdasarkan (ASTM C39, 2023) dan *workability* beton segar melalui uji *slump*, tanpa mencakup analisis mikrostruktur maupun durabilitas jangka panjang.

Metode

Penelitian ini merupakan eksperimen laboratorium dengan desain komparatif untuk mengevaluasi kinerja beberapa variasi campuran beton. Untuk setiap variasi, disiapkan spesimen uji berupa silinder beton berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm sebagai unit pengujian utama. Secara umum, rangkaian eksperimen meliputi penyiapan campuran, pencetakan dan perawatan *(curing)* spesimen, serta pengujian sifat beton pada kondisi segar dan setelah pengerasan. *Workability* dievaluasi pada beton segar, sedangkan kuat tekan ditentukan pada umur 7 hari dan 28 hari. Rincian metodologi pada bagian berikut mencakup bahan, peralatan, persiapan sampel, prosedur eksperimen, serta parameter yang diamati.

Penelitian ini menggunakan bahan utama sebagaimana disajikan pada Tabel 1. Peralatan yang digunakan beserta spesifikasi teknis utamanya disajikan pada Tabel 2, mencakup perangkat untuk pencampuran, pengukuran dimensi, pengujian *workability*, pencetakan spesimen silinder, dan pengujian kuat tekan sesuai standar yang relevan.

Persiapan sampel

Sampel beton disiapkan berdasarkan variasi campuran untuk mengevaluasi efek serat kulit pinang dan *superplastisizer*, baik secara individual maupun kombinatif. Beton normal (BN) digunakan sebagai kontrol dasar, sedangkan BSP berfungsi sebagai kontrol pembanding. Tiga kelompok lain menggambarkan peningkatan kadar serat dalam campuran yang mengandung *superplastisizer*. Proses ini dilakukan dalam kondisi terkendali untuk menjaga validitas uji dan keterbandingan antar sampel, seperti yang tercantum dalam Tabel 3. Pencampuran beton dilakukan dengan rasio air-semen konstan 0,35 menggunakan *mixer* horizontal selama 3 menit.

Tabel 1. Bahan utama penelitian

No	Bahan	Spesifikasi utama
1.	Semen portland Tipe I	Sesuai (SNI 2049, 2015), warna abu-abu, berat jenis ±3,15.
2.	Agregat halus	Pasir alami, lolos saringan No. 4, kadar lumpur < 5%.
3.	Agregat kasar	Batu kali, diameter maks. 25,5 mm, berat jenis ±2,65, kadar air jenuh permukaan.
4.	Air	Air bersih, bebas bahan organik dan minyak.
5.	*Superplastisizer*	*SikaCim Concrete*, dosis 2,1% dari berat semen.
6.	Serat kulit pinang	Panjang ±25 mm, diameter ±0,2 mm, kering udara, tanpa perlakuan kimia


Bahan 1


Bahan 2


Bahan 3


Bahan 5


Bahan 6

Tabel 2. Peralatan

No	Alat	Spesifikasi Teknis Utama
1.	Mesin Uji Tekan Beton	Kapasitas 1000 kN, akurasi ±0,5%, Standar (ASTM C39, 2023)
2.	Cetakan Silinder Beton	Ø150 mm × 300 mm, baja, standar (ASTM C470/C470M-15, 2023)
3.	*Slump Cone* Set	Standar (ASTM C143/C143M-20, 2024), tinggi 300 mm, Ø atas 100 mm, Ø bawah 200 mm
4.	Timbangan Digital	Akurasi 0,01 g
5.	Mixer Beton	Kapasitas 100 liter, putaran horizontal
6.	Jangka Sorong dan Penggaris	Akurasi ±0,1 mm

Tabel 3. Persiapan sampel

No	Variasi Campuran	Komposisi Utama	Jumlah Sampel	Umur Uji (hari)
1.	Beton Normal (BN)	Tanpa serat kulit pinang dan tanpa *superplastisizer*	6	7 dan 28
2.	BSP	*Superplastisizer* 2,1% tanpa serat kulit pinang	6	7 dan 28
3.	BSA 2% + SP 2,1%	Serat kulit pinang 2% + *Superplastisizer* 2,1%	6	7 dan 28
4.	BSA 2,5% + SP 2,1%	Serat kulit pinang 2,5% + *Superplastisizer* 2,1%	6	7 dan 28
5.	BSA 3% + SP 2,1%	Serat kulit pinang 3% + *Superplastisizer* 2,1%	6	7 dan 28

Tabel 4. Parameter yang Diamati

No	Parameter yang Diamati	Satuan	Metode Pengukuran	Standar Acuan
1.	Kuat tekan beton	MPa	Uji tekan silinder Ø150×300 mm	(ASTM C39, 2023)
2.	*Workability* beton	cm	*Slump* test dengan *Slump Cone*	(ASTM C143/C143M-20, 2024)
3.	Homogenitas distribusi serat	Kualitatif	Observasi visual saat pencampuran	Prosedur laboratorium

Setelah tercampur homogen, adukan dimasukkan ke dalam cetakan silinder Ø150 mm × 300 mm dan dipadatkan dalam dua lapis dengan 25 kali penusukan setiap lapis. Spesimen kemudian disimpan selama 24 jam di kondisi laboratorium sebelum direndam dalam tangki air *(curing)* hingga waktu pengujian.

Prosedur eksperimen

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 dan 28 hari menggunakan mesin uji tekan sesuai standar (ASTM C39, 2023). Setiap variasi diuji pada tiga sampel untuk masing-masing umur. Uji *slump* dilakukan sebelum proses pengecoran untuk menilai *workability* sesuai (ASTM C143/C143M-20, 2024). Nilai kuat tekan (σ) dihitung sebagai perbandingan antara beban maksimum (P) dan luas penampang silinder (A), sehingga $\sigma = P/A$, di mana σ adalah kuat tekan (MPa), P adalah beban maksimum (kN), dan A adalah luas penampang silinder (mm^2).

Parameter yang diamati

Untuk menilai efektivitas variasi campuran beton, tiga parameter utama diamati, yaitu kekuatan struktural, kelecakan beton segar, dan kualitas distribusi internal serat. Ketiga parameter ini dipilih karena keterkaitannya yang erat dengan kualitas beton dalam aplikasi praktis. Evaluasi komprehensif terhadap pengaruh serat kulit pinang dan *superplastisizer* terhadap performa beton dilakukan dengan mengamati ketiga parameter tersebut, sebagaimana dijelaskan dalam Tabel 4. Parameter-parameter yang diamati - kuat tekan, nilai *slump*, dan distribusi serat - memungkinkan evaluasi kuantitatif dan kualitatif terhadap kinerja beton. Kuat tekan mengindikasikan kekuatan struktural, nilai *slump* mengukur kelecakan beton segar, dan distribusi serat menilai keseragaman material. Ketiganya saling melengkapi untuk mendukung kesimpulan ilmiah yang valid dan aplikatif.

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian *workability*

Nilai *slump* yang diperoleh dari berbagai variasi campuran beton dengan faktor air-semen (FAS) 0,35 menunjukkan perbedaan *workability* yang dipengaruhi oleh penambahan serat kulit pinang dan penggunaan *superplastisizer*. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan aliran beton segar, yang merupakan parameter penting dalam proses pengecoran dan kualitas akhir beton,

terutama pada campuran dengan FAS rendah. Data hasil pengujian *slump* ini disajikan dalam Tabel 5.

Data pada Tabel 5 menunjukkan bahwa pada FAS 0,35, beton normal (BN) memiliki nilai *slump* 8,0 cm, sedangkan penambahan *superplastisizer* 2,1% tanpa serat meningkatkan *slump* menjadi 9,5 cm, yang menunjukkan efektivitas *superplastisizer* dalam meningkatkan *workability* tanpa penambahan air bebas (Hadji & Attia, 2022). Kombinasi BSA2%+SP2,1% menghasilkan nilai *slump* tertinggi, yaitu 9,8 cm (Hasan *et al*., 2023; Makunza, 2022; Yuan *et al*., 2023), sedangkan peningkatan BSA menjadi 2,5% dan 3% menurunkan *slump* masing-masing menjadi 8,5 cm dan 7,7 cm akibat meningkatnya kebutuhan air dan hambatan fisik dalam campuran (Mohamad *et al*., 2024; Mohsin *et al*., 2022). Hasil tersebut menunjukkan bahwa BSA2% memberikan *workability* terbaik di antara campuran berserat, sementara konsistensi prosedur pengujian tetap diperlukan untuk memperoleh hasil *slump* yang valid (Abbas *et al*., 2024; Matanza *et al*., 2022).

Pengaruh penambahan *superplasticizer* terhadap fluiditas beton.

Penambahan *superplasticizer* 2,1% meningkatkan *slump* beton dari 8,0 menjadi 9,5 cm melalui peningkatan dispersi partikel semen dan pengurangan gesekan antarpartikel, sehingga viskositas campuran menurun tanpa penambahan air (Akhlaghi *et al*., 2017; Ibrahim *et al*., 2019). Pada campuran berserat, BSA2%+SP2,1% menghasilkan *slump* tertinggi sebesar 9,8 cm, sedangkan peningkatan BSA hingga 3% menurunkannya menjadi 7,7cm akibat peningkatan luas permukaan, penahanan air oleh serat, dan fiber interlocking. Meskipun demikian, *superplasticizer* membantu mempertahankan dispersi partikel dan *workability* campuran (Akhlaghi *et al*., 2017; Alsadey & Omran, 2022).

Dosis yang tepat diperlukan karena jikas berlebih dapat menyebabkan kondisi jenuh sehingga peningkatan fluiditas menjadi terbatas (Akhlaghi *et al*., 2017; Alsadey & Omran, 2022; Sadegh-Zadeh *et al*., 2023). Efektivitasnya juga dipengaruhi jenis bahan kimia, karakteristik agregat, dan kondisi lingkungan (Aicha *et al*., 2022; Erzengin & Öcal, 2019; Gołaszewski *et al*., 2020; Takigawa *et al*., 2021). Analisis nilai *slump* pada variasi campuran beton yang dirangkum dalam Tabel 6 menunjukkan bahwa penambahan *superplasticizer* memberi kontribusi signifikan terhadap peningkatan fluiditas beton, sedangkan penambahan serat pada konsentrasi tinggi berpotensi menurunkan nilai *slump*.

Tabel 5. Hasil pengujian *slump*

No	Variasi Campuran	*Slump* (cm)	Keterangan
1.	BN (tanpa BSA & SP)	8,0	Beton normal tanpa bahan tambahan
2.	BSA 2% + SP 2,1%	9,8	Beton dengan 2% serat kulit pinang + *superplasticizer* 2,1%
3.	BSA 2,5% + SP 2,1%	8,5	Beton dengan 2,5% serat kulit pinang + *superplasticizer* 2,1%
4.	BSA 3% + SP 2,1%	7,7	Beton dengan 3% serat kulit pinang + *superplasticizer* 2,1%
5.	SP 2,1% (tanpa BSA)	9,5	Beton dengan *superplasticizer* 2,1% tanpa serat pinang

Tabel 6. Rincian nilai *slump* variasi campuran yang diuji

Variasi Campuran	*Slump* (cm)	Keterangan Pengaruh terhadap Fluiditas	Validitas dan Referensi	Kategori (ASTM C143/C143M-20, 2024)
BN (tanpa BSA & SP)	8,0	Fluiditas dasar tanpa bahan tambahan	Konsisten dengan standar beton normal (Akhlaghi, Menceloğlu, *et al*., 2017)	*Slump* sedang (1,5 – 10 cm)
BSA 2% + SP 2,1%	9,8	Peningkatan fluiditas maksimal meskipun ada serat	Sesuai dengan literatur *superplasticizer* dan serat yang menunjang *workability* (Alsadey & Omran, 2022)	*Slump* sedang (1,5 – 10 cm)
BSA 2,5% + SP 2,1%	8,5	Penurunan fluiditas akibat peningkatan serat, tetap lebih baik dari BN	Valid berdasarkan tren pengaruh serat terhadap fluiditas beton (Akhlaghi, Menceloğlu, *et al*., 2017; M. H. Ibrahim *et al*., 2019)	*Slump* sedang (1,5 – 10 cm)
BSA 3% + SP 2,1%	7,7	Penurunan fluiditas lebih signifikan karena kadar serat tinggi, namun SP menjaga *workability*	Konsisten dengan efek penurunan fluiditas pada serat tinggi (Alsadey & Omran, 2022)	*Slump* sedang (1,5 – 10 cm)
SP 2,1% (tanpa BSA)	9,5	Peningkatan fluiditas signifikan tanpa serat	Sesuai dengan literatur *superplasticizer* pada beton tanpa serat (Sadegh-Zadeh *et al*., 2023)	*Slump* sedang (1,5 – 10 cm)

Tabel 7. Pengaruh serat pinang (BSA) terhadap *slump* dan homogenitas beton segar

Variasi Campuran	*Slump* (cm)	Pengaruh terhadap Homogenitas	Validitas Data (Kutipan)	Keterangan
BN (tanpa BSA & SP)	8,0	Homogenitas standar tanpa pengaruh serat atau *superplasticizer*.	Konsisten dengan standar beton normal yang tidak menggunakan serat (Akhlaghi, Menceloğlu, *et al*., 2017)	Campuran kontrol tanpa serat dan *superplasticizer*, memberikan baseline *slump* dan homogenitas.
BSA 2% + SP 2,1%	9,8	Distribusi serat lebih baik, meskipun terdapat penurunan minor pada homogenitas.	Sesuai dengan literatur *superplasticizer* yang meningkatkan *workability* meskipun ada serat (Alsadey & Omran, 2022)	*Superplasticizer* membantu mengatasi efek penurunan fluiditas akibat serat, tetapi distribusi serat tetap penting.
BSA 2,5% + SP 2,1%	8,5	Distribusi serat mulai menunjukkan ketidakhomogenan yang lebih jelas pada campuran ini.	Valid berdasarkan tren pengaruh serat terhadap fluiditas beton (Akhlaghi, Menceloğlu, *et al*., 2017; M. H. Ibrahim *et al*., 2019)	Penambahan serat lebih tinggi menyebabkan penurunan signifikan dalam fluiditas, namun distribusi serat mulai terpengaruh.
BSA 3% + SP 2,1%	7,7	Penggumpalan serat lebih jelas, distribusi serat menjadi kurang merata.	Konsisten dengan efek penurunan fluiditas pada serat tinggi (Alsadey & Omran, 2022)	Peningkatan kadar serat menyebabkan penurunan fluiditas yang lebih besar dan ketidakhomogenan lebih jelas.
SP 2,1% (tanpa BSA)	9,5	Homogenitas lebih baik tanpa serat, distribusi serat tidak relevan di sini.	Sesuai dengan literatur *superplasticizer* pada beton tanpa serat (Sadegh-Zadeh *et al*., 2023)	Hanya *superplasticizer* tanpa serat, yang meningkatkan fluiditas dan homogenitas campuran beton.

Analisis pengaruh serat kulit pinang (BSA) terhadap *slump* dan homogenitas beton segar

Penambahan serat kulit pinang (BSA) dalam campuran beton dapat mempengaruhi *slump* (fluiditas) dan homogenitas beton segar. Penurunan *slump* terjadi akibat peningkatan viskositas campuran yang disebabkan oleh serat, meskipun penggunaan *superplasticizer (SP)* dapat membantu mempertahankan *workability* beton. Selain itu, distribusi serat yang merata berperan penting dalam memastikan homogenitas beton segar. Perlakuan kimia pada serat, seperti perlakuan alkali, dapat meningkatkan distribusi serat dan homogenitas beton. Tabel 7 berikut menyajikan pengaruh variasi penambahan BSA dan SP terhadap *slump* dan homogenitas beton segar.

Tabel 6 dan 7 menunjukkan bahwa peningkatan kadar BSA cenderung menurunkan *slump* dan homogenitas beton segar. Dari campuran BS 2%+SP2,1% menghasilkan *slump* tertinggi sebesar 9,8 cm dengan distribusi serat yang relatif baik, sedangkan peningkatan BSA menjadi 2,5% dan 3% menurunkan *slump* masing-masing menjadi 8,5 dan 7,7cm serta meningkatkan kecenderungan peng-gumpalan serat. Beton normal digunakan sebagai kondisi dasar tanpa pengaruh BSA dan *superplasticizer*. Perlakuan alkali pada serat berpotensi memperbaiki distribusi dan homogenitas serat dalam matriks beton (Artchomphoo *et al*., 2024; C I P K Kencanawati *et al*., 2020).

Hasil pengujian mekanis (kuat tekan)

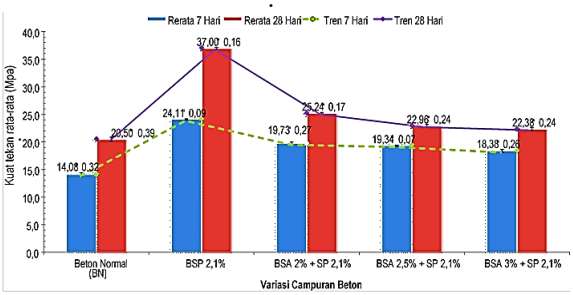
Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji silinder (Ø150 mm × 300 mm) untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi serat kulit pinang (BSA) dan *superplastisizer (SP)* terhadap kekuatan beton dengan faktor air semen rendah. Pengujian dilakukan pada umur 7 dan 28 hari mengacu pada standar (ASTM C39, 2023). Tegangan tekan dihitung berdasarkan beban maksimum per luas penampang, sedangkan regangan dan deformasi aksial ditentukan melalui pendekatan elastis linier. Tabel 8 menunjukkan bahwa SP2,1% menghasilkan kuat tekan lebih tinggi daripada beton normal pada umur 7 dan 28 hari. Diantara campuran berserat, BSA2%+SP 2,1% memberikan kuat tekan tertinggi, sedangkan peningkatan BSA hingga 3% cenderung menurunkan kekuatan, yang menunjukkan adanya kadar serat optimum. Perbandingan antara kuat tekan rata-rata pada umur 7 dan 28 hari beserta sebaran datanya disajikan pada Gambar 1.

Evaluasi pola kenaikan atau penurunan kekuatan tekan berdasarkan variasi BSA.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh campuran BSA memiliki kuat tekan lebih tinggi daripada beton normal, tetapi peningkatannya tidak berlangsung linier terhadap kadar serat. campuran berserat, BSA 2% + SP 2,1% memberikan kinerja terbaik, sedangkan peningkatan BSA menjadi 2,5–3% menurunkan kuat tekan.

Tabel 8. Hasil Pengujian kuat tekan

Nama Spesimen	Umur (hari)	Berat (kg)	Luas silinder (mm^2)	Volume silinder (mm^3)	Beban (kN)	Regangan	Kuat tekan (MPa)	Rerata (MPa)
Beton normal (1)	7	12,14	17671,46	5301437,60	243,164	0,000486	13,7603	
Beton normal (2)	7	12,12	17671.46	5301437,60	248,980	0,000498	14,0894	14,08
Beton normal (3)	7	11,98	17671,46	5301437,60	254,488	0,000509	14,4011	
BSA 2% + SP 2,1% (1)	7	11,52	17671,46	5301437,60	343,336	0,000686	19,4288	
BSA 2% + SP 2,1% (2)	7	11,60	17671,46	5301437,60	350,276	0,000700	19,8216	19,73
BSA 2% + SP 2,1% (3)	7	11,70	17671,46	5301437,60	352,308	0,000704	19,9366	
BSA 2,5% + SP 2,1% (1)	7	11,36	17671,46	5301437,60	340,916	0,000681	19,2919	
BSA 2,5% + SP 2,1% (2)	7	11,37	17671,46	5301437,60	341,196	0,000682	19,3077	19,34
BSA 2,5% + SP 2,1% (3)	7	11,38	17671,46	5301437,60	343,224	0,000686	19,4225	
BSA 3% + SP2,1% (1)	7	11,52	17671,46	5301437,60	325,224	0,000650	18,4039	
BSA 3% + SP2,1% (2)	7	11,48	17671,46	5301437,60	320,180	0,000640	18,1185	18,38
BSA 3% + SP2,1% (3)	7	11,66	17671,46	5301437,60	329,236	0,000658	18,6309	
BSP 2,1% (1)	7	12,08	17671,46	5301437,60	424,256	0,000848	24,0080	
BSP 2,1% (2)	7	12,04	17671,46	5301437,60	427,564	0,000855	24,1952	24,11
BSP 2,1% (3)	7	12,14	17671,46	5301437,60	426,152	0,000852	24,1153	
Beton normal (1)	28	11,77	17671,46	5301437,60	354,492	0,000709	20,0601	
Beton normal (2)	28	11,78	17671,46	5301437,60	364,356	0,000728	20,6183	20,50
Beton normal (3)	28	11,74	17671,46	5301437,60	367,960	0,000735	20,8223	
BSA 2% + SP 2,1% (1)	28	11,26	17671,46	5301437,60	446,240	0,000892	25,2520	
BSA 2% + SP 2,1% (2)	28	11,27	17671,46	5301437,60	448,984	0,000897	25,4073	25,24
BSA 2% + SP 2,1% (3)	28	11,44	17671,46	5301437,60	442,976	0,000885	25,0673	
BSA 2,5% + SP 2,1% (1)	28	11,52	17671,46	5301437,60	406,508	0,000813	23,0036	
BSA 2,5% + SP 2,1% (2)	28	11,56	17671,46	5301437,60	401,236	0,000802	22,7053	22,96
BSA 2,5% + SP 2,1% (3)	28	11,58	17671,46	5301437,60	409,448	0,000818	23,1700	
BSA 3% + SP2,1% (1)	28	11,25	17671,46	5301437,60	398,836	0,000797	22,5695	
BSA 3% + SP2,1% (2)	28	11,24	17671,46	5301437,60	396,960	0,000793	22,4633	22,38
BSA 3% + SP2,1% (3)	28	11,28	17671,46	5301437,60	390,620	0,000781	22,1046	
BSP 2,1% (1)	28	11,94	17671,46	5301437,60	653,952	0,001307	37,0061	
BSP 2,1% (2)	28	12,04	17671,46	5301437,60	656,764	0,001313	37,1652	37,00
BSP 2,1% (3)	28	11,74	17671,46	5301437,60	650,992	0,001301	36,8386	



Gambar 1. Perbandingan kuat tekan beton dengan tren

Penurunan tersebut dapat berkaitan dengan berkurangnya *workability*, aglomerasi serat, dan pemadatan yang kurang optimal sehingga transfer beban serat–matriks menjadi kurang efisien (Praveena *et al*., 2022; Rajkumar *et al*., 2024)SP 2,1% membantu mempertahankan *workability* dan dispersi serat, sehingga BSA 2% dapat terdistribusi lebih baik dalam matriks; kondisi ini sejalan dengan pentingnya adhesi dan dispersi serat terhadap kinerja mekanik beton komposit (Artchomphoo *et al*., 2024; Praveena *et al*., 2022). Pada kadar BSA 2,5–3%, ketidakseragaman distribusi dan peningkatan cacat internal dapat mengurangi efektivitas penguatan serat (Rajkumar *et al*., 2024). Dengan demikian, BSA 2% + SP 2,1% merupakan komposisi berserat paling efektif dalam rentang yang diuji.

Interpretasi mengenai interaksi BSA dan *superplasticizer* terhadap kinerja beton.

Interaksi antara serat kulit pinang (BSA) dan *superplasticizer (SP)* menunjukkan peran yang saling melengkapi dalam menentukan kinerja beton, terutama pada parameter kuat tekan, *workability*, dan homogenitas campuran. Evaluasi interaksi ini didasarkan pada hasil uji kuat tekan pada umur 7 dan 28 hari, uji *slump*, serta pengamatan terhadap distribusi serat dalam matriks beton.

Pada aspek kuat tekan, peningkatan nilai kuat tekan pada campuran yang mengandung BSA dan SP mengindikasikan adanya mekanisme sinergis. Campuran dengan BSA 2% dan SP 2,1% menghasilkan kuat tekan sebesar 24,008 MPa pada umur 7 hari dan 37,006 MPa pada umur 28 hari. Secara interpretatif, BSA berperan sebagai elemen penguat mikro yang membantu menghambat perambatan retak, sementara SP berkontribusi dalam memperbaiki kondisi pengerjaan campuran

melalui penurunan viskositas dan peningkatan pemadatan. Kombinasi kedua efek tersebut menghasilkan matriks beton yang lebih padat dan ikatan yang lebih efektif antara pasta semen, agregat, dan serat. Pola ini sejalan dengan temuan sebelumnya bahwa peningkatan kuat tekan pada beton berserat dengan dukungan *superplasticizer* (Hasan *et al*., 2023; Wang *et al*., 2023).

Pada aspek *workability*, penambahan serat alami umumnya meningkatkan viskositas campuran sehingga berpotensi menurunkan kelecakan beton. Namun, hasil uji *slump* menunjukkan bahwa keberadaan SP mampu mengompensasi efek tersebut. Nilai *slump* 98 mm pada campuran BSA 2% dan SP 2,1% menunjukkan bahwa beton tetap mudah dikerjakan dan mendukung proses pengecoran. Secara fungsional, SP bertindak sebagai agen pendispersi yang mengurangi gesekan internal dalam pasta semen, sehingga dapat mempertahankan kemampuan alir campuran meskipun mengandung serat. Hal ini menegaskan bahwa peran SP tidak hanya meningkatkan *workability*, tetapi juga menciptakan kondisi yang memungkinkan serat berfungsi secara optimal.

Distribusi serat dalam matriks beton memperkuat interpretasi tersebut. Pada campuran yang mengandung SP, serat cenderung terdistribusi lebih merata dan kecenderungan terjadinya pengelompokan serat dapat diminimalkan. Distribusi yang lebih homogen mengurangi terbentuknya zona lemah lokal dan meningkatkan efisiensi transfer tegangan antara matriks dan serat, yang selanjutnya berkontribusi terhadap peningkatan kuat tekan. Temuan ini konsisten dengan laporan (Hasan *et al*., 2023) yang menyatakan bahwa *superplasticizer* berperan penting dalam meningkatkan homogenitas beton berserat.

Interaksi BSA dan SP juga menegaskan pentingnya optimalisasi proporsi campuran. Campuran dengan BSA 2,5% dan SP 2,1% menghasilkan kuat tekan 25,252 MPa pada umur 28 hari dengan *workability* yang masih berada dalam rentang yang dapat diterima. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kadar serat masih memberikan keuntungan mekanik selama didukung oleh dosis SP yang memadai untuk menjaga kelecakan dan distribusi serat. Dengan demikian, kinerja beton tidak ditentukan oleh satu komponen secara terpisah, melainkan oleh keseimbangan interaksi antara BSA dan SP dalam campuran.

Secara keseluruhan, interpretasi terhadap parameter yang ditinjau menunjukkan bahwa interaksi sinergis antara BSA dan *superplasticizer* meningkatkan kuat tekan beton, mempertahankan *workability*, serta memperbaiki homogenitas campuran. Konsistensi hasil dengan penelitian terdahulu mendukung validitas temuan ini dan memperkuat potensi penggunaan serat kulit pinang sebagai bahan tambahan beton yang berkontribusi pada peningkatan kinerja sekaligus pemanfaatan limbah pertanian (Hasan *et al*., 2023; Wang *et al*., 2023).

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan serat kulit pinang dalam variasi dosis yang ditentukan, bersama dengan superplastisizer pada dosis konstan, secara signifikan meningkatkan kuat tekan beton W/C rendah tanpa mengorbankan *workability*. Kombinasi serat kulit pinang 2% dengan superplastisizer 2,1% menghasilkan peningkatan kuat tekan beton yang optimal pada umur 7 dan 28 hari, sejalan dengan tujuan untuk menentukan dosis yang paling efektif untuk meningkatkan kinerja beton.

Serat kulit pinang dapat memperbaiki sifat mekanik beton, namun hanya pada dosis optimal 2%. Penambahan serat melebihi 2,5% justru menurunkan kekuatan tekan pada umur 28 hari, yang disebabkan oleh ketidakmerataan distribusi serat dalam campuran beton. Selain itu, superplastisizer terbukti efektif dalam meningkatkan fluiditas beton, mendukung distribusi serat yang lebih merata, dan mempertahankan kemudahan pengecoran pada beton dengan rasio air-semen rendah. Penggunaan limbah serat kulit pinang berpotensi mengurangi ketergantungan pada material konvensional serta mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada evaluasi durabilitas jangka panjang beton yang mengandung serat kulit pinang dan superplastisizer, serta analisis mikrostruktur untuk memahami lebih lanjut mekanisme interaksi antara kedua bahan dalam meningkatkan ketahanan beton terhadap berbagai kondisi lingkungan.

Daftar Pustaka

Abbas, B. A., Adisa, S. N., Abubakar, J., Akorede, B. A., & Alabi, A. S. (2024). An Ann Model for Predicting Slump of Concrete Containing Crushed Glass and Natural Gravel. Usak University Journal of Engineering Sciences, *7*(1), 43–53. https://doi.org/10.47137/uujes.1396383

Aicha, M. B., Jalbaud, O., Roguiez, X., Alaoui, A. H., & Burtschell, Y. (2022). The Effect of Superplasticizer Dry Extract on Rheological and Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete. Advanced Materials Research, 1174, 65–80. https://doi.org/10.4028/p-oj7dxq

Akhlaghi, O., Menceloglu, Y. Z., & Akbulut, O. (2017). Poly(carboxylate ether)-based superplasticizer achieves workability retention in calcium aluminate cement. Scientific Reports, 7(1), 41743. https://doi.org/10.1038/srep41743

Akhlaghi, O., Menceloğlu, Y. Z., & Akbulut, Ö. (2017). Poly(carboxylate Ether)-Based Superplasticizer Achieves Workability Retention in Calcium Aluminate Cement. Scientific Reports, 7(1). https://doi.org/10.1038/srep41743

Alsadey, S., & Omran, A. (2022). Effect of Superplasticizers to Enhance the Properties of Concrete. 2, 84–91. https://doi.org/10.37394/232022.2022.2.13

Amalia, Yanuar Setiawan, Lilis Tiyani, & Agus Murdiyoto. (2023). Effect Of Rice Husk Ash And Steel Fibers On Self-Compacting Concrete Properties. International Journal of GEOMATE, 25(108). https://doi.org/10.21660/2023.108.3677

Artchomphoo, J., Saijun, D., Sungsee, P., & Rattanapan, S. (2024). Enhancing Mechanical Properties of Natural Rubber Latex Composites Through Alkali-Treated Areca Husk Fibers: Eco-Friendly Reinforcements. Key Engineering Materials, 1003, 15–28. https://doi.org/10.4028/p-aaew8j

ASTM C39. (2023). Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-23

ASTM C143/C143M-20. (2024). Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20

ASTM C470/C470M-15. (2023). Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0470_C0470M-15

Bitouri, Y. E., Azéma, N., Saoût, G. L., Lauten, R. A., & Weerdt, K. D. (2022). Effect of Plasticizer on Hydration and Rheological Behavior of Cement Pastes. Civileng, 3(3), 748–759. https://doi.org/10.3390/civileng3030043

C I P K Kencanawati, Suardana, N. P. G., Sugita, I. K. G., & Suyasa, I. W. B. (2020). Characteristics of Fiber Treatments on Tensile and Impact Strengths of Pine Resin/Areca Husk Fiber Biocomposites. International Journal of Civil Engineering and Technology (Ijciet), 11(1). https://doi.org/10.34218/ijciet.11.1.2020.009

Carrillo, J., & Díaz, C. A. (2020). Mechanical Properties of Concrete Slabs Reinforced With Recycled Steel Fibers From Post-Consumer Tires in Bogotá, Colombia. Ciencia E Ingeniería Neogranadina, 30(2), 67–79. https://doi.org/10.18359/rcin.4412

Dodai, A., Kumar, A., Hussain, S. E., & Meghwar, M. (2023). Effect of Rice Husk Ash and Indus River Sand on Properties of Autoclaved Aerated Concrete. International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. https://doi.org/10.56726/irjmets41884

Erzengin, S. G., & Öcal, C. (2019). Influences of design parameters on the properties of self-compacting concrete produced with structurally different polycarboxylates. Structural Concrete, 20(5), 1710–1721. https://doi.org/10.1002/suco.201900094

Garcia, D. C. S., Lima, K. U., Wang, K., & Figueiredo, R. B. (2022). Evaluating the Effect of Autoclave Curing on the Microstructure and Compressive Strength Evaluation of a High Strength Concrete. Matéria (Rio De Janeiro), 27(2). https://doi.org/10.1590/s1517-707620220002.1301

Gołaszewski, J., Ponikiewski, T., Kostrzanowska-Siedlarz, A., & Miera, P. (2020). The Influence of Calcareous Fly Ash on the Effectiveness of Plasticizers and Superplasticizers. Materials, 13(10), 2245. https://doi.org/10.3390/ma13102245

Hadji, T., & Attia, A. (2022). Case Study of High Strength Concrete Mix Proportioning Optimization. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 18(6), 1039–1048. https://doi.org/10.1108/mmms-07-2022-0132

Hasan, R., Sobuz, Md. H. R., Akid, A. S. M., Awall, Md. R., Houda, M., Saha, A., Meraz, Md. M., Islam, Md. S., & Sutan, N. M. (2023). Eco-friendly self-consolidating concrete production with reinforcing jute fiber. Journal of Building Engineering, 63, 105519. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105519

Huang, D., Xiong, Q., & Xing, Z. (2015). Effect of Dipping Basalt Fiber on Mechanical Properties of Concrete. https://doi.org/10.2991/ic3me-15.2015.389

Salain, I. M. A. K. (2021). Effect of water/cement and aggregate/cement ratios on consistency and compressive strength of concrete using volcanic stone waste as aggregates. *Civil Engineering and Architecture*, *9*(6), 1900-1908. https://doi.org/10.13189/cea.2021.090621

Ibrahim, A. O., Jimoh, A., Olaniyi, O. A., Abioye, T. E., Oluwapelumi, O. A., & Wasiu, J. (2024). Comparative Analysis of the Strength of Concretes Made From Different Aggregates. International Journal of Mechanical and Civil Engineering, 7(2), 26–35. https://doi.org/10.52589/ijmce-g6symn6r

Ibrahim, M. H., Xue, Z., Abdu, H. I., Shinger, M. I., Idris, A. M., Edris, M. M., Shan, D., & Lu, X. (2019). Sensitive and selective colorimetric nitrite ion assay using silver nanoparticles easily synthesized and stabilized by AHNDMS and functionalized with PABA††Electronic supplementary information (ESI) available: From Fig. S1 to S5. See DOI: 10.1039/c8na00146d. Nanoscale Advances, 1(3), 1207–1214. https://doi.org/10.1039/c8na00146d

Kanthe, V. N. (2024). Strength and Durability Performance of Fly Ash Concrete With and Without Superplasticizer. Journal of Physics Conference Series, 2779(1), 012001. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2779/1/012001

Kos, Ž., Kroviakov, S., Mishutin, A., & Poltorapavlov, A. (2023). An Experimental Study on the Properties of Concrete and Fiber-Reinforced Concrete in Rigid Pavements. Materials, 16(17), 5886. https://doi.org/10.3390/ma16175886

Kroviakov, S. O., Poltorapavlov, A., Mishutin, A. V., & Zavoloka, M. V. (2022). The Influence of the Amount of Fiber and Superplasticizer on the Strength of Concrete for the Rigid Pavements. Modern Construction and Architecture, (2), 60–69. https://doi.org/10.31650/2786-6696-2022-2-60-69

Makunza, J. K. (2022). Application of Areca Palm Fibers as Strength Enhancement in Conventional Concrete. Advanced Materials Research, 1168, 11–22. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1168.11

Matanza, A., Perlot, C., Latapie, E., & Cerveny, S. (2022). Hardening and Fresh State Behaviour of Ternary Cement for Marine Environments: Modification Through Nanoadditives. Materials, 15(5), 1938. https://doi.org/10.3390/ma15051938

Megahed, F. A., Sharaky, I. A., Badawy, A., & Seleem, M. A. (2017). The Role of Cement Content on Controlling the Compressive Strength and Water Absorption of Nano Silica Concrete. Journal of Al-Azhar University Engineering Sector, 12(45), 1417–1426. https://doi.org/10.21608/auej.2017.19135

Mohamad, D., Beddu, S., Kamal, N. L. M., Meena, & Karim, S. (2024). The Combination of Conventional Roller Compacted Concrete (RCC) With the Substitution of Fly Ash for Fine Aggregate Replacement. Matec Web of Conferences, 400, 01006. https://doi.org/10.1051/matecconf/202440001006

Mohammed, A. K., Hassan, A. M. T., & Mohammed, A. S. (2023). Predicting the Compressive Strength of Green Concrete at Various Temperature Ranges Using Different Soft Computing Techniques. Sustainability, 15(15), 11907. https://doi.org/10.3390/su151511907

Mohsin, S. M. S., Ruslan, H. N., Muthusamy, K., & Ariffin, N. F. (2022). Compressive Strength of Lightweight Aggregate Concrete Containing Crushed Cockle Shell as Partial Sand Replacement. Key Engineering Materials, 912, 111–118. https://doi.org/10.4028/p-ght9fy

Praveena, B. A., Santhosh, N., Buradi, A., Srikanth, H. V., Shankar, G., Ramesha, K., Manjunath, N., Karthik, S. N., Naik, M. R., & Kumar, S. P. (2022). Experimental Investigation on Density and Volume Fraction of Void, and Mechanical Characteristics of Areca Nut Leaf Sheath Fiber-Reinforced Polymer Composites. International Journal of Polymer Science, 2022, 1–13. https://doi.org/10.1155/2022/6445022

Rabehi, R., Rabehi, M., & Omrane, M. (2023). Physical-mechanical and fresh state properties of self-compacting concrete based on different types of gravel reinforced with steel fibers: Experimental study and modeling. Construction and Building Materials, 390, 131758. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131758

Raheem, A. A., Olowu, O. A., Hungbo, A. A., & Ibiwoye, E. O. (2021). Effects of Water Cement Ratio on Strengths Characteristics of Concrete Produced With Recycled Iron and Steel Slag (RISS) Aggregate. Advances in Science and Technology. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ast.107.97.

Rajkumar, R., Arumugam, C. A. K., Palanisamy, S., & Ayrılmış, N. (2024). Mechanical Properties of

Epoxy Composites Reinforced With Areca Catechu Fibers Containing Silicon Carbide. Bioresources, 19(2), 2353–2370. https://doi.org/10.15376/biores.19.2.2353-2370

Rashwan, M. M., Abaas, K. A., & Ali, M. (2020). Assessment of Using an Optimal Dose of Superplasticizer With the Optimum Replacement of Rice Husk Ash (Rha)on Concrete Compressive Strength. International Journal of Civil Engineering and Technology (Ijciet), 11(10). https://doi.org/10.34218/ijciet.11.10.2020.002

Sadegh-Zadeh, S.-A., Dastmard, A., Kafshgarkolaei, L. M., Movahedi, S., Ghidary, S. S., Najafi, A., & Saadat, M. (2023). Machine Learning Modelling for Compressive Strength Prediction of Superplasticizer-Based Concrete. Infrastructures, 8(2), 21. https://doi.org/10.3390/infrastructures8020021

Selvam, M., Singh, S., & Anjana, A. G. (2023). Enhancing the Performance of Roller-Compacted Concrete Pavement by Synergetic Improvement of Packing Density, Lubrication, and Moisture State of Recycled Concrete Aggregate. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2677(6), 594–608. https://doi.org/10.1177/03611981221149427

Shamsudin, M. M. H., Hamid, N. H. A., & Fauzi, M. A. M. (2021). Compressive and Flexural Strength of Concrete Containing Recycled Polyethylene Terephthalate (PET). Key Engineering Materials, 879, 13–21. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.879.13

Silva, D. L., Jesus, K. L. M. D., Adina, E. M., Mangrobang, D. V., Escalante, M. D., & Susi, N. A. M. (2021). Prediction of Tensile Strength and Erosional Effectiveness of Natural Geotextiles Using Artificial Neural Network. Int. Conf. Comput. Autom. Eng., ICCAE, 121–127. Scopus. https://doi.org/10.1109/ICCAE51876.2021.9426170

SNI 2049. (2015). SNI-2049-2015—Semen Portland. http://sispk.bsn.go.id/SNI/DetailSNI/14305

Sundararasan, S. T. (2023). Mechanical and Durability Evaluation of Hooked End Steel Fibers Reinforced Concrete. Iop Conference Series Earth and Environmental Science, 1280(1), 012026. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1280/1/012026

Takigawa, M., Katsuoka, N., Hashimoto, S. I., & Date, S. (2021). Performance Change in Superplasticizers After Thermal Stimulation. Key Engineering Materials, 896, 157–163. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.896.157

Verma, C., Quraishi, M. A., Alfantazi, A., & Rhee, K. Y. (2023). Biodegradable synthetic polymers in sustainable corrosion protection: Present and future scenarios. Biodegradable Polymers for Engineering Applications, 6(4), 407–435. https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.04.005

Wang, H., Pang, J., & Xu, Y. (2023). Mechanical Properties and Microstructure of Rice Husk Ash–Rubber–Fiber Concrete Under Hygrothermal Environment. Polymers, 15(11), 2415. https://doi.org/10.3390/polym15112415

Xia, Y., & Xian, G. (2019). Hybrid Basalt/Flax Fibers Reinforced Polymer Composites and Their Use in Confinement of Concrete Cylinders. Advances in Structural Engineering, 23(5), 941–953. https://doi.org/10.1177/1369433219886084

Yuan, J., Zhang, H., Zhao, H., Ren, H., & Zhai, H. (2023). Study on Dissociation and Chemical Structural Characteristics of Areca Nut Husk. Molecules, 28(3), 1513. https://doi.org/10.3390/molecules28031513

Zebari, Z. (2019). Using Ultrasonic Pulse Velocity Test to Assess the Effect of Water-Cement Ratio on the Compressive Strength of Concrete. Journal of Engineering, 25(5), 79–86. https://doi.org/10.31026/j.eng.2019.05.06

Zhang, T., Yin, Y., Gong, Y., & Wang, L. (2020). Mechanical properties of jute fiber-reinforced high-strength concrete. Structural Concrete, 21(2), 703–712. https://doi.org/10.1002/suco.201900012

Zhou, Y., Xiao, Y., Gu, A., & Lu, Z. (2018). Dispersion, Workability and Mechanical Properties of Different Steel-Microfiber-Reinforced Concretes With Low Fiber Content. Sustainability, 10(7), 2335. https://doi.org/10.3390/su10072335

Zulu, B. A., Miyazawa, S., & Nito, N. (2019). Properties of Blast-Furnace Slag Cement Concrete Subjected to Accelerated Curing. Infrastructures, 4(4), 69. https://doi.org/10.3390/infrastructures4040069