

Investigasi pendahuluan terhadap kinerja lentur dan perkembangan retak pada balok HS-SCC dan HVFA-SCC

Vinda Nurul Hidayatul Aiman¹, Mochamad Teguh^{1,*}

¹Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Sleman, Indonesia

Article Info

Available online

Keywords:

High-strength SCC
HVFA-SCC
Flexural performance
Crack development
Reinforced concrete beam
preliminary investigation

Corresponding Author:

Mochamad Teguh
m.teguh@uii.ac.id

Abstract

This preliminary investigation was conducted to examine the current state of knowledge regarding the flexural performance and crack development of High-Strength Self-Compacting Concrete (HS-SCC) beams and High-Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete (HVFA-SCC) beams. The study was based on a structured review of national and international publications related to SCC, HVFA-SCC, fly ash utilization, high-strength concrete, and the flexural behavior of reinforced concrete beams. The reviewed studies were analyzed to identify key parameters affecting structural performance, including fresh concrete properties, compressive strength, tensile strength, modulus of elasticity, first cracking load, load-deflection response, stiffness, ductility, crack patterns, and ultimate flexural capacity. The findings indicate that conventional HS-SCC generally exhibits superior early-age compressive strength development and modulus of elasticity due to the dominant use of Portland cement. In contrast, HVFA-SCC demonstrates improved workability and sustainability benefits resulting from the incorporation of high-volume fly ash. However, high fly ash replacement levels may influence early-age strength development, cracking behavior, and post-cracking stiffness. The review also reveals that previous studies have predominantly focused on material properties, while direct comparisons of flexural performance and crack development between HS-SCC and HVFA-SCC beams remain limited. Therefore, further experimental investigations are required to evaluate first cracking load, crack propagation, stiffness degradation, ductility, and ultimate flexural capacity under comparable structural conditions.

Copyright © 2026 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Beton merupakan material konstruksi yang paling banyak digunakan pada pekerjaan struktur karena memiliki kuat tekan yang baik, bahan penyusun yang mudah diperoleh, serta dapat dibentuk sesuai kebutuhan desain. Pada beton konvensional, pemadatan masih diperlukan agar campuran dapat mengisi acuan dan mengurangi rongga udara. Namun, pada elemen struktur dengan tulangan rapat, proses pemadatan sering tidak dapat dilakukan secara optimal, sehingga dapat

menimbulkan segregasi, *honeycomb*, rongga udara, dan penurunan kualitas hasil pengecoran.

Sebagai solusi terhadap permasalahan tersebut, dikembangkan *Self Compacting Concrete (SCC)*, yaitu beton yang memiliki kemampuan mengalir, mengisi acuan, melewati celah-celah tulangan, serta memadat dengan sendirinya tanpa menggunakan alat-getar. *SCC* sangat sesuai digunakan pada struktur dengan susunan tulangan rapat maupun acuan yang memiliki bentuk rumit

karena mampu terkonsolidasi akibat beratnya sendiri. Menurut Zulkarnain dkk. (2026), *SCC* merupakan salah satu inovasi penting dalam teknologi beton karena dapat mengalir dan memadat secara mandiri tanpa bantuan alat pemadat, sehingga efektif diterapkan pada elemen struktur dengan kepadatan tulangan tinggi atau bentuk cetakan yang kompleks.

Seiring perkembangan teknologi beton, *SCC* juga dikembangkan menjadi *High Strength Self Compacting Concrete (HS-SCC)*. Jenis beton ini tidak hanya harus memiliki kemampuan mengalir dan memadat sendiri, tetapi juga dituntut mempunyai kuat tekan serta modulus elastisitas yang tinggi. Wibowo dkk. (2022) menunjukkan bahwa *SCC* mutu tinggi dengan penggunaan variasi *steel slag* dan metakaolin mampu mencapai kuat tekan maksimum sebesar 62,17 MPa dan modulus elastisitas sebesar 31.179,2 MPa. Hal tersebut menunjukkan bahwa beton *SCC* dapat diklasifikasikan sebagai beton mutu tinggi apabila komposisi campuran dan penggunaan bahan-tambah dirancang serta dikontrol dengan tepat.

Meskipun *SCC* memiliki berbagai keunggulan dari segi teknis, *SCC* konvensional umumnya memerlukan kadar pasta dan semen yang relatif tinggi untuk memperoleh kemampuan mengalir, kemampuan melewati celah tulangan, serta stabilitas campuran yang baik. Tingginya kebutuhan semen ini menjadi salah satu permasalahan lingkungan karena proses produksi semen Portland berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida. Rohman dkk. (2024) menyatakan bahwa setiap produksi 1 kg semen dapat menghasilkan sekitar 0,9 kg CO₂. Oleh karena itu, penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen menjadi salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca.

Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batu bara yang memiliki sifat pozzolanik dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengganti sebagian semen. Secara fisik, *fly ash* memiliki partikel halus dan relatif bulat, sehingga dapat berperan sebagai *filler* sekaligus membantu

melumasi pergerakan antar partikel dalam campuran beton. Karakteristik ini dapat meningkatkan kemampuan alir *SCC* tanpa harus menambah kadar air secara berlebihan. Secara kimiawi, *fly ash* mengandung silika dan alumina yang mampu bereaksi dengan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen untuk membentuk produk hidrasi tambahan, sehingga *mikrostruktur* beton menjadi lebih padat (Budi, Santosa, dkk., 2021). Zulkarnain dkk. (2026) menyatakan bahwa penggunaan *fly ash* dalam *SCC* dapat mengurangi kebutuhan semen dan *high range water reducing admixture* karena *fly ash* mampu menurunkan kebutuhan air serta meningkatkan kepadatan *mikrostruktur* beton.

Penggunaan *fly ash* juga berkaitan dengan konsep *green material* dan sejalan dengan konsep *sustainable construction materials* dan *circular economy* dalam industri konstruksi. *Fly ash* dapat digunakan sebagai material ramah lingkungan karena mampu mengurangi penggunaan semen Portland, memanfaatkan limbah industri, serta menurunkan emisi karbon. Pada penelitian Tiorivaldi dan Abrianoro (2024), pemanfaatan *fly ash* pada *SCC* dilaporkan mampu menurunkan emisi karbon seiring meningkatnya kadar *fly ash*, dengan reduksi emisi mencapai 68% pada kadar *fly ash* 65%, sedangkan efisiensi karbon tertinggi diperoleh pada kadar *fly ash* 50% .

Penggunaan *fly ash* dalam jumlah tinggi, yaitu sekitar 50% atau lebih dari total bahan pengikat, dikenal sebagai *High Volume Fly Ash (HVFA)*. Apabila konsep *HVFA* digabungkan dengan *SCC*, maka diperoleh *High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete (HVFA-SCC)*. Material ini dinilai potensial karena menggabungkan kemudahan pengecoran dari *SCC* dan pengurangan konsumsi semen dari *HVFA*. Rohman dkk. (2024) menjelaskan bahwa penggabungan *HVFA* dan *SCC* merupakan upaya untuk menghasilkan beton berkelanjutan di masa depan.

Pada elemen struktur bangunan, balok beton bertulang berperan sebagai komponen utama,

yang menerima dan menyalurkan beban lentur. Perilaku lentur balok tidak hanya dipengaruhi oleh kuat tekan beton, tetapi juga oleh beberapa parameter lain, seperti kuat tarik, modulus elastisitas, beban retak awal, lendutan, kekakuan, daktilitas, pola retak, serta kapasitas lentur *ultimit*. Rohman dkk. (2024) menunjukkan bahwa balok *HVFA-SCC* memiliki pola retak yang cenderung serupa dengan balok beton normal, yaitu didominasi oleh keruntuhan lentur, namun memiliki nilai daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan beton normal. Sementara itu, Dragaš dkk. (2023) menyatakan bahwa balok *HVFA* dengan kadar *fly ash* tinggi memiliki kapasitas lentur *ultimit* yang relatif mendekati balok *Ordinary Portland Cement (OPC)*, meskipun perkembangan retak yang terjadi lebih besar. Beberapa penelitian lainnya menunjukkan bahwa kapasitas lentur *ultimit* balok *HVFA-SCC* dapat mendekati balok *OPC*, meskipun sangat dipengaruhi oleh kadar *fly ash*, umur beton, dan desain campuran, sehingga masih perlu diteliti lebih lanjut.

Berdasarkan permasalahan sebelumnya, studi pendahuluan ini bertujuan untuk menetapkan dasar ilmiah dan mengidentifikasi kesenjangan penelitian untuk perbandingan eksperimental antara balok *HS-SCC* dan balok *HVFA-SCC* berkekuatan tinggi, dengan fokus pada beban retak pertama, perambatan retak (*crack propagation*), respons beban-lendutan, degradasi kekakuan, daktilitas, dan kapasitas lentur maksimum.

Metode Investigasi

Kriteria literatur

Literatur yang digunakan dalam kajian ini ditetapkan berdasarkan kriteria inklusi yang telah ditentukan. Kriteria tersebut meliputi artikel yang dipublikasikan dalam rentang tahun 2018–2026, ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris, serta memiliki pembahasan yang berkaitan dengan *SCC*, *HS-SCC*, *HVFA-SCC*, *fly ash*, dan perilaku lentur balok beton bertulang. Artikel yang dimasukkan dalam kajian ini memuat parameter yang sesuai dengan fokus penelitian, seperti kuat tekan, kuat tarik,

modulus elastisitas, perambatan retak, lendutan, kekakuan, daktilitas, pola retak, atau kapasitas lentur balok. Artikel yang tidak memenuhi kriteria inklusi tidak digunakan dalam kajian ini. Hal ini dilakukan agar literatur yang dianalisis benar-benar sesuai dengan fokus penelitian.

Jenis penelitian

Penelitian ini merupakan studi pendahuluan (*preliminary investigation*) berbasis kajian literatur terstruktur. Dalam pelaksanaannya, beberapa tahapan dalam metode *Systematic Literature Review (SLR)*, khususnya proses identifikasi, penyaringan, dan sintesis literatur, diadopsi untuk mendukung penelusuran referensi secara sistematis. Metode ini dipilih karena kajiannya dilakukan melalui proses pengumpulan, penyaringan, penilaian, dan sintesis terhadap hasil-hasil penelitian terdahulu secara sistematis. Penelitian ini tidak dilaksanakan melalui pengujian laboratorium secara langsung, melainkan dilakukan melalui analisis terhadap artikel-artikel ilmiah yang relevan dengan topik *HS-SCC* konvensional, *HS-HVFA-SCC*, *fly ash*, serta perilaku lentur balok beton bertulang.

Kajian ini disusun dengan menggunakan pendekatan *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses (PRISMA)*, seperti diuraikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Alur PRISMA

Tahap PRISMA	Penjelasan	Jumlah Artikel
Identifikasi	Artikel dikumpulkan dari jurnal Indonesia, jurnal internasional, DOI, dan open access.	47
Penyaringan	Artikel disaring berdasarkan tahun 2018–2026, kesesuaian judul, abstrak, dan ketersediaan <i>full text</i> .	40
Kelayakan	Artikel dibaca lebih lanjut untuk memastikan kesesuaian dengan topik <i>SCC</i> , <i>HVFA-SCC</i> , <i>fly ash</i> , dan perilaku lentur balok	31
Inklusi	Artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi digunakan dalam sintesis akhir	25

Kerangka *PRISMA* digunakan agar proses pemilihan literatur dapat dilakukan secara jelas, transparan, dan dapat ditelusuri dengan baik. Kajian ini dimaksudkan untuk mengidentifikasi *research gap* terkait dengan topik penelitian. Tahapan dalam alur *PRISMA* disajikan pada Tabel 1.

Dengan pendekatan tersebut, literatur yang digunakan dalam kajian ini diharapkan memiliki relevansi yang kuat, kualitas yang memadai, dan sesuai dengan fokus penelitian.

Hasil Investigasi

Karakteristik artikel yang dikaji

Berdasarkan hasil seleksi literatur yang relevan dengan topik penelitian, diperoleh 25 artikel, yang selanjutnya diklasifikasikan ke dalam beberapa kluster utama, yaitu *HS-SCC* konvensional, *HVFA-SCC*, beton dengan penggunaan *fly ash*, perilaku lentur balok, serta sifat mekanik pendukung. Rincian karakteristik artikel yang dikaji ditunjukkan pada Tabel 2.

Atas dasar pengelompokan tersebut, dapat dilihat bahwa penelitian tentang *SCC* dan *HVFA-SCC* masih banyak difokuskan pada sifat material, sedangkan penelitian yang secara khusus membandingkan kinerja lentur balok *HS-SCC* konvensional dan *HS-HVFA-SCC* masih terbatas. Hasil penyusunan matriks dari literatur yang telah dikaji dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 2. Karakteristik artikel

Kluster Topik	Jumlah Artikel	Fokus Kajian
<i>High Strength SCC</i> konvensional dan berbasis SCMs	5	Sifat beton segar <i>HSCC</i> dan material pendukung <i>SCC</i>
<i>HVFA-SCC</i>	8	Penggunaan <i>fly ash</i> dan sifat beton segar <i>HVFA-SCC</i>
Balok <i>HVFA</i> dan <i>HVFA-SCC</i>	8	Kinerja balok <i>HVFA</i> dan <i>HVFA-SCC</i>
Metode uji lentur balok	4	Metode pengujian lentur balok pada 1/3 bentangan

Tabel 3. Matriks literatur yang dikaji

No.	Penulis	Tahun	Judul Artikel	Fokus Kajian
1	Dragaš dkk.	2023	<i>Flexural Behaviour and Ultimate Bending Capacity of High-Volume Fly ash Reinforced Concrete Beams</i>	Balok <i>HVFA</i> dengan 63% <i>fly ash</i>
2	Rohman dkk.	2024	<i>Flexural Behavior of High Volume Fly ash-Self Compacting Concrete Beams to Normal Concrete Beams with Conventional Steel Reinforcement</i>	Balok <i>HVFA-SCC</i> terhadap beton normal
3	Salimu dkk.	2024	Pengaruh <i>High Volume Fly ash (HVFA)</i> terhadap Kuat Lentur Balok <i>Self Compacted Concrete (SCC)</i>	Balok <i>SCC HVFA50</i>
4	Wibowo dkk.	2022	Kajian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas pada Beton Memadat Mandiri Mutu Tinggi dengan Metakaolin 12,5% sebagai Semen dan Variasi Steel Slag sebagai Substitusi Agregat Halus	<i>SCC</i> mutu tinggi dengan metakaolin dan steel slag
5	Budi dkk.	2021	Kajian Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, dan Modulus Elastisitas <i>High Volume Fly ash (HVFA)</i> dengan Kadar <i>Fly ash</i> 50%, 60%, dan 70% terhadap Beton Normal	<i>HVFA</i> 50%, 60%, dan 70%
6	Budi dkk.	2021	Kajian Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, dan Modulus Elastisitas Beton dengan Bahan Pengganti Semen <i>Fly ash</i> Kadar 15%, 30%, dan 40% terhadap Beton Normal	<i>Fly ash</i> 15%, 30%, dan 40%
7	Zulkarnain dkk.	2026	<i>The Effect of Fly ash and Silica Fume as Filler Materials on the Tensile Strength and Modulus of Elasticity of Self-Compacting Concrete</i>	<i>Fly ash</i> dan silica fume pada <i>SCC</i>
8	Nurhickmah dan Zulfikar	2025	Studi Kuat Tekan Beton <i>SCC</i> dengan Variasi <i>Fly ash</i> dan <i>Sika Viscocrete</i> pada Perendaman Air Laut	<i>SCC fly ash</i> dan <i>Sika Viscocrete</i>
9	Hadi dkk.	2021	Metode <i>Self Compacting Concrete (SCC)</i> terhadap Sifat Mekanis Beton	Metode <i>SCC</i> terhadap sifat mekanis beton
10	Nasruddin dkk.	2020	Efek Penambahan <i>Admixture</i> terhadap Kuat Tekan Beton <i>SCC</i> pada Umur 7 Hari dengan Metode <i>Wet Curing</i>	<i>SCC</i> dengan <i>admixture</i>
11	Irfansyah dkk.	2021	Studi Analisis Beton Mutu Tinggi <i>SCC</i> Menggunakan Campuran Limbah Marmer dan <i>Superplasticizer</i>	<i>SCC</i> mutu tinggi dengan limbah marmer

No.	Penulis	Tahun	Judul Artikel	Fokus Kajian
12	Hashmi dkk.	2020	<i>Flexural Performance of High Volume Fly ash Reinforced Concrete Beams and Slabs</i>	HVFA reinforced concrete beams and slabs
13	Madan dkk.	2022	<i>Comparison of the Flexural Behavior of High-Volume Fly ash Based Concrete Slab Reinforced with GFRP Bars and Steel Bars</i>	HVFA slab with GFRP and steel bars
14	Kudva dkk.	2024	<i>Assessment of Flexural Response of RC Beams and Unrestrained Shrinkage of Fiber-Reinforced High-Volume Fly ash-Based No-Aggregate Concrete and Self-Compacting Concrete</i>	Flexural response of RC beams with HVFA-SCC
15	Sobuz dkk.	2024	<i>High Strength Self-Compacting Concrete Production Incorporating Supplementary Cementitious Materials: Experimental Evaluations and Machine Learning Modelling</i>	HSSCC with SCMs
16	Padavala dkk.	2025	<i>Self-Compacting Concrete with Fly ash and Silica Fume: Experimental Evaluation, Microstructural Analysis, and Machine Learning Modeling</i>	SCC with fly ash and silica fume
17	Aziz dkk.	2024	<i>Enhancing Sustainability in Self-Compacting Concrete by Optimizing Blended Supplementary Cementitious Materials</i>	Blended SCMs in SCC
18	Aziz dkk.	2026	<i>Flexural Behavior and Crack Development of Reinforced Geopolymer Slabs With Longitudinal Voids: an Experimental Study</i>	One-Third of the span
19	Rohman dkk.	2025	<i>A Proposed Mix Design for High-Volume Fly ash Self-Compacting Concrete</i>	Mix design HVFA-SCC
20	Kumar dkk.	2025	<i>Influence of High-Volume Fly ash and Silica Fume on the Microstructural, Fresh, and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete</i>	HVFA and silica fume in SCC
21	Şenol dan Karakurt	2024	<i>High Strength Self-Compacting Concrete Produced with Fly ash and Recycled Clay Brick Powder</i>	HSSCC with fly ash and recycled clay brick powder
22	Meena dkk.	2024	<i>Shear Strength and Microstructural Investigation on High-Volume Fly ash Self-Compacting Concrete</i>	HVFA-SCC structural and microstructural behavior
23	Daniel	2022	<i>Experimental and numerical study on the cracking behavior and flexural strength of RC shallow beams with rectangular opening and varying length</i>	One-Third of the span
24	Vijayan dan Daniel	2026	<i>Experimental study on cracking patterns, failure mechanisms, and revised classification of slender RC beams containing elongated web openings</i>	One-Third of the span
25	Domski dkk.	2025	<i>Cracking Behavior of Fiber-Reinforced Concrete Beams Made of Waste Sand</i>	One-Third of the span

HS-SCC konvensional berbasis Supplementary Cementitious Materials (SCMs)

HS-SCC konvensional telah banyak dikembangkan melalui penggunaan bahan-tambah dan pengaturan proporsi campuran yang tepat. Penggunaan metakaolin dan variasi *steel slag* sebagai substitusi agregat halus terbukti mampu menghasilkan *HS-SCC* dengan kuat tekan maksimum 62,17 MPa dan modulus elastisitas 31.179,2 MPa, sehingga dapat dijadikan dasar bahwa *SCC* dapat dikategorikan sebagai beton mutu tinggi apabila komposisi materialnya dikendalikan dengan baik (Wibowo dkk., 2022). Selain itu, pengembangan *HS-SCC* juga dapat dilakukan dengan mensubstitusikan bahan-tambah lain, seperti limbah marmer dan *superplasticizer*, yang menunjukkan bahwa performa *HS-SCC*

tidak hanya bergantung pada *fly ash*, tetapi juga dapat dicapai melalui kombinasi bahan-tambah yang berbeda (Irfansyah dkk., 2021).

Perkembangan *HS-SCC* modern juga menunjukkan arah yang lebih luas, tidak hanya berfokus pada kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, tetapi juga pada durabilitas, pemanfaatan *supplementary cementitious materials*, serta pemodelan prediktif berbasis *machine learning* (Sobuz dkk., 2024). Penggunaan *fly ash* bersama *recycled clay brick powder* juga menunjukkan bahwa *HS-SCC* dapat dikembangkan dengan pendekatan material pengganti semen dan material daur ulang, sehingga artikel tersebut menjadi penghubung antara kajian *HS-SCC* dan *SCC* berbasis *fly ash* (Şenol & Karakurt, 2024). Sementara itu, keberhasilan *SCC* konvensional sangat dipengaruhi oleh

penggunaan *admixture*, metode *curing*, *workability*, dan sifat mekanis beton segar serta beton keras. Hal ini ditunjukkan melalui penelitian SCC dengan penambahan *admixture* pada kuat tekan awal serta perbandingan sifat mekanis SCC terhadap beton normal (Hadi dkk., 2021; Nasruddin dkk., 2020).

HVFA-SCC

Berdasarkan hasil kajian literatur, penggunaan *fly ash* berpengaruh terhadap sifat mekanik, *workability*, dan *mikrostruktur* beton. Budi dkk. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* dengan kadar tinggi, yaitu 50%, 60%, dan 70%, dapat mempengaruhi kuat tekan, kuat tarik belah, serta modulus elastisitas beton. Secara umum, peningkatan kadar *fly ash* cenderung menurunkan kuat tekannya pada umur awal, sehingga kondisi ini perlu diperhatikan dalam pengembangan HVFA-SCC. Pengaruh *fly ash* terhadap beton juga dipengaruhi oleh persentase penggantian semen, sehingga perbandingan kadar rendah, sedang, dan tinggi diperlukan untuk melihat perubahan kinerja beton secara lebih jelas (Budi, Safitri, dkk., 2021).

Zulkarnain dkk. (2026) menjelaskan bahwa kombinasi *fly ash* dan *silica fume* dalam SCC dapat mempengaruhi kuat tarik belah serta modulus elastisitas. Kedua parameter tersebut penting karena berkaitan dengan retak awal dan lendutan balok. Selain komposisi material, performa SCC berbasis *fly ash* juga dipengaruhi oleh kondisi perawatan dan lingkungan, misalnya pada beton yang direndam dalam air laut dengan penggunaan *Sika Viscocrete* (Nurhickmah dan Zulfikar, 2025). Padavala dkk. (2025) juga menunjukkan bahwa SCC berbasis *fly ash* perlu dianalisis secara menyeluruh, mulai dari sifat segar, sifat keras, *mikrostruktur*, hingga prediksi performa beton menggunakan pemodelan *machine learning*.

Pengembangan HVFA-SCC memerlukan desain campuran yang lebih khusus karena kadar *fly ash* tinggi dapat mempengaruhi

kebutuhan air, stabilitas campuran, *workability*, kuat tekan, dan kepadatan *mikrostruktur* beton. Kombinasi beberapa SCMs bisa dipakai untuk mengoptimalkan performa SCC, meskipun tidak semua kajian secara langsung membahas perilaku lentur balok (Aziz dkk., 2024). Kumar dkk. (2025) menunjukkan bahwa HVFA-SCC tidak hanya perlu memenuhi persyaratan *workability*, tetapi juga harus memiliki *mikrostruktur* yang cukup padat agar kinerja mekaniknya tetap baik. Oleh karena itu, desain campuran HVFA-SCC perlu diperhatikan secara khusus karena kadar *fly ash* tinggi dapat mempengaruhi kebutuhan air, kuat tekan, *workability*, dan stabilitas campuran (Rohman dkk., 2025).

Balok HVFA dan HVFA-SCC

Kajian mengenai balok HVFA dan HVFA-SCC menjadi bagian penting karena berkaitan langsung dengan perilaku lentur elemen beton bertulang. Dragaš dkk. (2023) menunjukkan bahwa balok beton bertulang dengan penggunaan *fly ash* sebesar 63% memiliki kapasitas lentur ultimit yang relatif mendekati balok OPC, meskipun kondisi ini sangat dipengaruhi oleh kadar *fly ash*, umur beton, dan desain campuran. Namun, *crack propagation* pada balok HVFA cenderung lebih besar, sehingga penggunaan *fly ash* kadar tinggi tidak selalu menurunkan kapasitas lentur, tetapi dapat mempengaruhi aspek kemampuan layan, khususnya retak dan lendutan.

Perilaku lentur balok HVFA-SCC juga telah dibandingkan dengan balok beton normal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola retak balok HVFA-SCC hampir serupa dengan beton normal, yaitu didominasi oleh retak lentur, tetapi nilai daktilitasnya lebih tinggi (Rohman dkk., 2024). Temuan ini menunjukkan bahwa HVFA-SCC berpotensi diterapkan pada elemen lentur beton bertulang, meskipun parameter retak awal, lendutan, dan kekakuan tetap perlu dianalisis lebih lanjut. Salimu dkk. (2024) juga menunjukkan bahwa balok SCC dengan variasi HVFA50 memiliki beban maksimum

lebih tinggi dibandingkan *SCC* tanpa *fly ash*, tetapi beban retak awalnya lebih rendah. Kondisi tersebut menegaskan bahwa peningkatan kapasitas maksimum belum tentu sejalan dengan peningkatan beban retak pertama.

Kajian *HVFA* pada elemen struktur juga diperkuat oleh penelitian terhadap balok dan pelat beton bertulang. Penggunaan *fly ash* kadar tinggi tidak hanya perlu dievaluasi pada benda uji silinder, tetapi juga pada elemen struktur yang mengalami lentur, melalui parameter hubungan beban-lendutan, pola retak, dan kapasitas lentur (Hashmi dkk., 2020). Penelitian yang dilakukan oleh Madan dkk. (2022) menunjukkan bahwa perilaku lentur elemen *HVFA* juga dipengaruhi oleh jenis tulangan, seperti *Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)* dan baja, sehingga kapasitas lentur dan deformasi tidak hanya ditentukan oleh material beton, tetapi juga oleh sistem penulangannya.

Kudva dkk. (2024) membahas respons lentur balok beton bertulang berbasis high-volume *fly ash* dan *SCC*, sehingga penelitian tersebut memperkuat pentingnya evaluasi *HVFA-SCC* pada tingkat elemen struktur. Respons balok, seperti retak, beban puncak, beban dan lendutan, menjadi parameter utama untuk menilai kinerja struktural *HVFA-SCC*. Selain itu, performa *HVFA-SCC* juga dipengaruhi oleh aspek mikrostruktur beton, reaksi pozzolanik *fly ash*, dan kepadatan matriks. Kajian mikrostruktur tersebut penting untuk menjelaskan perubahan kuat tarik, modulus elastisitas, retak awal, dan lendutan pada balok *HVFA-SCC* (Meena dkk., 2024).

Metode uji lentur balok two-point loading pada 1/3 bentangan

Metode *two-point loading* pada 1/3 bentangan atau *third-point loading* merupakan metode pengujian lentur yang banyak digunakan untuk mengevaluasi retak, lendutan, kekakuan, dan kapasitas lentur balok beton bertulang. Pada metode ini, beban diberikan pada dua titik yang

berjarak sepertiga bentangan dari masing-masing tumpuan, sehingga daerah di antara kedua titik beban membentuk zona momen konstan dengan gaya geser yang relatif kecil. Kondisi tersebut memungkinkan retak lentur pada bagian tengah bentangan diamati secara lebih jelas dan terkontrol.

Daniel (2022) menggunakan metode *two-point loading* pada balok beton bertulang dengan bukaan persegi panjang. Pengujian dilakukan pada bentangan efektif 2 m dengan jarak *shear span* 0,667 m untuk mengamati *first crack load*, beban *ultimit*, kuat lentur, lendutan, pola retak, dan mode keruntuhan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa keberadaan bukaan dapat menurunkan kekakuan, mempercepat munculnya retak, serta mempengaruhi kapasitas beban balok. Hal ini menunjukkan bahwa metode pembebanan dua titik pada 1/3 bentangan relevan digunakan untuk mengkaji perilaku retak dan lentur balok.

Domski dkk. (2025) juga menerapkan dua beban terpusat di sepertiga bentangan. Parameter yang diamati meliputi momen retak, jarak retak, lebar retak, serta perbandingan hasil pengujian dengan perhitungan berdasarkan Eurocode 2. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa retak pertama umumnya muncul pada daerah momen maksimum dan berkembang secara bertahap hingga membentuk pola retak yang stabil. Dengan demikian, metode pembebanan 1/3 bentangan sesuai untuk mengevaluasi perkembangan retak lentur pada balok beton bertulang.

Vijayan dan Daniel (2026) menggunakan *two point loading* yang mengacu pada ASTM C78/C78M-22 untuk meneliti pola retak, mekanisme keruntuhan, dan pengaruh bukaan pada balok beton bertulang ramping. Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan daerah momen konstan di tengah bentangan, sehingga respons lentur dapat diamati secara lebih jelas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok dengan bukaan kecil cenderung mengalami retak lentur bertahap (*progressive flexural cracks*), sedangkan balok dengan bukaan

besar menunjukkan kombinasi keruntuhan lentur dan geser.

Penelitian Aziz dkk. (2026) juga dapat digunakan sebagai rujukan pendukung apabila membahas pengujian lentur balok dengan metode *two point loading* pada 1/3 bentangan. Metode tersebut relevan untuk mengamati *first crack load*, perkembangan retak, respon beban–lendutan, dan perilaku lentur balok beton bertulang karena zona momen konstan yang terbentuk di tengah bentangan memungkinkan retak lentur diamati secara lebih terarah.

Hasil kajian tersebut di atas menunjukkan bahwa metode *two point loading* pada 1/3 bentangan dinilai tepat untuk pengujian lentur balok karena mampu menghasilkan zona momen murni pada bagian tengah bentangan. Zona ini penting untuk mengevaluasi retak awal, perkembangan retak, lendutan, perubahan kekakuan, dan kapasitas lentur. Oleh karena itu, metode ini relevan digunakan dalam kajian yang membandingkan kinerja lentur balok *HS-SCC* konvensional dan *HS-HVFA-SCC*.

Pembahasan

Perbandingan kinerja balok HS-SCC konvensional dan HS-HVFA-SCC

Merujuk hasil kajian artikel (Tabel 3), dapat disimpulkan bahwa *HS-SCC* konvensional secara umum menunjukkan keunggulan pada perkembangan kuat tekan awal, modulus elastisitas, serta kestabilan sifat mekanik. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh penggunaan semen Portland sebagai bahan pengikat utama dan pemanfaatan *superplasticizer* yang mampu meningkatkan *workability* tanpa penggantian binder dalam jumlah besar.

Pada aspek beton segar, *HS-SCC* konvensional secara umum memiliki *workability* tinggi karena penggunaan *superplasticizer* dan volume pasta yang memadai, tetapi kondisi tersebut biasanya membutuhkan kadar semen yang besar. Sebaliknya, pada *HVFA-SCC*, *fly ash* dapat membantu meningkatkan *workability* karena

bentuk partikelnya yang halus dan relatif bulat mampu mengurangi gesekan antar partikel. Salimu dkk. (2024) menunjukkan bahwa campuran *HVFA50* lebih mampu memenuhi persyaratan *SCC* dibandingkan campuran tanpa *fly ash*, sehingga *fly ash* dapat berperan dalam memperbaiki karakteristik beton segar apabila proporsi campuran dirancang dengan tepat.

Dari sisi sifat mekanik, *HS-SCC* konvensional cenderung memiliki kuat tekan awal yang lebih tinggi karena semen Portland masih menjadi bahan pengikat utama. Sebaliknya, penggunaan *fly ash* dalam kadar tinggi pada *HVFA-SCC* dapat menurunkan kuat tekan umur awal. Budi, dkk. (2021) menunjukkan bahwa peningkatan kadar *fly ash* dari 50% menjadi 70% menurunkan kuat tekan dari 30,37 MPa menjadi 19,81 MPa. Selain itu, modulus elastisitas juga perlu diperhatikan karena berpengaruh terhadap lendutan dan kekakuan balok. *SCC* mutu tinggi dapat menghasilkan modulus elastisitas yang tinggi apabila kuat tekan dan komposisi materialnya optimal (Wibowo dkk., 2022), sedangkan pada *HVFA-SCC* parameter ini perlu diuji secara langsung karena kadar *fly ash* tinggi dapat mempengaruhi respons deformasi beton.

Kinerja lentur balok beton bertulang tidak hanya dipengaruhi oleh kuat tekan beton, tetapi juga oleh hubungan antara kuat tekan, kuat tarik, modulus elastisitas, dan perkembangan retak. Peningkatan kuat tekan umumnya diikuti oleh peningkatan modulus elastisitas yang berkontribusi terhadap kekakuan awal balok. Di sisi lain, kuat tarik beton berperan penting dalam menentukan beban retak pertama (*first cracking load*). Ketika tegangan tarik melampaui kapasitas tarik beton, retak awal mulai terbentuk dan menyebabkan penurunan kekakuan lentur. Penurunan kekakuan tersebut kemudian memengaruhi respons lendutan dan perkembangan retak selama proses pembebanan. Oleh karena itu, evaluasi kuat tarik beton menjadi penting dalam memahami hubungan antara sifat

material dan perilaku lentur balok baik pada *HS-SCC* maupun *HVFA-SCC*.

Pada aspek perilaku lentur, retak awal menjadi parameter penting karena setelah retak pertama terjadi, kekakuan balok akan menurun dan respon beban–lendutan berubah. (Salimu dkk., 2024) menunjukkan bahwa balok *HVFA-SCC* dapat memiliki beban maksimum yang lebih tinggi, tetapi beban retak awalnya lebih rendah dibandingkan *SCC* tanpa *fly ash*. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas ultimit tidak selalu sejalan dengan kemampuan balok dalam menahan retak awal. Selain itu, kekakuan setelah retak, lendutan, dan daktilitas juga perlu dianalisis. Kekakuan elastis *HVFA50* dilaporkan lebih tinggi, tetapi kekakuan pascaretaknya sedikit lebih rendah, sedangkan daktilitas balok *HVFA-SCC* cenderung lebih tinggi dibandingkan beton normal (Rohman dkk., 2024; Salimu dkk., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, *HS-SCC* konvensional memiliki keunggulan pada kuat tekan awal, kestabilan modulus elastisitas, dan pembentukan sifat mekanik yang lebih cepat. Sementara itu, *HS-HVFA-SCC* memiliki potensi dalam meningkatkan *workability* dan daktilitas, tetapi masih perlu diperhatikan terhadap kuat tekan umur awal, retak awal, lendutan, dan penurunan kekakuan setelah retak. Oleh karena itu, evaluasi kinerja lentur *HVFA-SCC* tidak cukup hanya didasarkan pada kapasitas maksimum, tetapi perlu dilakukan secara menyeluruh melalui perambatan retak, respon beban–lendutan, kekakuan, daktilitas, pola retak, dan kapasitas lentur ultimit.

Gap penelitian

Berdasarkan hasil kajian literatur, penelitian mengenai *HS-SCC* dan *HVFA-SCC* masih banyak berfokus pada karakteristik material, seperti sifat beton segar, kuat tekan, kuat tarik belah, modulus elastisitas, durabilitas, dan desain campuran. Kajian tersebut penting, tetapi belum cukup untuk menggambarkan perilaku beton ketika

digunakan sebagai elemen struktur, khususnya balok beton bertulang yang bekerja terhadap beban lentur.

Penelitian terdahulu juga masih terbatas dalam membahas kinerja balok lentur secara menyeluruh. Parameter struktural seperti beban maksimum, respon beban–lendutan, kekakuan awal, kekakuan setelah retak, daktilitas, pola retak, dan kapasitas lentur ultimit belum banyak dikaji secara lengkap. Selain itu, perambatan retak umumnya hanya dijelaskan berdasarkan pola retak akhir atau mode keruntuhan, sedangkan rambatan retak, arah retak, lebar retak, dan penyebaran retak selama pembebanan masih jarang dianalisis secara sistematis.

Gap lain yang ditemukan adalah masih terbatasnya penelitian yang membandingkan secara langsung balok *HS-SCC* konvensional dengan balok *HS-HVFA-SCC*. Sebagian besar penelitian masih membandingkan *HVFA-SCC* dengan beton normal atau hanya meninjau *HVFA-SCC* pada tingkat material. Oleh karena itu, penelitian lanjutan diperlukan untuk mengevaluasi kinerja lentur dan *crack propagation* pada balok secara lebih rinci, sehingga pengaruh *fly ash* kadar tinggi tidak hanya dinilai dari kuat tekan dan *workability*, tetapi juga dari lendutan, kekakuan, daktilitas, pola retak, dan kapasitas lentur balok.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi pendahuluan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa *High-Strength Self-Compacting Concrete (HS-SCC)* dan *High-Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete (HVFA-SCC)* memiliki karakteristik yang berbeda baik pada tingkat material maupun perilaku struktural. *HS-SCC* umumnya menunjukkan performa yang lebih baik dalam perkembangan kuat tekan umur awal dan modulus elastisitas, sedangkan *HVFA-SCC* memiliki keunggulan pada aspek *workability*, daktilitas, serta potensi keberlanjutan lingkungan melalui pengurangan penggunaan semen Portland.

Berdasarkan literatur yang tersedia, kapasitas lentur ultimit kedua jenis beton relatif sebanding. Namun demikian, beberapa parameter penting yang berkaitan dengan perilaku layan dan pascaretak, seperti *first crack load*, *crack propagation*, *stiffness degradation*, dan *ductility index*, masih belum banyak dikaji secara komprehensif, khususnya pada balok *HVFA-SCC*. Selain itu, penelitian yang membandingkan secara langsung kinerja lentur balok *HS-SCC* dan *HVFA-SCC* dengan kondisi geometri, penulangan, dan pembebanan yang setara masih sangat terbatas.

Hasil studi pendahuluan ini menunjukkan bahwa *HVFA-SCC* memiliki potensi sebagai alternatif beton mutu tinggi yang lebih berkelanjutan tanpa penurunan signifikan terhadap kapasitas lentur ultimit. Namun demikian, pengaruh penggunaan *fly ash* dalam kadar tinggi terhadap retak awal, propagasi retak, degradasi kekakuan, dan perilaku pascaretak masih memerlukan verifikasi melalui pengujian eksperimental yang terkontrol. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan yang membandingkan secara langsung kinerja balok *HS-SCC* dan *HVFA-SCC* melalui evaluasi hubungan beban–lendutan, perkembangan retak, kekakuan, daktilitas, dan kapasitas lentur ultimit pada kondisi pengujian yang identik. Temuan dari penelitian tersebut diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah yang lebih kuat bagi pemanfaatan *HVFA-SCC* sebagai material beton mutu tinggi yang ramah lingkungan dan layak diterapkan pada elemen struktur beton bertulang.

Daftar Pustaka

- Aziz, A., Mehboob, S. S., Tayyab, A., Khan, D., Hayyat, K., Ali, A., & Latif Qureshi, Q. B. I. (2024). Enhancing sustainability in self-compacting concrete by optimizing blended supplementary cementitious materials. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-62499-w>
- Aziz, Y. H. A., Malky, A. El, & El-Sayed, T. A. (2026). Flexural behavior and crack development of reinforced geopolymer slabs with longitudinal voids: an experimental study. *Scientific Reports*, 16(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-53647-5>
- Budi, A. S., Safitri, E., & Kuncoro, F. B. (2021). Kajian Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, dan Modulus Elastisitas Beton dengan Bahan Pengganti Semen Fly Ash Kadar 15%, 30%, dan 40% Terhadap Beton Normal. *Matriks Teknik Sipil*, 9(3), 170. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v9i3.54494>
- Budi, A. S., Santosa, B., & Widodo, M. A. (2021). Kajian Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, dan Modulus Elastisitas pada High Volume Fly Ash (HVFA) dengan Kadar Fly Ash 50%, 60%, dan 70% terhadap Beton Normal. *Matriks Teknik Sipil*, 9(4), 244. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v9i4.54787>
- Daniel, J. J. (2022). Experimental and numerical study on the cracking behavior and flexural strength of RC shallow beams with rectangular opening and varying length. *Structures*, 40, 460–468. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.04.040>
- Domski, J., Laskowska-Bury, J., & Dudzińska, A. (2025). Cracking Behavior of Fiber-Reinforced Concrete Beams Made of Waste Sand. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/app15094790>
- Dragas, J., Marinković, S., Ignjatović, I., Tošić, N., & Koković, V. (2023). Flexural behaviour and ultimate bending capacity of high-volume fly ash reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115446>
- Hadi, A. K., Supardi, S., Maruddin, M., Alal, A., Yusuf, A., Samsuddin, R. H., & Kunci, K. (2021). Metode Self Compacting Concrete (Scc) Terhadap Sifat Mekanis Beton. Dalam *Maret* (Vol. 6, Nomor 1). <https://ojs.unanda.ac.id/index.php/jiit/index>
- Hashmi, A. F., Shariq, M., & Baqi, A. (2020). Flexural performance of high volume fly ash reinforced concrete beams and slabs. *Structures*, 25, 868–880. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.071>
- Irfansyah, M. H., Rakhmawati, A., & Arnandha, Y. (2021). STUDI ANALISIS BETON MUTU TINGGI SCC (SELF COMPACTING CONCRETE) MENGGUNAKAN CAMPURAN LIMBAH MARMER DAN SUPERPLASTICIZER. *Jurnal Rekayasa Infrastruktur Sipil*, 02, 56–62.
- Kudva P., L., Nayak, G., Shetty, K. K., & H.K., S. (2024). Assessment of flexural response of RC beams and unrestrained shrinkage of fiber-reinforced high-volume fly ash-based no-aggregate concrete and self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 431. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136527>

- Kumar, S., Kumar, N., Kumar, V., Rahul, A. K., Priyadarshree, A., & Ansari, M. I. (2025). Influence of High-Volume Fly Ash and Silica Fume on the Behaviour of Self-Compacting Concrete. *IFAC-PapersOnLine*, 59(8), 501–508. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.07.083>
- Madan, C. S., Munuswamy, S., Joanna, P. S., Gurupatham, B. G. A., & Roy, K. (2022). Comparison of the Flexural Behavior of High-Volume Fly Ash Based Concrete Slab Reinforced with GFRP Bars and Steel Bars. *Journal of Composites Science*, 6(6). <https://doi.org/10.3390/jcs6060157>
- Meena, A., Singh, N., & Singh, S. P. (2024). Shear strength and microstructural investigation on high-volume fly ash self-compacting concrete containing recycled concrete aggregates and coal bottom ash. *Materiales de Construcción*, 74(353). <https://doi.org/10.3989/mc.2024.354623>
- Nasruddin, Sampebulu, V., & Mushar, P. (2020). Efek Penambahan Admixture terhadap Kuat Tekan Beton SCC pada Umur 7 Hari Dengan Metode Wet Curing. *Jurnal Lingkungan Binaan Indonesia*, 9(1), 1–5. <https://doi.org/10.32315/jlbi.v9i1.94>
- Nurhickmah, G., & Zulfikar, A. R. (2025). Studi Kuat Tekan Beton SCC dengan Variasi Fly Ash dan Sika Viscocrete pada Perendaman Air Laut. *Jurnal Sipil Terapan*, 3(1), 25–36. <https://doi.org/10.58169/jusit.v3i1.898>
- Padavala, S. S. A. B., Avudaiappan, S., Paluri, Y., Bharath, C. N., Prathipati, S. R. R. T., & Kumara, A. M. (2025). Self-compacting concrete with fly ash and silica fume: experimental evaluation, microstructural analysis, and machine learning modeling. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-33180-7>
- Rohman, R. K., Afrianto, A., & Cahyono, S. D. (2025). A Proposed Mix Design for High-Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete (HVFA-SCC). *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 15(6), 30112–30118. <https://doi.org/10.48084/etasr.13726>
- Rohman, R. K., Wibowo, R. G., & Afrianto, A. (2024). Flexural Behavior of High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete Beams to Normal Concrete Beams with Conventional Steel Reinforcement. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(6), 17792–17797. <https://doi.org/10.48084/etasr.8771>
- Salimu, S., Mendrofa, M., Zalukhu, B. S. F., Telaumbanua, A. J., Zebua, Y. E., Halawa, R., Gea, A. P., Hia, S., Wulansari, L. H., & Morib, M. A. (2024). Pengaruh High Volume Fly Ash (HVFA) Terhadap Kuat Lentur Balok Self Compacted Concrete (SCC). *JURNAL TEKNIK SIPIL UKRIM*, 1(2), 70–77. <https://doi.org/10.61179/jtsukrim.v1i2.640>
- Şenol, A. F., & Karakurt, C. (2024). High-strength self-compacting concrete produced with recycled clay brick powders: Rheological, mechanical and microstructural properties. *Journal of Building Engineering*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109175>
- Sobuz, M. H. R., Aditto, F. S., Datta, S. D., Kabbo, M. K. I., Jabin, J. A., Khan, M. M. H., Rahman, S. M. A., Raazi, M., & Zaman, A. A. U. (2024). High-Strength Self-Compacting Concrete Production Incorporating Supplementary Cementitious Materials: Experimental Evaluations and Machine Learning Modelling. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00707-7>
- Tiorivaldi, & Abriantoro, A. P. (2024). Studi Eksperimental High Volume Fly ash Self-Compacting Concrete (HVFA SCC) dengan Penambahan 5% Silica Fume terhadap Sifat Reologi dan Mekanik. *Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil*, 7(2), 114–128. <https://doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6319>
- Vijayan, D. S., & Daniel, J. J. (2026). Experimental study on cracking patterns, failure mechanisms, and revised classification of slender RC beams containing elongated web openings. *Composites Part C: Open Access*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2026.100729>
- Wibowo, W., Purwanto, P., & Syuja, M. N. (2022). KAJIAN KUAT TEKAN DAN MODULUS ELASTISITAS PADA BETON MEMADAT MANDIRI MUTU TINGGI DENGAN METAKAOLIN 12,5% SEBAGAI SEMEN DAN VARIASI STEEL SLAG SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT HALUS. *Matriks Teknik Sipil*, 10(3), 222. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v10i3.64402>
- Zulkarnain, F., Hasibuan, D. K., Siregar, Z., & Muthusamy, K. (2026). *The Effect of Fly Ash and Silica Fume As Filler Materials on The Tensile Strength and Modulus of Elasticity of Self-Compacting Concrete*. <https://doi.org/10.24853/jurtek.18.1.49-56>