

Jurnal Kejuruteraan 38(2) 2026: 615-622
[https://doi.org/10.17576/jkukm-2026-38\(2\)-12](https://doi.org/10.17576/jkukm-2026-38(2)-12)

Baki Kekuatan Lentur Tegangan Konkrit Bertetulang Gentian Keluli (Residual Flexural Tensile Strength of Fiber Reinforced Concrete)

Jacob Lim Lok Guan^{a*}, Syarman Khan^a, A.B.M Amrul Kaish^a, Umawathy Techanamurthy^b,
 Muhammad Fauzi Mohd. Zain^c, KumYung Juan^d & Anis Azmi^a

^aJabatan Kejuruteraan Awam, Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina, 43600 Universiti Kebangsaan Malaysia

^bJabatan Pendidikan Kejuruteraan, Fakulti Kejuruteraan & Alam Bina, 43600 Universiti Kebangsaan Malaysia

^cUniversity College of Yayasan Pahang 26060 Kuantan, Pahang

^dCluster of Engineering, Singapore Institute of Technology

*Corresponding author: jacoblim@ukm.edu.my

Received 15 January 2025, Received in revised form 5 November 2025
 Accepted 9 December 2025, Available online 30 March 2026

ABSTRAK

Konkrit adalah bahan rapuh dengan keupayaan terikan dan kekuatan tegangan yang rendah. Konkrit bertetulang gentian keluli (SFRC) telah mendapat perhatian sebagai bahan pembinaan inovatif, menawarkan peningkatan sifat tegangan dan lenturan berbanding konkrit konvensional. Piawaian Singapura, "SS 674: Fiber concrete- Design of fiber concrete structures" baru sahaja dilancarkan dan menawarkan struktur komprehensif bagi meningkatkan pemahaman tentang Konkrit Bertetulang Gentian. Kajian ini memperkenalkan pencirian komprehensif SFRC, dengan fokus pada sifat mekanikalnya terutamanya kekuatan baki. Susulan itu, satu siri kerja eksperimen dijalankan untuk menilai kekuatan tegangan baki di bawah tingkah laku beban lenturan spesimen SFRC. Mengkaji kekuatan tegangan dan kekuatan baki SFRC untuk menilai kekuatan bahan dan tingkah lakunya selepas dikenakan beban akan membantu jurutera memahami kekuatan dan kelemahan bahan tersebut dengan menggunakan Piawaian Singapura-SS674. Kandungan sebanyak gentian 40 kg/m³ menunjukkan baki kekuatan tertinggi sebanyak 4.6 MPa dengan tingkah laku pengerasan regangan yang diperhatikan berbanding dengan kandungan gentian 20 kg/m³ dan 30 kg/m³ iaitu 3.0 MPa dan 2.1 MPa masing-masing. Kesimpulannya, kajian ini menawarkan pencirian holistik SFRC, merangkumi sifat mekanikal dengan kekuatan baki yang lebih tinggi. Hasilnya memberikan pemahaman saintifik dan pandangan praktikal tentang SFRC untuk jurutera dan pengamal yang berusaha untuk mengoptimalkan penggunaan SFRC bagi meningkatkan ketahanan struktur dan mengurangkan kos penyelenggaraan.

Kata kunci: Lengkung lenturan; gentian keluli; retak pertama; kekuatan baki; tahan lasak dan mampan

ABSTRACT

Concrete is a brittle material with low tensile strain and strength capacities. Steel fiber reinforced concrete (SFRC) has gained prominence as an innovative construction material, offering improved tensile and flexural properties over conventional concrete. Singapore Standards, "SS 674: Fiber concrete- Design of fiber concrete structures" just launched recently to offers a comprehensive structure for enhancing comprehension of Fiber-Reinforced Concrete. This study presents a comprehensive characterization of SFRC, focusing on both its mechanical properties particularly residual strength. Following this, a series of experimental works are conducted to assess the residual tensile strength under flexural loading behavior of SFRC specimens complying to SS674. Examining the tensile strength and residual strength of SFRC to assess its material strength and behaviour after being subjected to a load will help engineers comprehend the material's strengths and weaknesses. At 40 kg/m³ fibers content shows the highest residual strength of 4.6 MPa with a strain hardening behaviour observed as compared to the 20 kg/m³ and 30 kg/m³ fibers content which is 3.0 MPa and

2.1 MPa. In conclusion, this study offers a holistic characterisation of SFRC, encompassing mechanical properties with higher residual strength. The outcomes provide scientific understanding and practical insights of SFRC for engineers and practitioners seeking to optimise the use of SFRC to enhance structural longevity and reduce maintenance costs.

Keywords: Flexural bending; steel fibers; first crack; residual strength; resilient and sustainable

PENGENALAN

Gentian keluli adalah gentian yang paling biasa digunakan dalam industri konkrit, dikenali sebagai Konkrit Bertetulang Gentian Keluli (SFRC). Dengan peningkatan kerumitan projek pembinaan bawah tanah, keupayaan konkrit bertetulang asas untuk diaplikasi adalah berkemungkinan tidak memadai (Dai et al. 2021). Keperluan untuk pelbagai jenis konkrit dalam industri pembinaan telah meningkat disebabkan oleh permintaan yang pelbagai dari projek yang kontemporari. SFRC adalah alternatif kepada konkrit bertetulang konvensional kerana ia meningkatkan kekuatan pada aspek konkrit yang lemah, seperti kekuatan tegangan dan kerapuhan, melalui penambahan gentian dalam bancuhan (Choi et al., 2019). Konkrit adalah bahan komposit yang terdiri daripada simen, air, agregat kasar, dan agregat halus. Ia mempunyai kekuatan mampatan yang tinggi tetapi kekuatan tegangan yang agak rendah (Syed Mohamed & Lim, 2024). Untuk menangani kekuatan tegangan konkrit yang rendah, pendekatan yang biasa digunakan adalah dengan memasukkan bar keluli bertetulang ke dalam konkrit. Batang bar yang digunakan ini bertanggungjawab untuk menanggung tekanan tegangan yang dihadapi oleh konkrit apabila ia dikenakan regangan (Yoo et al 2017).

Konkrit bertetulang gentian keluli (SFRC) adalah bahan komposit yang terdiri daripada matriks simen yang mengandungi pelbagai jenis gentian. Gentian ini, yang diperbuat daripada bahan seperti keluli, kaca, sintetik, atau gentian semula jadi, ditambah ke dalam campuran konkrit untuk meningkatkan sifat mekanikalnya (Yoo et al. 2017). Bergantung pada jenis dan dos gentian yang digunakan, FRC dengan dos 30-40 kg/m³ boleh mempamerkan ketahanan, rintangan keretakan, dan ketahanan yang lebih baik berbanding dengan konkrit bertetulang tradisional. Gentian berbentuk ulir yang pendek dan diskret dimasukkan ke dalam campuran konkrit, serupa dengan komponen lain, dan diedarkan secara merata ke seluruh struktur, mencipta gentian yang tak berterusan dan berorientasi secara rawak (Lim et al. 2018). Susunan gentian stokastik ini sangat berkesan dalam menguruskan retakan dalam konkrit, sekali gus meningkatkan kemuluran elemen yang diperkuat dengan gentian. SFRC telah digunakan secara meluas dalam pelbagai projek pembinaan terowong bawah tanah seperti kereta api, lebuhraya dan sistem pembetulan (Vijayan et al. 2022). Penggunaan SFRC adalah terhad

kepada projek yang hanya menumpukan kepada masalah kawalan retakan dan tidak digunakan secara meluas untuk tujuan reka bentuk struktur. Sektor pembinaan belum sepenuhnya memanfaatkan kelebihan SFRC, dari aspek memudahkan kerja pembinaan, pengurusan retakan yang lebih baik, dan bagi tujuan mengurangkan tenaga kerja (Choi et al. 2019; Vijayan et al. 2022). Salah satu faktor utama yang menyumbang kepada ini adalah ketiadaan garis panduan atau piawaian untuk merekabentuk SFRC. Pemahaman yang terhad tentang ciri-ciri bahan SFRC menghalang penggunaannya dalam projek pembinaan kerana ketidakpastian mengenai tingkah laku strukturnya selepas pembinaan (Singh et al. 2016).

Penyebaran gentian yang lemah boleh menjejaskan prestasi konkrit (Koo et al. 2023). Penyebaran gentian dalam konkrit adalah cabaran yang signifikan dalam bidang teknologi konkrit (Wang et al. 2022). Gentian keluli biasanya ditambah ke dalam campuran konkrit untuk meningkatkan sifat mekanikal bahan tersebut, seperti kekuatan tegangan, ketahanan, dan kemuluran (Wang et al. 2020). Pelbagai kaedah telah dibangunkan untuk memeriksa penyebaran gentian keluli dalam konkrit, termasuk pelarasan sifat reologi matriks, induksi aliran, dan *wall effect*. Selain itu, penggunaan '*silane*' sebagai bahan campuran telah terbukti memperbaiki penyebaran gentian keluli dalam mortar bertetulang gentian keluli (Tan et al. 2023). Penyebaran gentian keluli dalam konkrit telah dikaji secara meluas, dengan campuran yang direka secara saintifik menunjukkan pengurangan kos dos gentian keluli dan meningkatkan penyebaran gentian (Larsen et al. 2020). Orientasi gentian dalam konkrit boleh diperbaiki sehingga 80% melalui induksi aliran dan bilangan gentian dalam konkrit yang meningkatkan kekuatan lenturan, kekuatan tegangan, dan ketahanan matriks konkrit. Pencirian lanjut mengenai penyebaran gentian dalam aspek tiga dimensi diperlukan, dan faktor-faktor seperti agregat atau pengukuhan mesti dipertimbangkan dalam hasil simulasi teori mengenai orientasi gentian. Penggunaan gentian keluli secara menyangkut telah terbukti memaparkan tingkah laku sesaran beban pengerasan terikan dengan kemuluran yang dipertingkatkan dengan ketara dalam komposit simen bertetulang gentian konkrit (Vijayan et al. 2022; Singh et al. 2016).

Banyak penyelidikan yang meluas dijalankan pada abad ke-20 mengenai konkrit bertetulang konvensional, menjadikannya bahan yang sangat digunakan dan dikaji

secara menyeluruh dalam sektor pembinaan. Penggunaan gentian keluli memainkan peranan penting dalam memperkukuhkan kekuatan tegangan SFRC. Konkrit tradisional, apabila dikenakan tegangan, cenderung untuk memulakan dan menyebarkan retakan. Walau bagaimanapun, gentian keluli dalam SFRC bertindak sebagai rangkaian mikro-penguatan, secara strategik mengurangkan kemungkinan retakan ini dan mengagihkan tekanan tegangan dengan berkesan ke seluruh bahan. Mekanisme transformasi ini bukan sahaja menghalang penyebaran retakan yang tidak terkawal tetapi juga meningkatkan keupayaan konkrit untuk menahan tegangan dengan ketara. Selain itu, SFRC menawarkan kelebihan tambahan berpotensi mengurangkan atau malah menghapuskan keperluan untuk batang keluli bertetulang tradisional dalam struktur konkrit. Inovasi ini menangani cabaran seperti kesesakan rebar dan ruang terhad untuk penguatan tradisional yang biasanya dihadapi semasa fasa pembinaan. Sebagai tindak balas kepada cabaran-cabaran ini, konkrit bertetulang gentian, seperti SFRC, muncul sebagai penyelesaian untuk menyelaraskan proses pembinaan sambil mengekalkan integriti struktur. Piawaian yang ditetapkan oleh RILEM (*International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems, and Structures*) pada tahun 2003 telah memainkan peranan penting dalam memajukan pemahaman dan aplikasi SFRC (RILEM, 2003). Piawaian ini telah memudahkan kajian dan melibatkan analisis terperinci mengenai perkembangan dan penyebaran retakan, yang biasanya dinilai dengan mengira lebar keretakan (*Crack Mouth Opening Displacement-CMOD*) selepas kelakuan retakan pertama. CMOD adalah parameter kritikal yang memberikan maklumat tentang kelakuan konkrit pascaretakan, termasuk keupayaannya untuk mengekalkan keupayaan menanggung beban dan menahan retakan lanjut (Meng et al. 2018).

Piawaian Singapura SS 674 telah diterbitkan pada tahun 2021 dengan harapan besar daripada pihak berkepentingan dalam industri pembinaan (SS 674, 2021). Piawaian ini menyediakan klasifikasi tentang kekuatan baki yang diperoleh dari CMOD 0.5 mm, 1.5 mm, 2.5 mm dan 3.5 mm masing-masing, menggunakan bahan untuk reka bentuk struktur tanpa kod yang ditetapkan menimbulkan risiko yang ketara, oleh itu penting bagi jurutera untuk mengutamakan pemahaman mereka tentang bahan tersebut untuk mereka bentuk struktur dengan berkesan. Kajian ini bertujuan untuk memberikan analisis komprehensif mengenai sifat bahan SFRC dan kekuatan bakinya di bawah beban lenturan, seperti yang ditetapkan oleh piawaian SS 674 (SS 674, 2021).

METODOLOGI

REKA BENTUK KAJIAN

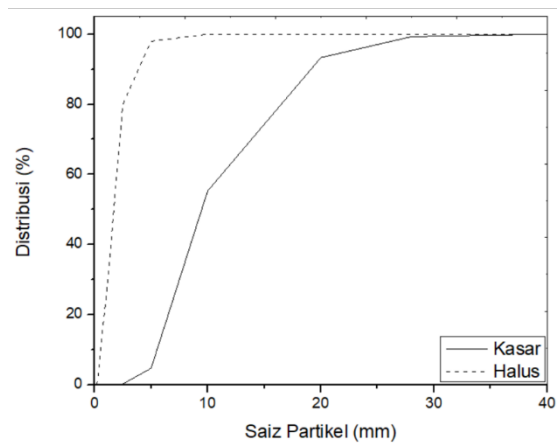
Simen Portland Biasa (OPC, CEM I 42.5N), agregat halus dan kasar, gentian keluli, campuran kimia sebagai bahan tambahan digunakan sebagai bahan asas membancuh konkrit. Dua jenis campuran kimia yang digunakan adalah *superplasticizer* berasaskan polikarboksilat dan perencat. Keputusan ciri-ciri simen OPC dirumuskan dalam Jadual 1, distribusi saiz partikel agregat halus dan kasar ditunjukkan dalam Rajah 1. Jenis gentian keluli yang dipilih adalah gentian keluli dengan panjang (L) 60 mm, diameter (D) 0.75 mm dengan nisbah aspek (L/D) 80 yang disediakan oleh SCAMCEM telah digunakan dalam campuran ini. Reka bentuk campuran konkrit dan ciri-ciri gentian keluli ditunjukkan dalam Jadual 2.

JADUAL 1. Pencirian Simen Portland Biasa (OPC)

Ciri-ciri	OPC
Graviti tentu	3.15
Luas permukaan tentu (m ² /kg)	365
SiO ₂ (%)	21.0
Al ₂ O ₃ (%)	5.3
Fe ₂ O ₃ (%)	3.4
CaO (%)	65.0
MgO (%)	1.5
SO ₃ (%)	0.3
Na ₂ O (%)	0.5
K ₂ O (%)	0.3

JADUAL 2. Reka bentuk campuran SFRC

Bahan	Isipadu
Simen OPC	380 kg/m ³
Air	165 kg/m ³
Agregat kasar	965 kg/m ³
Agregat halus	820 kg/m ³
<i>Superplasticizer</i>	1365 ml/m ³
Bahan Perencat (<i>Retarder</i>)	1705 ml/m ³
Gentian	20 kg/m ³ 30 kg/m ³ 40 kg/m ³



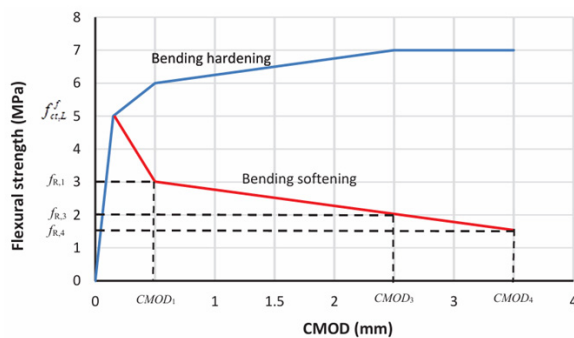
RAJAH 1. Distribusi saiz partikel agregat halus dan kasar

UJIAN EKSPERIMEN

Bagi setiap sampel, tiga rasuk berukuran 150x150x550 mm dihasilkan. Selepas konkrit segar dituang kedalam acuan rasuk, sampel dipadatkan menggunakan rod getar. Kekuatan lenturan rasuk diuji pada umur 28 hari, dan peranti LVDT digunakan untuk mengukur lebar keretakan. Sifat khusus konkrit gentian yang diperlukan untuk reka bentuk konkrit bertetulang gentian termasuk ciri kekuatan baki lenturan (tegangan), $f_{R^2,1}$, $f_{R^2,3}$ dan $f_{R^2,4}$, pada lebar keretakan masing-masing 0.5, 2.5 dan 3.5 mm (lihat Rajah 2), yang ditentukan dari ujian rasuk mengikut BS EN 14651 pada umur 28 hari. Ciri kekuatan baki boleh diperolehi daripada persamaan berikut,

$$f_{R,ik} = f_{R,im} - kn\sigma \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

di mana $f_{R^2,ik}$ ialah nilai ciri, $f_{R^2,im}$ ialah nilai min, σ ialah sisihan piawai, dan kn ialah faktor statistik yang bergantung pada bilangan spesimen, n dalam siri ujian, seperti yang dinyatakan dalam SS 674:2021 (SS 674. 2021).



RAJAH 2. Hubungan antara kekuatan lenturan dan CMOD daripada piawai BS EN 14651.

KEPUTUSAN EKSPERIMEN DAN ANALISIS

Kajian ini meneliti prestasi SFRC di bawah keadaan lenturan dengan menggunakan persamaan (1). Jadual 3 menunjukkan ciri kekuatan baki, $f_{R^2,1}$, $f_{R^2,3}$, dan $f_{R^2,4}$, pada lebar keretakan masing-masing 0.5, 2.5, dan 3.5 mm. Keputusan menunjukkan bahawa peningkatan dos dari 20 kg/m³ kepada 30 kg/m³ menyebabkan penurunan dalam kekuatan tegangan lenturan baki. Ketiadaan rangkaian gentian yang tersebar dengan baik (dalam Rajah 7) dalam matriks konkrit pada rasuk dengan 30 kg/m³ mengurangkan *bridging effect* yang disediakan oleh gentian keluli, dimana ianya penting untuk mengekalkan kekuatan baki selepas retakan awal. Penyebaran gentian yang lemah disebabkan oleh penggumpalan gentian, menyebabkan sebahagian kawasan dengan pengukuhan gentian yang kurang dalam konkrit (Choi et al. 2019). Secara teori, kekuatan tegangan lenturan dalam campuran konkrit boleh diperbaiki dengan menambah lebih banyak gentian keluli. Walau bagaimanapun, terdapat dos yang ideal untuk mencapai hasil yang diinginkan kerana hubungan antara jumlah gentian keluli dan ciri-ciri konkrit adalah tidak lurus. Variasi dalam kandungan isipadu gentian boleh menyebabkan masalah keboleherjaan, penyebaran gentian yang tidak sekata dalam campuran konkrit, dan pembentukan bebola gentian atau penggumpalan (Choi et al. 2019; Ahmad et al. 2019). Kehadiran pelembutan terikan dalam semua sampel, dengan dos 20 kg/m³ dan 30 kg/m³, menunjukkan pengagihan gentian keluli yang tidak sekata dalam sampel. Penurunan dalam kekuatan sisa seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3 dan Rajah 4, selepas retakan pertama, semua rasuk mengalami tingkah laku pelembutan dalam lenturan dimana terdapat penurunan dalam kapasiti menanggung beban disebabkan oleh penyebaran dan pelebaran retakan secara beransur-ansur. Tingkah laku pelembutan ini dikaitkan dengan penarikan keluar gentian keluli dari matriks secara beransur-ansur dan perkembangan retakan yang lebih besar (Ahmad et al. 2019). Ini mungkin disebabkan oleh jumlah gentian keluli yang tidak mencukupi semasa proses penuangan konkrit segar, di mana keboleherjaan SFRC yang kurang baik berpotensi menyebabkan aliran SFRC yang tidak mencukupi.

Dos 40 kg/m³ menunjukkan kekuatan baki yang lebih baik berbanding dengan dos 20 kg/m³ dan 30 kg/m³. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5, rasuk dengan gentian 40 kg/m³ menunjukkan pengerasan terikan selepas retakan pertama (Yoo et al. 2017; Tamanna et al. 2023). Ini bermaksud, walaupun selepas retakan berlaku, bahan tersebut terus mengalami ubah bentuk dan menanggung beban tambahan, menyebabkan peningkatan dalam regangan tegangan. Selain itu, dua sampel menunjukkan

tindak balas pengerasan terikan apabila dikenakan dos 40 kg/m³. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 8, kehadiran gentian keluli membantu mengawal lebar keretakan dan mengagihkan tegasan tegangan, yang menyumbang kepada peningkatan kekuatan baki. SFRC menunjukkan kelakuan pasca retakan yang lebih baik berbanding konkrit biasa, yang dikaitkan dengan *Bridging effect* dan kesan pengukuhan gentian keluli.

Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6 dan Rajah 7, pengagihan gentian yang tidak sekata menyebabkan sebahagian kawasan mengalami kekurangan pengukuhan yang mencukupi. Keadaan ini secara langsung menjejaskan keupayaan struktur untuk menahan tegasan, terutamanya di bahagian yang tidak menerima taburan gentian yang mencukupi, sekaligus boleh menyumbang kepada

pembentukan rekahan awal dan mengurangkan kekuatan lenturan. Spesimen rasuk dengan kandungan gentian yang lebih besar (ditunjukkan dalam Rajah 8) menunjukkan keupayaan *Bridging effect* yang lebih baik dan mencapai kekuatan baki yang lebih tinggi. Peningkatan dalam ketahanan retakan dan integriti bahan menghasilkan prestasi yang lebih baik berbanding dengan penggunaan gentian yang lebih rendah. Kesan pengerasan terikan menggambarkan pengagihan gentian yang seragam dalam konkrit dan penglibatan penuh mereka semasa keretakan, yang membawa kepada peningkatan kekuatan tegangan lenturan baki spesimen. Adalah diingini bagi semua bahan SFRC untuk mempunyai tindak balas pengerasan terikan, kerana ini dianggap sebagai jenis tindak balas yang paling baik dan diingini.

JADUAL 3. Komposisi Campuran untuk Konkrit yang Ditetapkan

Jumlah gentian keluli, kg/m ³	Sampel	f _{R,1} (MPa)	f _{R,3} (MPa)	f _{R,4} (MPa)
20	B1	2.5	2.7	2.8
20	B2	2.3	2.1	2.1
20	B3	2.2	3.0	3.0
30	B1	1.6	1.6	1.6
30	B2	1.7	1.8	1.8
30	B3	2.0	2.1	2.1
40	B1	2.5	4.5	4.6
40	B2	2.5	2.6	2.8
40	B3	3.0	2.5	2.5

Mekanisme kegagalan utama yang diperhatikan dalam kebanyakan sampel boleh dikaitkan dengan fenomena penarikan keluar gentian. Fenomena ini berlaku apabila ikatan antara gentian dan permukaan matriks konkrit tidak mencukupi untuk menahan daya penarikan keluar yang dikenakan, menyebabkan penglibatan gentian yang tidak berkesan. Graf beban-lenturan bagi semua bahan yang diuji secara konsisten menunjukkan jumlah kemuluran yang ketara selepas pembentukan retakan awal di zon tegangan bahan (Abbas et al. 2023; Gesoglu et al. 2016).

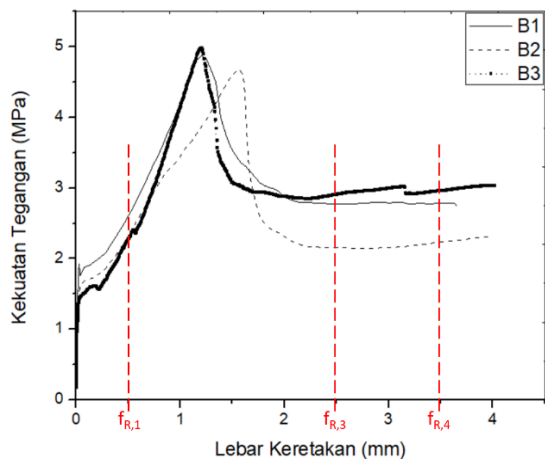
Gentian memainkan peranan yang signifikan dalam meningkatkan prestasi mekanikal konkrit melalui mekanisme *bridging effect*. Dalam konkrit bertetulang gentian keluli, ia bertindak sebagai elemen pengukuhan yang tersebar secara rawak di dalam matriks konkrit, sekali gus berfungsi untuk menghalang pembentukan, perkembangan dan penyebaran retakan mikro serta makro. Keputusan kajian ini menunjukkan bahawa kehadiran gentian keluli memberikan sumbangan ketara terhadap peningkatan tingkah laku pasca-retakan konkrit berbanding konkrit tanpa gentian. Retakan awal dalam konkrit lazimnya berlaku apabila tegasan tegangan yang dikenakan melebihi kekuatan tegangan intrinsik matriks simen, seterusnya menyebabkan permulaan retakan mikro. Dalam konkrit biasa, retakan ini akan berkembang dengan cepat

dan membawa kepada kegagalan rapuh. Walau bagaimanapun, dalam sistem SFRC gentian keluli yang tertanam di dalam matriks konkrit berupaya merentasi retakan yang terbentuk dan memindahkan tegasan merentasi permukaan retakan tersebut. Mekanisme ini secara langsung mengurangkan kadar pembesaran retakan dan meningkatkan kapasiti penyerapan tenaga konkrit.

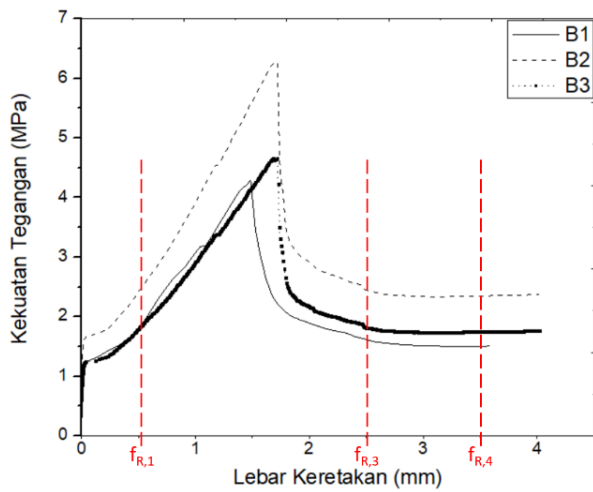
Hasil ujian mekanikal menunjukkan bahawa sampel konkrit yang mengandungi gentian keluli memperlihatkan peningkatan ketara dalam kekuatan lenturan dan ketahanan (*toughness*) berbanding sampel kawalan. Peningkatan ini dikaitkan dengan keupayaan gentian keluli untuk menahan beban selepas berlakunya retakan awal, sekali gus mengekalkan integriti struktur konkrit. Pemerhatian visual terhadap corak kegagalan turut menunjukkan perubahan mod kegagalan daripada kegagalan rapuh kepada kegagalan yang lebih daktail, dicirikan oleh pembentukan retakan yang lebih banyak tetapi lebih kecil dan terkawal.

Selain itu, interaksi antara gentian keluli dan matriks simen memainkan peranan penting dalam menentukan keberkesanan *bridging effect*. Ikatan mekanikal dan geseran antara permukaan gentian dan matriks konkrit menyumbang kepada rintangan terhadap penarikan keluar gentian (*fiber pull-out*), yang seterusnya meningkatkan kapasiti beban pasca-retakan. Keputusan ujian juga

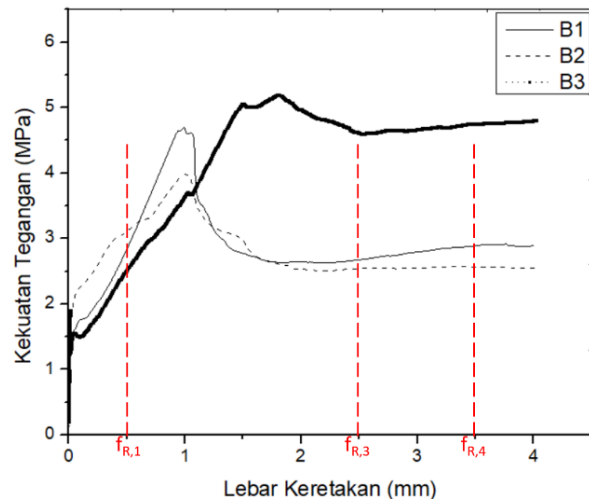
menunjukkan bahawa peningkatan kandungan gentian membawa kepada peningkatan prestasi pasca-retakan, walaupun pada tahap tertentu kesan marginal menjadi semakin kecil disebabkan isu keboleherjaan dan pengagihan gentian. Rajah 6 hingga Rajah 8 menunjukkan corak dan lebar retakan bagi spesimen rasuk SFRC dengan variasi kandungan gentian masing-masing. Pemerhatian visual ini direkodkan selepas pembentukan retakan, dan didapati bahawa semua spesimen rasuk masih kekal terikat oleh gentian keluli pada kedua-dua bahagian rasuk walaupun selepas berlakunya retakan.



RAJAH 3. Keputusan ujian lenturan bagi rasuk SFRC 20 kg/m³



RAJAH 4. Keputusan ujian lenturan bagi rasuk SFRC 30 kg/m³



RAJAH 5. Keputusan ujian lenturan bagi rasuk SFRC 40 kg/m³



RAJAH 6. Lebar keretakan pada sampel rasuk yang menggunakan 20kg/m³ gentian keluli



RAJAH 7. Lebar keretakan pada sampel rasuk yang menggunakan 30kg/m³ gentian keluli



RAJAH 8. Lebar keretakan pada sampel rasuk yang menggunakan 40kg/m³ gentian keluli

Pemerhatian visual terhadap permukaan retakan mendedahkan peranan signifikan gentian keluli sebagai mekanisme crack *bridging* selepas pembentukan retakan awal, yang secara langsung mempengaruhi tingkah laku pasca-retakan dan prestasi lenturan spesimen. Bagi spesimen yang mengandungi 20 kg/m³ gentian keluli (Rajah 6), retakan utama yang terbentuk adalah lebih lebar dan menunjukkan tahap pemisahan matriks yang ketara. Walaupun kehadiran gentian masih dapat diperhatikan merentasi zon retakan, bilangan gentian yang terlibat dalam mekanisme *bridging* adalah terhad. Keadaan ini menyebabkan keupayaan pemindahan tegasan selepas keretakan menjadi kurang berkesan, sekali gus menyumbang kepada pembesaran retakan yang lebih cepat. Fenomena penarikan keluar gentian (*fiber pull-out*) jelas berlaku menunjukkan bahawa ikatan antara gentian dan matriks konkrit hanya mampu memberikan rintangan sederhana terhadap pembukaan retakan.

Sebaliknya, spesimen dengan kandungan gentian 30 kg/m³ (Rajah 7) memperlihatkan peningkatan ketara dalam mekanisme *bridging*. Lebar retakan yang diperhatikan adalah lebih kecil dan lebih terkawal berbanding spesimen 20 kg/m³. Bilangan gentian yang melintasi zon retakan adalah lebih banyak, membolehkan pemindahan beban yang lebih berkesan selepas keretakan awal. Gentian-gentian ini bertindak sebagai elemen pengikat yang mengekang pembukaan retakan dan melambatkan perambatan retakan ke zon sekeliling. Keadaan ini mencerminkan peningkatan keupayaan serapan tenaga serta kemuluran yang lebih baik dalam tingkah laku pasca-retakan spesimen. Spesimen dengan kandungan gentian tertinggi, iaitu 40 kg/m³ (Rajah 8), menunjukkan prestasi crack *bridging* yang paling berkesan. Retakan yang terbentuk adalah lebih sempit dan jelas terkawal, dengan penglibatan gentian yang padat dan berterusan merentasi keseluruhan zon retakan. Kehadiran gentian dalam jumlah yang tinggi membolehkan pengalihan tegasan yang lebih seragam, seterusnya mengekalkan integriti struktur walaupun selepas pembentukan retakan utama. Mekanisme

kegagalan didominasi oleh penarikan keluar gentian secara berperingkat, yang menunjukkan penglibatan penuh gentian dalam menahan beban dan menyumbang kepada tingkah laku pengerasan terikan (*strain-hardening behaviour*).

Secara keseluruhan, peningkatan kandungan gentian daripada 20 kg/m³ kepada 40 kg/m³ jelas meningkatkan keberkesanan mekanisme *bridging* selepas retakan, mengurangkan lebar retakan, serta memperbaiki prestasi pasca-retakan SFRC. Pemerhatian visual ini mengesahkan bahawa kandungan gentian yang lebih tinggi memainkan peranan penting dalam meningkatkan kemuluran, keupayaan menanggung beban baki, dan kestabilan struktur konkrit selepas keretakan, menjadikannya sesuai untuk aplikasi struktur yang memerlukan prestasi pasca-retakan yang unggul.

KESIMPULAN

Kekuatan baki lenturan bagi sampel rasuk konkrit bertetulang gentian keluli (SFRC) menunjukkan peningkatan yang jelas dengan pertambahan dos gentian. Dos 40 kg/m³ memperlihatkan tindak balas lenturan pasca-retakan yang paling ketara berbanding dos 20 kg/m³ dan 30 kg/m³, sekali gus menunjukkan keberkesanan mekanisme *bridging* effect dalam meningkatkan prestasi struktur selepas pembentukan retakan awal. Gentian keluli berfungsi merentasi retakan dan memindahkan tegasan antara bahagian matriks konkrit yang terpisah, seterusnya mengekalkan kapasiti gelas beban.

Mod kegagalan utama yang diperhatikan dalam kebanyakan spesimen ialah penarikan keluar gentian (*fiber pull-out*), berbanding kegagalan rapuh matriks konkrit. Mekanisme ini menunjukkan bahawa gentian keluli terus menyumbang kepada pemindahan beban sehingga peringkat kegagalan, sekali gus meningkatkan keliatan dan kapasiti penyerapan tenaga konkrit. Beberapa spesimen turut mempamerkan kelakuan pengerasan terikan (*strain hardening*) tanpa mengalami kegagalan struktur sepenuhnya, kerana gentian keluli kekal tertanam dan berfungsi secara berkesan walaupun selepas ujian dihentikan. Kajian ini mengesahkan bahawa kekuatan ikatan antara gentian keluli dan matriks simen merupakan faktor kritikal dalam menentukan prestasi SFRC. Selagi gentian kekal tertanam dengan kukuh di dalam matriks, ia berupaya menahan tegasan tegangan yang signifikan dan mengawal pembesaran retakan secara progresif. Walau bagaimanapun, dos gentian keluli yang optimum masih belum dapat ditentukan secara muktamad berikutan keputusan yang tidak sepenuhnya konklusif serta isu kualiti beberapa sampel ujian, termasuk pengalihan gentian yang tidak sekata.

Secara keseluruhannya, kajian ini menunjukkan bahawa penggunaan gentian keluli dalam konkrit berupaya meningkatkan kekuatan lenturan, kekuatan baki, dan kawalan retakan dengan ketara. Keupayaan SFRC untuk mengekalkan keteguhan struktur dan menyerap tenaga pada peringkat pasca-retakan menjadikannya bahan yang berpotensi tinggi untuk aplikasi struktur yang memerlukan tahap ketahanan, keselamatan, dan prestasi jangka panjang yang lebih baik.

PENGHARGAAN

Para penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas sokongan kewangan dari Skim Geran GGPM-2023-078

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERTENTANGAN

Tiada.

RUJUKAN

- Abbas, Y. M. & Khan, M. I. 2023. Robust machine learning framework for modeling the compressive strength of SFRC: Database compilation, predictive analysis, and empirical verification. *Materials* 16: 7178.
- Ahmad, R., Hamid, R. & Osman, S. A. 2019. Effect of fiber treatment on the physical and mechanical properties of kenaf fiber reinforced blended cementitious composites. *KSCE Journal of Civil Engineering* 23: 4022–4035.
- Choi, S. W., Choi, J. & Lee, S. C. 2019. Probabilistic analysis for strain-hardening behavior of high-performance fiber-reinforced concrete. *Materials* 12(15): 2399.
- Dai, J. G., Huang, B. T. & Shah, S. P. 2021. Recent advances in strain-hardening UHPC with synthetic fibers. *Journal of Composites Science* 5(10): 283.
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Muhyaddin, G. F. & Asaad, D. S. 2016. Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: Effect of fiber type and concentration. *Composites Part B: Engineering* 103: 74–83.
- Koo, D. H., Kim, J. S., Kim, S. H. & Suh, S. W. 2023. Evaluation of flexural toughness of concrete reinforced with high-performance steel fiber. *Materials* 16: 6623.
- Larsen, I. L. & Thorstensen, R. T. 2020. The influence of steel fibers on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials* 256: 119459.
- Lim, J. L. G., Raman, S. N., Lai, F. C., Zain, M. F. M. & Hamid, R. 2018. Synthesis of nano cementitious additives from agricultural wastes for the production of sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production* 171: 1150–1160.
- Meng, W. & Khayat, K. H. 2018. Effect of hybrid fibers on fresh properties, mechanical properties, and autogenous shrinkage of cost-effective UHPC. *Journal of Materials in Civil Engineering* 30(4): 04018030.
- Pathan, M. G., Rajan, L. & Wankhade, A. M. et al. 2022. Experimental analysis for performance of concrete with addition of steel fibers, SBR and polypropylene fibers. *Jurnal Kejuruteraan* 34(3): 429–445.
- RILEM TC 162. 2003. *Test and Design Methods for Steel Fiber Reinforced Concrete*. Springer.
- Singh, H. 2016. *Steel Fiber Reinforced Concrete: Behavior, Modelling and Design*. Springer.
- Singapore Standard Enterprise. 2021. *SS 674: Fiber Concrete – Design of Fiber Concrete Structures*.
- Syed Mohamed, S. K. & Lim, J. L. G. 2024. Effect of waste naphthalene sludge on workability and strength of mortar and concrete. *Jurnal Kejuruteraan* 36(6): 2345–2353.
- Tamanna, K., Raman, S. N., Jamil, M. & Hamid, R. 2023. Coal bottom ash as supplementary material for sustainable construction: A comprehensive review. *Construction and Building Materials* 389: 131679.
- Tan, L., Yang, J., Li, C. et al. 2023. Effect of polyoxymethylene fiber on the mechanical properties and abrasion resistance of ultra-high-performance concrete. *Materials* 16: 7014.
- Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Parthiban, D. et al. 2022. Comprehensive analysis of the use of SFRC in structures and its current state of development in the construction industry. *Materials* 15(19): 7012.
- Wang, S., Lim, J. L. G. & Tan, K. H. 2020. Strength performance of lightweight cementitious composite incorporating carbon nanofibers. *Cement and Concrete Composites* 109: 103561.
- Wang, S., Lim, J. L. G. & Tan, K. H. 2022. Strength, shrinkage and creep of lightweight cementitious composite incorporating with carbon nanofibers. *Materials and Structures* 55: 196.
- Yoo, D. Y., Kim, S. W. & Park, J. J. 2017. Comparative flexural behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers. *Construction and Building Materials* 132: 219–229.