

NILAI AMBANG KLORIDA UNTUK INISIASI KOROSI PADA BETON BERTULANG MENGGUNAKAN ABU TERBANG

Dahlia Patah¹, Amry Dasar^{1*}, Yusman¹, Sainuddin¹, Amalia Nurdin¹, Apriansyah¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Barat, Jalan Prof. Dr. Baharuddin Lopa, SH, Talumung, Majene, 91412, Indonesia

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

(Received: 8 Sep 2023; Reviewed: 11 Oktober 2023; Accepted: 31 Oktober 2023)

Abstract

Threshold value of chloride for initiation of corrosion in reinforced concrete using fly ash. In recent years, chloride-induced corrosion of reinforced concrete become serious issue in many countries due to the increasing construction in marine environment. In this study focused on the early age for corrosion of reinforcing bar which is caused by eksisting chloride in concrete with containing of fly ash for 20% from weight of cement . The main objectives of this study is to determine the chloride threshold concentration which is sufficient to promotes depassivation and active corrosion of reinforcing bar in mortar. The chloride to cement weight ratio applied is 0% -2% were evaluated. To determine the threshold for chloride concentration, a corrosion potential test was carried out using the HCP method. The threshold value for chloride concentration that causes depassivation and the appearance of active corrosion in reinforcing steel is 1.5% of the cement weight.

Keywords: chloride, fly ash, corrosion rate, half-cell potential, threshold value, reinforced concrete.

Abstrak

Dalam beberapa tahun terakhir, korosi beton bertulang yang disebabkan oleh klorida menjadi masalah serius di banyak negara karena meningkatnya konstruksi di lingkungan laut. Dalam penelitian ini difokuskan pada umur dini terjadinya korosi pada tulangan yang disebabkan oleh adanya klorida pada beton yang mengandung abu terbang sebesar 20% dari berat semen. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menentukan konsentrasi ambang batas klorida yang cukup untuk mendorong depassivasi dan korosi aktif batang tulangan dalam mortar. Untuk itu dilakukan penelitian eksperimental dengan jumlah benda uji sebanyak 9 variasi. Rasio klorida terhadap berat semen yang diterapkan adalah 0% -2% akan dievaluasi. Untuk menentukan ambang batas konsentrasi klorida, dilakukan pengukuran potensial korosi dengan metode *Half-cell potential* (HCP). Nilai ambang batas konsentrasi klorida yang menyebabkan depassivasi dan munculnya korosi aktif pada baja tulangan adalah 1,5% dari berat semen.

Kata Kunci: klorida, fly ash, tingkat korosi, half-cell potential, nilai ambang batas, beton bertulang.

Pendahuluan

Korosi baja tulangan pada beton telah menjadi perhatian dalam beberapa tahun terakhir karena durabilitas menjadi faktor penting dalam struktur beton. Khususnya, korosi baja tulangan yang disebabkan oleh klorida semakin penting di banyak negara karena meningkatnya penggunaan pasir laut dan air laut untuk konstruksi berat struktur laut. Beberapa penelitian tentang korosi baja tulangan pada beton telah banyak diteliti (Hamada et al., 2021; Dasar et al., 2020; Patah et al., 2018; Patah dan Dasar, 2023; Dasar et al., 2022; Patah et al., 2022; Patah et al., 2019). Meskipun banyak peneliti telah mempelajari mekanisme korosi yang disebabkan oleh klorida, konsentrasi ion klorida yang menyebabkan inisiasi korosi baja pada beton – parameter terpenting dalam menentukan umur ketahanan dan/atau masa pakai struktur beton – masih ambigu dan memerlukan studi lebih lanjut. Tingkat kandungan klorida yang berkelanjutan pada permukaan tulangan baja yang menyebabkan depassivasi disebut nilai ambang batas klorida. Nilai ambang batas klorida telah direpresentasikan dalam tiga bentuk berbeda dalam literatur, sebagai rasio ion klorida terhadap ion hidroksil ($[Cl^-]/[OH^-]$), sebagai kandungan klorida bebas, dan sebagai kandungan klorida total.

Karena penilaian dan prediksi nilai ambang batas klorida saling bergantung, banyak peneliti menyarankan plot sebar yang sangat rumit untuk memperkirakan nilai ambang batas klorida berdasarkan kondisi tertentu. Konsentrasi ambang batas klorida untuk inisiasi korosi tidak tetap dan diketahui dipengaruhi oleh beberapa faktor termasuk kandungan semen, jenis pengikat, kapasitas pengikatan semen, konsentrasi ion hidroksil, kelembaban dan oksigen, dll (Hilsdorf dan Jorg, 1995). RILEM telah merekomendasikan bahwa 0,2~0,5% klorida berat semen sebagai ambang batas klorida (RILEM, 1994). Standar JSCE juga merekomendasikan tingkat nilai ambang batas klorida sebesar 0,4% untuk struktur RC (JSCE, 2007). Selanjutnya, faktor-faktor seperti bahan campuran mineral yang digunakan, adanya retakan permukaan, pengotor yang ada dalam beton, rasio w/c, kondisi permukaan baja, jenis pengukuran yang digunakan dan satuan yang digunakan untuk pengukuran mempengaruhi secara signifikan nilai ambang batas klorida. Terlepas dari pengaruh faktor-faktor ini, secara umum, 0,2 hingga 0,4% berat semen digunakan sebagai perkiraan konservatif nilai ambang batas klorida selama desain analitis untuk masa pakai struktur beton bertulang (Lopez et al., 1993; Andrade et al., 2000; Alanso et al., 1988; Feliu et al., 1989; Glass et al., 1991).

Penelitian ini difokuskan pada korosi baja tulangan yang disebabkan oleh klorida internal pada beton pada usia dini. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui ambang batas konsentrasi klorida yang menyebabkan depassivasi dan timbulnya korosi aktif pada baja tulangan yang tertanam dalam mortar. Untuk itu studi eksperimental dilakukan dan sebanyak sembilan variasi benda uji yaitu penambahan klorida 0%-2% terhadap berat semen telah dievaluasi. Dalam studi ini faktor yang mempengaruhi ambang klorida terhadap inisiasi korosi pada beton dan pengaruh lainnya diabaikan. Untuk mengetahui ambang batas konsentrasi klorida, dilakukan pengujian potensi korosi dengan metode *Half-cell potential* (HCP).

Metode

Material dan Mix Proporsi

Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah Semen Portland Tipe I (PCC) sesuai standar SNI 15-7064-2004. Semen ini umum diproduksi oleh pabrik semen di Indonesia dan tersedia banyak di pasaran. *Fly ash* (FA) berasal dari PT. Makassar Tene, Provinsi Sulawesi Selatan digunakan untuk menggantikan sebagian semen, yakni 20% terhadap berat semen. FA diayak menggunakan saringan No. 50 seperti terlihat pada Gambar 1. Properti kimia dari PCC dan FA ditunjukkan pada Tabel 1. Agregat

halus diayak lolos saringan 5 mm berasal dari pasir Sungai Mappili, Sulawesi Barat. Berat jenis material yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 1. Penampakan PCC dan FA

Tabel 1. Properti kimia dari PCC dan FA

Komposisi kimia	PCC, %	FA, %
SiO ₂	20.5	39.89
Al ₂ O ₃	5.5	13.35
Fe ₂ O ₃	3.9	21.92
CaO	62	17.23
MgO	0.89	-
SO ₃	2.8	4.68
K ₂ O	-	1.32

Tabel 2. Material digunakan

Material	Tipe	Keterangan
Semen	Portland Composite Cement (PCC), Tipe 1	Berat jenis: 3.15 g/cm ³
FA	<i>Fly ash</i>	Berat jenis: 3.09 g/cm ³
Pasir	Pasir sungai	Berat jenis (SSD): 2.13 g/cm ³
Tulangan	Polos	BJTP 10 mm

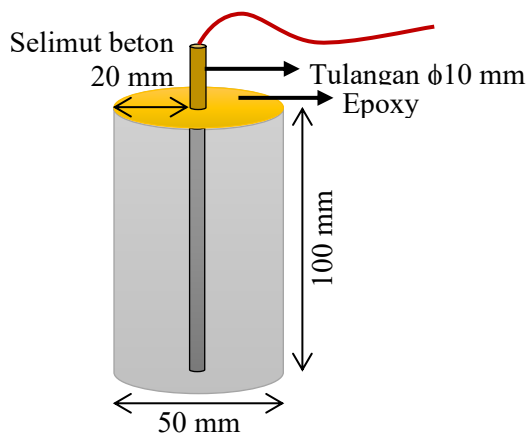
Pada penelitian ini dilakukan evaluasi elektrokimia terhadap korosi baja tulangan yang tertanam dalam mortar terkontaminasi klorida, benda uji mengandung klorida dengan interval 0.25% yaitu 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1.0%, 1.25%, 1.5%, 1.75% dan 2.0% terhadap berat semen. Pada penelitian ini dibuat sebanyak sembilan variasi beton yang menggunakan 20% FA sebagai pengganti semen. Proporsi campuran benda uji dan seluruh kasus kandungan klorida untuk setiap campuran disajikan pada Tabel 3.

Pembuatan benda uji

Benda uji berbentuk selinder dengan diameter 5 cm dan tinggi 10 cm (Gambar 2). Satu batang baja tulangan polos berdiameter 10 mm ditanam pada setiap benda uji dengan selimut beton 20 mm dari permukaan pengukuran. Arah pengukuran dari samping sisi panjang benda uji dan arah *casting* dari atas sejajar dengan tulangan agar lekatan beton dan tulangan baik. Proses pembuatan, pencetakan dan perawatan benda uji dapat dilihat pada Gambar 3. Pelepasan cetakan dilakukan setelah 20-24 jam setelah *casting*. Sebelum dilakukan perawatan dilakukan *epoxy* pada sisi atas dan bawah benda uji, selain itu *epoxy* juga dilakukan pada baja tulangan yang tidak tertanam dalam beton. Kemudian sisi sisanya dijadikan permukaan pengukuran. Proses perawatan dilakukan dengan cara direndam dalam suhu ruang tidak terkontrol hingga tanda awal korosi didapatkan (Gambar 4).

Tabel 3. Mix proporsi

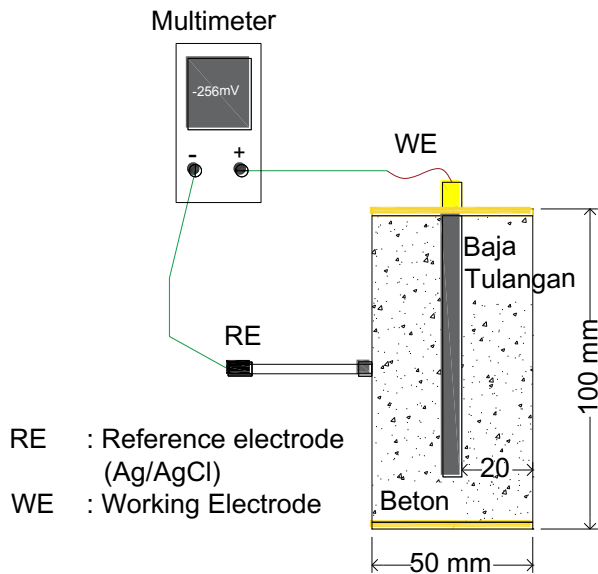
Benda Uji	NaCl, %	Berat unit (kg/m ³)		
		Semen	Pasir	Air
FA20 CL0	0	581	1508	232
FA20 CL0.25	0.25	581	1508	232
FA20 CL0.50	0.50	581	1508	232
FA20 CL0.75	0.75	581	1508	232
FA20 CL1.0	1.00	581	1508	232
FA20 CL1.25	1.25	581	1508	232
FA20 CL1.5	1.50	581	1508	232
FA20 CL1.75	1.75	581	1508	232
FA20 CL2.0	2.00	581	1508	232

**Gambar 2. Bentuk dan ukuran benda uji****Gambar 3. Proses pembuatan, pencetakan dan perawatan benda uji: (A) mixing, (B) pencetakan, (C) Pemadatan, (D) Pencegahan evaporasi setelah casting, (E) Penampakan benda uji****Gambar 4. Proses epoxy, curing dan pengujian: (F) Epoxy sisi atas dan bawah benda uji, (G) Curing rendam benda uji dan (H) Pengujian HCP**

Pengujian Half-cell potential (HCP)

Pengujian korosi dilakukan dengan metode *Half-Cell Potential* (HCP) dimana metode ini menggunakan alat berupa Referensi Elektroda (RE) berbahan Ag/AgCl. Nilai HCP diambil dari rata-rata tiga kali pengambilan data yang diukur menggunakan multimeter dan RE yang disambungkan ke benda uji.

Detail pengukuran dapat dilihat pada Gambar 5. Pengukuran HCP dilakukan setelah *pre-wetting* selama 30 menit dengan kain basah pada sisi permukaan pengukuran pada benda uji. Hal ini dilakukan untuk mengurangi potensi fluktuasi nilai HCP. Pengujian ini mengacu pada ASTM C876-15 dimana apabila nilai HCP < -256 mV menunjukkan 90% kemungkinan telah korosi seperti pada Tabel 4.



Gambar 5. Pengujian HCP

Tabel 4. Prediksi kemungkinan korosi (ASTM C876, 2015)

HCP (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

Pengecekan aktual korosi

Untuk evaluasi aktual atau inspeksi visual, korosi area baja tulangan dilakukan dengan memisahkan tulangan baja dari beton dengan cara mengupas penutup beton seperti terlihat pada Gambar 6. Setelah baja tulangan diekstraksi, digunakan sebuah kertas transparan lalu baja tulangan dibungkus dengan hati-hati pada permukaan melingkar dari batang baja berkarat. Kemudian menggunakan spidol hitam permanen area yang berkarat itu dibuat sketsa sesuai garis luar area yang korosi/karat. Kemudian luas baja tulangan yang terkorosi dihitung dengan menggunakan perangkat lunak analisis citra komputer (Image J v1.49).

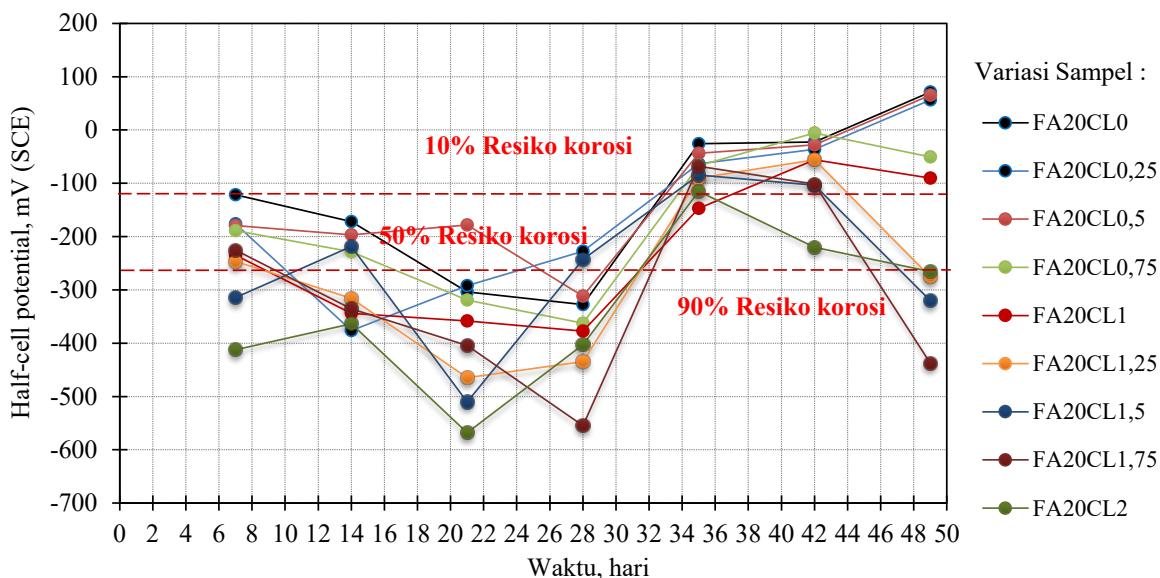


Gambar 6. Pemisahan baja tulangan dari beton

Hasil

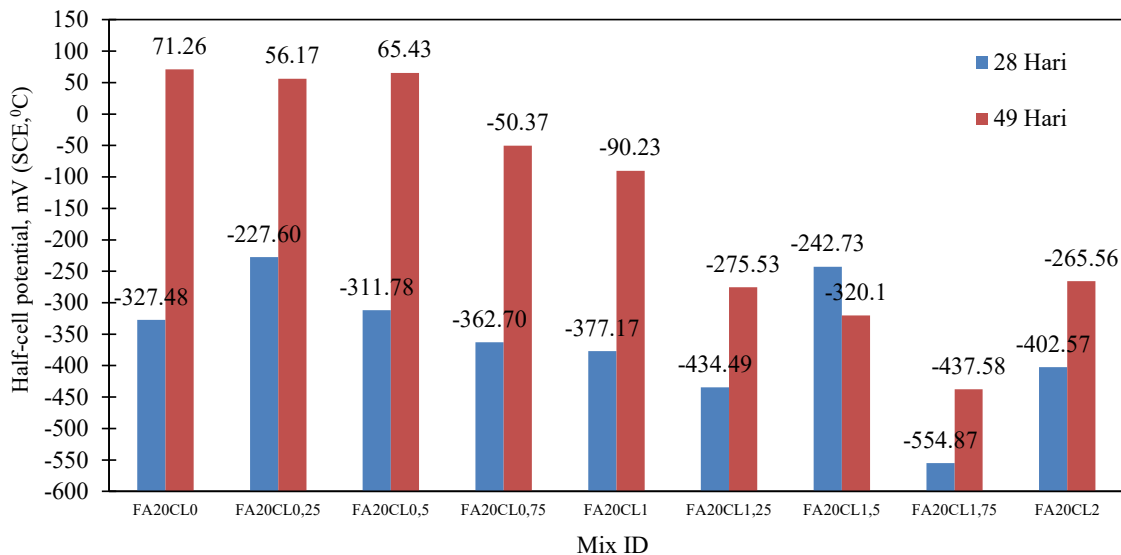
Half-cell potential (HCP)

Hasil pengukuran nilai HCP terhadap perubahan waktu dari umur 1 hari hingga 49 hari untuk benda uji dapat dilihat pada Gambar 7. Berdasarkan Gambar 7, pada hari pertama setelah cetakan dibuka, nilai HCP untuk semua benda uji berada antara -100mV hingga -400 mV. Hal ini dikarenakan beton masih basah dan semen masih belum mengikat secara sempurna sehingga potential yang terbaca ini akibat pengaruh basahnya beton (Dasar et al., 2016; Patah et al., 2019). Akan tetapi, nilai potential ini berangsur-angsur menjadi lebih positif berdasarkan waktu hingga melewati masa hidrasi semen diumur 28 hari, nilai HCP terus pulih menjadi lebih positif dan dikategorikan 90% tidak mengalami korosi. Hal ini menandakan semen telah terikat secara sempurna. Pada umur mulai dari 49 hari, didapatkan nilai potential beberapa benda uji menjadi negatif di bawah -256 mV yang teridentifikasi mengalami korosi baja tulangan.



Gambar 7. Nilai HCP terhadap perubahan waktu dari umur 1 hari hingga 49 hari

Secara terperinci, nilai potential semua benda uji di umur 28 hari dan 49 hari dapat dilihat pada Gambar 8. Berdasarkan Gambar 8 didapatkan bahwa semua benda uji diumur 28 hari memiliki nilai potential lebih negatif dari -311.78 yang menandakan teridentifikasi kemungkinan korosi 90%. Hanya satu benda uji FA20CL0,25 memiliki nilai potential -227.60mV dan teridentifikasi kemungkinan korosi 50%. Akan tetapi, setelah 49 hari benda uji dengan Cl 0%-Cl1% memiliki potential lebih positif dari -90.23mV dan teridentifikasi kemungkinan korosi 50%. Sedangkan benda uji dengan Cl1.25%-Cl2.0% memiliki potential lebih negatif dari -256mV dan teridentifikasi korosi berdasarkan metode HCP.



Gambar 8. Nilai half-cell potensial benda uji pada umur 28 hari dan 49 hari

Aktual Korosi

Setelah pengukuran elektrokimia dengan metode HCP selesai, seluruh benda uji dipotong dan dibelah pada umur 50 hari (pada waktu pengukuran terakhir) untuk memverifikasi perubahan yang diamati dengan pengukuran elektrokimia dan korosi dikonfirmasi dengan visualisasi. Dari pengamatan sebenarnya, area yang terkorosi diukur kecuali tepi 1,5 cm dari atas dan bawah batang tulangan untuk menghindari korosi yang tidak terduga akibat lapisan yang tidak sempurna pada tepi atas dan bawah batang baja. Penampakan aktual korosi pada baja tulangan yang telah diekstraksi dari beton dapat dilihat pada Gambar 6.

Hasil pengecekan aktual korosi pada umur 49 hari untuk tiap persentase penambahan klorida pada benda uji dapat dilihat pada Tabel 5. Berdasarkan Tabel 5 dapat dilihat bahwa semua benda uji yang mengandung klorida 0%-1% tidak mengalami korosi. Sedangkan benda uji yang mengandung klorida 1.25-2.0% telah mengalami korosi dengan nilai korosi area sebesar 9.18-41.21%.

Tabel 5. Korosi area

Mix ID	Luas, Cm ²	Area Korosi	
		cm ²	%
FA20CL0	19.6	0.00	0.00
FA20CL0,25	19.6	0.00	0.00
FA20CL0,5	19.6	0.00	0.00
FA20CL0,75	19.6	0.00	0.00
FA20CL1	19.6	0.00	0.00
FA20CL1,25	19.6	3.03	15.45
FA20CL1,5	19.6	4.36	22.25
FA20CL1,75	19.6	8.08	41.21
FA20CL2	19.6	1.80	9.18

Pembahasan

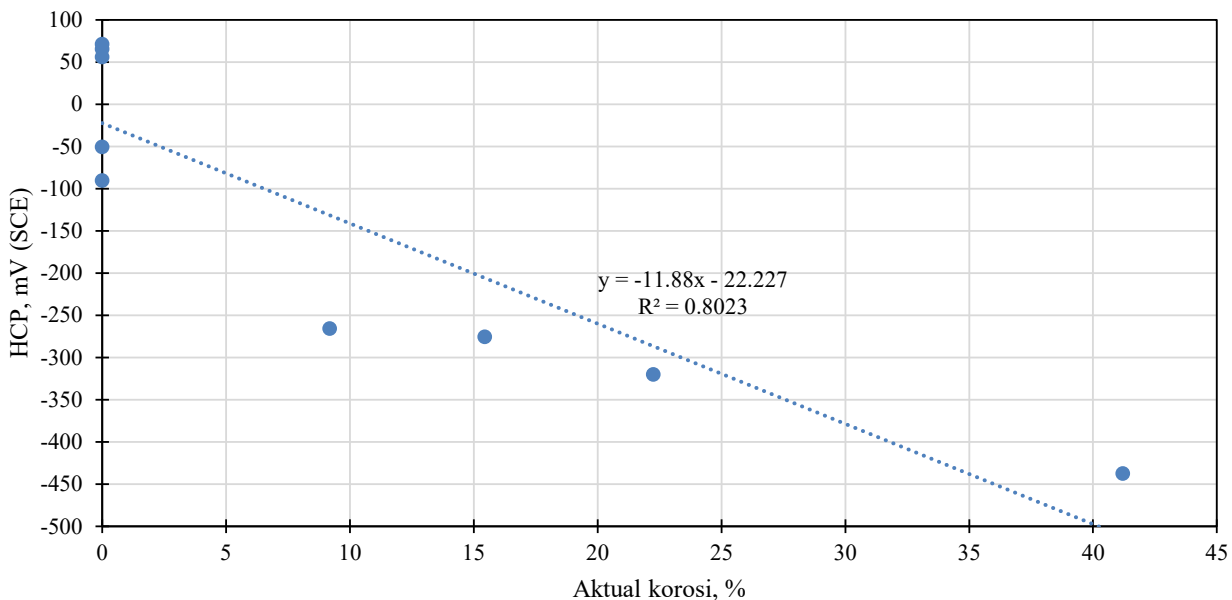
Hubungan antara nilai HCP dengan aktual korosi baja tulangan dan hubungan nilai HCP dan klorida dapat dilihat pada masing-masing Gambar 9 dan Gambar 10. Berdasarkan Gambar 9, terdapat hubungan

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. Dimana nilai x adalah korosi area dalam % dan y adalah nilai HCP dalam mV. Hubungan R^2 dari hubungan linear ini didapatkan sebesar 0.8023. Ini menandakan bahwa pemeriksaan dengan metode HCP dapat diandalkan dan relevan untuk mendeteksi kemungkinan korosi tanpa harus dilakukan pemeriksaan secara visual pada baja tulangan beton.

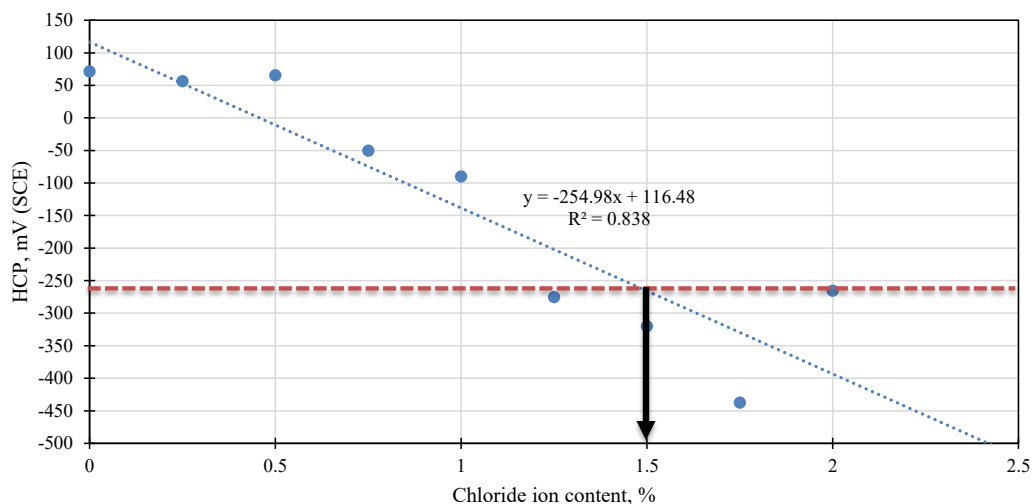
$$y = -11.88x - 22.227 \quad (1)$$

Berdasarkan Gambar 10, didapatkan hubungan linier antara pengujian elektrokimia metode HCP dengan penambahan klorida pada benda uji. Semakin banyak klorida yang dimasukkan ke dalam benda uji semakin tinggi (negatif) nilai HCP. Persamaan yang didapatkan dari hubungan HCP dengan penambahan klorida ditunjukkan oleh Persamaan 2. Dimana nilai x adalah kandungan klorida dalam % dan y adalah nilai HCP dalam mV. Hubungan R^2 dari hubungan linear ini didapatkan sebesar 0.838. Dari hubungan linier ini didapatkan nilai ambang batas untuk terjadinya inisiasi korosi pada saat penambahan klorida 1.5% terhadap berat semen.

$$y = -254.98x - 116.48 \quad (2)$$



Gambar 9. Hubungan HCP dan aktual korosi



Gambar 10. Hubungan HCP dan jumlah ion klorida (*chloride ion content*)

Kesimpulan

Nilai ambang batas konsentrasi klorida yang menyebabkan depassivasi dan timbulnya korosi aktif pada baja tulangan yang diperoleh hubungan HCP dan klorida yaitu pada kandungan klorida 1.5% terhadap berat semen. Hal ini menunjukkan bahwa penghancuran film pasif pada permukaan baja terjadi di sekitar kadar klorida ini diyakini saat ini merupakan ambang batas kandungan klorida untuk inisiasi korosi baja tulangan pada beton yang mengandung FA sebesar 20%. Berdasarkan observasi aktual korosi, semua benda uji terdeteksi korosi selaras dengan pengukuran elektrokimia dan didapatkan hubungan linear antara aktual korosi dengan pengukuran nilai HCP.

Referensi

- Alonso, Carmen, C. Andrade, and J. A. Gonzalez. "Relation between resistivity and corrosion rate of reinforcements in carbonated mortar made with several cement types." *Cement and concrete research* 18.5 (1988): 687-698.
- American Society for Testing and Materials. (1991). *Standard Method for Half Cell Potential of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete: ASTM C876*. America: Annual book of ASTM Standards.
- Andrade, C., C. Alonso, and S. Goni. "Possibilities for electrical resistivity to universally characterise mass transport processes in concrete." *Concrete 2000: Economic and durable construction through excellence 2* (2000): 1639-1652.
- 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, Volume, 38(1), 1203-1208*.
- Dasar, A., Patah, D., & Apriansyah, A. (2022, November). Effect of limestone as coarse aggregate and seawater as mixing water on half-cell potential of steel bar in concrete. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2543, No. 1). AIP Publishing.
- 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.
- Feliu, S., et al. "Relationship between conductivity of concrete and corrosion of reinforcing bars." *British corrosion journal* 24.3 (1989): 195-198.
- Glass, G. K., C. L. Page, and N. R. Short. "Factors affecting the corrosion rate of steel in carbonated mortars." *Corrosion Science* 32.12 (1991): 1283-1294.
- Hamada, H., Otsuki, N., & Nishida, T. (2021). *Seawater in Concrete Mix*. CRC Press.
- Hilsdorf, H., and Jorg Kropp. *Performance criteria for concrete durability*. CRC Press, 1995.
- JGC16, "Standard Specification for Concrete Structures (Materials and Construction)," Japan Society of Civil Engineers, 2007.
- Lopez, W., and J. A. Gonzalez. "Influence of the degree of pore saturation on the resistivity of concrete and the corrosion rate of steel reinforcement." *Cement and concrete research* 23.2 (1993): 368-376.
- Patah, D., & Dasar, A. (2023, September). The Impact of using Rice Husks Ash, Seawater and Sea Sand on Corrosion of Reinforcing Bars in Concrete. In *Journal of the Civil Engineering Forum* (pp. 251-262). Patah, D., Dasar, A., & Hamada,

- H. (2022, November). Electrochemical consideration on corrosion performance of steel bar embedded in SCMs mortar with initial chloride contaminated. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2543, No. 1). AIP Publishing.
- PATAH, D., HAMADA, H., YAMAMOTO, D., & SAGAWA, Y. (2018). 6 YEARS'EVALUATION OF ELECTROCHEMICAL CHARACTERISTICS OF STEEL BAR IN CHLORIDE CONTAMINATED MORTAR. セメント・コンクリート論文集, 71(1), 402-409.
- Recommendation, RILEM Draft. "Draft recommendation for repair strategies for concrete structures damaged by reinforcement corrosion." Materials and Structures 27.171 (1994): 415-436.
- Standar Nasional Indonesia. (2004). Semen Portland komposit. SNI 15-7064-2004, ICS 91.10. 10, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. (2012). Metode Uji Untuk Analisis Saringan Agregat Halus Dan Agregat Kasar (ASTM C 136-06, IDT). SNI ASTM C16-2012, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- パタダリア, 濱田秀則, & 山本大介. (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), 791-796.
- パタダリア, 濱田秀則, & 山本大介. (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), 791.