

Karakteristik Mortar Nanosilika Direndam dalam Larutan NaCl dengan Metode Perendaman Statis

Muhammad Raja Alfadh¹, Gunawan Wibisono², Monita Olivia^{3*}

Program Studi Magister Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Riau, ^{1,2,3}

Penulis korespondensi: monita.olivia@lecturer.unri.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan nanosilika dalam mortar pada kondisi perendaman statis dalam larutan NaCl terhadap kuat tekan dan sorptivity. Pada lingkungan laut, mortar merupakan bahan konstruksi yang sering terpapar lingkungan agresif, termasuk larutan NaCl. Penambahan nanosilika dianggap dapat meningkatkan performa mortar dengan memperbaiki struktur mikro dan mengurangi porositasnya. Dalam penelitian ini, mortar PCC, PCC-NS 0,75%, PCC-NS 1,5% dan PCC-NS 2,25% diuji pada perendaman statis dalam larutan NaCl selama periode tertentu. Perawatan awal dilakukan selama 28 hari dilanjutkan dengan pembebanan hingga terdapat retakan pada mortar dengan lebar antara 0,1-0,3 mm. Kemudian sampel mortar direndam selama 7 dan 28 hari dalam campuran larutan NaCl 3,5% sebagai pengganti air laut. Kuat tekan mortar diukur dengan uji tekan standar; sementara sorptivity diukur dengan metode pengujian penyerapan air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan nanosilika secara signifikan meningkatkan kuat tekan mortar dan menurunkan sorptivity dibandingkan dengan mortar tanpa nanosilika. Penurunan sorptivity menunjukkan bahwa nanosilika efektif dalam mengurangi penetrasi air; yang berkontribusi pada peningkatan kekuatan dan ketahanan mortar dalam kondisi lingkungan yang keras. Penelitian ini menunjukkan bahwa nanosilika dapat digunakan sebagai bahan aditif yang efektif dalam meningkatkan performa mortar, khususnya dalam aplikasi kondisi lingkungan terpapar yang mengandung larutan NaCl.

Kata kunci - kuat tekan, mortar, nanosilika, sorptivity, statis

Abstract

This study evaluates the effect of nanosilica addition in mortar under static immersion conditions in NaCl solution on compressive strength and sorptivity. In marine environments, mortar is a construction material often exposed to aggressive environments, including NaCl solutions. The addition of nanosilica is thought to improve mortar performance by enhancing its microstructure and reducing porosity. In this study, PCC, PCC-NS 0.75%, PCC-NS 1.5% and PCC-NS 2.25% mortars were tested under static immersion in NaCl solution for a specified period. Initial treatment was carried out for 28 days followed by loading until there were cracks in the mortar with a width between 0.1-0.3 mm. Then the mortar samples were immersed for 7 and 28 days in a mixture of 3.5% NaCl solution instead of seawater. The compressive strength of mortar was measured by a standard compressive test, while sorptivity was measured by the water absorption testing method. The results showed that the addition of nanosilica significantly increased the compressive strength of mortar and decreased sorptivity compared to mortar without nanosilica. The decrease in sorptivity indicates that nanosilica is effective in reducing water penetration, which contributes to the increased strength and durability of mortar under harsh environmental conditions. This study shows that nanosilica can be used as an effective additive in improving mortar performance, especially in the application of exposed environmental conditions containing NaCl solution.

Keywords - compressive strength, mortar, nanosilica, sorptivity, static

1. PENDAHULUAN

Indonesia, sebagai negara tropis dengan garis pantai sepanjang 108.000 km (Kementerian Koordinator Bidang Kemaritiman, 2018), merupakan salah satu negara dengan garis pantai terpanjang di dunia. Lingkungan pesisir yang terpengaruh pasang surut sering kali memerlukan struktur teknik sipil, seperti dinding penahan tanah yang menggunakan mortar. Menurut SNI 03-6882-2002, mortar diklasifikasikan menjadi empat tipe, dengan tipe M memiliki kuat tekan tertinggi sebesar 17,2 MPa, yang biasa digunakan untuk aplikasi seperti drainase, jalan, dan dinding penahan tanah.

Namun, lingkungan laut menghadirkan tantangan besar bagi mortar dan beton karena paparan terhadap kondisi eksternal seperti perubahan suhu, kelembapan, dan serangan kimiawi (Yazici et al., 2012). Salah satu zat kimia yang terdapat dalam air laut adalah natrium klorida (NaCl). Air laut mengandung sekitar 3,5% NaCl, yang memberikan beberapa sifat fisik dan kimia yang berbeda dari air tawar (Kim dan Lee, 2022). Serangan NaCl pada mortar menyebabkan degradasi mekanis, seperti pelepasan kalsium, peningkatan porositas, dan penurunan kekuatan struktural (Wang et al., 2021). Tekanan hidrostatik dari air laut juga dapat memaksa air masuk ke dalam pori-pori mortar. Jika mortar memiliki permeabilitas tinggi, air laut dapat meresap lebih dalam dan menyebabkan kerusakan yang lebih parah (Priastiwi et al., 2023). Gelombang laut dan partikel pasir yang terbawa oleh air dapat menyebabkan abrasi dan erosi pada permukaan mortar, mengikis permukaan dan mempercepat degradasi material (Melesse et al., 2023). Ion klorida, khususnya, dapat menyebabkan korosi pada tulangan baja yang terdapat dalam beton bertulang (Angst et al., 2024).

Untuk menghadapi tantangan tersebut, penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan semen kualitas tinggi dan bahan pozzolan seperti nanosilika dapat meningkatkan kuat tekan dan ketahanan abrasi (Li et al., 2017). Nanosilika, partikel silika dalam skala nanometer, memiliki luas permukaan besar untuk reaktivitas kimia dan dapat mempercepat hidrasi semen serta mengisi pori-pori, meningkatkan kekuatan dan menurunkan porositas (Singh et al., 2013). Penggabungan nanosilika hibrid dalam matriks mortar menghambat pembentukan produk yang tidak stabil seperti ettringite saat terkena air laut, sehingga mengurangi potensi pemuai dan retak (Gu et al., 2022). Penelitian eksperimental oleh Shen et al. (2021) mengungkapkan bahwa nanosilika dapat berinteraksi dengan produk hidrasi semen, membentuk jaringan kohesif yang kuat di dalam struktur mortar. Interaksi antara nanosilika dan semen memperkuat ikatan antarpartikel, meningkatkan kekuatan dan ketahanan abrasi mortar. Beton dengan nanosilika sebagai bahan pengganti semen sebesar 2% merupakan campuran optimum yang menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik yang tinggi (Ahmed et al., 2022). Ketika nanosilika ditambahkan 2% dan 3% berat semen, kuat tekannya menunjukkan perbaikan. Namun bila persentase nanosilika ditingkatkan yaitu sebesar 4%, kekuatan tekannya menurun secara signifikan (Singh et al., 2015).

Indonesia memiliki potensi sumber daya pasir silika besar, mencapai 25 miliar ton dengan cadangan 330 juta ton (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021). Pasir silika dapat dikonversi menjadi nanosilika melalui metode seperti kopresipitasi, sol-gel, atau hidrotermal, dengan metode hidrotermal menjadi yang paling ekonomis dan efisien (Negara, 2021). Penelitian menunjukkan bahwa pasir silika dari beberapa lokasi di Indonesia memiliki kandungan silika tinggi yang cocok untuk nanosilika (Setiati, 2017).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi penggunaan nanosilika yang diekstraksi dari pasir silika Pulau Rupert sebagai bahan tambahan dalam campuran mortar, serta mengevaluasi pengaruh penambahan nanosilika terhadap sifat mekanis mortar, seperti kuat tekan dan *sorptivity*, di bawah paparan larutan NaCl. Selain itu, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi konsentrasi nanosilika optimum yang dapat meningkatkan durabilitas mortar di lingkungan maritim. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi terkait pengembangan material konstruksi berbasis nanosilika sebagai solusi inovatif untuk infrastruktur pesisir yang berkelanjutan, sekaligus memanfaatkan sumber daya alam Indonesia secara optimal.

2. METODE PENELITIAN

Bahan penyusun mortar dibentuk dengan campuran agregat halus, semen PCC, air dan zat aditif berupa nanosilika. Agregat halus berasal dari Rimbo Panjang, Kampar, memiliki berat jenis 2,67 dengan modulus kehalusan 2,7. Agregat halus memenuhi spesifikasi dan cocok digunakan sebagai bahan penyusun mortar dalam penelitian ini. Nanosilika yang digunakan merupakan hasil ekstraksi pasir silika yang berasal dari Pulau Rupert, Bengkalis. Air yang digunakan adalah air tawar berasal dari tanah. Semen yang digunakan yaitu semen dengan jenis PCC yang berasal dari PT. Semen Padang dengan berat jenis sebesar 3,15 gr/cm³. Pengujian semen tersebut tidak dilakukan karena sudah sesuai dengan persyaratan SNI 7064-2014 dari fabrikasi semen.

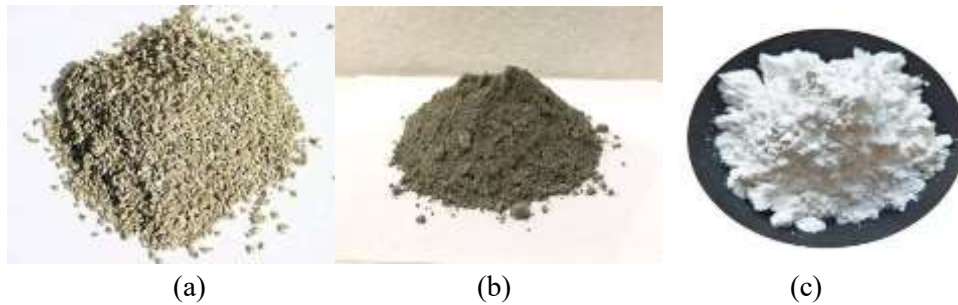
Dalam penelitian ini digunakan bahan aditif berupa nanosilika. Nanosilika merupakan senyawa silika dioksida (SiO₂) yang berukuran antara 20-40 nanometer. Partikel nanosilika dapat mengisi ruang antara partikel gel C-S-H yang menyebabkan reaksi pozzolan dengan kalsium hidroksida yang meningkatkan C-S-H sehingga menghasilkan densifikasi matriks yang lebih tinggi, yang meningkatkan kekuatan dan daya tahan material. Karakteristik nanosilika sebagai bahan aditif dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik nanosilika

No.	Karakteristik Kimia	Hasil Pengujian (%)
1.	SiO ₂	96,5
2.	K ₂ O	0,22
3.	MgO	0,09
4.	CaO	0,03
5.	Fe ₂ O ₃	0,33
6.	Al ₂ O ₃	2,15
7.	Na ₂ O	0,23

Sumber: (Setiati, 2017)

Komposisi benda uji terdiri dari agregat halus sebagai bahan utama, air, semen dan nanosilika sebagai bahan tambah pengganti semen. Bahan penyusun benda uji dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bahan Penyusun Benda Uji (a) Agregat halus, (b) Semen PCC, (c) Nanosilika

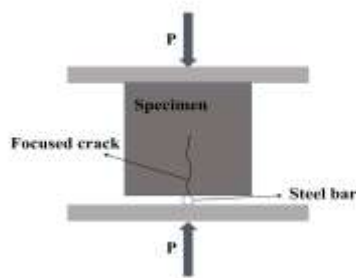
Perencanaan komposisi campuran benda uji mortar mengacu pada SNI 03-6825-2002. Perencanaan pengujian menggunakan Faktor Air Semen (FAS) sebesar 0,5 dengan *Sand per Binder* (S/B) 2,5. Pada penelitian ini digunakan nanosilika dengan variasi 0,75%, 1,5% dan 2,25%. Persentase nanosilika yang digunakan merupakan bahan pengganti sebagian semen yang dihitung berdasarkan berat jenis. Berat jenis nanosilika yang digunakan sebesar 2,18 gr/cm³. Rincian komposisi benda uji dengan masing-masing variasi mix dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Komposisi mortar PCC dan PCC-NS (nanosilika) dengan f_c' 20 MPa per m³

No.	Jenis Mortar	Agregat Halus (kg)	Air (kg)	PCC (kg)	NS (kg)
1.	PCC	1408,2	288,6	565,6	-
2.	PCC-NS 0,75%	1408,2	288,6	561,4	2,9
3.	PCC-NS 1,5%	1408,2	288,6	557,1	5,9
4.	PCC-NS 2,25%	1408,2	288,6	552,9	8,8

Pelaksanaan penelitian dimulai dari pemeriksaan bahan penyusun mortar yaitu agregat halus (gradasi, berat satuan, berat jenis, absorpsi, kadar air), perancangan bahan susun mortar/*mix design* berupa air, semen, agregat halus, dan nanosilika. Mortar dicetak dan dilakukan pengujian kuat tekan dan *sorptivity*. Benda uji yang digunakan berbentuk kubus dengan ukuran 50x50x50 mm. Setiap pengujian untuk kuat tekan menggunakan 6 sampel dan untuk *sorptivity* menggunakan 3 sampel. Standar pengujian uji kuat tekan mortar mengacu pada SNI 03-6825-2002.

Setelah sampel dicetak, dilanjutkan dengan perawatan. Pada proses perawatan, benda uji direndam selama 28 hari dalam bak perendaman menggunakan air tawar. Pada sampel untuk setiap variasi dilakukan pengujian kuat tekan untuk mengetahui kuat tekan awal pada umur 0 hari. Kemudian untuk sampel lainnya akan dilakukan proses *pre-crack* dengan alat uji tekan yang didukung dengan *steel bar* berukuran 5 mm pada tengah alas mortar seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2. Sampel diberi pembebanan hingga muncul retak kecil pada permukaan dengan ukuran control 0,1-0,3 mm. Selanjutnya akan dilakukan perendaman pada setiap umur 7 dan 28 hari di larutan NaCl dan diikuti dengan pengujian kuat tekan dan *sorptivity* pada setiap umur perendaman.



Gambar 2. Metode *pre-crack* pada mortar

Setelah benda uji dilakukan proses *pre-crack*, maka benda uji dimasukkan kedalam bak rendaman yang mengandung 3,5% larutan NaCl. Larutan ini dibuat untuk mempresentasikan air laut yang sebagian besar mengandung NaCl. Penggunaan larutan NaCl sebagai media simulasi dapat mendukung evaluasi yang lebih terkontrol terhadap mekanisme transportasi ion klorida ke dalam beton, dengan penyesuaian volume larutan untuk mencerminkan kondisi pelindian yang terjadi di lapangan (De Weerd et al., 2019). Perendaman statis digunakan sebagai rekayasa struktur yang terendam secara terus menerus dalam lingkungan air laut. Pendekatan ini memberikan gambaran realistis tentang interaksi langsung antara material, seperti mortar atau beton, dengan larutan air laut yang mengandung zat agresif seperti NaCl. Kondisi perendaman statis membuat penelitian terfokus pada kondisi lingkungan maritim yang stabil, berbeda dari metode paparan dinamis yang melibatkan kondisi arus atau gelombang.

Perendaman benda uji dalam larutan NaCl dilakukan selama 7 dan 28 hari sampai batas waktu pengujian untuk kondisi perendaman statis. Kondisi perendaman dapat dilihat pada Gambar 3. Lokasi pengujian dilaksanakan di Laboratorium Struktur Fakultas Teknik Universitas Riau, Pekanbaru.



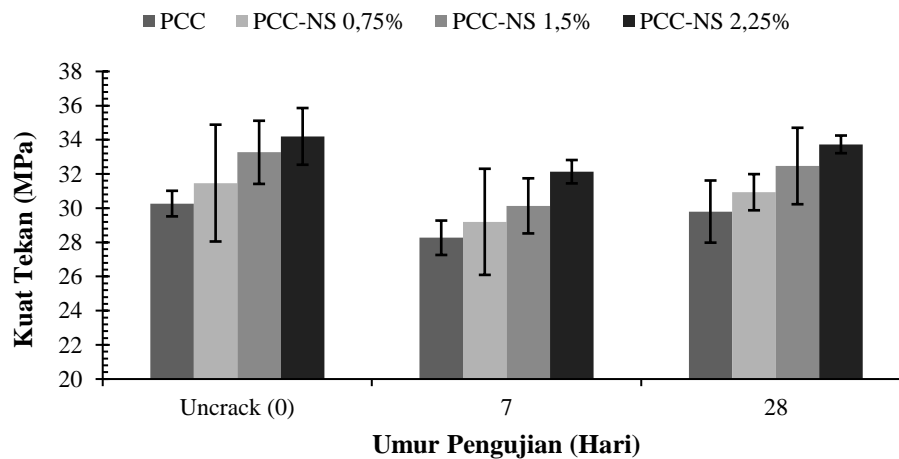
Gambar 3. Perendaman benda uji dalam larutan NaCl metode statis

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan mortar PCC dan PCC-Nanosilika (PCC-NS) variasi 0,75%, 1,5% dan 2,25% pada kondisi perendaman statis dapat dilihat pada Gambar 4. Setelah

dilakukannya *pre-cracked*, kuat tekan beton PCC dan PCC-Nanosilika mengalami penurunan kuat tekan. Penurunan kuat tekan terbesar setelah 7 hari perendaman secara statis dalam larutan NaCl terjadi pada mortar PCC-NS 1,5% sebesar -9,42%, diikuti oleh mortar PCC-NS 0,75%, PCC dan PCC-NS 2,25% masing-masing sebesar -7,20%, -6,61% dan -6,04%. Setelah 28 hari, terjadi peningkatan kekuatan mortar, yang secara umum hampir memiliki kuat tekan yang sama seperti saat sebelum dilakukannya *pre-cracked*. Peningkatan kuat tekan terbesar dari umur 7 ke 28 hari terjadi pada mortar PCC-NS 1,5 sebesar 7,74% diiringi oleh mortar PCC-NS 0,75%, PCC dan PCC-NS 2,25% masing-masing sebesar 5,94%, 5,42% dan 4,98%.

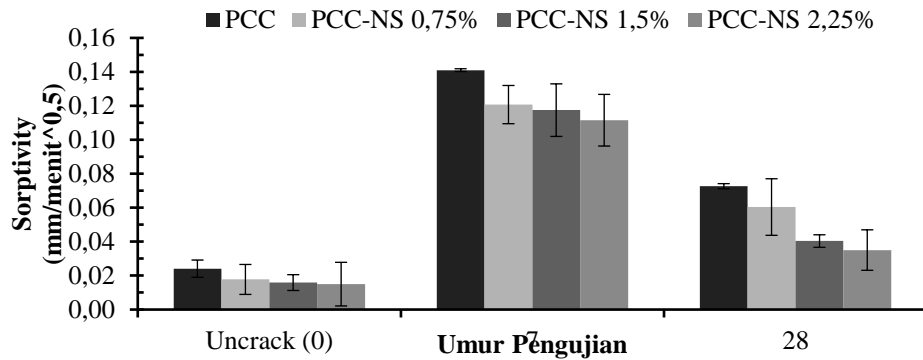


Gambar 4. Grafik kuat tekan mortar PCC dan PCC-Nanosilika metode perendaman statis

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4 secara umum mortar yang mengandung nanosilika memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan kuat tekan mortar tanpa nanosilika pada saat sebelum dan setelah dilakukannya *pre-cracked* dan direndam secara statis dalam larutan NaCl. Penelitian eksperimental oleh Shen et al. (2021) mengungkapkan bahwa nanosilika dapat berinteraksi dengan produk hidrasi semen, membentuk jaringan kohesif yang kuat di dalam struktur mortar. Interaksi antara nanosilika dan semen memperkuat ikatan antarpartikel, meningkatkan kekuatan dan ketahanan abrasi mortar. Secara keseluruhan, mortar PCC-NS 2,25% memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan mortar lainnya. Kuat tekan mortar PCC-NS 2,25% mencapai 33,73 Mpa pada umur 28 hari setelah direndam secara statis dalam larutan NaCl.

3.2. Sorptivity

Pengujian *sorptivity* merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi durabilitas mortar. Nilai *sorptivity* berbanding terbalik dengan nilai kuat tekan mortar. Semakin rendah nilai *sorptivity*, maka nilai kuat tekan mortar juga semakin besar. Hasil pengujian *sorptivity* dapat dilihat pada Gambar 5.

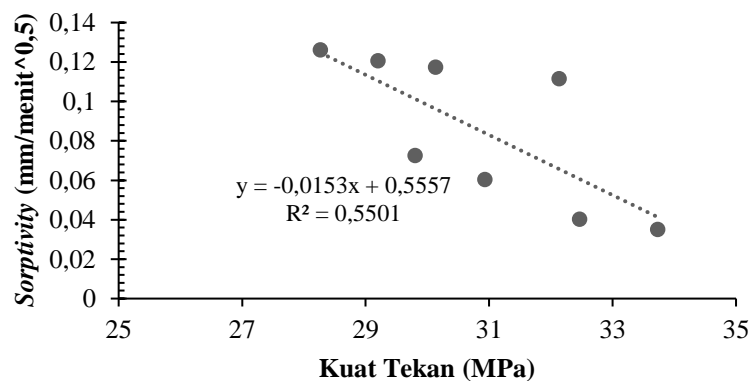


Gambar 5. Grafik *sorptivity* mortar PCC dan PCC-Nanosilika metode perendaman statis

Berdasarkan Gambar 5 dapat dilihat bahwa nilai *sorptivity* meningkat secara signifikan pada pengujian hari ke-7. Hal ini karena penutupan retak belum terjadi pada variasi nanosilika maupun variasi kontrol. Retak pada mortar menyebabkan penyerapan air yang tinggi karena celah yang dapat dilalui oleh air dan seiring bertambahnya umur pengujian menunjukkan nilai *sorptivity* mortar yang menurun.

Pada umur 28 hari terjadi penurunan pada seluruh variasi. *Sorptivity* seluruh variasi mengalami penurunan sebesar 42,42%, 49,98%, 65,64% dan 68,58% untuk mortar PCC, PCC-NS 0,75% , PCC-NS 1,5% dan PCC-NS 2,25% setelah 28 hari perendaman pada kondisi statis. Penambahan nanosilika dalam mortar semen mengurangi porositas, meningkatkan pengisian produk hidrasi, meningkatkan kepadatan, dan memperbaiki struktur mikro, yang mengarah pada daya serap yang lebih rendah dan peningkatan sifat penyerapan air (Gopalakrishnan, 2014).

Nilai *sorptivity* terendah ditunjukkan oleh variasi 2,25% nano silika pada umur ke-28 hari. Hal ini disebabkan karena celah pada mortar sudah tertutup karena reaksi lebih lanjut dari nanosilika. Secara umum studi yang ditinjau menunjukkan bahwa menambahkan nanosilika ke dalam campuran semen dapat meningkatkan kedapatan struktur. Korelasi antara *sorptivity* dan kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik Hubungan antara kuat tekan dan *sorptivity* PCC dan PCC-Nanosilika metode perendaman statis

Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa perbandingan kuat tekan dan *sorptivity* berbanding terbalik, yakni kuat tekan terus meningkat seiring dengan penurunan nilai *sorptivity* untuk seluruh jenis mortar, baik yang menggunakan nanosilika dan tanpa nanosilika. *Sorptivity* memiliki nilai penting pada mortar karena *sorptivity* berhubungan langsung dengan sifat mekanik mortar seperti kekedapan, keawetan bahkan dengan kekuatan mortar. Pada Gambar 6 dapat dilihat bahwa korelasi kuat tekan dan *sorptivity* mortar PCC dan PCC-NS untuk kondisi perendaman statis berbanding lurus dengan $R = 0,5501$. Secara umum *sorptivity* menurun seiring dengan peningkatan kuat tekan terutama untuk beton PCC-NS 2,25%.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi empat jenis mortar berbasis PCC (PCC, PCC-NS 0,75%, PCC-NS 1,5%, dan PCC-NS 2,25%) yang direndam secara statis dalam larutan NaCl selama 28 hari. Pengujian menunjukkan bahwa penambahan nanosilika dapat meningkatkan kuat tekan dan menurunkan *sorptivity*, dengan hasil terbaik pada mortar PCC-NS 2,25%, mencapai kuat tekan 33,73 MPa dan *sorptivity* 0,035 mm/menit^{0.5}. Nanosilika berfungsi mengisi pori-pori, meningkatkan kepadatan, serta mengurangi penyerapan air. Berdasarkan hasil pengujian disimpulkan bahwa nanosilika diperlukan untuk meningkatkan ketahanan mortar di lingkungan air laut. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk menguji performa jangka panjang dengan umur perendaman yang lebih lama serta variasi metode perendaman yang berbeda, seperti siklus *wet-dry* atau suhu ekstrem, untuk mencerminkan kondisi laut yang lebih nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S. I., Al-Adili, A. S., & Hameed, A. M. (2022). The effect of dosage nanosilica and the particle size of porcelanite aggregate concrete on mechanical and microstructure properties. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1), 573–579. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0062>
- Angst, U. M., Rossi, E., Boschmann Käthler, C., Mannes, D., Trtik, P., Elsener, B., Zhou, Z., & Strobl, M. (2024). Chloride-induced corrosion of steel in concrete—insights from bimodal neutron and X-ray microtomography combined with ex-situ microscopy. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 57(4). <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02337-7>
- De Weerd, K., Lothenbach, B., & Geiker, M. R. (2019). Comparing chloride ingress from seawater and NaCl solution in Portland cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 115, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.014>
- Gopalakrishnan, R. (2014). Compressive strength and Scanning electron microscopy studies on Nanosilica admixed cement mortar. In *International Journal of ChemTech Research CODEN* (Vol. 7, Issue 2).
- Gu, Y., Fan, R., Xia, K., Lyu, K., Wei, Z., & Guo, M. (2022). The Effect of Seawater on Mortar Matrix Coated with Hybrid Nano-Silica-Modified Surface Protection Materials. *Polymers*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/polym14194080>

- Kim, Y., & Lee, W. (2022). Seawater and Its Resources. In Y. Kim & W. Lee (Eds.), *Seawater Batteries: Principles, Materials and Technology* (pp. 1–35). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0797-5_1
- Li, L. G., Zhu, J., Huang, Z. H., Kwan, A. K. H., & Li, L. J. (2017). Combined effects of micro-silica and nano-silica on durability of mortar. *Construction and Building Materials*, 157, 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.105>
- Melesse, G., Kaske Kassa, H., Geta, M., Simachew, T., Mamo, T., Mengesha, A., & Asale, T. (2023). A Study on the Abrasion Resistance of Hydraulic Structures with Different Repair Mortars. *Journal of Engineering (United Kingdom)*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/3077902>
- Negara, S. P. J. (2021). *Sintesis Nanosilika Pasir Pantai Takalar Menggunakan Metode Hidrotermal Synthesis Nanosilica of Sand from Takalar Beach by Using Hydrothermal Method: Vol. X* (Issue 2). <http://ojs.unm.ac.id/index.php/sainsmat>
- Priastiwi, Y. A., Yuniarto Adi, R., Hidayat, A., & Nabil Hanif, A. (2023). *Jurnal Presipitasi Comparison of Physical Properties and Strength of Geopolymer Mortar with White Soil Substitution and Mortar with Portland Pozzolan Cement under Corrosive Seawater Conditions*. 20(3), 534–544.
- Setiati, N. R. (2017). The potential use of silica sand as nanomaterials for mortar. *AIP Conference Proceedings*, 1903. <https://doi.org/10.1063/1.5011549>
- Shen, S., Mei, K., Xue, Q., Wang, B., & Zhang, L. (2021). Study on the process of chloride invasion and deposition in concrete under dry-wet cycles and continuous loading. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 861(7). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/861/7/072013>
- Singh, A., Lal, R., Bavoria, P., & Saklani, A. (2015). Compressive Strength Of Concrete With Fly Ash, Nanosilica And Recycled Aggregate. In *IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology*. <http://www.ijret.org>
- Singh, L. P., Karade, S. R., Bhattacharyya, S. K., Yousuf, M. M., & Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials - A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 47, pp. 1069–1077). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052>
- Wang, Y., Li, J., Ueda, T., Zhang, D., & Deng, J. (2021). Meso-scale mechanical deterioration of mortar subjected to freeze thaw cycles and sodium chloride attack. *Cement and Concrete Composites*, 117, 103906. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103906>
- Yazici, Ş., Sezer, G. N., & Şengül, H. (2012). The effect of high temperature on the compressive strength of mortars. *Construction and Building Materials*, 35, 97–100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.082>