



Ketahanan Korosi Baja Tulangan dalam Beton menggunakan Palm Oil Fuel Ash (POFA) dan Air Laut

Amry Dasar^{1*}, Dahlia Patah¹, Sainuddin¹, Muhammad Akbar Caronge²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat, Majene

²Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Makassar

^{*)}amry.dasar@unsulbar.ac.id

Received: 9 Juni 2023 Revised: 12 Januari 2024 Accepted: 2 Februari 2024

Abstract

POFA (palm oil fuel ash) and seawater have the possible to be used in concrete as an effort to reduce construction costs and environmental waste problems. POFA contains pozzolanic properties such as those contained in cement so it has the possible to be used as a mineral in concrete mixtures. Therefore, the use of POFA and seawater in concrete mixtures have the potential to be implemented, but it is obligatory to pay awareness to the potential for corrosion that also follows. This study aims to evaluate the use of POFA up to 20% as a replacement for cement and the effect of mixing seawater on the strength and corrosion of reinforcing bar in concrete. The compressive strength of concrete was evaluated by carrying out a compressive test on a cylindrical specimen with 100 mm in diameter and 200 mm in height at 7 days and 28 days of age. Furthermore, a concrete cylinder specimen with a diameter of 10 mm reinforcement was used to evaluate the potential for corrosion. Measurement of corrosion estimation using the half-cell potential (HCP) method based on ASTM C876-15. Test results show the use of up to 10% POFA to replace cement by mixing seawater and treated with fresh water has a high strength that is almost the same as normal concrete. The risk of corrosion is also not detected and proven by actual measurements of corrosion. Furthermore, HCP values more negative than -400 mV are predicted to experience corrosion in the reinforcement area above 10%.

Keywords: Concrete, POFA, seawater, corrosion, half-cell potential (HCP), actual corrosion

Abstrak

POFA (Palm Oil Fuel Ash) atau abu cangkang kelapa sawit dan air laut memiliki potensi untuk digunakan dalam beton sebagai upaya pengurangan biaya konstruksi dan masalah limbah lingkungan. POFA mengandung sifat pozzolan seperti yang terkandung pada semen sehingga berpotensi digunakan sebagai mineral pada campuran beton. Oleh karena itu pemanfaatan POFA dan air laut pada campuran beton berpotensi dilakukan, namun perlu diperhatikan juga terkait potensi masalah korosinya. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penggunaan POFA hingga 20% sebagai pengganti semen dan pengaruh pencampuran air laut terhadap kekuatan dan korosi baja tulangan pada beton. Kuat tekan beton dievaluasi dengan melakukan uji tekan pada spesimen selinder dengan diameter dan tinggi masing-masing 100 mm dan 200 mm pada umur 7 hari dan 28 hari. Selanjutnya, benda uji selinder beton dengan diameter tulangan 10 mm digunakan dalam mengevaluasi potensi korosi. Pengukuran estimasi korosi menggunakan metode half-cell potential (HCP) berdasarkan ASTM C876-15. Hasil pengujian menunjukkan penggunaan hingga 10% POFA menggantikan semen dengan pencampuran air laut (AL) dan perawatan air tawar (AT) memiliki kekuatan tinggi yang hampir sama dengan beton normal. Resiko korosi juga tidak terdeteksi dan dibuktikan dengan pengukuran aktual korosi. Leboh lanjut, nilai HCP lebih negatif dari -400 mV diprediksi mengalami korosi pada area tulangan di atas 10%.

Kata kunci: Beton, POFA (palm oil fuel ash), air laut, korosi, half-cell potential (HCP), aktual korosi

Pendahuluan

Pesatnya perkembangan teknologi beton menuntut penggunaan material yang tahan lama dan ramah

lingkungan. Semen dan air tawar merupakan material bangunan utama dalam konstruksi, sehingga produksi beton menghabiskan beberapa miliar ton air tawar dan semen setiap tahunnya,

yang membatasi pertumbuhan sumber daya air tawar dan semen.

Kelapa sawit merupakan produk utama di negara-negara beriklim tropis dan Indonesia merupakan produsen utama, salah satunya di Mamuju Tengah, Sulawesi Barat. Setiap tahun jutaan ton produk sampingan berupa limbah dari pabrik kelapa sawit yang dikenal sebagai *palm oil fuel ash* (POFA) telah dibuang sehingga memberikan dampak negatif terhadap lingkungan. Beberapa limbah yang mengandung sifat pozzolan yang memungkinkan untuk digunakan sebagai campuran mineral dalam material beton seperti *fly ash*, POFA, dan abu sekam padi telah banyak dilakukan penelitian (Patah & Dasar, 2022; Patah *et al.*, 2020). POFA adalah limbah yang berasal dari industri pertanian dengan kandungan pozzolan yang cukup tinggi karena memiliki jumlah silika (SiO₂) yang signifikan dalam partikelnya (Aldahdooh *et al.*, 2013).

Beberapa hasil penelitian juga menemukan bahwa abu pozzolan yang terkandung dalam POFA dapat digunakan untuk menghasilkan beton (Awal & Hussin, 1997) dan beton ringan (Hussin dan Abdullah, 2009) yang memiliki kekuatan lebih tinggi dari beton normal. Selain itu dilakukan juga penelitian pemanfaatan POFA dalam beton terkait perilaku sifat beton yang mengandung POFA terhadap kinerja kuat tekan beton (Sata *et al.*, 2004) dan ketahanan terhadap sulfat serta susut beton (Tangchirapat *et al.*, 2009). Munir *et al.* (2015) menggunakan POFA dalam pembuatan beton ringan pada bangunan non-struktural. Rajak *et al.* (2015) melakukan penelitian untuk mengetahui karakteristik morfologi pasta semen yang mengeras yang mengandung Nano-POFA dengan ukuran partikel berkisar antara 20 nm dan 90 nm. Ditemukan bahwa partikel Nano-POFA memiliki pengaruh yang signifikan terhadap reaksi pozzolan dalam pasta semen karena efek pengisian. Oyejobi *et al.* (2015) melakukan eksperimen terkait pemanfaatan POFA sebagai pengganti sebagian semen. Paris *et al.* (2016) melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh POFA terhadap sifat fisik dan mekanik serta daya tahan pasta semen. Rosseli *et al.* (2021) melakukan eksperimen pemanfaatan limbah untuk beton yang menggabungkan POFA dan limbah plastik Polyethylene Terephthalate (PET) yang diolah. Mujah (2016) melakukan eksperimen untuk mengevaluasi kuat tekan dan durabilitas beton menggunakan POFA. Akan tetapi, sejauh ini masih terbatas penelitian terkait durabilitas pada beton yang diproduksi menggunakan POFA diekspos ke lingkungan air laut.

Industri beton menggunakan air tawar dalam jumlah besar setiap tahun untuk pencampuran, perawatan

dan pencucian. Penelitian tentang penggunaan air laut dalam beton banyak menarik perhatian para peneliti dimana air laut sebagai alternatif lain untuk air tawar untuk digunakan dalam beton. Akan tetapi, pengaruh air laut terhadap durabilitas pada beton bertulang masih menimbulkan pertanyaan. Klorida dalam air laut dapat menyebabkan reaksi korosi yang dipercepat. Hasil evaluasi pemanfaatan air laut sebagai campuran dalam pembuatan menunjukkan air laut memiliki efek positif pada kekuatan beton dan ketahanan terhadap korosi tulangan. Selain itu, kekuatan beton dan ketahanan terhadap korosi tulangan menggunakan air laut lebih baik daripada beton yang dicampur dengan air tawar (Dasar *et al.*, 2013; Dasar *et al.*, 2016; Dasar *et al.*, 2020). Penggunaan air laut sebagai air pencampur hanya dianjurkan untuk beton polos.

Penggunaan air laut sebagai campuran air untuk struktur beton bertulang harus dihindari karena risiko korosi dini baja tulangan akibat klorida pada kandungan air laut (JSCE 1986; JCI 2014). Menurut Otsuki (1985), benda uji yang terekspos selama 20 tahun yang diteliti oleh Port and Airport Research Institute (PARI) di Jepang memperlihatkan bahwa jumlah klorida yang diperiksa dalam beton tidak terdampak oleh air pencampuran dan dampak negatif air laut yang dipakai sebagai air pencampur relatif menurun pada umur lanjut beton. Mohammed *et al.* (2001) juga melaporkan bahwa spesimen yang berumur 15 tahun terekspos di daerah pasang surut air laut tidak mengalami degradasi kekuatan beton karena akselerasi reaksi hidrasi dengan hadirnya klorida dalam air laut. Selain itu, Patah *et al.* (2019) melaporkan pada balok beton bertulang yang berumur 36 tahun yang dicampur air laut memiliki kekuatan beton sebesar 10 MPa lebih kuat dari beton biasa yang dicampur dengan air tawar, dan memiliki perbandingan kuat tekan air laut terhadap air tawar adalah 1,2.

Jika pemanfaatan air laut sebagai air pencampuran dan perendaman dapat dioptimalkan, maka air laut akan mendorong efisiensi dan keekonomisan dalam mengerjakan konstruksi yang terletak pulau terpencil ataupun daerah terpencil. Lebih lanjut, pemanfaatan material daur ulang limbah hasil industri pertanian seperti kelapa sawit (POFA) yang dikombinasikan dengan air laut pada pembuatan beton berpotensi dalam meningkatkan durabilitas beton khususnya ketahanan terhadap korosi.

Penelitian ini menginvestigasi penggunaan POFA dan air laut dalam pencampuran beton guna mendorong peningkatan kuat tekan dan durabilitas beton jika dibandingkan dengan beton normal. Sebanyak dua belas spesimen telah dievaluasi. Faktor pokok dalam eksperimen ini yaitu variasi jumlah rasio penambahan POFA, tipe air

pencampuran dan perendaman (perawatan) pada beton. Tujuan utamanya adalah menginvestigasi efek dari air laut pada pencampuran, perendaman, dan variasi penambahan POFA sebagai pengganti sebagian semen yang digunakan secara bersamaan terhadap sifat mekanik dan korosi baja tulangan pada beton. Selain itu juga mengevaluasi efektifitas air laut sebagai air pencampuran dan POFA terhadap durabilitas beton setelah direndam atau dirawat pada air laut.

Metode

Penelitian ini dilakukan melalui pengujian di laboratorium yang terdiri dari uji kuat tekan beton dan kuat tarik belah beton, kemudian dengan menggunakan metode *half-cell potential* (HCP) pengujian elektrokimia dilakukan pada baja tulangan dan selanjutnya pengecekan aktual korosi pada permukaan baja tulangan. Air laut digunakan dalam pencampuran dan perawatan beton.

Pengujian potensi korosi pada baja tulangan dengan menggunakan metode HCP yang dilakukan pada umur 0 hingga 49 hari. Pengujian HCP dihentikan ketika beton telah terdeteksi korosi berdasarkan ASTM C876-15. Pada umur 7 dan 28 hari dilakukan pengujian kuat tekan beton, sementara pada umur 28 hari dilakukan pengujian kuat tarik belah beton. Lebih lanjut, pengecekan aktual korosi dengan cara ekstraksi baja tulangan dari beton dilakukan pada umur 50 hari.

Material

Portland Composite Cement (PCC) yang diproduksi secara nasional di Indonesia digunakan sebagai pengikat pada pembuatan benda uji. Penggunaan abu cangkang sawit POFA menjadi substitusi sebagian semen dengan persentase sebesar 0, 5, 10 dan 20 persen terhadap berat semen. POFA diperoleh dari pabrik kelapa sawit, Mamuju Tengah, Sulawesi Barat. Sebelum digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen, POFA diayak dan lolos saringan No.50. Hasil analisis kimia PCC dan POFA dapat dilihat pada Tabel 1.

Menurut ASTM-618, nilai $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ menunjukkan bahwa POFA ini masuk dalam klasifikasi tipe C (>50). Penampakan PCC dan POFA dapat dilihat pada Gambar 1. Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah/kerikil dengan ukuran maksimal 20 mm. Agregat halus yang digunakan adalah pasir sungai dengan ukuran maksimal 5 mm. Agregat kasar dan agregat halus ini berasal dari Sungai Mappili, Kabupaten Majene, Provinsi Sulawesi Barat. Batas klasifikasi untuk agregat kasar dan halus telah diuji dan sesuai dengan SNI 03-1968-1990 (Dasar dan Patah, 2021).

Penggunaan air tawar dan air laut adalah untuk pencampuran dan perawatan beton. Air laut diambil dari Pamboang, Majene. Karakteristik dan kandungan kimia pada air laut dapat dilihat pada Tabel 2 dan berat jenis masing-masing material disajikan pada Tabel 3.

Tabel 1. Kandungan Kimia PCC dan POFA

Kandungan kimia (%)	PCC	POFA
Silicon dioxide (SiO ₂)	20,5	54,32
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	5,5	-
Ferric oxide (Fe ₂ O ₃)	3,9	9,23
Calcium oxide (CaO)	62	15,27
Magnesium oxide (MgO)	0,89	-
Potassium oxide (K ₂ O)	-	14,13
Sulphur oxide (SO ₃)	2,8	-
Phosphorus oxide (P ₂ O ₂)	-	5,38



Gambar 1. POFA sebagai pengganti sebagian semen

Tabel 2. Karakteristik dan kandungan kimia air laut

Item	Nilai
Berat jenis, gr/cm ³	1,03
pH	7,3
Salinity, 0/00	30,2
Kandungan Kimia	
K, (mg/L)	243
Na, (mg/L)	19706
Ca, (mg/L)	226
Mg, (mg/L)	2738
CO ₃ , (mg/L)	3486
SO ₄ , (mg/L)	1676
Cl ⁻ , (mg/L)	16936

Tabel 3. Berat jenis material

Item	Berat jenis kg/m ³
Semen PCC	3,14
POFA	2,9
Air tawar	1
Air laut	1,03
Pasir	2,46
Kerikil	2,61

Desain dan pembuatan benda uji

Target kuat tekan pada campuran beton normal umur 28 hari adalah 25 MPa. Beton normal ini

merupakan beton kontrol yang diproduksi menggunakan semen 100% sebagai pengikat. Kemudian, campuran beton POFA sebagai pengganti semen diproduksi dengan komposisi 0%, 5%, 10%, dan 20% terhadap berat semen. Faktor air semen (FAS) yang digunakan adalah 40%. Semua agregat yaitu kerikil dan pasir dalam kondisi kering permukaan jenuh (SSD) sebelum digunakan agar rasio air terhadap pengikat tidak terpengaruh selama proses pencampuran. Proporsi campuran beton dan desain benda uji dapat dilihat pada Tabel 4 dan 5. Pencampuran dan perawatan air tawar diberi simbol FF; pencampuran air tawar dan perawatan air laut diberi simbol FS; pencampuran air laut dan perawatan air tawar diberi simbol SF; pencampuran dan perawatan air laut diberi simbol SS.

Tabel 4. Komposisi penyusun beton

Material	Kontrol		Beton POFA	
	kg/m ³		kg/m ³	
	0%	5%	10%	20%
PCC	580	551	522	464
POFA	-	29	58	116
Air	232	232	232	232
Pasir	559,36	559,36	559,36	559,36
Kerikil	830,35	830,35	830,35	830,35

Tabel 5. Desain benda uji

Mix ID	POFA (%)	Mixing	Curing	Uji tekan & belah	Uji korosi
POFA-FF	0	AT	AT	9	1
POFA-FF	5	AT	AT	9	1
POFA-FF	10	AT	AT	9	1
POFA-FF	20	AT	AT	9	1
POFA-FS	0	AT	AL	9	1
POFA-FS	5	AT	AL	9	1
POFA-FS	10	AT	AL	9	1
POFA-FS	20	AT	AL	9	1
POFA-SF	0	AL	AL	9	1
POFA-SF	5	AL	AL	9	1
POFA-SF	10	AL	AL	9	1
POFA-SF	20	AL	AL	9	1
POFA-SS	0	AL	AL	9	1
POFA-SS	5	AL	AL	9	1
POFA-SS	10	AL	AL	9	1
POFA-SS	20	AL	AL	9	1

Keterangan: AT= air tawar; AL = air laut

Total 144 benda uji dicetak dalam bentuk silinder ukuran D-100 mm dan T-200 mm, yaitu untuk benda uji tekan dan uji tarik belah. Benda uji korosi, silinder dibuat 16 dengan ukuran D-50 mm dan T-100 mm. Untuk masing-masing benda uji korosi, sebanyak satu buah baja tulangan dengan P10 ditanam di tengah selinder secara memanjang. Kabel sepanjang 50 mm terhubung ke baja tulangan sebagai penghubung arus pada pengukuran korosi. Selanjutnya dibalut plastik selama 20-24 jam untuk mengurangi terjadinya evaporasi, kemudian

dilakukan pelepasan cetakan (*demolding*). Perawatan benda uji dilakukan dengan merendam kedalam air tawar/air laut dengan suhu ruang laboratorium yang tidak dikontrol selama 7 dan 28 hari. Untuk benda uji korosi, setelah perawatan 28 hari, dirawat di udara dengan suhu ruang yang tidak terkontrol hingga baja pada benda uji terdeteksi korosi.

Metode Pengujian

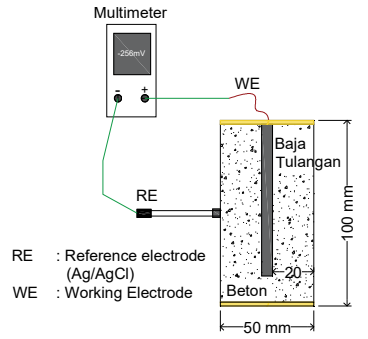
Uji kuat tekan dan uji tarik belah beton sesuai dengan SNI-1974-2011 dan SNI 03-2491-2002. Pengujian kuat tekan beton dilakukan pada umur 7 dan 28 hari sedangkan pengujian kuat tarik belah dilakukan pada umur 28 hari. Sebanyak tiga buah benda uji dirata-ratakan untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton dan kuat tarik belah beton. Pengujian korosi baja tulangan dengan metode *half-cell potential* (HCP) sesuai ASTM C876-15 dan prediksi korosi disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Prediksi korosi metode HCP

Elektroda mV		Resiko kemungkinan korosi
Cu/CuSO ₄	Ag/AgCl	
> -200	> -106	Rendah (10% resiko korosi)
-200 ke -350	-106 ke -256	Menengah (50% resiko korosi)
< -350	< -256	Tinggi (<90% resiko korosi)
< -500	< -406	Sangat tinggi (90% resiko korosi)

Metode HCP menggunakan alat *referensi elektroda* (RE) berbahan Ag/AgCl. Pengujian korosi dilakukan setiap 7 hari hingga benda uji terdeteksi korosi. Data HCP diambil dari rata-rata tiga kali pengambilan yang diukur dengan alat multimeter dan RE yang terhubung ke baja tulangan. Sebelum pengukuran terlebih dahulu dilakukan *pre-wetting* selama 30 menit menggunakan kain basah pada sisi permukaan beton. Hal ini dilakukan untuk mengurangi potensi fluktuasi nilai HCP. Detail pengukuran HCP dapat dilihat pada Gambar 2.

Visual pengecekan aktual korosi pada baja dilakukan dengan cara mengekstraksinya dari beton dengan melepas selimut betonnya (Gambar 3). Setelah baja tulangan diekstraksi, seluruh permukaan baja tulangan dibungkus secara melingkar menggunakan plastik bening transparan. Lalu dibuat sketsa gambar pada area korosi yang terdapat pada permukaan baja tulangan dengan menggunakan spidol hitam permanen. Luas area baja tulangan yang terkorosi dihitung dengan menggunakan bantuan *software* Image J v1.49.



Gambar 2. Detail pengukuran HCP



Gambar 3. Ekstraksi baja tulangan dari beton dan penggambaran korosi area

Hasil dan Pembahasan

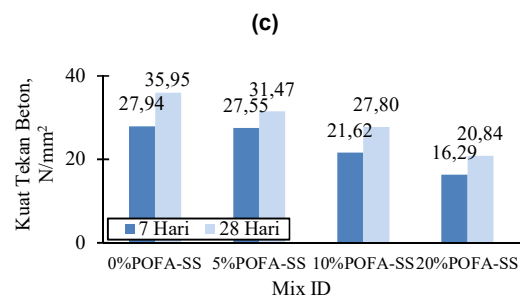
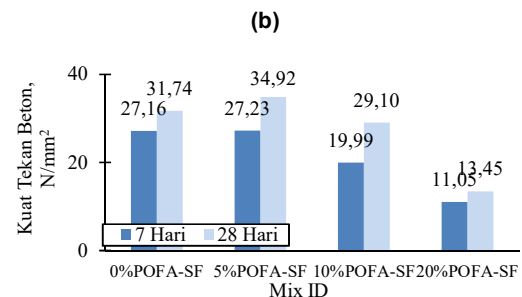
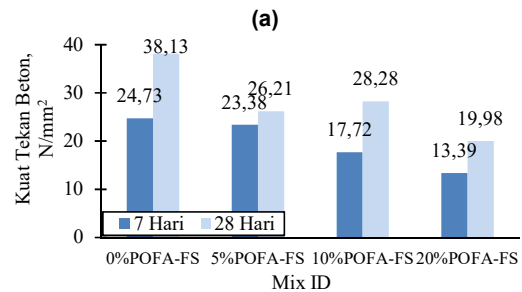
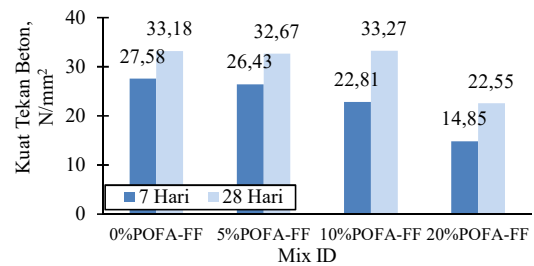
Kuat tekan dan kuat tarik belah beton

Gambar 4 menyajikan hasil uji kuat tekan beton pada umur 7 hari dan 28 hari. Berdasarkan Gambar 4a untuk benda uji dengan pencampuran dan perendaman air tawar (FF) didapatkan bahwa nilai kuat tekan diumur 28 hari dengan penggunaan 0%, 5%, 10% dan 20% POFA-FF berturut-turut sebesar 33,18 N/mm², 32,67 N/mm², 33,27 N/mm², dan 22,55 N/mm². Penggunaan 10%POFA-FF memiliki kuat tekan yang sama dengan beton normal dengan penggunaan 0%POFA-FF.

Nilai kuat tekan untuk benda uji dengan pencampuran air tawar dan perendaman air laut (FS) diumur 28 hari dengan penggunaan 0%, 5%, 10% dan 20% POFA berturut-turut sebesar 38,13 N/mm², 26,21 N/mm², 28,28 N/mm², dan 19,98 N/mm². Penggunaan perendaman dengan air laut pada 0%POFA-FS memiliki kuat tekan yang lebih besar 4,95 N/mm² terhadap beton normal dengan penggunaan 0%POFA-FF. Sedangkan penggunaan 20%POFA-FS memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibawah 25 N/mm² (Gambar 4b).

Benda uji dengan pencampuran air laut dan perendaman air tawar (SF), didapat nilai kuat tekan diumur 28 hari dengan penggunaan 0%, 5%, 10% dan 20% POFA-SF berturut-turut sebesar 31,74 N/mm², 34,92 N/mm², 29,10 N/mm², dan 13,45 N/mm² (Gambar 4c). Penggunaan pencampuran

dengan air laut pada 0%POFA-SF memiliki kuat tekan yang sedikit lebih rendah 1,44 N/mm² terhadap beton normal dengan penggunaan 0%POFA-FF. Penggunaan hingga 5%POFA menunjukkan kuat tekan relatif lebih tinggi dari beton normal 0%POFA-FF dan 0%POFA-SF. Penggunaan 20%POFA-SF memiliki kuat tekan lebih rendah di bawah 25 N/mm². Hasil pengujian kuat tekan umur 28 hari yang ditampilkan dalam Gambar 4d merupakan benda uji dengan pencampuran dan perendaman air laut (SS) dengan penggunaan 0%, 5%, 10% dan 20% POFA-SS berturut-turut sebesar 35,95 N/mm², 31,47 N/mm², 27,80 N/mm², dan 20,84 N/mm².



Gambar 4. Kuat tekan beton (a) benda uji FF, (b) benda uji FS, (c) benda uji SF, dan (d) benda uji SS

Penggunaan pencampuran dan perendaman dengan air laut pada 0%POFA-SS memiliki kuat tekan yang lebih tinggi 2,77 N/mm² terhadap beton normal dengan penggunaan 0%POFA-FF. Sedangkan penggunaan hingga 5%POFA memiliki kuat tekan sedikit lebih rendah dari beton normal 0%POFA-FF. Untuk penggunaan 20%POFA-SS memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibawah 25 N/mm².

Penggunaan POFA dan air laut secara bersamaan menyebabkan penurunan kuat tekan yang terjadi pada benda uji dengan kandungan POFA sebesar 10% dan 20%. POFA memiliki kandunga pozzolan seperti pada semen sehingga untuk mendukung proses hidrasi semen membutuhkan kadar air yang banyak, belum lagi evaporasi yang terjadi selama berlangsungnya proses hidrasi menjadi salah satu penyebab kurangnya kandungan air di dalam beton. Oleh karena itu, semakin banyak rasio penggantian POFA terhadap semen dapat mendorong rendahnya kuat tekan beton dikarenakan penyediaan air yang dibutuhkan dalam proses hidrasi semen dalam beton tidak cukup.

Kemungkinan pada umur lanjut, kuat tekan beton dengan kandungan POFA sebesar 10% dan 20% diprediksi akan meningkat dengan catatan terjaminnya kandungan air di dalam beton. Lebih lanjut, kalsium-silikat-hidrat tambahan (C-S-H), yang meningkatkan efisiensi pengikatan dan nilai kekuatan yang sesuai pada umur lanjut dari pengeringan terbentuk selama hidrasi semen. Hal ini karena silika dari POFA bereaksi dengan kalsium hidroksida yang dibebaskan sebagai produk sampingan.

Kekuatan diperoleh karena hidrasi terus menerus semen dan peningkatan reaksi pozzolanic (Ramasamy *et al.*, 2012). Hal ini ditunjukkan oleh 5%POFA-SF memiliki kuat tekan tertinggi. Besar kemungkinan kandungan POFA 5% dan kandungan air yang cukup menyebabkan tercapainya reaksi pozzolanic yang mendorong kuat tekan meningkat. Selanjutnya, kuat tekan beton menggunakan air laut baik sebagai pencampuran ataupun perawatan menunjukkan kuat tekan sedikit lebih rendah dari air tawar. Hal ini mengimplikasikan bahwa beton yang melalui pencampuran atau perawatan menggunakan air laut kemungkinan dapat menanggulangi proses hidrasi semen sehingga peningkatan kekuatan tekan beton memerlukan waktu. Terlebih lagi dengan adanya POFA yang bersifat pozzolan akan mempengaruhi hidrasi semen. Otsuki *et al.* (2011) mendapatkan hasil kuat tekan beton menggunakan air laut pada umur lanjut sedikit lebih baik dibandingkan pada beton yang menggunakan air tawar. Hal ini mengimplikasikan kombinasi POFA dan air laut diprediksi akan meningkatkan kuat tekan beton pada umur lanjut.

Kuat tarik belah beton

Tabel 7 menunjukkan hasil uji kuat tarik belah beton setelah perawatan 28 hari. Tampak bahwa nilai kuat tarik belah tertinggi didapat pada benda uji 0%POFA-FS yang dirawat dengan air laut dengan nilai 3,94 N/mm². Nilai kuat belah tertinggi kedua yaitu pada benda uji 0%POFA-SS yang dicampur dan dirawat dengan air laut dengan nilai 3,61 N/mm².

Apabila dibandingkan dengan beton normal 0%POFA-FF, kuat tarik belah benda uji 0%POFA-FS dan 0%POFA-SS lebih besar masing-masing sebesar 19% dan 9%. Untuk benda uji 0%POFA-SF memiliki kuat tarik belah yang sama dengan beton normal 0%POFA-FF. Sedangkan penggunaan 5%POFA-SF menunjukkan kuat tarik belah 6% lebih tinggi terhadap beton normal 0%POFA-FF.

Tabel 7. Kuat tarik belah beton

Mix ID	Kuat tarik belah N/mm ²	Normalised %	Rasio kuat tarik belah pada kuat tekan beton
0%POFA-FF	3,30	100	10,05
5%POFA-FF	3,20	97	10,21
10%POFA-FF	3,35	101	9,94
20%POFA-FF	2,60	79	8,69
0%POFA-FS	3,94	119	9,68
5%POFA-FS	3,01	91	8,70
10%POFA-FS	3,27	99	8,64
20%POFA-FS	2,83	86	7,07
0%POFA-SF	3,31	100	9,58
5%POFA-SF	3,51	106	9,94
10%POFA-SF	2,56	78	11,35
20%POFA-SF	2,18	66	6,17
0%POFA-SS	3,61	109	9,95
5%POFA-SS	3,19	97	9,86
10%POFA-SS	2,81	85	9,89
20%POFA-SS	2,45	74	8,49

Rasio kuat tarik belah terhadap kuat tekan beton juga dapat dilihat pada Tabel 7. Kemudian beton dengan menggunakan POFA dan air laut memiliki rasio antara 6.17–11,35%. Berdasarkan Kosmatka (2002) pada beton normal nilai rasio kuat tarik belah sebesar 8% hingga 12%. terhadap kuat tekan beton. Hanya benda uji 20%POFA-SF dan 20%POFA-FS yang memiliki rasio dibawah 8%. Hal ini mengimplikasikan bahwa kuat tarik belah sangat bergantung pada besarnya nilai kuat tekan beton. Besar kekuatan tekan beton sangat dipengaruhi oleh proses hidrasi semen. Semakin besar rasio penggantian semen dengan POFA mendorong penundaan hidrasi semen. Hal ini menunjukkan semakin tinggi level penggantian semen (*cement replacement level*), semakin banyak waktu yang dibutuhkan kekuatan tekan beton untuk meningkat.

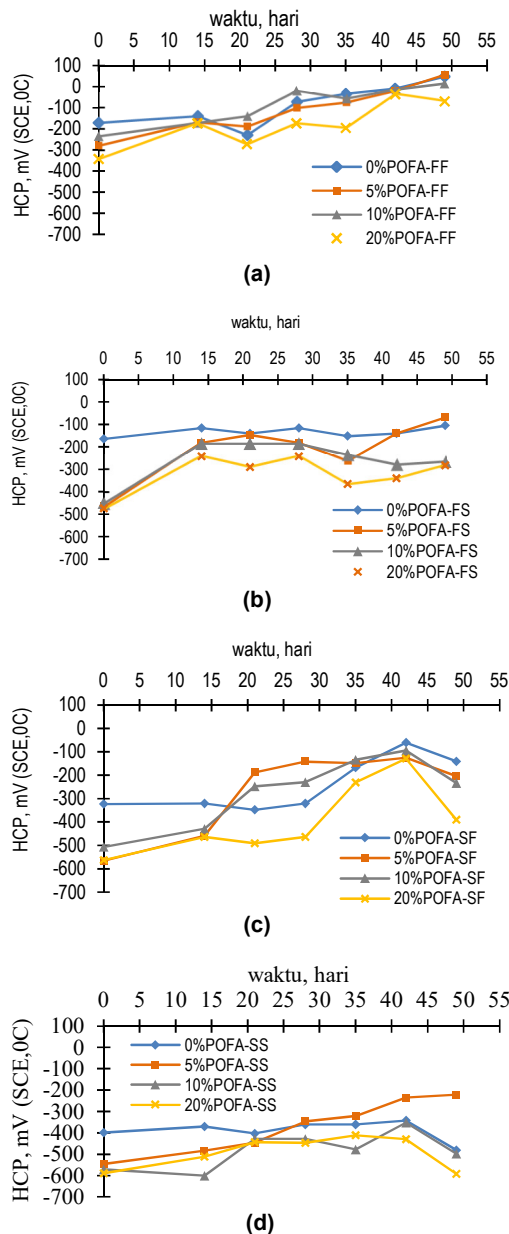
Half-cell potential (HCP)

Hasil pembacaan nilai *half-cell potential* (HCP) seiring bertambahnya waktu dari umur 0 hingga 49 hari untuk benda uji FF, FS, SF dan SS dapat dilihat pada Gambar 5. Nilai HCP untuk benda uji yang dicampur dan dirawat dengan air tawar sebagai yang ditunjukkan pada Gambar 5a (benda uji FF) menunjukkan bahwa pada umur 0 hari untuk 0%, 5%, 10, dan 20% POFA berturut-turut adalah -172 mV, -278mV, -235 mV dan -343mV.

Untuk benda uji yang dengan pencampuran air tawar dan perawatan air laut (FS, Gambar 5b) dapat dilihat bahwa nilai HCP pada umur 0 hari untuk 0%, 5%, 10, dan 20% POFA berturut-turut bernilai -164 mV, -463mV, -449 mV dan -474 mV. Pada benda uji dicampur air laut dan dirawat dengan air tawar (SF, Gambar 5c), nilai HCP pada umur 0 hari untuk 0%, 5%, 10, dan 20% POFA berturut-turut adalah -323 mV, -565 mV, -506 mV dan -563 mV. Sedangkan untuk benda uji dicampur dan dirawat dengan air laut SS, (Gambar 5d), nilai HCP pada umur 0 hari untuk 0%, 5%, 10, dan 20% POFA berturut-turut bernilai -398 mV, -545 mV, -571 mV dan -589 mV. Hanya benda uji 0%POFA-FF, 0%POFA-SF, dan 10%POFA-FF yang memiliki nilai HCP antara -100mV hingga -250 mV.

Sedangkan benda uji lainnya memiliki nilai HCP lebih negatif yaitu -250 hingga -600 mV. Menurut Dasar *et al.*, 2016 bahwa nilai HCP yang sangat negatif ini dipengaruhi oleh beton yang masih basah dan semen masih dalam proses hidrasi dan belum mengikat secara sempurna sehingga nilai HCP terbaca sangat tinggi, yang disebabkan oleh kemajuan hidrasi semen. Maka, antarmuka baja dan matriks semen yang mengeras, jauh lebih baik selama usia dini hingga umur enam bulan.

Nilai HCP pada semua benda uji perlahan-lahan menunjukkan peningkatan ke arah positif dengan bertambahnya waktu. Beberapa benda uji saat melewati proses hidrasi semen diumur 28 hari, nilai HCP mengalami pemulihan menjadi lebih positif hingga dikategorikan 90% tidak mengalami korosi pada umur 49 hari. Hal ini mengindikasikan matriks semen telah mengalami pengikatan sempurna. Nilai HCP pengukuran umur 49 hari dapat dilihat pada Tabel 8. Tampak bahwa, semua benda uji dengan pencampuran dan perawatan air tawar (FF) memiliki indikasi kemungkinan korosi rendah (10% resiko korosi). Namun, untuk benda uji yang dicampur air tawar dan dirawat dengan air laut (FS) pada 0% dan 5%POFA memiliki indikasi kemungkinan korosi rendah (10% potensi korosi). Sedangkan benda uji dengan 10 dan 20%POFA memiliki indikasi kemungkinan korosi tinggi (<90% resiko korosi).



Gambar 5. Perubahan terhadap waktu pada nilai HCP: (a) Benda uji FF, (b) Benda uji FS, (c) Benda uji SF, dan (d) Benda uji SS

Untuk spesimen dengan perendaman air laut dan perawatan air tawar (SF) pada 0%, 5% dan 10%POFA memiliki indikasi kemungkinan korosi menengah (50% resiko korosi), sedangkan benda uji dengan 20%POFA memiliki indikasi kemungkinan korosi tinggi (<90% resiko korosi). Untuk spesimen dengan pencampuran dan perawatan air laut (SS) hanya benda uji 5%POFA yang memiliki indikasi kemungkinan korosi menengah (50% resiko korosi), sedangkan benda uji 0%, 10% dan 20% memiliki indikasi korosi. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh dua faktor yang

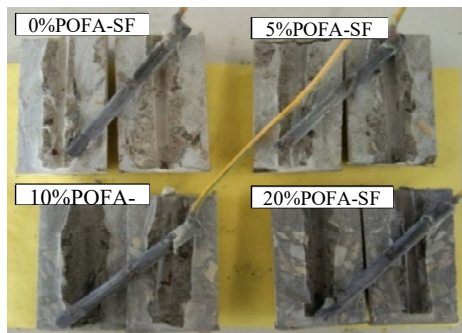
menyebabkan nilai potential sangat negatif pada umur-umur awal beton: 1) Ion klorida yang terkandung pada air laut menyerap air yang dibutuhkan untuk proses hidrasi semen 2) POFA yang bersifat pozzolan membutuhkan proses hidrasi semen yang panjang.

Tabel 8. Nilai HCP pada umur 49 hari

Mix ID	HCP mV	Indikasi Korosi
0%POFA-FF	46.58	Rendah
5%POFA-FF	55.76	Rendah
10%POFA-FF	14.06	Rendah
20%POFA-FF	-70.40	Rendah
0%POFA-FS	-105.70	Rendah
5%POFA-FS	-69.10	Rendah
10%POFA-FS	-267.00	Tinggi
20%POFA-FS	-282.70	Tinggi
0%POFA-SF	-140.50	Rendah
5%POFA-SF	-204.30	Menengah
10%POFA-SF	-234.00	Menengah
20%POFA-SF	-390.00	Tinggi
0%POFA-SS	-481.30	Sangat tinggi
5%POFA-SS	-221.20	Menengah
10%POFA-SS	-497.10	Sangat tinggi
20%POFA-SS	-592.20	Sangat tinggi

Aktual Korosi

Pemisahan baja tulangan dari beton dengan cara ekstraksi diilustrasikan pada Gambar 6. Baja tulangan yang telah diekstraksi dibersihkan untuk dapat dihitung area yang telah korosi. Hasil pengecekan aktual korosi berupa korosi area dilakukan pada umur 50 hari dapat dilihat pada Tabel 8. Benda uji yang dicampur dan dirawat air tawar (FF) didapatkan bahwa semua benda uji yaitu beton normal dan penggunaan hingga 20%POFA-FF tidak memiliki korosi.



Gambar 6. Pemisahan baja tulangan dari beton

Untuk benda uji dengan pencampuran air tawar dan perawatan air laut (FS) didapatkan bahwa hanya benda uji dengan 10% dan 20% POFA-FS yang terjadi korosi dengan persentase korosi area sebesar 2,67% dan 4,67%. Selanjutnya benda uji yang dicampur air laut dan dirawat air tawar (SF) didapatkan bahwa hanya benda uji dengan

20%POFA-SF yang mengalami korosi dengan nilai korosi area sebesar 8.23%. Pada benda uji yang dicampur dan dirawat air laut (SS) didapatkan bahwa hanya dengan 5%POFA-SS yang tidak terjadi korosi. Sedangkan benda uji 0%, 10% dan 20%POFA-SS telah terjadi korosi dengan nilai korosi area sebesar 11.96%, 12.20% dan 13.56%.

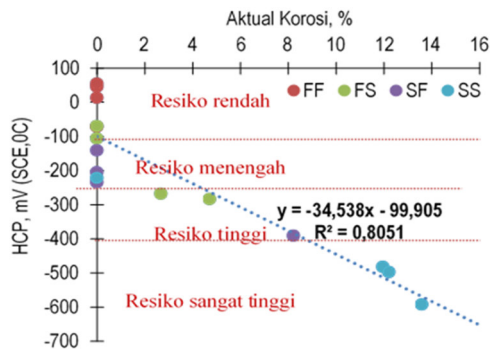
Tabel 9. Korosi Area

Mix ID	Korosi area %
0%POFA-FF	0,00
5%POFA-FF	0,00
10%POFA-FF	0,00
20%POFA-FF	0,00
0%POFA-FS	0,00
5%POFA-FS	0,00
10%POFA-FS	2,67
20%POFA-FS	4,67
0%POFA-SF	0,00
5%POFA-SF	0,00
10%POFA-SF	0,00
20%POFA-SF	8,23
0%POFA-SS	11,96
5%POFA-SS	0,00
10%POFA-SS	12,20
20%POFA-SS	13,56

Penggunaan 5%POFA pada beton memberikan pengaruh pada kuat tekan maupun durabilitas beton. Tingkat rasio penggantian semen terhadap POFA menjadi salah satu faktor penting pada beton, hal ini disebabkan karena kandungan pozzolannya dapat mempengaruhi proses hidrasi semen. Hidrasi semen merupakan faktor penting dalam meningkatkan kekuatan tekan dan durabilitas pada beton. Pozzolan adalah bahan silika dan alumina yang memiliki sedikit atau tidak ada nilai semen tetapi dalam bentuk yang terbagi halus dan dengan adanya uap air bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida yang dibebaskan selama hidrasi semen Portland untuk menghasilkan senyawa semen yang stabil dan tidak larut yang berkontribusi pada kekuatan dan durabilitas beton (Karim *et al.*, 2011).

Korelasi HCP dan aktual korosi

Korelasi antara nilai HCP dengan aktual korosi pada baja tulangan dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan Gambar 7, terdapat hubungan linear antara pengujian elektrokimia untuk mengukur resiko korosi tulangan baja dengan metode HCP dengan aktual korosi. Persamaan yang didapatkan dari hubungan HCP dengan aktual korosi ditunjukkan oleh Persamaan 1. Nilai y adalah korosi area dalam % dan x adalah nilai HCP dalam mV. Hubungan linear yang digambarkan berupa nilai R^2 menunjukkan angka hubungan linear sebesar 0.8051 (Persamaan 1).



Gambar 7. Korelasi nilai HCP dan korosi actual baja tulangan

Ini mengindikasikan bahwa pengukuran elektrokimia dengan metode HCP dapat digunakan dan dapat diandalkan dalam mendeteksi potensi resiko korosi baja tulangan yang tertanam didalam beton guna menghindari pemeriksaan langsung pada permukaan baja tulangan beton dengan cara pengupasan selimut beton yang termasuk pengujian metode merusak (*destructive test*).

$$y = -34.538x - 99.905 \quad (1)$$

Berdasarkan korelasi antara nilai HCP dan aktual korsi pada Gambar 7, jika nilai HCP sebesar <-406mV dengan resiko kemungkinan korosi sangat tinggi maka nilai actual korosi baja tulangan di prediksi telah melebihi 10%.

Kesimpulan

Hasil pengukuran dengan menggunakan metode elektrokimia untuk baja tulangan pada semua benda uji dengan penggunaan 5%POFA dengan pencampuran dan perawatan dengan air tawar maupun air laut meningkatkan durabilitas pada beton. Hal ini terkoneksi dengan hasil observasi pada aktual korosi, dimana semua benda uji tidak terdapat korosi berkorelasi kuat dengan hasil pengukuran elektrokimia dan menunjukkan hubungan linearitas yang baik antara aktual korosi dengan pembacaan nilai HCP. Penggunaan hingga 10%POFA menggantikan semen dengan pencampuran air laut dan dirawat dengan air tawar memiliki kekuatan yang tinggi yang hampir sama dengan beton normal dan resiko korosi juga tidak terdeteksi. Lebih lanjut, pembacaan nilai HCP lebih negatif dari -400 mV diprediksi mengalami aktual korosi dengan area permukaan baja tulangan yang korosi di atas 10%.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada pemberi dana penelitian yaitu DIPA Universitas Sulawesi Barat Tahun Anggaran 2023.

Daftar Pustaka

Awal, A. S. M., & Hussin, M. W. (1997, November). Some aspects of durability performances of concrete incorporating palm oil fuel ash. In *Proceedings Of Fifth International Conference On Structural Failure, Durability and Retrofitting, Singapore* (pp. 210-217).

Aldahdooh, M. A. A., Bunnori, N. M., & Johari, M. M. (2013). Development of green ultra-high performance fiber reinforced concrete containing ultrafine palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 48, 379-389. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.007>

Dasar, A., Hamada, H., Sagawa, Y., & Irmawaty, R. (2013). Corrosion evaluation of reinforcing bar in sea water mixed mortar by electrochemical method. *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 35(1), 889-894. https://data.jci-net.or.jp/data_pdf/35/035-01-1144.pdf

Dasar, A., Hamada, H., Sagawa, Y., & Yamamoto, D. (2016). Recovery In Mix Potential And Polarization Resistance Of Steel Bar In Cement Hardened Matrix During Early Age Of 6 Months-Sea-Water Mixed Mortar And Cracked Concrete. *Proceedings of the Japan Concrete Institute At: Fukuoka*, 38(1), 1203-1208. https://data.jci-net.or.jp/data_pdf/38/038-01-1196.pdf

Dasar, A., Patah, D., Hamada, H., Sagawa, Y., & Yamamoto, D. (2020). Applicability of seawater as a mixing and curing agent in 4-year-old concrete. *Construction and Building Materials*, 259, 119692. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119692>

Dasar, A., & Patah, D. (2021). Pasir dan Kerikil Sungai Mappili sebagai material Lokal untuk Campuran Beton di Sulawesi Barat. *Bandar: Journal Of Civil Engineering*, 3(2), 9-14. <https://doi.org/10.31605/bjce.v3i2.1207>

Hussin, M. W., & Abdullah, K. (2009). Properties of palm oil fuel ash cement based aerated concrete panel subjected to different curing regimes. *Malaysian Journal of Civil Engineering*, 21(1), 17-31. <http://civil.utm.my/mjce/vol21-no1-2009/>

Karim, R., Zain, M. F. M., Jamil, M., & Islam, N. (2011). Strength of concrete as influenced by palm oil fuel ash. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 5(5), 990-997. <http://ajbasweb.com/old/ajbas/2011/990-997.pdf>

Mohammed, T. U., Yamaji, T., Aoyama, T., & Hamada, H. (2001). Marine durability of 15-year

- old concrete specimens made with ordinary portland, slag, and fly ash cements. In *7th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete* (pp. 541-560). American Concrete Institute. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&ID=10533>
- Mujah, D. (2016). Compressive strength and chloride resistance of grout containing ground palm oil fuel ash. *Journal of cleaner production*, 112, 712-722. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.066>
- Munir, A. (2015). Utilization of palm oil fuel ash (POFA) in producing lightweight foamed concrete for non-structural building material. *Procedia Engineering*, 125, 739-746. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.119>
- Otsuki, N. (1985). A study of effectiveness of Chloride on Corrosion of Steel Bar in Concrete. *Report of Port and Harbor Research Institute*, 127-134.
- Otsuki, N., Furuya, D., Saito, T., & Tadokoro, Y. (2011, August). Possibility of sea water as mixing water in concrete. In *36th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore* (Vol. 36, pp. 131-138).
- Oyejobi, D. O., Abdulkadir, T. S., & Ahmed, A. T. (2015). A study of partial replacement of cement with palm oil fuel ash in concrete production. *Journal of Agricultural Technology*, 12(4), 619-631. [http://www.ijat-aatsea.com/pdf/v12_n4_16_July/6_IJAT_12\(4\)_2016%20-Oyejobi,%20D.%20O-POFA%20%20Agricultural%20Engineering%20x.pdf](http://www.ijat-aatsea.com/pdf/v12_n4_16_July/6_IJAT_12(4)_2016%20-Oyejobi,%20D.%20O-POFA%20%20Agricultural%20Engineering%20x.pdf)
- Paris, J. M., Roessler, J. G., Ferraro, C. C., DeFord, H. D., & Townsend, T. G. (2016). A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of cleaner production*, 121, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>
- Patah, D., & Dasar, A. (2022). Strength Performance of Concrete Using Rice Husk Ash (RHA) as Supplementary Cementitious Material (SCM). In *Journal of The Civil Engineering Forum* (pp. 261-276). <https://doi.org/10.22146/jcef.3488>
- Patah, D., Hamada, H., & Dasar, A. (2020, June). Effects of Mineral Admixtures on Pore Structure and Compressive Strength of Mortar Contaminated Chloride. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 875, No. 1, p. 012091). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/875/1/012091>
- Patah, D., Hamada, H., Sagawa, Y., & Yamamoto, D. (2019). The Effect of Seawater Mixing On Corrosion of Steel Bar in 36-Years Old RC Beams under Marine Tidal Environment. *At Hokaido, Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 41(1), 791-796.
- Rajak, M. A. A., Majid, Z. A., & Ismail, M. (2015). Morphological characteristics of hardened cement pastes incorporating nano-palm oil fuel ash. *Procedia Manufacturing*, 2, 512-518. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.088>
- Ramasamy, V. W. (2012). Compressive strength and durability properties of rice husk ash concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16, 93-102. <https://doi.org/10.1007/s12205-012-0779-2>
- Rosseli, S. R., Sidek, M. M., Hashim, N. H., Mohd, N. M., & Ali, N. M. (2021). The Role of POFA and Recycled Plastic in Enhancing Concrete Properties. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1144, No. 1, p. 012034). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1144/1/012034/pdf>
- Sata, V., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2004). Utilization of palm oil fuel ash in high-strength concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 16(6), 623-628. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2004\)16:6\(623\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:6(623))
- J S C E. (1986). *Standard Specification for Design and Construction of Concrete Structures, Part(Construction)*, Japan Society of Civil Engineering, Tokyo, Japan.
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., & Chindapasirt, P. (2009). Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2641-2646. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.008>
- J C I. (2014). *Technical Committee on the Use of Sea Water in Concrete*, Committee Report: JCI-TC121A, Japan Concrete Institute, Tokyo.