

KESAN KANDUNGAN ABU BAHAN API KELAPA SAWIT ULTRA-HALUS SEBAGAI PENGGANTI SIMEN TERHADAP PRESTASI KEBOLEHKERJAAN DAN MEKANIKAL KONKRIT AGREGAT KITAR SEMULA MAMPAT KENDIRI

Mohd Zulham Affandi Bin Mohd Zahid¹, Siti Shuhadah Binti Aziz¹, Aizam Binti Yusoff¹

¹Pusat Pengajian Kejuruteraan Awam, Kampus Kejuruteraan Tuanku Syed Sirajuddin, Universiti Sains Malaysia, 14300 Nibong Tebal, Pulau Pinang

Penulis koresponden: mohdzulham@usm.my

Abstrak

Kajian ini bertujuan menilai kebolehlaksanaan penggunaan *ultra-fine palm oil fuel ash* (UPOFA) sebagai pengganti separa simen dalam *self-compacting recycled aggregate concrete* (SCRAC) yang menggunakan 100% agregat kasar kitar semula. UPOFA digunakan pada kadar penggantian 0%, 10%, 15% dan 20% daripada berat simen. Penilaian prestasi dijalankan melalui ujian kebolehkerjaan (slump flow) serta ujian kekuatan mampatan dan lenturan mengikut piawaian ASTM dan BS yang berkaitan. Keputusan menunjukkan bahawa peningkatan kandungan UPOFA meningkatkan masa aliran runtuh daripada 4.10 s kepada 6.11 s, namun masih berada dalam julat piawaian *self-compacting concrete* (SCC), menunjukkan kebolehkerjaan yang memuaskan. Dari segi kekuatan mampatan, peningkatan ketara diperhatikan pada umur 28 hari, daripada kira-kira 14 MPa (0% UPOFA) kepada 52 MPa (20% UPOFA), iaitu peningkatan sekitar 270%. Kekuatan lenturan turut meningkat daripada 4.1 MPa kepada 7.2 MPa, bersamaan peningkatan kira-kira 75%. Secara keseluruhan, penggunaan sehingga 20% UPOFA didapati mampu meningkatkan prestasi mekanikal SCRAC tanpa menjejaskan kebolehkerjaan, sekali gus membuktikan potensinya sebagai bahan tambah simen yang lestari dalam konkrit mampat sendiri.

Kata kunci: abu bahan api kelapa sawit ultra-halus; bahan pozzolan; konkrit agregat kitar semula; konkrit mampat; konkrit mampat sendiri.

Sejarah artikel:

Submitted: 02/02/2026; Revised: 12/05/2026; Accepted: 30/06/2026; Online: 30/06/2026

Pendahuluan

Industri pembinaan merupakan antara sektor yang paling banyak menggunakan sumber semula jadi dan pada masa yang sama menyumbang kepada penghasilan sisa pepejal serta pelepasan karbon yang tinggi. Pengeluaran simen Portland khususnya dikenal pasti sebagai salah satu penyumbang utama kepada pelepasan karbon dioksida (CO₂) global, dengan anggaran sekitar 7 hingga 8% daripada jumlah pelepasan CO₂ dunia berpunca daripada industri simen (International Energy Agency & World Business Council for Sustainable Development, 2018). Oleh itu, pembangunan bahan binaan yang lebih lestari melalui penggunaan bahan buangan industri dan bahan kitar semula semakin mendapat perhatian dalam penyelidikan kejuruteraan awam.

Salah satu pendekatan yang berpotensi ialah penggunaan agregat konkrit kitar semula atau *Recycled Concrete Aggregates* (RCA) yang diperolehi daripada sisa pembinaan dan perobohan bangunan. Penggunaan RCA dapat mengurangkan kebergantungan terhadap agregat semula jadi serta membantu mengurangkan jumlah sisa pembinaan yang dihantar ke tapak pelupusan. Walau bagaimanapun, RCA mempunyai beberapa kekangan dari segi sifat fizikal seperti kadar penyerapan air yang tinggi, ketumpatan yang lebih rendah serta kehadiran mortar lama pada permukaan agregat. Ciri-ciri ini boleh memberi kesan kepada kebolehkerjaan, kekuatan serta ketahanan lasakan konkrit yang dihasilkan. Oleh itu, penggunaan bahan tambah simen atau Supplementary Cementitious Materials (SCM) diperlukan bagi meningkatkan prestasi konkrit yang menggunakan RCA (Dabbour et al, 2026).

Dalam konteks ini, SCM atau bahan daripada sisa industri telah menjadi satu strategi penting dalam pembangunan konkrit lestari. Abu bahan api kelapa sawit atau *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) merupakan salah satu bahan buangan industri yang berpotensi tinggi untuk digunakan dalam konkrit, terutamanya di negara pengeluar kelapa sawit seperti Malaysia dan Indonesia. POFA dihasilkan daripada pembakaran gentian dan tempurung kelapa sawit dalam loji janakuasa biojisim. Bahan ini mengandungi kandungan silika amorfus yang tinggi dan mempunyai sifat pozzolanik yang membolehkannya bertindak balas dengan kalsium hidroksida yang terhasil daripada proses hidrasi simen untuk menghasilkan gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) tambahan, sekali gus meningkatkan kekuatan dan ketahanan lasakan konkrit (Hou et al, 2025).

Kajian terdahulu menunjukkan bahawa kehalusan zarah POFA memainkan peranan penting dalam meningkatkan kereaktifan pozzolanik bahan tersebut. Apabila POFA dikisar sehingga mencapai saiz zarah yang sangat halus atau dikenali sebagai *Ultra-Fine Palm Oil Fuel Ash* (UPOFA), bahan ini mampu meningkatkan kepadatan matriks konkrit melalui kesan pengisian mikro (micro-filler effect) dan mempercepatkan tindak balas pozzolanik. Alani et al (2023) melaporkan bahawa konkrit yang mengandungi UPOFA menunjukkan kadar perkembangan kekuatan yang lebih perlahan pada peringkat awal tetapi menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi pada umur pengawetan yang lebih panjang akibat daripada tindak balas pozzolanik yang berterusan. Kajian ini juga mendapati bahawa kandungan silika yang tinggi dalam UPOFA boleh meningkatkan sifat mekanikal bahan binaan melalui pembentukan gel C–S–H tambahan.

Selain penggunaan SCM, inovasi dalam teknologi konkrit turut menyumbang kepada pembangunan bahan binaan yang lebih efisien. SCC merupakan salah satu inovasi penting yang diperkenalkan oleh Okamura pada tahun 1988 (Ozawa et al, 1989) untuk mengatasi masalah keboleherjaan konkrit konvensional. SCC mempunyai keboleherjaan yang sangat tinggi dan mampu mengalir serta memadat secara sendiri tanpa memerlukan pemadatan mekanikal. Ciri ini membolehkan SCM mengisi ruang acuan dan kawasan bertetulang dengan lebih efektif serta mengurangkan kecacatan seperti rongga dan sarang lebah (honeycombing). Selain itu, penggunaan SCC dapat meningkatkan produktiviti pembinaan dan mengurangkan keperluan tenaga kerja di tapak pembinaan.

Walaupun terdapat banyak kajian yang meneliti penggunaan UPOFA atau RCA secara berasingan dalam konkrit, kajian yang menggabungkan kedua-dua bahan tersebut dalam konkrit mampat sendiri masih terhad. Sebagai contoh, Akhtam et al (2023) menumpukan kajian terhadap kesan penggunaan UPOFA dan gentian PET terhadap kekuatan konkrit, tetapi kajian tersebut tidak mempertimbangkan penggunaan RCA dalam campuran konkrit. Sementara itu, kajian oleh Karthik et al. (2024) meneliti prestasi mekanikal dan ketahananlasakan konkrit yang menggunakan RCA, namun tidak mengambil kira potensi penggunaan POFA sebagai bahan tambah simen untuk meningkatkan prestasi konkrit tersebut. Oleh itu, pemahaman yang menyeluruh mengenai kesan gabungan penggunaan UPOFA dan RCA dalam konkrit mampat sendiri masih belum diterokai secara mendalam dalam literatur sedia ada.

Berdasarkan tinjauan literatur tersebut, dapat dikenal pasti bahawa jurang penyelidikan utama terletak pada kekurangan kajian yang menilai secara sistematik kesan penggunaan UPOFA sebagai penggantian separa simen dalam konkrit mampat sendiri yang menggunakan agregat konkrit kitar semula sepenuhnya. Kajian mengenai interaksi antara SCM daripada sisa industri dan agregat kitar semula dalam sistem SCC adalah penting bagi memahami bagaimana kedua-dua bahan ini mempengaruhi sifat keboleherjaan, sifat mekanikal dan ketahananlasakan konkrit secara keseluruhan.

Sehubungan itu, kebaruan (*novelty*) kajian ini terletak pada pendekatan yang menggabungkan tiga elemen penting dalam pembangunan konkrit lestari, iaitu penggunaan UPOFA sebagai bahan tambah simen, penggunaan 100% agregat konkrit kitar semula sebagai agregat kasar, serta aplikasi dalam sistem SCC. Pendekatan ini bukan sahaja menyumbang kepada pengurangan penggunaan simen dan agregat semula jadi, malah memanfaatkan sisa industri kelapa sawit dan sisa pembinaan secara serentak dalam penghasilan bahan binaan berprestasi tinggi.

Oleh itu, kajian ini dijalankan dengan objektif utama untuk menilai kebolehlaksanaan penggunaan UPOFA sebagai penggantian separa simen dalam SCC yang menggunakan agregat konkrit kitar semula atau *self-compacting recycled aggregate concrete* (SCRAC). Secara khususnya, objektif kajian ini adalah untuk menilai kesan penggunaan UPOFA pada kadar penggantian yang berbeza terhadap keboleherjaan dan kekuatan mampatan dan kekuatan lenturan SCRAC.

Melalui pendekatan ini, kajian ini diharapkan dapat menyumbang kepada pembangunan konkrit yang lebih lestari dengan memanfaatkan bahan buangan industri dan pembinaan tanpa menjejaskan prestasi mekanikal dan ketahananlasakan konkrit.

KAEDAH DAN BAHAN

Jadual 1 menunjukkan nisbah campuran bagi beberapa jenis campuran konkrit, yang merangkumi satu campuran kawalan serta tiga variasi yang menggabungkan UPOFA sebagai penggantian sebahagian simen. Bahan-bahan yang digunakan dalam campuran konkrit ini ialah Simen Portland Biasa (OPC), UPOFA, 100% RCA sebagai pengganti agregat kasar, agregat halus, air, dan bahan tambah superplastik, dengan semua kuantiti dinyatakan dalam kilogram per meter padu (kg/m^3).

Dalam campuran kawalan, OPC digunakan sebanyak 333 kg/m^3 tanpa sebarang penggantian oleh UPOFA. Walau bagaimanapun, dalam campuran yang diubah suai, sebahagian daripada OPC digantikan dengan UPOFA pada kadar yang berbeza iaitu 10%, 15%, dan 20% masing-masing (Mandal et al., 2024). Walaupun terdapat variasi dalam bahan pengikat, kuantiti agregat kasar, agregat halus, dan air dikekalkan sama bagi semua campuran. Begitu juga, dos bahan superpemplastik dikekalkan

pada 6.66 kg/m³ bagi memastikan keboleherjaan dan kebolehaliran yang mencukupi, terutamanya kerana konkrit ini direka sebagai SCC.

Reka bentuk campuran ini bertujuan untuk menyiasat kesan penggantian OPC dengan UPOFA terhadap keboleherjaan dan kekuatan SCRAC sambil mengekalkan nisbah agregat kepada pengikat serta nisbah air kepada pengikat yang tetap. Dengan memvariasikan kandungan UPOFA secara sistematik, kajian ini berusaha menentukan tahap penggantian optimum yang dapat menyeimbangkan aspek kelestarian dan prestasi.

Jadual 1: Campuran konkrit yang digunakan dalam kajian ini.

Bahan	Campuran konkrit (kg/m ³)			
	Campuran kawalan	UPOFA10	UPOFA 15	UPOFA 20
OPC	333	299.7	283	266.4
UPOFA	-	33.3	50.0	66.6
RCA	571	571	571	571
Agregat Halus	944	944	944	944
Air	150	150	150	150
Superpempplastik	6.66	6.66	6.66	6.66

RCA yang digunakan dalam kajian ini diperoleh daripada bahan lebih eksperimen terdahulu yang dijalankan di makmal Universiti Sains Malaysia. Bagi memproses RCA tersebut, mesin gerudi *jackhammer* terlebih dahulu digunakan untuk memecahkan kepingan konkrit yang besar kepada serpihan yang lebih kecil. Julat saiz antara 10 mm hingga 20 mm dipilih secara khusus kerana RCA cenderung menyerap lebih banyak air berbanding agregat semula jadi, dan luas permukaan yang lebih besar dapat meningkatkan kadar penyerapan air, sekali gus memperbaiki prestasinya dalam campuran konkrit.

Selepas proses penghancuran selesai, RCA diayak menggunakan ayak piawai 20 mm dan 12.5 mm bagi memastikan hanya zarah yang berada dalam julat saiz sasaran dikekalkan. Selepas proses pengayakan, agregat tersebut dibasuh dan direndam selama satu jam menggunakan air paip, bertujuan untuk menyingkirkan zarah halus, habuk, serta bahan pencemar lain yang berpotensi. Langkah ini penting bagi memastikan kekotoran tidak menjejaskan prestasi campuran konkrit.

Selepas dibersihkan, RCA dibiarkan kering secara semula jadi pada suhu bilik sehingga mencapai keadaan *Saturated Surface Dry* (SSD), bagi memastikan agregat mengandungi kelembapan yang mencukupi tanpa kehadiran air berlebihan pada permukaan. Setelah mencapai keadaan tersebut, RCA sedia untuk digunakan dalam proses pencampuran konkrit. Penyediaan bahan secara teliti ini adalah untuk memastikan ketekalan sifat bahan, seterusnya menyumbang kepada penghasilan campuran konkrit yang lebih baik dan lestari.

POFA mentah yang digunakan dalam kajian ini diperoleh daripada sebuah kilang kelapa sawit selepas proses pembakaran dalam dandang. Sebelum diproses lanjut, POFA tersebut dikeringkan di dalam ketuhar makmal pada suhu 105°C selama 24 jam bagi menyingkirkan sisa kelembapan dan memastikan ketekalan sifat bahan. Setelah dikeringkan, bahan tersebut diayak menggunakan ayak bersaiz 300 µm untuk menyingkirkan zarah kasar serta meningkatkan kereaktifannya sebagai bahan pengikat tambahan.

Selepas proses pengayakan, POFA dikisar menggunakan mesin pengisar bebola (ball mill) sekurang-kurangnya selama 10 jam bagi menghasilkan zarah yang sangat halus, sekali gus memastikan kehalusannya setanding dengan simen OPC seperti yang diperlukan untuk penggantian sebahagian simen dalam konkrit. Tempoh masa pengisaran ini adalah berdasarkan daripada kajian terdahulu yang menunjukkan bahawa UPOFA yang lebih halus dapat meningkatkan aktiviti pozzolan dan menyumbang kepada prestasi konkrit yang lebih baik.

Sebagai langkah akhir, POFA yang telah dikisar dipanaskan dalam relau mufel pada suhu 500°C selama 1.5 jam untuk menyingkirkan karbon yang tidak terbakar serta memperbaiki komposisi kimianya. Rawatan haba ini penting bagi meningkatkan kereaktifan pozzolan UPOFA, sekali gus menjadikannya lebih berkesan sebagai SCM yang mampan. Setelah melalui semua proses ini, UPOFA sedia digunakan dalam pencampuran konkrit, sambil menawarkan manfaat alam sekitar tanpa menjejaskan, malah berpotensi untuk meningkatkan kekuatan dan ketahanan konkrit.

Proses pencampuran SCC dalam kajian ini dijalankan menggunakan pendekatan dua peringkat yang tersusun bagi memastikan penyebaran bahan yang seragam serta mencapai keboleherjaan yang optimum. Prosedur sistematik ini penting kerana SCC mempunyai tahap keboleherjaan yang

tinggi dan perlu mengekalkan sifat pemadatan sendiri tanpa berlakunya pengasingan bahan (segregation).

Pada peringkat pertama, agregat kitar semula (RCA) dan agregat halus dicampurkan terlebih dahulu selama satu minit bersama 50% daripada jumlah keseluruhan air. Langkah ini penting kerana RCA mempunyai kadar penyerapan air yang lebih tinggi berbanding agregat semula jadi kerana sifatnya yang lebih berliang. Dengan membenarkan RCA menyerap air pada peringkat awal pencampuran, permintaan air yang berlebihan pada peringkat seterusnya dapat dielakkan, sekali gus mengelakkan perubahan pada konsistensi dan kekuatan campuran. Proses pra-pembasahan ini juga dapat mengurangkan risiko kehilangan kelembapan secara mendadak daripada konkrit segar yang boleh menyebabkan penghidratan tidak mencukupi serta menjejaskan sifat mekanikal konkrit.

Selepas pencampuran awal, simen dan UPOFA ditambah ke dalam campuran dan proses pengadunan diteruskan selama kira-kira empat minit bagi memastikan bahan-bahan tersebut bercampur dengan lebih sekata. Penggunaan UPOFA sebagai pengganti sebahagian simen adalah penting kerana ia dapat mengurangkan penggunaan simen, sekali gus menurunkan pelepasan karbon serta menyokong amalan pembinaan yang lebih lestari. Selain itu, UPOFA juga meningkatkan ketumpatan pembungkusan (packing density) dalam matriks konkrit, yang menyumbang kepada peningkatan ketahanan konkrit. Walau bagaimanapun, kerana zarah UPOFA lebih halus berbanding simen, proses pencampuran yang menyeluruh diperlukan bagi mengelakkan penggumpalan zarah dan memastikan penyebaran yang seragam.

Pada peringkat kedua, baki 50% air dimasukkan secara berperingkat sambil proses pencampuran diteruskan selama dua minit lagi. Langkah ini penting bagi mengekalkan nisbah air kepada pengikat (water-to-binder ratio) yang diperlukan serta memastikan campuran konkrit mencapai keboleherjaan yang dikehendaki tanpa berlakunya penjujukan (bleeding) atau pengasingan bahan. Setelah air dimasukkan sepenuhnya, superplastik ditambah secara manual dalam kuantiti kecil secara beransur-ansur. Dos bahan tambah ini dikawal pada 2% daripada jumlah berat bahan pengikat bagi meningkatkan keboleherjaan SCC tanpa menjejaskan kekuatannya. Superplastik berfungsi meningkatkan keboleherjaan dengan mengurangkan keperluan air sambil mengekalkan tahap kecairan yang tinggi, membolehkan campuran mengalir dengan mudah ke dalam acuan tanpa memerlukan getaran atau pemadatan mekanikal.

Selepas proses pencampuran selesai, ujian slump flow dijalankan mengikut piawaian ASTM C1611 bagi menilai keboleherjaan serta sifat pemadatan sendiri SCC. Julat aliran sasaran ditetapkan antara 500–700 mm dalam tempoh 3–7 saat, yang menunjukkan bahawa campuran mempunyai tahap kebolehan ubah bentuk yang mencukupi sambil kekal stabil tanpa berlakunya pengasingan bahan. Ujian slump flow merupakan langkah kawalan kualiti yang penting dalam reka bentuk SCC kerana ia menunjukkan keupayaan konkrit untuk memenuhi acuan di bawah beratnya sendiri sambil mengekalkan konsistensi yang seragam. Jika sebaran aliran berada dalam julat yang ditetapkan, campuran tersebut dianggap sesuai untuk kerja penuangan tanpa memerlukan pemadatan mekanikal tambahan.

Setelah SCC baru memenuhi kriteria slump flow yang ditetapkan, campuran tersebut segera dituangkan ke dalam acuan. Berbeza dengan konkrit konvensional, SCC tidak memerlukan getaran atau pemadatan manual kerana ia direka khusus untuk mengalir secara bebas dan memenuhi ruang acuan sambil membaluti tetulang dengan sempurna. Sifat meratakan sendiri ini meningkatkan kecekapan pembinaan, mengurangkan keperluan tenaga kerja, serta meminimumkan kecacatan seperti rongga udara atau honeycombing. Dengan mengikuti prosedur pencampuran yang teliti serta memastikan pematuhan terhadap ujian keboleherjaan piawai, campuran SCC berjaya disediakan untuk proses pengawetan (*curing*) dan penilaian prestasi seterusnya.

Bagi menilai prestasi SCC yang mengandungi RCA dan UPOFA, satu siri ujian telah dijalankan mengikut prosedur piawai yang ditetapkan. Ujian-ujian ini bertujuan untuk menilai sifat konkrit baru dan konkrit mengeras, sekali gus memastikan campuran yang dihasilkan mematuhi piawaian industri.

Ujian slump flow yang dijalankan mengikut piawaian ASTM C1611 (ASTM C1611, 2018) digunakan untuk menentukan tahap keboleherjaan dan kebolehaliran campuran SCC. Dalam ujian ini, kon Abrams standard diletakkan di atas permukaan rata dan konkrit segar dituangkan ke dalam kon tanpa sebarang getaran atau pemadatan luaran. Selepas kon diangkat, konkrit akan merebak semula jadi di bawah beratnya sendiri. Diameter sebaran konkrit kemudian diukur dalam dua arah yang saling berserenjang, dan nilai purata direkodkan. Julat sasaran bagi campuran konkrit pemadatan sendiri ditetapkan antara 500–700 mm dalam tempoh 3–7 saat, bagi memastikan konkrit mempunyai tahap kebolehubah bentuk yang mencukupi sambil mengekalkan kestabilan tanpa berlakunya pengasingan bahan.

Bagi ujian kekuatan mampatan, piawaian BS EN 12390-3:2019 (British Standard Institution, 2019) telah digunakan. Kiub konkrit bersaiz 100 mm × 100 mm × 100 mm disediakan dan diawet dalam

air pada suhu terkawal sehingga mencapai hari ujian yang ditetapkan iaitu 7 dan 28 hari (Manap et al., 2024). Sebelum ujian dijalankan, lebih kelembapan pada permukaan sampel dibuang dan spesimen diletakkan di dalam mesin ujian mampatan. Beban paksi yang seragam dikenakan pada kadar tertentu sehingga kegagalan berlaku, dan beban maksimum yang direkodkan digunakan untuk menentukan kekuatan mampatan konkrit. Ujian ini memberikan gambaran tentang keupayaan galas beban campuran SCC serta perkembangan kekuatannya mengikut masa.

Ujian kekuatan lentur yang dijalankan berdasarkan piawaian BS EN 12504-2:2021 ((British Standard Institution, 2021) bertujuan untuk menilai keupayaan konkrit menahan daya lenturan. Spesimen rasuk konkrit dibina dan dikenakan ujian beban tiga titik (three-point loading test). Beban dikenakan secara berperingkat pada kadar yang seragam sehingga kegagalan berlaku, dan daya maksimum yang diperlukan untuk mematahkan rasuk direkodkan. Keputusan ujian ini memberikan gambaran tentang integriti struktur dan ketahanan campuran SCC, khususnya dalam aplikasi di mana elemen konkrit terdedah kepada tegasan lenturan.

Melalui pelaksanaan ujian-ujian ini, satu penilaian menyeluruh terhadap sifat konkrit segar dan konkrit mengeras bagi campuran SCC dapat dilakukan. Dapatan kajian memberikan maklumat penting berkaitan kekuatan mekanikal, ketahanan, serta kebolehkeraan konkrit, sekali gus memastikan kesesuaiannya untuk aplikasi pembinaan yang lebih mampan.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

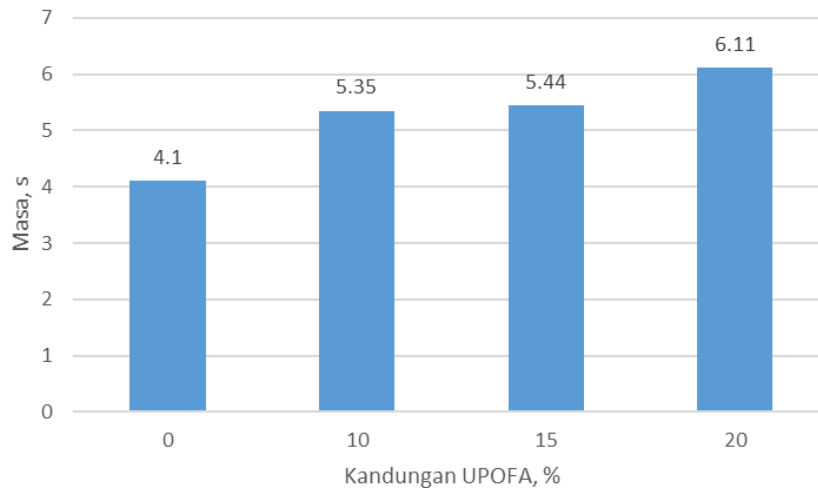
Ujian Aliran Turun

Keputusan masa aliran runtuh (slump flow time) bagi SCC yang menggunakan 100% agregat kasar kitar semula ditunjukkan dalam Rajah 1. Keputusan menunjukkan peningkatan masa aliran selari dengan pertambahan kandungan UPOFA.

Bagi campuran kawalan (0% UPOFA), masa aliran runtuh direkodkan paling rendah iaitu 4.10 saat, menunjukkan kebolehkeraan yang baik dengan kelikatan yang rendah. Apabila 10% UPOFA ditambah, masa aliran meningkat kepada 5.35 saat, menandakan peningkatan kelikatan campuran. Trend ini berterusan bagi 15% UPOFA, dengan masa aliran sedikit meningkat kepada 5.44 saat. Peningkatan paling ketara diperhatikan pada 20% UPOFA, di mana masa aliran mencapai 6.11 saat, iaitu nilai tertinggi antara semua campuran.

Secara keseluruhan, peningkatan masa aliran runtuh ini menunjukkan bahawa penambahan UPOFA menyebabkan campuran menjadi lebih likat dan kurang mengalir dengan pantas. Fenomena ini boleh dikaitkan dengan sifat ultra halus UPOFA yang meningkatkan luas permukaan spesifik, seterusnya meningkatkan keperluan air dan rintangan terhadap aliran. Selain itu, UPOFA bertindak sebagai bahan pengisi mikro (micro filler) yang meningkatkan kepadatan zarah, sekali gus mengurangkan ruang bebas untuk pergerakan campuran.

Walaupun masa aliran meningkat, semua nilai yang diperoleh (4.10–6.11 saat) masih berada dalam julat yang boleh diterima untuk SCC, menunjukkan bahawa campuran masih mengekalkan kebolehkeraan yang baik walaupun menggunakan 100% agregat kasar kitar semula. Ini membuktikan bahawa penggunaan UPOFA tidak menjejaskan kebolehkeraan secara kritikal, sebaliknya membantu meningkatkan kestabilan dan kohesi campuran SCC.



Rajah 1: Kesan kandungan UPOFA terhadap masa aliran turun

Ujian Mekanikal

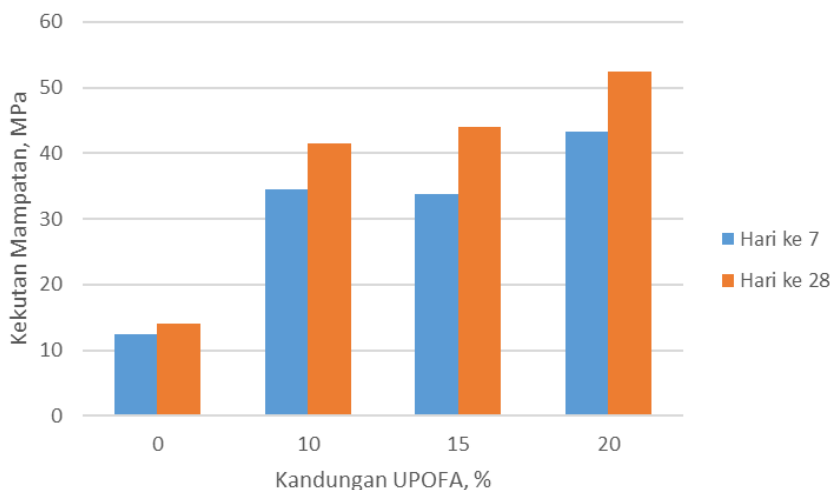
Kekuatan Mampatan

Keputusan ujian kekuatan mampatan bagi konkrit yang menggunakan agregat kitar semula mampat sendiri (SCRAC) dengan kandungan UPOFA 0%, 10%, 15% dan 20% seperti dalam Rajah 2 menunjukkan peningkatan prestasi yang jelas dengan pertambahan peratusan UPOFA, khususnya pada umur 28 hari.

Pada umur 7 hari, campuran kawalan (0% UPOFA) mencatatkan kekuatan paling rendah iaitu sekitar 12–13 MPa. Apabila 10% UPOFA ditambah, kekuatan meningkat dengan ketara kepada kira-kira 34–35 MPa. Walau bagaimanapun, peningkatan ini tidak berterusan secara linear apabila kandungan ditingkatkan kepada 15%, di mana kekuatan sedikit menurun kepada sekitar 33–34 MPa. Seterusnya, campuran dengan 20% UPOFA menunjukkan peningkatan semula dan mencapai kekuatan tertinggi pada umur awal iaitu sekitar 43 MPa. Secara keseluruhan, keputusan ini menunjukkan bahawa UPOFA mula memberikan kesan positif terhadap kekuatan awal apabila kandungannya melebihi 10%.

Bagi umur 28 hari, trend peningkatan kekuatan adalah lebih konsisten dan ketara. Campuran 0% UPOFA kekal dengan kekuatan terendah, sekitar 14 MPa. Dengan 10% UPOFA, kekuatan meningkat dengan signifikan kepada kira-kira 41 MPa. Peningkatan berterusan diperhatikan bagi campuran 15% UPOFA yang mencapai sekitar 44 MPa, dan nilai tertinggi direkodkan oleh campuran 20% UPOFA iaitu sekitar 52 MPa. Ini menunjukkan bahawa pada umur matang, kesan pozzolan UPOFA menjadi lebih dominan dan menyumbang secara signifikan kepada peningkatan kekuatan.

Secara keseluruhannya, dapatan ini menunjukkan bahawa peningkatan kandungan UPOFA sehingga 20% memberikan kesan positif terhadap kekuatan mampatan konkrit, terutamanya pada umur 28 hari. Ini membuktikan bahawa UPOFA bukan sahaja bertindak sebagai bahan pengganti simen, malah meningkatkan prestasi mekanikal konkrit melalui tindak balas pozzolan dan kesan pengisian mikro yang memperbaiki struktur dalaman konkrit.



Rajah 2: Kekuatan mampatan SCRAC dengan kandungan UPOFA pada usia 7 dan 28 hari.

Ujian Lenturan

Berdasarkan Rajah 3, kekuatan lenturan SCRAC menunjukkan trend peningkatan yang konsisten apabila kandungan UPOFA dinaikkan daripada 0% hingga 20%. Nilai kekuatan lenturan yang direkodkan adalah sekitar 4.1 MPa bagi campuran kawalan (0% UPOFA), meningkat kepada 6.3 MPa pada 10% UPOFA, seterusnya 6.5 MPa pada 15% UPOFA, dan mencapai nilai tertinggi sekitar 7.2 MPa pada 20% UPOFA. Secara keseluruhan, keputusan ini menunjukkan bahawa penggunaan UPOFA memberi kesan positif terhadap prestasi lenturan SCRAC.

Bagi campuran kawalan tanpa UPOFA, nilai kekuatan lenturan yang paling rendah menunjukkan bahawa matriks konkrit dan zon peralihan antara muka atau *Interface Zone* (ITZ) dalam campuran ini masih kurang padat. Hal ini lazim bagi konkrit yang menggunakan agregat kitar semula kerana agregat tersebut biasanya mempunyai mortar lama yang masih melekat, lebih berliang, dan menyumbang kepada ikatan antara pes simen dengan agregat yang kurang optimum. Akibatnya, apabila beban lenturan dikenakan, retakan lebih mudah terhasil dan merebak, lalu menyebabkan kapasiti lenturan lebih rendah.

Apabila 10% UPOFA digunakan, berlaku peningkatan yang sangat ketara dalam kekuatan lenturan, iaitu daripada sekitar 4.1 MPa kepada 6.3 MPa. Peningkatan ini menunjukkan bahawa pada aras penggantian ini, UPOFA telah mula bertindak balas dengan berkesan sebagai bahan pozzolan dan juga bahan pengisi halus. Saiz partikel UPOFA yang sangat halus akan mengisi liang-liang halus dalam pes simen dan ITZ, menjadikan mikrostruktur konkrit lebih padat. Pada masa yang sama, tindak balas pozzolanik antara silika amorfus dalam UPOFA dengan kalsium hidroksida yang terhasil daripada penghidratan simen membentuk lebih banyak gel C-S-H tambahan. Pembentukan C-S-H tambahan ini memperkukuh ikatan dalaman konkrit dan meningkatkan rintangan terhadap tegasan lenturan. Ini menjelaskan mengapa peningkatan terbesar berlaku pada peralihan daripada 0% kepada 10%.

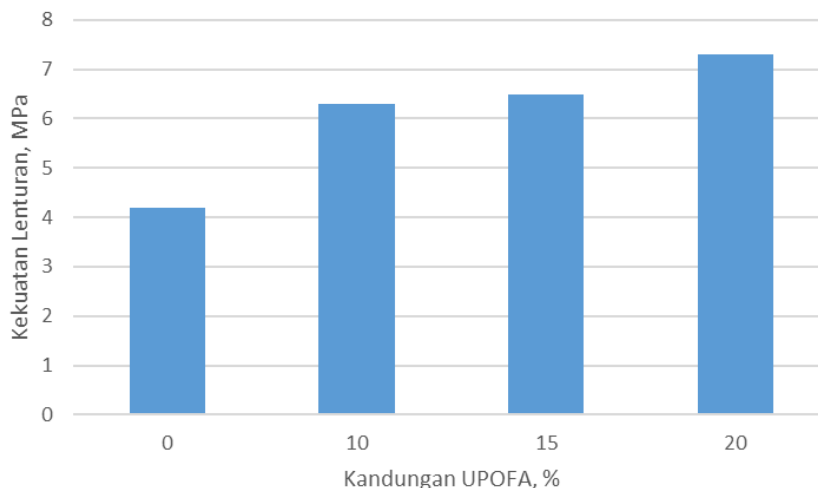
Bagi campuran dengan 15% UPOFA, kekuatan lenturan terus meningkat sedikit kepada sekitar 6.5 MPa. Walaupun peningkatan ini tidak setinggi yang diperoleh pada 10%, ia masih menunjukkan bahawa penambahan UPOFA dapat memperbaiki struktur dalaman SCRAC. Pada tahap ini, kesan pengisian dan tindak balas pozzolanik masih menyumbang secara positif, namun kadar peningkatannya mula menjadi lebih perlahan. Ini mungkin kerana sebahagian besar ruang liang kritikal telah pun dipadatkan pada kandungan 10%, maka manfaat tambahan pada 15% menjadi lebih marginal. Namun begitu, peningkatan ini tetap penting kerana ia menandakan bahawa UPOFA tidak menjejaskan kapasiti lenturan, malah terus memperbaikinya.

Campuran dengan 20% UPOFA merekodkan kekuatan lenturan tertinggi, iaitu sekitar 7.2 MPa. Keputusan ini sangat signifikan kerana ia menunjukkan bahawa sehingga 20% penggantian, UPOFA masih mampu meningkatkan prestasi lenturan SCRAC secara berkesan. Nilai ini menunjukkan bahawa gabungan kesan pengisian mikro, penambahbaikan ITZ, dan pembentukan produk pozzolanik sekunder telah menghasilkan matriks konkrit yang lebih tumpat dan lebih kukuh. Dalam konteks lenturan, konkrit memerlukan keupayaan yang baik untuk menahan tegasan tegangan pada bahagian bawah elemen seperti rasuk. Oleh sebab UPOFA membantu mengurangkan kecacatan mikro dan memperbaiki ikatan pes-agregat, penyebaran retakan dapat diperlahankan, lalu meningkatkan kapasiti lenturan keseluruhan.

Jika dibandingkan secara relatif, peningkatan daripada 0% kepada 20% UPOFA adalah sangat besar, iaitu lebih kurang 75%. Ini menunjukkan bahawa UPOFA mempunyai potensi yang sangat baik sebagai bahan tambahan mineral dalam SCRAC, khususnya untuk meningkatkan sifat mekanikal yang berkaitan dengan kawalan retakan dan keutuhan struktur. Dalam konkrit yang menggunakan agregat kitar semula, aspek ini amat penting kerana kelemahan utama RAC biasanya berkait dengan kerapuhan ITZ dan porositi yang lebih tinggi. Oleh itu, penggunaan UPOFA dilihat berjaya mengimbangi kelemahan tersebut.

Daripada sudut kejuruteraan bahan, peningkatan kekuatan lenturan ini juga menunjukkan bahawa UPOFA bukan sekadar menyumbang kepada kekuatan mampatan, tetapi turut memperbaiki tingkah laku konkrit di bawah beban lenturan. Ini penting kerana kekuatan lenturan sering dikaitkan dengan ketahanan terhadap keretakan awal, prestasi permukaan, dan keupayaan elemen konkrit menahan beban perkhidmatan. Dengan kata lain, SCRAC yang mengandungi UPOFA berpotensi memberikan prestasi struktur yang lebih baik berbanding campuran tanpa UPOFA.

Secara keseluruhannya, rajah ini membuktikan bahawa penambahan UPOFA daripada 0% hingga 20% memberi kesan positif dan progresif terhadap kekuatan lenturan SCRAC. Kandungan 20% UPOFA menghasilkan prestasi terbaik, manakala 10% hingga 15% juga menunjukkan peningkatan yang jelas berbanding campuran kawalan. Keputusan ini mengesahkan bahawa UPOFA berfungsi secara efektif dalam memperbaiki mikrostruktur, memadatkan matriks, menguatkan ITZ, dan seterusnya meningkatkan keupayaan SCRAC menahan beban lenturan. Dari perspektif kelestarian, dapatan ini juga sangat bernilai kerana ia menunjukkan bahawa bahan buangan agroindustri seperti UPOFA boleh dimanfaatkan untuk menghasilkan konkrit mampan dengan prestasi mekanikal yang lebih baik.



Rajah 3: Kekuatan lenturan SCRAC dengan kandungan UPOFA berbeza.

KESIMPULAN

Kajian ini telah berjaya menilai kebolehlaksanaan penggunaan Ultra-Fine Palm Oil Fuel Ash (UPOFA) sebagai penggantian separa simen dalam self-compacting recycled aggregate concrete (SCRAC) yang menggunakan 100% agregat kasar kitar semula, dengan fokus terhadap kebolehkerjaan serta prestasi mekanikal konkrit.

Dari aspek kebolehkerjaan, keputusan ujian slump flow menunjukkan bahawa peningkatan kandungan UPOFA daripada 0% kepada 20% telah meningkatkan masa aliran runtuh daripada 4.10 s kepada 6.11 s, iaitu peningkatan sekitar 49%. Walaupun berlaku peningkatan kelikatan, semua campuran masih berada dalam julat piawai SCC (3–7 saat), membuktikan bahawa penggunaan sehingga 20% UPOFA masih mengekalkan kebolehkerjaan yang boleh diterima tanpa berlakunya pengasingan bahan. Ini menunjukkan bahawa UPOFA menyumbang kepada peningkatan kohesi dan kestabilan campuran SCC.

Bagi prestasi mekanikal, kekuatan mampatan menunjukkan peningkatan yang signifikan dengan pertambahan kandungan UPOFA. Pada umur 7 hari, kekuatan meningkat daripada sekitar 12–13 MPa (0% UPOFA) kepada kira-kira 43 MPa (20% UPOFA), iaitu peningkatan melebihi 200%. Pada umur 28 hari, peningkatan yang lebih konsisten diperhatikan, di mana kekuatan mampatan meningkat daripada sekitar 14 MPa kepada 52 MPa, bersamaan peningkatan kira-kira 270%. Keputusan ini mengesahkan bahawa tindak balas pozzolanik UPOFA menjadi lebih dominan pada umur matang dan menyumbang

kepada pembentukan gel C–S–H tambahan yang meningkatkan ketumpatan dan kekuatan matriks konkrit.

Dari segi kekuatan lenturan, peningkatan yang berterusan turut diperhatikan apabila kandungan UPOFA dinaikkan. Nilai kekuatan lenturan meningkat daripada sekitar 4.1 MPa (0% UPOFA) kepada 7.2 MPa (20% UPOFA), iaitu peningkatan kira-kira 75%. Peningkatan ini menunjukkan bahawa UPOFA berkesan dalam memperbaiki zon peralihan antara muka (ITZ), mengurangkan perambatan retakan mikro, serta meningkatkan keupayaan konkrit menahan tegasan lenturan.

Secara keseluruhannya, keputusan kajian ini menunjukkan bahawa penggunaan UPOFA sebagai pengganti simen sehingga 20% dalam SCRAC bukan sahaja mengekalkan keboleherjaan dalam julat piawaian, malah meningkatkan kekuatan mampatan dan lenturan secara signifikan. Kandungan 20% UPOFA dikenal pasti sebagai tahap optimum dalam kajian ini, memberikan prestasi mekanikal tertinggi tanpa menjejaskan sifat SCC.

Dari perspektif kelestarian, kajian ini membuktikan bahawa gabungan penggunaan UPOFA dan 100% agregat kitar semula mampu menghasilkan konkrit mampat sendiri yang berprestasi tinggi, sekali gus mengurangkan penggunaan simen Portland dan agregat semula jadi. Oleh itu, pendekatan ini berpotensi besar sebagai alternatif bahan binaan lestari dalam industri pembinaan moden.

Penghargaan

Penghargaan kepada Universiti Sains Malaysia, Geran Jangka Pendek dengan No. Projek: R501-LR-RND002-0000001037-0000

Rujukan

1. Akhtam H. Alani, M. Azmi Megat Johari, A. Tareq Noaman, N. Muhamad Bunnori, T.A. Majid (2022). Effect of the incorporation of PET fiber and ternary blended binder on the flexural and tensile behaviour of ultra-high performance green concrete. *Construction and Building Materials*, 331, 127306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127306>
2. ASTM International. (2005). *ASTM C1611/C1611M-05: Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete*. ASTM International.
3. British Standards Institution. (2019). *BS EN 12390-3:2019. Testing hardened concrete—Part 3: Compressive strength of test specimens*. BSI Standards Publication.
4. British Standards Institution. (2021). *BS EN 12504-2:2021. Testing concrete in structures—Part 2: Non-destructive testing—Determination of rebound number*. BSI Standards Publication.
5. Dabbour, B. S. A., Mohd Zahid, M. Z. A., Abu Bakar, B. H., & Rahman, N. A. (2026). *Effect of rubber content on the mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete reinforced with steel fibres and modified with silica fume*. *Journal of Building Engineering*, 123, 115805. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2026.115805>
6. Hou, M., Zhong, Y., & Hansen, W. (2025). Correlating frost durability and liquid transport properties of concrete with a modified penetration depth model: Effect of aggregate, water/cementitious ratio, and supplementary cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04597. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04597>
7. International Energy Agency, & World Business Council for Sustainable Development. (2018). *Technology roadmap: Low-carbon transition in the cement industry*. International Energy Agency.
8. Karthik, S., Srinivasnaik, M., Kasirajan, G., Kumar, R. S., Govindarajan, S., & Sethu Ramalingam, P. (2024). Evaluation of the mechanical performance and durability of concrete using reinforced cement concrete in the partial replacement of coarse and fine aggregates. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.05.123>
9. Mandal, R., Panda, S. K., & Nayak, S. (2024). Evaluation of rheological properties of sustainable self-compacting recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach. *Journal of Building Engineering*, 87. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109126>
10. Ozawa K., Maekawa K., and Okamura H., (1989). Development of the high-performance concrete, *Proceedings of JSI*, 1989, 11, 1, p. 699-704.

