

Pengaruh Variasi Kadar Limbah Wire Rope sebagai Serat dan Silica Fume terhadap Kuat Tekan High Performance Concrete (HPC)

Heru Kurniawan¹, Ahmad Zarkasi², Nurul Hidayati³

^{1,2,3}Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Mataram, Indonesia

herukurniawannn21@gmail.com

ABSTRACT

Keywords:

High-Performance Concrete;
Wire Rope Waste;
Compressive Strength.

Abstract: High-Performance Concrete (HPC) offers superior compressive strength, durability, and microstructural density compared to conventional concrete; however, it remains inherently brittle and susceptible to crack propagation. While the addition of steel fibers can enhance crack resistance, the use of waste wire rope from discarded steel cables as an alternative fiber has not been extensively studied in high-grade HPC—specifically at a target strength of 60 MPa. This study aims to analyze the effects of adding silica fume and varying dosages of waste wire rope on the compressive strength of HPC, determine the optimum dosage, and identify the cracking patterns of the test specimens. An experimental laboratory approach was employed targeting a design strength of 60 MPa; a control mix was designed based on SNI 03-2834-2000 and subsequently modified with 10% silica fume and a superplasticizer to achieve HPC characteristics, with the addition of 30 mm-long waste wire rope at dosages of 0%, 0.75%, and 1.25% by weight of cement. Testing included slump tests on fresh concrete and compressive strength tests on 150×300 mm cylindrical specimens at 3 days of age, with values converted to 28-day strength in accordance with ACI Committee 209R-92 guidelines. The results indicate that the average compressive strength of the control concrete was 75.79 MPa; this increased to 83.18 MPa (a 9.7% rise) at the 0.75% dosage but decreased to 76.92 MPa at the 1.25% dosage due to a tendency for the "balling effect." All variations met the target strength of 60 MPa. Regarding cracking patterns, Type 5 failure was observed in the 0% and 0.75% variations, whereas the 1.25% variation exhibited Type 4 failure, classified according to ASTM C39/C39M-23 standards. Thus, a wire rope waste content of 0.75% represents the optimum variation for use as a fiber additive in HPC, supporting the sustainable utilization of industrial waste.

Kata Kunci:

High Performance Concrete;
Limbah Wire Rope;
Kuat Tekan.

Abstrak: High Performance Concrete (HPC) merupakan beton berkinerja tinggi yang menawarkan kuat tekan, durabilitas, dan kepadatan mikrostruktur yang lebih baik dibandingkan beton normal, namun umumnya masih bersifat getas (brittle) sehingga rentan mengalami propagasi retak. Penambahan serat baja dapat memperbaiki ketahanan retak beton, sementara pemanfaatan limbah wire rope dari kabel baja bekas sebagai serat alternatif belum banyak dikaji pada HPC bermutu tinggi, khususnya pada mutu rencana 60 MPa. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan silica fume dan variasi kadar limbah wire rope terhadap kuat tekan HPC, menentukan kadar optimum, serta mengidentifikasi pola retakan benda uji. Penelitian menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan mutu rencana 60 MPa; campuran kontrol dirancang berdasarkan SNI 03-2834-2000 kemudian dimodifikasi dengan silica fume 10% dan superplasticizer untuk mencapai HPC, ditambah limbah wire rope panjang 30 mm dengan variasi kadar 0%, 0,75%, dan 1,25% terhadap berat semen. Pengujian meliputi slump test pada beton segar serta kuat tekan benda uji silinder 150×300 mm pada umur 3 hari yang dikonversi ke umur 28 hari mengacu ACI Committee 209R-92. Hasil penelitian menunjukkan kuat tekan rata-rata beton normal sebesar 75,79 MPa, meningkat menjadi 83,18 MPa (naik 9,7%) pada variasi 0,75%, kemudian menurun menjadi 76,92 MPa pada variasi 1,25% akibat kecenderungan balling effect. Seluruh variasi memenuhi mutu rencana 60 MPa. Pola retakan menunjukkan keruntuhan Tipe 5 pada variasi 0% dan 0,75%, sedangkan variasi 1,25% mengalami keruntuhan Tipe 4 berdasarkan ASTM C39/C39M-23. Dengan demikian, kadar limbah wire rope 0,75% merupakan variasi optimum sebagai bahan tambah serat pada HPC yang mendukung pemanfaatan limbah industri secara berkelanjutan.

Article History:

Received : 01-10-2026

Accepted : 30-11-2026



This is an open access article under the **CC-BY-SA** license

A. INTRODUCTION

Perkembangan infrastruktur global yang semakin pesat mendorong kebutuhan material konstruksi berkinerja tinggi, terutama beton dengan kuat tekan, durabilitas, dan ketahanan retak yang lebih baik dibanding beton konvensional. *High Performance Concrete* (HPC) merupakan salah satu inovasi material yang dikembangkan untuk memenuhi tuntutan tersebut karena memiliki kuat tekan tinggi, permeabilitas rendah, serta ketahanan terhadap lingkungan agresif, sehingga penggunaannya terus meningkat pada gedung bertingkat, jembatan, pelabuhan, dan infrastruktur strategis lainnya (Kajaste & Hurme, 2016). Namun demikian, beton berkinerja tinggi umumnya masih bersifat getas (*brittle*), sehingga rentan mengalami propagasi retak yang dapat menurunkan integritas struktural secara tiba-tiba. Penambahan serat menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan ketahanan retak dan memperbaiki sifat mekanik beton, karena serat baja terbukti mampu meningkatkan kuat tekan, daktilitas, serta ketahanan retak beton secara signifikan (Bortali, Rabouli, Yessari, & Hajjaji, 2023; Chetbani dkk., 2023; Yang, Peng, Shui, & Zhang, 2019).

Di sisi lain, peningkatan aktivitas industri dan transportasi menghasilkan akumulasi limbah logam yang semakin besar, termasuk limbah *wire rope* dari kabel baja alat berat, pelabuhan, dan konstruksi, yang umumnya belum dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi mencemari lingkungan apabila dibuang tanpa pengolahan. Pendekatan konstruksi berkelanjutan (*sustainable construction*) mendorong pemanfaatan limbah industri sebagai material alternatif dalam campuran beton, dan beberapa penelitian menunjukkan bahwa serat baja hasil daur ulang dari limbah kabel mampu meningkatkan sifat mekanik beton sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Abdulridha, Nasr, Al-Abbas, & Hasan, 2022; Amin, Ahmad, Khan, & Ahmad, 2022; Gao dkk., 2023). Pada beton berserat (*fiber reinforced concrete*), peningkatan kuat tekan sangat dipengaruhi oleh kadar, bentuk, dan distribusi serat (Kang, Yoo, & Gupta, 2021; Wang & Yue, 2023), sedangkan pengembangan HPC dengan kuat tekan 60–80 MPa juga umum dikombinasikan dengan material pozzolan seperti *silica fume* untuk memadatkan mikrostruktur beton (Ahmad dkk., 2022). Meski demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih menggunakan serat baja komersial, sementara pemanfaatan limbah *wire rope* sebagai alternatif serat pada beton mutu tinggi masih sangat terbatas.

Berdasarkan kajian tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) berupa terbatasnya studi yang mengkaji penggunaan limbah *wire rope* sebagai bahan tambah serat pada HPC dengan mutu rencana 60 MPa, sekaligus belum adanya kajian yang secara spesifik menganalisis pengaruh variasi kadarnya terhadap kuat tekan beton. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan *silica fume* dan variasi kadar limbah *wire rope* (0%, 0,75%, dan 1,25%) terhadap kuat tekan HPC, menentukan kadar yang menghasilkan kuat tekan optimum, serta mengidentifikasi pola retakan benda uji setelah pengujian kuat tekan, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan material beton berkinerja tinggi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan aplikatif pada kebutuhan konstruksi modern.

B. METHOD

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan eksperimental melalui pengujian laboratorium di Laboratorium Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Mataram (Sugiyono, 2023). Bahan penyusun HPC yang digunakan meliputi semen Portland tipe I, pasir silika sebagai agregat halus, batu pecah maksimum 40 mm sebagai agregat kasar, air, *superplasticizer* berbasis *polycarboxylate ether* (SikaCim® Concrete), *silica fume* sebesar 10% dari berat semen, serta limbah *wire rope* dari kabel baja bekas yang dipotong sepanjang 30 mm, dibersihkan dari karat dan sisa pelumas sebelum digunakan sebagai bahan tambah serat.

Variabel bebas penelitian adalah variasi kadar limbah *wire rope* terhadap berat semen (0%, 0,75%, dan 1,25%) dengan panjang serat tetap 30 mm, variabel terikat berupa kuat tekan HPC, sedangkan variabel kontrol meliputi mutu rencana 60 MPa, faktor air terhadap bahan pengikat, kadar

silica fume, dosis *superplasticizer*, jenis dan gradasi agregat, metode pencampuran, bentuk benda uji, metode perawatan (*water curing*), serta umur pengujian. Setiap variasi dibuat sebanyak tiga benda uji silinder berukuran 150 mm × 300 mm sebagai replikasi, sehingga total benda uji berjumlah 9 sampel sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Desain Eksperimen Penelitian

Kode	Kadar WR (%)	Jumlah Benda Uji	Umur Uji (hari)
WR-0	0,00	3	3
WR-0.75	0,75	3	3
WR-1.25	1,25	3	3

(Sumber: Data Penelitian, 2026)

Perancangan campuran (*mix design*) beton kontrol mengacu pada SNI 03-2834-2000, kemudian dimodifikasi dengan penambahan *silica fume* dan *superplasticizer* untuk mencapai mutu rencana HPC 60 MPa, sebelum limbah *wire rope* ditambahkan sesuai variasi kadar yang ditetapkan. Karakteristik agregat penyusun beton diuji terlebih dahulu meliputi kadar air (SNI 1971:2011), berat volume (SNI 03-4804-1998), gradasi saringan (SNI 03-1968-1990), berat jenis dan penyerapan air (SNI 03-1970-1990 dan SNI 03-1969-1990), serta keausan agregat kasar menggunakan mesin *Los Angeles* (SNI 2417:2008), untuk memastikan seluruh material memenuhi syarat sebagai bahan penyusun HPC.

Pembuatan benda uji mengacu pada SNI 2493:2011, diawali dengan penimbangan material sesuai *mix design*, pencampuran menggunakan *concrete mixer* dengan penambahan limbah *wire rope* secara bertahap agar tersebar merata, pengujian *slump* dengan kerucut Abrams mengacu SNI ASTM C143/C143M:2012, pencetakan pada silinder 150 mm × 300 mm, hingga perawatan (*curing*) dengan perendaman dalam bak air. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3 hari menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) sesuai SNI 1974:2011, dengan nilai kuat tekan dihitung menggunakan Pers. (1),

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dengan f'_c adalah kuat tekan beton (N/mm²), P adalah beban tekan maksimum (N), dan A adalah luas bidang tekan benda uji (mm²), yang merupakan parameter utama untuk menilai kinerja mekanik beton keras (Neville, 2011) Karena keterbatasan waktu penelitian, pengujian aktual pada umur 28 hari belum dapat dilakukan, sehingga nilai kuat tekan umur 3 hari dikonversi ke umur 28 hari menggunakan faktor konversi berdasarkan ACI Committee 209R-92 (1997), yang memungkinkan kecenderungan pengaruh variasi kadar *wire rope* tetap dianalisis secara proporsional antar variasi meskipun bersifat estimasi.

Setelah pengujian kuat tekan, setiap benda uji diamati secara visual untuk mengidentifikasi pola keruntuhan berdasarkan klasifikasi ASTM C39/C39M-23 (ASTM International, 2023), yang meliputi pola kerucut (*cone*), kerucut dan belah (*cone and split*), geser (*shear*), belah (*split*), dan kolumnar (*columnar*). Data kuat tekan setiap variasi selanjutnya dibandingkan untuk mengetahui pengaruh kadar limbah *wire rope*, disajikan dalam bentuk grafik untuk menentukan titik optimum, serta dianalisis bersama pola retakan untuk menilai keterkaitan antara penambahan serat dengan mekanisme *crack bridging*.

C. RESULTS & DISCUSSION

1. Karakteristik material dan mix design

Hasil pengujian karakteristik agregat menunjukkan bahwa seluruh parameter memenuhi persyaratan SNI sebagai bahan penyusun HPC. Kadar air rata-rata agregat halus dan kasar masing-masing sebesar 0,36% dan 2,08%, berat volume agregat halus 1,60–1,70 kg/L dan agregat kasar 1,40–1,60 kg/L, sedangkan gradasi saringan menghasilkan modulus kehalusan (*fineness modulus*) agregat halus sebesar 3,26 dan agregat kasar sebesar 6,17, keduanya berada pada rentang yang dipersyaratkan. Berat jenis agregat halus dan kasar berturut-turut sebesar 2,50 dan 2,50–2,80, dengan penyerapan air 1,4% dan 3,0%, sementara nilai keausan agregat kasar dengan mesin *Los Angeles* sebesar 27,99%, masih di bawah batas maksimum 40% menurut SNI 2417:2008. Berdasarkan hasil tersebut, campuran HPC mutu rencana 60 MPa dirancang mengacu SNI 03-2834-2000 dengan faktor air-semen 0,30, kadar semen 617 kg/m³, kemudian dimodifikasi dengan *silica fume* 10% dan *superplasticizer* SikaCim® Concrete sebelum ditambahkan limbah *wire rope* sesuai variasi kadar.

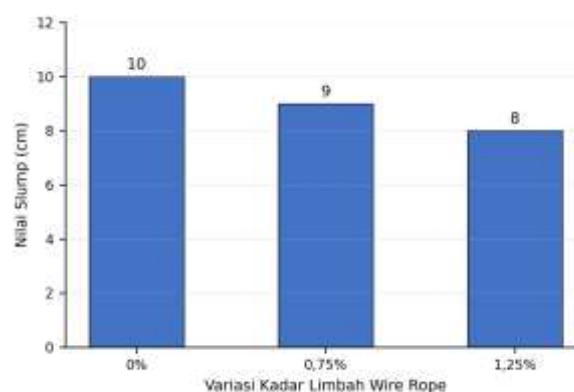
2. Nilai slump dan kuat tekan beton

Pengujian *slump* menunjukkan tren penurunan *workability* seiring peningkatan kadar limbah *wire rope*, yaitu 10 cm pada variasi 0%, menurun menjadi 9 cm pada variasi 0,75%, dan 8 cm pada variasi 1,25%, sebagaimana disajikan pada Tabel 2. Penurunan ini terjadi karena meningkatnya gesekan antarpartikel serat dengan agregat sehingga mobilitas campuran beton segar berkurang, namun seluruh variasi masih berada pada rentang *slump* rencana 60–180 mm sehingga tetap memenuhi kebutuhan pengecoran, dengan tren penurunan tersebut diperlihatkan pada Gambar 1.

Tabel 2. Nilai Slump HPC pada Setiap Variasi

Variasi WR (%)	Nilai Slump (cm)
0,00	10
0,75	9
1,25	8

(Sumber: Hasil Penelitian Pribadi, 2026)



Gambar 1. Grafik Nilai Slump HPC pada Setiap Variasi

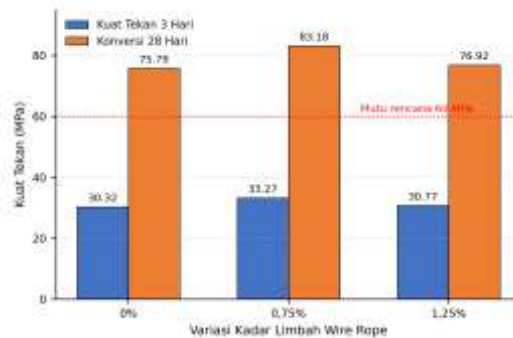
Hasil pengujian kuat tekan pada umur 3 hari beserta nilai konversinya ke umur 28 hari disajikan pada Tabel 3. Beton kontrol (0%) menghasilkan kuat tekan rata-rata 30,32 N/mm² pada umur 3 hari atau setara 75,79 N/mm² pada umur 28 hari. Penambahan limbah *wire rope* 0,75% meningkatkan kuat tekan menjadi 33,27 N/mm² (83,18 N/mm² konversi 28 hari), atau naik sekitar 9,7% dibandingkan beton kontrol, dengan sebaran nilai antar sampel yang lebih konsisten sehingga mengindikasikan distribusi tegangan yang lebih homogen akibat keberadaan serat. Sebaliknya, pada

variasi 1,25% kuat tekan menurun menjadi 30,77 N/mm² (76,92 N/mm² konversi 28 hari), meskipun tetap sedikit lebih tinggi dari beton kontrol. Perbandingan kuat tekan antar variasi tersebut divisualisasikan pada Gambar 2.

Tabel 3. Rekapitulasi Kuat Tekan HPC Antar Variasi

Kode	Kuat Tekan 3 Hari (MPa)	Konversi 28 Hari (MPa)
WR-0	30,32	75,79
WR-0.75	33,27	83,18
WR-1.25	30,77	76,92

(Sumber: Hasil Penelitian Pribadi, 2026)



Gambar 2. Grafik Kuat Tekan HPC Antar Variasi

Kecenderungan peningkatan kuat tekan pada kadar 0,75% diduga terjadi karena serat *wire rope* berperan menahan penjarangan retak mikro pada matriks beton melalui mekanisme *crack bridging*, sejalan dengan temuan Abdulridha dkk. (2022) yang melaporkan peningkatan kuat tekan sekitar 22% pada kadar optimum *waste rope fibers* 0,25% dari berat beton, maupun Chetbani dkk. (2023) yang memperoleh kuat tekan HPC sekitar 78 MPa menggunakan serat baja daur ulang dari kabel baja terpilin pada kadar 29 kg/m³. Penurunan kuat tekan pada kadar 1,25% mengindikasikan telah terlampauinya kadar optimum, sejalan dengan Summra, Mahmoud, & Soliman (2024) yang menemukan penurunan kuat tekan pada kadar *recycled steel fiber* di atas 1,5% akibat *fiber balling*, yaitu penggumpalan serat yang menurunkan homogenitas dan kepadatan campuran. Kecenderungan serupa juga dilaporkan Najm, Nanayakkara, & Sabri (2022), yang memperoleh kuat tekan optimum pada serat baja sepanjang 30 mm dengan kadar 1,0% karena distribusi serat yang lebih homogen dibanding kadar yang lebih tinggi. Meskipun demikian, seluruh variasi dalam penelitian ini tetap menghasilkan kuat tekan di atas mutu rencana 60 MPa, sehingga penambahan limbah *wire rope* hingga 1,25% masih layak digunakan pada HPC, dengan kadar 0,75% sebagai variasi yang memberikan kuat tekan paling optimum.

3. Pola retakan benda uji

Pengamatan pola retakan berdasarkan klasifikasi ASTM C39/C39M-23 menunjukkan bahwa benda uji pada variasi 0% dan 0,75% mengalami keruntuhan Tipe 5, yaitu retak pada salah satu samping ujung benda uji, sedangkan variasi 1,25% mengalami keruntuhan Tipe 4 berupa retak geser diagonal pada kedua sisi benda uji, sebagaimana dirangkum pada Tabel 4.

Tabel 4. Pola Retakan Benda Uji HPC

Variasi	Tipe Retak (ASTM C39)	Karakteristik
0%	Tipe 5	Retak pada salah satu sisi ujung benda uji
0,75%	Tipe 5	Retak pada salah satu sisi ujung benda uji
1,25%	Tipe 4	Retak geser diagonal pada kedua sisi

(Sumber: Hasil Penelitian Pribadi, 2026)

Dari sembilan benda uji yang diamati, pola Tipe 5 mendominasi hasil pengujian (6 dari 9 benda uji pada variasi 0% dan 0,75%), sedangkan Tipe 4 hanya ditemukan pada ketiga benda uji variasi 1,25%. Dominasi pola Tipe 5 menunjukkan bahwa mayoritas benda uji HPC mengalami keruntuhan yang relatif landai dan bertahap, bukan keruntuhan getas (*brittle*) seperti umumnya terjadi pada beton tanpa serat, yang mengindikasikan bahwa keberadaan limbah *wire rope* berkontribusi menghambat perambatan retakan melalui mekanisme *crack bridging*. Hasil ini sejalan dengan Amin dkk. (2022) yang menyimpulkan bahwa serat baja pada beton umumnya mengubah pola keruntuhan menjadi lebih daktail dibandingkan beton tanpa serat, meskipun pada kadar *wire rope* yang lebih tinggi (1,25%) pola retak geser diagonal mulai muncul, sejalan dengan kecenderungan penurunan homogenitas campuran akibat *balling effect* yang telah dibahas sebelumnya.

D. CONCLUSIONS AND SUGGESTIONS

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan, kuat tekan HPC tanpa penambahan limbah *wire rope* (beton kontrol) pada umur 3 hari sebesar 30,32 MPa atau setara 75,79 MPa pada umur 28 hari, sehingga telah memenuhi mutu rencana 60 MPa. Penambahan limbah *wire rope* berpengaruh terhadap kuat tekan HPC, di mana kuat tekan meningkat pada variasi 0,75% menjadi 83,18 MPa (naik sekitar 9,7% dibanding beton kontrol) sebagai kadar optimum, kemudian menurun menjadi 76,92 MPa pada variasi 1,25% akibat kecenderungan *balling effect*, meskipun nilai *slump* menurun secara konsisten dari 10 cm menjadi 8 cm namun masih memenuhi kebutuhan *workability*. Seluruh variasi tetap menghasilkan kuat tekan di atas mutu rencana 60 MPa. Pengamatan pola retakan menunjukkan bahwa variasi 0% dan 0,75% mengalami keruntuhan Tipe 5, sedangkan variasi 1,25% mengalami keruntuhan Tipe 4 berdasarkan klasifikasi ASTM C39/C39M-23, dengan pola Tipe 5 yang mendominasi hasil pengujian (6 dari 9 benda uji), mengindikasikan keruntuhan yang relatif landai dan bertahap dibandingkan keruntuhan getas pada beton tanpa serat. Dengan demikian, kadar limbah *wire rope* 0,75% merupakan variasi optimum sebagai bahan tambah serat pada HPC, sekaligus menjadi alternatif pemanfaatan limbah industri yang mendukung konsep konstruksi berkelanjutan.

REFERENCES

- Abdulridha, S. Q., Nasr, M. S., Al-Abbas, B. H., & Hasan, Z. A. (2022). Mechanical and structural properties of waste rope fibers-based concrete: An experimental study. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00964. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E00964>
- Ahmad, J., Abid, S. R., Arbili, M. M., Majdi, A., Hakamy, A., & Deifalla, A. F. (2022). A Review on Sustainable Concrete with the Partially Substitutions of Silica Fume as a Cementitious Material. *Sustainability (Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/SU141912075>
- Amin, M. N., Ahmad, W., Khan, K., & Ahmad, A. (2022). Steel Fiber-Reinforced Concrete: A Systematic Review of the Research Progress and Knowledge Mapping. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 6155, 15(17), 6155. <https://doi.org/10.3390/MA15176155>
- ASTM International. (2023). *ASTM C39/C39M-23: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA.
- Bortali, M., Rabouli, M., Yessari, M., & Hajjaji, A. (2023). Assessment of harbor sediment contamination for a path to valorize dredged material. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(11). <https://doi.org/10.1016/J.ARABJC.2023.105208>
- Chetbani, Y., Zaitri, R., Tayeh, B. A., Hakeem, I. Y., Dif, F., & Kellouche, Y. (2023). Physicomechanical Behavior of High-Performance Concrete Reinforced with Recycled Steel Fibers from Twisted Cables in the Brittle State—Experimentation and Statistics. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 2290, 13(9), 2290. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13092290>
- Gao, Y., Wang, B., Xu, Q., Liu, C., Hui, D., Yuan, W., ... Zhao, J. (2023). Experimental study on recycled steel fiber-reinforced concrete under repeated impact. *Reviews on Advanced Materials Science*, 62(1). <https://doi.org/10.1515/RAMS-2022-0312/XML>
- Kajaste, R., & Hurme, M. (2016). Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4041–4052. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.07.055>

- Kang, M. C., Yoo, D. Y., & Gupta, R. (2021). Machine learning-based prediction for compressive and flexural strengths of steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 266, 121117. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121117>
- Najm, H. M., Nanayakkara, O., & Sabri, M. M. S. (2022). Destructive and Non-Destructive Evaluation of Fibre-Reinforced Concrete: A Comprehensive Study of Mechanical Properties. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 4432, 15(13), 4432. <https://doi.org/10.3390/MA15134432>
- Neville. (2011). *Properties of Concrete* (5 ed.). Harlow, England: Pearson Education Limited.
- Sugiyono. (2023). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D* (2 ed.). Bandung: Alfabeta.
- Summra, A. A., Mahmoud, M. H., & Soliman, M. M. (2024). Influence of Using Various Types of Steel Fibers of Recycled Concrete Aggregates on the Shear Behavior of RC Beams. *Journal of Engineering*, 2024(1), 6493687. <https://doi.org/10.1155/2024/6493687>
- Wang, W., & Yue, Q. (2023). The Time Variation Law of Concrete Compressive Strength: A Review. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 4947, 13(8), 4947. <https://doi.org/10.3390/APP13084947>
- Yang, J., Peng, G. F., Shui, G. S., & Zhang, G. (2019). Mechanical Properties and Anti-Spalling Behavior of Ultra-High Performance Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers. *Materials* 2019, Vol. 12, Page 783, 12(5), 783. <https://doi.org/10.3390/MA12050783>