e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Pemodelan Matematis Hubungan Lebar Retak Dan Penetrasi Korosi Tulangan Pada Beton Bertulang Berbasis Data Eksperimen KUL-edCCRC

Mathematical Modelling Of The Relationship Between Crack Width And Rebar Corrosion Penetration In Reinforced Concrete Based On The KUL-edCCRC Experimental Dataset

Gladies Nataly Simatupang*, Sovian Aritonang[1]
**Program Studi Matematika Militer, Fakultas MIPA Militer, Universitas Pertahanan Republik Indonesia*

gladiessimatupang@gmail.com* , sovian.aritonang@idu.ac.id

Abstract

Rebar corrosion produces rust whose volume exceeds that of the consumed steel, inducing tensile stress in the concrete cover and longitudinal cracking. This study builds a mathematical model linking equivalent crack width (w) to corrosion level using 192 segments from 51 specimens of the open KUL-edCCRC database. Mass loss ρ was converted exactly into corrosion penetration x = (d/2)(1 − √(1 − ρ)), and a threshold-linear model w = k(x − x0) was derived from a rust-volume balance. Parameters were estimated by ordinary least squares, uncertainty by a specimen-level cluster bootstrap, and models were compared through the Akaike information criterion and cross-validation. The linear model in x (R^2 = 0.346; RMSE = 0.326 mm) outperformed the linear model in ρ and power-law models. The slope k = 1.65 mm/mm (95% CI: 1.28–2.14) corresponds to an effective rust expansion coefficient of about 1.26, indicating that most rust does not contribute to crack opening. An analysis-of-covariance model with test-programme intercepts raised R^2 to 0.468 with a common slope of 1.67 ± 0.16 mm/mm, whereas cover-to-diameter ratio, tensile strength and rebar type were not significant once x was included. Maximum crack width averaged 1.84 times the equivalent width. Corrosion penetration is therefore a more appropriate physical variable than percentage mass loss, but corrosion estimates from crack width should be reported with their uncertainty bounds.

Keywords **:** *Reinforced Concrete, Rebar Corrosion, Crack Width, Corrosion Penetration, Least Squares*

Abstrak

Korosi tulangan baja menghasilkan produk karat yang volumenya lebih besar daripada baja asal, sehingga memicu tegangan tarik pada selimut beton dan retak longitudinal. Penelitian ini membangun model matematis hubungan lebar retak ekuivalen (w) dengan tingkat korosi tulangan memakai 192 segmen dari 51 benda uji pada basis data terbuka KUL-edCCRC. Kehilangan massa ρ diubah secara eksak menjadi penetrasi korosi x = (d/2)(1 − √(1 − ρ)), lalu model linear berambang w = k(x − x0) diturunkan dari keseimbangan volume produk karat. Parameter diestimasi dengan kuadrat terkecil biasa, ketidakpastian dihitung dengan bootstrap klaster per benda uji, dan model dibandingkan dengan kriteria informasi Akaike serta validasi silang. Model linear terhadap x (R^2 = 0,346; RMSE = 0,326 mm) lebih baik daripada model linear terhadap ρ dan model pangkat. Kemiringan k = 1,65 mm/mm (IK 95%: 1,28–2,14) setara dengan koefisien ekspansi karat efektif sekitar 1,26, yang menunjukkan sebagian besar karat tidak menyumbang bukaan retak. Model kovarians dengan intersep per program uji menaikkan R^2 menjadi 0,468 dengan kemiringan bersama 1,67 ± 0,16 mm/mm, sedangkan rasio selimut terhadap diameter, kuat tarik beton, dan jenis tulangan tidak signifikan setelah x diperhitungkan. Lebar retak maksimum rata-rata 1,84 kali lebar retak ekuivalen. Penetrasi korosi lebih tepat dipakai sebagai variabel fisis daripada persentase kehilangan massa, tetapi estimasi korosi dari lebar retak harus dilaporkan bersama rentang ketidakpastiannya.

Kata Kunci: Beton Bertulang, Korosi Tulangan, Lebar Retak, Penetrasi Korosi, Kuadrat Terkecil

Penulis Korespondensi : Gladies Nataly Simatupang

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

I. PENDAHULUAN

Korosi tulangan adalah penyebab utama penurunan kinerja struktur beton bertulang, terutama di lingkungan yang terpapar klorida seperti kawasan pesisir. Dari sudut pandang fisika material, prosesnya adalah reaksi elektrokimia: atom besi teroksidasi di anoda, dan produk karat berupa oksida dan hidroksida besi menempati volume beberapa kali volume baja yang hilang (Bažant, 1979; Liu and Weyers, 1998). Ekspansi volume ini menekan beton di sekeliling tulangan, membangkitkan tegangan tarik melingkar pada selimut beton, dan akhirnya membentuk retak longitudinal di permukaan (Tepfers, 1979; Nasser et al., 2021). Di Indonesia, analisis penampang balok beton bertulang menunjukkan bahwa tingkat korosi tulangan 30–40% sudah menjadi batas kritis penurunan kinerja lentur (Astuti, 2023).

Lebar retak permukaan adalah indikator kerusakan yang paling mudah diukur saat inspeksi visual. Karena itu, banyak penelitian mencari hubungan empiris antara lebar retak dan tingkat korosi, misalnya model linear lebar retak terhadap kehilangan jari-jari tulangan (Andrade, Alonso and Molina, 1993; Alonso et al., 1998) dan model terhadap kehilangan luas penampang (Vidal, Castel and François, 2004). Alonso et al. (1998) melaporkan bahwa kehilangan jari-jari sekitar 15–50 µm sudah cukup untuk memunculkan retak pertama yang terlihat. Penelitian dalam negeri juga menunjukkan bahwa rapat arus pada uji korosi dipercepat memengaruhi perilaku retak; kurva perkembangan retak bersifat bilinear dan rapat arus yang lebih rendah justru menghasilkan perkembangan retak permukaan yang lebih cepat (Amalia et al., 2021), sedangkan selimut beton yang lebih tipis menghasilkan kehilangan massa tulangan yang lebih besar (Arista et al., 2021). Kelemahan model-model empiris tersebut adalah ketidakpastian yang besar dan keterbatasan pada kondisi uji asalnya (Martens et al., 2024a).

Martens et al. (2024a; 2024b) menerbitkan basis data terbuka KUL-edCCRC yang menghimpun tujuh program uji korosi dipercepat di Laboratorium Reyntjens, KU Leuven. Basis data ini memuat geometri benda uji, sifat material, tata letak tulangan, kondisi korosi, lebar retak, dan kehilangan massa tulangan per segmen. Ketersediaan data terbuka seperti ini memungkinkan pengujian ulang model fisis secara kuantitatif tanpa eksperimen baru.

Penelitian ini memanfaatkan data KUL-edCCRC untuk tiga tujuan. Pertama, menurunkan model matematis hubungan lebar retak dan penetrasi korosi dari prinsip keseimbangan volume produk karat. Kedua, mengestimasi parameter model dengan regresi kuadrat terkecil dan menghitung ketidakpastiannya dengan bootstrap klaster. Ketiga, membandingkan model linear, model pangkat, model berambang Alonso–Vidal, dan model kovarians antarprogram uji untuk menilai variabel fisis mana yang paling menjelaskan lebar retak.

II. METODE

Data diambil dari basis data KUL-edCCRC versi 1.0 (Martens et al., 2024b) di KU Leuven Research Data Repository dengan lisensi CC BY-NC-SA 4.0. Basis data terdiri atas tujuh berkas MATLAB berformat tabel dengan 35 kolom yang mencakup geometri, komposisi beton, sifat mekanis, tulangan, kondisi korosi, lebar retak, dan kehilangan massa. Semua benda uji dikorosi dengan arus terpasang langsung (*direct impressed current*), sebagian besar pada rapat arus 100 µA/cm². Setiap baris data adalah satu segmen tulangan, dengan lebar retak ekuivalen dan kehilangan massa ekuivalen sesuai definisi Martens et al. (2024a). Berkas .mat diekstrak dengan

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

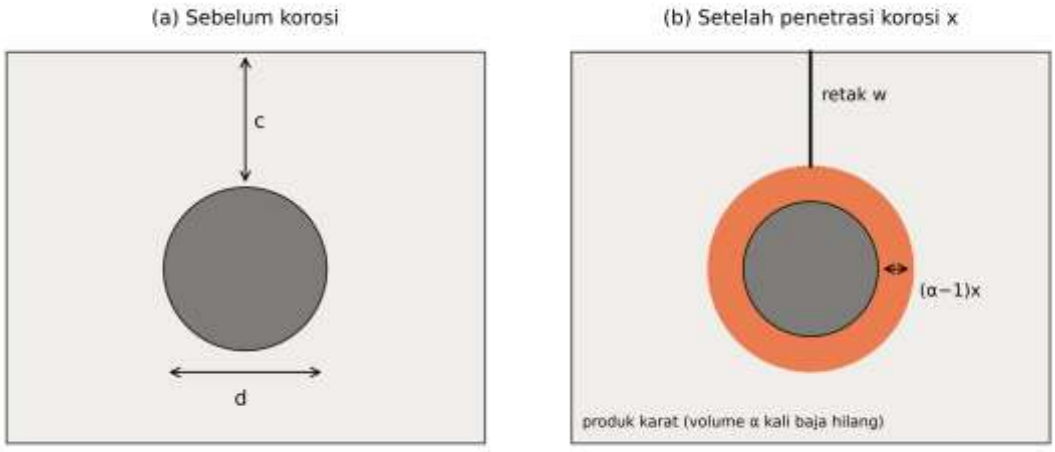
membaca ruang kerja objek tabel MATLAB di dalamnya, lalu jumlah baris dan rentang nilai tiap kolom dicocokkan dengan dokumentasi basis data. Ringkasan ketujuh program uji ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan program uji dalam basis data KUL-edCCRC (rata-rata ± simpangan baku)

Set	Sumber	Jenis	Segmen (benda uji)	c (mm)	d (mm)	c/d	f_{ct} (MPa)	ρ (%)	w (mm)
DS1	Van Steen et al. (2019)	Prisma	11 (11)	69	12	5,75	3,12	6,08 ± 1,86	0,68 ± 0,43
DS2	Van Beirendonck et al. (2022)	Prisma	6 (6)	30	14	2,14	3,25	3,25 ± 0,57	0,11 ± 0,03
DS3	Van Beirendonck et al. (2022)	Prisma	10 (10)	68	14	4,86	3,32	5,46 ± 1,67	0,22 ± 0,16
DS4	Nasser et al. (2021)	Balok	96 (12)	30	14	2,14	2,71	8,65 ± 4,37	0,64 ± 0,31
DS5	Nasser et al. (2022)	Balok	41 (6)	28	14	2,00	4,35	8,05 ± 3,78	0,72 ± 0,58
DS6	Vandecruys et al. (2023)	Balok	24 (4)	30	12	2,50	3,74	10,63 ± 2,81	0,47 ± 0,23
DS7	Vandecruys et al. (2022)	Balok	4 (2)	30	14	2,14	4,59	7,41 ± 2,38	1,03 ± 0,57
Total			192 (51)					8,26 ± 4,02	0,61 ± 0,40

Variabel respons adalah lebar retak ekuivalen w (mm). Variabel penjelas utama adalah penetrasi korosi x (μm) dari persamaan (2), dengan ρ = kehilangan massa ekuivalen/100 dan d = diameter tulangan tarik. Variabel pendukung adalah rasio selimut terhadap diameter c/d, kuat tarik beton f_{ct}, dan jenis tulangan (ulir = 1, polos = 0).

Model diturunkan dalam tiga langkah: mengubah kehilangan massa menjadi penetrasi korosi, menghitung perpindahan radial akibat ekspansi karat, lalu mengaitkan perpindahan itu dengan bukaan retak. Skema geometrinya ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema penampang beton bertulang: (a) tulangan berdiameter d dengan selimut c sebelum korosi; (b) setelah penetrasi korosi x, produk karat menimbulkan perpindahan radial (α – 1)x dan retak selebar w

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tinjau tulangan berdiameter d dan jari-jari r = d/2. Jika korosi merata mengikis lapisan setebal x, luas penampang baja turun dari πr^2 menjadi $\pi(r - x)^2$. Karena massa per satuan panjang sebanding dengan luas penampang, rasio kehilangan massa ρ adalah:

$$\rho = 1 - \frac{(r-x)^2}{r^2} \tag{1}$$

Persamaan (1) diselesaikan terhadap x untuk $0 \le x \le r$ sehingga diperoleh transformasi eksak:

$$x = \frac{d}{2}\left(1 - \sqrt{1-\rho}\right) \tag{2}$$

Untuk ρ kecil, deret Taylor $\sqrt{(1-\rho)} \approx 1 - \rho/2$ memberi pendekatan $x \approx d\rho/4$. Pada data ini (ρ sampai 18%), galat relatif pendekatan tersebut paling besar 4,7%, sehingga penelitian ini memakai bentuk eksak (2). Persamaan (2) juga menunjukkan bahwa ρ yang sama menghasilkan penetrasi lebih besar pada tulangan berdiameter besar; inilah alasan fisis x lebih tepat daripada ρ sebagai variabel penjelas.

Misalkan produk karat bervolume α kali volume baja yang hilang (α > 1). Karat menempati cincin antara jari-jari r − x dan r_k, sehingga keseimbangan luas per satuan panjang adalah:

$$\pi(r_k^2 - (r-x)^2) = \alpha\,\pi(r^2 - (r-x)^2) \tag{3}$$

Dengan $x \ll r$ dan mengabaikan suku x^2, penyelesaian (3) memberi perpindahan radial bebas pada antarmuka baja–beton:

$$u = r_k - r \approx (\alpha - 1)\,x \tag{4}$$

Tidak seluruh karat menekan beton, karena sebagian mengisi zona berpori di sekitar tulangan. Jika tebal zona berpori setara δ_0, perpindahan efektif adalah $(\alpha - 1)x - \delta_0$ (Liu and Weyers, 1998). Selimut beton dimodelkan sebagai silinder berdinding tebal dengan jari-jari dalam r dan tebal c; retak dimulai ketika tekanan antarmuka melampaui kapasitas cincin yang bergantung pada kuat tarik beton dan rasio c/d (Tepfers, 1979). Setelah retak menembus selimut, pertambahan keliling antarmuka hampir seluruhnya menjadi bukaan retak, sehingga dengan mengabaikan regangan elastis beton diperoleh:

$$w = 2\pi[(\alpha-1)x - \delta_0] = k\,(x - x_0), \quad k = 2\pi(\alpha-1), \quad x_0 = \frac{\delta_0}{\alpha-1} \tag{5}$$

Persamaan (5) adalah model linear berambang: w nol sampai penetrasi mencapai x_0, lalu naik dengan laju k. Bentuk ini sama dengan model empiris Alonso et al. (1998), tetapi di sini kemiringan k mempunyai arti fisis. Dari k hasil fitting dapat dihitung koefisien ekspansi efektif:

$$\alpha_{ef} = 1 + \frac{k}{2\pi} \tag{6}$$

Nilai α_{ef} adalah batas bawah α sebenarnya karena sebagian karat tidak berkontribusi pada ekspansi. Untuk ambang, Vidal, Castel and François (2004) memakai bentuk empiris Alonso et al. (1998), $x_0 = 7{,}53 + 9{,}32\ c/d$ (μm), dan menuliskan modelnya dalam kehilangan luas penampang ΔA_s (mm^2):

$$w = 0{,}0575\,(\Delta A_s - \Delta A_{s0}), \quad \Delta A_{s0} = A_s\left[1 - \left(1 - \frac{\alpha_p}{d}\,x_0 \cdot 10^{-3}\right)^2\right] \tag{7}$$

dengan $A_s = \pi d^2/4$ dan $\alpha_p = 2$ sebagai faktor sumuran (Vidal, Castel and François, 2004).

Tujuh model dibandingkan: M1, linear terhadap ρ ($w = b_0 + k_\rho\rho$); M2, linear terhadap x sesuai persamaan (5) ($w = b_0 + kx$, dengan $x_0 = -b_0/k$); M3 dan M4, model pangkat $w = a\rho^n$ dan $w = ax^n$ yang dilinearkan dengan logaritma; M5, regresi berganda $w = b_0 + b_1x + b_2(c/d) + b_3f_{ct} + b_4\cdot$ulir; MV, model Vidal et al. dengan parameter asli tanpa fitting; dan MA, model kovarians $w_{ij} = a_j + kx_{ij} + \varepsilon_{ij}$ dengan a_j intersep program uji ke-j.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Semua model linear dalam parameter ditulis dalam bentuk matriks y = Xβ + ε. Penduga kuadrat terkecil biasa meminimumkan S(β) = (y − Xβ)ᵀ(y − Xβ). Turunan S terhadap β yang disamakan dengan nol menghasilkan persamaan normal dan penyelesaiannya:

$$\hat{\beta} = (X^{\top}X)^{-1}X^{\top}y \tag{8}$$

Galat baku parameter diambil dari diagonal matriks kovarians:

$$\widehat{\mathrm{Var}}(\hat{\beta}) = \hat{\sigma}^2(X^{\top}X)^{-1}, \quad \hat{\sigma}^2 = \frac{\mathrm{SSE}}{n-p} \tag{9}$$

dengan n jumlah data, p jumlah parameter, dan SSE jumlah kuadrat residual.

Segmen-segmen dari satu balok tidak saling bebas karena berbagi beton, tulangan, dan riwayat korosi yang sama, sehingga galat baku OLS biasa akan terlalu kecil. Karena itu, selang kepercayaan (IK) 95% dihitung dengan bootstrap klaster (Efron and Tibshirani, 1993; Cameron, Gelbach and Miller, 2008): 51 benda uji diambil ulang dengan pengembalian, semua segmen benda uji terpilih ikut masuk, model difit ulang, dan proses diulang 2.000 kali. IK diambil dari persentil 2,5% dan 97,5% distribusi penduga bootstrap.

Kecocokan diukur dengan $R^2 = 1 - \mathrm{SSE}/\mathrm{SST}$, $\mathrm{RMSE} = \sqrt{(\mathrm{SSE}/n)}$, dan kriteria informasi Akaike (Akaike, 1974):

$$\mathrm{AIC} = n\ln\left(\frac{\mathrm{SSE}}{n}\right) + 2p \tag{10}$$

Nilai AIC yang lebih kecil menunjukkan model yang lebih baik setelah memperhitungkan jumlah parameter (Burnham and Anderson, 2002). Untuk model pangkat, ketiga ukuran dihitung pada skala asli w agar sebanding. Kemampuan prediksi diuji dengan validasi silang tinggalkan-satu (LOOCV) dan tinggalkan-satu-set (LODO), yaitu model difit tanpa satu program uji lalu dipakai memprediksi program uji tersebut. Perbedaan intersep dan kemiringan antarprogram uji diuji dengan uji F model bersarang:

$$F = \frac{(\mathrm{SSE}_0 - \mathrm{SSE}_1)/(p_1 - p_0)}{\mathrm{SSE}_1/(n - p_1)} \tag{11}$$

dengan indeks 0 untuk model terbatas dan 1 untuk model yang lebih umum. Normalitas residual diuji dengan uji Shapiro–Wilk dan homoskedastisitas dengan uji Breusch–Pagan. Seluruh perhitungan dilakukan dengan Python (NumPy, SciPy, dan pandas).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Lebar retak ekuivalen pada 192 segmen berkisar 0,036–2,258 mm (rata-rata 0,607 mm), sedangkan kehilangan massa berkisar 1,12–18,08% (rata-rata 8,26%). Setelah ditransformasi dengan persamaan (2), penetrasi korosi berkisar 39–664 µm. Korelasi Pearson w terhadap ρ adalah 0,568 dan naik menjadi 0,588 terhadap x, sedangkan korelasi peringkat Spearman w terhadap ρ adalah 0,683 (semua $p < 10^{-17}$). Selisih Pearson dan Spearman menunjukkan hubungan monoton yang cukup kuat, tetapi ada pencilan yang menurunkan korelasi linear, terutama dari DS5.

Tabel 2 merangkum hasil fitting. Di antara model satu variabel, M2 (linear terhadap x) memberikan R^2 tertinggi, RMSE dan AIC terendah, serta galat LOOCV terkecil. Mengganti ρ dengan x menurunkan AIC sebesar 6,6 satuan, yang menurut kaidah Burnham and Anderson (2002) berarti dukungan data yang jelas lebih besar untuk M2. Model pangkat tidak lebih baik daripada model linear; eksponen n = 0,86 (galat baku 0,08) dan 0,87 (0,07) dekat dengan 1, sehingga data tidak mendukung kelengkungan yang kuat. Gambar 2

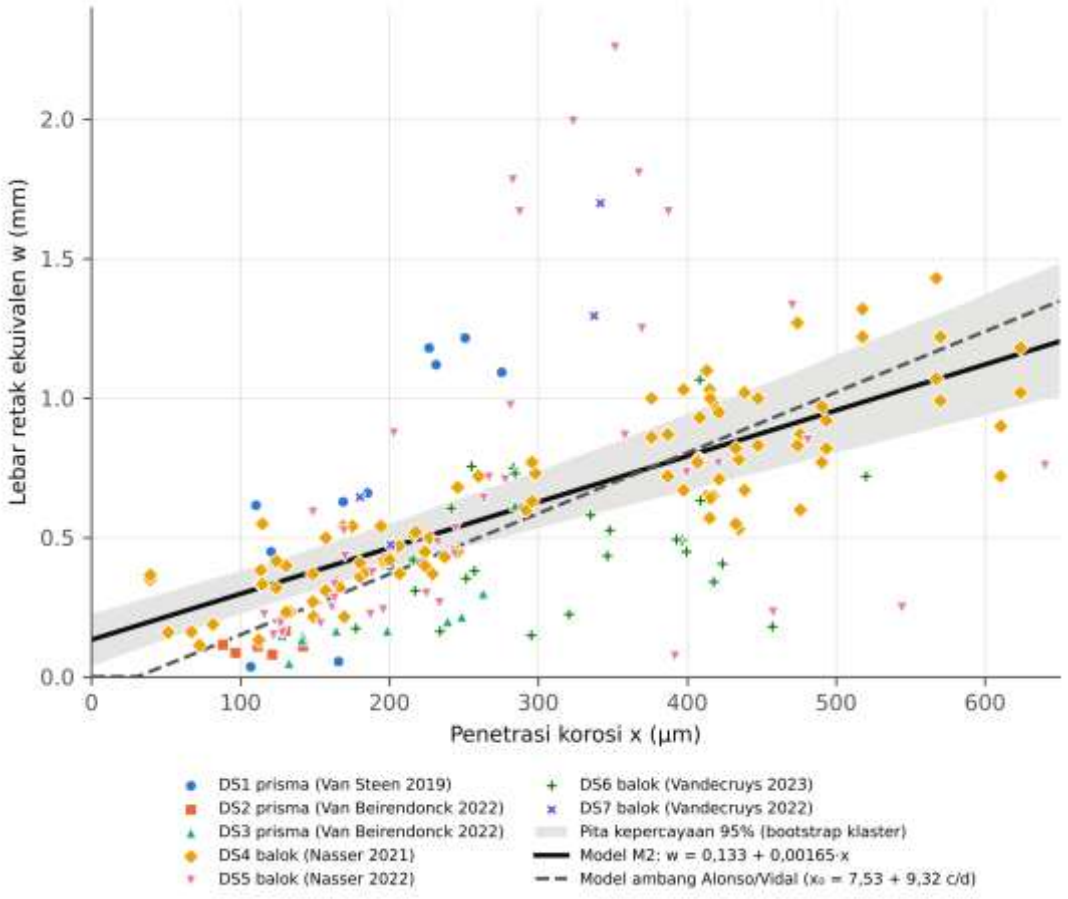
e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

menampilkan seluruh data, garis M2, pita kepercayaan 95% hasil bootstrap klaster, dan model berambang Alonso–Vidal.

Tabel 2. Hasil fitting dan pembandingan model (n = 192; w dalam mm, ρ dalam %, x dalam µm)

Model	Persamaan hasil fitting	Param.	R^2	RMSE (mm)	AIC	RMSE LOOCV (mm)
M1 linear ρ	$w = 0{,}135 + 0{,}0571\ \rho$	2	0,323	0,331	−420,3	0,334
M2 linear x	$w = 0{,}133 + 0{,}00165\ x$	2	0,346	0,326	−426,8	0,328
M3 pangkat ρ	$w = 0{,}0865\ \rho^{0{,}863}$	2	0,290	0,339	−411,1	0,342
M4 pangkat x	$w = 0{,}0038\ x^{0{,}874}$	2	0,315	0,333	−417,9	0,336
M5 berganda	$w = 0{,}016 + 0{,}00166\ x + 0{,}006\ c/d + 0{,}030\ f_{ct} - 0{,}003$ ulir	5	0,349	0,325	−421,7	0,333
MV Vidal et al.	Persamaan (7), parameter asli	0	0,284	0,341	–	–
MA kovarians	$w = a_j + 0{,}00167\ x$ (7 intersep)	8	0,468	0,294	−454,4	0,308



Gambar 2. Lebar retak ekuivalen terhadap penetrasi korosi untuk 192 segmen dari tujuh program uji, beserta model M2, pita kepercayaan 95% bootstrap klaster, dan model berambang Alonso–Vidal

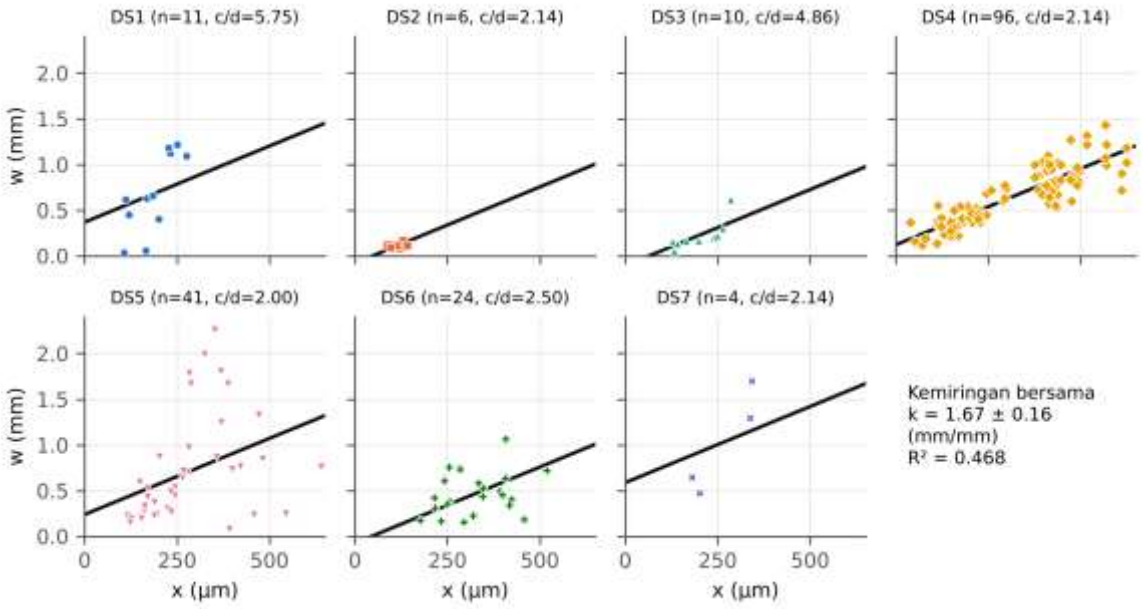
e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Kemiringan M2 adalah k = 1,645 mm per mm penetrasi (galat baku OLS 0,164) dengan IK 95% bootstrap klaster 1,28–2,14 mm/mm. Intersep M2 positif (b_0 = 0,133 mm), sehingga ambang yang diekstrapolasi bernilai negatif, x_0 = −81 µm (IK 95%: −170 sampai −19 µm). Model Vidal et al. dengan parameter aslinya, tanpa fitting ulang, menghasilkan R^2 = 0,284, RMSE = 0,341 mm, bias rata-rata +0,010 mm, dan rasio median prediksi/observasi 1,09.

Pada model berganda M5, hanya x yang signifikan (b_1 = 0,00166 per µm; IK bootstrap 0,00127–0,00225). IK bootstrap koefisien c/d (−0,058 sampai 0,063), f_{ct} (−0,130 sampai 0,245), dan jenis tulangan (−0,175 sampai 0,132) semuanya mencakup nol. Penambahan tiga variabel ini hanya menaikkan R^2 dari 0,346 ke 0,349 dan justru menaikkan AIC dari −426,8 ke −421,7. Kemiringan untuk tulangan ulir (k = 1,65 ± 0,22 mm/mm; n = 139) dan polos (k = 1,66 ± 0,19 mm/mm; n = 53) praktis sama, sedangkan benda uji prisma (k = 3,81 ± 1,01 mm/mm; n = 27) lebih curam daripada balok (k = 1,55 ± 0,18 mm/mm; n = 165).

Gambar 3 menunjukkan model kovarians MA dengan satu kemiringan bersama dan intersep berbeda per program uji. Uji F menunjukkan intersep berbeda nyata antarprogram (F = 7,02; db = 6 dan 184; p < 0,001). Kemiringan bersama k = 1,67 ± 0,16 mm/mm hampir sama dengan k pada M2, sedangkan R^2 naik dari 0,346 menjadi 0,468 dan AIC turun 27,6 satuan. Membiarkan kemiringan berbeda per program uji hanya menaikkan R^2 ke 0,507 (F = 2,35; db = 6 dan 178; p = 0,033). Estimator dalam-benda-uji, yaitu setiap segmen dikurangi rata-rata benda ujinya (24 benda uji dengan lebih dari satu segmen), memberikan k = 1,53 mm/mm dengan R^2 dalam-kelompok 0,50.

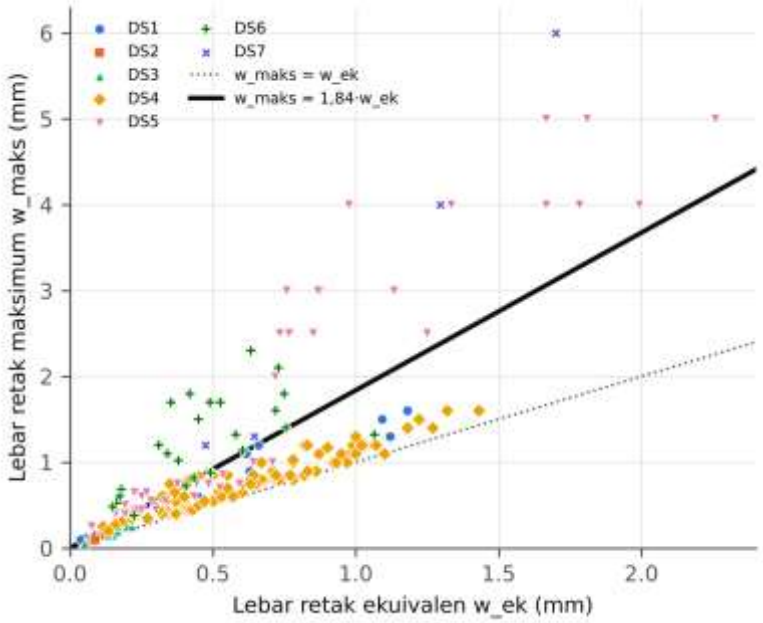


Gambar 3. Model kovarians (MA): garis dengan kemiringan bersama k = 1,67 mm/mm dan intersep berbeda untuk setiap program uji

Validasi tinggalkan-satu-set memberikan RMSE prediksi M2 sebesar 0,15 mm (DS4) sampai 0,54 mm (DS5) dan 0,61 mm (DS7). Gambar 4 memperlihatkan hubungan lebar retak maksimum dan ekuivalen; regresi melalui titik asal memberi w_{maks} = 1,84w (r = 0,805) dengan median rasio 1,44. Rasio ini sekitar 1,2 untuk DS2–DS4 tetapi 2,2–3,0 untuk DS5–DS7.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan



Gambar 4. Lebar retak maksimum terhadap lebar retak ekuivalen per segmen; garis titik-titik adalah $w_{maks} = w$ dan garis tebal adalah regresi melalui titik asal

2. Pembahasan

Melalui persamaan (6), k = 1,645 setara dengan $\alpha_{ef} = 1 + 1{,}645/(2\pi) \approx 1{,}26$. Nilai ini jauh di bawah koefisien ekspansi produk karat yang biasa dilaporkan, yaitu sekitar 2–4 untuk oksida dan hidroksida besi. Artinya, hanya sebagian kecil volume karat yang benar-benar diubah menjadi bukaan retak; sisanya mengisi pori, berdifusi ke dalam retak, atau keluar melalui retak, sebagaimana diasumsikan model zona berpori (Liu and Weyers, 1998). Tafsiran ini mengandaikan w mewakili bukaan retak total segmen; jika w adalah rata-rata beberapa retak, α_{ef} sedikit lebih besar. IK bootstrap k lebih lebar daripada IK OLS (±0,32) karena memperhitungkan korelasi antarsegmen dalam satu balok.

Ambang negatif $x_0 = -81$ µm tidak bermakna secara fisis. Penyebabnya adalah ketiadaan data pada fase inisiasi retak: penetrasi terkecil dalam basis data sekitar 39 µm dan hampir semua segmen sudah retak, sehingga garis yang difit pada fase propagasi tidak dapat mengungkap ambang di luar rentang data. Ambang empiris $x_0 = 7{,}53 + 9{,}32$ c/d memberikan 26–61 µm untuk benda uji di sini, konsisten dengan rentang 15–50 µm yang dilaporkan Alonso et al. (1998). Jika ambang ini dipakai tetap dan hanya k yang difit, diperoleh k = 2,18 mm/mm dengan $R^2 = 0{,}288$. Model Vidal, Castel and François (2004) yang dikembangkan dari benda uji berbeda ternyata hampir tidak bias terhadap data KU Leuven dan hanya sedikit kalah dari M2 yang dikalibrasi langsung pada data ini.

Secara teori, c/d dan f_{ct} mengatur ambang retak melalui kapasitas cincin selimut beton (Tepfers, 1979). Karena data ini didominasi fase propagasi, pengaruh kedua variabel itu pada w tidak terdeteksi, dan hal yang sama berlaku untuk jenis tulangan. Kemiringan prisma yang lebih curam dapat dijelaskan oleh panjang korosi yang pendek (42–100 mm), sehingga ekspansi karat terkonsentrasi; namun jumlah prisma kecil dan IK-nya lebar.

Hasil uji F menunjukkan bahwa sebagian besar variasi antarprogram adalah pergeseran level (intersep), bukan perbedaan laju pertumbuhan retak. Kemiringan dari variasi di dalam satu balok (1,53 mm/mm) dan dari variasi antarbalok (1,65–1,67 mm/mm) konsisten, dan konsistensi ini adalah bukti terkuat bahwa k adalah

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

besaran fisis yang stabil. Intersep dipengaruhi kondisi masing-masing program uji seperti panjang korosi, rapat arus, dan cara pengukuran retak. DS5 menyimpang karena beberapa segmennya memiliki retak sangat lebar ($w > 1{,}5$ mm) pada penetrasi menengah, sedangkan sebagian balok DS6 hanya dikorosi lokal sepanjang 400 mm. Perbedaan rasio w_{maks}/w antarprogram berarti inspeksi yang hanya mencatat retak terlebar akan melebih-lebihkan tingkat korosi rata-rata segmen bila memakai model yang dikalibrasi pada w ekuivalen.

Dalam inspeksi, yang diketahui adalah w dan yang dicari adalah ρ. Dengan membalik M2 dan persamaan (2) diperoleh:

$$\hat{x} = \frac{w - b_0}{k}, \quad \hat{\rho} = 1 - \left(1 - \frac{2\hat{x}}{d}\right)^2 \tag{12}$$

Untuk tulangan d = 14 mm dengan w = 0,3 mm diperoleh $\hat{x} \approx 102$ µm dan $\hat{\rho} \approx 2{,}9\%$, sedangkan untuk w = 0,5 mm diperoleh $\hat{x} \approx 223$ µm dan $\hat{\rho} \approx 6{,}3\%$. Namun RMSE 0,33 mm setara dengan ketidakpastian penetrasi sekitar ±200 µm, sehingga estimasi ini hanya layak sebagai penapisan awal dan harus dilaporkan bersama rentangnya. Residual M2 tidak berdistribusi normal (Shapiro–Wilk $W = 0{,}865$; $p < 0{,}001$) karena ekor kanan dari retak yang sangat lebar, sedangkan uji Breusch–Pagan tidak menemukan heteroskedastisitas yang nyata pada taraf 5% ($LM = 3{,}06$; $p = 0{,}080$); ketidaknormalan ini menjadi alasan IK dihitung dengan bootstrap. Keterbatasan lain adalah semua data berasal dari korosi dipercepat dengan rapat arus tinggi, padahal rapat arus terbukti memengaruhi perilaku retak (Amalia et al., 2021). Pada kondisi ini jenis dan sebaran produk karat dapat berbeda dari korosi alami yang berlangsung jauh lebih lambat, sehingga kesimpulan kuantitatif perlu diverifikasi pada struktur lapangan.

IV. KESIMPULAN

Model matematis hubungan lebar retak dan korosi tulangan yang diturunkan dari keseimbangan volume produk karat berhasil diuji dengan 192 segmen dari basis data KUL-edCCRC. Penetrasi korosi $x = (d/2)(1 - \sqrt{(1 - \rho)})$ terbukti menjadi variabel penjelas yang lebih baik daripada persentase kehilangan massa, dengan $R^2 = 0{,}346$, RMSE = 0,326 mm, dan AIC 6,6 satuan lebih rendah. Kemiringan $k = 1{,}65$ mm/mm (IK 95%: 1,28–2,14) stabil di antara model antarbalok, model kovarians, dan estimator dalam-benda-uji, serta setara dengan koefisien ekspansi efektif sekitar 1,26 yang menunjukkan sebagian besar karat tidak menyumbang bukaan retak. Rasio c/d, kuat tarik beton, dan jenis tulangan tidak berpengaruh nyata setelah x diperhitungkan, model Vidal et al. tanpa kalibrasi ulang hampir tidak bias, perbedaan antarprogram uji terutama berupa pergeseran intersep, dan lebar retak maksimum rata-rata 1,84 kali lebar retak ekuivalen. Penelitian lanjutan disarankan memakai data fase inisiasi retak untuk mengestimasi ambang x_0, menerapkan model efek campuran atau pembaruan Bayes, dan menguji model pada struktur yang mengalami korosi alami.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada C. Martens, E. Vandecruys, C. Van Steen, H. Nasser, dan E. Verstrynge (KU Leuven) yang telah menerbitkan basis data KUL-edCCRC secara terbuka (doi: 10.48804/WO62A4).

DAFTAR PUSTAKA

Akaike, H. (1974) 'A new look at the statistical model identification', *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), pp. 716–723. doi: 10.1109/TAC.1974.1100705.

Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J. and Diez, J. M. (1998) 'Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion', *Materials and Structures*, 31(7), pp. 435–441. doi: 10.1007/BF02480466.

Andrade, C., Alonso, C. and Molina, F. J. (1993) 'Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I – Experimental test',

Materials and Structures, 26(8), pp. 453–464. doi: 10.1007/BF02472805.
Amalia, Z., Saidi, T., Aulia, T. B. and Mahlil, M. (2021) 'Pengaruh densitas arus terhadap perilaku retak beton bertulang yang mengalami korosi tulangan', *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), pp. 351–362. doi: 10.29103/tj.v11i2.507.
Arista, M. R., Komara, I., Propika, J. and Susanti, E. (2021) 'Analisa empiris distribusi korosi tulangan balok beton bertulang berdasarkan kuat tekan dan selimut beton', in *Prosiding Seminar Teknologi Perencanaan, Perancangan, Lingkungan dan Infrastruktur*. Surabaya: ITATS, pp. 177–187.
Astuti, P. (2023) 'Perilaku lentur struktur balok beton bertulang dengan korosi tulangan hingga 50%', *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 19(1), pp. 14–21. doi: 10.25077/jrs.19.1.14-21.2023.
Bažant, Z. P. (1979) 'Physical model for steel corrosion in concrete sea structures – Application', *Journal of the Structural Division*, 105(6), pp. 1155–1166. doi: 10.1061/JSDEAG.0005169.
Burnham, K. P. and Anderson, D. R. (2002) *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. 2nd edn. New York: Springer.
Cameron, A. C., Gelbach, J. B. and Miller, D. L. (2008) 'Bootstrap-based improvements for inference with clustered errors', *The Review of Economics and Statistics*, 90(3), pp. 414–427. doi: 10.1162/rest.90.3.414.
Efron, B. and Tibshirani, R. J. (1993) *An Introduction to the Bootstrap*. Monographs on Statistics and Applied Probability 57. New York: Chapman & Hall.
Liu, Y. and Weyers, R. E. (1998) 'Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures', *ACI Materials Journal*, 95(6), pp. 675–681.
Martens, C., Botte, W., Caspeele, R. and Verstrynge, E. (2024a) 'Bayesian updating of relationships between crack width and corrosion level in reinforced concrete based on a large set of experimental data', *Structural Concrete*. doi: 10.1002/suco.202400581.
Martens, C., Vandecruys, E., Van Steen, C., Nasser, H. and Verstrynge, E. (2024b) *KUL-edCCRC: Experimental Datasets for Concrete Cracking due to Reinforcement Corrosion* [Dataset], KU Leuven RDR, V1. doi: 10.48804/WO62A4.
Nasser, H., Van Steen, C., Vandewalle, L. and Verstrynge, E. (2021) 'An experimental assessment of corrosion damage and bending capacity reduction of singly reinforced concrete beams subjected to accelerated corrosion', *Construction and Building Materials*, 286, p. 122773. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122773.
Nasser, H., Vandewalle, L. and Verstrynge, E. (2022) 'Effect of pre-existing longitudinal and transverse corrosion cracks on the flexural behaviour of corroded RC beams', *Construction and Building Materials*, 319, p. 126141. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126141.
Tepfers, R. (1979) 'Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars', *Magazine of Concrete Research*, 31(106), pp. 3–12. doi: 10.1680/macr.1979.31.106.3.
Van Beirendonck, T., Van Steen, C. and Verstrynge, E. (2022) 'Experimental study of the bond degradation in concrete due to reinforcement corrosion', in *Proceedings of the 14th fib PhD Symposium in Civil Engineering*. Rome, pp. 475–482.
Van Steen, C., Verstrynge, E., Wevers, M. and Vandewalle, L. (2019) 'Assessing the bond behaviour of corroded smooth and ribbed rebars with acoustic emission monitoring', *Cement and Concrete Research*, 120, pp. 176–186. doi: 10.1016/j.cemconres.2019.03.023.
Vandecruys, E., Martens, C., Van Steen, C., Nasser, H., Lombaert, G. and Verstrynge, E. (2022) 'Preliminary results on acoustic emission and vibration-based monitoring of locally corroded reinforced concrete beams', in *Proceedings of the International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*. Zurich. doi: 10.58286/27258.
Vandecruys, E., van de Velde, M., Reynders, E., Lombaert, G. and Verstrynge, E. (2023) 'Experimental study on acoustic emission sensing and vibration monitoring of corroding reinforced concrete beams', *Engineering Structures*, 293, p. 116553. doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116553.
Vidal, T., Castel, A. and François, R. (2004) 'Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete', *Cement and Concrete Research*, 34(1), pp. 165–174. doi: 10.1016/S0008-8846(03)00246-1.