

ANALISIS PENGARUH PENAMBAHAN *CEMENT ADDITIVES* (CA) TERHADAP KUAT TEKAN DAN PANAS HIDRASI PADA SEMEN *PORTLAND* TIPE OPC

Nora Aulia Apsarin dan Ari Susanti

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia
noraaulia16@gmail.com ; ari.susanti@polinema.ac.id

ABSTRAK

Semen *Portland* tipe OPC merupakan material utama dalam industri konstruksi karena memiliki sifat mekanik yang baik dan ketersediaan yang luas. Namun, proses produksinya menghadapi kendala berupa aglomerasi partikel pada tahap penggilingan serta peningkatan suhu akibat reaksi hidrasi yang tidak terkontrol. Penambahan *cement additives* (CA) menjadi salah satu strategi untuk meningkatkan efisiensi penggilingan sekaligus memperbaiki kualitas mekanik dan termal dari semen. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan tiga jenis CA (CA01, CA02, dan CA03) terhadap kuat tekan dan panas hidrasi semen OPC. Metode yang digunakan meliputi pencampuran CA dengan semen, pembuatan sampel mortar, pengujian kuat tekan pada hari ke-3, ke-7, dan ke-28 serta pengujian panas hidrasi. Uji panas hidrasi dilakukan menggunakan alat *thermography test* untuk mengukur suhu puncak, waktu puncak, serta waktu pengikatan awal dan akhir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh CA mampu meningkatkan kuat tekan dan mempercepat reaksi hidrasi dibandingkan dengan sampel tanpa CA. Sampel CA03 menunjukkan performa terbaik dengan kuat tekan tertinggi (556 kg/cm²) dan suhu puncak tertinggi (67,69°C) panas hidrasi yang signifikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan CA yang terbukti optimal berdasarkan hasil pengujian mampu meningkatkan sifat mekanik dan termal pada semen OPC, sehingga cocok untuk aplikasi konstruksi yang membutuhkan kekuatan awal tinggi serta waktu pengerasan yang singkat.

Kata kunci: *cement additives*, kuat tekan, OPC, panas hidrasi, panas termal

ABSTRACT

Portland cement type OPC is the primary material in the construction industry due to its good mechanical properties and wide availability. However, its production process faces challenges like particle agglomeration during grinding and increased temperature due to uncontrolled hydration reactions. Adding cement additives (CA) is one strategy to improve grinding efficiency while enhancing cement's mechanical and thermal properties. This study aims to analyze the effect of adding three types of CA (CA01, CA02, and CA03) on OPC cement's compressive strength and hydration heat. The methods used include mixing CA with cement, preparing mortar samples, testing compressive strength on days 3, 7, and 28, and conducting hydration heat testing. Hydration heat testing was conducted using a thermography test to measure peak temperature, peak time, initial, and final setting times. The results showed all CA increased compressive strength and accelerated hydration reactions compared to sample without CA. Sample CA03 demonstrated the best performance with the highest compressive strength (556 kg/cm²) and peak hydration heat temperature (67,69°C). The result showed that the use of CA, which was proven to be optimal based on the test results, was able to improve the mechanical and thermal properties of OPC cement, making it suitable for construction applications that require high initial strength and short setting times.

Keywords: *cement additives*, compressive strength, OPC, hydration heat, thermal heat

Corresponding author: Ari Susanti

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno-Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

E-mail: ari.susanti@polinema.ac.id



1. PENDAHULUAN

Industri semen memegang peran penting dalam pembangunan infrastruktur di Indonesia. Terutama dengan banyaknya proyek konstruksi seperti jalan, jembatan, pelabuhan, dan perumahan. Salah satu jenis semen yang paling banyak digunakan adalah *Ordinary Portland Cement* (OPC) karena kekuatannya yang tinggi dan ketersediaannya melimpah. Namun, dalam proses produksinya khususnya pada tahap penggilingan, sering muncul masalah aglomerasi partikel akibat muatan elektrostatik. Masalah ini menurunkan efisiensi penggilingan sehingga diperlukan bahan tambahan berupa *Cement Additives* (CA) untuk mengoptimalkan proses tersebut [1].

Penggunaan CA terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggilingan, memperbaiki distribusi ukuran partikel, serta mengurangi kebutuhan energi tanpa mengurangi kualitas semen [2]. Beberapa jenis CA seperti *cement grinding aids* dan *strength enhancers* dapat mempercepat reaksi hidrasi awal, meningkatkan kuat tekan, serta mengatur waktu pengikatan [3]. Penelitian sebelumnya oleh Guo dan Shao-Fei (2017) menunjukkan bahwa senyawa seperti trietanolamin (TEA), dietilen glikol (DEG), dan kalsium klorida (CaCl_2) dalam CA memberikan dampak positif terhadap kualitas semen, baik dari segi mekanik maupun termal [4]. Selain itu, penelitian Heikal (2004) dan Kishar (2013) membuktikan bahwa aditif tertentu dapat mempercepat pembentukan produk hidrasi seperti ettringite yang meningkatkan kekuatan tekan dan mengurangi waktu *setting* [5,6].

Dalam efisiensi produksi semen, penggunaan CA juga berkontribusi pada aspek lingkungan dengan mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon selama proses penggilingan [7]. Dengan meningkatnya kesadaran akan dampak lingkungan, pengembangan CA yang ramah lingkungan dan berkelanjutan menjadi fokus utama industri semen modern [8]. Inovasi dalam formulasi CA memungkinkan penyesuaian waktu *setting* dan pengendalian panas hidrasi yang sangat bermanfaat untuk mencegah retak akibat perubahan suhu yang drastis [9]. Berbagai penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa penggunaan CA mampu meningkatkan kuat tekan awal maupun mencapai puncak suhu panas hidrasi [10,11].

Meski demikian, sebagian besar hanya berfokus pada satu aspek kinerja semen seperti kuat tekan atau panas hidrasi saja. Padahal, kedua parameter ini saling berkaitan erat. Oleh karena itu, penelitian ini berupaya memberikan kontribusi ilmiah dengan menganalisis pengaruh penambahan CA terhadap kuat tekan dan panas hidrasi. Kuat tekan merupakan parameter mekanik yang menunjukkan kemampuan suatu bahan dalam menahan gaya tekan hingga terjadi keruntuhan dan sering digunakan sebagai indikator mutu semen [12]. Panas hidrasi adalah energi panas yang dihasilkan dari reaksi eksotermis antara senyawa semen dan air, sedangkan panas termal mengacu pada kenaikan suhu yang terukur selama proses tersebut [13]. Penelitian ini juga membedakan secara konseptual dan eksperimental antara panas hidrasi sebagai fenomena kimia dan panas termal sebagai manifestasi fisik dari perubahan suhu dalam campuran semen.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan CA terhadap kuat tekan dan panas hidrasi pada semen OPC. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengidentifikasi jenis CA yang paling efektif dalam meningkatkan sifat mekanik dan termal semen OPC sehingga dapat diaplikasikan secara optimal dalam konstruksi yang membutuhkan kekuatan awal tinggi dan durabilitas jangka panjang.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh penambahan *cement additives* (CA) terhadap karakteristik mekanik dan termal semen OPC. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui pengujian langsung terhadap empat sampel, yaitu tiga sampel dengan penambahan CA (CA01, CA02, dan CA03) dan satu sampel tanpa penambahan CA. Setiap sampel akan dilakukan pengujian menggunakan alat kuat tekan dan *thermography test*. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis CA yang digunakan, sedangkan variabel terikat mencakup nilai kuat tekan (kg/cm^2) dan parameter panas hidrasi seperti suhu puncak ($^{\circ}\text{C}$), waktu puncak (menit), waktu pengikatan awal serta akhir (menit). Variabel tetap meliputi komposisi semen, rasio air-semen, massa pasir silika, serta prosedur pencampuran yang konsisten pada seluruh perlakuan.

2.1. Prosedur Pencampuran CA dengan Semen

Masing-masing jenis CA (CA01, CA02, dan CA03) dilarutkan terlebih dahulu ke dalam 1 liter aquades untuk memperoleh larutan aditif dengan konsentrasi 0,6 mg/L. Campuran semen sebanyak 250 gram dan pasir silika sebanyak 650 gram dimasukkan ke dalam wadah pengaduk, lalu larutan CA ditambahkan ke dalam campuran tersebut. Proses pencampuran dilakukan selama 90 detik dalam 3 tahap: 30 detik pertama dilakukan pengadukan cepat, 30 detik berhenti, kemudian 30 detik pengadukan lambat. Prosedur ini mengacu pada pedoman ASTM C305 "*Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*" untuk memastikan distribusi CA merata di seluruh massa campuran [14].



(a)



(b)



(c)

Gambar 1. (a) Campuran semen dan pasir silika; (b) Penambahan CA ke dalam semen; (c) Proses pengadukan

2.2. Pembuatan Sampel Mortar

Mortar pada penelitian ini merupakan campuran homogen antara semen OPC, pasir silika, air, dan CA yang digunakan sebagai spesimen uji. Mortar yang telah tercampur dituangkan ke dalam cetakan kubus berukuran standar (5 cm x 5 cm x 5 cm). Cetakan dipadatkan secara merata untuk menghindari rongga udara dan dibiarkan mengeras selama 24 jam di suhu ruang pada ruang penyimpanan. Setelah itu, sampel dikeluarkan dari cetakan dan dilakukan proses *curing* dalam air bersih selama 3, 7, dan 28 hari. Setelah masa perawatan sesuai jadwal selesai, sampel diuji kuat tekan menggunakan mesin uji kuat tekan. Pengujian kuat tekan dilakukan berdasarkan pada pedoman ASTM C109 "*Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*" [15]. Untuk pengujian

panas hidrasi, campuran mortar setelah pengadukan dimasukkan ke kantong plastik tertutup, kemudian dimasukkan ke alat *thermography test* untuk dilakukan pengukuran suhu puncak dan parameter lainnya selama 7 jam.



Gambar 2. (a) Proses pencetakan; (b) Proses pengerasan pada ruang penyimpanan

2.3. Metode Analisis Data

Data yang diperoleh dari hasil pengujian kuat tekan dan panas hidrasi dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui hubungan antar parameter. Analisis awal dilakukan dengan membandingkan nilai kuat tekan dan parameter panas hidrasi (suhu puncak, waktu puncak, waktu pengikatan awal dan akhir) antara sampel tanpa penambahan CA (blangko) dan sampel dengan penambahan CA. Selain analisis perbandingan, penelitian ini juga melakukan analisis korelasi antara kuat tekan dan suhu puncak panas hidrasi untuk mengidentifikasi hubungan fungsional antara karakteristik mekanik dan termal yang dihasilkan akibat penambahan CA.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian, data pengujian kuat tekan dan panas hidrasi yang diperoleh melalui pengamatan menggunakan alat uji termal, ditunjukkan pada tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Data pengamatan uji kuat tekan sampel blangko, CA01, CA02, dan CA03

Hari Ke-	Standar Nilai Kuat Tekan (kg/cm ²)	Uji Kuat Tekan (kg/cm ²)			
		Blangko	CA01	CA02	CA03
3	Min. 220	230	267	270	274
7	Min. 270	331	368	373	388
28	Min. 380	464	544	549	556

Tabel 2. Data pengamatan uji panas termal sampel blangko, CA01, CA02, dan CA03

No.	Sampel	Uji Panas Termal			
		Suhu Puncak (°C)	Waktu Puncak (menit)	Waktu Pengikatan Awal (menit)	Waktu Pengikatan Akhir (menit)
1	Blangko	57,63	426	149,1	264,12
2	CA01	62,75	405	141,75	251,1
3	CA02	63,44	390	138,25	244,9

No.	Sampel	Suhu Puncak (°C)	Waktu Puncak (menit)	Uji Panas Termal	
				Waktu Pengikatan Awal	Waktu Pengikatan Akhir
				(menit)	(menit)
4	CA03	67,69	390	136,5	241,8

(lanjutan)

CA merupakan suatu bahan kimia yang biasanya digunakan sebagai bahan tambahan untuk membantu proses penggilingan *clinker*. Proses ini merupakan tahap akhir dalam pembuatan semen sebelum menjadi produk. Ketika dilakukan proses penggilingan untuk mendapatkan tingkat kehalusan tertentu, sering terjadi penggumpalan pada bahan yang digiling. Hal ini disebabkan oleh muatan listrik yang dihasilkan selama proses penggilingan, dimana muatan positif dan negatif pada permukaan partikel semen saling tarik-menarik. Penggunaan CA adalah suatu solusi paling efektif untuk mencegah terjadinya permasalahan tersebut. CA dapat membantu meningkatkan luas permukaan, distribusi ukuran partikel, dan mengurangi konsumsi energi selama penggilingan serta meningkatkan efisiensi produksi.

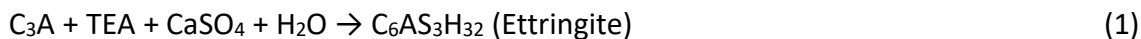
Pada umumnya kandungan dari CA adalah *triethanolamine*, *ethylene glycol*, *diethylene glycol*, *amine acetate*, *chloride*, *alkali salts*, *triisopropanolamine*, *FE (II) sulfate*, *polycarboxylates*, *gluconates*, dan *synthetic surfactants*. Bahan tambahan penggilingan ini menggabungkan komponen tunggal yang memanfaatkan interaksi antar komponen tersebut sehingga diharapkan efek penggilingan yang baik, stabilitas tinggi dan berpengaruh pada kualitas produk yang dihasilkan [4]. Adanya beberapa komponen yang terkandung dalam CA, dapat berpengaruh pada kualitas semen dilihat dari segi uji kuat tekan dan panas hidrasi semen. Penggunaan CA memberikan manfaat signifikan pada efisiensi penggilingan dan kekuatan tekan awal. Selain itu, panas hidrasi yang lebih tinggi menunjukkan bahwa CA memiliki potensi untuk mempercepat proses hidrasi sehingga cocok digunakan pada konstruksi yang membutuhkan semen dengan kekuatan awal yang tinggi dan waktu pengerjaan yang cepat.

Semen adalah bahan pengikat utama dalam konstruksi yang kekuatan dan karakteristiknya sangat dipengaruhi oleh proses hidrasi. Proses ini melibatkan reaksi kimia antara semen dan air, menghasilkan produk yang memberikan kekuatan mekanis sekaligus melepaskan energi panas yang dikenal sebagai panas hidrasi. Kandungan utama dalam semen memiliki peran signifikan dalam menentukan kuat tekan dan panas hidrasi. Beberapa komponen yang terkandung dalam semen adalah trikalsium silikat (C_3S), dikalsium silikat (C_2S), trikalsium aluminat (C_3A) dan kalsium aluminoforit (C_4AF). Kandungan C_3S dan C_3A yang tinggi menghasilkan panas hidrasi tinggi, yang mendukung perkembangan kuat tekan awal. Kandungan C_2S lebih tinggi menghasilkan panas hidrasi rendah, tetapi memberikan kontribusi besar pada kuat tekan jangka panjang. Kandungan CA yang paling efektif untuk meningkatkan kuat tekan dan panas hidrasi semen biasanya melibatkan bahan-bahan yang dapat mempercepat hidrasi dan memperbaiki kualitas semen. Kandungan CA yang memiliki peran dominan dalam proses penggilingan, mempercepat hidrasi dan kekuatan tekan awal adalah *triethanolamine* (TEA), *diethylene glycol* (DEG), dan *chloride* (Cl).

1. Reaksi *Triethanolamine* (TEA)

Triethanolamine (TEA) berfungsi sebagai aktivator kimia, terutama memengaruhi fase awal hidrasi. Mekanisme reaksi yang utama melibatkan interaksinya dengan senyawa semen, seperti trikalsium aluminat (C_3A) dan trikalsium silikat (C_3S)

Reaksi dengan C_3A :



TEA bertindak sebagai katalis, mempercepat reaksi antara C_3A dan *gypsum* ($CaSO_4$) sehingga panas hidrasi meningkat pada fase awal.

Reaksi dengan C_3S :



C-S-H adalah produk hidrasi utama yang memberikan kekuatan pada semen. TEA membantu pelepasan ion kalsium Ca^{2+} ke dalam larutan sehingga mempercepat pembentukan C-S-H [16,17].

2. Reaksi *Diethylene Glycol* (DEG)

Diethylene glycol tidak bereaksi secara langsung dengan komponen semen seperti C_3S dan C_3A namun DEG dapat memengaruhi kuat tekan dan panas hidrasi melalui mekanisme fisik. DEG bertindak sebagai pelumas selama proses penggilingan *clinker* yang berfungsi untuk mengurangi gaya tarik-menarik antar partikel semen yang menggumpal. Hasil yang didapatkan adalah partikel semen lebih halus dengan distribusi ukuran seragam. Kehalusan yang maksimal menyebabkan reaksi hidrasi lebih cepat dan menyeluruh serta dapat meningkatkan pembentukan produk hidrasi (C-S-H) [18].

3. Reaksi *Chloride* (Cl)

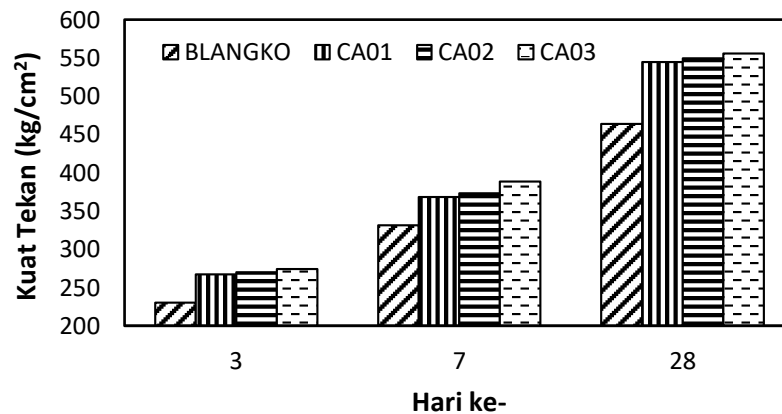
Kalsium klorida adalah bahan yang paling sering digunakan karena ketersediannya yang mudah didapat dan biaya yang rendah. $CaCl_2$ telah lama dikenal dapat mempercepat proses pengaturan dan pengerasan beton semen *portland* [5].

Ion klorida dapat bereaksi dengan senyawa aluminat dan sulfat dalam semen untuk mempercepat pembentukan ettringite. Dalam reaksi ini, *chloride* berperan untuk meningkatkan kekuatan tekan awal semen.



Reaksi tersebut menunjukkan bahwa kalsium klorida dapat mempercepat antara C_3A dan *gypsum*. Sulfat bereaksi terlebih dahulu dengan C_3A , kemudian diikuti oleh reaksi dengan klorida setelah *gypsum* habis. $CaCl_2$ berperan dalam menstabilkan pembentukan trisulfominat hidrat (ettringite) [6].

3.1. Pengaruh Penambahan CA Terhadap Kuat Tekan Semen OPC



Gambar 6. Grafik uji kuat tekan sampel blanko, CA01, CA02, dan CA03

Gambar 6 menunjukkan grafik hasil uji kuat tekan semen OPC dengan sampel blanko dan sampel dengan penambahan CA yaitu CA01, CA02 dan CA03. Pengujian kuat tekan ini dilakukan pada hari ke-3, 7 dan 28 untuk mengetahui perkembangan kuat tekan semen. Pada hari ke-3 diketahui bahwa semua sampel dengan penambahan CA memiliki kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan sampel blanko atau tanpa CA. Penambahan CA secara efektif mempercepat rekasi hidrasi awal sehingga meningkatkan kuat tekan awal. Pada hari ke-7 peningkatan kuat tekan semen semakin signifikan dimana sampel dengan penambahan CA memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan sampel blanko. Pada hari ke-28 didapatkan hasil akhir nilai kuat tekan yang perbedaannya cukup jauh antara sampel blanko yaitu 464 kg/cm² dan sampel dengan penambahan CA yaitu CA01 sebesar 544 kg/cm², CA02 sebesar 549 kg/cm² dan CA03 sebesar 556 kg/cm².

Peningkatan kuat tekan ini berkaitan dengan mekanisme kerja CA, khususnya yang mengandung TEA dan Cl. TEA mempercepat reaksi C₃S dan C₃A menghasilkan pembentukan produk C-S-H lebih awal. Cl mempercepat pembentukan ettringite melalui interaksi antara C₃A dan *gypsum*. Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan CA dapat meningkatkan efisiensi pengikatan partikel semen sehingga menghasilkan nilai kuat tekan yang tinggi, hal ini sejalan dengan penelitian oleh Bhatt (2023) [19].

3.2. Pengaruh Penambahan CA Terhadap Panas Hidrasi Semen OPC

Pengujian panas hidrasi dilakukan menggunakan alat *thermography test* yang cara kerjanya adalah mengukur panas termal. Hal ini dilakukan karena panas hidrasi dan panas termal saling berkaitan. Panas termal merupakan perubahan suhu yang terjadi pada semen akibat faktor eksternal seperti perubahan suhu lingkungan atau pemanasan dalam struktur semen sendiri. Panas termal dapat dipengaruhi oleh panas hidrasi dimana keduanya dapat berinteraksi. Peningkatan panas hidrasi menyebabkan peningkatan panas atau suhu internal semen sehingga memengaruhi perubahan suhu keseluruhan atau panas termal.

Berdasarkan data yang didapat pada Tabel 2 diketahui variabel berupa suhu puncak, waktu puncak, waktu pengikatan awal, dan waktu pengikatan akhir.

1. Suhu Puncak

Merupakan suhu puncak tertinggi yang tercatat selama uji panas termal. Suhu puncak ini merupakan suhu maksimum yang tercapai oleh sampel selama proses hidrasi.

Suhu terendah ada pada sampel blangko yaitu sebesar 57,63°C dan suhu tertinggi pada sampel CA03 sebesar 67,69°C. Panas hidrasi berbanding lurus dengan suhu puncak yang dicapai. Semakin cepat reaksi hidrasi berlangsung maka semakin banyak panas yang dilepaskan.

2. Waktu Puncak

Merupakan suhu puncak tertinggi yang tercatat selama uji panas termal. Suhu puncak ini merupakan suhu maksimum yang tercapai oleh sampel selama proses hidrasi. Suhu terendah ada pada sampel blangko yaitu sebesar 57,63°C dan suhu tertinggi pada sampel CA CA03 sebesar 67,69°C. Panas hidrasi berbanding lurus dengan suhu puncak yang dicapai. Semakin cepat reaksi hidrasi berlangsung maka semakin banyak panas yang dilepaskan.

3. Waktu Pengikatan Awal

Waktu pengikatan awal merupakan waktu yang diperlukan semen untuk mulai mengeras setelah dicampur dengan air. Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa waktu sampel blangko untuk mulai mengeras adalah 149,1 menit sedangkan sampel dengan penambahan CA lebih cepat yaitu pada sampel CA02 dan CA03 selama 136,5 menit.

4. Waktu Pengikatan Akhir

Waktu pengikatan akhir merupakan waktu yang diperlukan semen untuk mencapai kekuatan akhir yang maksimal. Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa waktu sampel blangko untuk mencapai kekuatan akhir adalah 264,12 menit sedangkan sampel dengan penambahan CA lebih cepat yaitu pada sampel CA02 dan CA03 selama 241,8 menit.

Berdasarkan Tabel 2 dapat diketahui bahwa sampel blangko mencapai panas hidrasi lebih rendah dengan waktu terlama dibandingkan sampel dengan penambahan CA sehingga dapat disimpulkan bahwa adanya penambahan CA dapat mempercepat reaksi dan meningkatkan panas hidrasi. Hasil ini sejalan dengan penjelasan bahwa keberadaan TEA dan DEG sebagai aditif dapat mempercepat pelepasan ion Ca^{2+} dan meningkatkan laju pembentukan C-S-H [20]. Penurunan waktu pengikatan pada sampel yang ditambahkan CA menunjukkan kinerja hidrasi yang efisien. TEA mempercepat pembentukan ettringite pada fase awal, sedangkan DEG dapat membantu proses penggilingan untuk memperbaiki kehalusan semen [21].

3.3. Pengaruh Penambahan Variasi Jenis CA Terhadap Kuat Tekan dan Panas Hidrasi Semen OPC

Berdasarkan hasil pengujian terhadap kuat tekan dan panas hidrasi, diketahui bahwa penambahan CA secara signifikan meningkatkan performa mekanis dan termal semen OPC dibandingkan dengan sampel tanpa penambahan CA. Peningkatan ini dikaitkan dengan komposisi kimiawi dari masing-masing CA yang berperan aktif dalam memengaruhi mekanisme hidrasi semen. Berdasarkan karakteristik pengujian dan literatur terdahulu, diduga bahwa masing-masing CA mengandung senyawa aktif seperti TEA, DEG dan Cl yang berkontribusi terhadap proses hidrasi dan kekuatan tekan semen. TEA dan DEG diketahui memiliki pengaruh terhadap peningkatan panas hidrasi, sedangkan Cl berperan dalam memperkuat ikatan antarpartikel dan meningkatkan kuat tekan. Perbedaan hasil nilai kuat tekan dan panas hidrasi pada sampel CA01, CA02 dan CA03 didasarkan pada prosentase kandungan TEA, DEG dan Cl pada masing-masing CA [20,22].

CA dengan tipe *grinding aids* yang umumnya mengandung TEA dan DEG, biasanya digunakan dalam dosis optimal sebesar 0,01% – 0,03% terhadap massa semen. Sementara itu, CI dengan tipe *strength enhancers* yang mengandung CI diaplikasikan sekitar 0,15 – 0,25% dari total massa semen. Formulasi CA dengan kadar TEA dan DEG yang lebih rendah cenderung menghasilkan panas hidrasi yang lebih rendah, sedangkan peningkatan konsentrasi kedua komponen tersebut berbanding lurus dengan kenaikan suhu hidrasi akibat percepatan reaksi kimia. Demikian pula kandungan CI yang lebih tinggi terbukti dapat meningkatkan kuat tekan secara signifikan [20].

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, sampel CA03 menunjukkan performa yang unggul baik dalam peningkatan nilai kuat tekan maupun panas hidrasi. Hasil uji tekan tertinggi yaitu pada hari ke-28 sebesar 556 kg/cm² dan panas hidrasi sebesar 67,69°C selama 390 menit. Hal tersebut diduga bahwa formulasi CA03 memiliki rasio optimal antara TEA, DEG, dan CI. Sehingga, disimpulkan bahwa pemilihan CA03 sebagai CA menjadi solusi yang paling efektif untuk meningkatkan kualitas semen OPC terutama pada pengaplikasian yang memerlukan kuat tekan dan panas hidrasi yang tinggi.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pengamatan yang telah dilakukan, disimpulkan bahwa komponen yang terkandung pada CA dapat bereaksi dengan senyawa utama dalam semen seperti C₃A dan C₃S. Interaksi ini memberikan pengaruh terhadap peningkatan kuat tekan dan panas hidrasi semen. Oleh karena itu, pemilihan dan penggunaan CA dengan formulasi yang tepat diperlukan untuk mengoptimalkan kinerja semen. Pada percobaan ini, hasil menunjukkan bahwa CA03 merupakan jenis CA yang paling efektif dalam meningkatkan nilai kuat tekan dan panas hidrasi pada semen OPC.

Penelitian ini diharapkan menjadi rujukan bagi peneliti selanjutnya untuk melakukan pengujian menggunakan peralatan *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) pada CA. Langkah ini bertujuan untuk memperoleh data yang lebih akurat mengenai komposisi masing-masing CA sebagai dasar pengembangan formulasi yang tepat.

REFERENSI

- [1] S. Wulandari, I. Pratama, dan N. Rauf. "Pembuatan dan Pengujian Kualitas Semen Portland yang Diperkaya Silikat Abu Ampas Tebu," *Jurnal Jurusan Fisika FMIPA Universitas Hasanuddin*, hal. 1–11, 2015.
- [2] R. Yanita, "Semen PCC sebagai Material Green Construction dan Kinerja Beton yang Dihasilkan," *Jurnal Sains dan Teknologi Institut Teknologi Indonesia*, vol. 19, no. 1, hal. 13–18, Mar. 2020.
- [3] Standar Nasional Indonesia 15-2049, "Portland ICS 91.100.10," 2004.
- [4] Y.-M. Guo dan S.-F. Sun. "The Effect on the Performance of Cement Grinding Aid Components," *Journal of Materials, Processing and Design*, vol. 1, no. 1, Canada, 2017.
- [5] M. Heikal, "Effect of Calcium Formate as an Accelerator on the Physicochemical and Mechanical Properties of Pozzolan Cement Pastes," *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 6, hal. 1051–1056, Jun. 2004.

- [6] E. A. Kishar, D. A. Ahmed, M. R. Mohammed, dan R. Noury, "Effect of Calcium Chloride on the Hydration Characteristics of Ground Clay Bricks Cement Pastes," *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, hal. 20–30, Mar. 2013.
- [7] K. L. Scrivener, V. M. John, dan E. M. Gartner, "Eco-efficient Cements: Potential Economically Viable Solutions for a Low-CO₂ Cement-Based Materials Industry," *Cement and Concrete Research*, vol. 114, hal. 2–26, Des. 2018.
- [8] J. Li dan B. Sun, "Prevention and Control of Mass Concrete Cracks in Building Construction Engineering," *Highlights in Science, Engineering and Technology*, vol. 51, hal. 137–141, 2023.
- [9] J. W. Bullard, "Mechanisms of Cement Hydration," *Cement and Concrete Research*, vol. 41, hal. 1208–1223, Des. 2011.
- [10] E. Jimenez-Relinque dan M. Castellote, "Quantification of Hydroxyl Radicals on Cementitious Materials by Fluorescence Spectrophotometry as a Method to Assess the Photocatalytic Activity," *Cement and Concrete Research*, vol. 74, hal. 108–115, Agu. 2015.
- [11] H. M. Ludwig dan W. Zhang, "Research Review of Cement Clinker Chemistry," *Cement and Concrete Research*, hal. 2–14, Des. 2015.
- [12] K. E. Alyamaç dan R. Ince, "A Preliminary Concrete Mix Design for SCC with Marble Powders," *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 3, hal. 1201–1210, Mar. 2009.
- [13] E. Purwanto, "Pengaruh Semen OPC dan PCC terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur pada Beton Mutu Tinggi Faktor Air Semen 0,36 dan 0,39," *Jurnal Rekayasa Universitas Lampung*, vol. 20, no. 1, Apr. 2016.
- [14] American Society for Testing and Materials International, "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency 1," hal. 1–3, 2020.
- [15] American Society for Testing and Materials International, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) 1," hal. 1–6, West Conshohocken, 2020.
- [16] Y. L. Yaphary, Z. Yu, R. H. W. Lam, dan D. Lau, "Effect of Triethanolamine on Cement Hydration Toward Initial Setting Time," *Construction and Building Materials*, vol. 141, hal. 94–103, Jun. 2017.
- [17] X. Yang, J. Liu, H. Li, L. Xu, Q. Ren, dan L. Li, "Effect of Triethanolamine Hydrochloride on the Performance of Cement Paste," *Construction and Building Materials*, vol. 200, hal. 218–225, Mar. 2019.
- [18] V. Chipakwe, P. Semsari, T. Karlkvist, J. Rosenkranz, dan S. C. Chelgani, "A Critical Review on the Mechanisms of Chemical Additives used in Grinding and Their Effects on the Downstream Processes," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, no. 4, hal. 8148–8162, 2020.
- [19] H. J. Bhatt, P. Darshan, A. A. Khalak, dan M. J. Patel, "Advancements in Cement Technology: A Comprehensive Review of Additives and Their Impact on Material Properties," *International Journal of Research Publication and Reviews Journal*, vol. 4, no. 12, hal. 1105–1112, 2023.

- [20] F. S. Hashem, E. E Hekal, dan M. A. El Wahab, "The Influence of Triethanol Amine and Ethylene Glycol on the Grindability, Setting and Hydration Characteristics of Portland Cement," *International Journal of Petrochemical Science and Engineering*, vol. 4, no. 3, hal. 81–88, Mei. 2019.
- [21] K. B. Ramkumar, P. R. Kannan Rajkumar, S. Noor Ahmmad, dan M. Jegan, "A Review on Performance of Self-Compacting Concrete – Use of Mineral Admixtures and Steel Fibres with Artificial Neural Network Application," *Construction and Building Materials*, vol. 261, hal 2–19, Nov. 2020.
- [22] A. Popov dan G. Chernev, "Effect of Grinding Aids on Cement Properties and Grinding Process," *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, vol. 59, no. 6, hal. 1327–1330, 2024.