

Analisis Kuat Tekan Dan Mikrostruktur Mortar Menggunakan Pasir Laut, Air Tawar Digabung Dengan SCMs Dan Superplasticizer

Innayah Nabilla Putri Jun^{1*}, Prima Ranna² dan Jonbi¹

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Jakarta

² Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tarumanagara, Jakarta

Abstrak. Dalam pembangunan konstruksi kebutuhan material berupa mortar terus mengalami peningkatan, salah satu komponen utama mortar adalah pasir sungai yang ketersediaannya semakin berkurang. Pasir laut berpotensi sebagai pengganti pasir sungai, namun penggunaan pasir laut pada mortar masih dihindari karena terdapat kandungan NaCl yang menyebabkan terjadinya korosi pada tulangan. Penelitian ini difokuskan untuk menurunkan kandungan NaCl terhadap kuat tekan dan mikrostruktur mortar laut dengan tambahan material, seperti SCMs dan superplasticizer. Pengujian mortar yang dilakukan dalam penelitian, yaitu pengujian kuat tekan dan pengujian mikrostruktur setelah benda uji melalui perawatan dengan *curing* air tawar. Dalam pengujian kuat tekan yang dilakukan pada spesimen M1, M2, dan M3 mengalami penurunan pada umur 28 hari, sedangkan spesimen M4, M5, dan M6 mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya umur. Pada hasil pengujian SEM, mikrostruktur MC1 lebih homogen dibandingkan MC2, sedangkan M5 kepadatannya lebih baik dibandingkan dengan MC1. Hasil kadar NaCl yang dilakukan pada pengujian metrohm untuk air tawar 0,00%, pasir laut 0,95%, dan spesimen MC1, MC2, M2 dan M5 mendekati 0,00%. Berdasarkan hasil pengujian pasir laut dapat meningkatkan kuat tekan awal, penambahan SCMs dan SP dapat meningkatkan kuat tekan, membuat mikrostruktur mortar lebih padat dan homogen, serta menurunkan kadar NaCl yang terdapat pada pasir laut. Proporsi campuran mortar yang paling optimal terdapat pada spesimen M5 dengan volume perbandingan, yaitu 1 semen : 1 pasir laut : 1,5 kapur : 0,5625 nano *silica* : 1,125 *silica fume* : 0,4 superplasticizer.

Kata kunci: Kuat tekan; Mikrostruktur; Pasir laut; *Supplementary Cementitious Material (SCMs)*; *Superplasticizer*.

1. PENDAHULUAN

Mortar merupakan material utama dalam pembangunan konstruksi yang kebutuhannya terus meningkat terutama di wilayah pesisir pantai. Namun, salah satu masalah utama dalam konstruksi di wilayah pesisir pantai yaitu ketersediaan material yang murah tetapi dapat digunakan seperti pasir laut untuk pembuatan mortar. Oleh karena itu, penggunaan pasir laut memiliki potensi dalam mengatasi masalah kelangkaan sumber daya di wilayah pesisir pantai dan melindungi ekologi lokal, sehingga dapat mendorong pembangunan infrastruktur [1, 2].

Menurut [3–5] penggunaan 15% pasir laut dalam campuran mortar dapat meningkatkan kuat tekan maksimum. Namun penggunaan pasir laut pada mortar masih dihindari oleh stakeholder konstruksi, karena kandungan NaCl yang menyebabkan terjadinya korosi pada tulangan. Untuk itu perlu adanya material tambahan yang dapat mereduksi NaCl, seperti *Supplementary Cementitious Material (SCMs)*. Penggunaan *Supplementary Cementitious Material (SCMs)* dapat memodifikasi karakteristik beton baik dalam keadaan segar maupun mengeras [6, 7]. *Supplementary Cementitious Material (SCMs)* yang digunakan terdiri dari kapur, nano *silica* dan *silica fume*.

*Corresponding author: innayahnabilla@gmail.com

Penambahan kapur pada campuran mortar sebagai bahan pengikat dapat meningkatkan kuat tekan sebesar 26% dan mempercepat reaksi hidrasi mortar [8, 9]. Menurut [10–13] penambahan nano *silica* sebagai bahan pengisi mortar dapat meningkatkan kuat tekan sebesar 9% dan aktivitas hidrolik mortar. Penambahan *silica fume* dapat membantu proses hidrasi semen, meningkatkan kuat tekan sebesar < 30% dan menurunkan penetrasi sebesar < 50% [14, 15]. Selain itu, menurut [16, 17] penambahan bahan admixture seperti superplasticizer dapat mengurangi penambahan air dan meningkatkan kuat tekan sebesar 20,98%.

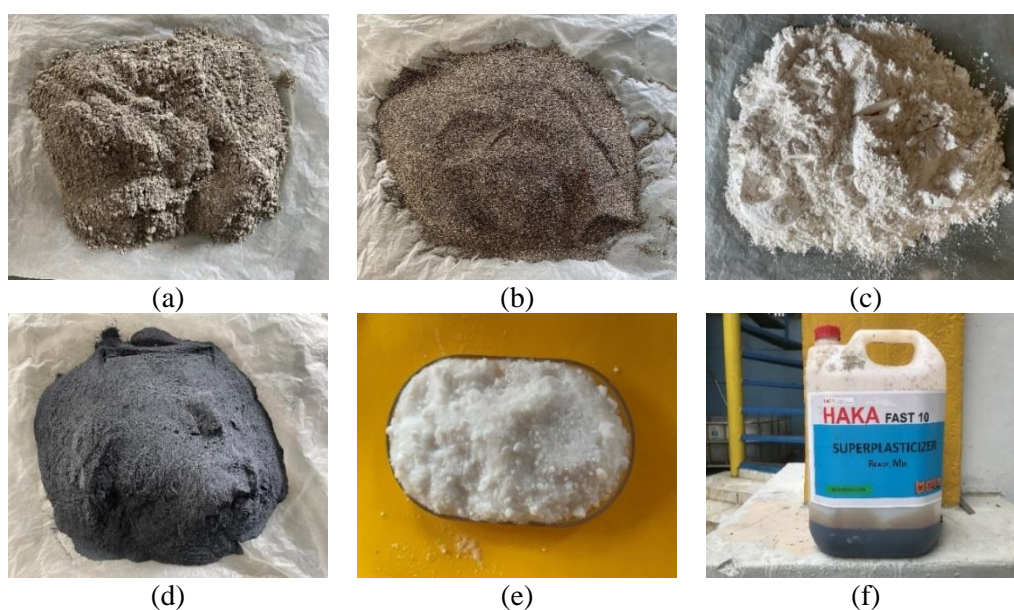
Dalam memahami kinerja dan penyebab kegagalan pada mortar perlu dilakukan pengujian kuat tekan dan pengujian mikrostruktur yang dapat mempengaruhi kekuatan, sifat mekanik dan kinerja suatu mortar. Salah satu metode investigasi mikrostruktur yang umum digunakan adalah *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan Metrohm [18]. Dari pengujian akan diperoleh gambar *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang digunakan untuk mengukur sifat mikrostruktur yang akan membantu menentukan ikatan fisik [19, 20]. Sedangkan pengujian Metrohm dilakukan untuk mengetahui kadar NaCl yang terdapat didalam mortar [21].

Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh pemanfaatan penggunaan pasir laut yang digabung dengan *Supplementary Cementitious Material* (SCMs) dan superplasticizer terhadap *workability* dan daya tahan mortar, serta mendapatkan komposisi campuran mortar yang optimal untuk mereduksi NaCl.

2. METODE

Dalam penelitian ini, pasir yang digunakan berasal dari pantai Keusik Urug, Sukabumi, Jawa Barat, Indonesia. Semen yang digunakan yaitu jenis Portland tipe I berasal dari PT. Adhimix RMC Indonesia. *Supplementary Cementitious Material* (kapur, *silica fume*, nano *silica*) dan superplasticizer yang digunakan berasal dari Workshop John Hi – Tech Contrindo. Nano *silica* yang digunakan merk HDKN20 ex PT. Bratachem. Superplasticizer (SP) yang digunakan Naphthalene Formaldehyde Sulfonate yang dimodifikasi dengan pereduksi air untuk mempercepat pengerasan. Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia material.

Mix design mortar dapat dilihat pada Tabel 2 dengan nomenklatur MC1 (pasir sungai, air tawar, dan semen) dan MC2 (pasir laut, air tawar, dan semen) adalah mortar kontrol, M1 s/d M5 (pasir laut, air tawar, semen, SCMs, dan SP) merupakan mortar dengan perbandingan campuran 1 : 1. M4 s/d M6 (pasir laut, air tawar, semen, SCMs, dan SP) adalah mortar dengan perbandingan campuran 2 : 1. SP yang digunakan adalah 40% dari semen, sedangkan air yang digunakan merupakan air tawar dengan w/b 0,35. Komposisi air tawar dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 1 Material Mortar: (a) Semen; (b) Pasir Laut; (c) Kapur; (d) *Silica Fume*; (e) Nano *Silica*; (f) Superplasticizer.

Tabel 1 Komposisi Kapur, *Silica Fume*, dan Nano *Silica*.

Chemical Compound	Lime (LS)	Silica fume (SF)	Nano silica (NS)
SiO ₂	7.06	87.74	99.99
Al ₂ O ₃	2.38	0.72	
Fe ₂ O ₃	0.06	1.63	
CaO	84.85	0.520	
MgO	0.04	1.45	
SO ₃	1.2	0.576	
Na ₂ O & K ₂ O	1.08	3.64	
CuO		0.004	0.01

Tabel 2 *Mix Design* (Satuan Rasio Volume).

Spesimen	Pasir Sungai	Pasir Laut	Semen	Kapur	Nano SiO ₂	Silica Fume	Air Tawar	SP
MC1	1	-	1	-	-	-	0.35	-
MC2	-	1	1	-	-	-	0.35	-
1 : 1 (Kapur : Semen)								
M1	-	1	1	1	0.5	1	0.35	0.4
M2	-	1	1	0.75	0.5625	1.125	0.35	0.4
M3	-	1	1	0.5	0.625	1.25	0.35	0.4
2 : 1 (Kapur : Semen)								
M4	-	1	1	2	0.5	1	0.35	0.4
M5	-	1	1	1.5	0.5625	1.125	0.35	0.4
M6	-	1	1	1	0.625	1.25	0.35	0.4

Tabel 3 Komposisi Air Tawar.

Units	Cl	Ca	Mg	Na	K	Cu	Fe	Mo	Ni	V	Zn
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
Freshwater	124	72	6.5	38.8	2.68	5.42	0.2	6.21	0.52	0.49	23.12

Setelah campuran mortar homogen masukan ke dalam cetakan berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm dan diamkan selama 24 jam hingga mengering [22]. Perawatan benda uji dilakukan dengan cara direndam dalam air tawar (*curing*) sesuai dengan [23]. Pengujian dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari menggunakan *Unit Test Scientific (Autocon 2000)* untuk mengitung pencapaian kuat tekan mortar kontrol dengan persamaan [24]:

$$(\%) = \frac{F_c'(\text{Hasil})}{F_c'(\text{Kontrol})} \times 100 \quad (1)$$

Dimana:

Fc' hasil = hasil kuat tekan (M1-M6)

Fc' kontrol = hasil kuat tekan (MC1 dan MC2)

Pengujian mikrostruktur dilakukan pada 2 pengujian, yaitu pengujian SEM dan pengujian Metrohm dilakukan pada umur mortar \leq 28 hari. Pengujian SEM dilakukan pada spesimen kontrol MC1 (pasir sungai, semen, dan air tawar), MC2 (pasir laut, semen, dan air tawar), dan spesimen dengan kuat tekan paling tinggi pada M5 (pasir laut, semen, kapur, *silica fume*, nano *silica*, air tawar dan SP) menggunakan HITACHI SU3500 untuk mendapatkan hasil morfologi, mikrograf dan pemetaan unsur.

Pengujian Metrohm dilakukan pada spesimen kontrol MC1 (pasir sungai, semen, dan air tawar), MC2 (pasir laut, semen, dan air tawar), dan spesimen dengan kuat tekan paling tinggi pada M2 dan M5 (pasir laut, semen, kapur, *silica fume*, nano *silica*, air tawar dan SP) menggunakan Metrohm Argentometri untuk mendapatkan kadar NaCl mortar.

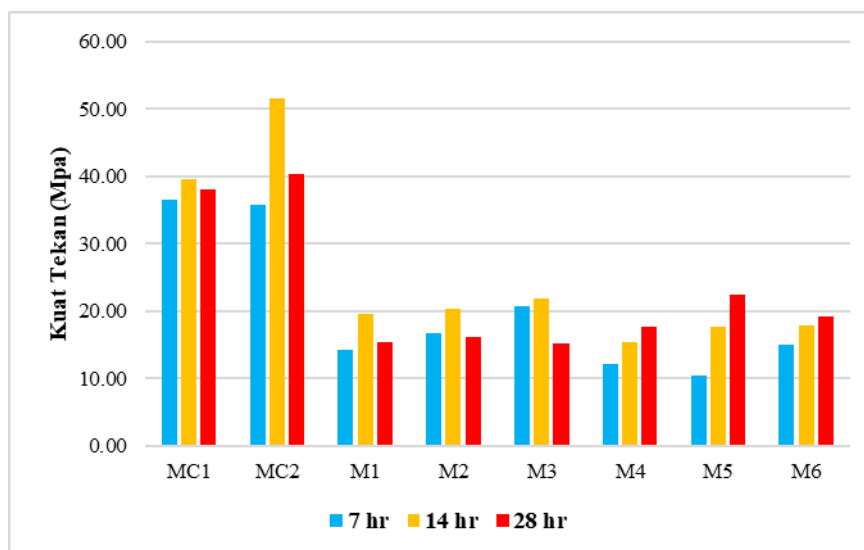
3. HASIL

a. Kekuatan Tekan

Dari hasil pengujian kuat tekan mortar untuk masing-masing benda uji pada Gambar 1 menunjukkan bahwa nilai kuat tekan mortar kontrol MC1 dan MC2 sebesar 38,04 MPa dan 40,40 MPa. Menurut [1] penggunaan pasir laut dan air tawar pada mortar dapat meningkatkan kuat tekan awal, kuat tekan awal yang tinggi menegaskan kelayakan pemanfaatan pasir laut (agregat halus) pada mortar laut dapat menggantikan pasir sungai. Tetapi seiring bertambahnya umur terjadi penurunan kuat tekan yang dapat dilihat pada Gambar 1. Hal ini disebabkan oleh sifat fisik dari pasir laut yang memiliki modulus kehalusan rendah dan gradasi yang buruk menyebabkan sifat ikatan antar partikel menurun, sehingga terjadi penurunan densitas mortar [25, 26].

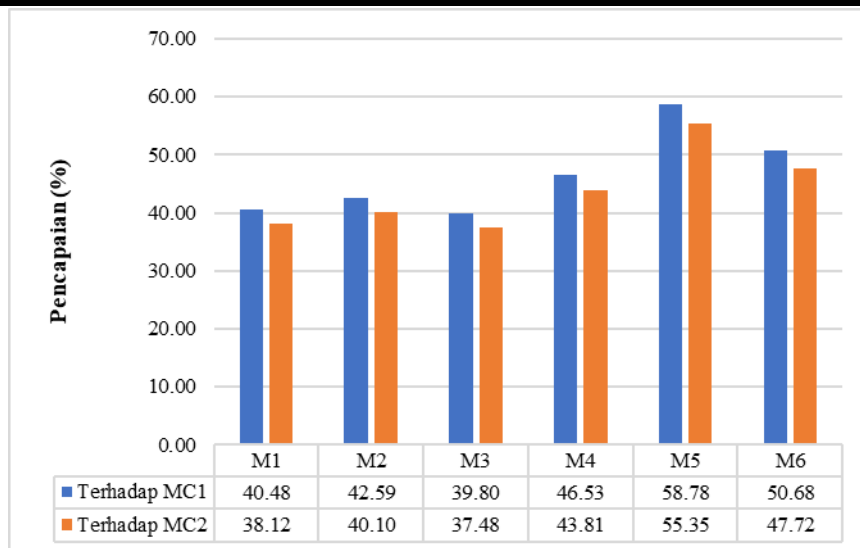
Dengan penambahan SCMs (kapur, nano *silica*, *silica fume*) dan superplasticizer dengan perbandingan 1 : 1 (kapur : semen) pada spesimen M1, M2, dan M3 mengalami penurunan kuat tekan pada umur 28 hari, nilai kuat tekan yang dicapai sebesar 15,40 MPa, 16,20 MPa, dan 15,14 MPa. Penurunan kuat tekan terjadi karena penggunaan kapur lebih dari kadar optimal pemakaian yaitu $\leq 75\%$ dari semen.

Sedangkan untuk perbandingan 2 : 1 (kapur : semen) pada spesimen M4, M5, dan M6 mengalami peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur, nilai kuat tekan umur 28 hari yang dicapai sebesar 17,70 MPa, 22,36 MPa, dan 19,28 MPa. Menurut [27] peningkatan terjadi karena penurunan proporsi kapur dapat meningkatkan kuat tekan karena kemampuan *filling effect* yang semakin rendah dan kandungan CaO yang cukup tinggi dapat mempercepat *setting time* pengerasan pada mortar. Penggunaan nano *silica* dan *silica fume* secara bersama-sama dapat meningkatkan kuat tekan mortar karena adanya reaksi pozzolan yang dapat mengurangi jumlah Ca(OH) menjadi lebih sedikit, meningkatkan laju hidrasi semen dan membuat mortar lebih padat [28, 29]. Selain itu, penambahan bahan admixture superplasticizer sebesar 40% dari semen dapat menjaga *workability* campuran mortar, meningkatkan kelecakan (*flow*) campuran untuk faktor air semen yang rendah sehingga meningkatkan kuat tekan [30].



Gambar 2 Grafik Hasil Nilai Kuat Tekan.

Dari Gambar 2 grafik pencapaian nilai kuat tekan untuk masing-masing benda uji dapat dilihat bahwa penambahan SCMs dan superplasticizer terhadap MC1 dan MC2 pada umur 28 hari, didapat hasil pencapaian terhadap MC1 pada spesimen M1, M2, dan M3 dengan perbandingan 1 : 1 (kapur : semen) sebesar 40,48%, 42,59%, dan 39,8%. Sedangkan spesimen M4, M5, dan M6 dengan perbandingan 2 : 1 (kapur : semen) sebesar 46,52%, 58,78%, dan 50,68%. Pencapaian terhadap MC2 pada spesimen M1, M2, dan M3 dengan perbandingan 1 : 1 (kapur : semen) sebesar 38,12%, 40,10%, dan 37,48%. Sedangkan spesimen M4, M5, dan M6 dengan perbandingan 2 : 1 (kapur : semen) sebesar 43,81%, 55,35%, dan 47,72%. Maka, konfigurasi pencapaian nilai kuat tekan tertinggi terhadap MC1 dan MC2 adalah spesimen M5.

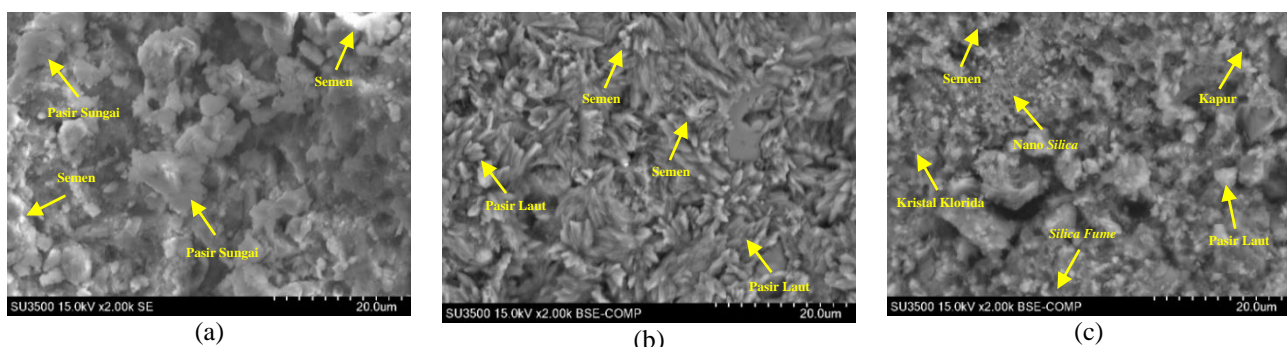


Gambar 3 Grafik Persentase Pencapaian Nilai Kuat Tekan Terhadap Kontrol.

b. Pengujian SEM (Scanning Electron Microscope)

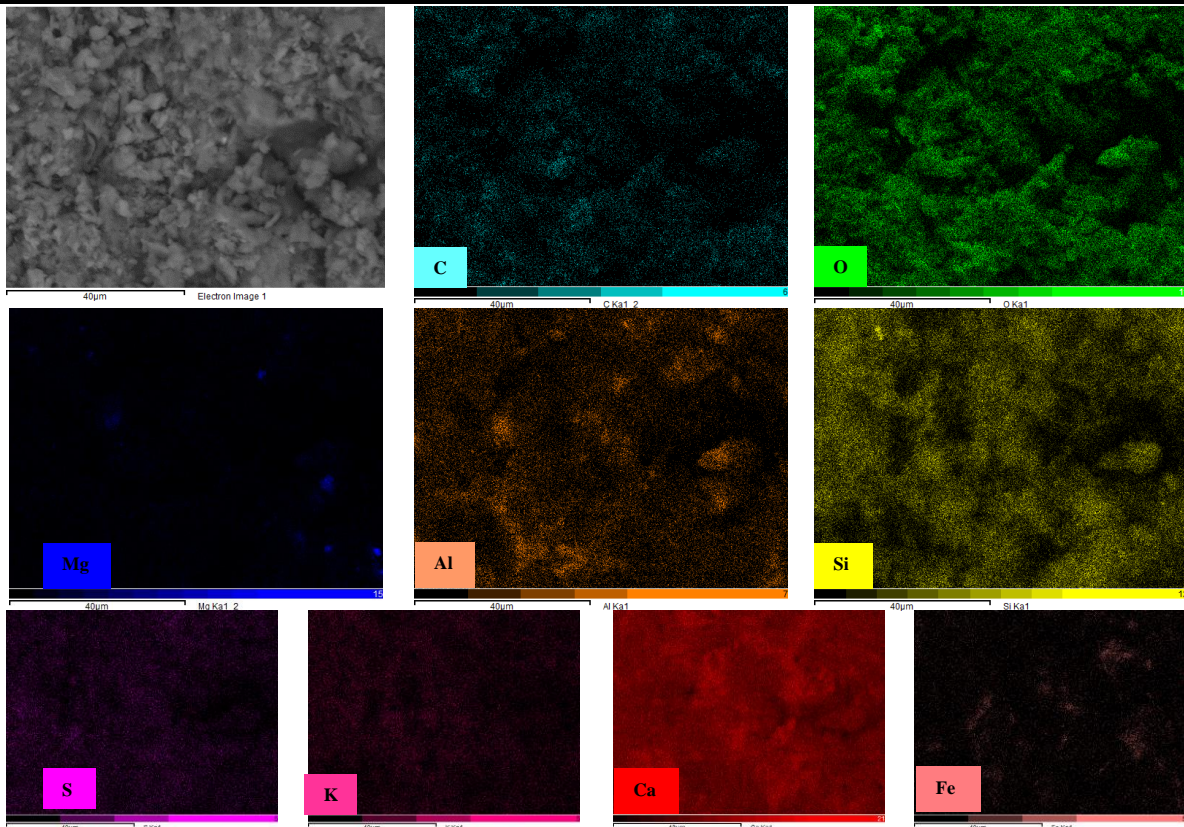
Hasil pemindaian morfologi dari pengujian SEM dapat dilihat pada Gambar 3 bahwa mikrostruktur MC1 lebih homogen dibandingkan mikrostruktur MC2, mikrograf MC1 menunjukkan bentuk dan ukuran partikel hidrasi yang mengelilingi pasir lebih bervariasi dan merata daripada MC2. Hal ini karena sifat fisik, komposisi kimia dan gradasi pasir sungai yang lebih baik daripada pasir laut. Serta pasir laut dapat membentuk kristal klorida berbentuk jarum karena adanya kandungan garam dengan konsentrasi klorida yang tinggi dan kandungan sulfat, sehingga menghasilkan dan mempercepat reaksi hidrasi [26, 31].

Pada mortar M5 kepadatannya lebih baik dibandingkan dengan MC1, karena menurut [13] efek pengisi dari nano *silica* yang berukuran nano lebih efektif dalam mengisi pori-pori mortar, sehingga kepadatan mortar M5 lebih baik. Selain itu, penambahan bahan pozzolan seperti kapur dan *silica fume* pada M5 dapat membantu meningkatkan kepadatan mortar. Reaksi pozzolan kapur menghasilkan pembuatan kristalisasi yang membantu dalam pengikatan mortar, sedangkan efek pozzolan *silica fume* mendorong pembentukan lebih banyak C-S-H, menghasilkan mortar yang lebih padat dan homogen [32, 33].



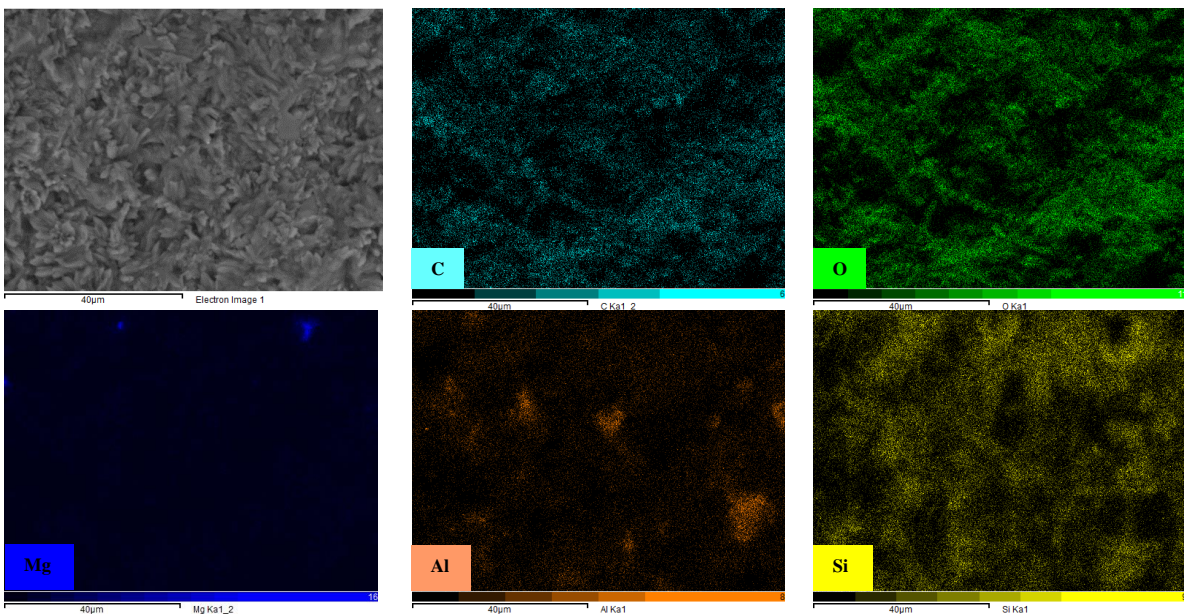
Gambar 4 Morfologi Mikrostruktur Mortar: (a) MC1; (b) MC2; (c) M5.

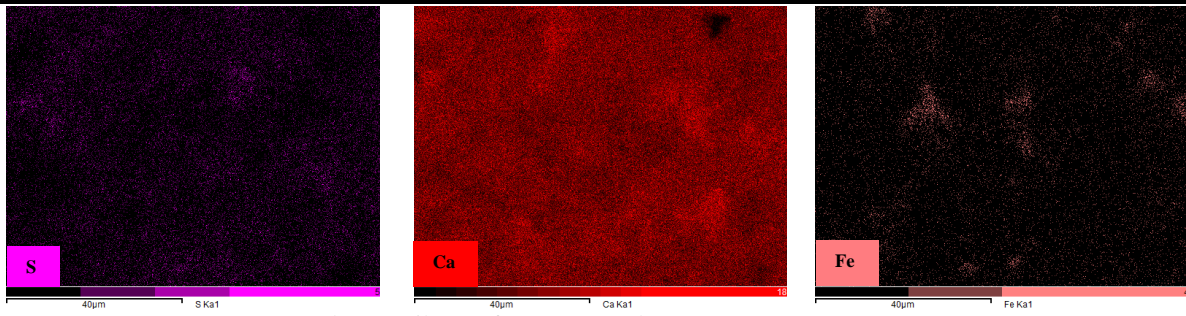
Gambar 5 menampilkan mikrograf SEM-EDX dan peta unsur MC1. Dari peta unsur dapat dilihat bahwa unsur O, Ca, S, dan K terdistribusi secara menyebar/acak yang dimana sebagian proporsi S menyebar di area yang sama dengan K, unsur Si, Al, dan C terdistribusi secara menyebar pada area/pola yang sama dengan penyebaran unsur Si lebih banyak, unsur Fe dan Mg terdistribusi pada area matriks mortar di titik tertentu. Sebagian besar Si yang terdeteksi di area kuning adalah pasir laut. Sedangkan Ca yang terdeteksi di area merah adalah semen.



Gambar 5 Mikrograf SEM-EDX dan Pemetaan Unsur MC1.

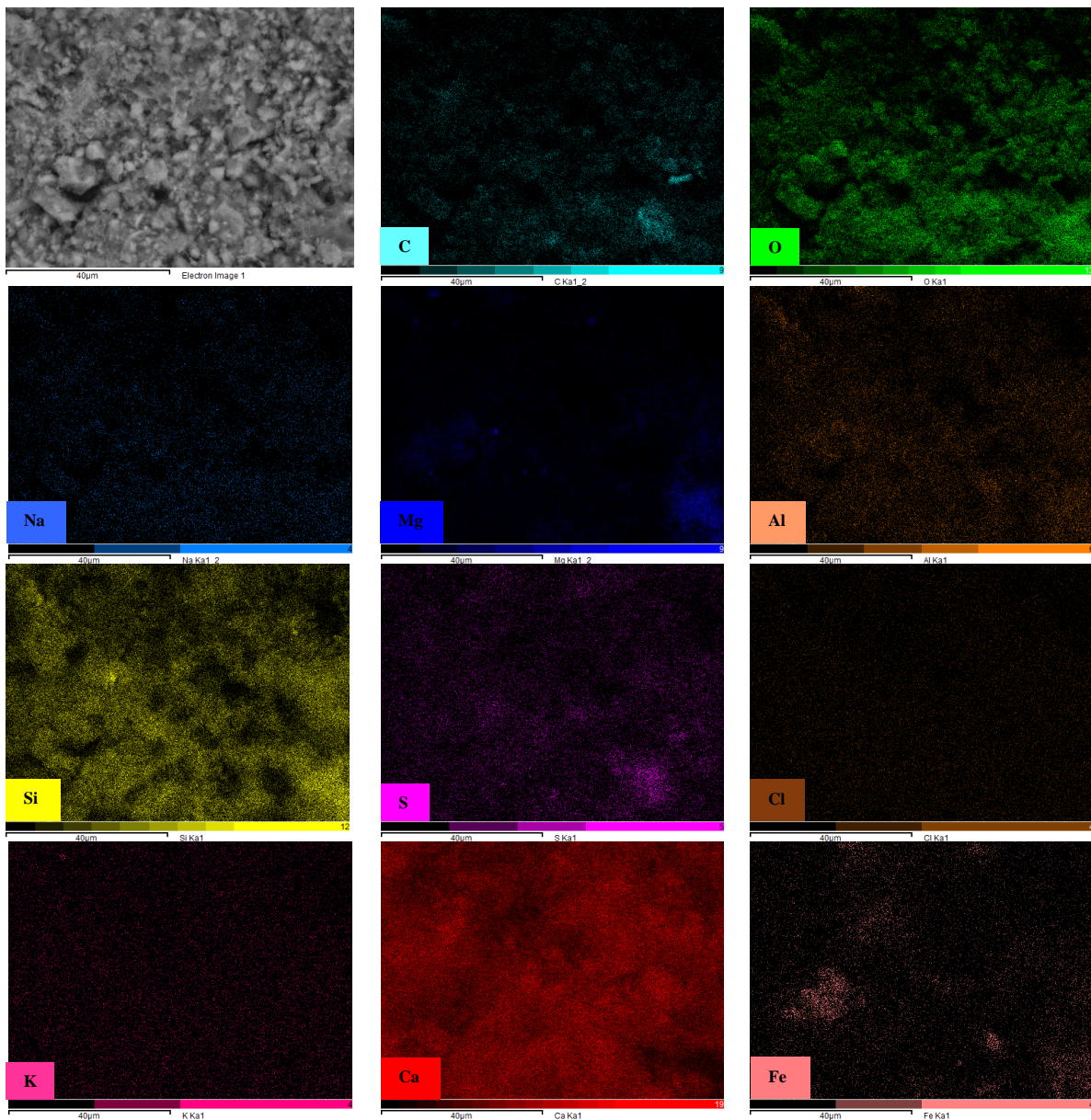
Gambar 6 menampilkan mikrograf SEM-EDX dan peta unsur MC2. Dari peta unsur dapat dilihat bahwa unsur O, C, dan Ca terdistribusi secara menyebar/acak, penyebaran proporis Si lebih banyak dan terdistribusi secara menyebar di area/pola yang sama dengan S, unsur Al dan Fe terdistribusi pada area matriks mortar yang sama, unsur Mg terdistribusi pada area matriks mortar dititik tertentu. Sebagian besar Si yang terdeteksi di area kuning adalah pasir laut. Sedangkan Ca yang terdeteksi di area merah adalah semen.





Gambar 6 Mikrograf SEM-EDX dan Pemetaan Unsur MC2.

Gambar 7 menampilkan mikrograf SEM-EDX dan peta unsur M5. Dari peta unsur dapat dilihat bahwa unsur O, Si, C, dan Ca terdistribusi secara menyebar/acak, unsur K dan Cl terdistribusi secara menyebar dengan pola yang sama, unsur Al, Na, dan S terdistribusi pada area matriks mortar yang sama, unsur Fe dan Mg terdistribusi pada area matriks mortar dititik tertentu. Sebagian besar Si yang terdeteksi di area kuning adalah pasir laut, nano *silica*, dan *silica fume*. Sedangkan Ca yang terdeteksi di area merah adalah semen dan kapur.

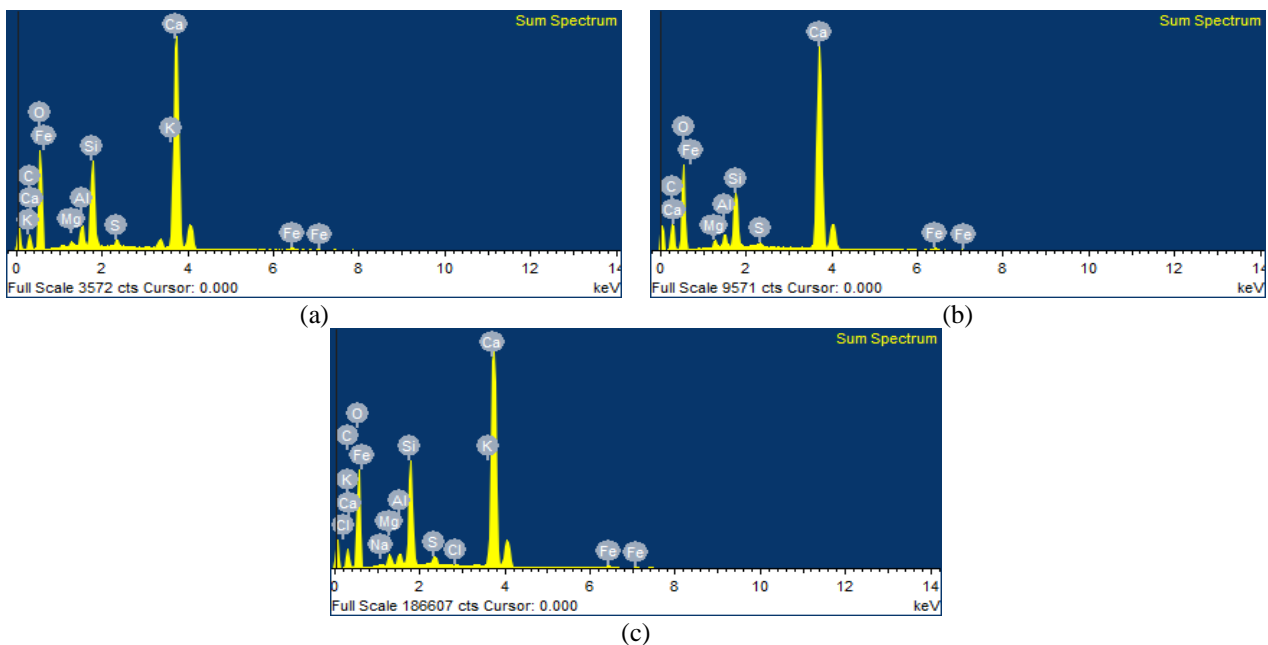


Gambar 7 Mikrograf SEM-EDX dan Pemetaan Unsur M5.

Pada Tabel 4 dan Gambar 8 menunjukkan kandungan kimia yang mendeteksi massa pada MC1, MC2, dan M5, dimana unsur C, unsur O, dan unsur Ca menjadi unsur tertinggi yang terkandung dalam mortar. Selain itu, penambahan nano *silica* dan *silica fume* pada M5 meningkatkan kandungan Si dibandingkan MC1 dan MC2.

Tabel 4 Elemen Unsur Kimia Mikrostruktur.

Elemen	Berat (%)		
	MC1	MC2	M5
C	8,78	12,49	11,78
O	53,24	52,12	51,01
Na	-	-	0,11
Mg	0,60	0,76	1,00
Al	1,52	0,99	0,74
Si	6,66	4,48	7,62
S	0,59	0,37	0,68
Cl	-	-	0,09
K	0,99	-	0,10
Ca	26,96	28,16	26,15
Fe	0,67	0,63	0,71
Total	100		



Gambar 8 Grafik Jumlah Spektrum: (a) MC1; (b) MC2; (c) M5.

c. Pengujian Metrohm

Kadar NaCl pada masing-masing unit untuk AT (Air Tawar), PL (Pasir Laut), spesimen kontrol (MC1 dan MC2) dan spesimen campuran (M2 dan M5) ditunjukkan pada Tabel 5. Berdasarkan hasil pengujian metrohm terlihat bahwa kadar NaCl pada air tawar (AT) 0,00%, sedangkan pasir laut (PL) terdapat kadar NaCl sebesar 0,95%. Untuk kadar NaCl pada spesimen mortar kontrol MC1 dan MC2 mendekati 0,00%, sedangkan pada spesimen campuran yang menggunakan pasir laut, air tawar, SCMs (semen, kapur, *silica fume*, nano *silica*) dan superplastizer dengan kuat tekan paling baik, yaitu M2 dan M5 kadar NaCl mendekati 0,00%. Sehingga campuran M2 dan M5 baik digunakan sebagai mortar pada konstruksi bangunan karena dapat menurunkan kadar NaCl pada pasir laut dengan memperhatikan peningkatan nilai kuat tekan yang dihasilkan.

Menurut [34, 35] penurunan kadar NaCl disebabkan oleh peningkatan proporsi *silica fume*, yang dapat mengurangi pengikatan kandungan klorida dan meningkatkan nilai pH. Serta mengurangi kandungan alumina sehingga mempengaruhi kemampuan pengikatan klorida pada mortar. Penambahan kapur pada campuran mortar dapat mempengaruhi penurunan kadar NaCl karena peningkatan alkalinitas yang terjadi akan menghambat kemampuan mortar untuk mengikat klorida.

Tabel 5 Hasil Pengujian Metrohm (%).

Unit	AT	PL	MC1	MC2	M2	M5
NaCl	0,00	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00

4. KESIMPULAN

Penggunaan pasir laut dan air tawar pada mortar dapat meningkatkan kuat tekan awal, sehingga pasir laut dapat digunakan untuk menggantikan pasir sungai. Penggunaan SCMs dan SP pada campuran mortar laut dapat meningkatkan kuat tekan. Dengan cara penurunan proporsi kapur sebesar 25% - 50%, penggunaan nano *silica* dan *silica fume* sebesar 12,5% - 25% dan penambahan bahan admixture superplasticizer sebesar 40% dari semen. Mikrostruktur MC1 lebih homogen dibandingkan mikrostruktur MC2, sedangkan M5 kepadatannya lebih baik dibandingkan dengan MC1. Penggunaan SCMs (kapur, nano *silica*, *silica fume*) dapat menurunkan kandungan NaCl pada mortar. Proporsi campuran mortar yang paling optimal terdapat pada spesimen M5 dengan volume perbandingan, yaitu 1 semen : 1 pasir laut : 1,5 kapur : 0,5625 nano *silica* : 1,125 *silica fume* : 0,4 superplasticizer.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada PT. Adhimix RMC Indonesia, CV, John Hi – Tech Contrindo, *Research Centre for Advance Materials* – BRIN dan PT Essence Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. He, C. Jiao, Y. Niu, and S. Li, "Utilizing of coral/sea sand as aggregates in environment-friendly marine mortar: Physical properties, carbonation resistance and microstructure," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16, no. December (2021), p. e00981, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00981.
- [2] Y. Wang *et al.*, "Utilizing coral waste and metakaolin to produce eco-friendly marine mortar: Hydration, mechanical properties and durability," *J Clean Prod*, vol. 219, (2019), [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.147>.
- [3] S. Moradi and S. Shahnoori, "Eco-friendly Mix for Roller-Compacted Concrete: Effects of Persian-Gulf-Dredged Marine Sand on Durability and Resistance Parameters of Concrete," *Constr Build Mater*, vol. 281, (2021), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122555.
- [4] J. R, A. A, A. S.Y, R. E, and L. A, "Natural Hydraulic Lime for Blended Cement Mortars: Behavior from Fresh to Hardened States," *Cem Concr Res*, vol. 120, (2019), [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884617304921>.
- [5] García-González, P. Faria, A. S. Pereira, P. C. Lemos, and A. Juan-Valdés, "A sustainable production of natural hydraulic lime mortars through bio-amendment," *Constr Build Mater*, vol. 340, no. May, (2022), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127812.
- [6] T. Boubekour, B. Boulekbache, K. Aoudjane, K. Ezziane, and E. H. Kadri, "Prediction of the durability performance of ternary cement containing limestone powder and ground granulated blast furnace slag," *Constr Build Mater*, vol. 209, pp. 215–221, Jun. (2019), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.120.
- [7] D. Fodil and M. Mohamed, "Compressive strength and corrosion evaluation of concretes containing pozzolana and perlite immersed in aggressive environments," *Constr Build Mater*, vol. 179, pp. 25–34, Aug. (2018), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.190.
- [8] B. Yan, K. J. A. Kouame, W. Lv, P. Yang, and M. Cai, "Modification and in-place mechanical characteristics research on cement mortar with fly ash and lime compound admixture in high chlorine environment," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 1451–1460, (2019), doi: 10.1016/j.jmrt.2018.10.011.
- [9] H. Zhu, J. Chen, and H. Li, "Effect of ultrafine pozzolanic powders on durability of fabricated hydraulic lime," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, no. March, p. e01191, (2022), doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01191.
- [10] R. Liu *et al.*, "Effects of Nano-SiO₂ on the Permeability-Related Properties of Cement-Based Composites with Different Water/Cement Ratios," *J Mater Sci*, vol. 53, no. 7, (2018), doi: 10.1007/s10853-017-1906-8.
- [11] E. Kapeluszna, Ł. Kotwica, and W. Nocuń-Wczelik, "Comparison of the Effect of Ground Waste Expanded Perlite and Silica Fume on the Hydration of Cements with Various Tricalcium Aluminate Content – Comprehensive Analysis," *Constr Build Mater*, vol. 303, no. July, (2021), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124434.
- [12] D. Siang Ng *et al.*, "Influence of SiO₂, TiO₂ and Fe₂O₃ nanoparticles on the properties of fly ash blended cement mortars," *Constr Build Mater*, vol. 258, (2020), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119627.

- [13] A. N. Saleh, A. A. Attar, O. K. Ahmed, and S. S. Mustafa, "Improving the thermal insulation and mechanical properties of concrete using Nano-SiO₂," *Results in Engineering*, vol. 12, no. November, p. 100303, (2021), doi: 10.1016/j.rineng.2021.100303.
- [14] M. Abdi Moghadam and R. A. Izadifard, "Effects of zeolite and silica fume substitution on the microstructure and mechanical properties of mortar at high temperatures," *Constr Build Mater*, vol. 253, p. 119206, (2020), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119206.
- [15] S. Ahmad, O. S. Baghabra Al-Amoudi, S. M. S. Khan, and M. Maslehuddin, "Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, no. February, p. e01255, (2022), doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01255.
- [16] E. Paul, "Influence of superplasticizer on workability and strength of ambient cured alkali activated mortar," *Cleaner Materials*, vol. 6, no. April, p. 100152, (2022), doi: 10.1016/j.clema.2022.100152.
- [17] R. Yan, S. Yin, H. Zhang, L. Wang, and D. Chen, "Effect of superplasticizer on the setting behaviors and mechanical properties of tailings-waste rock cemented paste backfills," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, no. September (2022), p. e01714, 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01714.
- [18] S. S. Bangaru, C. Wang, X. Zhou, and M. Hassan, "Scanning electron microscopy (SEM) image segmentation for microstructure analysis of concrete using U-net convolutional neural network," *Autom Constr*, vol. 144, Dec. (2022), doi: 10.1016/j.autcon.2022.104602.
- [19] B. Feng *et al.*, "Research on properties and durability of desalinated sea sand cement modified with fly ash," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, no. September, p. e00675, (2021), doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00675.
- [20] K. Scrivener, R. Snellings, and B. Lothenbach, *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, 1st Edition. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [21] A. R. I. Tjahjani, Jonbi, D. Suraedi, I. N. P. Jun, and R. B. Chandraningtias, "THE EFFECT OF USING LIME, SILICA FUME AND NANO-SILICA ON MORTAR MADE FROM SEA SAND AND SEAWATER," *International Journal of GEOMATE*, vol. 25, no. 108, pp. 172–182, (2023), doi: 10.21660/2023.108.3800.
- [22] American Standard Testing and Material, "ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars," (2008).
- [23] American Standard Testing and Material, "ASTM C192 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory," (2015).
- [24] American Standard Testing and Material, "ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," (2021).
- [25] P. Li, W. Li, T. Yu, F. Qu, and V. W. Y. Tam, "Investigation on early-age hydration, mechanical properties and microstructure of seawater sea sand cement mortar," *Constr Build Mater*, vol. 249, Jul. (2020), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118776.
- [26] F. Qu, W. Li, K. Wang, V. W. Y. Tam, and S. Zhang, "Effects of seawater and undesalted sea sand on the hydration products, mechanical properties and microstructures of cement mortar," *Constr Build Mater*, vol. 310, p. 125229, Dec. (2021), doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125229.
- [27] W. Qadir, K. Ghafor, and A. Mohammed, "Evaluation the effect of lime on the plastic and hardened properties of cement mortar and quantified using Vipulanandan model," *Open Engineering*, vol. 9, no. 1, pp. 468–480, Jan. (2019), doi: 10.1515/eng-2019-0055.
- [28] J. D. S. Jacob, A. G. Mascelani, R. L. R. Steinmetz, F. A. D. Costa, and O. A. Dalla Costa, "Use of silica fume and nano-silica in mortars attacked by acids present in pig manure," in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., (2018), pp. 44–51. doi: 10.1016/j.prostr.2018.11.007.
- [29] T. Oh, B. Chun, S. K. Lee, W. Lee, N. Banthia, and D. Y. Yoo, "Substitutive effect of nano-SiO₂ for silica fume in ultra-high-performance concrete on fiber pull-out behavior," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 1993–2007, Sep. (2022), doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.013.
- [30] I. S. Fuad, "Pengaruh Penambahan Superplasticizer dan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Mortar dengan FAS 0,3," *Jurnal Desiminasi Teknologi*, vol. 9, no. 2, pp. 92–165, 2021.
- [31] W. Lin, Y. Gao, W. Lin, Z. Zhuo, W. Wu, and X. Cheng, "Seawater-based bio-cementation of natural sea sand via microbially induced carbonate precipitation," *Environ Technol Innov*, vol. 29, Feb. (2023), doi: 10.1016/j.eti.2023.103010.
- [32] G. Zhang, G. F. Peng, X. Y. Zuo, X. J. Niu, and H. Ding, "Adding hydrated lime for improving microstructure and mechanical properties of mortar for ultra-high performance concrete," *Cem Concr Res*, vol. 167, May (2023), doi: 10.1016/j.cemconres.2023.107130.

-
- [33] Y. Yao, B. Wu, W. Zhang, Y. Fu, and X. Kong, "Experimental investigation on the impact properties and microstructure of recycled steel fiber and silica fume reinforced recycled aggregate concrete," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 18, p. e02213, Jul. (2023), doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02213.
- [34] T. Abou Rachied, F. Dbouk, B. Hamad, and J. J. Assaad, "Structural behavior of beams cast using normal and high strength concrete containing blends of ceramic waste powder and blast furnace slag," *Cleaner Materials*, vol. 7, Mar. (2023), doi: 10.1016/j.clema.2023.100179.
- [35] D. Ndahirwa, H. Zmamou, H. Lenormand, and N. Leblanc, "The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits: A review," *Cleaner Materials*, vol. 5. Elsevier Ltd, Sep. 01, (2022). doi: 10.1016/j.clema.2022.100123.