

PENGARUH KADAR CALCIUM SULFOALUMINATE SEBAGAI SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP PROPERTI SEGAR, MENERAS, DAN DURABILITAS MORTAR

Yudhi Noer Cahya Wijayadi¹, Herry Suryadi Djayaprabha^{1,*}

¹Jurusan Teknik Sipil, Universitas Katolik Parahyangan, 40141, Indonesia

*Corresponding author: herry.suryadi@unpar.ac.id

Abstract: Due to the apprehension about global warming caused by extensive carbon dioxide (CO₂) emissions, the construction industry is striving to develop alternate composite cement. Calcium sulfoaluminate (CSA) cement has been utilized since it consumes less energy and discharges less CO₂ during production in comparison to Ordinary Portland Cement (OPC). CSA cement has gained popularity due to its exceptional abilities like rapid setting, high strength, and durability. In construction materials, CSA has been extensively used as a substitute binder, either partially or entirely replacing OPC. This research involved the partial substitute of OPC with CSA in varying amounts of 0%, 12.5%, 25%, 37.5%, and 50% while maintaining a fixed water-to-binder ratio of 0.4 for mortar production. The study aimed to explore the fresh properties, hardened properties, and durability of mortar. The results indicated that the optimal CSA proportion of 12.5% exhibited in compressive strength of 36.70 MPa and flexural strength of 7.36 MPa at 28 days. Furthermore, the results revealed that the CSA proportion of 12.5% displayed satisfactory durability-related properties at 28 days with a drying shrinkage value of 640 mm/m, ultrasonic pulse velocity of 4274 m/s, and a sorptivity coefficient of 5.46×10^{-4} mm/s^{1/2}.

Keywords: Calcium sulfoaluminate, compressive strength, durability, flexural strength, sorptivity

Abstrak: Akibat dari isu pemanasan global yang disebabkan oleh emisi karbon dioksida (CO₂) yang sangat besar, maka sektor konstruksi berusaha untuk mengembangkan semen komposit alternatif. Semen *calcium sulfoaluminat* (CSA) telah digunakan karena menggunakan lebih sedikit energi dan mengeluarkan lebih sedikit CO₂ selama produksi dibandingkan dengan *ordinary Portland cement* (OPC). Semen CSA menjadi populer karena kemampuannya untuk menunjukkan beberapa kinerja khusus seperti *rapid setting*, berkekuatan tinggi, dan durabilitas. Dalam material konstruksi, CSA telah banyak digunakan sebagai bahan pengikat alternatif, menggantikan OPC sebagian atau seluruhnya. Pada penelitian ini OPC disubstitusi sebagian dengan CSA kadar sebesar 0%; 12,5%; 25%; 37,5%; dan 50% dengan *water to binder ratio* yang ditetapkan sebesar 0,4 dalam produksi mortar. Properti segar, mengeras, dan durabilitas mortar dipelajari dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar optimal CSA sebesar 12,5% menunjukkan kekuatan tekan sebesar 36,70 MPa dan kekuatan lentur sebesar 7,36 MPa yang diuji pada umur 28 hari. Hasil lainnya juga menunjukkan bahwa CSA dengan kadar sebesar 12,5% menunjukkan sifat yang berhubungan dengan durabilitas yang memuaskan yaitu pada 28 hari dengan nilai *drying shrinkage* sebesar 640 μm/m, *ultrasonic pulse velocity* sebesar 4274 m/s, dan koefisien sorptivity sebesar $5,46 \times 10^{-4}$ mm/det^{1/2}.

Kata kunci: : *Calcium sulfoaluminate*, kekuatan tekan, durabilitas, kekuatan lentur, *sorptivity*

PENDAHULUAN

Greenhouse Gas (GHG) merupakan salah satu penyebab terjadinya *global warming* yang telah menjadi isu utama saat ini. *Global warming* disebabkan oleh melimpahnya emisi gas karbon yang dihasilkan dari berbagai sektor termasuk sektor industri pembangunan. Sebelum revolusi industri, konsentrasi gas karbon dioksida (CO₂) di atmosfer cukup stabil pada angka 280 ppm.

Namun, saat ini angka tersebut telah meningkat pesat dan berada di sekitar angka 400 ppm (Hanein et al., 2018). Salah satu penyebab meningkatnya GHG pada sektor pembangunan adalah akibat dari penggunaan semen Portland yang berlimpah, dimana pada hampir semua pembangunan yang sedang berlangsung saat ini mayoritas menggunakan semen. Produksi semen Portland masih menggunakan bahan bakar fosil dan memerlukan energi yang sangat besar.

Klinker semen Portland diproduksi oleh industri semen dan terestimasi menyumbang sekitar 5% dari total global emisi antropogenik CO₂ (Gartner, 2004). Pada tahun 2021, Indonesia diperkirakan memproduksi sebesar 66 juta ton semen Portland dan sekitar 4,4 milyar ton semen Portland diproduksi secara global (U.S. Geological Survey, 2022). Atas dasar itulah penggunaan semen Portland sebagai material konstruksi utama dalam pembangunan harus dikurangi untuk menekan emisi CO₂ dari sektor industri pembangunan. Salah satu solusi untuk mengurangi penggunaan semen Portland adalah dengan memanfaatkan *supplementary cementitious material* (SCM) sebagai bahan substitusi sebagian semen yang umumnya berasal dari produk sampingan limbah padat industri seperti *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) dan *fly ash* (Gartner, 2004). Di Indonesia, SCM telah banyak dimanfaatkan oleh industri semen dalam upaya untuk mengurangi emisi CO₂ dengan meningkatkan produksi semen Portland komposit dengan menggiling klinker semen dengan bahan anorganik lain seperti GGBFS, pozzolan, silikat, dan batu kapur (SNI 15-7064-2004, 2004).

Calcium sulfoaluminate (CSA), dengan rumus kimia $3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$, yang dikenal pula sebagai semen CSA merupakan salah satu alternatif yang dapat digunakan sebagai material pengikat pada mortar dan beton yang mulai berkembang dan diteliti sejak tahun 1998. Semen CSA hadir sebagai alternatif pengganti *ordinary Portland cement* (OPC) yang lebih ramah lingkungan karena emisi gas CO₂ yang dihasilkan selama produksi lebih rendah dan klinker CSA diproduksi dengan suhu 1350°C pada proses penggilingan yang lebih rendah dari produksi OPC (Gastaldi et al., 2016; Sharp et al., 1999; Sirtoli et al., 2019; Zhang et al., 2018). Klinker CSA mempunyai konstituen penting yaitu *ye'elimite* (C₄A₄S) dan fase minor lainnya yaitu kalsium silikat (C₂S), ferit (C₄AF), kalsium aluminat (C₃A dan C₁₂A₇) (Allevi et al., 2016). Kehadiran semen CSA dapat menjadi awal perkembangan dari suatu sistem semen yang rendah energi dan memiliki kekuatan awal yang lebih tinggi dibandingkan dari semen Portland serta memiliki permeabilitas yang rendah serta daya tahan terhadap serangan sulfat yang baik (Sharp et al., 1999). Dilaporkan pula oleh Sharp et al. (1999) bahwa kekuatan tekan awal semen CSA dapat mencapai nilai yang

sangat tinggi yaitu sekitar 33-35 MPa pada umur 1 hari dan sekitar 55-70 MPa pada umur 28 hari.

Campuran komposit dari OPC dan CSA sangat berpotensi digunakan untuk dapat mencapai properti mekanis khusus seperti waktu pengikatan dan pengerasan yang cepat (Zhang et al., 2018). Selain itu, pencampuran CSA dengan OPC tidak mempengaruhi hidrasi C₃S (*alite*) pada OPC, akan tetapi mengontrol disolusi alumina yang terdapat pada OPC. Selain itu, CSA dapat membantu bertambahnya pembentukan *ettringite* (AFt; C₆AS₃H₃₂) yang merupakan produk hidrasi utama dari *ye'elimite* yang mempunyai peranan penting dalam peningkatan properti mekanis dan ekspansi (Kim et al.). Namun, seiring dengan tingginya pembentukan *ettringite* pada campuran OPC-CSA akan menyebabkan lebih tingginya *chemical shrinkage* jika dibandingkan dengan campuran murni OPC (Saoût et al., 2013).

Penelitian ini dilakukan untuk memanfaatkan semen CSA sebagai pengganti sebagian OPC dalam memproduksi mortar yang lebih ramah lingkungan. Semen CSA, yang digunakan sebagai pengganti sebagian OPC divariasikan dengan kadar sebesar 0%; 12,5%, 25%; 37,5%; dan 50%. Pengaruh kadar CSA sebagai pengganti sebagian OPC terhadap properti segar, mengeras, dan durabilitas mortar dipelajari secara mendetail. Sebagai tambahan, penelitian campuran komposit dari OPC dan CSA pada mortar yang difokuskan pada perilaku pengerasan awal dilakukan dengan menguji kekuatan tekan awal pada umur 6 jam, dimana properti ini sangat bermanfaat dalam perbaikan beton pada era ini.

METODE PENELITIAN

Material

Ordinary Portland Cement (OPC)

Semen yang digunakan pada penelitian ini adalah semen Portland tipe I, yang dikenal secara umum dengan *Ordinary Portland Cement* (OPC), dengan massa jenis sebesar 3,07 g/cm³ yang diuji berdasarkan ASTM C188 (ASTM C188-17, 2017).

Calcium Sulfoaluminate (CSA)

Semen CSA yang digunakan pada penelitian ini, yang disebut dengan *calcium*

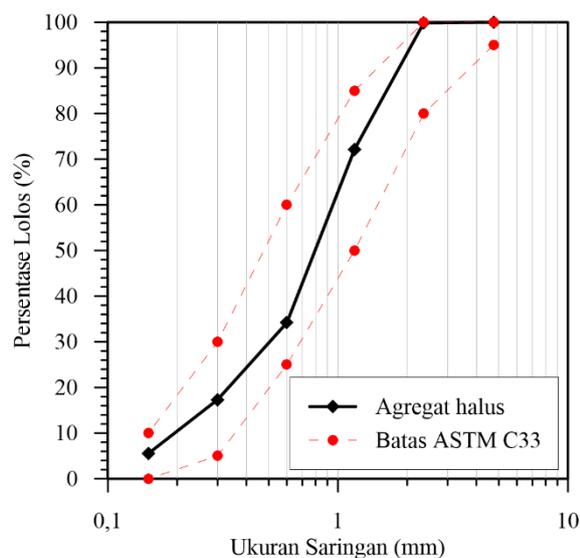
sulfoaluminate (CSA), diimpor dari China dengan merk *Polar Bear*. Massa jenis CSA yang diuji dengan standar pengujian menurut ASTM C188-17 (2017) diperoleh sebesar $2,78 \text{ g/cm}^3$.

Superplasticizer (SP)

Superplasticizer (SP) merupakan bahan tambah kimiawi yang digunakan untuk mendapatkan kelecakan mortar yang seragam pada setiap campuran. Pada penelitian ini, SP yang digunakan adalah MasterGlenium SKY 8614 yang merupakan *polycarboxylate ether* (PCE) yang tergolong Tipe F menurut ASTM C494/C949M (ASTM C494/C494M-19, 2019). SP tersebut berfungsi untuk mengurangi jumlah pemakaian air serta meningkatkan kelecakan mortar segar.

Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan pada penelitian ini berasal dari Provinsi Bandar Lampung. Agregat halus yang digunakan dalam keadaan kering oven yang dikeringkan menggunakan oven pada suhu $110 \pm 5^\circ\text{C}$ selama 24 jam. Berdasarkan pengujian yang mengacu pada ASTM C128 (ASTM C128-15, 2015), dapat diketahui bahwa agregat halus yang digunakan memiliki *specific gravity* sebesar 2,63 dan kapasitas absorpsi yang cukup kecil sebesar 0,74%. Analisis saringan pada agregat halus dilakukan mengacu pada ASTM C136/C136M (ASTM C136/C136M-19, 2019).



Gambar 1. Gradasi Agregat Halus

Berdasarkan pengujian yang dilakukan dapat diketahui bahwa agregat halus mempunyai modulus kehalusan (FM) sebesar 2,71 dengan kurva gradasi seperti terlihat pada Gambar 1. Terlihat bahwa nilai FM dan gradasi dari agregat halus tersebut memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh ASTM C33 (ASTM C33-18, 2018).

Langkah Penelitian

Perencanaan Campuran Mortar

Tabel 1 memperlihatkan perencanaan campuran pada penelitian ini yang dihitung berdasarkan metode volume absolut. Campuran mortar dibuat sebanyak 5 variasi dimana CSA menjadi substitusi OPC dengan persentase sebesar 0% (CSAN); 12,5% (CSAT); 25% (CSAQ); 37,5% (CSAF); dan 50% (CSAH). Pada penelitian ini, campuran CSAN yang merupakan mortar dengan 100% OPC diambil sebagai spesimen kontrol. Rasio air terhadap *binder* (*w/b*) ditetapkan sebesar 0,4. Penambahan SP dilakukan untuk mendapatkan kelecakan mortar dengan nilai *flow* (*F*) pada rentang $110 \pm 5 \%$ sesuai dengan ketentuan pada ASTM C109/C109M (ASTM C109/C109M-20, 2020). Pengujian kelecakan campuran mortar segar dilakukan dengan menggunakan alat meja sebar dengan spesifikasi sesuai dengan ASTM C1437 (ASTM C1437-20, 2020). Kadar SP yang digunakan pada campuran mortar tanpa substitusi CSA sebesar 0,5%, sedangkan pada campuran mortar yang menggunakan campuran OPC dan CSA sebesar 1,5%.

Tabel 1. Komposisi Campuran Mortar

Kode [†]	OPC	CSA	W	FA	SP (%)
	(kg/m ³)				
CSAN	596	-	239	1491	0,5
CSAT	519	74	237	1491	1,5
CSAQ	442	147	236	1491	1,5
CSAF	366	220	234	1491	1,5
CSAH	291	291	233	1491	1,5

Keterangan: OPC = *ordinary Portland cement*; CSA = *calcium sulfoaluminate*; W = air; FA = agregat halus; SP = *superplasticizer*

[†]CSAN = 0% CSA; CSAT = 12,5% CSA; CSAQ = 25% CSA; CSAF = 37,5% CSA; dan CSAH = 50% CSA.

Proses Pembuatan Spesimen

Proses pengadukan campuran mortar diawali dengan melakukan menaruh pencampuran kering yaitu dengan menaruh seluruh material dalam keadaan kering dan mengaduknya selama 2 menit dengan kecepatan rendah. Hal tersebut dilakukan agar memastikan bahwa seluruh material telah tercampur secara homogen. Selanjutnya, SP dengan kadar yang telah ditentukan dicampurkan pada air secara merata dan kemudian campuran air dan SP tersebut dituangkan pada *mixer* yang berputar dengan kecepatan rendah ke sedang selama 2 menit. Kemudian *mixer* dimatikan, selama 30 detik campuran mortar diaduk secara manual dengan spatula untuk memastikan semua campuran teraduk dengan sempurna. Kemudian, pengadukan dilanjutkan dengan menggunakan kecepatan sedang ke tinggi selama 2 menit.

Campuran mortar segar kemudian dituangkan pada cetakan yang sudah dipersiapkan dan dilakukan penumbukkan untuk memadatkan campuran mortar segar tersebut. Adapun bentuk dari spesimen benda uji yang dibuat terdiri dari kubus, kuboid, dan prisma. Spesimen kubus dengan ukuran $50 \times 50 \times 50$ mm dibuat dengan prosedur yang mengacu pada ASTM C109/C109M (ASTM C109/C109M-20, 2020) yang digunakan untuk pengetesan kekuatan tekan mortar dan *sorptivity*. Sedangkan spesimen kuboid dibuat dengan prosedur yang mengacu pada ASTM C348 (ASTM C348-21 2021). Terdapat dua jenis spesimen kuboid yang dibuat yaitu spesimen kuboid dengan ukuran $40 \times 40 \times 160$ mm untuk pengujian kekuatan lentur dan spesimen kuboid dengan ukuran $50 \times 50 \times 200$ mm untuk pengujian non destruktif menggunakan alat uji ultrasonik. Spesimen prisma dengan ukuran $25 \times 25 \times 285$ mm untuk pengujian *drying shrinkage* dibuat dengan prosedur yang mengacu pada ASTM C157/C157M (ASTM C348-21 2021). Setelah 24 jam setelah proses pencetakan, seluruh spesimen mortar dilepaskan dari cetakan dan dirawat dengan menggunakan metode perawatan kering (*air curing*) yaitu menyimpan dalam kontainer plastik pada suhu $23 \pm 3^\circ\text{C}$ dengan kelembaban relatif (RH) diatas 50% hingga hari pengujian.

Pengujian Properti Segar

Pengujian properti segar dilakukan dengan melakukan uji waktu pengikatan pada pasta semen dengan substitusi CSA sebesar 0%; 12,5%, 25%, 37,5%; dan 50% dengan prosedur pengujian berdasarkan ASTM C191 (ASTM C191-21, 2021). Hasil yang didapatkan berupa waktu pengikatan awal dan akhir dari masing-masing campuran.

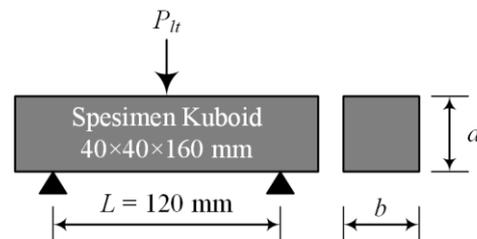
Pengujian Properti Mengeras

Pemeriksaan kekuatan tekan dan lentur dilakukan pada umur 6 jam, 1 hari, 3 hari, 7 hari, 14 hari, 21 hari, 28 hari, dan 56 hari. Dimana pengetesan pada umur 6 jam dilakukan untuk mengetahui karakteristik kekuatan awal dari spesimen mortar yang dibuat. Pengujian kekuatan tekan dilakukan pada kubus dengan ukuran $50 \times 50 \times 50$ mm yang mengacu pada ASTM C109/C109M (ASTM C109/C109M-20, 2020). Beban maksimum dicatat dan kekuatan tekan rata-rata mortar (f_m) dihitung dengan membagi beban maksimum dari pengujian tekan (P_t) dengan luas permukaan bidang tekan (A) dengan menggunakan Persamaan 1.

$$f_m = P_t / A \quad (1)$$

Kekuatan lentur diuji pada kuboid dengan ukuran $40 \times 40 \times 160$ mm dengan berdasarkan ASTM C348 (ASTM C348-21 2021). Gambar 2 menunjukkan skema pengujian kekuatan lentur dengan satu titik beban (P_t) yang terletak ditengah bentang dimana jarak antar tumpuan (L) sebesar 120 mm. Kekuatan lentur (S_f) untuk balok dengan penampang dengan lebar b dan tinggi d , dihitung menggunakan Persamaan (2)

$$S_f = 3P_t L / 2bd^2 \quad (2)$$



Gambar 2. Skema Pengujian Kekuatan Lentur

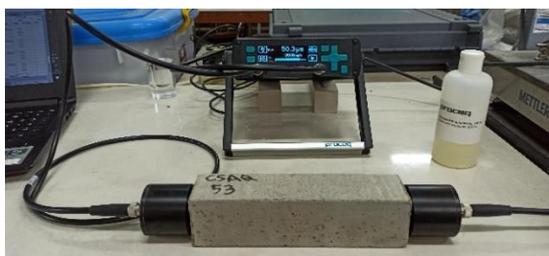
Pengujian Durabilitas

Pengujian durabilitas dilakukan pada beberapa pengujian yaitu meliputi pengujian *drying shrinkage*, pengujian *ultrasonic pulse velocity* (UPV), dan pengujian *sorptivity*. Pengujian *drying shrinkage* dilakukan pada spesimen mortar dengan ukuran 25×25×285 mm yang dilengkapi oleh *gage studs* khusus pada kedua ujungnya dan diuji berdasarkan ASTM C157/C157M (ASTM C157/C157M-17, 2017) dengan menggunakan alat pengukur panjang dengan ketelitian 0.001 mm seperti terlihat pada Gambar 3. Panjang awal (*initial*) dari spesimen *drying shrinkage* diukur pada saat spesimen dilepaskan dari cetakan dan kemudian panjang benda uji dipantau pada hari ke-1, 3, 5, 7, 14, 21, dan 28.



Gambar 3. Alat Pengujian *Drying Shrinkage*

Pengujian UPV pada mortar menggunakan spesimen kuboid dengan ukuran 50×50×200 mm dilakukan dengan acuan ASTM C597 (ASTM C597-16, 2016) menggunakan alat pengujian UPV (Proceq Pundit Lab+) seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Alat Pengujian UPV

UPV merupakan uji non destruktif yang dapat menggambarkan keseragaman material dengan

menggunakan gelombang kompresional yang dipancarkan oleh *transducer* dan diterima oleh *receiver* (Djayaprabha et al., 2020). Gelombang tersebut merambat melalui spesimen mortar dengan panjang L_m dengan waktu rambat gelombang t_{UPV} . Kecepatan gelombang kompresional (V_{UPV}) dapat dihitung dengan menggunakan Persaman 3.

$$V_{UPV} = L_m / t_{UPV} \quad (3)$$

Nilai V tersebut dapat digunakan untuk untuk memvalidasi hasil pengujian properti mekanis yang didapatkan dari uji destruktif.

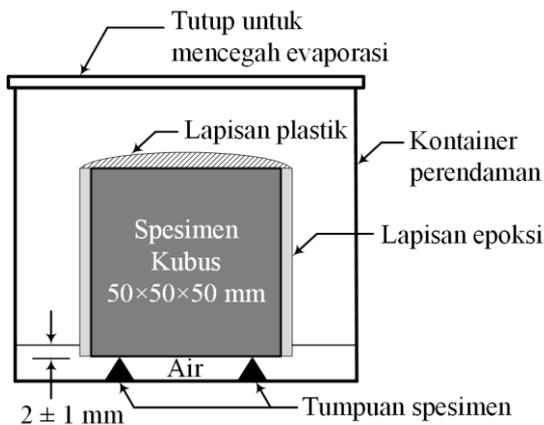
Pengujian *sorptivity* dilakukan untuk mengetahui tingkat durabilitas mortar terhadap penetrasi air secara kapiler. ASTM C1585 (ASTM C1585-20, 2020) diadopsi sebagai acuan dalam pengujian ini untuk mortar dengan menggunakan kubus dengan ukuran 50×50×50 mm (Asadi et al., 2021). Spesimen mortar yang telah mencapai umur 28 hari kemudian ditaruh pada desikator dan dikeringkan dengan oven selama 3 hari pada suhu $50 \pm 2^\circ\text{C}$ bersama dengan larutan kalium bromida jenuh pada bagian dasar desikator untuk menjaga RH di dalam desikator sebesar $80 \pm 0,5\%$. Sebelum dilakukan pengujian, spesimen mortar disimpan di dalam *zipper bag* selama 2 minggu untuk menyeimbangkan kelembaban relatif internal sekitar 50 – 70% untuk mendapatkan spesimen dengan kondisi yang mirip dengan kondisi di lapangan (ASTM C1585-20, 2020). Seluruh sisi samping spesimen mortar dilapisi oleh epoksi yang bertujuan untuk mencegah terjadinya penyerapan dari samping dan untuk mengurangi evaporasi, maka ada sisi atas benda uji dilapisi dengan menggunakan plastik. Pengujian dilakukan dengan dengan menaruh sisi spesimen kubus yang tidak terlapisi pada tumpuan yang telah disediakan di dalam kontainer berisi air dengan kedalaman air dijaga sebesar 2 ± 1 mm selama pengujian. Detail skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.

Pada penelitian ini, tingkat penyerapan air yang diamati hanya absorpsi awal (*initial absorption*), dimana fasa awal ini dapat mengukur seberapa cepat air dapat mengisi celah-celah pori yang besar (Li et al., 2017). Oleh karena itu tingkat penyerapan air diamati selama 6 jam, dimana tingkat penyerapan air pada spesimen mortar diamati pada waktu 1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300, dan 360 menit. Koefisien *sorptivity* (S) dapat diketahui

dari kemiringan garis regresi linear seperti tertulis pada Persamaan 4.

$$I = S\sqrt{t} + b \quad (4)$$

dimana, I (mm) perubahan massa spesimen akibat air yang terserap per satuan luas permukaan spesimen mortar, S (mm/det^{1/2}) adalah koefisien *sorptivity*, t (det) menunjukkan waktu, dan b adalah konstanta.



Gambar 5. Skema Pengujian *Sorptivity* Mortar

HASIL DAN PEMBAHASAN

Properti Segar

Pengujian kelecakan mortar segar dilakukan agar didapatkan nilai *flow* (F) yang seragam pada setiap campuran. Tabel 2 memperlihatkan diameter sebaran (D_{avg}) memenuhi persyaratan ASTM C109/C109M (ASTM C109/C109M-20, 2020) yaitu pada rentang 205 – 215 mm atau pada nilai *flow* pada rentang 110 ± 5 %. Nilai *flow* yang memenuhi syarat persyaratan tersebut mengindikasikan kelecakan mortar yang baik sehingga dapat menjamin bahwa mortar tidak terlampaui encer maupun terlalu kental untuk digunakan sebagai material konstruksi (Tippayasam et al., 2018).

Pengujian waktu pengikatan pada campuran pasta semen dengan substitusi CSA dilakukan dengan menggunakan alat Vicat sesuai dengan ASTM C191 (ASTM C191-21, 2021). Berdasarkan pengujian yang dilakukan sebanyak tiga kali untuk masing-masing campuran diperoleh waktu pengikatan awal dan akhir seperti terlihat pada Tabel 2, dimana nilai tersebut didapatkan dengan mengambil rata-rata dari 3 kali pengujian. Varian CSAN yang merupakan spesimen dengan 100% OPC

mempunyai waktu pengikatan awal dan akhir secara berturut-turut didapatkan sebesar 167 dan 240 menit. Dari hasil tersebut, dapat diketahui bahwa OPC yang digunakan telah sesuai dengan yang disyaratkan pada ASTM C150/C150M (ASTM C150/C150M-22, 2022) sehingga valid untuk dijadikan kontrol. Pada campuran pasta semen OPC dan CSA, terlihat bahwa waktu pengikatan terpengaruh akibat substitusi CSA yang menggantikan OPC. Tabel 2 memperlihatkan waktu pengikatan awal dan akhir yang bervariasi. Substitusi CSA sebesar 12.5% (CSAT) memberikan waktu pengikatan awal dan akhir berturut-turut sebesar 35 menit dan 40 menit. Sedangkan dengan substitusi CSA sebesar 25% (CSAQ) memberikan waktu pengikatan yang tercepat dibandingkan dengan variasi lainnya yaitu pengikatan awal tercapai dalam waktu 15 menit dan pengikatan akhir tercapai dalam waktu 20 menit. Waktu pengikatan berangsur-angsur melambat pada substitusi dengan 37.5% CSA hingga 50% CSA. Substitusi sebesar 37.5% CSA (CSAF) mencapai waktu pengikatan awal dalam waktu 73 menit dan pengikatan akhir dalam waktu 122 menit. Substitusi sebesar 50% CSA (CSAH) mengalami waktu pengikatan yang paling lama dibandingkan dengan variasi lainnya yaitu mencapai waktu pengikatan awal dalam waktu 255 menit dan pengikatan akhir dalam waktu 300 menit. Dari hasil tersebut, terlihat bahwa CSAT dan CSAQ mempunyai proses waktu pengikatan sangat cepat dengan perbedaan waktu dapat disebabkan oleh pembentukan *ettringite* yang cepat pada campuran OPC dan CSA (Saoût et al., 2013).

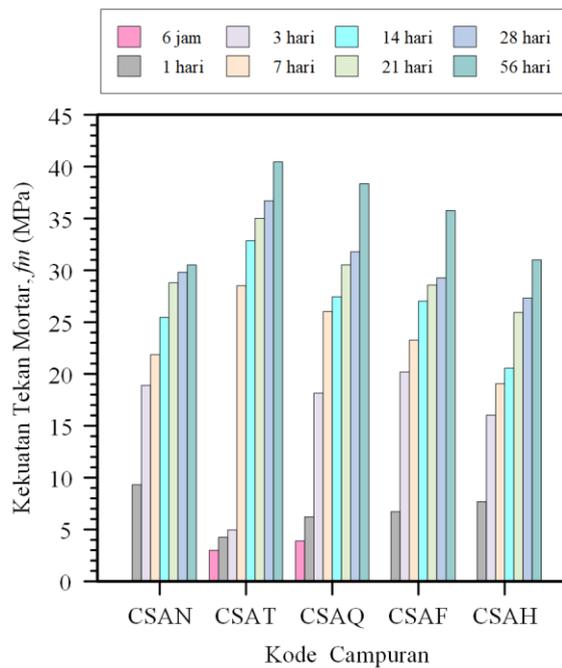
Tabel 2. Kelecakan dan Waktu Pengikatan

Kode	Kelecakan		Waktu Pengikatan	
	D_{avg} (mm)	F (%)	Awal (menit)	Akhir (menit)
CSAN	209,33	109	167	240
CSAT	206,42	106	35	40
CSAQ	211,67	111	15	20
CSAF	208,33	108	73	122
CSAH	213,33	113	255	300

Kekuatan Tekan Mortar

Gambar 6 memperlihatkan hasil pengujian kekuatan tekan mortar yang diuji pada umur 6 jam, 1 hari, 3 hari, 7 hari, 14 hari, 21 hari,

28 hari, dan 56 hari. Kekuatan tekan mortar pada 6 jam dapat diperoleh pada campuran CSAT dan CSAQ, dimana hanya kedua campuran tersebut yang dapat dilepaskan dari cetakan sebelum 6 jam. Hal tersebut sesuai dengan hasil pengujian waktu pengikatan. Dalam kurun waktu 6 jam, campuran CSAT dan CSAQ mencapai kekuatan tekan sebesar 2,99 dan 3,90 MPa.



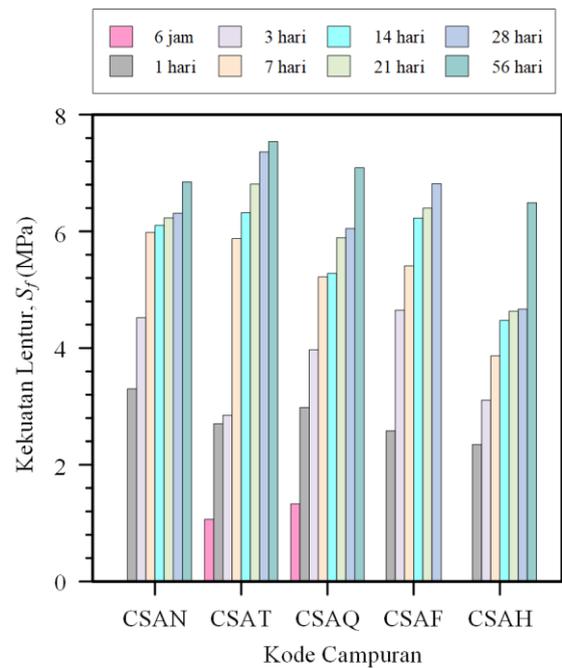
Gambar 6. Kekuatan Tekan Mortar

Walaupun campuran CSAT dan CSAQ memiliki kekuatan tekan awal yang lebih tinggi dari campuran lainnya namun perkembangan kekuatan tekan pada hari ke-1 dan ke-3 masih tidak signifikan dimana dibandingkan dengan CSAN sebagai benda uji kontrol pada hari ke-1 dan ke-3 dan kekuatan tekan CSAT lebih rendah sebesar 54,34% dan 73,73%, sedangkan CSAQ lebih rendah sebesar 33,28% dan 3,97%. Namun, campuran CSAT dapat mencapai kekuatan tekan tertinggi dibandingkan campuran lainnya sebesar 36,70 MPa dan 40,45 MPa pada hari ke-28 dan hari ke-56.

Kekuatan Lentur Mortar

Hasil pengujian kekuatan lentur mortar dari berbagai variasi kadar CSA dapat dilihat pada Gambar 7. Karena kekuatan lentur merupakan fungsi dari kekuatan tekan, maka perilaku yang terjadi serupa. Kekuatan tekan awal 6 jam diperoleh sebesar 1,06 MPa dan 1,33

MPa untuk campuran CSAT dan CSAQ, secara berturutan. Kekuatan lentur pada umur 28 hari diperoleh sebesar 6,31 MPa, 7,36 MPa, 6,05 MPa, 6,82 MPa, dan 4,67 MPa secara berturutan untuk campuran CSAN, CSAT, CSAQ, CSAF, dan CSAH. Terlihat bahwa campuran dengan kadar CSA 12,5% mencapai kekuatan lentur optimum.

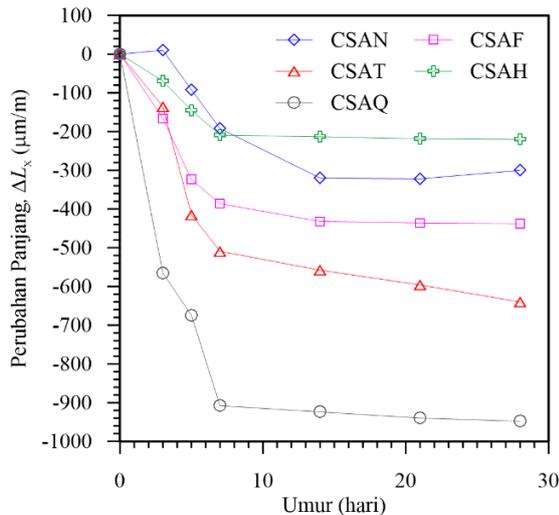


Gambar 7. Kekuatan Lentur Mortar

Drying Shrinkage

Pengujian *drying shrinkage* dari masing-masing variasi campuran mortar menggambarkan perubahan volume dari specimen akibat dari kehilangan air pada gel pori. Beberapa faktor eksternal yang dapat menyebabkan fenomena ini antara lain adalah suhu dan kelembaban. (Mastali et al., 2018). Hasil pengujian *drying shrinkage* pada mortar dengan variasi kadar CSA dapat dilihat pada Gambar 8. Nilai *drying shrinkage* dari CSAN sebagai specimen kontrol yang merupakan 100% OPC mencapai sebesar 300 μm/m pada hari ke-28. Hanya campuran CSAH memiliki nilai *drying shrinkage* yang lebih kecil sebesar 26,67%, sedangkan campuran CSAT, CSAQ, dan CSAF memiliki nilai *drying shrinkage* yang 113,33%, 216,00%, dan 46,00% lebih besar, secara berturutan. Nilai penyusutan dari specimen campuran OPC dan CSA yang lebih besar dari specimen kontrol dapat

mengindikasikan bahwa kehadiran CSA dengan alkalinitas yang rendah (umumnya mempunyai nilai pH yang lebih rendah dari 10,5) akan berpengaruh buruk terhadap kestabilan *ettringite* (Zhang et al., 2018). Karakteristik CSA yang merupakan *expansive agent* dapat terlihat pada campuran CSAH yang memiliki kadar CSA yang tinggi. Dalam penelitian yang dilakukan Telesca et al. (2014) ditunjukkan bahwa penggunaan sebesar 50% CSA menunjukkan ekspansi yang tinggi.



Gambar 8. *Drying Shrinkage Mortar*

Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)

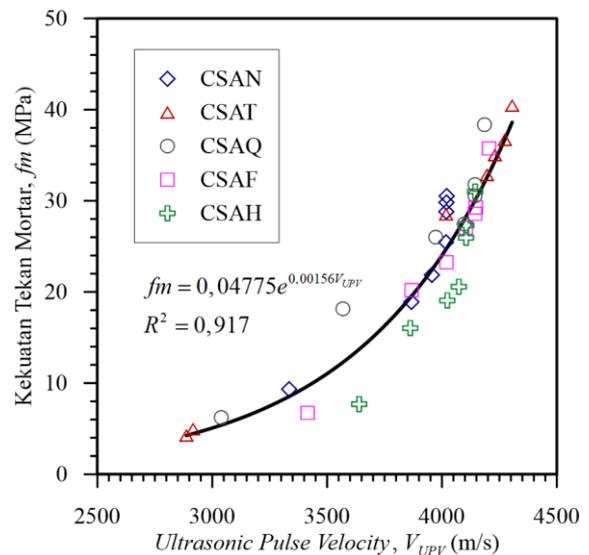
Nilai UPV dapat menunjukkan keseragaman atau homogenitas material yang ditunjukkan dengan pori-pori udara atau keretakan yang mungkin terdapat dalam sampel (Djayaprabha et al., 2017). Pengujian UPV yang dilakukan dalam penelitian ini diuji pada umur 1, 3, 7, 14, 21, 28, dan 56 hari seperti terangkum pada Tabel 3. Terlihat bahwa mulai dari umur 14 hari nilai UPV yang didapatkan telah mencapai lebih dari 4000 m/s yang menandakan bahwa perkembangan hidrasi yang baik dan seluruh campuran mortar mempunyai klasifikasi baik hingga sangat baik (Ngo dan Huynh, 2022).

Perkembangan nilai UPV tersebut juga sejalan dengan perkembangan nilai kekuatan tekan, karena ada korelasi yang kuat antara kekuatan tekan dan UPV. Dimana persamaan yang sangat umum dipergunakan untuk menggambarkan hubungan tersebut adalah persamaan eksponensial seperti tertulis pada Persamaan 5.

$$fm = ae^{bV_{UPV}} \tag{5}$$

Tabel 3. Nilai *Ultrasonic Pulse Velocity*

Umur (hari)	V_{UPV} (m/s)				
	Kode Campuran				
	CSAN	CSAT	CSAQ	CSAF	CSAH
1	3335	2887	3039	3415	3639
3	3867	2916	3569	3868	3862
7	3956	4018	3973	4020	4023
14	4018	4196	4097	4104	4073
21	4019	4230	4144	4144	4105
28	4020	4274	4144	4147	4106
56	4021	4305	4185	4205	4145



Gambar 9. Korelasi antara Kekuatan Tekan Mortar dan UPV

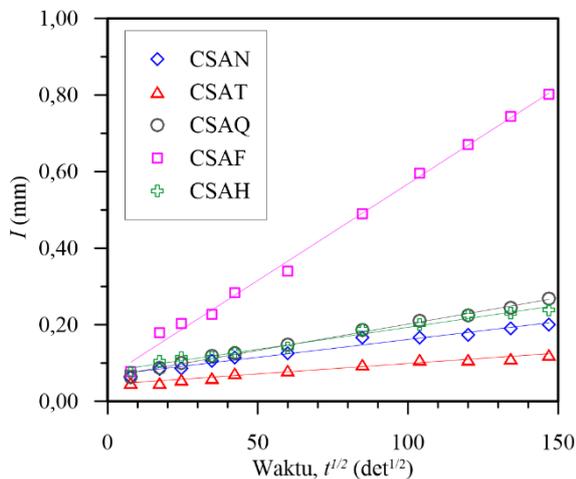
Gambar 9 menunjukkan hasil korelasi antara kekuatan tekan dan UPV didapatkan sebuah persamaan dengan koefisien *a* sebesar 0,04775 dan *b* sebesar 0,00156 yang dapat menggambarkan hubungan antara kekuatan tekan mortar dan UPV untuk campuran OPC dan CSA dengan kadar CSA sebesar 0%; 12,5%; 25%; 37,5%; dan 50% seperti tertulis pada Persamaan 6.

$$fm = 0,04775e^{0,00156V_{UPV}} \tag{6}$$

Nilai koefisien determinasi (R^2) yang diperoleh dari persamaan tersebut adalah sebesar 0,917 dimana menurut Choi dan Yuan (2005) persamaan korelasi dapat dianggap sebagai model yang mempunyai korelasi yang kuat jika memiliki nilai R^2 yang lebih besar dari 0,7. Maka berdasarkan itu, persamaan yang telah didapatkan dapat menggambarkan hubungan kekuatan tekan mortar dan nilai UPV dengan korelasi yang kuat.

Sorptivity

Perubahan massa kumulatif dari spesimen mortar akibat air yang terserap pada satuan luas permukaan mortar yang merupakan fungsi dari akar waktu untuk masing-masing campuran dengan variasi kadar CSA sebesar 0%; 12,5%; 25%; 37,5%; dan 50% dapat dilihat pada Gambar 10. Semakin besarnya peningkatan massa kumulatif yang terjadi, maka akan menandakan bahwa semakin banyak pori-pori yang terisi air, sehingga tingkat penyerapan air pada spesimen dapat dianalisis melalui koefisien *sorptivity* (S) dapat diperoleh berdasarkan gradien garis regresi masing-masing campuran, yang telah dirangkum pada Tabel 4. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa campuran CSAT memiliki nilai koefisien *sorptivity* terkecil sebesar $5,46 \times 10^{-4}$ mm/det^{1/2}, dimana nilai tersebut dapat menandakan bahwa spesimen mortar dengan campuran tersebut memiliki durabilitas yang baik. Campuran lainnya masih memiliki nilai koefisien *sorptivity* yang lebih besar dari spesimen kontrol CSAN. Hasil nilai koefisien *sorptivity* tersebut sebanding pula dengan nilai kekuatan tekan masing-masing campuran, dimana kekuatan tekan yang lebih rendah menandakan porositas yang tinggi.



Gambar 10. Grafik Sorptivity

Tabel 4. Koefisien Sorptivity pada Spesimen Mortar

Kode	Kadar CSA (%)	Koefisien Sorptivity (mm/det ^{1/2})
CSAN	0,0	$9,31 \times 10^{-4}$
CSAT	12,5	$5,46 \times 10^{-4}$
CSAQ	25,0	$13,75 \times 10^{-4}$
CSAF	37,5	$50,45 \times 10^{-4}$
CSAH	50,0	$11,50 \times 10^{-4}$

KESIMPULAN

Studi eksperimental ini telah dilakukan untuk mengurangi penggunaan semen Portland untuk mendapatkan semen yang lebih ramah lingkungan. Dimana, telah dilakukan serangkaian pengujian untuk mengetahui properti segar, mengeras, dan durabilitas dari pemanfaatan semen CSA untuk menjadi substitusi OPC. Berdasarkan hasil yang diperoleh, kadar CSA untuk mencapai kekuatan tekan dan kekuatan lentur yang optimum diperoleh pada kadar CSA sebesar 12,5%. Substitusi OPC dengan 12,5% CSA tidak memiliki kekuatan tekan awal yang signifikan, namun properti mekanis pada umur 28 menunjukkan nilai yang optimum yaitu mencapai kekuatan tekan sebesar 36,70 MPa yang lebih tinggi sebesar 40,5% dibandingkan dengan spesimen kontrol dan kekuatan lentur sebesar 7,36 MPa yang lebih tinggi sebesar 10,1% dibandingkan dengan spesimen kontrol. Perubahan volume spesimen yang ditunjukkan berdasarkan nilai *drying shrinkage* didapatkan bahwa pada umur 28 hari untuk spesimen mortar dengan substitusi CSA sebesar 0%; 12,5%, 25%, 37,5%, dan 50% secara berturut-turut mempunyai nilai penyusutan sebesar 300, 640, 948, 438, dan 220 μ m. Selain itu, berdasarkan pengujian non destruktif pada umur 28 hari menggunakan alat pengujian *ultrasonic pulse velocity* didapatkan nilai UPV pada rentang 4020 – 4274 m/s untuk semua variasi campuran mortar yang mengindikasikan homogenitas yang baik untuk campuran OPC dan CSA.

Selanjutnya, substitusi sebagian OPC dengan CSA menunjukkan tingkat durabilitas yang baik. Dimana, campuran dengan kadar CSA sebesar 12,5% mempunyai koefisien *sorptivity* yang lebih rendah sebesar 41,35% dibandingkan dengan spesimen kontrol. Substitusi sebagian OPC dengan CSA dalam produksi mortar yang lebih ramah lingkungan layak untuk dipertimbangkan berdasarkan hasil yang telah dilakukan pada studi eksperimental ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan untuk pemberian izin penggunaan fasilitas di Laboratorium Teknik Struktur, Dunia

Mortar atas penyediaan material utama untuk pelaksanaan kegiatan penelitian ini, dan PT Master Builder Solution Indonesia atas penyediaan SP. Semua tulisan dalam makalah ini menjadi tanggung jawab para penulis dan tidak mencerminkan pandangan sponsor.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C188-17. (2017). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. West Conshohocken, ASTM International.
- SNI 15-7064-2004. (2004). *Semen portland komposit* Jakarta, Badan Standardisasi Nasional.
- Allevi, S., Marchi, M., Scotti, F., Bertini, S. dan Cosentino, C. (2016). Hydration of calcium sulphoaluminate clinker with additions of different calcium sulphate sources. *Materials and Structures*, 49:453–466. DOI: 10.1617/s11527-014-0510-5.
- Asadi, I., Shafigh, P., Hashemi, M., Akhiani, A. R., Maghfouri, M., Sajadi, B., Mahyuddin, N., Esfandiari, M., Talebi, H. R. dan Metselaar, H. S. C. (2021). Thermophysical properties of sustainable cement mortar containing oil palm boiler clinker (OPBC) as a fine aggregate. *Construction and Building Materials*. 268, 121091. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121091.
- ASTM C33-18. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. West Conshohockens, ASTM International.
- ASTM C109/C109M-20. (2020). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM C128-15. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM C136/C136M-19. (2019). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohockens, ASTM International.
- ASTM C150/C150M-22. (2022). *Standard Specification for Portland Cement*. West Conshohockens, ASTM International.
- ASTM C157/C157M-17. (2017). *Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM C191-21. (2021). *Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM C348-21 (2021). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM C494/C494M-19. (2019). *Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*. West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM C597-16. (2016). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM C1437-20. (2020). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. West Conshohocken, ASTM International.
- ASTM C1585-20. (2020). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. West Conshohocken, ASTM International.
- Djayaprabha, H. S., Chang, T.-P., Shih, J.-Y. dan Chen, C.-T. (2017). Mechanical properties and microstructural analysis of slag based cementitious binder with calcined dolomite as an activator. *Construction Building Materials*, 150:345-354. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.221.
- Djayaprabha, H. S., Chang, T.-P., Shih, J.-Y. dan Nguyen, H.-A. (2020). Improving the Mechanical and Durability Performance of No-Cement Self-Compacting Concrete by Fly Ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(9), 04020245. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.19435533.0003281.
- Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*, 34:1489-1498. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.021.
- Gastaldi, D., Paul, G., Marchese, L., Irico, S., Boccacali, E., Mutke, S., Buzz, L. dan Canonico, F. (2016). Hydration products in sulfoaluminate cements: Evaluation of amorphous phases by XRD/solid-state NMR. *Cement and Concrete Research*, 90:162-173. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.05.014.

- Hanein, T., Galvez-Martos, J.-L. dan Bannerman, M. N. (2018). Carbon footprint of calcium sulfoaluminate clinker production. *Journal of Cleaner Production*, 172:2278-2287. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.183.
- Kim, T., Seo, K.-Y., Kang, C. dan Lee, T.-K. Development of Eco-Friendly Cement Using a Calcium Sulfoaluminate Expansive Agent Blended with Slag and Silica Fume. *Applied Sciences*, 11(1), 394. DOI: 10.3390/app11010394.
- Li, X., Lu, Z., Chuah, S., Li, W., Liu, Y., Duan, W. H. dan Li, Z. (2017). Effects of graphene oxide aggregates on hydration degree, sorptivity, and tensile splitting strength of cement paste. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 100:1-8. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.05.002.
- Mastali, M., Kinnunen, P., Dalvand, A., Firouz, R. M. dan Illikainen, M. (2018). Drying shrinkage in alkali-activated binders – A critical review. *Construction Building Materials*, 190:533-550. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.125.
- Ngo, S.-H. dan Huynh, T.-P. (2022). Effect of Paste Content on Long-Term Strength and Durability Performance of Green Mortars. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering*, 16(1):113–125. DOI: 10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(1)-10.
- Saoût, G. L., Lothenbach, B., Hori, A., Higuchi, T. dan Winnefeld, F. (2013). Hydration of Portland cement with additions of calcium sulfoaluminates. *Cement and Concrete Research*, 43:81-84. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.10.011.
- Sharp, J. H., Lawrence, C. D. dan Yan, R. (1999). Calcium sulfoaluminate cements—low-energy cements, special cements or what?. *Advances in Cement Research*, 11(1):3-13. DOI: 10.1680/adcr.1999.11.1.3.
- Sirtoli, D., Wyrzykowski, M., Riva, P., Tortelli, S., March, M. dan Lura, P. (2019). Shrinkage and creep of high performance concrete based on calcium sulfoaluminate cement. *Cement and Concrete Composites*, 98:61-73. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2019.02.006.
- U.S. Geological Survey. (2022). Mineral Commodity Summaries 2022. *Virginia, USGS*. DOI: 10.3133/mcs2022.
- Telesca, A., Marroccoli, M., Pace, M. L., Tomasulo, M., Valenti, G. L. dan Monteiro, P. J. M. (2014). A hydration study of various calcium sulfoaluminate cements. *Cement and Concrete Composites*, 53:224-232. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.07.002.
- Tippayasam, C., Suttikulsoombat, S., Paramee, J., Leonelli, C. dan Chaysuwan, D. (2018). Development of Geopolymer Mortar from Metakaolin Blended with Agricultural and Industrial Wastes. *Key Engineering Materials*, 766:305-310. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.766.305.
- Zhang, J., Li, G., Ye, W., Chang, Y., Liu, Q. dan Song, Z. (2018). Effects of ordinary Portland cement on the early properties and hydration of calcium sulfoaluminate cement. *Construction and Building Materials*, 186:1144-1153. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.008.