

Kekuatan dan Durabilitas Beton Menggunakan *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) dan Pasir Pantai

Amry Dasar*¹, Dahlia Patah²

^{1,2}Universitas Sulawesi Barat, Jalan Prof. Dr. Baharuddin Lopa, S.H, Talumung, Kabupaten Majene, Sulawesi Barat

e-mail: *amry.dasar@unsulbar.ac.id, dahliapatah@unsulbar.ac.id

Abstract

Palm Oil Fuel Ash (POFA) is one of the waste products from the agricultural industry. POFA contains pozzolanic ingredients so it has the potential to be mixed with Portland cement as partial replacement of cement (SCM). Therefore, POFA has the potential to be used to produce concrete that is durable and at the same time environmentally friendly concrete. The addition of POFA to Portland cement is expected to increase the formation of calcium silicate hydrate (C-S-H) gel. This can encourage increased strength and performance of concrete. Apart from that, environmental problems such as flooding due to river sand mining continue to occur. So the urgency of looking for alternative replacement materials is increasing. Sea sand is a sustainable natural resource so it has the potential to be used as an alternative material to replace river sand. Currently, research on the performance of concrete using POFA is still limited, especially using sea sand as fine aggregate. Therefore, this research was conducted to evaluate the mechanical properties and durability of concrete using POFA and sea sand. In this research, tests were carried out such as compressive strength, water absorption and porosity tests, rapid chloride ion penetration test (RCPT) and chloride penetration depth. Test results show that the compressive strength of concrete using POFA and sea sand is lower than normal concrete. Furthermore, the HCP results show the potential for corrosion of reinforcing steel in concrete using POFA and sea sand in a passive state similar with normal concrete.

Keywords: POFA, sea sand, half-cell potential, RCPT, corrosion, reinforced concrete

Abstrak

Abu cangkang sawit atau yang dikenal Palm Oil Fuel Ash (POFA) merupakan salah satu limbah dari hasil industri pertanian. POFA mengandung bahan yang bersifat pozzolan sehingga berpotensi dicampur dengan semen Portland sebagai bahan pengganti semen (SCM). Oleh karena itu POFA berpotensi digunakan untuk menghasilkan beton yang memiliki durabilitas dan sekaligus beton yang ramah lingkungan. Penambahan POFA pada semen Portland diharapkan dapat meningkatkan pembentukan gel kalsium silikat hidrat (CSH). Hal ini dapat mendorong meningkatnya kekuatan dan kinerja beton. Selain itu, permasalahan lingkungan seperti banjir dikarenakan penambangan pasir sungai terus terjadi. Sehingga urgensi mencari alternatif material pengganti semakin meningkat. Pasir laut merupakan salah satu SDA yang berkelanjutan sehingga berpotensi digunakan sebagai material alternatif pengganti pasir sungai. Saat ini penelitian mengenai kinerja beton menggunakan POFA masih terbatas, khususnya juga dengan menggunakan 100% pasir laut sebagai agregat halus. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik dan durabilitas dari beton yang menggunakan POFA dan pasir laut. Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian seperti uji kuat tekan, penyerapan air dan porositas, rapid chloride ion penetration test (RCPT) dan kedalaman penetrasi klorida. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan beton menggunakan POFA dan pasir laut lebih rendah dibandingkan beton normal sebesar masing-masing 27.40% untuk

penggunaan POFA 10%, 14.75% untuk penggunaan POFA 20%, dan 40.64% untuk penggunaan POFA 30%. Lebih lanjut, hasil HCP menunjukkan potensi korosi baja tulangan pada beton yang menggunakan POFA dan pasir laut dalam keadaan pasif seperti pada beton normal dengan potensi negatif yang lebih kecil dari 275 mV.

Kata kunci: POFA, pasir laut, half-cell potential, RCPT, korosi beton bertulang

1. Pendahuluan

Industri kelapa sawit merupakan salah satu agroindustri terpenting di Indonesia. Kementerian Pertanian pada tahun 2021 melaporkan luas perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai sekitar 15,08 juta hektar. Akan tetapi hasil agroindustri ini menghasilkan limbah yang disebut Palm Oil Fuel Ash. *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) adalah salah satu bahan berupa limbah padat yang dihasilkan sebagai produk sampingan dari industri kelapa sawit (Hamada, et al., 2021) (Hamada, et al., 2018) (Thomas, et al., 2017), yang diperoleh dengan membakar bahan limbah seperti serat kelapa sawit, kernel, tandan buah kosong, dan cangkang di pembangkit listrik untuk menghasilkan energi (Khankhaje, et al., 2016). Jumlah POFA yang diproduksi semakin meningkat seiring dengan meningkatnya produksi minyak sawit. Membiarkan limbah padat ini tanpa pemanfaatan lebih lanjut akan menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Namun, disisi lain POFA berpotensi dimanfaatkan untuk menggantikan sebagian semen dalam produksi beton karena memiliki sifat pozzolan seperti pada semen (Rajak, et al., 2015) (Al-mulali, et al., 2015) (Alsubari, et al., 2016) (Al-Jabri & Shoukry, 2014) (Lim, et al., 2015) (Thomas, et al., 2017). Selain itu, permasalahan limbah POFA, masalah lingkungan seperti pengikisan dan degradasi SDA pasir sungai semakin meningkat. Ekstraksi pasir sungai sebagai penggunaan agregat halus berdampak negatif terhadap ekosistem sungai, navigasi dan pengendalian banjir (Xiao, et al., 2017). Pasir laut berpotensi menjadi alternatif material pengganti pasir sungai dalam pencampuran beton. Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan terkait pemanfaatan pasir laut (Ge, et al., 2023) (Su, et al., 2019) (Guo, et al., 2020) (Etzeberria, et al., 2016) (Han, et al., 2021) (Goyal & Karade, 2020) (Patah, et al., 2019) (Dasar, et al., 2020). Patah dkk (2019) menemukan mutu beton yang menggunakan pasir laut dengan pencampuran air laut menunjukkan 10 MPa lebih besar dari beton normal yang berumur 36 tahun (Patah, et al., 2019).

Dalam dekade terakhir durabilitas beton bertulang khususnya ketahanan terhadap korosi menarik perhatian para peneliti. Terlebih lagi dorongan pemanfaatan material alternatif seperti pasir laut yang diduga dapat menjadi pemicu korosi. Dasar dkk (2016) dengan menggunakan metode half-cell potential mengevaluasi ketahanan korosi beton dengan air laut (Dasar, et al., 2016). Selain itu, Dasar dkk (2020) juga melakukan uji ketahanan korosi pada beton pasir laut dan air laut hingga umur 4 tahun (Dasar, et al., 2020). Patah dkk (2022) juga telah meneliti durabilitas beton terhadap ketahanan korosi dengan menggunakan batu gamping dan pasir laut juga teliti oleh (Patah, et al., 2022). Selain itu pemanfaatan pasir laut, peneliti juga mulai banyak menggunakan limbah untuk digunakan sebagai SCM atau pengganti semen, salah satunya adalah pemanfaatan POFA. POFA yang bersifat pozzolan berpotensi meningkatkan kinerja beton terhadap korosi. Pada penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja beton terhadap ketahanan korosi dengan pemanfaatan pasir laut dan POFA sebagai pengganti semen. Untuk mengevaluasi kinerja beton dengan pasir laut dan POFA dilakukan uji tekan beton, serapan air dan porositas, rapid chloride penetartion test dan kedalaman penetrasi klorida. Dari hasil penelitian didapatkan untuk kuat tekan beton menggunakan pasir laut dan POFA masih berada dibawah beton normal. Sementara dari hasil uji ketahanan korosi memperlihatkan durabilitas beton menggunakan POFA dan pasir laut berdasarkan *half-cell potential* (HCP) menunjukkan kondisi tulangan dalam keadaan pasif.

2. Metode Penelitian

2.1 Material

Semen Portland Komposit (PCC) Tipe 1 digunakan sesuai standar SNI 15-7064-2004. *Palm Oil Fuel Ash* (POFA) digunakan sebagai pengganti parsial dari PCC dengan rasio sebesar 0%, 10%, 20% dan 30% terhadap berat semen. POFA berasal dari limbah pabrik kelapa sawit PT Lestari II Mamuju Tengah. POFA yang diperoleh dalam kondisi kering memiliki reaksi pozzolan rendah karena ukuran partikel besar dan porositas tinggi; oleh karena itu, POFA disaring lolos No.100 sebelum digunakan untuk meningkatkan reaktivitasnya. Sifat fisik PCC dan POFA ditunjukkan pada Tabel 1. Seperti terlihat pada Tabel 1, Menurut ASTM-618, nilai $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ menunjukkan bahwa POFA ini masuk dalam klasifikasi tipe C (>50). Penampakan PCC dan POFA dapat dilihat pada Gambar 1.

Agregat halus yang digunakan adalah pasir pantai berasal dari Pantai Pamboan sebagai pengganti 100% pasir sungai. Ukuran maksimum dari pasir pantai yang digunakan adalah 4.75 mm. Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah/kerikil dengan ukuran maksimal 20 mm yang berasal dari Sungai Anato. Batas klasifikasi untuk agregat kasar dan agregat halus telah diuji dan sesuai dengan SNI 03-1968-1990 (Dasar & Patah, 2021). Semua agregat yaitu kerikil dan pasir pantai dicuci terlebih dahulu. Kerikil dan pasir pantai dalam kondisi kering permukaan jenuh (SSD) sebelum digunakan agar rasio air terhadap pengikat tidak terpengaruh selama proses pencampuran.

Air yang digunakan adalah air tawar yang berasal dari sumur bor Laboratorium Terpadu Unsulbar. Berat jenis masing-masing material dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi kimia PCC dan POFA

Sampel	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	SO_3	P_2O_5
PCC	20.5	5.5	3.9	62	0.89	-	2.8	-
POFA	54.32	-	9.23	15.27	-	14.13	-	5.38

Sumber: Hasil pengujian laboratorium (2023)



Gambar 1. Penampakan PCC dan POFA.

Tabel 2. Berat jenis material

Sampel	Berat jenis, g/cm^3
Type I Portland cement	3.16
POFA	2.84
Pasir pantai	2.22
Kerikil	3.33
Air tawar	1.0

2.2 Proporsi campuran beton

Beton dirancang memiliki kandungan pengikat (semen) sebesar 510 kg/m³, sesuai dengan rasio faktor air semen (FAS) sebesar 50%. Proporsi campuran beton normal/kontrol (POFA0-SS) dan beton yang mengandung POFA (POFA10%-SS, POFA20%-SS, dan POFA30%-SS) dirangkum dalam Tabel 3. Kuat tekan beton kontrol POFA0-SS dirancang sebesar 21MPa pada umur 28 hari. Penggantian parsial semen dengan POFA dalam campuran beton yaitu sebesar 10, 20, dan 30% terhadap total berat semen. Pengaruh variasi POFA terhadap kekuatan dan korosi baja tulangan beton diselidiki dan dibandingkan dengan beton kontrol. Total benda uji sebanyak 72 benda uji dengan masing-masing 24 benda uji (selinder 100x200mm) untuk pengujian tekan beton, 24 benda uji (selinder 100x200mm) untuk pengujian serapan air dan porositas, 8 benda uji (selinder 50x100mm) untuk HCP, 8 benda uji (selinder 100x50mm) untuk RCPT dan 8 benda uji (selinder 100x50mm) untuk pengujian kedalaman ion klorida (Tabel 4).

Tabel 3. Proporsi campuran jenis beton

Sampel	POFA	Mix proportion (kg/m ³)				
		POFA	PCC	Pasir Pantai	Kerikil	Air
POFA0%-SS	0%	0	510	584	1069	255
POFA10%-SS	10%	51	459	584	1069	255
POFA20%-SS	20%	102	408	584	1069	255
POFA30%-SS	30%	153	357	584	1069	255

Tabel 4. Jumlah benda uji

Sampel	Kuat tekan	Penyerapan air dan porositas	HCP	RCPT	Kedalaman ion klorida
POFA0%-SS	6	6	2	2	2
POFA10%-SS	6	6	2	2	2
POFA20%-SS	6	6	2	2	2
POFA30%-SS	6	6	2	2	2
Total	24	24	8	8	8

2.3 Metode Pengujian

2.3.1 Kuat tekan beton

Benda uji berbentuk silinder 100 x 200mm digunakan untuk pengujian kuat tekan. Untuk menyiapkan benda uji beton, cetakan berbentuk silinder diisi dengan beton segar sebanyak tiga lapis sama banyak, dan setiap lapisan ditusuk sebanyak 25 kali dengan menggunakan tongkat besi standar. Setelah pengecoran, benda uji dibiarkan mengeras selama 24 jam sebelum dikeluarkan dari cetakan dan dirawat dalam air tawar. Kuat tekan beton diuji menggunakan *Compression Machine* berkapasitas 3000 kN pada umur 28 dan 91 hari sesuai ASTM C39. Pada setiap umur pengujian digunakan tiga sampel untuk memperoleh nilai rata-rata.

2.3.2 Penyerapan air dan porositas efektif

Pengujian penyerapan air dan porositas dilakukan sesuai standar ASTM C642-97. Untuk menentukan penyerapan air dan porositas efektif, benda uji selinder 100 x 50 mm disiapkan. Benda uji dirawat selama 28 hari dan 91 hari dalam air suling. Setelah masa perawatan selesai, benda uji dioven dengan suhu 105°C ±5°C selama 48 jam untuk menguapkan kadar air yang terdapat pada beton. Penyerapan air dan porositas efektif dihitung berdasarkan masing-masing Persamaan (1) dan (2)

$$\text{Penyerapan air} = \frac{B-A}{A} \quad (1)$$

$$\text{Porositas} = \frac{B-A}{V} \quad (2)$$

dimana,

A = Massa sampel yang dikeringkan dalam oven di udara kecepatan (gr),

B = massa jenuh permukaan sampel kering di udara setelah perendaman jarak (gr),

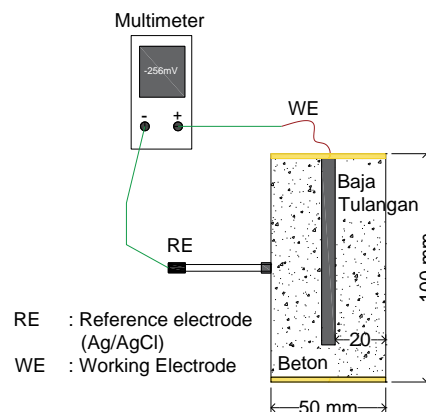
V = volume massal sampel (mm³).

2.3.3 Half-cell Potential (HCP)

Sebanyak satu tulangan diameter 10 mm ditanam dalam benda uji HCP berbentuk selinder 50 x 100 mm. Selama casting, tulangan dibersihkan sebelum ditanam dalam beton. Setelah pengecoran, benda uji dirawat dalam air tawar selama 28 hari. Setelah 28 hari perawatan, selinder dikeluarkan dan dirawat udara dalam ruang laboratorium tidak terkontrol. Pengukuran HCP diukur setiap pekan sejak benda uji berumur 1 hari dengan menggunakan alat referensi elektroda (RE) berbahan Ag/AgCl secara berkala dengan waktu sesuai ASTM C876. Nilai HCP akan diplot terhadap waktu. Prediksi kemungkinan korosi berdasarkan nilai HCP dapat dilihat pada Tabel 5. Skema pengujian HCP dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 5. Prediksi kemungkinan korosi

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



Gambar 2. Skema pengujian HCP.

2.3.4 Rapid chloride ion penetration test (RCPT)

Pada umur 28 dan 90 hari, benda uji selinder 100 mm x 50 mm dipotong dari silinder beton berukuran 100 x 200 mm, dilapisi dengan resin epoksi pada sisi melingkar, dan dilakukan pengujian RCPT sesuai dengan ASTM C1202 (Tabel 6). Metode pengujian ini mencakup penentuan konduktansi listrik beton untuk memberikan indikasi cepat ketahanannya terhadap penetrasi ion klorida. Pengaturan alat uji RCPT ditunjukkan pada Gambar 3. Dua bagian benda uji ditutup dengan wadah plastik berdiameter 100 mm. Satu sisi wadah diisi dengan larutan NaCl 3% (sisi sel tersebut akan

dihubungkan ke terminal negatif catu daya), sisi lainnya diisi dengan larutan NaOH 0.3 N (yang akan dihubungkan ke terminal positif catu daya). Arus diukur setiap 30 menit hingga 6 jam. Kontaminasi klorida setiap 30 menit juga diukur. Dari hasil menggunakan arus dan waktu, penetrasi ion klorida dihitung dalam satuan Coulomb di akhir 6 jam menggunakan Persamaan (3). Sebanyak dua benda uji diukur setiap variasi dan nilai penetrasi ion klorida rata-rata dicatat.

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2)$$

Dimana,

Q = Muatan listrik (coulomb)

L_0 = arus (ampere) sesaat setelah tegangan dinyalakan

L_t = arus (ampere) pada t menit setelah tegangan dinyalakan



Gambar 3. Uji pemasangan untuk indikasi kelistrikan kemampuan beton dalam menahan penetrasi ion klorida.

Tabel 6. Tingkatan RCPT

Nilai charge passed (Coulomb)	Kriteria penetrasi ion klorida
>4000	Tinggi
4000-2001	Sedang
2000-1001	Rendah
1000-100	Sangat rendah
<100	diabaikan

2.3.5 Kedalaman penetrasi klorida

Pengujian penetrasi klorida dianalisis menggunakan metode analisis colorimetric AgNO_3 (Fu, et al., 2022). Pada umur 28 dan 90 hari dibelah dan disemprot larutan AgNO_3 0.1 mol/L untuk selanjutnya diukur kedalaman penetrasi klorida berdasarkan analisis colorimetric AgNO_3 . Sebanyak 10 titik diukur menggunakan caliper kemudian diambil rata-ratanya (Gambar 4).



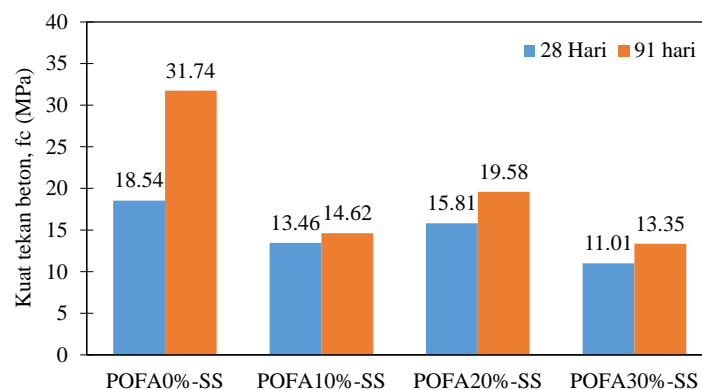
Gambar 4. Pengukuran kedalaman penetrasi klorida.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Kuat Tekan

Gambar 5 menunjukkan kuat tekan benda uji setelah perawatan 28 dan 91 hari. Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa kuat tekan meningkat seiring dengan seiring bertambahnya usia. Nilai ini berlaku untuk semua variasi benda uji.

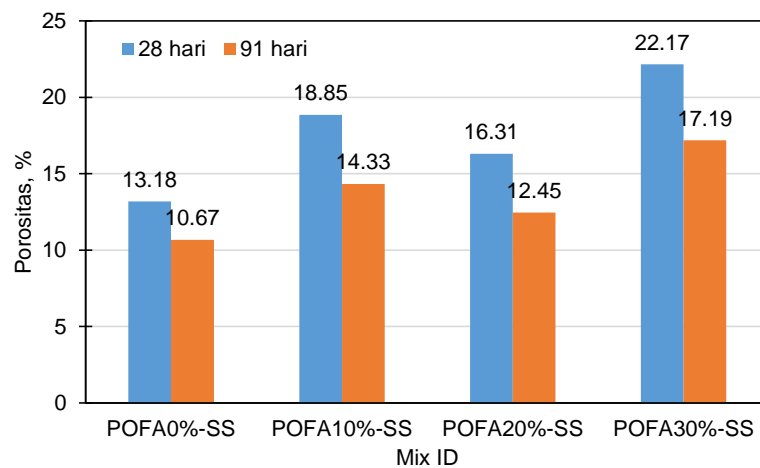
Nilai kuat tekan benda uji POFA0%-SS, POFA10%-SS, POFA20%-SS dan POFA30%-SS pada umur 28 hari masing-masing sebesar 18.54 MPa, 13.46 MPa, 15.81 MPa, dan 11.01 MPa. Penggunaan POFA ini menurunkan kuat tekan beton dengan masing-masing penurunan sebesar 27.40%, 14.75%, dan 40.64% terhadap beton kontrol. Namun terlihat, POFA20%-SS memiliki kuat tekan yang paling tinggi dibandingkan POFA10%-SS dan POFA30%-SS. Hal yang sama dilaporkan oleh Muthusamy dan Zamri (2016) bahwa POFA 20% sebagai pengganti semen merupakan rasio optimum kuat tekan beton pada umur 28 hari (Muthusamy & Zamri, 2016). Sedangkan nilai kuat tekan benda uji POFA0%-SS, POFA10%-SS, POFA20%-SS dan POFA30%-SS pada umur 91 hari masing-masing sebesar 31.74 MPa, 14.62 MPa, 19.58 MPa, dan 13.35 MPa. Penggunaan POFA ini menurunkan kuat tekan beton masing-masing penurunan sebesar 53.93%, 38.32% dan 57.93% terhadap beton kontrol. Menurunnya kuat tekan beton yang mengandung POFA tanpa penggilingan atau penghalusan dalam jumlah lebih besar disebabkan oleh ukuran partikel POFA yang besar dan porositas yang tinggi. Partikel POFA berpori meningkatkan rasio FAS dalam beton karena penyerapan air, sehingga menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah (Jaturapitakul, et al., 2007) (Tangchirapat, et al., 2007).



Gambar 5. Kuat tekan beton umur 28 hari dan 91 hari.

3.2 Porositas efektif

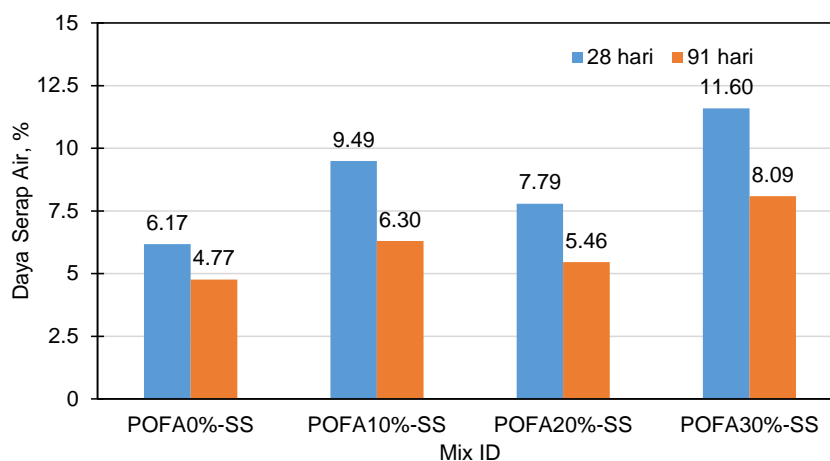
Gambar 6 menunjukkan nilai porositas PCC dan perbedaan persentase POFA pengganti sebagian semen setelah perawatan 28 hari dan 91 hari. Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa nilai porositas semakin menurun seiring dengan bertambahnya usia dan semakin meningkat dengan penggunaan POFA sebagai pengganti sebagian semen. Nilai porositas efektif benda uji POFA0%-SS, POFA10%-SS, POFA20%-SS dan POFA30%-SS pada umur 28 hari masing-masing sebesar 13.18%, 18.85%, 16.31% dan 22.17%. Sedangkan nilai porositas efektif benda uji POFA0%-SS, POFA10%-SS, POFA20%-SS dan POFA30%-SS pada umur 91 hari masing-masing sebesar 10.67%, 14.33%, 12.45% dan 17.19%. Ukuran partikel POFA yang lebih halus dapat diperoleh pada ball mill melalui proses penggilingan. Porositas POFA juga dapat dikurangi dengan memperkecil ukuran partikel melalui proses penggilingan (Paya, et al., 1996). Selain itu, Tangchirapat dkk (2007) menunjukkan bahwa proses penggilingan partikel POFA menghasilkan partikel yang lebih kecil dengan porositas yang lebih sedikit. (Tangchirapat, et al., 2007).



Gambar 6. Porositas efektif umur 28 hari dan 91 hari.

3.3 Penyerapan air

Gambar 7 menunjukkan penyerapan air PCC dan perbedaan persentase POFA pengganti sebagian semen setelah perawatan 28 hari dan 91 hari. Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa penyerapan air semakin menurun seiring dengan bertambahnya usia dan semakin meningkat dengan penggunaan POFA sebagai pengganti sebagian semen. Nilai penyerapan air benda uji POFA0%-SS, POFA10%-SS, POFA20%-SS dan POFA30%-SS pada umur 28 hari masing-masing sebesar 6.17%, 9.49%, 7.79%, dan 11.60%. Sedangkan penyerapan benda uji POFA0%-SS, POFA10%-SS, POFA20%-SS dan POFA30%-SS pada umur 91 hari masing-masing sebesar 4.77%, 6.30%, 5.46% dan 8.09%. Ukuran partikel POFA yang tanpa melalui proses penggilingan cukup besar sehingga mempengaruhi besar penyerapan. Oleh karena itu, proses penggilingan POFA diperlukan untuk menghasilkan ukuran partikel mikro yang meningkatkan ketahanan beton dan mengurangi penyerapan air (Tangchirapat & Jaturapitakkul, 2010).

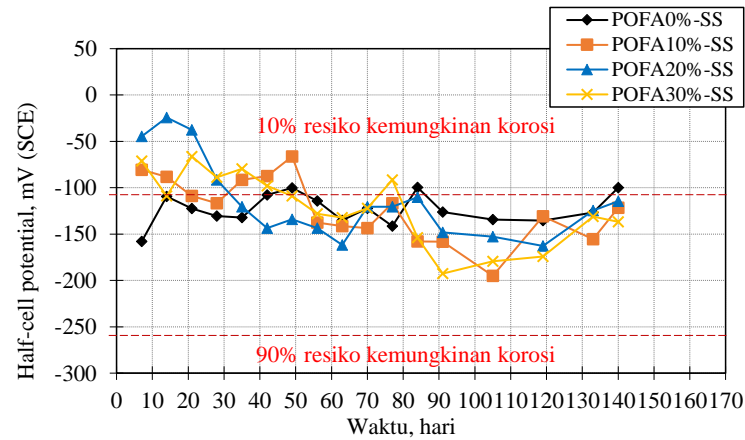


Gambar 7. Penyerapan air umur 28 hari dan 91 hari

3.4 HCP (*Half-Cell Potential*)

Potensi baja tertanam diukur secara berkala terhadap elektroda kalomel jenuh (SCE) dengan waktu untuk tingkat penggantian POFA yang berbeda ditunjukkan pada Gambar. 8. Sesuai sistem ASTM C876-97 yang menunjukkan nilai HCP kurang dari 256 mV vs. SCE dianggap dalam kondisi pasif.

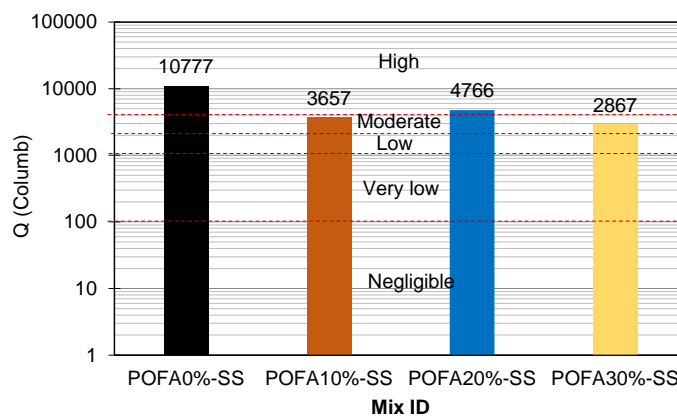
Dari gambar tersebut terlihat bahwa seluruh benda uji baik beton kontrol dan beton menggunakan POFA menunjukkan potensi negatif yang lebih kecil dari 275 mV bahkan hingga pemaparan hingga 140 hari masih menunjukkan kondisi tulangan yang pasif.



Gambar 7. Penyerapan air umur 28 hari dan 91 hari

3.5 Rapid chloride ion penetration test

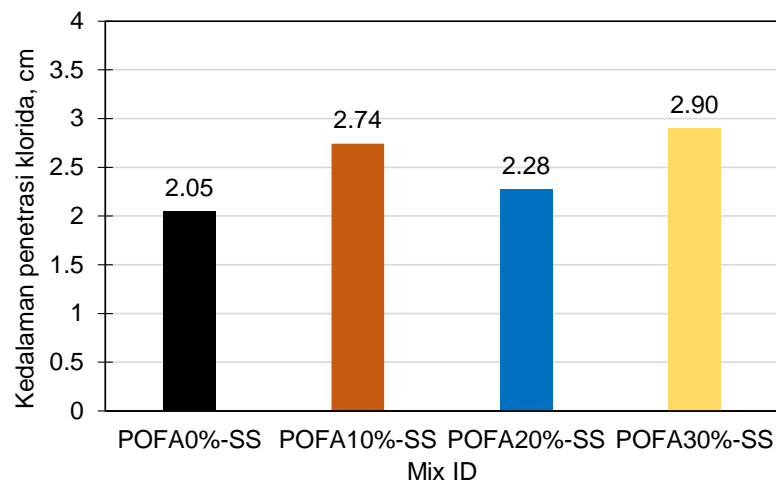
Gambar 8 menunjukkan hasil RCPT semua variasi benda uji setelah perawatan 91 hari. Berdasarkan Gambar 8, diketahui bahwa dengan bertambahnya persentasi penggantian POFA, muatan yang dilewatkan semakin berkurang. Penggantian POFA menurunkan nilai Coulomb secara drastis. Nilai Coulomb benda uji POFA0%-SS, POFA10%-SS, POFA20%-SS dan POFA30%-SS pada umur 91 hari masing-masing sebesar 10777 Coulomb, 3657 Coulomb, 4766 Coulomb, dan 2867 Coulomb. Nilai penetrasi klorida pada benda uji POFA20%-SS masuk kategori muatan yang tinggi yang sama dengan beton kontrol (POFA0%-SS) yaitu nilai Coulomb > 4000. Sedangkan benda uji POFA20%-SS dan POFA20%-SS masuk kategori muatan sedang yaitu nilai Coulomb berada diantara 4000-2001. Hal serupa juga dilaporkan oleh Johari dkk., 2012 bahwa uji penetrasi klorida cepat (RCPT) pada beton yang mengandung 20%, 40% dan 60% uPOFA sebagai pengganti semen. Muatan yang lolos berkurang dengan meningkatnya jumlah POFA dan penurunannya sebesar 84% dibandingkan dengan campuran kontrol, ketika jumlah POFA adalah 60% (Johari, et al., 2012). Selain itu, Bamaga dkk (2013) juga melakukan RCPT sesuai ASTM C1202, dimana 20% POFA diganti dengan OPC menunjukkan muatan yang dilewatkan berkurang (Bamaga, et al., 2013).



Gambar 8 Hasil RCPT umur 91 hari

3.6 Kedalaman penetrasi klorida

Gambar 9 menunjukkan kedalaman penetrasi klorida semua variasi benda uji. Berdasarkan Gambar 9, diketahui bahwa dengan bertambahnya persentase penggantian POFA, nilai penetrasi klorida semakin tinggi. Nilai kedalaman penetrasi klorida benda uji POFA0-SS, POFA10-SS, POFA20-SS dan POFA30-SS pada umur 91 hari masing-masing sebesar 2.05cm, 2.74 cm, 2.28cm, dan 2.90 cm. Kedalaman penetrasi klorida bergantung pada kuat tekan beton, semakin tinggi kuat tekan beton maka semakin rendah penetrasi ion klorida. Hal ini menandakan matriks beton padat dan jumlah pori yang terkandung sangat sedikit (Li, et al., 2018). Kedalaman penetrasi klorida berbanding lurus dengan penyerapan air, semakin tinggi penyerapan air maka semakin tinggi kedalaman penetrasi ion klorida.



Gambar 8 Kedalaman penetrasi klorida

4. Kesimpulan

Dari penyelidikan di atas ditemukan bahwa penggunaan POFA hingga tingkat penggantian 20% mengurangi penetrasi klorida, menurunkan permeabilitas, meningkatkan sifat mekanik beton yakni pada kuat tekannya dan akan meningkatkan durabilitas khususnya ketahanan terhadap korosi. Dari penelitian ini disimpulkan bahwa tingkat penggantian POFA yang direkomendasikan hingga 20%.

Daftar Pustaka

Al-Jabri, K. & Shoukry, H., 2014. Use of nano-structured waste materials for improving mechanical, physical and structural properties of cement mortar. *Construction and Building Materials*, Volume 73, pp. 636-44.

Al-mulali, M., Awang, H., Khalil, H. & Aljoumaily, Z., 2015. The incorporation of oil palm ash in concrete as a means of recycling: A review. *Cement and Concrete Composites*, Volume 55, pp. 129-38.

Alsubari, B., Shafigh, P. & Jumaat, M., 2016. Utilization of high-volume treated palm oil fuel ash to produce sustainable self-compacting concrete. *Journal of cleaner production*, Volume 137, pp. 982-96.

Bamaga, S., Hussin, M. & Ismail, M., 2013. Palm oil fuel ash: promising supplementary cementing materials. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Volume 17, pp. 1708-13.

- 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*, p. 1203–1208.
- 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), pp. 9-14.
- Dasar, A. et al., 2020. Applicability of seawater as a mixing and curing agent in 4-year-old concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 259, p. 119692.
- Etxeberria, M., Fernandez, J. & Limeira, J., 2016. Secondary aggregates and seawater employment for sustainable concrete dyke blocks production: Case study. *Construction and Building Materials*, Volume 113, pp. 586-95.
- Fu, C. et al., 2022. Chloride profile characterization by electron probe microanalysis, powder extraction and AgNO₃ colorimetric: A comparative study. *Construction and Building Materials*, Volume 341, p. 127892.
- Ge, L., Feng, Z., Sayed, U. & Li, H., 2023. Research on the performance of seawater sea-sand concrete: A review. *Construction and Building Materials*, Volume 409, p. 133921.
- Goyal, A. & Karade, S., 2020. Steel corrosion and control in concrete made with seawater. *Innovations in Corrosion and Materials Science (Formerly Recent Patents on Corrosion Science)*, 10(1), pp. 58-67.
- Guo, M. et al., 2020. Characterization of the mechanical properties of eco-friendly concrete made with untreated sea sand and seawater based on statistical analysis. *Construction and Building Materials*, Volume 234, p. 117.
- Hamada, H. et al., 2018. The present state of the use of palm oil fuel ash (POFA) in concrete. *Construction and Building Materials*, Volume 175, pp. 26-40.
- Hamada, H. et al., 2021. Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, Volume 40, p. 102286.
- Han, S., Zhong, J., Ding, W. & Ou, J., 2021. Strength, hydration, and microstructure of seawater sea-sand concrete using high-ferrite Portland cement. *Construction and Building Materials*, Volume 295, p. 123703.
- Jaturapitakkul, C., Kiattikomol, K., Tangchirapat, W. & Saeting, T., 2007. Evaluation of the sulfate resistance of concrete containing palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 21(7), pp. 1399-405.
- Johari, M., Zeyad, A., Bunnori, N. & Ariffin, K., 2012. Engineering and transport properties of high-strength green concrete containing high volume of ultrafine palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, Volume 30, pp. 281-8.
- Khankhaje, E. et al., 2016. On blended cement and geopolymer concretes containing palm oil fuel ash. *Materials & Design*, Volume 89, pp. 385-98.
- Li, D. et al., 2018. A predictive model of the effective tensile and compressive strengths of concrete considering porosity and pore size. *Construction and Building Materials*, Volume 170, pp. 520-6.

- Lim, N. et al., 2015. The effects of high volume nano palm oil fuel ash on microstructure properties and hydration temperature of mortar. *Construction and Building Materials*, Volume 93, pp. 29-34.
- Muthusamy, K. & Zamri, N., 2016. Mechanical properties of oil palm shell lightweight aggregate concrete containing palm oil fuel ash as partial cement replacement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Volume 20, pp. 1473-81.
- Patah, D., Dasar, A. & Nurdin, A., 2022. Durabilitas Baja Tulangan pada Beton Menggunakan Material Batu Gamping, Pasir Laut dan Air Laut dalam Campuran Beton. *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, 28(1), pp. 109-117.
- Patah, D., Hamada, H. & Yamamoto, D., 2019. The Effect of Seawater Mixing On Corrosion Of Steel Bar In 36-Years Old Rc Beams Under Marine Tidal Environment. *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, 41(1), pp. 791-6.
- Paya, J. et al., 1996. Mechanical treatment of fly ashes part II: Particle morphologies in ground fly ashes (GFA) and workability of GFA-cement mortars. *Cement and Concrete research*, 26(2), pp. 225-35.
- Rajak, M., Majid, Z. & Ismail, M., 2015. Morphological characteristics of hardened cement pastes incorporating nano-palm oil fuel ash. *Procedia Manufacturing*, Volume 2, pp. 512-8.
- Su, M. et al., 2019. A solution for sea-sand reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, Volume 204, pp. 586-96.
- Tangchirapat, W. & Jaturapitakkul, C., 2010. Strength, drying shrinkage, and water permeability of concrete incorporating ground palm oil fuel ash. *Cement and Concrete Composites*, 32(10), pp. 767-74.
- Tangchirapat, W. et al., 2007. Use of waste ash from palm oil industry in concrete. *Waste management*, 27(1), pp. 81-8. .
- Thomas, B., Kumar, S. & Arel, H., 2017. Sustainable concrete containing palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 80, pp. 550-61.
- Xiao, J., Qiang, C., Nanni, A. & Zhang, K., 2017. Use of sea-sand and seawater in concrete construction: Current status and future opportunities. *Construction and Building Materials*, Volume 155, pp. 1101-11.