

PENGARUH VARIASI KADAR NATRIUM SULFAT TERHADAP KEKUATAN TEKAN DAN MODULUS ELASTISITAS BETON *SUPER SULFATED CEMENT*

Jonathan Hadinata¹ dan Herry Suryadi Djayaprabha²

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit No 94. Bandung
Email: ¹8102301015@student.unpar.ac.id, ²herry.suryadi@unpar.ac.id

ABSTRAK

Dengan tingginya emisi gas CO₂ yang dihasilkan dari produksi semen OPC, *super sulfated cement* dapat digunakan sebagai substitusi semen konvensional. Dengan proporsi aktivator yang tepat, properti mekanik dari *super sulfated cement* mampu menyerupai beton konvensional berbasis semen Portland. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh dari variasi kadar natrium sulfat (Na₂SO₄) yang digunakan sebagai aktivator sulfat terhadap properti mekanik beton yang mencakup kekuatan tekan dan modulus elastisitas beton. Semen Portland yang digunakan pada penelitian ini berperan sebagai aktivator alkali untuk menciptakan suasana basa sehingga GGBFS dapat berhidrasi dengan optimal. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat adanya peningkatan kekuatan tekan beton pada umur awal seiring dengan meningkatnya kadar Na₂SO₄. Proporsi Na₂SO₄ optimum didapatkan pada kadar SO₃ sebesar 10% dengan nilai kekuatan tekan pada umur hari ke 28 sebesar 29,2 MPa dan modulus elastisitas sebesar 17700 MPa. Pada kadar SO₃ sebesar 20%, terdapat penurunan kekuatan tekan beton dan modulus elastisitas dikarenakan adanya akumulasi dari kalsium sulfoaluminat (*ettringite*) yang terbentuk dalam beton sehingga timbul retakan mikrostruktur yang menurunkan properti mekanik beton *super sulfated cement*. Sementara itu, didapatkan pula nilai rasio Poisson pada beton berbasis *super sulfated cement* sebesar 0,11 – 0,20 yang berada dalam rentang normal nilai teoritis rasio Poisson beton yaitu antara 0,10 - 0,20. Hal ini menunjukkan bahwa beton supersulfat memiliki perilaku yang menyerupai beton berbasis semen Portland bila ditinjau dari segi properti mekanik.

Kata kunci: kekuatan tekan, modulus elastisitas, natrium sulfat, *super sulfated cement*

PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang sering digunakan khususnya di Indonesia karena material penyusunnya yang mudah didapatkan, kemudahan pengerjaan beton yang tidak memerlukan tenaga kerja khusus, dan ekonomis apabila ditinjau dari segi konstruksi, operasional, dan perawatan. Namun, disamping keuntungan yang dimiliki oleh beton, terdapat emisi gas rumah kaca secara global yang dihasilkan dari produksi semen Portland yang berkontribusi sebesar 8% per tahun dan berpotensi untuk menyumbangkan emisi karbondioksida (CO₂) yang meningkat sebesar 470 GT pada pembangunan infrastruktur dalam rentang 30 tahun kedepan (Lehne dan Preston, 2018). Oleh karena itu, diperlukan dikembangkan suatu material alternatif yang lebih ramah lingkungan sebagai pengganti Semen Portland yang bertujuan untuk mengurangi penggunaan energi dan emisi gas CO₂.

Super sulfated cement merupakan semen yang terdiri atas *slag* sebanyak 80%, aktivator sulfat sebanyak 10% - 20%, dan aktivator alkali dalam jumlah yang sedikit (Rubert, et al., 2018). *Super sulfated cement* dapat menjadi alternatif sebagai bahan pengganti semen dikarenakan kandungan klinker yang sedikit sehingga proses manufaktur dari *super sulfated cement* tidak memerlukan energi yang besar dan tidak mengeluarkan emisi CO₂ berlebih. Selain itu, semen ini memiliki kandungan alumina (Al₂O₃) yang rendah sehingga semen ini cocok apabila diaplikasikan pada konstruksi beton yang terpapar oleh kadar sulfat yang tinggi (Pinto, et al., 2020). *Slag* yang umumnya digunakan pada pembuatan *super sulfated cement*, yaitu *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS). Karena proses hidrasi GGBFS yang rendah apabila dibandingkan dengan semen Portland, maka diperlukan senyawa aktivator untuk mempercepat proses hidrasi dari GGBFS sehingga beton yang dihasilkan memiliki properti yang menyerupai semen Portland (Djayaprabha dan Hermawan, 2023).

Terdapat beberapa aktivator yang dapat digunakan dalam meningkatkan performa *slag* dalam campuran *super sulfated cement*. Rubert, et al. (2018) menggunakan kalsium sulfat (CaSO₄) dan kalium hidroksida (KOH) dalam kuantitas yang rendah untuk meningkatkan properti mekanik dan hidrasi dari mortar supersulfat. Dari penelitian tersebut, didapatkan bahwa memiliki pengaruh yang lebih besar dalam meningkatkan properti mekanik mortar

Corresponding Author

E-mail Address : herry.suryadi@unpar.ac.id

dibandingkan dengan aktivator sulfat. Liu, et al. (2020) menggunakan aktivator fosfogypsum yang sudah dinetralisasi dari kapur dalam campuran *super sulfated cement* dan didapat adanya peningkatan properti kekuatan tekan mortar pada umur awal dan umur 28 hari. Tian, et al. (2021) menambahkan aluminium sulfat ($Al_2(SO_4)_3$) ke dalam campuran semen berbasis CaO dan menunjukkan adanya peningkatan properti mekanik bila kadar sulfat yang digunakan tidak melebihi 3%. Walaupun demikian, peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan.

Salah satu aktivator sulfat yang dapat digunakan adalah natrium sulfat (Na_2SO_4) yang merupakan senyawa garam dengan pH 7 dengan berbagai macam fungsi seperti obat, manufaktur kaca, dan manufaktur detergen. Na_2SO_4 merupakan aktivator yang mudah didapat baik secara alami maupun dari limbah proses manufaktur seperti serat viskos, natrium dikromat, dan asam askorbat sehingga diharapkan dapat menjadi alternatif aktivator yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, natrium sulfat tergolong sebagai senyawa kimia yang tidak memerlukan perlakuan khusus dalam penggunaannya menjadikan Na_2SO_4 sebagai senyawa kimia yang relatif aman dalam penggunaannya. Nawaz, et al. (2020) menunjukkan adanya peningkatan kekuatan tekan sebesar 16% disertai dengan meningkatnya durabilitas beton. Penggunaan Na_2SO_4 juga terbukti dapat membuat beton menjadi lebih ekonomis dan mengurangi jejak karbon dari proses pembuatan beton tersebut. Zhao, et al. (2020) menunjukkan adanya peningkatan waktu hidrasi dair campuran semen dan pembentukan *ettringite* yang lebih cepat dengan menggunakan Na_2SO_4 . Bakhbergen, et al. (2022) menunjukkan peningkatan kekuatan tekan beton, porositas, dan ketahanan beton terhadap serangan sulfat pada campuran semen reaktif yang diberi larutan Na_2SO_4 . Sementara itu, dalam penelitian yang dilakukan oleh Djayaprabha, et al. (2023) ditunjukkan potensi penggunaan Na_2SO_4 sebagai aktivator sulfat dan Ordinary Portland Cement (OPC) sebagai aktivator alkali pada pembuatan mortar *super sulfated cement* dengan penggunaan Na_2SO_4 dengan kadar Sulfur Trioksida (SO_3) sebesar 10% dapat meningkatkan kekuatan tekan sebesar 36,10 MPa pada umur 28 hari. Walaupun nilai kekuatan tekan awal lebih rendah dibandingkan dengan mortar berbahan dasar OPC, pada umur hari ke 28. Namun, kekuatan tekan mortar *super sulfated cement* mampu mendekati kekuatan tekan mortar berbahan dasar OPC. Berdasarkan penelitian tersebut, ditunjukkan bahwa Na_2SO_4 sebagai aktivator sulfat berpotensi meningkatkan properti mekanik dari mortar *super sulfated cement*.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan investigasi lebih lanjut efek dari kadar SO_3 terhadap kekuatan tekan dan modulus elastisitas beton *super sulfated cement* dengan variasi kadar SO_3 sebesar 0%, 10%, dan 20% yang dapat diekuivalensikan ke dalam kadar Na_2SO_4 sebesar 0%, 17,75%, dan 35,5%. Variasi tersebut digunakan untuk menentukan optimum kadar SO_3 optimum dalam pembuatan *super sulfated cement*.

MATERIAL DAN LANGKAH PENELITIAN

Ordinary Portland Cement (OPC)

Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah Semen Portland Tipe I atau OPC dengan massa jenis sebesar $3,05 \text{ g/cm}^3$ yang didapatkan berdasarkan standar pengujian ASTM C188-16 (2016). Semen ini digunakan sebagai aktivator alkali.

Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)

Slag yang digunakan sebagai bahan utama pengganti semen dalam penelitian ini adalah GGBFS yang diperoleh dari PT. KRNG Indonesia. GGBFS yang digunakan memiliki massa jenis sebesar $2,85 \text{ g/cm}^3$ yang didapatkan berdasarkan standar pengujian ASTM C188-16 (2016). Komposisi kimiawi GGBFS yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1 (Hermawan, et al., 2023).

Tabel 1. Komposisi kimiawi GGBFS

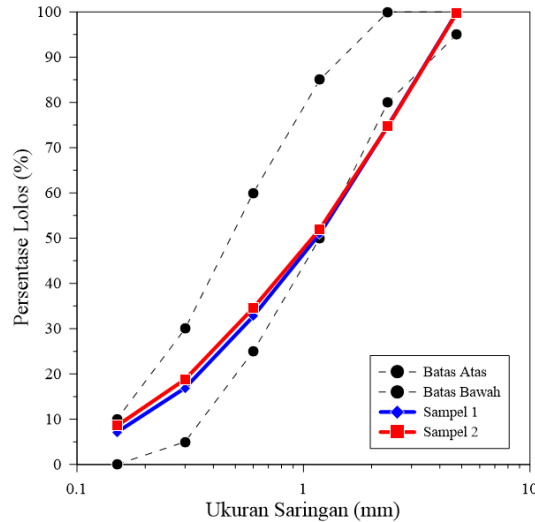
Komposisi Kimia	Persentase (wt.%)
Fe_2O_3	0,62
Al_2O_3	16,25
CaO	41,60
MgO	1,03
MnO_2	0,47
Cr_2O_3	< 0,01
Na_2O	0,03
K_2O	0,33
SiO_2	37,45
TiO_2	0,87
P_2O_5	0,02
SO_3	1,73

Natrium Sulfat (Na_2SO_4)

Na_2SO_4 dimanfaatkan sebagai aktivator sulfat dalam penelitian ini yang didapatkan secara komersial dengan massa jenis sebesar $2,61 \text{ g/cm}^3$ yang didapatkan berdasarkan standar pengujian ASTM C188-16 (2016).

Agregat Halus

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir Garut yang lolos uji saringan No. 4 (4,75 mm). Agregat halus tersebut memiliki nilai *specific gravity* sebesar 2,617 dan absorpsi sebesar 2,55% berdasarkan standar pengujian ASTM C128-15 (2015). Modulus kehalusan (*fineness modulus*) dari agregat halus yang digunakan sebesar 3,12 dengan gradasi agregat halus seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Gradasi agregat halus

Agregat Kasar

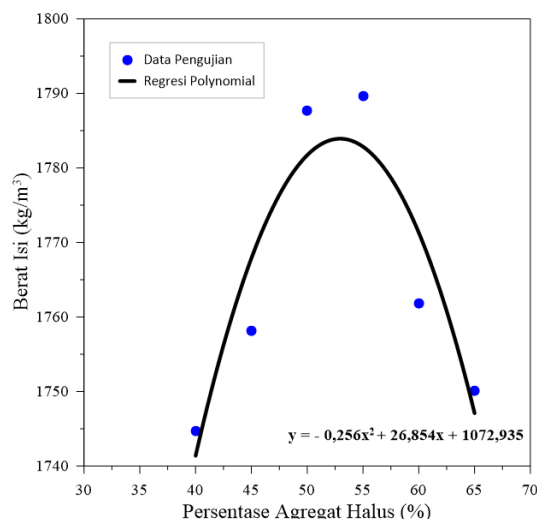
Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini adalah batu pecah yang berasal dari daerah Rumpin, Bogor dengan ukuran agregat maksimum sebesar 25 mm. Agregat kasar tersebut memiliki *specific gravity* sebesar 2,603 dan absorpsi sebesar 4,31% yang diuji berdasarkan ASTM C127-15 (2015).

Persentase Agregat Halus terhadap Kadar Total Agregat

Untuk mendapatkan campuran beton dengan kualitas yang baik, persentase optimum agregat halus terhadap kadar total agregat kasar perlu ditentukan terlebih dahulu berdasarkan pengujian berat isi sesuai dengan standar pengujian ASTM C29/C29M-17 (2017). Berat isi campuran diuji pada kadar agregat halus sebesar 40%, 45%, 50%, 55%, dan 60%, sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Djayaprabha, et al. (2020). Berdasarkan data pengujian, dibuat kurva regresi polynomial derajat dua dan persentase agregat halus optimum diambil berdasarkan titik puncak kurva regresi dari hasil pengujian berat isi campuran agregat halus dan agregat kasar seperti terlihat pada Gambar 2. Berdasarkan pengujian tersebut, didapatkan persentase optimum agregat halus terhadap kadar total agregat sebesar 52,95%.

Perencanaan Proporsi Campuran

Tabel 2 menunjukkan proporsi dari setiap material yang dibutuhkan dalam membuat campuran beton *super sulfated cement* yang dihitung berdasarkan metode volume absolut. Kebutuhan Na_2SO_4 sebagai aktivator sulfat ditentukan berdasarkan variasi kadar SO_3 sebesar 0%, 10%, dan 20% yang setara dengan kadar Na_2SO_4 sebesar 0%, 17,75%, dan 35,5% yang dihitung berdasarkan perbandingan massa molekul relatif. Kebutuhan OPC sebagai aktivator alkali ditetapkan sebesar 5%. Rasio *water to binder* yang digunakan dalam penelitian ini ditetapkan sebesar 0,36 untuk masing-masing campuran yang didapatkan berdasarkan hasil *trial mix*.



Gambar 2. Berat isi agregat campuran dengan variasi persentase agregat halus

Tabel 2. Proporsi campuran beton *super sulfated cement*

Kode*	OPC	GGBFS	NS	W	FA	CA
	(kg/m ³)					
G95S0	20	379	0	120	882	770
G85S10	20	308	71	120	882	770
G75S20	20	237	142	120	882	770

OPC = *Ordinary Portland Cement*; G = *Ground Granulated Blast Furnace Slag*; NS = Na_2SO_4 ; W = air; FA = agregat halus; CA = agregat kasar

*G95S0 = OPC 5%, GGBFS 95%, SO_3 0%; G85S10 = OPC 5%, GGBFS 85%, SO_3 10%; G75S20 = OPC 5%, GGBFS 75%, SO_3 20%

Pembuatan Benda Uji

Pada penelitian ini dipersiapkan benda uji berupa silinder dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm sebanyak 36 buah. Proses pengecoran dilakukan dengan melakukan pencampuran material *binder* yaitu OPC, GGBFS, dan Na_2SO_4 beserta agregat halus di dalam *mixer* dan diaduk dalam keadaan kering selama 2 menit hingga tercampur secara merata. Kemudian, air dimasukkan secara perlahan ke dalam campuran selama 2 menit untuk membentuk mortar yang homogen. Setelah itu, agregat kasar dimasukkan ke dalam campuran dan diaduk selama 2 menit. Setelah campuran homogen, dilakukan pengujian *slump* sesuai standar pengujian ASTM C143/C143M-15 (2015) untuk mengecek kelecakan campuran beton segar. Kemudian benda dicetak ke dalam silinder 100 × 200 mm dengan prosedur sesuai dengan ASTM C192/192M-16 (2016). Setelah didiamkan selama 24 jam, benda uji kemudian dikeluarkan dari cetakan secara perlahan lalu dilakukan perawatan *sealed curing* untuk menjaga kelembaban yang ada dalam beton hingga beton siap untuk diuji.

Pengujian Kekuatan Tekan Beton

Kekuatan tekan beton *super sulfated cement* diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari dengan menggunakan benda uji silinder 100 × 200 mm. Pengujian kekuatan tekan mengacu pada standar uji ASTM C39/C39M-17 (2017) dimana benda uji diuji dengan menggunakan *compression testing machine* (CTM) dengan kapasitas 2000 kN seperti lihat pada Gambar 3. Nilai kekuatan tekan beton (f_c) dihitung dengan membagi beban tekan maksimum (P) dengan luas penampang aktual dari silinder beton (A) seperti yang dituliskan pada Persamaan (1).

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$



Gambar 3. Pengujian kekuatan tekan beton

Pengujian Modulus Elastisitas Beton

Pengujian modulus elastisitas beton *super sulfated cement* dilakukan pada umur hari ke 28 dengan menggunakan benda uji silinder 100×200 mm. Pengujian modulus elastisitas mengacu pada standar uji ASTM C469/C469M-14 (2014) dimana beton akan diberikan beban tekan dengan CTM hingga mencapai 40% dari beban ultimitnya. Perubahan panjang longitudinal dan transversal spesimen beton akan diukur dengan menggunakan *compressometer-extensometer* seperti yang terlihat pada Gambar 4, dimana perubahan panjang akan dicatat dan regangan dihitung setiap penambahan beban sebesar 5 kN.



Gambar 4. Pengujian modulus elastisitas beton

Modulus elastisitas beton didapatkan dengan menentukan gradien kurva tegangan regangan beton pada kondisi elastik seperti pada Persamaan (2).

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (2)$$

dengan E = modulus elastisitas beton, S_2 = tegangan beton pada 40% tegangan ultimit beton, S_1 = tegangan beton pada saat beton mengalami regangan sebesar 0,00005, dan ε_2 = regangan beton pada 40% tegangan ultimit beton

Nilai modulus elastisitas yang didapatkan kemudian digunakan untuk menentukan koefisien hubungan antara kekuatan tekan beton dengan modulus elastisitas beton *super sulfated cement*. Koefisien tersebut didapatkan dengan menggunakan Persamaan (3) sesuai dengan persamaan empiris yang terdapat dalam standar SNI 2847:2019 (2019).

$$E = k\sqrt{f_C} \quad (3)$$

dengan E = modulus elastisitas beton, k = koefisien hubungan modulus elastisitas dengan kekuatan tekan beton, dan f_c = kuat tekan beton

Pengujian Rasio Poisson dan Modulus Geser Beton

Rasio Poisson didapatkan dengan menghitung perbandingan antara regangan transversal dengan regangan longitudinal yang mengacu pada ASTM C469/C469M-14 (2014), seperti tertulis pada Persamaan 4.

$$\nu = \frac{\varepsilon_{t_2} - \varepsilon_{t_1}}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (4)$$

dimana: ν = rasio Poisson beton, ε_{t_2} = regangan transversal beton pada saat tegangan S_2 , ε_{t_1} = regangan transversal beton pada saat tegangan S_1 , dan ε_2 = regangan longitudinal beton pada saat tegangan S_2

Nilai modulus geser beton dihitung dengan menggunakan Persamaan (5) dengan menggunakan nilai modulus elastisitas dan rasio Poisson yang didapatkan dari hasil pengujian.

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (5)$$

dengan G = modulus geser beton, E = modulus elastisitas beton, dan ν = rasio Poisson beton

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keleccakan Beton Segar

Keleccakan beton diuji dengan menggunakan uji *slump* berdasarkan ASTM C143/C143M-15 (2015) yang dilakukan pada masing-masing variasi. Berdasarkan hasil pengujian *slump*, yang dapat dilihat pada Tabel 3 menunjukkan adanya penurunan nilai *slump* seiring dengan bertambahnya kadar sulfat dalam campuran. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan Na_2SO_4 ke dalam campuran beton *super sulfated cement* mempercepat waktu pengikatan (*setting time*) dari campuran beton tersebut (Etcheverry, et al., 2023).

Tabel 3. Nilai *slump* beton *super sulfated cement* dengan variasi SO_3

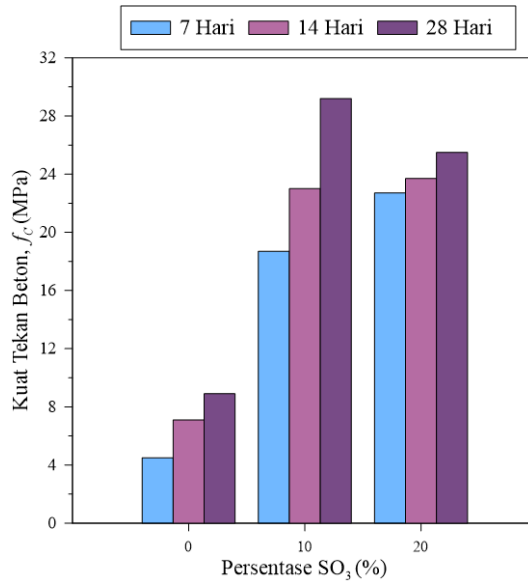
Kode	Variasi SO_3 (%)	<i>Slump</i> (mm)
G95S0	0	38
G85S10	10	25
G75S20	20	8

Kekuatan Tekan Beton

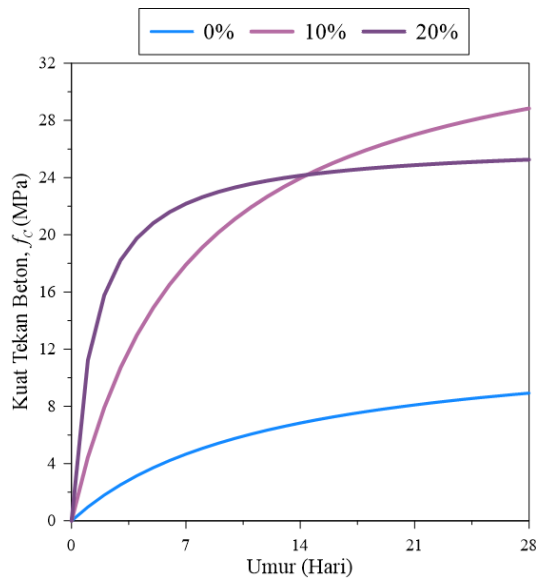
Gambar 5 menunjukkan nilai kekuatan tekan beton *super sulfated cement* pada umur ke 7, 14, dan 28 hari untuk setiap variasi sulfat. Nilai kekuatan tekan pada umur hari 28 untuk variasi SO_3 sebesar 0%, 10%, dan 20% berturut – turut adalah 8,9 MPa, 29,2 MPa, dan 25,5 MPa dengan nilai kekuatan tekan optimum dicapai pada variasi sulfat SO_3 . Hal ini menunjukkan bahwa penambahan Na_2SO_4 ke dalam campuran meningkatkan kekuatan tekan beton *super sulfated cement* yang sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Zhang dan Chen (2017).

Gambar 6 menunjukkan perkembangan kekuatan tekan dari masing-masing variasi beton *super sulfated cement*. Terlihat bahwa terjadi peningkatan kekuatan tekan awal yang signifikan pada campuran dengan kadar SO_3 sebesar 20% hingga umur 7 hari. Namun, peningkatan kekuatan tekan setelah umur hari 7 hari untuk campuran dengan kadar SO_3 sebesar 20% tidak terlalu signifikan sehingga pada hari ke-28 memiliki kekuatan tekan yang lebih rendah dibandingkan dengan kekuatan tekan hari ke-28 campuran dengan kadar SO_3 sebesar 10%. Penggunaan aktivator sulfat yang berlebih menyebabkan akumulasi dari kalsium sulfoaluminat hidrat sehingga timbul retak mikrostruktur merubah properti mekanik pada umur 28 hari (Rubert, et al., 2018).

Dari hasil pengujian kuat tekan tersebut, beton *super sulfated cement* dengan kadar SO_3 sebesar 10% dan 20% telah memenuhi persyaratan untuk dijadikan sebagai beton struktural dikarenakan memiliki kekuatan tekan pada umur 28 hari yang melampaui 17 MPa. Selain itu, kedua beton tersebut dapat digunakan juga dalam desain struktur beton rangka pemikul momen khusus karena memenuhi persyaratan kekuatan tekan minimum sebesar 21 MPa sesuai dengan persyaratan pada SNI 2847:2019 (2019).



Gambar 5 Kekuatan tekan beton *super sulfated cement* dengan variasi kadar SO₃



Gambar 6. Perkembangan kekuatan tekan beton *super sulfated cement*

Modulus Elastisitas Beton, Rasio Poisson, dan Modulus Geser Beton

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan sesuai dengan standar pengujian ASTM C469/C469M-14 (2014), didapatkan modulus elastisitas beton *super sulfated cement* untuk campuran dengan variasi SO₃ sebesar 0%, 10%, dan 20% sebesar 10031,47 MPa, 17700,89 MPa, dan 16405,23 MPa, secara berurutan (Tabel 4). Terlihat bahwa nilai modulus elastisitas optimum dari beton *super sulfated cement* pada kadar SO₃ sebesar 10% yang sejalan dengan hasil kekuatan tekan beton *super sulfated cement*. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas semakin meningkat apabila kekuatan tekan beton meningkat.

Berdasarkan Tabel 4, diperoleh nilai rasio Poisson untuk beton *super sulfated cement* dengan variasi SO₃ sebesar 0%, 10%, dan 20% adalah 0,11, 0,20, dan 0,18, secara berturut – turut. Hal ini menunjukkan bahwa nilai rasio Poisson beton *super sulfated cement* masih sesuai dengan nilai rasio Poisson teoritis yaitu berkisar antara 0,1 – 0,2. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa properti rasio Poisson beton *super sulfated cement* tidak mengalami efek signifikan dengan penambahan sulfat pada campuran beton dibandingkan dengan beton normal.

Sementara itu, nilai modulus geser untuk beton *super sulfated cement* dengan variasi SO₃ sebesar 0%, 10%, dan 20% secara berturut – turut adalah 4242,30 MPa, 7869,99 MPa, dan 6295,87 MPa, seperti terlihat pada Tabel 4, dimana nilai optimum didapat pada persentase SO₃ sebesar 10%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai modulus geser beton *super sulfated cement* meningkat apabila nilai modulus elastisitas beton tersebut meningkat.

Tabel 4. Modulus elastisitas, rasio Poisson, dan modulus geser beton *super sulfated cement*

Kode	Modulus Elastisitas (MPa)	Rasio Poisson	Modulus Geser (MPa)
G95S0	10031,47	0,11	4242,30
G85S10	17700,89	0,20	7869,99
G75S20	16405,23	0,18	6295,87

Dalam SNI 2847:2019 (2019), terdapat persamaan empiris, sesuai dengan Persamaan (3), yang dapat digunakan untuk menentukan nilai modulus elastisitas berdasarkan kekuatan tekan beton dengan besaran koefisien *k* sebesar 4700. Pada penelitian ini, kekuatan tekan beton *super sulfated cement* yang didapatkan dari hasil pengujian dikorelasikan dengan nilai modulus elastisitasnya sehingga didapatkan koefisien *k* seperti pada Tabel 5. Nilai koefisien *k* yang tercantum pada SNI 2847:2019 (2019) berbeda dengan koefisien hasil pengujian dengan rentang nilai koefisien pengujian sekitar 3200. Hal ini menunjukkan bahwa koefisien yang diberikan SNI 2847:2019 (2019) hanya berlaku untuk campuran beton normal berbahan dasar semen Portland. Untuk beton berbahan dasar *super sulfated cement* dengan Na₂SO₄ sebagai aktivator, nilai koefisien hubungan kekuatan tekan dengan modulus elastisitas dapat menggunakan nilai empiris seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Koefisien hubungan kekuatan tekan dengan modulus elastisitas beton *super sulfated cement*

Kode	Kekuatan Tekan Beton (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)	Koefisien <i>k</i>	
			SNI 2847	Hasil Pengujian
G95S0	8,9	10031,47	4700	3370
G85S10	29,2	17700,89	4700	3278
G75S20	25,5	16405,23	4700	3248

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa properti mekanis dari beton *super sulfated cement* seperti kekuatan tekan dan modulus elastisitas meningkat seiring dengan pertambahan kadar sulfat dalam campuran dengan nilai optimum didapat pada kadar SO₃ sebesar 10%. Penambahan Na₂SO₄ akan meningkatkan waktu pengerasan pada campuran beton berdasarkan pengamatan nilai *slump* dan grafik perkembangan kekuatan tekan beton. Nilai kekuatan tekan, dan modulus elastisitas pada kadar 20% lebih rendah apabila dibandingkan dengan kadar 10%. Hal ini dapat diakibatkan adanya akumulasi kalsium sulfoaluminat yang menyebabkan retak mikrostruktur pada beton.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Struktur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan dalam menyediakan fasilitas pengujian yang dipergunakan dalam melaksanakan kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Lehne, J. dan Preston, F. (2018). *Making concrete change, innovation in low carbon cement and concrete*. Chatham House, London.
- Rubert, S., Luz, C. A. d., Varela, M. V. F., Filho, J. I. P. dan Hooton, R. D. (2018). "Hydration mechanisms of supersulfated cement: The role of alkali activator and calcium sulfate content". *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 134, 971–980
- Pinto, S. R., Luz, C. A. d., Munhoz, G. S. dan Medeiros-Junior, R. A. (2020). "Durability of phosphogypsum-based supersulfated cement mortar against external attack by sodium and magnesium sulfate". *Cement and Concrete Research*, Vol. 136, 106172

- Djayaprabha, H. S. dan Hermawan (2023). "The influence of calcium oxide doses as an activator on the compressive strength and mechanical characteristics of cement-free mortar containing ground granulated blast furnace slag". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 1195, 012029
- Liu, S., Fang, P., Ren, J. dan Li, S. (2020). "Application of lime neutralised phosphogypsum in supersulfated cement". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 272, 122660
- Tian, Y., Xing, J., Zhao, Y., Sun, X., Wu, P. dan Qiu, J. (2021). "Influence of aluminum sulfate on strength of CaO-activated slag system". *Construction and Building Materials*, Vol. 306, 124895
- Nawaz, M. A., Ali, B., Qureshi, L. A., Aslam, H. M. U., Hussain, I., Masood, B. dan Raza, S. S. (2020). "Effect of sulfate activator on mechanical and durability properties of concrete incorporating low calcium fly ash". *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 13, e00407
- Zhao, Y., Qiu, J., Zhang, S., Guo, Z., Ma, Z., Sun, X. dan Xing, J. (2020). "Effect of sodium sulfate on the hydration and mechanical properties of lime-slag based eco-friendly binders". *Construction and Building Materials*, Vol. 250, 118603
- Bakhbergen, U., Shon, C.-S., Zhang, D., Kryzhanovskiy, K. dan Kim, J. R. (2022). "Assessment of reactive powder concrete subjected to three different sodium sulfate concentrations: compressive strength, absorption, porosity, microstructure, and durability". *Construction and Building Materials*, Vol. 325, 126804
- Djayaprabha, H. S., Aliusius, J. J., Pangestu, J. dan Candra, T. (2023). "Mechanical strengths and ultrasonic pulse velocity evaluation of supersulfated cement mortar containing sodium sulfate". *E3S Web of Conferences* Vol. 429, 05007
- ASTM C188-16 (2016). *Standard test method for density of hydraulic cement*. ASTM International, West Conshohocken.
- Hermawan, H., Djayaprabha, H. S. dan Nguyen, H.-A. (2023). "Utilizing phosphogypsum waste to improve the mechanical and durability performances of cement-free structural mortar containing ground granulated blast furnace slag and calcium oxide". *Journal of Building Engineering*, Vol. 72, 106557
- ASTM C128-15 (2015). *Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate*. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C127-15 (2015). *Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate*. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C29/C29M-17 (2017). *Standard test method for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate*. ASTM International, West Conshohocken.
- 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*, Vol. 32(9), 04020245
- ASTM C143/C143M-15 (2015). *Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete*. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C192/192M-16 (2016). *Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C39/C39M-17 (2017). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM C469/C469M-14 (2014). *Standard test method for static modulus of elasticity and poisson's ratio of concrete in compression*. ASTM International, West Conshohocken.
- SNI 2847:2019 (2019). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Etcheverry, J. M., Villagran-Zaccardi, Y. A., Heede, P. V. d., Hallet, V. dan Belie, N. D. (2023). "Effect of sodium sulfate activation on the early age behaviour and microstructure development of hybrid cementitious systems containing Portland cement, and blast furnace slag". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 141, 105101
- Zhang, L. dan Chen, B. (2017). "Hydration and properties of slag cement activated by alkali and sulfate". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 29(9), 04017091