



Original Article

High-Performance Cementitious Composites Made with Rice Husk Ash as Partial Replacement of Cement Containing Nano Additives *Komposit Simen Berkekuatan Tinggi Dibuat dengan Abu Sekam Padi Sebagai Pengganti Separa Simen yang Mengandungi Bahan Tambah Nano*



Khiew Maggie¹, Cheah Chee Ban^{*1}

¹ School of Housing, Building and Planning, Universiti Sains Malaysia, 11800 Penang, Malaysia

* Correspondence email: cheahcheeban@usm.my

Abstract

This research was to compare rice husk ash (RHA) concrete with which nano additives is better to maintain or enhance its workability and mechanical properties. RHA were used as partial replacement material of cement containing nano additives (Nano Silica and X-Seed XTE). In this study, the amount of RHA remained constant at the replacement dosage of 40% by binder weight throughout the experiment while NS additives was utilized at the replacement level of 5%, 7.5% and 10% whereas X-Seed STE was 0.2%, 0.4% and 0.6%. On the other hand, the w/c ratio and s/b ratio were 0.32 and 1.00 respectively. 7 different mix design were tested at the curing age of 2 days, 7 days and 28 days. Various tests were conducted to determine the mechanical and durability properties of these specimens such as flow table test, compressive strength test, flexural strength test, water absorption test, total porosity test and so on. Additionally, digital microscope analysis also conducted to determine the microstructural behavior of RHA concrete containing nano additives.

Copyright © 2025 KARYA ILMU PUBLISHING - All rights reserved

Article Info

Received 07 December 2024

Received in revised form 25 March 2025

Accepted 12 April 2025

Available online 18 May 2025

Keywords

Rice Husk Ash (RHA)
High Performance
Cementitious Composite
Nano silica (NS), XSeed STE
(XS)Kecacatan Bangunan
Faktor Klimatik
Penyelenggaraan
Kerosotan
Kelembapan

Abstrak

Kajian ini bertujuan untuk membandingkan konkrit abu sekam padi (RHA) dengan tambahan nano yang lebih untuk mengekalkan atau meningkatkan keliatan kerja dan sifat mekanikalnya. RHA digunakan sebagai bahan pengganti separa bagi simen yang mengandungi tambahan nano (Nano Silika dan X-Seed XTE). Melalui kajian ini, jumlah RHA telah dikekalkan dengan dos penggantian 40% berat pengikat sepanjang eksperimen manakala tambahan NS digunakan pada tahap penggantian 5%, 7.5% dan 10% manakala X-Seed XTE adalah 0.2%, 0.4% dan 0.6%. Selain itu, nisbah air dan nisbah pasir merupakan 0.32 dan 1.00 masing-masing. 7 spesimen yang

berbeza telah diuji pada 2 hari, 7 hari dan 28 hari. Pelbagai ujian dijalankan untuk menentukan sifat-sifat mekanikal dan tahan lama spesimen ini seperti ujian meja aliran, ujian kekuatan mampatan, ujian kekuatan lentur, ujian penyerapan air, ujian porositi total dan lain-lain. Tambahan pula, analisis menggunakan mikroskop digital juga dijalankan untuk menentukan tingkah laku mikrostruktur konkrit RHA yang mengandungi bahan tambah nano.

Copyright © 2025 KARYA ILMU PUBLISHING - All rights reserved

1. Pengenalan

Sebagai sebuah negara membangun, Malaysia telah menyaksikan pertumbuhan penduduk yang ketara, peningkatan taraf hidup, dan peningkatan urbanisasi. Kesannya, terdapat keperluan yang tinggi terhadap bahan binaan dan sumber makanan. Simen merupakan bahan pengikat yang banyak digunakan dan penting dalam bidang pembinaan. Pengeluaran simen adalah satu proses yang mahal kerana memerlukan tenaga yang tinggi, menghabiskan sumber semula jadi, dan menghasilkan pelepasan CO₂ yang ketara [1]. Terdapat satu kajian telah menunjukkan bahawa penghasilan satu tan simen melepaskan kira-kira satu tan CO₂, termasuklah pelepasan langsung dan tidak langsung [2]. Selain itu, Kullman [3] juga berpendapat bahawa sekitar 0.8 hingga 0.9 tan karbon dioksida dilepaskan bagi setiap tan simen yang menyumbang kira-kira 25% daripada jumlah jejak karbon dalam sektor pembinaan dan sekitar 8% daripada jumlah pelepasan CO₂ yang disebabkan oleh manusia di dunia. Oleh itu, industri pembinaan menyumbang antara 5 hingga 7% daripada jumlah pelepasan karbon dunia, menjadikannya penyumbang ketiga terbesar kepada gas rumah hijau [4].

Menjelang 2050, permintaan sumber makanan dijangka meningkat antara 59% hingga 98% [5]. Perkembangan tanaman secara meluas telah menghasilkan sejumlah besar sisa pertanian dan membangkitkan kebimbangan alam sekitar. Beras merupakan makanan asas utama penduduk Malaysia. Pengeluaran beras tahunan Malaysia telah melebihi 1.55 juta tan dan seterusnya memenuhi kira-kira 73% permintaan tempatan [6]. Dalam proses pengisar padi, tiga perempat daripada jumlah berat diperoleh dalam bentuk dedak, beras pecah, dan beras menurut Singh [7]. Hanya 22% berat padi diekstrak sebagai sekam.

Sekam padi merupakan sisa pertanian yang melimpah, menimbulkan masalah persekitaran yang ketara. Biasanya, sekam padi dibakar di ruang terbuka atau dilupuskan di tapak pembuangan sampah. Walau bagaimanapun, kedua-dua kaedah ini melepaskan sejumlah besar karbon dioksida (CO₂) ke atmosfera [1].

Sehubungan itu, terdapat permintaan yang semakin meningkat terhadap penyelesaian mesra alam bagi mengurangkan isu persekitaran dalam industri pembinaan. Dalam dekad kebelakangan ini, komponen tambahan simen yang berasal daripada abu sekam padi telah digunakan untuk menggantikan sebahagian simen dalam pelbagai projek pembinaan. Hu et al. [8] menunjukkan kekuatan mampatan bahan berasaskan simen dapat ditingkatkan dengan ketara apabila memasukkan abu sekam padi.

Nano silika (NS) pula merupakan bahan pozzolan yang sangat reaktif dan berkesan. Nanomaterial ini sebahagian besarnya terdiri daripada silika (SiO₂) dengan tahap kemurnian 99.5%. Disebabkan saiz zarah nanometer, NS telah mendapat perhatian penyelidik yang ingin menggabungkan bahan tambah nano dalam bahan seperti pastanya dan konkrit. Konkrit yang dibuat dengan nano-silika menggantikan simen adalah lebih mesra alam, kurang mahal, dan mempunyai jejak karbon yang lebih rendah. Penyelidik telah mempertimbangkan nano-silika sebagai pengisi mineral kerana gelagat yang lebih baik, taburan saiz zarah, pengurangan ketelapan konkrit, dan tindak balas kimia pozzolan yang dipertingkatkan untuk membentuk kalsium-silikat hidroksida menggunakan kalsium hidroksida [9]. Anto et al. [10] mencadangkan kesan 3% NS terhadap kekuatan mampatan campuran berasaskan OPC

dengan 10% RHA. Selepas 28 hari penghidratan, campuran menunjukkan kekuatan mampatan dan lenturan tertinggi. Ia turut menunjukkan penurunan penyerapan air dan kehilangan jisim apabila terdedah kepada serangan asid selepas 28 hari.

Tambahan pula, bahan yang dikenali sebagai X-Seed STE kini menjadi topik hangat dalam kalangan jurutera. X-Seed STE adalah bahan tambah peningkat kekuatan inovatif yang mampu meningkatkan perkembangan kekuatan awal dan lewat konkrit sambil menghadkan pelepasan CO₂. Teknik baharu ini berdasarkan teknologi penuaian X-Seed BASF, digunakan untuk mempercepatkan pengukuhan konkrit dan meningkatkan penghidratan simen. X-Seed STE turut meningkatkan prestasi dan pertumbuhan kekuatan konkrit [11]. Menurut Bagade [12], faktor keselamatan kekuatan sehingga 15% dapat dicapai dengan bahan tambah Master X-Seed STE. Pengeluar konkrit boleh mengubah susunan simen dan meningkatkan prestasi mana-mana campuran konkrit dengan menggunakan bahan tambah ini. Hasilnya, acuan boleh dialih lebih awal, seterusnya meningkatkan kecekapan pengeluaran.

Justeru, kajian kebolehlaksanaan komposit simen berkinerja tinggi yang mengandungi abu sekam padi dan nano silika sebagai bahan tambah memberikan beberapa kelebihan, termasuk aktiviti pozzolan yang dipertingkatkan, pengurangan keperluan air, pengembangan kekuatan awal yang dipercepatkan, dan daya tahan yang lebih baik. Penyelidikan ini mengkaji keberkesanan nano silika dan X-Seed STE sebagai bahan tambah dalam OPC yang digantikan sebahagiannya dengan RHA, bertujuan menentukan yang mana menghasilkan komposit simen berkekuatan tinggi yang unggul.

2. Metodologi

Dalam kajian ini, Abu Sekam Padi (RHA) digunakan sebagai pengganti separa simen. Graviti tentu simen, RHA dan tanah ditentukan berdasarkan ASTM C184-94. Enam proporsi campuran mortar ditetapkan, termasuk spesimen kawalan (100% simen), menggunakan nisbah air-kepada-pengikat 0.32 dan nisbah pasir-kepada-pengikat 1.00 yang disediakan di makmal. Tahap penggantian simen dengan RHA ditetapkan pada 40%, manakala jumlah bahan tambah nano silika dan X-Seed STE bervariasi antara 5% hingga 10% dan 0.03% hingga 0.07% masing-masing.

Bagi campuran RHA-NS dan RHA-X-Seed STE, simen ditetapkan pada 60% manakala RHA menggantikan simen sebanyak 40%. Pertama, RHA dikeringkan dalam ketuhar selama 8 jam. Kemudian, RHA dikisar menggunakan pengisar bebola dengan nisbah 1:10 pada kelajuan 250 rpm selama 45 minit untuk memperoleh RHA bertaraf halus. Sampel dibuat dengan menggabungkan simen, RHA, NS, X-Seed STE dan pasir sungai secara manual untuk menghasilkan campuran homogen. Superplastisizer Master Glenium ACE 8109 ditambahkan pada 1.8% daripada jisim pengikat dalam pastanya.

Ujian kekuatan mampatan dan kekuatan lenturan dijalankan menggunakan acuan prisma berukuran 40mm x 40mm x 160mm untuk spesimen mortar, dengan penilaian pada hari ke-2, 7, dan 28 mengikut standard ASTM C349-14. Tambahan pula, spesimen segiempat berukuran 100mm x 100mm x 100mm dibuat untuk menjalankan ujian halaju denyut ultrasonik. Seterusnya, ujian penyerapan air dan keporosan total dilakukan ke atas spesimen berbentuk silinder berdiameter 75mm dan 50mm masing-masing. Selang ujian yang sama iaitu 2, 7, dan 28 hari digunakan untuk kesemua spesimen.

2.1. Penyediaan Bahan

2.1.1. Simen Portland Biasa

Simen Portland Biasa (OPC) merupakan pengikat utama dalam penghasilan konkrit, digunakan meluas dalam projek pembinaan merentasi pelbagai sektor, termasuk kediaman, komersial dan industri. Mengikut standard ASTM C150, lima jenis OPC simen dapat dikenal pasti: Jenis I, II, III, IV dan V.

Jenis I OPC biasanya dirujuk sebagai simen biasa atau serbaguna. Ia lazimnya dianggap standard melainkan dinyatakan sebaliknya. Dalam kajian ini, Simen Portland Biasa Jenis I (OPC) dari Hume Cement Industries Berhad digunakan seperti yang ditunjukkan dalam [Rajah 1](#). OPC mematuhi spesifikasi standard MS EN 197-1:2000, dikategorikan khusus sebagai CEM I. Tambahan pula, graviti tentu dan luas permukaan khusus OPC masing-masing adalah 3.17 dan 3332 cm²/g. Komposisi kimia OPC Jenis I ditunjukkan dalam [Jadual 1](#).

Jadual 1: Komposisi Kimia OPC Jenis I [13].

SEBATIAN KIMIA	% MENGIKUT JUMLAH JISIM
MgO	0.90
Al ₂ O ₃	4.37
SiO ₂	19.06
P ₂ O ₅	0.10
SO ₃	4.02
K ₂ O	0.94
CaO	54.46
TiO ₂	0.24
MnO	0.05
Fe ₂ O ₃	3.93
Na ₂ O	0.05

2.1.2. Abu Sekam Padi (RHA)

Abu Sekam Padi (RHA) merupakan produk sampingan pertanian yang mudah diakses dan mapan, diperoleh daripada penggilingan beras di negara pengeluar beras. RHA terhasil daripada pembakaran sekam padi, produk sampingan agroindustri yang mengandungi sejumlah besar silika, sekitar 85% - 90%. Dalam kajian penyelidikan ini, RHA tidak dibakar dan berwarna hitam sepenuhnya. [Rajah 1](#) dan [Rajah 2](#) menunjukkan perbezaan antara RHA yang tidak dikisar dan RHA bertaraf halus masing-masing.



Rajah 1: RHA Tidak Dikisar.



Rajah 2: RHA Bertaraf Halus.

Untuk mencapai RHA bertaraf halus, RHA dikeringkan dalam ketuhar selama 24 jam dan dikisar menggunakan pengisar bebola selama 45 minit. Nisbah RHA kepada bebola keluli yang digunakan adalah 1:10. Selanjutnya, graviti tentu RHA ditentukan mengikut standard ASTM C188 – 14. Graviti tentu RHA adalah 2.21 kg/m³ manakala luas permukaan khusus ialah 7968 cm²/g. [Jadual 2](#) memaparkan komposisi kimia RHA yang dianalisis menggunakan XRF.

Jadual 2: Komposisi Kimia RHA.

SEBATIAN KIMIA	% MENGIKUT JUMLAH JISIM
SiO ₂	80.391
TiO ₂	0.004
Al ₂ O ₃	0.087
Fe ₂ O ₃	0.154
MnO	0.009
MgO	0.487
CaO	0.501
Na ₂ O	0.031
K ₂ O	2.777
P ₂ O ₅	0.869

2.1.3. Nano Silika (NS)

Dengan kerentanan pozzolan dan kesan pengisian liang, nano silika merupakan bahan nano yang paling kerap digunakan untuk meningkatkan prestasi simen dan konkrit. Secara umum, nano silika dihasilkan daripada zarah silika pada skala mikron. Graviti tentu nano silika diukur mengikut standard ASTM C188-14. Menurut Tan et al. [14], [Jadual 3](#) mengandungi butiran komposisi kimia bahan tambah NS.

2.1.4. X-Seed STE

Bahan nano lain dalam kajian ini ialah X-Seed STE. Bahan tambah peningkat kekuatan, X-Seed STE meningkatkan kekuatan awal dan penuaan konkrit. X-Seed STE mempunyai pelbagai faedah termasuk membaiki hidrasi simen, mempertingkatkan pembangunan kekuatan serta mengurangkan haba hidrasi melalui pengurangan kandungan simentasi.

2.1.5. Pasir Sungai dan Air Bancuhan

Dalam kajian ini, pasir sungai digunakan sebagai agregat halus untuk penyediaan spesimen mortar. Pasir dicuci secara menyeluruh sehingga air basuhan kekal jernih. Kemudian, pasir ditapis melalui

ayakan ujian BS 410 berukuran 5mm bagi menyingkirkan habuk dan partikel kasar. Pasir yang ditapis dikeringkan selama tiga hari sebelum pembentukan spesimen mortar. Graviti khusus pasir dan air bancuhan masing-masing ialah 2.62 dan 1.0.

2.1.6. Superplasticizer Master Glenium ACE 8109

Superplastisizer yang digunakan dalam kajian ini ialah Master Glenium ACE 8109. Master Glenium ACE 8109 merupakan superplastisizer eter polikarbosilat (PCE) termaju yang meningkatkan pembangunan kekuatan konkrit pada peringkat awal dan lanjut. Teknologi retensi super inovatifnya mengekalkan keboleherjaan yang dipanjangkan tanpa mengorbankan sifat kekuatan muktamad, menjadikannya sesuai untuk aplikasi konkrit pracetak dan konkrit bancuhan sedia (RMC). Bahan tambah ini menunjukkan prestasi unggul dalam pengekal kelunciran dan peningkatan kekuatan mampatan, serta memudahkan penghasilan konkrit reoplastik dan swapengukuhan (SCC) pada nisbah air simen yang rendah. Formulasinya mempamerkan keserasian dengan pelbagai bahan tambah konkrit, termasuk agen pengubah kelikatan dan bahan tambah pengekal udara, yang membolehkan peningkatan rintangan beku-cair. Tambahan pula, komposisi tidak berbahaya memastikan pelaksanaan selamat apabila protokol keselamatan yang betul dipatuhi, seperti penggunaan alat perlindungan peribadi termasuk sarung tangan dan goggles keselamatan.

Jadual 3: Komposisi Kimia Nano Silika [14].

SEBATIAN KIMIA	% MENGIKUT JUMLAH JISIM
SiO ₂	90.0
Al ₂ O ₃	1.2
Fe ₂ O ₃	2.0
CaO	1.0
MgO	0.6
SO ₃	0.5
N ₂ O	0.8

2.2. Reka Bentuk dan Pengadukan Campuran

Dalam kajian ini, 7 campuran berbeza direka. Jumlah RHA kekal malar pada dos penggantian 40% mengikut berat pengikat. Bahan tambah NS digunakan pada tahap penggantian 5%, 7.5% dan 10% manakala X-Seed STE pada 0.2%, 0.4% dan 0.6%. Nisbah air kepada pengikat (w/b) dan pasir kepada pengikat (s/b) dikekalkan pada 0.32 dan 1.0 masing-masing. Jumlah berat pengikat dikira iaitu 932.88 kg/m³, dibulatkan kepada 933 kg/m³. Seterusnya, berat pengikat mortar campuran mengikut perkadaran campuran dikira seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 4 di bawah.

2.3. Prosedur Pembentukan Spesimen dan Kaedah Pengujian

2.3.1. Prosedur Pembentukan Spesimen

Permukaan acuan ([Rajah 3](#)) dilumuri minyak. Pengaduk ([Rajah 4](#)) digunakan untuk membuat spesimen mortar. Sepanjang fasa pengadukan kering 10 minit, bahan-bahan dicampur secara manual setiap 2 minit demi memastikan pengintegrasian menyeluruh. Selepas pencampuran kering, air akan dimasukkan ke dalam pencampuran dengan 80% daripada jumlah berat air dan dicampurkan selama 2 minit. Selebihnya air akan dituangkan secara beransur-ansur dan dicampurkan selama 1 minit untuk memastikan kehomogenan bahan yang komprehensif.

Jadual 4: Perkadaran Campuran RHA, NS dan Master X-Seed dalam Simen.

Reka Bentuk Campuran	OPC (kg/m ³)	RHA (kg/m ³)	Bahan Tambah NS (kg/m ³)	X-Seed STE (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	Air (kg/m ³)	Pasir (kg/m ³)
Kawalan (100%OPC)	933	-	-	-	-	299	933
Kawalan (60%OPC+40%RHA)	560	373	-	-	16.79	299	933
RHA40NS5	560	373	47	-	16.79	299	933
RHA40NS7.5	560	373	70	-	16.79	299	933
RHA40NS10	560	373	93	-	16.79	299	933
RHA40XS0.2	560	373	-	1.87	16.79	299	933
RHA40XS0.4	560	373	-	3.73	16.79	299	933
RHA40XS0.6	560	373	-	5.60	16.79	299	933



Rajah 3: Permukaan acuan dilumuri minyak.



Rajah 4: Pengaduk.

Selepas pengadukan selesai, mortar dipindahkan ke dalam acuan berlumur minyak (3 set prisma, 2 kiub, 3 set silinder besar dan kecil) yang diletakkan di atas meja gegaran. Acuan diisi dalam tiga lapisan seragam. Pastikan Setiap lapisan digegar selama 10 saat untuk pemadatan lengkap.

Selepas sehari (24 jam), spesimen mortar dikeluarkan dan ditempatkan ke dalam tangki pematangan pada persekitaran suhu bilik untuk proses pematangan. Langkah di atas diulang untuk pembentukan spesimen yang lain.

2.3.2. Kaedah Pengujian Spesimen

Ujian Kekuatan Lenturan (ASTM C348)

Ujian kekuatan lenturan dilakukan pada umur pematangan 2, 7 dan 28 hari mengikut ASTM C348. Prisma mortar berukuran 40 mm × 40 mm × 160 mm digunakan dalam ujian ini. Mesin Ujian Universal Go-Tech turut dimanfaatkan. Prisma mortar diletakkan pada jig lenturan dengan beban tiga titik

dikenakan ke atas prisma. Apabila prisma mortar pecah menjadi dua, pembebanan mesin dihentikan serta-merta.

Ujian Kekuatan Mampatan (ASTM C349-14)

Ujian kekuatan mampatan prisma mortar dilaksanakan mengikut ASTM C349-14. Kedua-dua bahagian pecahan prisma dari ujian lenturan digunakan untuk pengujian mampatan dengan menggunakan Mesin Ujian Universal Go-Tech. Prisma pecah diletakkan antara plat berukuran 40 mm jig mampatan. Beban dikenakan berterusan ke atas prisma mortar sehingga pecah. Keluarkan prisma selepas pecah. Sisa-sisa pada plat jig mampatan turut disingkirkan bagi mengelakkan bebanan tidak sekata yang boleh menjejaskan ketepatan Keputusan. Pengenaan beban pada permukaan kasar spesimen perlu dielakkan bagi mencegah bebanan tidak sekata. Prisma mortar perlu diuji pada umur pematangan 2, 7 dan 28 hari. Beban maksimum pada mortar telah direkodkan dan kekuatan mampatan mortar dikira berdasarkan data tersebut.

Ujian Halaju Denyutan Ultrasonik (UPV) (ASTM C597)

Ujian UPV menggunakan denyutan ultrasonik untuk mengukur kelajuan gelombang bunyi semasa denyutan ultrasonik melintasi spesimen konkrit. UPV test juga memberikan maklumat penting tentang keseragaman, kehomogenan bahan serta kebarangkalian kecacatan seperti retakan dalam konkrit. Terdapat tiga cara transmisi: transmisi langsung, transmisi separa langsung dan transmisi permukaan tidak langsung. Kajian ini menggunakan transmisi langsung di mana gelombang bunyi melintasi lintasan terus antara pemancar dan penerima. Kaedah ini memberikan keputusan paling tepat kerana gelombang mengambil laluan terpendek, mengurangkan kehilangan tenaga dan gangguan. Saiz spesimen untuk ujian UPV ialah kiub 100mm. Semasa dikeluarkan dari tangki pematangan, pastikan kiub dibersihkan dan dikeringkan. Meter halaju denyutan ultrasonik disediakan mengikut arahan pengeluar. Transduser dipasangkan dengan betul pada permukaan bertentangan spesimen menggunakan gel atau pes penyambung. Instrumen dicetuskan untuk memancarkan denyutan ultrasonik dari pemancar ke penerima. Ujian diulang sehingga memperoleh 3 nilai yang sama.

Ujian Penyerapan Air (ASTM C1585-20)

Ujian penyerapan air dilakukan mengikut standard ASTM C1585-20. Silinder yang berukuran 75mm digunakan dalam ujian ini. Spesimen diperlukan untuk dikeringkan dalam ketuhar selama 72 jam. Kemudian, setiap spesimen disejukkan selama 24 jam. Selepas 24 jam, setiap spesimen ditimbang dan direkod beratnya, W_d . Seterusnya, spesimen direndam sepenuhnya dalam baldi berisi air selama 30 minit. Berat setiap spesimen dalam keadaan basah ditimbang dan direkod sebagai W_w .

Ujian Keliangan (ASTM F3191-16)

Ujian keliangan dilakukan mengikut standard ASTM F3191-16. Ujian ini melibatkan penentuan jumlah isipadu liang bahan. Jumlah isipadu liang bahan in merupakan faktor kritikal yang mempengaruhi ketahanan dan kebolehtelapan. Ujian biasanya bermula dengan pengeringan spesimen dalam ketuhar selama 72 jam dan kemudian setiap spesimen disejukkan selama 24 jam. Jisim spesimen kering ketuhar selepas penyejukan ditimbang dan dicatat sebagai W_d . Seterusnya, specimen direndam dalam air di dalam pengeringan yang disambungkan kepada pam vakum. Penutup pengeringan disegel, spesimen didedahkan kepada keadaan vakum konsisten selama 72 jam. Selepas penyepuan, spesimen ditimbang dan dicatat sebagai W_a . Seterusnya, spesimen direndam dalam air dan ditimbang semula, dengan berat dicatat sebagai W_w .

2.4. Penilaian Mikrostruktur

2.4.1. Analisis Mikroskop Digital

Analisis mikroskop digital dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik yang dilengkapi dengan penerima digital. Instrumen ini merakam imej mikrostruktur beresolusi tinggi yang dipaparkan pada monitor atau komputer yang disambungkan. Perisian khusus digunakan untuk menganalisis imej tersebut dan membolehkan pengenalanpastian fasa mikrostruktur yang berbeza serta pemeriksaan taburan saiz partikel. Teknik ini terbukti sangat bernilai untuk pengukuran kuantitatif seperti penentuan tahap keliangan dan analisis corak pengagihan agregat. Pendekatan digital ini bukan sahaja meningkatkan ketepatan dokumentasi malah memudahkan perkongsian data antara penyelidik.

3. Keputusan dan Perbincangan

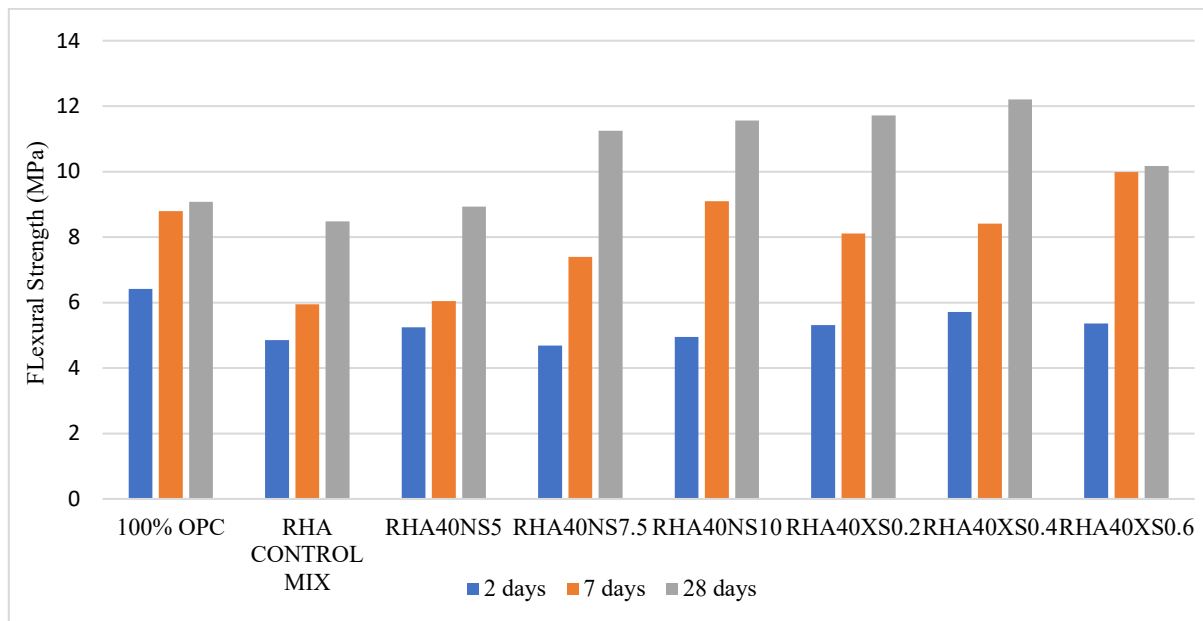
3.1. Ujian Kekuatan Lenturan

Keputusan menunjukkan campuran mortar binari OPC-RHA dengan dan tanpa nano silika mempunyai kekuatan lentur yang agak rendah berbanding campuran kawalan 100% OPC pada usia 2 hari ([Rajah 5](#)). Perkara ini disebabkan oleh jumlah kalsium hidroksida (CH) yang dihasilkan melalui hidrasi simen masih terhad. Penggantian separa OPC dengan RHA mengurangkan jumlah simen tersedia untuk hidrasi. OPC merupakan sumber utama CH, maka pengurangan ini membataskan jumlah CH yang dapat dihasilkan pada peringkat awal. Tambahan pula, 5% nano silika (NS) memberikan tindak balas seimbang, menggunakan CH tanpa menghabiskannya secara melampau. Ini membenarkan CH yang mencukupi kekal untuk hidrasi berterusan, menyumbang kepada pembangunan kekuatan. Di kalangan campuran berasaskan RHA, RHA40NS5 menunjukkan kekuatan lentur tertinggi pada 5.24 MPa, iaitu 8% lebih tinggi berbanding campuran kawalan RHA semata-mata (4.85 MPa). Pemerhatian mendapati peratusan NS yang lebih tinggi membawa kepada penurunan kekuatan lentur pada peringkat awal. Apabila NS dinaikkan kepada 7.5% dan 10%, kekuatan lentur masing-masing mencapai 26.95% dan 22.90% lebih rendah berbanding campuran kawalan. Penambahan nano zarah berlebihan menyebabkan pengagihan tidak serata dalam mortar simen akibat penggumpalan. Justeru, hasil ini telah membuktikan nano silika dapat menyumbang kepada peningkatan kekuatan awal pada dos optimum (5%). Namun, penambahan berlebihan mungkin menghalang pembangunan kekuatan pada peringkat awal. Hal ini selaras dengan penemuan Kawashima et al. [[15](#)].

Pada usia 7 hari, campuran berasaskan RHA dengan NS mula menunjukkan prestasi yang setanding. Campuran RHA40NS10 mencapai kekuatan lentur tertinggi pada 9.10 MPa, melepasi campuran kawalan OPC (8.79 MPa) sebanyak 3.53%. Kekuatan lentur RHA40NS10 adalah 52.94% lebih tinggi berbanding campuran kawalan RHA semata-mata. Begitu juga, RHA40NS7.5 menunjukkan peningkatan ketara, mencapai 7.39 MPa, iaitu 24.20% lebih tinggi berbanding campuran kawalan RHA (5.95 MPa) tetapi masih 15.93% lebih rendah berbanding campuran kawalan OPC. Walau bagaimanapun, 5% NS menunjukkan penurunan kekuatan lentur pada usia 7 hari. Kekuatan lentur yang dicapai oleh RHA40NS5 adalah 31.29% lebih rendah berbanding campuran kawalan (100% OPC). Namun begitu, RHA40NS5 masih lebih tinggi berbanding campuran kawalan RHA semata-mata.

Pada usia 28 hari, kekuatan lentur campuran berasaskan RHA dengan nano silika melebihi campuran kawalan OPC (9.08 MPa). RHA40NS7.5 mencapai kekuatan lentur 11.25 MPa, menunjukkan peningkatan 23.90% berbanding campuran kawalan OPC. RHA40NS10 mencapai 11.56 MPa, mewakili peningkatan 27.31% ke atas campuran kawalan OPC. Perbandingan dengan campuran kawalan RHA semata-mata (8.48 MPa), RHA40NS7.5 dan RHA40NS10 turut menunjukkan peningkatan masing-masing 32.67% dan 36.32%. Penurunan kecil masih diperhatikan pada RHA40NS5. Kekuatan lentur RHA40NS5 adalah 1.65% berbanding 100% OPC tetapi masih lebih

tinggi berbanding mortar campuran RHA semata-mata. Pada usia 28 hari, penghasilan kalsium hidroksida (CH) daripada hidrasi jauh lebih tinggi berbanding usia 2 dan 7 hari. Tindak balas pozzolanik nano silika (NS) menjadi lebih signifikan. Jumlah NS yang tinggi menggunakan lebih banyak CH untuk menghasilkan C-S-H tambahan, yang meningkatkan kekuatan jangka panjang. Tuntasnya, NS dapat meningkatkan kekuatan awal konkrit berasaskan RHA pada dos rendah (5%). Keberkesannya menjadi lebih ketara pada peringkat lanjutan, terutamanya pada dos tinggi (10%). Ia secara signifikan meningkatkan kekuatan lentur berbanding campuran kawalan OPC dan RHA semata-mata.



Rajah 5: Kekuatan lenturan.

Campuran kawalan 100% OPC menunjukkan kekuatan lentur peringkat awal yang lebih tinggi (6.42 MPa) berbanding semua campuran berasaskan RHA pada usia rawatan 2 hari. Campuran kawalan RHA semata-mata mencapai kekuatan lentur 4.85 MPa pada usia 2 hari. Penambahan X-Seed STE pada dos 0.2%, 0.4%, dan 0.6% menghasilkan kekuatan lentur masing-masing 5.31 MPa, 5.71 MPa, dan 5.36 MPa. Keputusan ini menunjukkan X-Seed STE mempercepatkan proses hidrasi, meningkatkan pembangunan kekuatan peringkat awal. Campuran RHA40XS0.4 menunjukkan kekuatan lentur tertinggi dalam semua campuran berasaskan RHA, mencatat peningkatan 17.73% berbanding campuran kawalan RHA semata-mata. Walau bagaimanapun, campuran RHA40XS0.4 masih menunjukkan penurunan kekuatan lentur 11.06% berbanding campuran kawalan 100% OPC.

Pada 7 hari, kedua-dua campuran kawalan (100% OPC dan RHA semata-mata) mencapai kekuatan lentur 8.79 MPa dan 5.95 MPa masing-masing. Campuran yang mengandungi XS menunjukkan peningkatan lanjut, dengan kekuatan 8.11 MPa, 8.41 MPa, dan 9.99 MPa untuk dos XS 0.2%, 0.4%, dan 0.6% masing-masing. Peningkatan ketara ini menggambarkan keberkesanan X-Seed STE dalam mengekalkan pencapaian kekuatan yang dipercepatkan pada peringkat rawatan pertengahan. Campuran RHA40XS0.6 pada 9.99 MPa menunjukkan kekuatan lentur tertinggi, malah melebihi campuran kawalan OPC pada usia 7 hari. Peningkatan dalam campuran RHA pada peringkat ini menyerlahkan kemampuan X-Seed STE dalam meningkatkan hidrasi dan pembangunan kekuatan pada sistem pozzolanik seperti RHA.

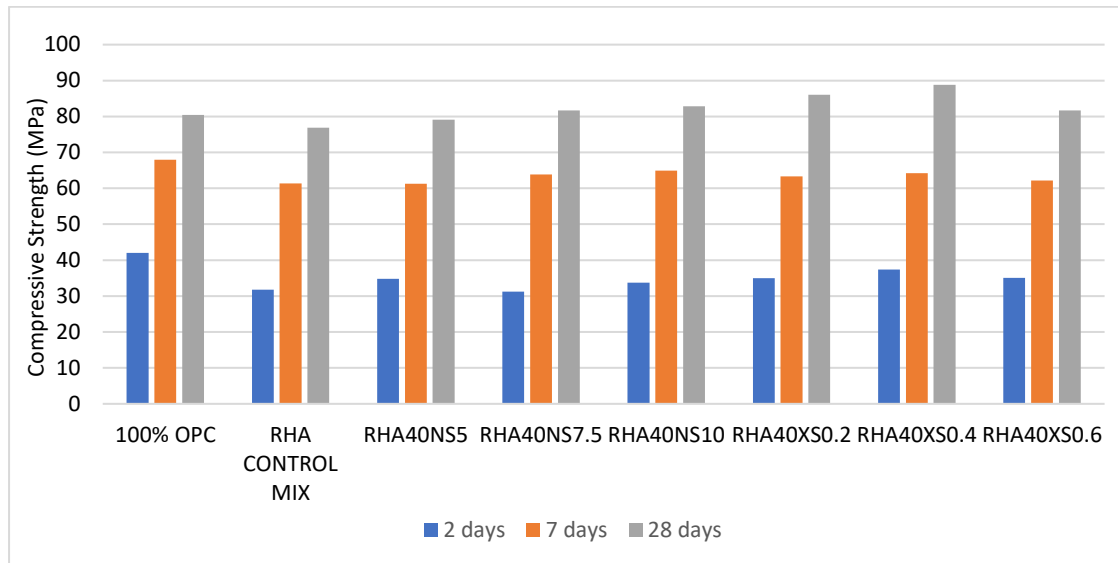
Pada 28 hari, semua campuran berasaskan RHA dengan X-Seed STE menunjukkan kekuatan lenturan lebih tinggi berbanding campuran kawalan 100% OPC dan campuran kawalan dengan RHA sahaja. Mortar dengan dos XS menunjukkan prestasi lebih baik, mencapai 11.72 MPa, 12.21 MPa, dan

10.17 MPa untuk dos 0.2%, 0.4%, dan 0.6%. Campuran RHA40XS0.4 mencatatkan kekuatan lenturan tertinggi sebanyak 12.21 MPa, meningkat 34.47% berbanding OPC (9.08 MPa). Keputusan ini menunjukkan bahawa nisbah ini adalah yang paling optimum dalam meningkatkan penghidratan jangka panjang dan pembangunan kekuatan. Campuran RHA40XS0.2 mencapai kekuatan 11.72 MPa, meningkat 29.1% berbanding OPC. Campuran dengan dos tertinggi, RHA40XS0.6, menunjukkan kekuatan lebih rendah iaitu 10.17 MPa, hanya meningkat 12.0% berbanding OPC. Pengurangan kekuatan pada dos lebih tinggi menunjukkan bahawa lebih X-Seed STE boleh menyebabkan kesan negatif, mungkin disebabkan oleh pengurangan kecekapan penyebaran atau gangguan terhadap proses hidratan campuran. Secara keseluruhan, X-Seed STE meningkatkan kekuatan lenturan pada semua tempoh pemulihan, dengan kesan paling ketara pada umur 7 dan 28 hari. Hal ini menunjukkan potensinya dalam meningkatkan sifat mekanikal mortar berbanding campuran kawalan.

3.2. Ujian Kekuatan Mampatan

Pada 2 hari, campuran kawalan 100% OPC mencatatkan kekuatan mampatan tertinggi pada 42.01 MPa. Campuran kawalan RHA (31.75 MPa) menunjukkan penurunan kekuatan sebanyak 24.42% berbanding campuran OPC. Semua campuran RHA menunjukkan kekuatan mampatan lebih rendah berbanding campuran kawalan (100% OPC) tetapi lebih tinggi daripada campuran kawalan dengan RHA sahaja, kecuali RHA40NS7.5 pada 2 hari ([Rajah 6](#)). Campuran RHA40NS7.5 dan RHA40NS10 telah mencatatkan kekuatan mampatan lebih rendah berbanding campuran kawalan. Nano silika diketahui mempercepatkan hidratan simen pada peringkat awal kerana luas permukaan yang tinggi dan aktiviti pozzolanik [16]. Dos nano silika memainkan peranan penting dalam pembangunan kekuatan awal. Namun, peningkatan dos nano silika boleh meningkatkan keperluan air [17]. Kesannya, mikrostruktur akan kurang padat dan mengurangkan kekuatan akibat lebih nanopartikel [18]. Deb et al. [19] melaporkan bahawa kandungan nano silika yang tinggi boleh menyebabkan penurunan kekuatan akibat zarah tidak terurai yang bertindak sebagai tapak kecacatan. Sebaliknya, dos lebih rendah dalam RHA40NS5 menunjukkan kereaktifan awal yang mencukupi dan prestasi terbaik (34.76 MPa), meningkat sebanyak 9.48% berbanding campuran kawalan RHA. RHA40NS7.5 mengalami penurunan kekuatan sebanyak 1.7%, mencatatkan 31.22 MPa.

Pada 7 hari, semua spesimen masih menunjukkan kekuatan mampatan lebih rendah berbanding campuran kawalan (100% OPC). Campuran 100% OPC mencapai 67.95 MPa dan kekal sebagai yang terkuat, manakala campuran kawalan RHA (61.38 MPa) mencatatkan penurunan sebanyak 9.67% berbanding OPC. Namun begitu, peningkatan ketara dalam kekuatan mampatan diperhatikan apabila peratusan nano silika meningkat. Campuran RHA40NS10 mencatatkan peningkatan sebanyak 5.70% berbanding campuran kawalan RHA, mencapai 64.88 MPa. Dos 10% menunjukkan prestasi terbaik dan hampir menyamai kekuatan campuran OPC, manakala campuran NS lain (RHA40NS5 dan RHA40NS7.5) sedikit ketinggalan pada 61.29 MPa dan 63.89 MPa. RHA40NS5 tidak menunjukkan peningkatan ketara berbanding campuran kawalan RHA (61.29 MPa, 0.1% lebih rendah). Kandungan tinggi Rice Husk Ash (RHA) dalam campuran binari boleh menyebabkan tindak balas pozzolanik yang perlahan akibat kekurangan kalsium hidroksida (CH) pada peringkat awal, menghalang pembentukan gel Kalsium-Silikat-Hidrat (C-S-H). Penambahan 7.5% dan 10% nano silika (NS) dalam mortar campuran binari OPC-RHA meningkatkan kekuatan mampatan pada 7 hari. Peningkatan ini disebabkan oleh penapisan struktur liang yang dipermudahkan oleh NS [20]. Luas permukaan spesifik yang tinggi dan saiz zarah halus NS mempercepatkan tindak balas pozzolanik [21]. Selain sifat pengisian liang, NS bertindak sebagai tapak nukleasi bagi pembentukan C-S-H, mempercepatkan proses hidratan [22]. Peningkatan dos NS dalam julat yang ditetapkan dapat meningkatkan kekuatan mampatan pada 7 hari.



Rajah 6: Kekuatan Mampatan.

Pada 28 hari, perkembangan kekuatan jangka panjang menjadi lebih ketara. Hal ini dapat ditunjukkan pada campuran kawalan 100% OPC yang mengekalkan prestasi tinggi dengan 80.45 MPa. Campuran kawalan RHA mencatatkan 76.88 MPa dan menunjukkan penurunan sebanyak 4.4% berbanding campuran OPC. Penambahan nano silika meningkatkan kekuatan jangka panjang dengan ketara. Campuran RHA40NS10 mencatatkan kekuatan mampatan tertinggi (82.86 MPa), manakala RHA40NS7.5 mencatatkan kekuatan kedua tertinggi (81.72 MPa) dalam kalangan campuran RHA-NS. Kekuatan mampatan RHA40NS10 meningkat 7.78% berbanding campuran kawalan RHA dan melebihi campuran OPC sebanyak 3.00%. RHA40NS7.5 meningkat 6.30% berbanding campuran kawalan RHA dan melebihi campuran OPC sebanyak 1.58%. Peningkatan kekuatan ini menunjukkan bahawa proses hidratan yang dipercepatkan dalam mortar campuran yang mengandungi RHA sebagai bahan pozzolanik menjadi lebih ketara pada usia matang, selari dengan peningkatan ketersediaan CH hasil daripada hidratan simen. Tindak balas pozzolanik antara RHA dan CH menghasilkan gel C-S-H sekunder. Tindak balas tertunda ini konsisten dengan pemerhatian bahawa RHA biasanya mempunyai kadar tindak balas lebih perlahan berbanding bahan simen tambahan lain [23]. Abolhasani et al. [24] turut melaporkan peningkatan kekuatan mampatan konkrit dengan kandungan RHA lebih tinggi pada usia matang. Peningkatan ini dikaitkan dengan luas permukaan spesifik lebih tinggi dan kereaktifan RHA yang lebih besar berbanding simen, menyebabkan tindak balas lebih luas dengan kalsium hidroksida dan peningkatan penghasilan gel C-S-H dari semasa ke semasa. Peningkatan kandungan gel C-S-H ini meningkatkan kapasiti mampatan dengan mengisi ruang kosong dalam matriks konkrit secara berkesan. Kadar peningkatan kekuatan lebih tinggi dalam konkrit dengan RHA berkehalusan tinggi pada usia matang berlaku kerana lebih banyak CH terbentuk untuk menghasilkan lebih banyak C-S-H dalam tindak balas pozzolanik pada usia matang. Campuran RHA40NS5 menunjukkan peningkatan lebih sederhana, dengan kenaikan 2.87% berbanding campuran kawalan RHA. Dos 5% NS tidak mencukupi untuk menggunakan CH sepenuhnya yang terhasil semasa hidratan simen pada usia matang. Penambahan NS sebanyak 5% juga menghadkan peningkatan ketumpatan pembungkusan zarah berbanding campuran dengan 7.5% dan 10% NS. Kandungan NS lebih tinggi menghasilkan kekuatan mampatan tertinggi, disebabkan saiz optimum, bentuk hampir sfera, dan penyebaran homogen zarah NS yang meningkatkan pembungkusan zarah dan ketumpatan matriks [25].

Penggunaan X-Seed STE turut dapat meningkatkan kekuatan campuran berasaskan RHA berbanding campuran kawalan RHA tetapi tidak mencapai tahap campuran kawalan 100% OPC pada 2

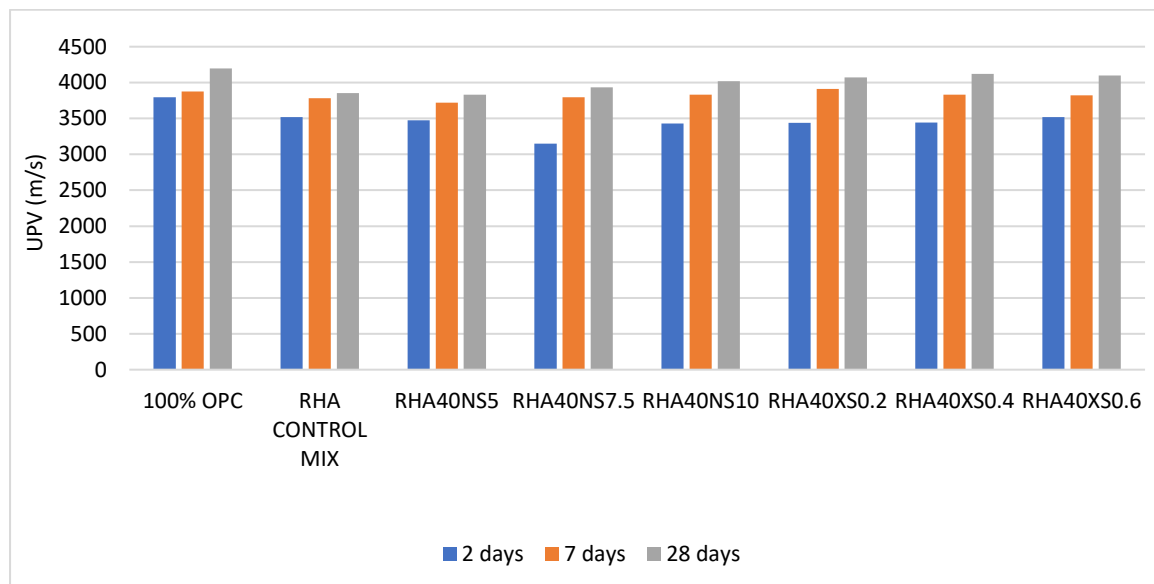
hari. Campuran dengan 0.2% XS mencatatkan 34.94 MPa, meningkat 10.10% berbanding campuran kawalan RHA tetapi menurun 16.88% berbanding campuran kawalan OPC. Campuran dengan 0.4% XS menunjukkan kekuatan awal tertinggi dalam kalangan campuran yang mengandungi XS, mencapai 37.39 MPa, meningkat 17.80% berbanding campuran kawalan RHA tetapi menurun 10.96% berbanding campuran kawalan OPC. Peningkatan kekuatan awal ini disebabkan oleh peranan X-Seed STE sebagai tapak nukleasi bagi pembentukan C-S-H. Kehadiran tapak nukleasi ini mempercepatkan pembentukan dan pertumbuhan kristal C-S-H, mempercepatkan proses hidratan, dan mengoptimumkan mikrostruktur konkrit. Peningkatan ini dapat dicapai sambil mengurangkan kandungan simen, menyumbang kepada pembangunan campuran konkrit yang lebih lestari. Campuran dengan 0.6% XS mencatatkan peningkatan sederhana sebanyak 10.46% berbanding campuran kawalan RHA, mencapai 35.07 MPa, tetapi masih 16.52% lebih rendah berbanding campuran kawalan OPC. Prestasi unggul campuran dengan 0.4% XS pada peringkat ini dikaitkan dengan dos optimum yang menyediakan tapak nukleasi mencukupi untuk hidratan. Secara tuntas, keputusan ini telah membuktikan X-Seed STE dapat membantu mempercepatkan hidratan dan meningkatkan kekuatan awal bagi campuran berasaskan RHA, namun kekuatan pada 2 hari masih lebih rendah berbanding campuran 100% OPC.

Pada 7 hari, semua spesimen masih me*Unique Strength-enhancing* menunjukkan kekuatan mampatan lebih rendah berbanding campuran kawalan 100% OPC. Namun, peningkatan ketara dicatatkan dalam RHA40XS0.2 dan RHA40XS0.4. Campuran dengan 0.2% XS mencapai kekuatan kedua tertinggi pada 63.31 MPa, meningkat 3.13% berbanding campuran kawalan RHA tetapi menurun 6.85% berbanding campuran kawalan OPC. Apabila XS meningkat kepada 0.4%, kekuatan tertinggi dicatatkan pada 64.21 MPa, meningkat 4.61% berbanding campuran kawalan RHA dan menurun 5.50% berbanding campuran kawalan OPC. Ini disebabkan oleh peningkatan ketersediaan CH hasil daripada hidratan OPC yang berterusan. Oleh itu, lebih banyak produk hidratan sekunder terbentuk melalui aktiviti pozzolanik antara RHA-XS dan CH primer daripada OPC. Sementara itu, campuran dengan 0.6% XS mencapai 62.16 MPa, menunjukkan peningkatan sederhana sebanyak 1.27% berbanding campuran kawalan RHA tetapi menurun 8.52% berbanding campuran kawalan OPC. Keputusan ini menunjukkan bahawa 0.4% X-Seed STE adalah dos optimum untuk meningkatkan proses hidratan dalam campuran berasaskan RHA. Dos lebih tinggi seperti 0.6% tidak memberikan peningkatan kekuatan yang ketara pada peringkat ini. Ini mungkin disebabkan oleh penyebaran zarah nano yang tidak sekata dalam matriks simen, menyebabkan pembentukan kawasan tertentu dengan hidratan dipercepatkan manakala kawasan lain mengalami kadar tindak balas lebih perlahan. Penyebaran tidak sekata produk hidratan ini boleh memberi kesan negatif terhadap perkembangan kekuatan keseluruhan [26].

Pada 28 hari, semua spesimen menunjukkan kekuatan mampatan lebih tinggi berbanding campuran kawalan 100% OPC dan campuran kawalan RHA. Hal ini telah membuktikan bahan tambah mempunyai potensi dalam keberkesanan jangka panjang untuk meningkatkan perkembangan kekuatan. Keputusan ini selari dengan penyelidikan Mazanec [27] dan Li et al. [28] yang melaporkan bahawa X-Seed STE berpotensi meningkatkan kekuatan pada usia matang. Li et al. [28] turut mengaitkan peningkatan ini dengan peranan X-Seed STE dalam mempromosikan pemendakan produk hidratan dalam struktur liang, menghasilkan penapisan struktur liang. Penggunaan 0.2% X-Seed STE menghasilkan kekuatan mampatan 86.04 MPa, meningkat 6.95% berbanding campuran kawalan OPC dan 11.91% berbanding campuran kawalan RHA. RHA40XS0.6 kurang berkesan tetapi masih mencapai 81.69 MPa, meningkat 1.54% berbanding campuran kawalan OPC dan 6.26% berbanding campuran kawalan RHA. Hal ini demikian kerana dos tinggi zarah nano meningkatkan keperluan air dan mengakibatkan keboleherjaan konkrit semakin kurang, kepadatan dalaman lebih rendah, lebih banyak liang berbahaya, dan akhirnya kekuatan lebih rendah [29]. Intihanya, peningkatan konsisten pada 28 hari membuktikan keberkesanan jangka panjang X-Seed STE dalam meningkatkan kekuatan campuran berasaskan RHA, terutama pada dos optimum 0.4% XS.

3.3. Halaju Nadi Ultrasonik (UPV)

Analisis data halaju purata pada 2 hari, 7 hari, dan 28 hari telah menunjukkan corak dan variasi ketara antara reka bentuk campuran. Halaju purata meningkat selaras dengan tempoh pematangan bagi semua campuran (Rajah 7). Campuran kawalan 100% OPC secara konsisten mencatatkan nilai halaju purata tertinggi pada semua tempoh pematangan, dengan 3795 m/s pada 2 hari, 3875 m/s pada 7 hari, dan 4195 m/s pada 28 hari. RHA40NS7.5 menunjukkan peningkatan mendadak daripada 3150 m/s pada 2 hari kepada 3795 m/s pada 7 hari, kemudian meningkat berterusan kepada 3935 m/s pada 28 hari. Begitu juga, RHA40XS0.2 meningkat dengan ketara daripada 3440 m/s kepada 3910 m/s, kemudian meningkat secara beransur-ansur kepada 4070 m/s pada 28 hari. Selain itu, campuran 100% OPC mencapai nilai UPV tertinggi dalam semua tempoh ujian. Namun demikian, apabila 40% OPC digantikan dengan abu sekam padi (RHA), nilai UPV menurun seperti yang dilihat dalam spesimen RHA40. Pengurangan ini disebabkan oleh tindak balas pozzolan RHA yang membentuk kekuatan pada kadar lebih perlahan berbanding OPC.



Rajah 7: Halaju Nadi Ultrasonik.

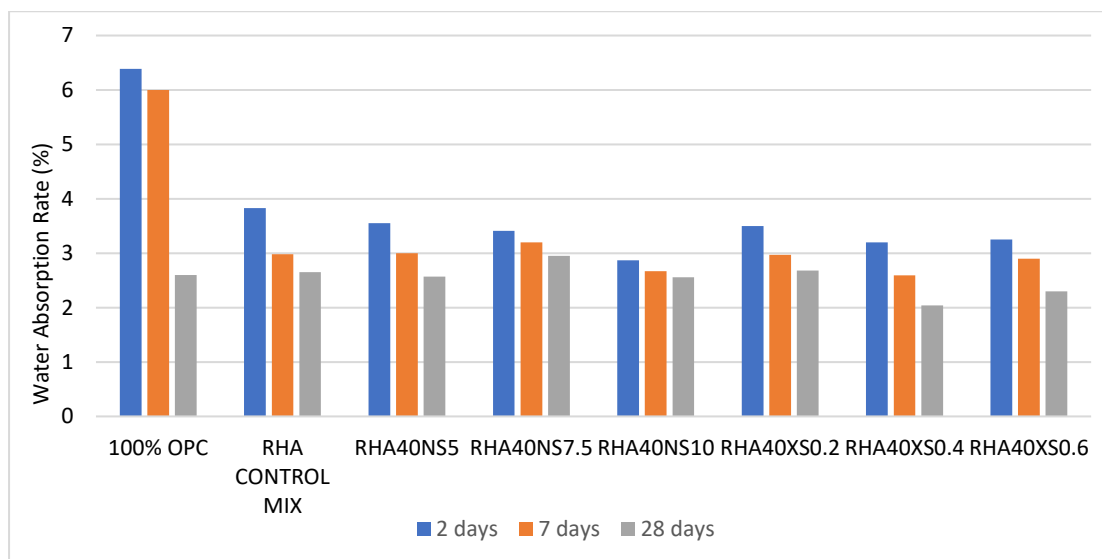
Semua spesimen dengan bahan tambah nano menunjukkan peningkatan ketara dalam halaju purata sepanjang tempoh pematangan. Dalam campuran NS, RHA40NS10 mencatatkan halaju purata tinggi pada semua tempoh pematangan: 3430 m/s (2 hari), 3830 m/s (7 hari), dan 4020 m/s (28 hari). Begitu juga, dalam campuran XS, RHA40XS0.4 menunjukkan halaju keseluruhan tertinggi. Walaupun berada di kedudukan kedua tertinggi pada 2 dan 7 hari, 0.4% XS mencapai nilai UPV tertinggi pada 28 hari iaitu 4120 m/s. Nilai UPV bagi RHA40NS10 dan RHA40XS0.4 masih lebih rendah berbanding 100% OPC tetapi lebih tinggi daripada campuran kawalan RHA. Ini menunjukkan bahawa penambahan bahan tambah nano dapat mengurangkan keliangan konkrit dengan ketara [30].

Berbanding RHA40NS10 dan RHA40XS0.4, halaju purata menunjukkan sedikit perbezaan. Variasi nilai UPV bergantung kepada jumlah liang dan rekahan mikro dalam konkrit [31]. Kualiti konkrit yang baik dengan bilangan liang atau keliangan yang lebih sedikit mempunyai halaju nadi tinggi. Selain itu, Jain, et al. [32] menyatakan bahawa saiz zarah RHA yang lebih kecil juga boleh mengisi liang mikro dalam konkrit.

3.4. Ujian Penyerapan Air

Bagi semua spesimen, penyerapan air semakin menurun dengan peningkatan tempoh pematangan. Campuran kawalan 100% OPC menunjukkan penurunan ketara dalam penyerapan air, iaitu daripada 6.39% pada 2 hari kepada 2.60% pada 28 hari (Rajah 8). Campuran kawalan RHA (RHA40) telah menunjukkan penyerapan air yang sedikit lebih tinggi pada peringkat awal berbanding campuran kawalan 100% OPC, dengan nilai 3.83% pada 2 hari. Walau bagaimanapun, campuran kawalan RHA mencapai tahap penyerapan air yang hampir sama pada 2.65% pada 28 hari. Penyelidikan ini menunjukkan bahawa RHA dapat menyumbang kepada pematatan matriks konkrit dari semasa ke semasa melalui tindak balas pozzolanik [33].

Penambahan nano-silika mengurangkan lagi penyerapan air dalam siri RHA40NS, terutamanya pada peratusan NS yang lebih tinggi. RHA40NS5 menunjukkan penyerapan air lebih rendah pada semua peringkat umur, dengan nilai 2.57% pada 28 hari, sedikit lebih baik daripada campuran kawalan RHA. RHA40NS7.5 menunjukkan prestasi yang lebih baik pada 2 hari (3.41%) berbanding RHA40NS5 (3.55%) tetapi mempunyai penyerapan yang sedikit lebih tinggi iaitu 2.95% pada 28 hari. RHA40NS10 menunjukkan penyerapan air paling rendah dalam semua campuran, mencapai 2.87% pada 2 hari dan 2.98% pada 7 hari. Nilai 2.56% pada 28 hari lebih rendah daripada campuran kawalan 100% OPC (2.60%).



Rajah 8: Kadar penyerapan air.

Berbanding campuran kawalan RHA, semua campuran RHA40NS mempunyai penyerapan air yang lebih rendah, terutama pada usia awal. Pengurangan penyerapan air dengan peningkatan kandungan nano-silika menunjukkan keupayaannya dalam memperhalus struktur liang dan meningkatkan ketelapan [34,35]. Selain itu, Rai dan Tiwari [36] menyatakan bahawa nano-silika mempercepatkan penghidratan simen dengan mempercepatkan pembentukan gel C-S-H dan bertindak sebagai agen pemula, menyumbang kepada penyerapan air yang lebih rendah dalam konkrit.

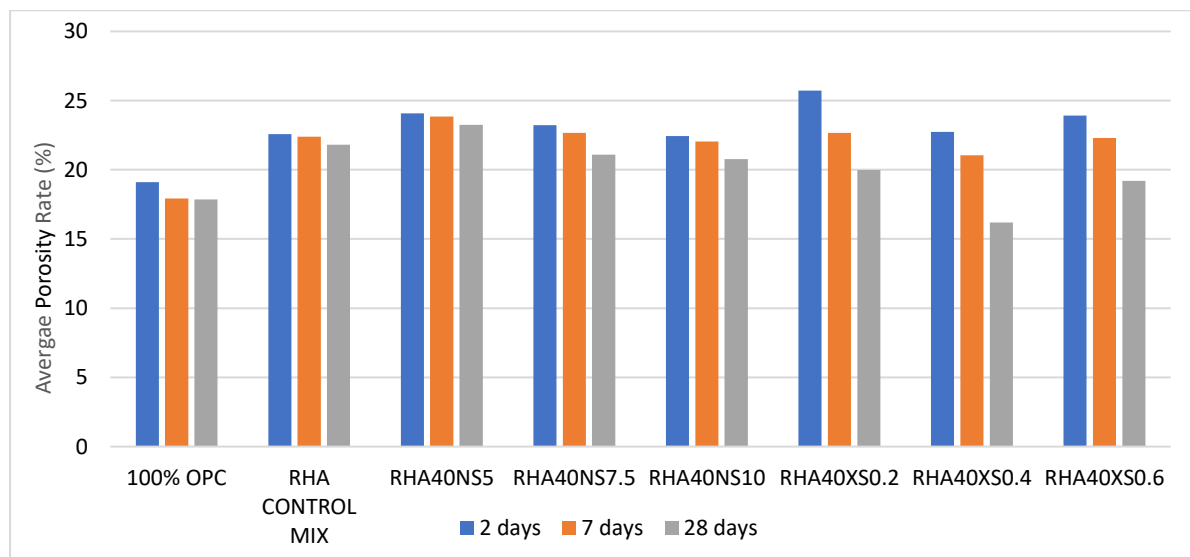
Keputusan kadar penyerapan air bagi campuran yang mengandungi X-Seed STE (XS) menunjukkan peningkatan ketara berbanding campuran kawalan. Campuran dengan 0.4% XS telah mengurangkan lagi penyerapan air dan seterusnya mencapai kadar penyerapan air paling rendah pada semua tempoh pengeringan. Kadar penyerapan air bagi campuran dengan 0.4% XS ialah 3.20% pada 2 hari, 2.59% pada 7 hari, dan 2.04% pada 28 hari. RHA40XS0.2 menunjukkan kadar penyerapan air

tertinggi pada semua peringkat umur. Kadar penyerapan air bagi 0.2% XS ialah 3.50% pada 2 hari, 2.97% pada 7 hari, dan 2.68% pada 28 hari.

Berbanding campuran kawalan RHA, semua campuran RHA40XS menunjukkan kadar penyerapan air lebih rendah pada semua peringkat tempoh kecuali RHA40XS0.2. Keputusan ini membuktikan bahawa X-Seed STE berpotensi meningkatkan kekuatan awal dan akhir, seperti yang dinyatakan oleh Master Builders Solutions [11]. Qadri dan Garg [37] juga bersetuju bahawa penambahan benih C-S-H dalam konkrit dapat meningkatkan kekuatan mampatan awal dan akhir. He dan Liao [38] memberikan bukti mikrostruktur melalui analisis Mikroskopi Elektron Imbasan (SEM). Mereka menunjukkan bahawa penambahan nano-C-S-H dapat memperhalus struktur liang pes simen. Ini membuktikan bahawa penambahan XS dapat meningkatkan pepadatan mikrostruktur dan mengatasi campuran kawalan pada semua peringkat umur. Akhir kata, X-Seed STE menunjukkan prestasi lebih baik, terutamanya pada dos 0.4% dengan mengurangkan penyerapan air dalam mortar campuran RHA.

3.5. Ujian Keliangan

Dalam kajian ini, keliangan semua spesimen berkurang mengikut umur ujian. Dengan penambahan 5% NS (RHA40NS5), kadar keliangan menurun daripada 24.08%, 23.84%, kepada 23.24% pada 2, 7, dan 28 hari, tetapi masih lebih tinggi berbanding campuran kawalan RHA (22.58%, 22.39%, dan 21.82%) (Rajah 9). Apabila kandungan nano-silika meningkat kepada 7.5% dan 10%, pengurangan keliangan yang lebih ketara diperhatikan. Campuran RHA40NS7.5 mencatatkan kadar keliangan 23.22%, 22.67%, dan 21.09%, manakala RHA40NS10 menunjukkan pengurangan lanjut kepada 22.44%, 22.05%, dan 17.03% pada 2, 7, dan 28 hari. Secara keseluruhan, RHA40NS5 mempunyai kadar keliangan tertinggi, manakala RHA40NS10 menunjukkan kadar keliangan paling rendah pada semua peringkat umur dalam campuran NS.



Rajah 9: Keputusan ujian keliangan.

Keputusan ini menjelaskan bahawa kepekatan nano-silika yang lebih tinggi, khususnya pada 10% memberi kesan dominan dalam pengurangan keliangan. Penambahan nano silika membantu pembentukan matriks konkrit yang lebih seragam dan padat, meningkatkan ketumpatan dan seterusnya mengurangkan keliangan [39]. Di samping itu, gabungan RHA dan kandungan NS optimum (10%) menghasilkan kesan sinergi di mana aktiviti pozzolan RHA dipertingkatkan oleh kehadiran nano-silika yang tersebar dengan baik, mengurangkan keliangan dan meningkatkan sifat mekanikal [40].

Keputusan ujian keliangan bagi campuran yang mengandungi X-Seed STE (XS) menunjukkan peningkatan signifikan berbanding campuran kawalan RHA dan membuktikan pengaruh dos XS dalam pengurangan keliangan mengikut masa. Dengan penambahan 0.2% XS (RHA40XS0.2), kadar keliangan menurun daripada 25.72%, 22.66%, kepada 19.98% pada 2, 7, dan 28 hari, tetapi masih lebih tinggi berbanding campuran kawalan dengan 40% RHA (22.58%, 22.39%, dan 21.82%). Apabila kandungan XS meningkat kepada 0.4% (RHA40XS0.4), ia menunjukkan kadar keliangan paling rendah dalam campuran XS, iaitu 22.7% pada 2 hari, 21.05% pada 7 hari, dan 16.18% pada 28 hari. Walau bagaimanapun, keliangan menurun kepada 23.91%, 22.39%, dan 19.19% pada 2, 7, dan 28 hari apabila jumlah XS ditingkatkan kepada 0.6%.

Semua campuran XS menunjukkan pengurangan keliangan dalam kajian ini, terutamanya pada 0.4%. Struktur liang menjadi lebih kecil apabila XS ditambah ke dalam konkrit. Hal ini dapat membuktikan dengan analisis mikroskop digital yang telah dilakukan dalam kajian ini dan keputusan direkodkan dalam bahagian seterusnya. Fenomena ini berlaku kerana X-Seed STE bertindak sebagai agen pemula C-S-H, meningkatkan ketahanan keseluruhan dengan menyumbang kepada pemurnian mikrostruktur seperti dinyatakan oleh Qadri et al. [41].

3.6. Analisis Mikroskop Digital

Analisis mikroskop digital dijalankan untuk mengkaji liang pada spesimen yang dipotong bagi reka bentuk campuran. Reka bentuk campuran yang dianalisis termasuk kedua-dua campuran kawalan (100% OPC dan campuran kawalan RHA), campuran 10% NS, dan campuran 0.4% XS pada usia ujian 28 hari. 100% OPC ialah campuran kawalan yang mewakili kekuatan sederhana pada 28 hari, manakala campuran kawalan RHA ialah campuran paling lemah pada 28 hari. 10% NS menunjukkan prestasi terbaik dalam campuran NS, manakala 0.4% XS memberikan keputusan terbaik dalam campuran XS. Jadual 4.6 menunjukkan imej tingkah laku mikrostruktur dan kekuatan bagi kedua-dua campuran kawalan, RHA40NS10, dan RHA40XS0.4.

4. Kesimpulan dan Cadangan

4.1. Kesimpulan

Perbincangan merangkumi sifat bahan simen yang mengandungi RHA dan bahan tambah nano (nano-silika dan X-Seed STE), termasuk komposisi kimia, sifat mekanikal, dan ketahanannya. Berdasarkan ujian dan analisis dalam kajian ini, beberapa kesimpulan mengenai mortar campuran dua bahan dengan pelbagai peratusan nano-silika dan X-Seed STE boleh dibuat selaras dengan objektif utama kajian seperti berikut:

- Campuran kawalan RHA menunjukkan kekuatan mampatan dan lenturan lebih rendah berbanding 100% OPC pada semua peringkat pematangan. Ini disebabkan oleh sifat pozzolan RHA yang perlahan.
- Nano silika sebagai bahan tambah meningkatkan kekuatan mortar campuran RHA kerana luas permukaan spesifik yang tinggi dan zarah bersaiz nano yang dapat memperhalus struktur liang mortar RHA.
- Nisbah campuran optimum untuk mortar RHA-NS ialah 60% OPC, 40% RHA, dan 10% NS.
- Nisbah campuran optimum untuk mortar RHA-XS ialah 60% OPC, 40% RHA, dan 0.4% XS.
- X-Seed STE sebagai bahan tambah meningkatkan kekuatan mortar campuran RHA pada peringkat awal dan akhir pematangan.
- X-Seed STE lebih sesuai digunakan sebagai bahan tambah dalam konkrit kerana hanya dengan 0.4% sudah dapat mencapai kekuatan tinggi berbanding spesimen RHA-10%NS. Hal ini demikian kerana kebanyakan bahan nano mempunyai kos yang tinggi. Jadi, kelebihan ekonomi ini bersama dengan kecekapan prestasinya menjadikan X-Seed STE pilihan lebih praktikal untuk aplikasi pembinaan.

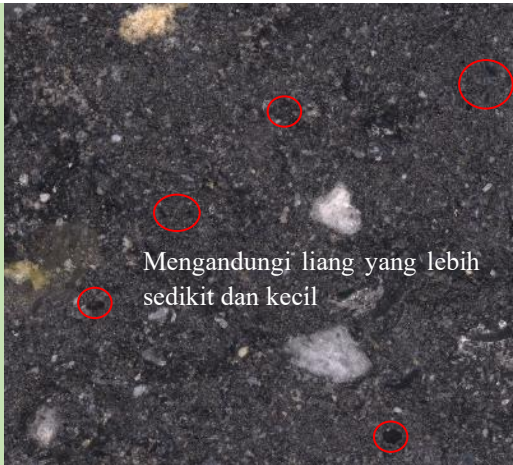
4.2. Cadangan untuk Penyelidikan Masa Depan

Kebanyakan kajian yang dilakukan berkaitan abu sekam padi dengan bahan nano. Namun, lebih banyak penyelidikan diperlukan untuk mengenal pasti dan memahami dengan lebih jelas pembangunan konkrit mesra alam. Untuk kajian masa depan, cadangan berikut boleh dipertimbangkan:

- Ujian boleh dilanjutkan sehingga 56 hari kerana tindak balas pozzolan RHA lebih tinggi selepas 28 hari.
- Ketahanan bahan berasaskan simen RHA terhadap serangan sulfat, ketahanan klorida, dan pengecutan perlu dikaji dengan lebih lanjut.
- RHA perlu dikalsinasi pada suhu berbeza untuk menentukan prestasi terbaik yang sesuai digunakan dalam konkrit.
- RHA yang dikisar perlu diayak untuk mendapatkan kehalusan lebih tinggi yang dapat meningkatkan pembangunan kekuatan.

Jadual 5: Analisis Mikroskop Digital.

Umur Ujian	Kekuatan	Rajah
28 hari	Sederhana	 Campuran kawalan (100% OPC)
28 hari	Paling lemah	 Campuran kawalan (mengandungi 40% RHA sahaja)

28 hari	Keputusan Terbaik	 Mengandung liang yang lebih sedikit dan kecil RHA40NS10
28 hari	Keputusan terbaik	 Mengandung liang yang lebih sedikit dan kecilless and tiny pore RHA40XS0.4

Pengenalan ORCID

Cheah Chee Ban  <https://orcid.org/0000-0003-2261-2991>

Pernyataan Konflik Kepentingan

Para pengarang menyatakan bahawa tiada konflik kepentingan dengan mana-mana pihak lain dalam penerbitan karya ini.

Rujukan

- [1] Leong Tuck Lun, Effects Of Rice Husk Ash (Rha) Produced From Different Temperatures On The Performance Of Concrete, Universiti Tunku Abdul Rahman, 2015.
- [2] R. Khan, A. Jabbar, I. Ahmad, W. Khan, A.N. Khan, and J. Mirza, Reduction in Environmental Problems Using Rice-Husk Ash in Concrete. Construction and Building Materials 30 (2012) 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.028>
- [3] Joe Kullman, Curbing Concrete's Carbon Emissions with Innovations in Cement Manufacturing, Arizona State University News (2023). <https://news.asu.edu/20231017-curbing-concretes-carbon-emissions-innovations-cement-manufacturing> (accessed May 17, 2025).

- [4] A. Akbar, and K.M. Liew, Assessing Recycling Potential of Carbon Fiber Reinforced Plastic Waste in Production of Eco-Efficient Cement-Based Materials. *Journal of Cleaner Production* 274 (2020) 123001. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123001>
- [5] Maarten Elferink, and Florian Schierhorn, Global Demand for Food Is Rising. Can We Meet It?, (2016). <https://hbr.org/2016/04/global-demand-for-food-is-rising-can-we-meet-it> (accessed May 17, 2025).
- [6] Ahmad Zairy Zainol Abidin, Sociological Issues and Challenges of Rice Production in Malaysia, (2023). <https://ap.ffiic.org.tw/article/3473> (accessed May 17, 2025).
- [7] M. Singh, Coal bottom ash, in: *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*, Elsevier, 2018: pp. 3–50. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00001-8>
- [8] L. Hu, Z. He, and S. Zhang, Sustainable Use of Rice Husk Ash in Cement-Based Materials: Environmental Evaluation and Performance Improvement. *Journal of Cleaner Production* 264 (2020) 121744. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121744>
- [9] F. Althoey, O. Zaid, R. Martínez-García, F. Alsharari, M. Ahmed, and M.M. Arbili, Impact of Nano-Silica on the Hydration, Strength, Durability, and Microstructural Properties of Concrete: A State-of-the-Art Review. *Case Studies in Construction Materials* 18 (2023) e01997. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01997>
- [10] G. Anto, K. Athira, N.A. Nair, T.Y. Sai, A.L. Yadav, and V. Sairam, Mechanical Properties and Durability of Ternary Blended Cement Paste Containing Rice Husk Ash and Nano Silica. *Construction and Building Materials* 342 (2022) 127732. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127732>
- [11] Master X-Seed, Unique Strength-Enhancing Concrete Admixture, Master X-Seed (2023). <https://master-builders-solutions.com/en-us/products/master-x-seed/> (accessed May 17, 2025).
- [12] Shivram B Bagade, *Urban Concrete: Requisites & Remedies*, (2020). <https://www.nbmcw.com/product-technology/construction-chemicals-waterproofing/concrete-admixtures/urban-concrete-requisites-remedies.html> (accessed May 17, 2025).
- [13] C.B. Cheah, K. Khaw Le Ping, J.J. Liew, R. Siddique, and W. Tangchirapat, Influence of Coal Bottom Ash Aggregate Grading on Properties of GGBS Binary Blended Cement Mortar. *Case Studies in Construction Materials* 21 (2024) e03739. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03739>
- [14] C.B. Cheah, L.E. Tan, and M. Ramli, The Engineering Properties and Microstructure of Sodium Carbonate Activated Fly Ash/ Slag Blended Mortars with Silica Fume. *Composites Part B: Engineering* 160 (2019) 558–572. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.056>
- [15] S. Kawashima, P. Hou, D.J. Corr, and S.P. Shah, Modification of Cement-Based Materials with Nanoparticles. *Cement and Concrete Composites* 36 (2013) 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.012>
- [16] F. Torabian Isfahani, E. Redaelli, W. Li, and Y. Sun, Effects of Nanosilica on Early Age Stages of Cement Hydration. *Journal of Nanomaterials* 2017 (2017) 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/4687484>
- [17] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, A. Portugal, and L. Durães, The Effect of Nanosilica Addition on Flowability, Strength and Transport Properties of Ultra High Performance Concrete. *Materials & Design* 59 (2014) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.051>
- [18] T. Phoo-ngernkham, P. Chindaprasirt, V. Sata, S. Hanjitsuwan, and S. Hatanaka, The Effect of Adding Nano-SiO₂ and Nano-Al₂O₃ on Properties of High Calcium Fly Ash Geopolymer Cured at Ambient Temperature. *Materials & Design* 55 (2014) 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.049>
- [19] P.S. Deb, P.K. Sarker, and S. Barbhuiya, Sorptivity and Acid Resistance of Ambient-Cured Geopolymer Mortars Containing Nano-Silica Cement and Concrete Composites 72 (2016) 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.06.017>
- [20] S. Lim, H.-S. Lee, and S. Kawashima, Pore Structure Refinement of Cement Paste Incorporating Nanosilica: Study with Dual Beam Scanning Electron Microscopy/Focused Ion Beam (SEM/FIB). *Materials Characterization* 145 (2018) 323–328. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.045>

- [21] S. Bai, X. Guan, H. Li, and J. Ou, Effect of the Specific Surface Area of Nano-Silica Particle on the Properties of Cement Paste. *Powder Technology* 392 (2021) 680–689. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.07.045>
- [22] M. Ranjan, S. Kumar, and S. Sinha, Nanosilica's Influence on Concrete Hydration, Microstructure, and Durability: A Review. *Journal of Applied Engineering Sciences* 14 (2024) 322–335. <https://doi.org/10.2478/jaes-2024-0040>
- [23] S. Abdul Kudus, Effect of Rice-Husk as Replacement Cement on Mechanical Properties Concrete. *Journal of Mechanical Engineering* 20 (2023) 91–104. <https://doi.org/10.24191/jmeche.v20i2.22056>
- [24] A. Abolhasani, B. Samali, and F. Aslani, Rice Husk Ash Incorporation in Calcium Aluminate Cement Concrete: Life Cycle Assessment, Hydration and Strength Development. *Sustainability* 14 (2022) 1012. <https://doi.org/10.3390/su14021012>
- [25] I. S., P.K. S., D. A., and M. Pichumani, The Interplay among Particle Packing, Binder, and Strength: Amelioration of Ultra-High Performance Concrete with Nanomaterials, a Hope or Hype?, *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 29 (2025) 618–646. <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2411300>
- [26] Y. Jiang, J. Huo, H. Qiao, Y. Lei, L. Jia, and Y. Zhang, Synthesis of C-S-H Accelerating Admixture and Its Effect on Mechanical and Hydration Properties of Engineering Cementious Composites. *Case Studies in Construction Materials* 20 (2024) e02993. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02993>
- [27] Oliver Mazanec, 11 Reasons to Use Master X-Seed STE for Strong, CO2-Optimized Concrete, *Master Builder Solutions* (2022). <https://blog.master-builders-solutions.com/en/11-reasons-to-use-master-x-seed-ste-for-strong-co2-optimized-concrete> (accessed May 17, 2025).
- [28] X. Li, J. Bizzozero, and C. Hesse, Impact of C-S-H Seeding on Hydration and Strength of Slag Blended Cement, *Cement and Concrete Research* 161 (2022) 106935. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106935>
- [29] S. Wang, P. Zhao, Y. Tian, and J. Liu, Effects of C-S-H Seed Prepared by Wet Grinding on the Properties of Cement Containing Large Amounts of Silica Fume. *Polymers* 16 (2024) 2769. <https://doi.org/10.3390/polym16192769>
- [30] J. Ren, X. Luo, R. Bai, C. Pan, and J. Zhang, Pore Characteristics of Different Phase in Nano-Modified Concrete and Their Influences on the Compressive Strength. *Journal of Building Engineering* 46 (2022) 103784. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103784>
- [31] N.R. Mohanta, and M. Murmu, Alternative Coarse Aggregate for Sustainable and Eco-Friendly Concrete - A Review. *Journal of Building Engineering* 59 (2022) 105079. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105079>
- [32] V. Jain, G. Sancheti, and B. Jain, Non-Destructive Test Analysis on Concrete with Rice Husk Ash and Crushed Stone Additives. *Materials Today: Proceedings* 60 (2022) 622–626. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.128>
- [33] S.A. Endale, W.Z. Taffese, D.-H. Vo, and M.D. Yehualaw, Rice Husk Ash in Concrete. *Sustainability* 15 (2022) 137. <https://doi.org/10.3390/su15010137>
- [34] H. Liu, Y. Zhang, R. Tong, Z. Zhu, and Y. Lv, Effect of Nanosilica on Impermeability of Cement - Fly Ash System. *Advances in Civil Engineering* 2020 (2020). <https://doi.org/10.1155/2020/1243074>
- [35] J.O. Tanimola, and S. Efe, Recent Advances in Nano-Modified Concrete: Enhancing Durability, Strength, and Sustainability through Nano Silica (NS) and Nano Titanium (NT) Incorporation. *Applications in Engineering Science* 19 (2024) 100189. <https://doi.org/10.1016/j.apples.2024.100189>
- [36] S. Rai, and S. Tiwari, Nano Silica in Cement Hydration. *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 9196–9202. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.044>
- [37] F. Qadri, and N. Garg, Early-Stage Performance Enhancement of Concrete via Commercial C-S-H Seeds: From Lab Investigation to Field Implementation in Illinois, US. *Case Studies in Construction Materials* 19 (2023) e02353. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02353>

- [38] W. He, and G. Liao, Effects of Nano-C-S-H Seed Crystal on Early-Age Hydration Process of Portland Cement, Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures 30 (2022) 365–372. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2021.1940969>
- [39] Y.H. Labaran, N. Atmaca, M. Tan, K. Atmaca, S.A. Aram, and A.T. Kaky, Nano-Enhanced Concrete: Unveiling the Impact of Nano-Silica on Strength, Durability, and Cost Efficiency. Discover Civil Engineering 1 (2024) 116. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00120-9>
- [40] S. Avudaiappan, S. Prakatanoju, M. Amran, R. Aepuru, E.I. Saavedra Flores, R. Das, R. Gupta, R. Fediuk, and N. Vatin, Experimental Investigation and Image Processing to Predict the Properties of Concrete with the Addition of Nano Silica and Rice Husk Ash. Crystals 11 (2021) 1230. <https://doi.org/10.3390/cryst11101230>
- [41] F. Qadri, S.R. Kumar, and N. Garg, Impact of C–S–H Seeds on Cementitious Hydration Kinetics: New Insights on Porosity and Microstructure. Materials Today Communications 38 (2024) 107763. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107763>