ANALISA EMPIRIS DISTRIBUSI KOROSI TULANGAN BALOK BETON BERTULANG BERDASARKAN KUAT TEKAN DAN SELIMUT BETON

Muhammad Rigga Arista[1*], Indra Komara[2], Jaka Propika[3], Eka Susanti[4]
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, ITATS[1,2,3,4]
*e-mail: riggaarista85@gmail.com**

ABSTRACT

Corrosion is an important aspect in terms of durability and degradation of capacity over service life. In this study, the variable durability based on the quality of the concrete and the thickness of the concrete cover was investigated. Three consecutive grades of concrete, 30 Mpa, 40 Mpa and 50 Mpa followed by a concrete cover, 20mm, 30mm and 40mm were analyzed. All these parameters are implemented on beam structural elements that are positioned against the coast and categorized as W1, concrete structures that are in contact with water and must have good permeability. The evaluation was carried out empirically by observing the corrosion acceleration to a service time of 25 years. The results of the empirical analysis will be compared with structural modeling in year 1 using the ETABS program followed by analysis of crack behavior and patterns using Response 2000. As a result, the smaller the thickness of the concrete cover the greater the mass loss value that will be obtained. This value is directly proportional to the corrosion distribution. The compressive strength value of concrete in this case provides an increase in the nominal moment and structure behavior, however the greater the value of the quality of the concrete the brittle the beam will occur, which will increase the value of mass loss. In addition, the crack width and corrosion distribution per year increased with a uniform corrosion distribution.

Keywords: *Durability, Reinforced Concrete, Moment of Capacity, Corrosion*

ABSTRAK

Korosi menjadi pertimbangan penting dalam hal durabilitas dan degradasi kapasitas sesuai masa layan. Pada studi ini variable durabilitas berdasarkan mutu beton dan tebal selimut beton di investigasi. Tiga macam mutu beton berurutan, 30 Mpa, 40 Mpa dan 50 Mpa disertai tebal selimut beton 20mm, 30mm dan 40mm dianalisa. Semua parameter tersebut di implementasikan pada elemen struktur balok yang diposisikan dengan dengan pantai dan dikategorikan sebagai struktur tangka W1 atau struktur beton yang berkontak dengan air dan harus memiliki permeabilitas yang baik. Evaluasi dilakukan secara empiris dengan meninjau percepatan korosi hingga waktu layan 25 tahun. Hasil analisa empiris akan dibandingkan dengan pemodelan struktur pada tahun ke 1 menggunakan program bantu ETABS di ikuti analisa perilaku dan pola retak menggunakan Response 2000. Sebagai hasil, semakin kecil tebal selimut beton semakin besar nilai *mass loss* yang akan didapatkan. Nilai tersebut berbanding lurus dengan distribusi korosi. Nilai kuat tekan beton dalam hal ini memberikan peningkatan momen nominal dan perilaku struktur, akan tetapi semakin besar nilai mutu beton semakin *brittle* perliku balok tersebut yang mana akan memperbesar nilai *mass loss.* Sebagai tambahan lebar retak dan distribusi korosi pertahun mengalami peningkatan dengan tinjauan korosi secara *uniform.*

Kata Kunci : Durabilitas, beton bertulang, momen kapasitas, korosi

PENDAHULUAN

Pertumbuhan infrastruktur tepi pantai baik berupa hunian atau fasilitas umum dari tahun ke tahun semakin meningkat, salah satu data BPS (2019) menunjukan sekitar 10% terjadi peningkatan dari tahun 2018. Dari data tersebut, hampir 80% infrastruktur terbangun merupakan struktur beton bertulang. Karena selain tersedia secara lokal, struktur beton juga relatif lebih murah dan memiliki ketahanan yang baik dibandingkan baja khususnya pada wilayah yang memiliki indeks klorida yang tinggi. Pada daerah tepi pantai, infrastruktur akan dengan mudah terpapar pada zona basah dan kering akibat pasang dan surut yang menyebabkan retak serta susut secara signifikan. Hal tersebut, ditambah dengan konten klorida air laut yang bersifat asam yang dapat mendegradasi kapasitas material sehingga mempercepat kerusakan. Penurunan kapasitas struktur beton bertulang berbanding dengan peningkatan korosi karena kapasitas tulangan akan hilang setelah adanya produk karat [1], [2].

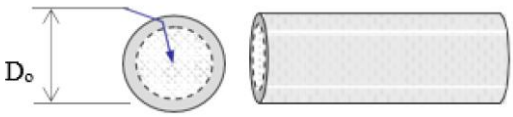
Beberapa parameter lain dijelaskan dalam studi terdahulu, salah satu diantaranya dilakukan studi oleh Wibowo (2007) menganalisa pengaruh penurunan kapasitas struktur beton bertulang berbanding dengan peningkatan korosi, yang mana hanya menginvestigasi pengurangan kapasitas pada tulangan longitudinal [3]. Lainnya oleh Maleej (2003) melakukan evaluasi deformasi pada struktur balok yang terkena paparan klorida dengan mengindikasi kegagalan struktur secara signifikan berdasarkan metode *patching* berdasarkan konsep durabilitas dan perilaku struktur [4]. Secara umum tulangan baja dalam beton beton tidak akan dengan mudah terkorosi apabila konsistensi matrix beton yang dipakai memiliki properti yang baik [5]–[7]. Tulangan baja dalam beton beton tidak akan dengan mudah terkorosi apabila konsistensi matrix beton yang dipakai memiliki properti yang baik, mutu beton tidak sesuai, kondisi aus akibat beban lingkungan akan menginisiasi retak dan susut yang menyebabkan proses kimia berlangsung dengan cepat ke bagian tulangan di dalam beton [8]. Akan tetapi apabila mutu beton tidak sesuai, kondisi aus akibat beban lingkungan akan menginisiasi retak dan susut yang menyebabkan proses kimia berlangsung dengan cepat ke bagian tulangan di dalam beton. Kemudian akan mengakibatkan proses korosi serta penurunan kapasitas secara drastis. Sebagai tambahan, tingkat korosi infrastruktur di Indonesia dapat terjadi sebelum umur layan rencana bangunan tersebut dengan prediksi perbaikan rutin sebesar 15% dari total biaya pembangunan [9]. Sehingga menjadi penting untuk melakukan evaluasi teknis terkait penurunan kapasitas berbanding durabilitas atau masa layan struktur khususnya di area tepi pantai.

Analisa durabilitas struktur beton balok bertulang dengan perletakan sederhana akan dianalisa dengan pertimbangan paparan akibat pengaruh klorida air laut [6], [10]. Penurunan kapasitas tulangan dengan memberikan indikasi kikisan pada wilayah selimut beton. Selimut beton pada studi akan dievaluasi kedalam beberapa kondisi ketebalan yaitu, 20 mm, 30 mm dan 40 mm yang mana akan diposisikan pada beban lingkungan dan perencanaan yang sama. Penggunaan mutu beton (*fc*) tinggi akan mempengaruhi koefisien difusi menjadi rendah, selimut beton pada struktur beton bertujuan untuk mengurangi kegagalan / kerusakan struktur (korosi). Variasi tebal selimut beton pada ukuran 40 mm dan mutu beton (*fc)* 22 Mpa dapat menahan kerusakan sekitar 50 tahun artinya tebal selimut dengan kombinasi mutu beton dapat mempengaruhi kualitas struktur dan waktu percepatan kerusakan akibat korosi. Studi lain juga mendukung implementasi studi khususnya terkait parameter lingkungan yang mempengaruhi kapasitas struktur berbasis peningkatan nilai angka korosi [11]–[16]. Sehingga pada penelitian ini dilakukan analisa variasi tebal selimut beton dengan variable mutu beton yang mana melihat proses prosentase *mass loss* dan kapasitas sisa berbasis waktu.

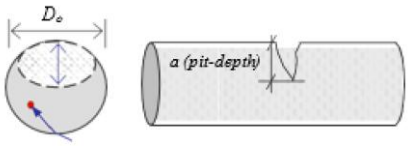
TINJAUAN PUSTAKA

Durabilitas Beton Bertulang Akibat Pengaruh Korosi

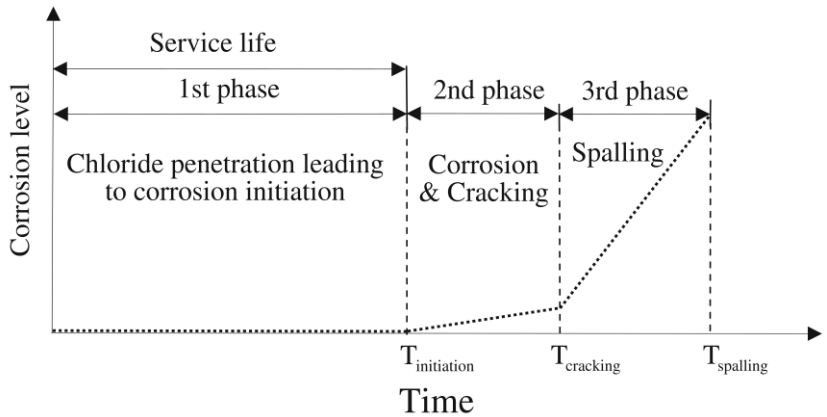
Durabilitas beton didefinisikan sebagai kemampuan beton untuk menahan aksi pelapukan, pengaruh lingkungan, serangan kimia, abrasi dan sekaligus mempertahankan sifat beton yang diinginkan [17]. Beton yang tahan lama adalah beton yang bertahan dengan baik di bawah kondisi paparan cuaca dan bertahan sesuai dengan umur struktur yang telah ditentukan [18]. Durabilitas beton terhadap beban struktur dapat diketahui dengan cara melihat kuat tekan hancur beton dan kuat tarik beton tersebut. Kuat tekan hancur beton merupakan kekuatan beton untuk memikul beban rencana sebelum mengalami kehancuran sedangkan kuat tarik merupakan kemampuan beton menahan tarikan. Faktor tersebut mendasari evaluasi kinerja kapasitas penampang pada suatu elemen struktur. Salah satu faktor penentu yang variablenya masih tidak diketahui secara pasti adalah akibat degradasi kapasitas oleh proses korosi. Korosi dikategorikan sebagai kerusakan ataupun penurunan kualitas material logam yang disebabkan oleh reaksi dengan lingkungan dimana tempat keberadaannya [19]. Karena proses tersebut tidak dapat dihindarkan, maka diperlukan penanganan khusus atau investigasi perilaku agar tidak terjadi kegagalan struktur secara mendadak. Seperti kegagalan terdeterorasi yang terjadi di slab jembatan. Proses korosi tidak dapat dielakan pada suatu infrastruktur yang memiliki material baja akan tetapi dapat diperlambat lajunya, sehingga usia pakai suatu material logam dapat ditingkatkan sebelum saatnya mengalami kerusakan. Model korosi yang sering terjadi pada beton bertulang adalah korosi porpagasi. Korosi propagasi adalah proses masuknya ion klorida (Cl-) yang berdisfusi ke lapisan pasih tulangan sehingga menyebabkan penurunan kapasitas struktur. Korosi propagasi dibagi menjadi dua yaitu korosi setempat, *pitting corrosion* dan korosi seragam, *uniform corrosion* [20]. Ilustrasi korosi setempat dan korosi seragam dapa dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Sedangkan proses terjadinya korosi yang di awali dari inisiasi, proses pengembangan korosi dan kerusakan dapat di lihat pada Gambar 3. Sebagai tambahan *proposed model* terkait korosi seragam mengacu sesuai Steward (2000) dan di ilustrasikan pada Gambar 4.



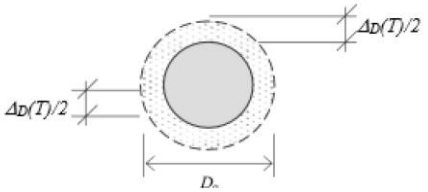
Gambar 1. Korosi seragam [11]



Gambar 2. Korosi tidak seragam [11]



Gambar 3. Mekanisme terjadinya korosi [20]



Gambar 4. Pemodelan korosi [11]

Evaluasi acuan yang digunakan sebagai pertimbangan terjadinya inisiasi korosi adalah berdasarkan Zhang dan Lounis (2006) yaitu kajian berdasarkan hukum *fick* kedua dengan pendekatan sederhana berbasis polynomial pangkat dua belas sesuai dengan presentasi persamaan (1) [21]. *Ti* adalah waktu inisiasi korosi dengan nilai kadar garam pada permukaan beton adalah *Co*. Sedangkan untuk kadar garam kritis pada permukaan besi tulangan dan koefisien difusi berurutan adalah *Cth* dan *D*. Parameter lain selanjutnya dalah tebal selimut beton, *dc*, dan koefisien polynomial fungsi pangkat dua belas, *Ai*. Data lain yang digunakan adalah prediksi percepatan korosi, i_{corr} sesuai persamaan (2) & (4) yang mana parameter penentuan klorida sesuai persamaan (3). *w/c* yang disebutkan dalam persamaan adalah faktor air semen sedangkan i_{corr} *(t)* dan i_{corr} *-20* berurutan adalah kecepatan korosi pada suhu kurang dari 20°C dan kecepatan korosi pada suhu 20°C.

Di Indonesia suhu rata-rata adalah 28-30°C, sehingga persamaan (2) harus dilakukan penyesuaian khususnya dengan dilakukan investigasi di laboratorium. Perumusan yang telah disesuaikan mengacu pada Persamaan (4). Konsep analisa empiris biasanya disesuaikan dengan parameter percepatan korosi untuk mendapatkan evaluasi berbasis waktu, sehingga dapat di investigasi dalam waktu yang relatif lebih singkat, seperti beberapa ivestigasi yang sudah dilakukan oleh beberapa peneliti menggunakan metode *Galvano static* untuk *accelerated corrosion test* [22]. Selain itu, sesuai SNI 2847:2019, harus mempertimbangkan kategori dan kelas paparan yang sejalan dengan percepatan karat yang disampaikan pada Tabel 1 [23].

Berdasarkan kelas paparan tersebut, campuran beton harus memenuhi persyaratan yang dirujuk. Sebagai contoh persyaratan campuran beton untuk komponen yang ditetapkan pada kelas paparan W1 (Kontak dengan Air) dan kelas paparan S2 (Sulfat) akan membutuhkan beton untuk memenuhi *w/c* maksimum sebesar 0,45 dan *fc'* minimum sebesar 31 Mpa. Kemudian, lamanya infiltrasi ion Cl− sampai ke permukaan baja tulangan ditentukan oleh prediksi waktu. Proses infiltrasi ion Cl− kedalam beton karena terjadinya difusi atau proses perembesan. Sesuai dengan persamaan (3), penentuan struktur lentur yang terkena pengaruh lingkungan pada bangunan harus ditambahkan koefisien difusi ion klorida Cl− terhadap ratio air semen, koefisien difusi gas O2 terhadap *w/c*, volume pori-pori di zona transisi terhadap *w/c* dan berat senyawa hasil reaksi korosi, sehingga analisa kapasitas dapat terhitung sesuai. Parameter dari persamaan (3) meliputi C_0, terkait konsentrasi ion klorida dalam kg/m^3, parameter akibat pengaruh kuat angin, *a*, jarak bangunan dari garis pantai dalam *km*, perkiraan jarak terjauh dari jangkauan klorida, x_o, dan *b* yang merupakan parameter akibat pengaruh topografi.

Bangunan beton yang dekat dengan wilayah pantai memiliki kelembaban relatif tinggi dikarenakan jumlah uap air dan suhu yang lebih tinggi dibandingkan wilayah yang jauh dari pantai. Hal tersebut berarti untuk bangunan yang jaraknya dekat dengan pantai maka makin pendek waktu inisiasi korosi dan sebaliknya untuk bangunan yang jaraknya jauh dari pantai maka makin panjang pula waktu inisiasi korosinya. Dengan kata lain, ada parameter difusi yang dipengaruhi faktor korosif. Semakin berkualitas beton maka semakin rendah nilai koefisien difusinya dan semakin kecil kecepatan masuknya zat-zat korosif dalam beton. Faktor air semen juga sangat mempengaruhi karena sifat alkali air dipermukaan baja dalam beton terbentuk sebuah lapisan pasif yang dapat menyebabkan baja terlindung dari pengaruh luar. Baja baru bisa terkorosi bila lapisan pasif ini rusak.

Tabel 1. Kelas paparan sesuai SNI 2847:2019 [23]

Kategori	Kelas	Kondisi	
Sulfat (S)		Sulfat SO42 larut dalam air dan tanah dalam persen masa[1]	Sulfat (SO42) larut dalam air dalam ppm[2]
	S0	SO42- < 0,10	SO42- < 150
	S1	0,10 ≤ SO42- <0,20	150 ≤ SO42- < 1500 atau air laut
	S2	0,20 ≤ SO42- <2,00	1500 ≤ SO42- ≤ 10.000
	S3	SO42- > 2,00	SO42- > 10.000
Kontak dengan air (W)	W0	Beton kering kondisi layan , Beton kontak dengan air dan permeabilitas rendah tidak disyaratkan	
	W1	Beton kontak dengan air dan permeabilitas rendah disyaratkan	
Proteksi korosi tulangan (C)	C0	Beton kering atau terlindung dari kelembapan	
	C1	Beton terpapar terhadap kelembaban tetapi tidak terhadap sumber klorida luar	
	C2	Beton terpapar terhadap kelembaban dan sumber klorida eksternal dari bahan kimia, garam, air asin, air payau, atau percikan dari sumber-sumber ini	

$$T_i\ (C_o, C_{th}, D, d_c) = \frac{d_c^2}{4D}\sum_i^{12} A_i \left(\frac{C_{th}}{C_o}\right)^i \quad (1)$$

$$i_{corr} = \frac{27.0 \times \left(1 - \frac{w}{c}\right)^{-1.64}}{d_c}\ \mu A/cm^2 \quad (2)$$

$$C_o = C_o \times exp \times \left[a \times \left(\frac{x}{x_0}\right)^b\right] \quad (3)$$

$$i_{corr} = i_{corr} - 20 \times [1 + 0.073(t - 20)] \quad (4)$$

$$w/c = \frac{27}{f_{cyl} + 13.5} \quad (5) \qquad f_{cyl} = f_c' + 7.5 \quad (6)$$

$$D = 10 - 10 + \left(4.66 \times \frac{w}{c}\right) \quad (7) \qquad \Delta m = \frac{M \times I \times t}{Z \times F} \quad (8)$$

$$\varphi Mn = \varphi \times A_s \times f_y \times \left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (9) \qquad \Delta D(T_o) = 0.0232 \times i_{corr} \times T_o \quad (10)$$

$$A(T_o) = \frac{\pi}{4}(D_0 - 0.0232 \times i_{corr} \times T_o) \quad (11) \qquad Mn(T_o) = A(T_o) \times f_y \times 0.8h \quad (12)$$

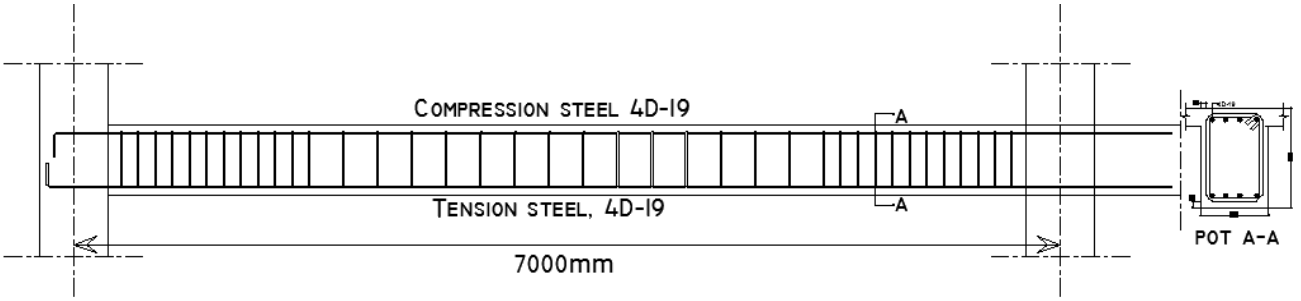
Faktanya, nilai difusi material beton dipengaruhi oleh *w/c* yang mana sesuai persamaan (5) dan (6) sejalan dengan kapasitas tekan betonnya, *f'c* dan yang direncanakan, *f'cyl*. Sebagai alternatif penyederhanaan koefisien difusi dapat diambil berdasarkan Stewart dan Rosowsky (1998) dan di informasikan pada persamaan (7). Persamaan tersebut berkorelasi dengan metode percepatan korosi berdasarkan hukum Faraday, untuk menginvestigasi perkiraan jumlah tulangan baja yang hilang, sesuai persamaan (8). Kehilangan masa tulangan tersebut dipengaruhi oleh nilai masa dari baja, *M*, yang memiliki nilai 56 gram/mol, nilai *Z*, valensi dari *Fe* senilai 2 disertai konstanta Faraday dan waktu dalam tahun, berurutan, *F* sebesar 96.5 Ampere detik dan *t* setara 31536000 detik. Sedangkan nilai *I* adalah nilai besarnya arus yang diberikan dalam Ampere [21], [24], [25].

Kapasitas Lentur Akibat Pengaruh Korosi

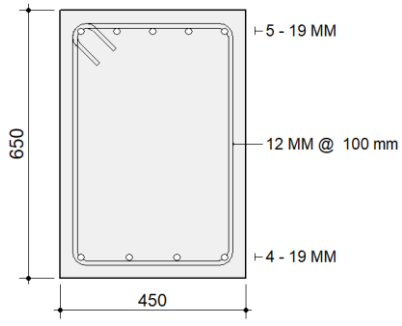
Analisis kapasitas balok bergantung pada nilai momen nominal, *Mn* dan geser nominal, *Vn*, yang mana akan dibandingkan degradasinya berdasarkan nilai prosentasi korosi yang terjadi. Persamaan (9) meninjau kapasitas *Mn* pada suatu balok dan persamaan (10-11) meninjau kapasitas *Mn* yang terdegradasi korosi. Faktor reduksi yang dipakai untuk elemen balok berdasarkan SNI 2847:2019, *θ,* adalah 0.9. *As* adalah luas tulangan longitudinal dengan *fy* merupakan kuat tarik tulangan dalam MPa. Selanjutnya adalah *d* dan *a* yang mana disampaikan secara berurutan adalah tinggi efektif balok dalam *mm* dan tinggi blok tegangan tekan beton perseki ekuivalen dalam *mm* [23]. Apabila korosi yang ditinjau adalah dengan pendekatan korosi seragam, maka pengurangan luas penampang ΔA dihitung setelah inisiasi korosi, *Ti*.

METODE PENELITIAN

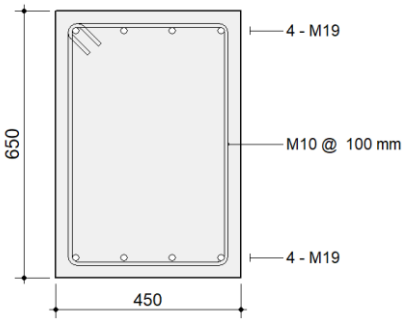
Investigasi awal dilakukan berupa kajian penentuan parameter meliputi evaluasi dimensi penampang dan penentuan prediksi korosi dengan alokasi masa layan 25 tahun dan juga penentuan parameter lingkungan. Penampang balok ditentukan berdasarkan kajian *preliminary design* struktur hunian berupa hotel 8 lt. di dekat pantai. Kemudian setelah diketahui dimensi penampang balok yang telah memenuhi rasio kapasitas, dikaji berdasarkan nilai selimut beton. Nilai selimut beton tersebut dipakai sebagai pertimbangan penentuan parameter berupa *dc* sebesar 20mm, 30mm dan 40mm. Detail ilustrasi penampang disertai dengan penulangan yang telah memenuhi evaluasi dapat dilihat pada Gambar 5.



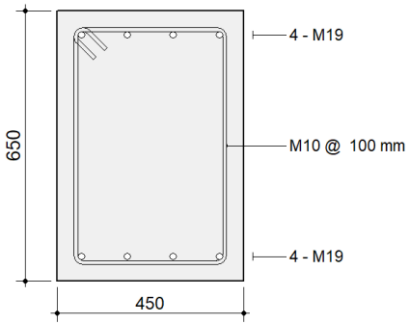
Detail penulangan memanjang disertai dengan potongan



Potongan penampang, *dc* 20mm



Potongan penampang, *dc* 30mm

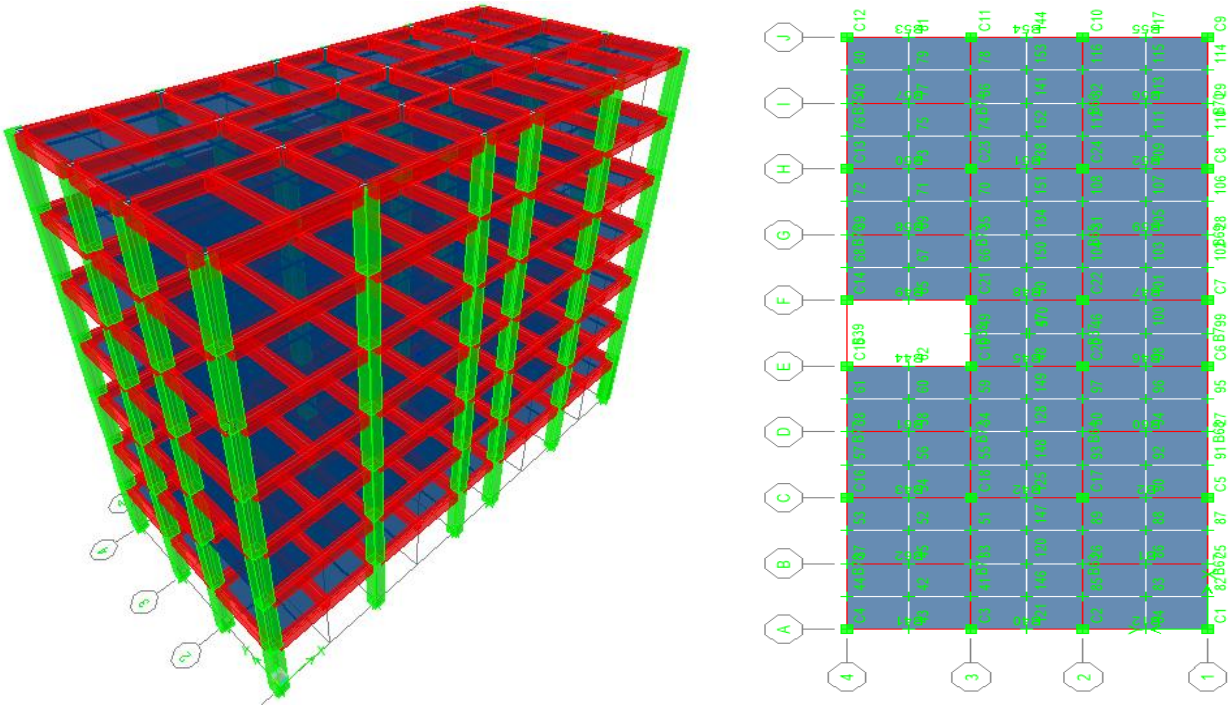


Potongan penampang, *dc* 40mm

Gambar 5. Detail penampang balok yang dianalisa berdasarkan variable selimut beton

Selanjutnya parameter lingkungan yang ditujukan untuk mengetahui nilai kehilangan baja pada saat terjadi korosi dan ketahanan tulangan berupa *mm/tahun* ditentukan berdasarkan penelitian terdahulu [10-11]. Parameter tersebut meliputi (1) Faktor pengali kecepatan korosi suhu 30° C, (2) Kehilangan massa tulangan perkiraan sebesar 2% /tahun, (3) Kandungan klorida sebesar 5%. Tahapan selanjutnya adalah evaluasi berdasarkan analisa empiris menggunakan persamaan-persamaan yang disampaikan sebelumnya yang akan dikontrol menggunakan program bantu ETABS dan Response 2000. Illustrasi model ETABS dapat dilihat berdasarkan Gambar 6. Lainnya, beban dan kombinasi merujuk SNI 1726:2019. Selain variable mutu, korelasi kuat tekan juga diimplementasikan sebagai parameter pembanding yang diterapkan pada beton, yaitu *f'c* dengan nilai 50 Mpa, 40 Mpa dan 30 Mpa. Penentuan korelasi antara variable selimut beton dengan mutu dijadikan pertimbangan berdasarkan investigasi dari penelitian sebelumnya yang menganalisa mutu beton dengan ketebalan yang sama [1]. Sebagai informasi tambahan pada struktur, lokasi bangunan diaplikasikan di kota Surabaya dengan kondisi situs C yaitu berada pada kondisi tanah keras atau berupa batuan lunak dengan nilai *Ss dan* S_1 berurutan sebesar 0.705 dan 0.305.

Setelah kondisi struktur terpenuhi dan dilakukan analisa kapasitas serta perilaku struktur berdasarkan beban servis, maka dilanjutkan dengan analisa prediksi korosi hingga 25 tahun kedepan. Acuan analisa pemodelan korosi mengadopsi Darmawan, dkk (2006) dan Maalej, dkk (2003) dengan membandingkan prosentasi *mass loss* akibat korosi [2], [26], [27] Tahapan selanjutnya adalah evaluasi retak dan kapasitas sisa yang dianalisa secara empiris dan dikontrol dengan menggunakan Response 2000. Pada tahapan ini juga dapat dikategorikan sebagai kontrol parameter desain, mengacu pada sistem rangka pemikul momen khusus (SRPMK) yang di ikuti dengan kontrol kinerja. Evaluasi kinerja dicocokan dengan parameter durabilitas sesuai dengan SNI 2847-2019, berupa *displacement, curvature, shear force*, hubungan *shear force* dan *displacement, crack* balok serta prediksi durabilitas presentase kapasitas struktur balok kurang dari momen ultimate.



Tampak 3D struktur bangunan Denah struktur bangunan

Gambar 6. Perspektif bangunan yang dianalisa berdasarkan pemodelan ETABS

HASIL DAN PEMBAHASAN.

Evaluasi Elemen Balok Berdasrkan Kelas Paparan Mutu Beton Denga Nilai Faktor Air Semen

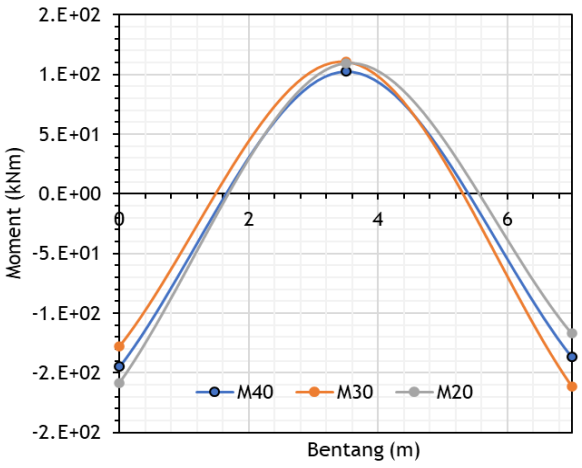
Pada tahapan awal, *preliminary design* kapasitas elemen balok dilakukan dengan mengacu pada SNI 2847:2019 terkait penentuan penampang menggunakan konsep SRPMK. Sistem tersebut dipertimbangkan sesuai dengan kondisi eksisting pada bangunan yang di ilustrasikan pada Gambar 6. Beberapa persyaratan yang dibuat adalah bentang bersih komponen struktur tidak kurang dari empat kali dari tinggi efektifnya, lebar dari tinggi tidak lebih kecil dari 0.3*h* atau 250 dan lebar balok yang melampaui kolom tidak melebihi nilai terkecil yang disyaratkan. Tinggi balok dan lebar balok yang dipertimbangkan berdasarkan bentang 7m serta memenuhi kontrol kriteria adalah berurutan 650mm dan 450mm. Evaluasi kapasitas momen dan geser dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8. Berdasarkan presentasi gambar tersebut dapat diketahui bahwa distribusi momen dan gaya terbesar diterima oleh elemen struktur dengan nilai selimut beton

terkecil sebesar 158 kNm dan 108 kN, secara berurutan. Analisa yang dilakukan adalah hasil investigasi secara empiris dan pemodelan menggunakan ETABS.

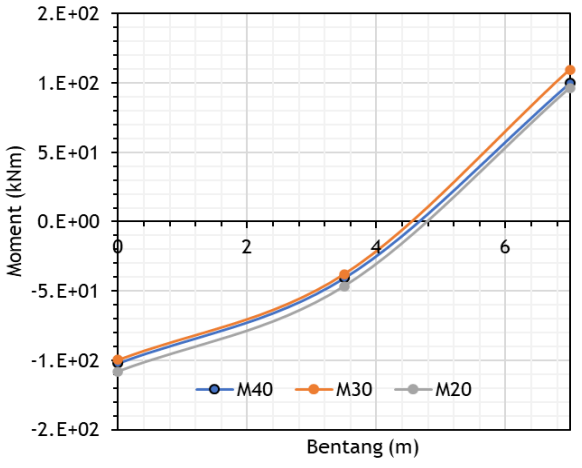
Selanjutnya adalah kontrol struktur lentur terhadap SNI 2847:2019 yang mana telah memenuhi nilai *Ln* lebih besar dari 4*d* untuk setiap parameter mutu beton dan *dc.* Begitu halnya untuk perbandingan setiap dimensi penampang memenuhi persyaratan yang diharuskan dengan nilai 0.7. Pada tahapan akhir adalah evaluasi tulangan terpasang, dimulai dari evaluasi nilai rasio desain balok dengan asumsi penampang terkendali tarik menggunakan faktor 0.9 didapatkan nilai tersebut atau *Rn*, 1.033 sebagai nilai maksimum dari setiap variable. Sebagai hasil didapatkan dimensi penampang tulangan berurutan dari selimut beton 20mm, 30mm dan 40mm adalah 5D19, 4D19 dan 4D19. Sedangkan untuk penulangan geser yang diterapkan pada semua parameter menggunakan D12 dengan jarak 100mm pada wilayah sendi plastis dan jarak 250mm diluar sendi plastis, menggunakan *closed stirup.* Momen nominal, *Mn*, untuk setiap kondisi selimut beton memiliki rasio yang berbeda dan apabila ditinjau pada satu jenis selimut beton, nilai *Mn* terpaut tidak terlalu berbeda. *Mn* terbesar didapat oleh elemen beton dengan nilai selimut beton 40mm yaitu 220 kNm. Nilai tersebut dibandingkan dengan kapasitas ultimat yang diterima oleh struktur yang nilainya harus lebih kecil dari nilai *Mn.*

Pada tahapan selanjutnya adalah korelasi perhitungan akibat pengaruh korosi. Evaluasi merujuk pada persamaan (5) dan (6) sebagai dasar untuk menentukan nilai percepatan korosi berbasis mutu kuat tekan beton. Koefisien faktor air semen, *w/c* didapat sebesar 0.53, 0.44 dan 0.38 secara berurutan dari mutu beton terkecil dengan kuat tekan rencana sebesar 37.5 – 40 Mpa. Pada SNI 2847:2019 berdasarkan kategori kelas paparan, mutu beton atau nilai *f'c* di cocokan dengan nilai *w/c* untuk menentukan batasan minimum sesuai kelas paparan. Sehingga didapatkan kelas paparan *W0* untuk *f'c* 30 Mpa dan kelas paparan *W1* untuk *f'c* 40 Mpa dan 50 Mpa. *W0* adalah kategori material yang memiliki permeabilitas rendah ketika kontak langsung dengan air dengan peruntukan pada wilayah kering sedangkan *W1* adalah kategori material yang diperbolehkan kontak langsung dengan air dengan persyaratan permeabilitas yang tinggi.

Selanjutnya adalah melakukan analisa percepatan korosi, $I_{corr,}$ yang diambil berdasarkan kehilangan massa tulangan. Analisa menggunakan persamaan (2) dengan nilai 4.02 µA/cm^2. Di studi yang dilakukan, penurunan kapasitas berdasarkan nilai I_{corr} diinvestigasi per tahun dengan prediksi penurunan signifikan pertahun adalah sebesar 2% sesuai dengan Bastian (2020) yang menganalisa menggunakan percepatan korosi. Pehitungan tersebut dikorelasikan dengan kapasitas lentur nominal, *Mn*, yang sebelumnya dianalisa atau disebut Balok T_0 yang kemudian diinvestigasi degradasi kapasitasnya berdasarkan nilai balok terkorosi atau T_1 hingga T_{25}. Merujuk pada persamaan (8) akan didapatkan nilai I_{corr} per satu buah tulangan yang nanti akan dikorelasikan kepada jumlah tulangan terpasang. Setelah didapatkan nilai tersebut kemudian di investigasi penurunan kapasitas berdasarkan degradasi luas tulangan aktual sesuai dengan waktu tinjauan. Persamaan polinomial pangkat dua belas dipakai sebagai parameter empiris yang menentukan koefisien kapasitas. Nilai polinomial pangkat dua belas tersebut dapat dilihat pada Gambar 9. Koefisien dari Gambar 9 adalah faktor pengali distribusi percepatan korosi yang ditinjau. Pada umumnya analisa korosi dapat dianalisa dengan dua konsep yakni secara normal dan dengan metode percepatan. Metode percepatan menjadi konsep analisa korosi yang umum dipakai dikarenakan dapat mengetahui perilaku durabilitas pada elemen struktur secara cepat. Analisa yang dilakukan ini berdasarkan konsep empiris menggunakan metode percepatan. Sehingga diperlukan koefisien pendekatan sebagai faktor evaluasi. Pada kondisi korosi secara normal umumnya digunakan konsep *water and drying* dalam kurun waktu tertentu yang konsep investigasinya dilakukan sama persis seperti metode percepatan. Yang menjadi tinjauan penentu dalam hal ini adalah unsur waktu.



Gambar 7. Distribusi momen berdasarkan bentang dengan variable nilai d_c



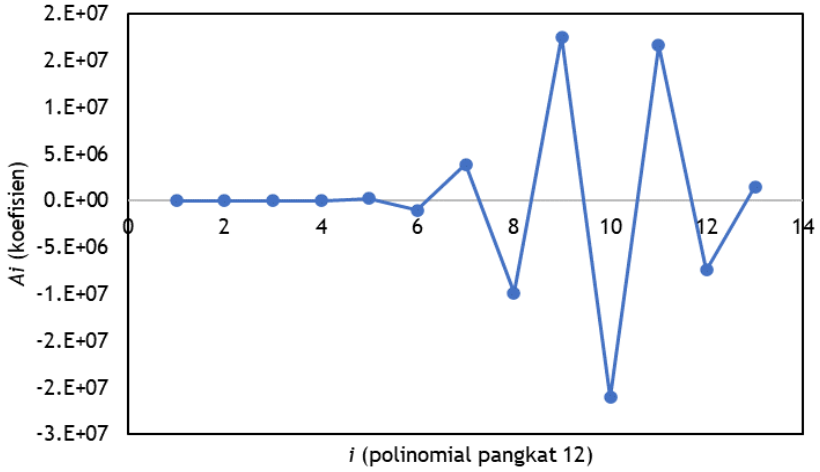
Gambar 8. Distribusi gaya geser berdasarkan bentang dengan variable nilai d_c

Hasil evaluasi balok akibat pengaruh degradasi korosi dapat dilihat pada Gambar 10 – 15. Sesuai informasi sebelumnya analisa degradasi korosi diinvestigasi berdasarkan variable mutu beton dengan parameter tebal selimut beton. Gambar 1 hingga Gambar 3 menjelaskan perbandingan kehilangan luasan tulangan longitudinal terpasang yakni 4D19. Apabila diperhatikan secara detail, kehilangan luasan area dalam berat penampang atau di informasikan sebagai Δw pada balok dengan selimut beton 20mm lebih besar dibandingkan dengan balok yang memiliki selimut beton 30mm dan 40mm. Pada umur tinjauan 25 tahun di balok dengan selimut beton 20mm juga memiliki kehilangan berat tulang mencapai 3 kali lebih besar daripada daripada balok dengan selimut beton 40mm. Hal tersebut berperilaku secara liniar dengan mutu beton yang dipakai. Sehingga dapat disimpulkan degradasi nilai Δw sangat dipengaruhi olehi nilai *dc*. Kehilangan tulangan berbasis berat juga menjadi indikasi penurunan kapasitas yang disampaikan pada Gambar 13 hingga Gambar 15. Semakin tebal nilai *dc* semakin baik pula tahanan nominalnya. Perhitungan kapasitas ini diasumsikan berdasarkan *uniformed corrosion* yang mana tulangan longitudinal pada balok terjadi secara seragam dengan kecepatan yang sama. Sebagai tambahan, mutu beton 40 dan 50 MPa menghasilkan nilai kapasitas yang tidak begitu jauh, hal tersebut dibuktikan dengan grafik yang slalu berdampingan.

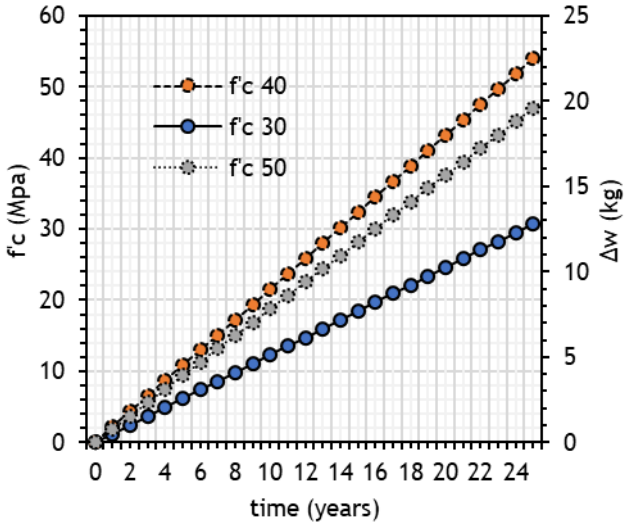
Setelah diketahui parameter kapasitas *vs* waktu untuk setiap variable, tahapan selanjutnya adalah *input* data pemodelan di program Response 2000. Response 2000 yang digunakan adalah versi 1.9.6 yang diperuntukan untuk menganalisa *sectional analysis* beton bertulang menggunakan metode *modified compression field theory*. Penggunaan program ini juga berdasarkan hasil *output* ETABS v.18 yang mana pada bagian *sectional load* akan diinputkan hasil distribusi momen dan gaya pada setiap kondisi. Hasil perilaku perubahan berbasis kapasitaspun dapat dibandingkan antara Response 2000 dan Etabs, seperti nilai besarnya deformasi dan gaya. Selain kapasitas penampang, pola retak yang dihasilkan berdasarkan fungsi kapasitas juga dapat di investigasi. Gambar 16 hingga 18 mengilustrasikan pola retak T_1 dan T_{25} berdasarkan variabel mutu dan selimut beton. Pola retak tersebut di investigasi berdasarkan perbedaan kapasitas setiap tahunnya menyesuaikan parameter korosi dari tahun ke 1 hingga tahun ke 25, T_1 - $T_{25.}$ Kondisi linear berperan pada perilaku retak, yang mana retak terbesar dialami oleh penampang dengan nilai selimut beton lebih kecil. Hal tesebut berperilaku sama untuk semua penampang diikuti dengan variabel mutu yang mana setiap tahun benda uji juga mengalami degradasi kapasitas di ikuti penambahan lebar retak sejalan dengan proses terjadinya korosi. Lebar retak secara signifikan mengalami peningkatan setiap 5 tahunan sebesar 0.02mm.

Jika melihat pada pola retak T_1, kapasitas layan masih terpenuhi dengan nilai retak yang relatif sangat kecil dibawah 0.6mm yang berada di tengah bentang untuk semua kondisi. Jumlah retak dan lebar retakpun tidak mencapai tulangan longitudinal bagian atas. Lebar dan panjang retak kian meningkat seiring dengan distribusi karat yang diberikan. Sehingga didapatkan ilustrasi retak pada T_{25} yang mana terjadi hingga 20 kali lipat nilainya untuk balok dengan selimut beton 20mm (lihat Gambar 16) dan masing-masing 8 kali dan 6 kali lipat untuk selimut beton 30mm dan 40mm (lihat Gambar 17 dan 18). Hal ini dapat menyatakan bahwa ketebalan selimut beton juga menentukan proses distribusi karat yang mana berakibat kepada penurunan kapasitas secara signifikan. Nilai mutu beton juga menjadi penentu proses degradasi, akan tetapi apabila mutu beton terlalu tinggi nilai, beton akan cenderung memiliki pola retak yang sama dengan mutu beton rendah. Sehingga perbandingan tebal selimut beton dan mutu beton juga harus dipertimbangkan dengan baik karena akan menentukan perilaku struktur dalam distribusi retak.

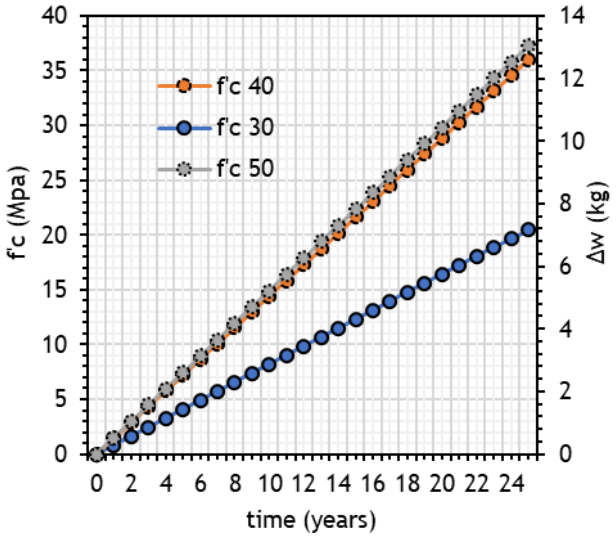
Dapat diperhatikan pada Gambarr 16. Distribusi lebar retak dan pola retak dengan nilai selimut beton 20mm memiliki lebar retak sangat besar untuk tahun ke 25, yaitu mencapai lebih dari 10mm. Berdasarkan SNI 2847:2019, lebar retak tersebut dapat menyebabkan struktur akan terdegradasi kapasitasnya secara signifikan. Dengan nilai lebar retak tersebut, balok juga akan sangat mudah mengelupas atau terjadinya akan mempercepat terjadinya proses delaminasi.



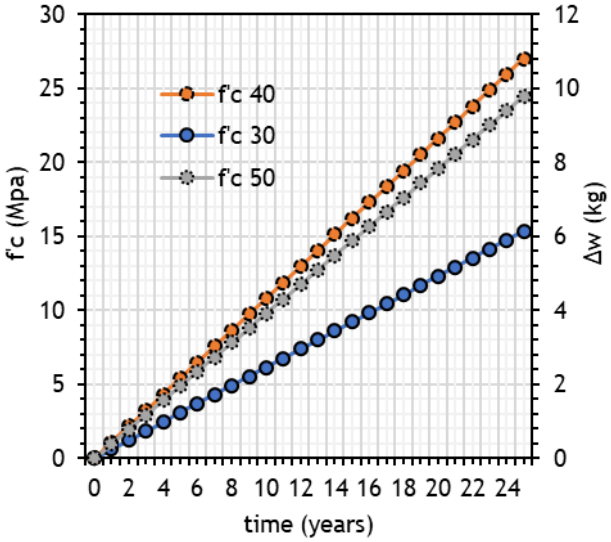
Gambar 9. Grafik perthitungan inisiasi korosi, *Ti*, berdasarkan polynomial pangkat dua belas



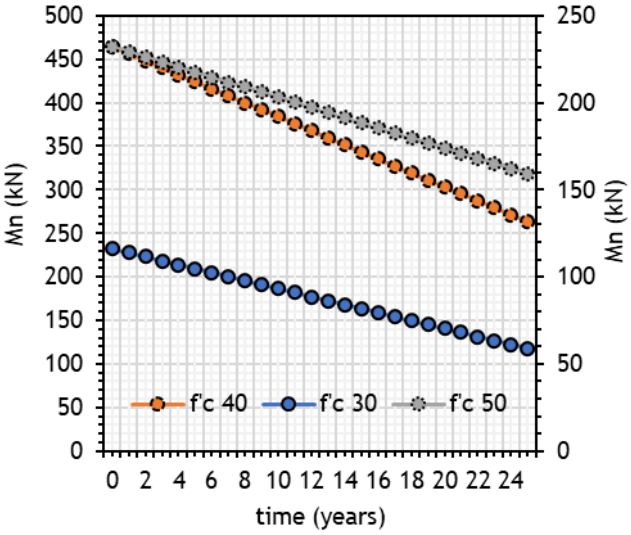
Gambar 10. *Mass loss* dengan selimut beton 20



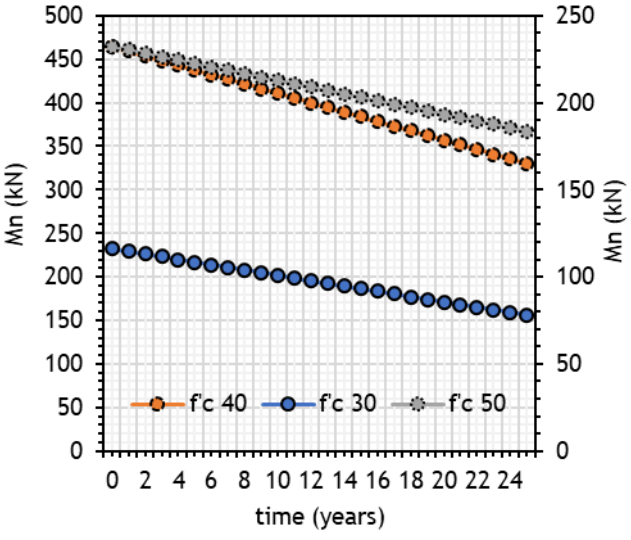
Gambar 11. *Mass loss* dengan selimut beton 30



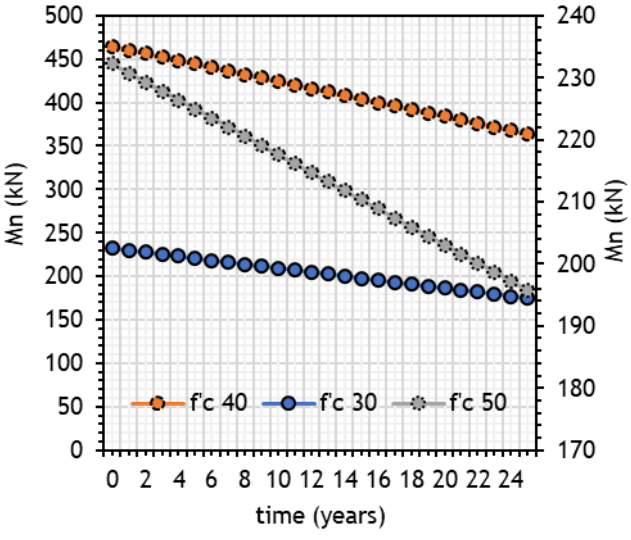
Gambar 12. *Mass loss* dengan selimut beton 40



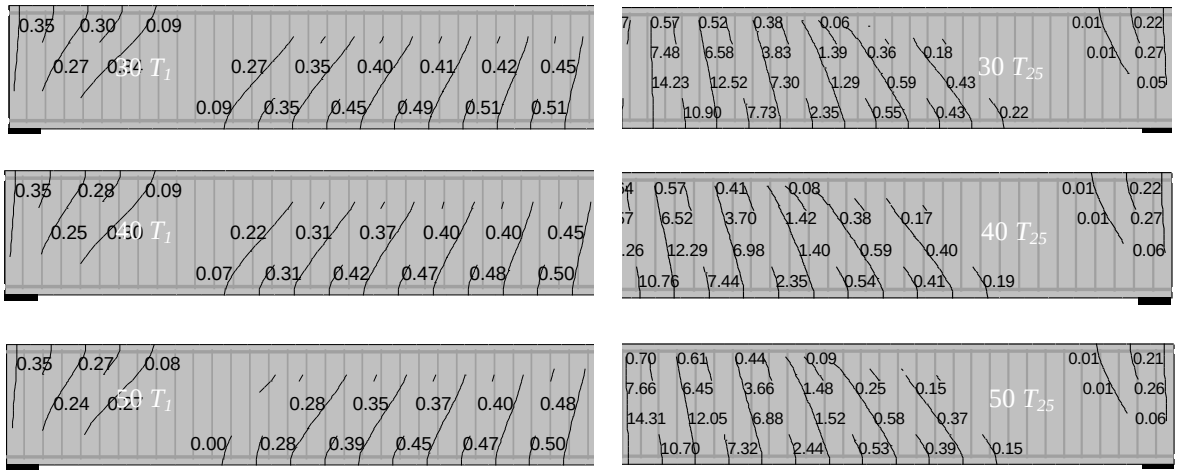
Gambar 13. Kapasitas *Mn* dengan selimut beton 20



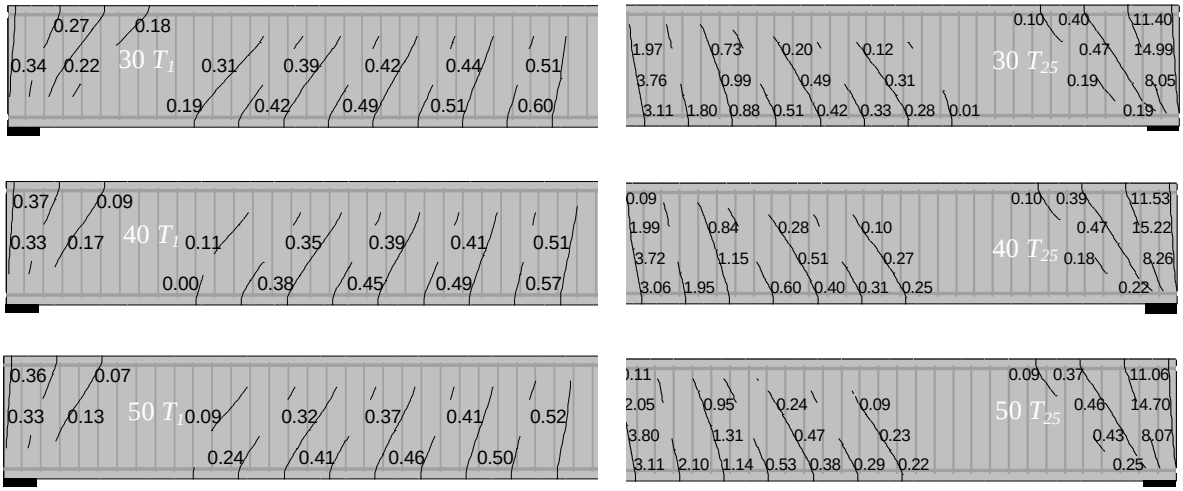
Gambar 14. Kapasitas *Mn* dengan selimut beton 30



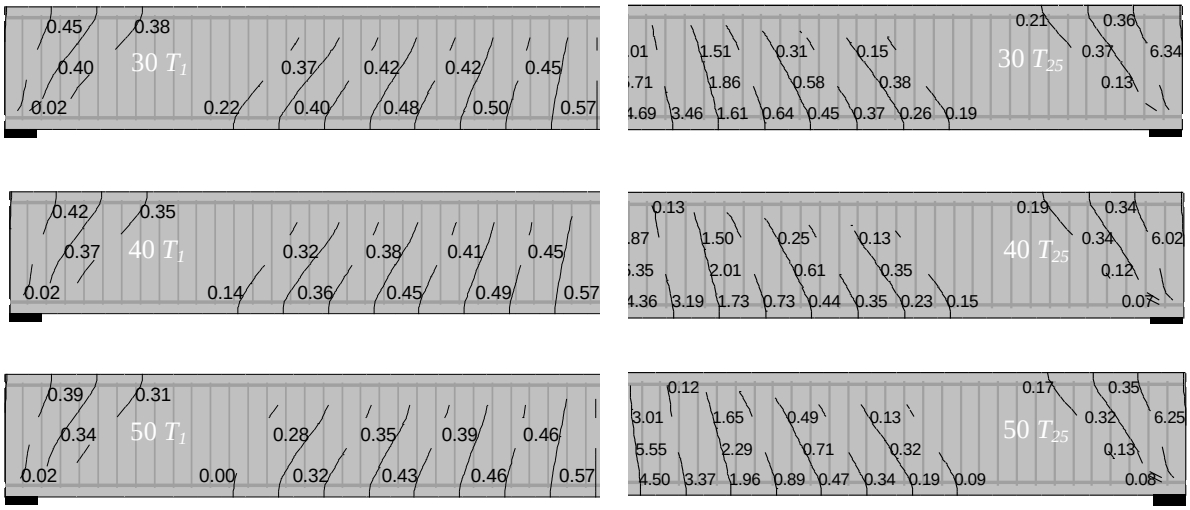
Gambar 15. Kapasitas *Mn* dengan selimut beton 40



Gambar 16. *Crack pattern T_1 vs T_{25}* dengan selimut beton 20mm berdasarkan Response 2000 [unit: mm]



Gambar 17. *Crack pattern T_1 vs T_{25}* dengan selimut beton 30mm berdasarkan Response 2000 [unit: mm]



Gambar 18. *Crack pattern T_1 vs T_{25}* dengan selimut beton 40mm berdasarkan Response 2000 [unit: mm]

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil investigasi berdasarkan variable mutu beton dan ketebalan selimut beton didapat beberapa kondisi yaitu:

1. Semakin kecil tebal selimut beton semakin besar nilai *mass loss* yang akan didapatkan hal tersebut berbanding lurus dengan distribusi korosi pada penampang yang ditinjau. Nilai kuat tekan beton dalam hal ini memberikan dukungan sebaliknya, semakin besar nilai mutu beton semakin *brittle* perliku balok tersebut yang mana akan memperbesar nilai *mass loss.*
2. *Mass loss* benda uji dengan nilai selimut beton 20mm akan mencapai nilai maksimum sebelum tahun ke25 dan harus dilakukan *retrofitting* atau perbaikan secara signifikan untuk tulangan longitudinalnya. Hal tersebut disampaikan karena pada balok dengan selimut beton paling kecil nilai *mass loss* mencapai maksimum atau kehilangannya melebihi 50%. Sebagai tambahan, menghasilkan nilai lebar retak lebih dari 10mm yang mana untuk kondisi W0/W1 struktur akan mengalami delaminasi atau pengelupasan elemen utama.
3. Semakin besar nilai kuat tekan beton, semakin besar pula nilai kapasitasnya berdasarkan tahanan momen nominal. Hal tersebut didukung dengan *output* perilaku yang mana nilai kuat tekan besar dengan variable selimut beton akan menghasilkan deformasi yang lebih kecil.
4. Kapasitas setiap balok meningkat seiring dengan meningkatnya nilai selimut beton. Perilaku tersetbut di ikuti oleh nilai dan pola retak, balok dengan selimut lebih kecil akan memiliki pola retak yang banyak dengan nilai lebar retak lebih besar.
5. Lebar retak *vs* distribusi korosi pertahun mengalami peningkatan secara *linier* apabila tingkat korosi yang diasumsikan terjadi secara *uniform*.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. Bayuaji *et al.*, "The effect of rice husk ash addition as pozzolan on geopolymer binder using alkali activators," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 588, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/588/1/012035.

[2] R. Bayuaji, M. Sigit Darmawan, N. A. Husin, R. B. Anugraha, A. Budipriyanto, and M. G. Stewart, "Corrosion damage assessment of a reinforced concrete canal structure of power plant after 20 years of exposure in a marine environment: A case study," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 84, no. June 2017, pp. 287–299, 2018, doi: 10.1016/j.engfailanal.2017.11.014.

[3] W. Wibowo and P. Gunawan, "Pengaruh Korosi Baja Tulangan Terhadap Kuat Geser Balok Beton Bertulang," *Media Tek. Sipil*, vol. 7, no. 1, pp. 21-30–30, 2007.

[4] M. Maalej, S. F. U. Ahmed, and P. Paramasivam, "Corrosion durability and structural response of functionally-graded concrete beams," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 307–316, 2003, doi: 10.3151/jact.1.307.

[5] I. Komara, A. Tambusay, W. Sutrisno, P. Suprobo, and D. Iranata, "The Investigation study of improving Durability Performance of Marine Infrastructure by using the Engineered Cementitious Composite," in *The 14th International Student Conference on Advanced Science and Technology (ICAST) 2019*, 2019, pp. 8–12, doi: 10.4324/9780367853815-2.

[6] M. Mooy, A. Tambusay, I. Komara, W. Sutrisno, Faimun, and P. Suprobo, "Evaluation of Shear-Critical Reinforced Concrete Beam Blended with Fly Ash," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 506, p. 012041, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/506/1/012041.

[7] W. N. Oktaviani, A. Tambusay, I. Komara, W. Sutrisno, F. Faimun, and P. Suprobo, "Flexural Behaviour of a Reinforced Concrete Beam Blended with Fly ash as Supplementary Material," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 506, p. 012042, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/506/1/012042.

[8] I. Komara, P. Suprobo, D. Iranata, A. Tambusay, and W. Sutrisno, "Experimental investigations on the durability performance of normal concrete and engineered cementitious composite," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 930, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/930/1/012056.

[9] A. Apriyanto, M. Irmawan, and E. Wahyuni, "Pengaruh Korosi Tulangan Balok Beton Bertulang Terhadap Kuat Lentur Berbasis Waktu Dengan Menggunakan Software LUSAS," pp. 1–6, 1990.

[10] I. Komara, A. Tambusay, W. Sutrisno, and P. Suprobo, "Engineered Cementitious Composite as an innovative durable material: A review," *ARPN J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 14, no. 4, pp. 822–833, 2019.

[11] R. J. Thomas, A. J. Fellows, and A. D. Sorensen, "Durability analysis of recycled asphalt pavement as partial coarse aggregate replacement in a high-strength concrete mixture," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 30, no. 5, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002262.

[12] C. R. Gagg, "Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 40, pp. 114–140, 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.

[13] C. Qiao, P. Suraneni, T. Nathalene Wei Ying, A. Choudhary, and J. Weiss, "Chloride binding of cement pastes with fly ash exposed to CaCl 2 solutions at 5 and 23 °C," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 97, no. 2019, pp. 43–53, 2019, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.011.

[14] K. Kobayashi, D. Le, and K. Rokugo, "Effects of crack properties and water-cement ratio on the chloride proo fi ng performance of cracked SHCC suffering from chloride attack," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 69, pp. 18–27, 2016, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.03.002.

[15] E. Booya, K. Gorospe, H. Ghaednia, and S. Das, "Durability properties of engineered pulp fibre reinforced concretes made with and without supplementary cementitious materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 172, no. January, pp. 376–386, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.05.070.
[16] B. Y. P. K. Mehta and R. W. Burrows, "Building Durable Structures in the 21st Century," no. March, pp. 57–63, 2001.
[17] O. E. Gjørv, "Durability design and quality assurance of major concrete infrastructure," vol. 1, no. 1, pp. 45–63, 2013.
[18] M. G. Alexander, F. Dehn, and P. Moyo, *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV*. 2015.
[19] R. Ranade, "Advanced Cementitious Composite Development for Resilient and Sustainable Infrastructure," p. 419, 2014.
[20] R. Muigai, P. Moyo, and M. Alexander, "Durability design of reinforced concrete structures: A comparison of the use of durability indexes in the deemed-to-satisfy approach and the full-probabilistic approach," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 45, no. 8, pp. 1233–1244, 2012, doi: 10.1617/s11527-012-9829-y.
[21] R. Zhang, A. Castel, and R. François, "Cement and Concrete Research Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process," *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 3, pp. 415–425, 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.09.026.
[22] Y. Yuan, Y. Ji, and S. P. Shah, "Comparison of two accelerated corrosion techniques for concrete structures," *ACI Struct. J.*, vol. 104, no. 3, pp. 344–347, 2007.
[23] SNI 2847 : 2013, "Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung," *Bandung Badan Stand. Indones.*, pp. 1–265, 2013.
[24] B. Wang, H. Peng, and J. R. Zhang, "Behavior of pre-cracked reinforced concrete beam strengthened with prestressed CFRP plate," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 351–352, pp. 1397–1403, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.351-352.1397.
[25] Y. Zhu, H. Zhang, Z. Zhang, B. Dong, and J. Liao, "Monitoring the cracking behavior of engineered cementitious composites (ECC) and plain mortar by electrochemical impedance measurement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 209, pp. 195–201, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.132.
[26] M. Maalej and V. C. Li, "Flexural/tensile-strength ratio in engineered cementitious composites," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 6, no. 4. pp. 513–528, 1994, doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1994)6:4(513).
[27] M. Maalej, S. F. U. Ahmed, and P. Paramasivam, "Corrosion durability and structural response of functionally-graded concrete beams," *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 307–316, 2003, doi: 10.3151/jact.1.307.