

Upaya Peningkatan Durabilitas Beton Terpapar Klorida dan Sulfat dengan Menggunakan *Silica Fume*, Semen Tipe II, dan *Protective Coating*

Agus Sulaeman ^{[1]*}, Yudi Herdiansah ^[1], Anto Destianto ^[1]

^{[1]*} Program Magister Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, 40525, Indonesia

Email: agussulaeman@lecture.unjani.ac.id*, yudi.herdiansah@lecture.unjani.ac.id, anto176717@gmail.com

*) Correspondent Author

Received: 12 April 2023; Revised: 08 September 2023; Accepted: 12 September 2023

How to cited this article:

Sulaeman, A., Herdiansah, Y., Destianto, A., (2024). Upaya Peningkatan Durabilitas Beton Terpapar Klorida dan Sulfat dengan Menggunakan *Silica Fume*, Semen Tipe II, dan *Protective Coating*. Jurnal Teknik Sipil, 20(2), 271–285.

<https://doi.org/10.28932/jts.v20i2.6418>

ABSTRAK

Durabilitas material beton dipengaruhi oleh lingkungan. Lingkungan ekstrem yang mempengaruhi lingkungan beton yaitu lingkungan dengan kadar klorida dan sulfat yang tinggi. Metode proteksi material beton yang saat ini sering digunakan adalah *silica fume*, semen tipe II, dan *protective coating*. Pengujian yang dilakukan antara lain pengujian kadar klorida, pengujian infiltrasi klorida, analisis visual dan pengujian perubahan panjang. Benda uji dibuat dalam 4 variasi yaitu; benda uji semen tipe I tanpa proteksi, benda uji semen tipe I dengan proteksi *coating*, benda uji semen tipe I dengan tambahan *silica fume*, dan benda uji semen tipe II tanpa proteksi. Benda uji direndam di dalam larutan klorida dan sulfat dengan lama perendaman 14 hari, 28 hari, 42 hari, dan 56 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *silica fume* pada semen tipe I dapat meningkatkan durabilitas beton terhadap klorida namun tidak terhadap sulfat, proteksi *coating* dapat meningkatkan durabilitas beton terhadap klorida dan sulfat, semen tipe II dapat meningkatkan durabilitas beton terhadap sulfat namun tidak terhadap klorida.

Kata kunci: Durabilitas Beton, Klorida dan Sulfat, *Coating*, *Silica fume*, Semen Tipe II

ABSTRACT. *Method to Increase the Durability of Concrete Which is Exposed to Chloride and Sulfate Using Silica Fume, Type II Cement and Protective Coatings.* The durability of concrete material is affected by the environment. Extreme environments that affect the concrete are environments with high chloride and sulfate levels. The most commonly used concrete protection methods are silica fume, type II cement and protective coatings. The tests are carried out included: testing for chloride content, testing on chloride infiltration, visual analysis and testing for changes of length. The specimens was made in 4 variations namely; specimens with type I cement without protection, specimens with type I cement with a protective coating, specimens with type I cement with the addition of silica fume, specimens with type II cement without protection. The specimens were immersed in a solution of chloride and sulfate for 14 days, 28 days, 42 days and 56 days. The results showed that silica fume in type I cement could increase the durability of concrete against chloride but not against sulfates, protective coating could increase the durability of concrete against chloride and sulfates, type II cement could increase the durability of concrete against sulfates but not against metals.

Keywords: *Durability of Concrete, Chloride and Sulfate, Coating, Silica fume, Cement Type II*

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur saat ini berkembang semakin pesat dan hampir merata di seluruh wilayah Indonesia. Mayoritas pembangunan infrastruktur tersebut menggunakan material beton. Akan tetapi durabilitas material beton tergantung dengan lingkungannya. Lingkungan ekstrem yang sangat mempengaruhi durabilitas beton yaitu lingkungan yang memiliki kadar klorida dan sulfat tinggi. Menurut Ariyuni E., Moersiddik S. S., Hartono D. M., Widanarko S. (1994), menyatakan bahwa beton dengan air klorida-sulfat membentuk gypsum dan ettringite yang memiliki kelarutan tinggi sehingga menyebabkan kenaikan porositas beton dan menyebabkan korosi dan kekuatan beton menurun.

Metode proteksi beton yang disarankan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI) antara lain untuk beton yang terpapar sulfat sedang disarankan menggunakan semen tipe II, beton yang terpapar sulfat tinggi disarankan menggunakan semen tipe V, dan beton yang terpapar klorida disarankan beton memiliki kuat tekan beton minimum 35 MPa. Metode proteksi yang sering digunakan di lapangan antara lain penambahan *silica fume* dan mengaplikasikan *coating* pada permukaan beton.

Metode-metode proteksi tersebut merupakan upaya untuk meningkatkan durabilitas beton sehingga umur beton dapat mencapai umur yang direncanakan. Penelitian ini bertujuan untuk menguji metode proteksi beton sehingga dapat diperoleh metode proteksi yang paling efektif dan efisien.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Teknik Bahan Bangunan, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani. Secara garis besar tahapan penelitian terdiri dari pembuatan benda uji yang mengacu pada SNI 7565 – 2012, ACI 234R-06, ACI 301R-16, dan ASTM C-1249-03, pembuatan larutan NaCl mengacu pada RILEM TC 230-PSC, pembuatan larutan Na₂SO₄ mengacu pada ASTM C-1012-04, melakukan perendaman sampel beton pada larutan NaCl dan Na₂SO₄, melakukan pengujian benda uji beton, dan pembuatan kesimpulan.

Pengujian yang akan dilakukan antara lain: pengujian kadar klorida mengacu pada ASTM C 114, pengujian infiltrasi klorida mengacu pada penelitian Otsuki N; Nagataki S; Nakashita K. (1992), analisis visual, dan pengujian perubahan panjang mengacu pada ASTM C 114. Dimensi benda uji yang digunakan untuk pengujian kadar klorida dan infiltrasi klorida berupa kubus beton dengan dimensi 15 cm x 15 cm x 6 cm, benda uji yang digunakan untuk pengujian perubahan panjang berupa kubus beton dengan dimensi 10 cm x 10 cm x 28.5 cm. Pada masing-masing benda uji diaplikasikan campuran semen tipe I tanpa proteksi, campuran semen

tipe I dengan proteksi coating, campuran semen tipe I dengan tambahan *silica fume*, campuran semen tipe II tanpa proteksi. Benda-benda uji tersebut akan direndam di dalam larutan klorida dan sulfat. Perendaman dilakukan setelah masa perawatan 28 hari. Variasi lama perendaman pada larutan NaCl dan Na₂SO₄ adalah 14 hari, 28 hari, 42 hari dan 56 hari.

Metode percepatan penetrasi klorida mengacu pada RILEM TC 230-PSC. Pengujian kadar klorida dilakukan dengan mengambil sampel serbuk beton sedalam 1 cm, 2 cm dan 3 cm, setelah sampel diperoleh maka langkah selanjutnya melakukan pengujian pada laboratorium. Pengujian kedalaman infiltrasi ion klorida pada beton dilakukan dengan membelah benda uji sesuai umur yang direncanakan kemudian menyemprotkan larutan AgNO₃ 0,1mol/L pada satu profil benda uji. Perubahan warna yang stabil akan diperoleh pada 20 detik setelah dilakukannya penyemprotan larutan AgNO₃ 0,1mol/L. Gambar dari hasil pengujian infiltrasi kemudian disketsa ulang dengan menggunakan *software Autocad*. Pengujian perubahan panjang akibat sulfat dilakukan sesuai dengan ASTM C 1012

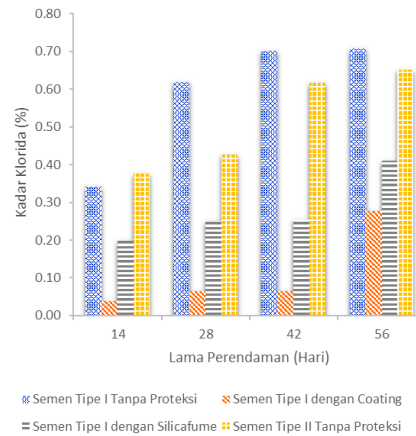
3. HASIL PENELITIAN

3.1. Hasil Pengujian Kadar Klorida

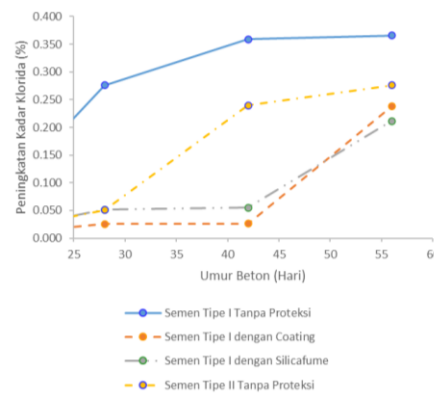
Ringkasan hasil uji kadar klorida pada benda uji dapat dilihat pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3.

Tabel 1. Hasil Uji Kadar Klorida pada Kedalaman 1 cm dari Permukaan Beton

Metode Perendaman	Lama Perendaman (hari)	Kadar Klorida (%)	Peningkatan Kadar Klorida (%)
Semen Tipe I tanpa proteksi	14	0,342	0,000
	28	0,618	0,276
	42	0,701	0,359
	56	0,708	0,366
Semen Tipe I dengan <i>Coating</i>	14	0,039	0,000
	28	0,065	0,026
	42	0,065	0,026
	56	0,277	0,238
Semen Tipe I dengan Silica fume	14	0,199	0,000
	28	0,250	0,051
	42	0,254	0,055
	56	0,410	0,211
Semen Tipe II tanpa proteksi	14	0,376	0,000
	28	0,427	0,051
	42	0,616	0,240
	56	0,652	0,276



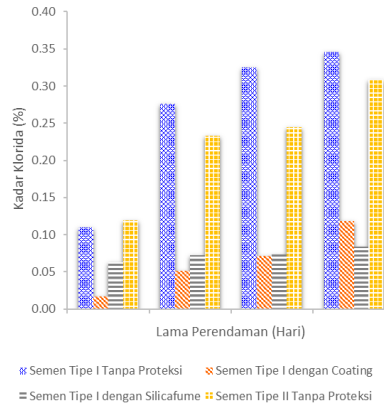
Gambar 1. Grafik Kadar Klorida pada Kedalaman 1 cm dari Permukaan Beton



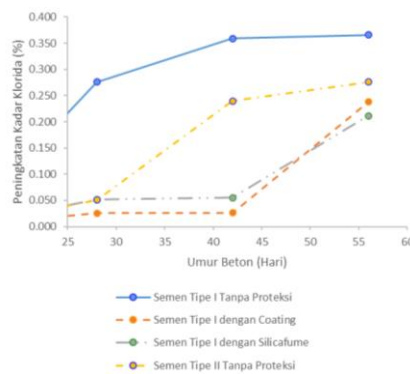
Gambar 2. Grafik Peningkatan Kadar Klorida pada Kedalaman 1 cm dari Permukaan Beton

Tabel 2. Hasil Uji Kadar Klorida pada Kedalaman 2 cm dari Permukaan Beton

Metode Perendaman	Lama Perendaman (hari)	Kadar Klorida (%)	Peningkatan Kadar Klorida (%)
Semen Tipe I tanpa proteksi	14	0,109	0,000
	28	0,276	0,167
	42	0,325	0,216
	56	0,346	0,237
Semen Tipe I dengan <i>Coating</i>	14	0,017	0,000
	28	0,051	0,034
	42	0,071	0,054
	56	0,118	0,101
Semen Tipe I dengan <i>Silica fume</i>	14	0,0625	0,000
	28	0,072	0,009
	42	0,073	0,011
	56	0,084	0,022
Semen Tipe II tanpa proteksi	14	0,119	0,000
	28	0,233	0,114
	42	0,245	0,126
	56	0,309	0,190



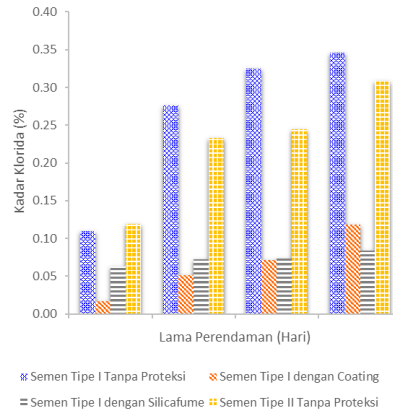
Gambar 3. Grafik Kadar Klorida pada Kedalaman 2 cm dari Permukaan Beton



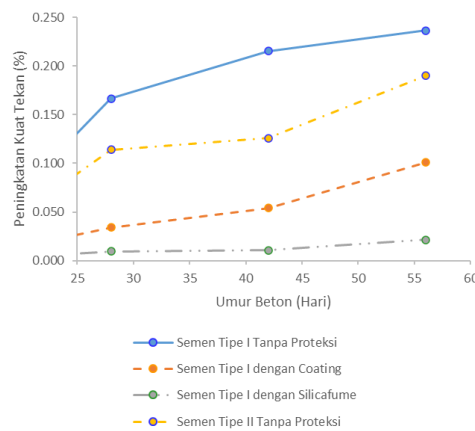
Gambar 4. Grafik Peningkatan Kadar Klorida pada Kedalaman 2 cm dari Permukaan Beton

Tabel 3. Hasil Uji Kadar Klorida pada Kedalaman 3 cm dari Permukaan Beton

Metode Perendaman	Lama Perendaman (hari)	Kadar Klorida (%)	Peningkatan Kadar Klorida (%)
Semen Tipe I tanpa Proteksi	14	0,072	0,000
	28	0,280	0,208
	42	0,275	0,202
	56	0,324	0,252
Semen Tipe I dengan <i>Coating</i>	14	0,019	0,000
	28	0,031	0,012
	42	0,078	0,059
	56	0,112	0,093
Semen Tipe I dengan Silicafume	14	0,041	0,000
	28	0,043	0,002
	42	0,044	0,003
	56	0,058	0,017
Semen Tipe II tanpa Proteksi	14	0,140	0,000
	28	0,195	0,056
	42	0,228	0,089
	56	0,285	0,146



Gambar 5. Grafik Kadar Klorida pada Kedalaman 3 cm dari Permukaan Beton



Gambar 6. Grafik Peningkatan Kadar Klorida pada Kedalaman 3 cm dari Permukaan Beton

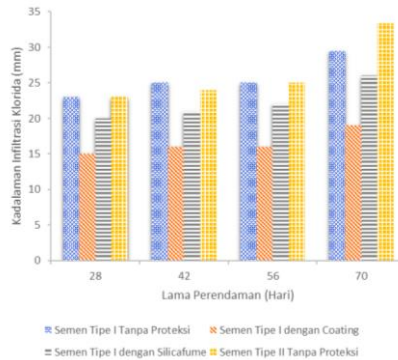
3.2. Hasil Pengujian Infiltrasi Klorida

Ringkasan hasil uji infiltrasi klorida pada benda uji dapat dilihat pada Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6.

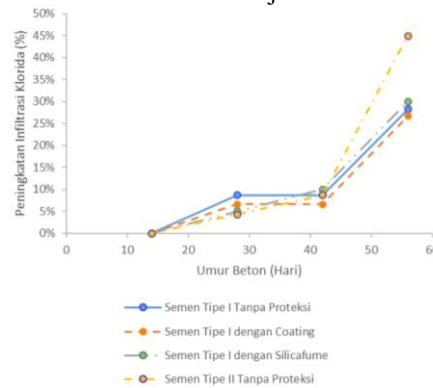
Tabel 4. Hasil Uji Infiltrasi Klorida

Metode Perendaman	Lama Perendaman (hari)	Kedalaman Infiltrasi Klorida (mm)	Peningkatan Infiltrasi Klorida (%)
Semen Tipe I tanpa proteksi	14	23,000	0,00%
	28	25,000	8,70%
	42	25,000	8,70%
	56	29,500	28,26%
Semen Tipe I dengan Coating	14	15,000	0%
	28	16,000	6,67%
	42	16,000	6,67%
	56	19,000	26,67%
Semen Tipe I dengan Silicafume	14	20,000	0%
	28	21,000	5,00%
	42	22,000	10,00%
	56	26,000	30,00%
	14	23,000	0%

Semen Tipe II tanpa proteksi	28	24,000	4,35%
	42	25,000	8,70%
	56	33,333	44,93%



Gambar 7. Grafik Hasil Uji Infiltrasi Klorida

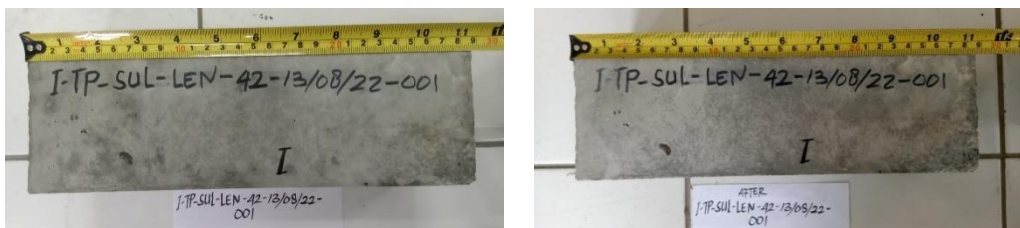


Gambar 8. Grafik Peningkatan Infiltrasi Klorida

3.3. Hasil Analisis Visual Uji Rendam Pada Larutan Na₂SO₄

Gambaran visual kondisi benda uji pada saat sebelum dan sesudah perendaman pada larutan Na₂SO₄ dapat dilihat pada Gambar 9, Gambar 10, Gambar 11, Gambar 12, Gambar 13, Gambar 14 dan Gambar 15.

a)

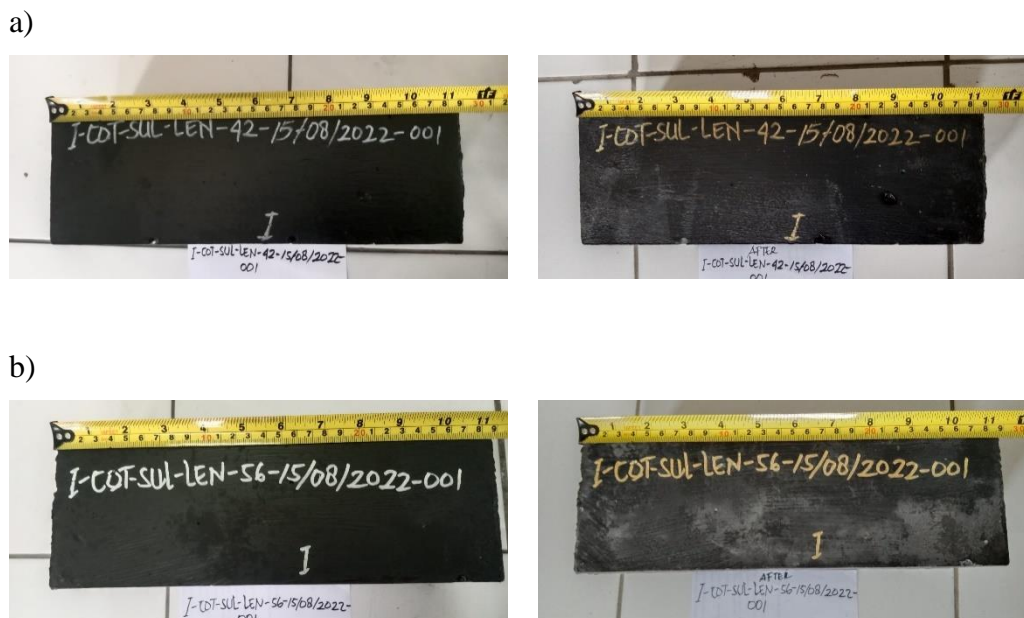


Gambar 9. Karakteristik Visual Benda Uji Semen Tipe I Tanpa Proteksi

a) Lama Rendam 14 Hari



Gambar 10. Karakteristik Visual Benda Uji Semen Tipe I Tanpa Proteksi (Lanjutan)
b) Lama Rendam 14 Hari, b) Lama Rendam 28 Hari, c) Lama Rendam 42 Hari,
d) Lama Rendam 56 Hari



Gambar 11. Karakteristik Visual Benda Uji Semen Tipe I dengan Coating
a) Lama Rendam 14 Hari, b) Lama Rendam 28 Hari



Gambar 12. Karakteristik Visual Benda Uji Semen Tipe I dengan Coating
c) Lama Rendam 42 Hari, d) Lama Rendam 56 Hari



Gambar 13. Karakteristik Visual Benda Uji Semen Tipe I dengan Silica fume
a) Lama Rendam 14 Hari, b) Lama Rendam 28 Hari, c) Lama Rendam 42 Hari

d)



Gambar 14. Karakteristik Visual Benda Uji Semen Tipe I dengan *Silica fume* (Lanjutan)
d) Lama Rendam 56 Hari

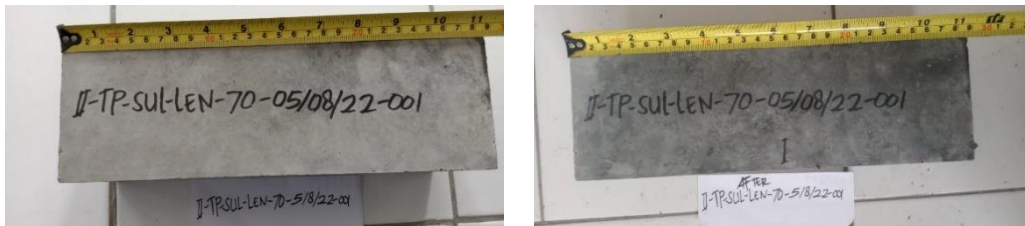
a)



b)



c)



d)



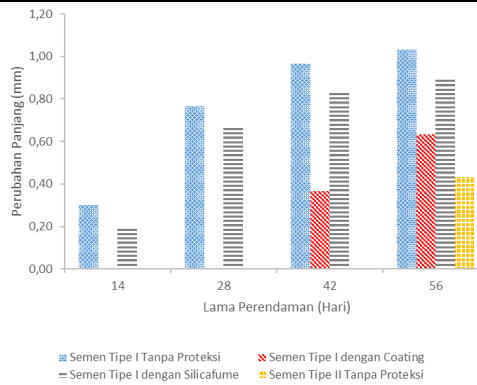
Gambar 15. Karakteristik Visual Benda Uji Semen Tipe II Tanpa Proteksi (Lanjutan)
a) Lama Rendam 14 Hari, b) Lama Rendam 28 Hari, c) Lama Rendam 42 Hari,
d) Lama Rendam 56 Hari

3.4. Hasil Pengujian Perubahan Panjang

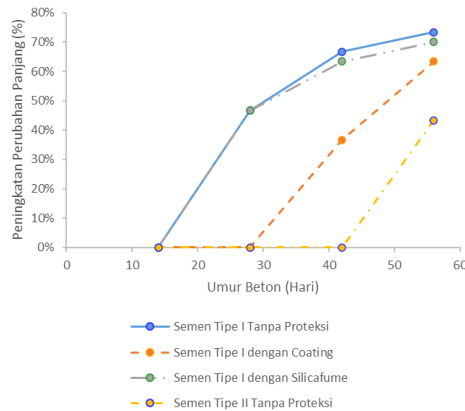
Ringkasan hasil uji perubahan panjang pada benda uji dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 5. Hasil Uji Perubahan Panjang

Metode Perendaman	Lama Perendaman (hari)	Perubahan Panjang (mm)	Peningkatan Perubahan Panjang (%)
Semen Tipe I tanpa proteksi	14	0,300	0%
	28	0,767	47%
	42	0,967	67%
	56	1,033	73%
Semen Tipe I dengan <i>Coating</i>	14	0,000	0%
	28	0,000	0%
	42	0,367	37%
	56	0,633	63%
Semen Tipe I dengan Silicafume	14	0,200	0%
	28	0,667	47%
	42	0,833	63%
	56	0,900	70%
Semen Tipe II tanpa proteksi	14	0,000	0%
	28	0,000	0%
	42	0,000	0%
	56	0,433	43%



Gambar 16. Grafik Hasil Uji Perubahan Panjang



Gambar 17. Grafik Peningkatan Perubahan Panjang

4. PEMBAHASAN

IV.1. Pengujian Kadar Klorida

Kadar klorida pada benda uji yang direndam pada larutan Na_2Cl selama 14 hari, 28 hari, 42 hari, dan 56 hari dijelaskan sebagai berikut:

1. Benda uji semen tipe I dengan *protective coating*

Setelah direndam dalam larutan klorida, benda uji semen tipe I dengan *protective coating* memiliki kadar yang relatif rendah. Namun, seiring dengan lama perendaman, kadar klorida di dalam benda uji semakin meningkat.

2. Benda uji semen tipe I dengan *silica fume*

Setelah direndam dalam larutan klorida, benda uji semen tipe I dengan *silica fume* memiliki kadar yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan kadar klorida dalam benda uji semen tipe I dengan *protective coating* pada kedalaman 1 cm. Namun, kadar klorida semakin menurun pada kedalaman 2 cm dan 3 cm, bahkan pada kedalaman 3 cm, kadar klorida pada benda uji semen tipe I dengan *silica fume* lebih rendah jika dibandingkan dengan kadar klorida pada benda uji semen tipe I dengan *protective coating*.

3. Benda uji semen tipe II tanpa proteksi

Setelah direndam dalam larutan klorida, benda uji semen tipe II tanpa proteksi memiliki kadar klorida paling tinggi jika dibandingkan dengan benda uji semen tipe I dengan *protective coating* dan dengan *silica fume*.

Pengujian Infiltrasi Klorida

Kedalaman infiltrasi klorida pada benda uji yang direndam pada larutan NaCl selama 14 hari, 28 hari, 42 hari, dan 56 hari dijelaskan sebagai berikut:

1. Benda uji semen tipe I dengan *protective coating*

Kadar klorida yang terkandung di dalam benda uji semen tipe I dengan *protective coating* setelah direndam di dalam larutan klorida memiliki kadar relatif rendah. Seiring dengan lama perendaman yang dilakukan, kadar klorida di dalam benda uji meningkat.

2. Benda uji semen tipe I dengan *silica fume*

Kadar klorida yang terkandung di dalam benda uji semen tipe I dengan *silica fume* setelah direndam di dalam larutan klorida memiliki kadar klorida lebih tinggi dibandingkan dengan benda uji semen tipe I dengan *protective coating* pada kedalaman 1 cm, namun kadar klorida semakin menurun pada kedalaman 2 cm dan 3 cm, dan menunjukkan kadar klorida lebih rendah dibandingkan benda uji semen tipe I dengan *protective coating*, pada kedalaman 3 cm.

3. Benda uji semen tipe II tanpa proteksi pada kedalaman 3 cm

Kadar klorida yang terkandung di dalam benda uji semen tipe II tanpa proteksi setelah direndam di dalam larutan klorida memiliki kadar klorida paling tinggi diantara benda uji semen tipe I dengan *protective coating* dan *silica fume*.

Analisis Visual Uji Rendam pada Larutan Na₂SO₄

Perubahan fisik pada benda uji yang direndam pada larutan Na₂SO₄ selama 14 hari, 28 hari, 42 hari, dan 56 hari dijelaskan sebagai berikut:

1. Benda uji semen tipe I dengan *protective coating*

Pengaruh sulfat secara fisik dan visual terhadap benda uji semen tipe I dengan *protective coating* tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Secara visual, pengaruh sulfat hanya memudarkan warna dari *protective coating*, dari yang semula berwarna hitam menjadi berwarna abu-abu.

2. Benda uji semen tipe I dengan *silica fume*

Pengaruh sulfat secara fisik dan visual terhadap benda uji semen tipe I dengan *silica fume* menunjukkan perubahan warna pada permukaan beton. Permukaan beton yang direndam di dalam larutan sulfat berubah warna menjadi keputihan.

3. Benda uji semen tipe II tanpa proteksi

a. Pengaruh sulfat secara fisik dan visual terhadap benda uji semen tipe II tanpa proteksi menunjukkan perubahan warna pada permukaan beton namun tidak signifikan. Perubahan warna keputihan pada benda uji semen tipe II tidak terlalu jelas seperti pada benda uji semen tipe I dengan *silica fume*.

Pengujian Perubahan Panjang

Berdasarkan hasil pengujian perubahan panjang pada benda uji, karakteristik tiap benda uji setelah di rendam pada larutan Na_2SO_4 selama 14 hari, 28 hari, 42 hari, dan 56 hari. Perubahan yang terjadi pada benda uji dijelaskan sebagai berikut:

1. Benda uji semen tipe I dengan *protective coating*
Perubahan panjang pada benda uji semen tipe I dengan *protective coating* menunjukkan perubahan panjang yang relatif kecil namun lebih besar apabila dibandingkan dengan benda uji semen tipe II tanpa proteksi.
2. Benda uji semen tipe I dengan *silica fume*
Perubahan panjang pada benda uji semen tipe I dengan *silica fume* menunjukkan perubahan panjang yang paling besar dibandingkan dengan benda uji lain.
3. Benda uji semen tipe II tanpa proteksi
Perubahan panjang pada benda uji semen tipe II tanpa proteksi menunjukkan perubahan panjang yang paling kecil dibandingkan dengan benda uji lain.

5. SIMPULAN

Kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *protective coating* memiliki ketahanan terhadap klorida dan sulfat, penambahan *silica fume* pada semen tipe I memberikan ketahanan terhadap klorida namun tidak memberi ketahanan terhadap sulfat, sedangkan penggunaan semen tipe II memberikan ketahanan terhadap sulfat namun tidak memberikan ketahanan terhadap klorida.
2. Dalam usaha meningkatkan durabilitas beton terhadap lingkungan, terutama yang mengandung klorida dan sulfat, diperlukan penyelidikan terlebih dahulu untuk menentukan *treatment* yang tepat.
3. Jika di dalam kondisi lingkungan yang memiliki kedua unsur, yaitu klorida dan sulfat, maka kombinasi dari ketiga *treatment* lebih direkomendasikan. *Treatment* yang dapat digunakan antara lain:
 - a. Untuk semen tipe I direkomendasikan menggunakan campuran *silica fume* dan diaplikasikan *protective coating* pada permukaan betonnya.
 - b. Untuk semen tipe II direkomendasikan mengaplikasikan *protective coating* pada permukaan betonnya.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah mendanai penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada PT. Adhi Persada Beton, PT. Semen Indonesia, PT. Sika Indonesia yang telah mendukung terlaksananya penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam proses penelitian dan pembuatan artikel ilmiah ini.

7. DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 234. (2006) ACI 234R-06, *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete*, (TT) : American Concrete Institute
- ACI Committee 301. (2016) ACI 301R-16, *Specifications for Structural Concrete*, Farmington Hills: American Concrete Institute
- Ariyuni W., Moersidik S. S., Hartono D. M., Widanarko S. 1994. Pengaruh Ion Klorida (Cl-) dan Ion Sulfat (SO₄²⁻) pada Kekuatan Tekon Beton Mutu Sedang [Laporan Penelitian]. Jakarta: Universitas Indonesia.
- ASTM C-1012-04. (2004), *Standard Test Methods for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*. (TT): American Society for Tersting and Materials.
- ASTM C-114-07. (2007), *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*. (TT): American Society for Tersting and Materials.
- ASTM C-1249-03. (2007), *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*. (TT): American Society for Tersting and Materials.
- Badan Standar Nasional. (2012). SNI 7565 – 2012, *Tata Cara Pemilihan Campuran Untuk Beton Normal, Beton Berat, dan Beton Massa*. Jakarta: Badan Standar Nasional
- Otsuki N; Nagataki S; Nakashita K. "Evaluation of AgNO₃ solution spray method for measurement of chloride penetration into hardened cementations matrix materials". *ACI Materials Journal* 1992; 89 (6): 587-592.
- RILEM TC 230-PSC. (2015), *Performance-Based Specifications and Control of Concrete Durability*. (TT): Springer.