SIKLUS: Jurnal Teknik Sipil

p- ISSN 2443- 1729 e- ISSN 2549- 3973 Vol 7, No. 2, Oktober 2021, pp 175 -186

Pemodelan Perilaku Beton Berkarat Menggunakan ATENA 3D

Ahmad Zaki*1, Andri Nugroho2

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Bantul, 55183 Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia

Submited: 14, Agustus, 2021; Accepted: 20, September, 2021

Abstrak

Beton bertulang merupakan material yang mampu menahan tekan namun tidak kuat menahan tarik. Oleh karena itu, penambahan tulangan baja mampu untuk menjawab kelemahan dari beton tersebut. Akan tetapi tulangan baja juga mempunyai kelemahan yaitu terpengaruh oleh lingkungan luar sehingga bisa menyebabkan korosi. Korosi pada tulangan baja juga menjadi penyebab utama penurunan kekuatan pada beton. Oleh karena itu, penelitian untuk mengkaji pengaruh korosi tulangan baja pada beton terhadap kekuatan beton sangat penting dilakukan. Penelitian ini mengkaji kekuatan pada beton dengan tingkat korosi yang berbeda menggunakan analisis elemen hingga dengan software Atena 3D. Benda uji yang digunakan berupa balok dengan ukuran 100 x 100 x 500 mm dengan mutu beton 30 MPa. Tingkat korosi pada tulangan baja pada balok yang digunakan yaitu 0%, 10%, 20%, 30%, 38%, dan 50%. Metode yang digunakan untuk pemodelan analisis elemen hingga pada balok dengan tingkat korosi yang berbeda yaitu dengan melalui pendekatan berkurangnya ikatan antara beton dan tulangan (bond) Bigaj 1999 dan pendekatan perfect bond pada beton bertulang. Hasil penelitian menunjukan penurunan beban ultimate dan defleksi pemodelan Bigaj 1999 dan perfect bond terhadap bertambahnya tingkat korosi pada benda uji balok.

Kata Kunci: Beton bertulang, tulangan, korosi, ikatan (*bond*), Atena 3D.

Abstract

Reinforced concrete is a material that can withstand compression but is not strong in tension. Therefore, the addition of steel reinforcement can answer the weakness of the concrete. However, steel reinforcement also has a weakness that is affected by the external environment so that it can cause corrosion. Corrosion of steel reinforcement is also a major cause of decreased strength in concrete. Therefore, research to examine the effect of corrosion of steel reinforcement on concrete on the concret2 strength is very important. This study examines the concrete strength with different corrosion rates using finite element analysis with Athena 3D software. The specimen used is a beam with a size of 100 x 100 x 500 mm with a concrete quality of 30 MPa. The corrosion rates of steel reinforcement in the beams used are 0%, 10%, 20%, 30%, 38%, and 50%. The method used for finite element analysis modeling on beams with different corrosion levels is

175

through the approach of reducing the bond between concrete and reinforcement Bigaj 1999 and the perfect bond approach to reinforced concrete. The results showed a decrease in the ultimate load and deflection of Bigaj 1999 and perfect bond modeling in terms of increase of the corrosion rate of the beam specimen.

Keywords: Reinforced concrete, reinforcement, corrosion, bond, Atena 3D.

A. PENDAHULUAN

Korosi tulangan baja pada beton bertulang adalah masalah utama yang mempengaruhi keawetan dan integritas struktur beton bertulang. Korosi terjadi ketika tulangan baja ditempatkan terlalu dekat dengan permukaan beton dalam situasi penutup beton yang tidak memadai atau karena kualitasnya yang buruk dan juga karena berada pada lingkungan dengan tingkat garam yang tinggi seperti pada daerah pantai. Keberadaan garam dapat menyebabkan kerusakan lokal pada lapisan oksida pasif tulangan, dikarenakan setelah lapisan pasif kehilangan kemampuan sebagai pelindung terhadap korosi. Kondisi ini dimulai dengan adanya uap air dan oksigen sehingga mengakibatkan reaksi yang menyebab lapisan oksida pasifnya rusak (Neville, 1996; Zaki et al., 2017).

Menurut Rusyadi (2014) terjadinya korosi pada tulangan menyebabkan melemahnya kuat ikatan atau lekatan antara tulangan dengan beton (bond) yang menyebabkan kegagalan konstruksi pada suatu bangunan. Ikatan antara tulangan baja dan beton merupakan bagian penting dari sistem mekanis beton bertulang. Pada proses perencanaan struktur balok bertulang, kuat ikatan antara tulangan baja dan beton harus dengan direncanakan baik untuk menjamin efek tahan gesekan saat struktur balok mengalami tekanan dari beban-beban yang terjadi.

Penelitian tentang pengaruh korosi terhadap beton telah banyak dilakukan baik uji laboratorium maupun pemodelan menggunakan elemen hingga dan analisis numerik. Penelitian menggunakan elemen hingga dan analisis numerik diantaranya, yaitu pengaruh tulangan korosi pada beton terhadap kuat lentur beton bertulang dengan menggunakan software ANSYS (Jnaid et al., 2016; Pandit et al., 2019), menggunakan software Abaqus (BaniAsad et al., 2019; Bhalme et al., 2017) dan menggunakan VecTor2 (Njeem et al., 2019), terhadap ultimate dengan pemodelan beban elemen hingga non-linier (Devi et al., 2017), terhadap penilaian kinerja berdasarkan studi eksperimen pemodelan probabilistik Gumbel (Lim et al., 2016), dan terhadap penurunan kuat geser dengan membandingkan eksperimen dan pemodelan elemen hingga (Huang et al., 2020).

Pada penelitian-penelitian di atas menggunakan beberapa software elemen hingga seperti Ansys dan Abaqus, namun sangat terbatas penelitian-penelitian yang menggunakan software elemen hingga Atena 3D. Oleh karena itu, penelitian tentang perilaku mekanis pada balok beton bertulang akibat korosi dan kuat ikatan antara beton dan tulangan baja perlu dilakukan dengan melakukan pemodelan atau simulasi elemen hingga menggunakan software Atena 3D.

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Korosi Tulangan pada Beton Bertulang

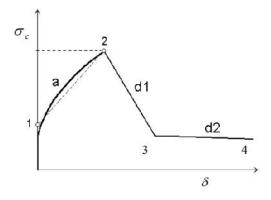
Tulangan baia pada beton sebenarnya dapat tahan terhadap korosi, dikarenakan beton mempunyai sifat alkali vaitu pH sekitar 12-13, sehingga pada permukaan tulangan baja di dalam beton membentuk suatu lapisan pasif yang mengakibatkan tulangan baja terlindung dari pengaruh lingkungan luar yang merupakan faktor penyebab korosi (Siregar, 2006). Korosi dapat terjadi karena beton mengalami retak, sehingga dapat mengakibatkan selimut beton terkelupas. Menurut Neville (1996) kondisi retak yang terjadi akibat tekanan ekspansif pada beton adalah retak biasa, spalling, dan delaminasi pada selimut beton. Setelah retakan dan terkelupasnya selimut beton, tulangan baja akan terlihat dan berinteraksi dengan udara ataupun air yang bisa menyebabkan terjadinya korosi.

Proses karbonisasi (carbonation) dan intrusi ion-ion khlorida (Cl⁻) ke dalam beton adalah dua faktor utama yang mengakibatkan rusaknya lapisan pasif tersebut dan berlanjut pada korosi tulangan baja di dalam beton. Karbonasi adalah reaksi larutan alkali di dalam beton dengan karbondioksida di udara. Karbonasi itu sendiri tidak menyebabkan kerusakan beton tetapi memiliki efek penting pada ketahanan struktur beton bertulang. Secara bertahap alkalinitas mengurangi nilai pH pada beton. Penurunan nilai pH ke tingkat tertentu dapat menyebabkan dimulainya korosi pada tulangan baja (Ahmad, 2003; Zaki et al., 2018). Tingkat kerusakan beton karbonasi tergantung akibat pada ketebalan dan permeabilitas selimut jenis pengikat, pengawetan, beton, kerapatan, rasio semen air, dan efek lingkungan seperti suhu, kelembaban relatif dan lain-lain. Korosi pada tulangan

baja merupakan proses bereaksinya atomatom Fe yang berada dalam batang tulangan menjadi ion Fe^{2+} atau Fe^{3+} (Parameswaran et al., 2008). Menurut Fahirah (2007), tulangan baja yang berkarat, mempunyai volume korosi lebih besar kurang lebih tiga kali dari volume aslinya, sehingga dapat mengakibatkan hilangnya ikatan atau lekatan antara beton dan tulangan hingga terjadinya retakan pada beton.

2. Kuat ikatan Bigaj 1999

Menurut Winter et al. (1993), kuat ikatan atau lekatan (bond) merupakan sifat dari beton dan tulangan baja menutupinya dalam menahan berbagai gaya atau beban. Gaya atau beban tersebut yang mengakibatkan melemahnya ikatan atau lekatan antara beton dan tulangan baja. Model kuat ikat *Bigaj 1999* (Bigaj, 1999) dapat dilihat pada Gambar.



Gambar 1. Model kuat ikatan *Bigaj* 1999 (Bigaj, 1999; Jendele et al., 2006)

Parameter pada model Bigaj 1999 adalah kuat tekan beton f c dan diameter tulangan D. Dalam implementasinya, bagian menaik dari kurva diperkirakan dengan linier fungsi dan hukum yang dihasilkan dalam bentuk triple-linear melengkung. Bagian yang naik dari hukum tegangan-perpindahan pada bagian "a" dilinearisasi, sehingga kohesi tegangan c dimodelkan dengan kurva triple-linear. Koordinat dari empat titik

(1-4) yang menentukan hubungan antara tegangan dan perpindahan (Bigaj, 1999). Menurut ervenka et al. (2013), koordinat dari empat titik (*point*) yang

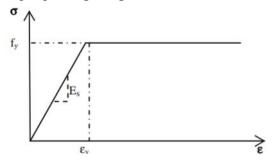
mendefinisikan hubungan teganganperpindahan (*strength-slip*) disampaikan pada tabel 1

Tabel 1. Parameter untuk menentukan hubungan ikatan strength-slip (Červenka et al., 2013)

Concrete Type (MPa)	Bond	Quality	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
	Б. И	s / D	0.000	0.020	0.044	0.480
f'c < 60	Excellent	$ au_b / \sqrt{0.8 \ f_{cu}^{'}}$	0.500	3.000	0.700	0.000
	Good	s/D	0.000	0.030	0.047	0.480
		$ au_b/\sqrt{0.8~f_{cu}^{'}}$	0.500	2.000	0.700	0.000
	Bad	s/D	0.000	0.040	0.047	0.480
		$ au_b / \sqrt{0.8 \ f_{cu}^{'}}$	0.500	1.000	0.700	0.000
f'c > 60		s / D	0.000	0.012	0.030	0.340
	Excellent	$ au_b / \sqrt{0.88 \ f_{cu}^{'}}$	0.600	1.900	0.900	0.000
		s / <u>D</u>	0.000	0.020	0.030	0.340
	Good	$ au_b$ / $\sqrt{0.88} f_{cu}$	0.600 1.900 0.900			0.000
	Bad	s/D	0.000	0.025	0.030	0.340
		$ au_b / \sqrt{0.88 \ f_{cu}^{'}}$	0.600	1.100	0.900	0.000

3. Kuat ikatan sempurna (Perfect Bond)

Menurut Obaidat et al. (2010), Ikatan antara tulangan baja dengan beton merupakan salah satu bagian penting dari sistem mekanis beton bertulang. *Perfect bond* diasumsikan sebagai bahan elastissempurna dan identik dengan tegangan-regangan seperti pada Gambar 2



Gambar 2. Asumsi ikatan tulangan sempurna

Modulus Elastis (Es) dan tegangan ultimate diukur dalam studi ksperimental dan nilai yang diperoleh adalah 209 GPa dan fy 507 MPa. Nilai-nilai ini digunakan dalam sebuah model finite element. Rasio possion sebesar 0,3 digunakan pada tulangan baja. Ikatan antara tulangan baja dengan beton diasumsikan sebagai ikatan yang sempurna (perfect bond).

4. Antena *3D*

Finite element analysis (FEA) adalah metode numerik yang berfungsi untuk memecahkan masalah dengan singkat tanpa melakukan percobaan laboratorium. Atena 3D digunakan untuk pemodelan struktur balok secara 3 dimensi dan juga untuk menganalisis struktur untuk menghasilkan perilaku

perilaku balok dalam wujud data berupa grafik seperti beban-defleksi dan pola retakbenda uji sesuai dengan syarat dan ketentuan dalam penelitian (ervenka etal., 2013).

Software Atena 3D terdiri dari solusi inti dan beberapa tampilan pengguna (Christianto, 2017; Fajarianto et al., Tampilan 2020). pengguna *'user* interface' dispesialisasikan untuk beberapa fungsi dan tidak diperlukan untuk menyediakan akses ke semua fitur dari solusi inti Atena. Pembatasannya berguna agar untuk memberikan kesan mudah digunakan 'user friendly' pada semua aplikasi Atena. Program ini memiliki 3 fungsi utama, yaitu:

a. Pre-processing

Pre-processing adalah jendela kerja untuk memasukan data geometri dari topology, material, pembebanan, kondisi batas, meshing, dan parameter solusi.

b. Run

Run adalah jendela kerja untuk menganalisis geometri yaang telah dibuat sebelumnya. Fungsi ini memungkinkan pengguna untuk memantau atau melihat proses perilaku benda uji dalam bentuk grafik ataupun pola retak selama perhitungan.

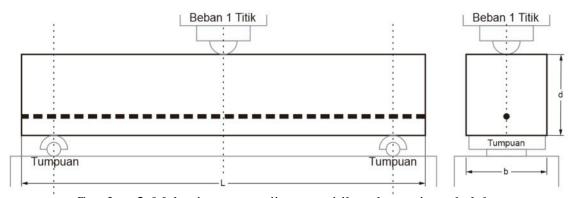
c. Post-processing

Post-processing adalah jendela kerja untuk melihat lebih banyak efek dari hasil running seperti tegangan, regangan, pola retak, gaya yang bekerja, dan defleksi.

C. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis numerik dengan metode elemen hingga (finite element) menggunakan Atena 3D dengan pengujian satu titik. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku mekanis pada balok beton bertulang seperti hubungan antara beban (load) dan perpindahan (displacement) dari benda uji balok yang dimodelkan. Gambar 3 menunjukkan mekanisme pengujian satu titik pada penelitian ini.

Pemodelan menggunakan 12 benda uji balok dengan dimensi 500 x 100 x 100 mm dengan penambahan tulangan tarik berdiameter 12 mm. Balok dimodelkan sebagai balok korosi dengan tingkat korosi yang berbeda-beda, yaitu 0%, 10%, 20%, 30%, 38%, dan 50%. Balok dimodelkan tingkat korosinya melalui dua model, yaitu Bigaj 1999 dan perfect bond. Korosi dengan model Bigaj 1999, balok dimodelkan melalui pendekatan berkurangnya ikatan antara beton dan tulangan (loss of bond), yaitu: benda uji B0, B10, B20, B30, B38, dan B50. Sementara model perfect bond pada ikatan antara beton dan tulangan, yaitu: benda uji S0, S10, S20, S30, S38, dan S50.



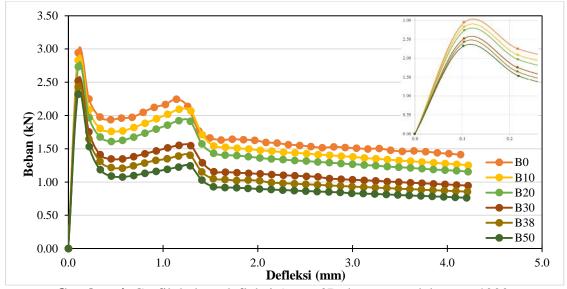
Gambar 3. Mekanisme pengujian satu titik pada spesimen balok

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Beban-defleksi Bigaj 1999

Hasil analisis dengan Atena 3D model *Bigaj 1999* menunjukan bahwa beban ultimate (*load*) pada benda uji balok B0, B10, B20, B30, B38, dan B50

yaitu berturut-turut sebesar 2.94 kN, 2.83 kN, 2.73 kN, 2.52 kN, 2.43 kN, dan 2.32 kN dan defleksi (*deflection*) yaitu 0.105 mm, 0.104 mm, 0.105 mm, 0.104 mm, dan 0.103 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik beban-defleksi Atena 3D dengan model *Bigaj 1999*

Gambar 4 menunjukkan grafik atau kurva perbandingan beban-defleksi dari hasil pemodelan Atena 3D dengan model Bigaj 1999, dimana pada zona 1 terjadi pembebanan tahap awal sampai terjadinya pola retak yang pertama, pada zona ini disebut juga sebagai daerah elastis. Setelah terjadi retak pertama kurva memasuki zona 2 yaitu pola retak mulai menjalar ke bagian samping dari benda uji balok dan tulangan baja mulai meleleh, pada zona ini disebut juga sebagai daerah plastis. Selanjutnya, pada zona 3 dimana kondisi beton mulai hancur dengan tulangan yang terus meleleh karena bertambah regangannya hingga balok putus.

Pada pemodelan Atena 3D model Bigaj 1999 mengalami pola hubungan beban-defleksi yang sama pada semua benda uji balok. Sebagai contoh, pada benda uji balok B0 mengalami retak pertama pada beban 2.94 kN. Setelah itu, kurva turun kemudian mulai naik kembali namun tidak sampai melebihi beban pada retak pertama, dan selanjutnya tulangan mulai meleleh pada beban 2.94 kN. Hal ini mengindikasikan bahwa tulangan tidak dapat menahan beban setelah retak pertama, disebabkan karena buruknya ikatan antara beton dan tulangan baja (bond). Balok mulai hancur setelah defleksi mencapai 4.1 mm.

Pada pemodelan Atena 3D model Bigaj 1999 mengalami pola hubungan beban-defleksi yang sama pada semua benda uji balok. Sebagai contoh, pada benda uji balok B0 mengalami retak pertama pada beban 2.94 kN. Setelah itu, kurva turun kemudian mulai naik kembali namun tidak sampai melebihi beban pada retak pertama, dan selanjutnya tulangan mulai meleleh pada beban 2.94 kN. Hal ini mengindikasikan bahwa tulangan tidak dapat menahan beban setelah retak pertama, disebabkan karena buruknya ikatan antara beton dan tulangan baja (bond). Balok mulai hancur setelah defleksi mencapai 4.1 mm.

Dari beban dan defleksi pemodelan *Bigaj 1999* menunjukan bahwa dengan bertambahnya tingkat korosi pada benda uji balok mengakibatkan berkurang beban namun untuk defleksi tidak menunjukkan perbedaan yang berarti. Sehingga semakin bertambahnya tingkat korosi pada benda uji mengakibatkan berkurangnya kekakuan pada benda uji

Dari beban dan defleksi pemodelan Bigaj 1999 menunjukan bahwa dengan bertambahnya tingkat korosi pada benda uji balok mengakibatkan berkurang beban namun untuk defleksi tidak menunjukkan perbedaan yang berarti. Sehingga semakin bertambahnya tingkat korosi pada benda uji mengakibatkan berkurangnya kekakuan pada benda uji balok seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat korosi pada balok mengakibatkan menurunnya beban yang bisa dipikul oleh uji balok karena korosi mengakibatkan berkurangnya kemampuan benda uji balok untuk menahan beban yang terjadi dengan berkurangnya ikatan antara beton dan tulangan (Zaki et al., 2017).

Tabel 2. Kekakuan balok Bigaj 1999

Benda Uji	Beban (kN)	Defleksi (mm)	Kekakuan (kN/mm)
В0	2.943	0.105	28.136
B10	2.829	0.104	27.098
B20	2.733	0.105	26.103
B30	2.520	0.104	24.161
B38	2.431	0.104	23.285
B50	2.320	0.103	22.502

Tabel 3 menunjukan perbandingan daktilitas pengujian *Bigaj 1999*. Berdasarkan grafik perbandingan bebandefleksi semua benda uji menunjukan bahwa dengan penambahan tingkat korosi dan kualitas ikatan pada tulangan baja berpengaruh terhadap nilai daktilitas balok. Dari semua pemodelan benda uji dengan *bond Bigaj 1999* menunjukan tingkat daktilitas yang sama yaitu sebesar 1,00 mm, karena titik leleh dan titik puncak berada di posisi yang sama.

Tabel 3. Daktilitas balok Bigaj 1999

Benda Uji	Titik leleh y (mm)	Titik puncak u (mm)	Daktilitas μ= u/ y (mm)
B0	1.141	1.141	1.000
B10	1.169	1.169	1.000
B20	1.166	1.166	1.000
B30	1.291	1.291	1.000
B38	1.284	1.284	1.000
B50	1.286	1.286	1.000

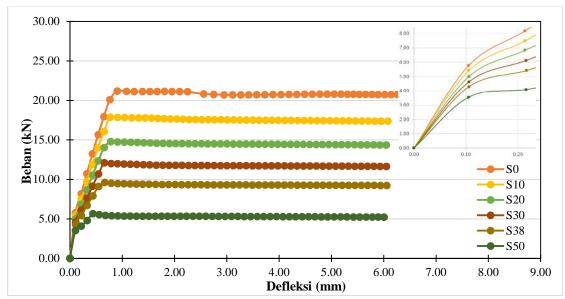
2. Beban-defleksi Atena 3D Perfect Bond

Hasil analisis dengan *Atena 3D* model *perfect bond* menunjukkan bahwa beban ultimate pada model benda uji balok S0, S10, S20, S30, S38, dan S50 yaitu berturut-turut sebesar 21.18 kN, 17.88 kN, 14.78 kN, 12.11 kN, 9.62 kN, dan 5.67 kN dan besar defleksi

(*defl tion*) yang diterima adalah 0.902 mm, 0.767 mm, 778 mm, 0.658 mm, 0.665 mm, dan 0.438 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan penjelasan tentang grafik atau kurva perbandingan beban-defleksi benda uji balok model *perfect bond* dimana pada zona 1 terjadi tahap awal pembebanan pada balok sampai terjadinya retak yang pertama,

kurva memasuki zona 2 yaitu balok mengalami penambahan beban dan pola retak mulai menjalar ke bagian samping dari benda uji, zona ini disebut sebagai daerah plastis dimana tulangan baja mengalami lendutan. Selanjutnya pada zona 3, tulangan mulai meleleh, kondisi beton mulai hancur dan retakan pada beton mulai membuka serta jika beban diberikan terus menerus maka tulangan baja bisa putus.



Gambar 5. Grafik beban-defleksi Atena 3D dengan model perfect bond

Pada Gambar 5, pemodelan Atena 3D model perfect bond mengalami pola hubungan beban-defleksi yang sama pada semua benda uji balok. Sebagai contoh, pada benda uji balok S0, pola retak pertama terjadi pada beban 5.77 kN dan titik leleh berada pada beban 21.18 kN, setelah itu kurva mulai turun namun tidak terlalu signifikan sampai pada kondisi beton hancur. Setelah retak pertama beban masih dapat bertambah sampai titik leleh karena pada tulangan diasumsikan dalam kondisi baik dalam menahan beban yang terjadi.

Dari beban-defleksi pemodelan perfect bond menunjukan bahwa dengan bertambahnya tingkat korosi pada benda uji mengakibatkan berkurang beban dan sedikit defleksi dari benda uji balok. Sehingga semakin bertambahnya tingkat korosi pada benda uji mengakibatkan berkurangnya kekakuan pada benda uji balok seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat korosi mengakibatkan menurunnya beban yang bisa dipikul oleh benda uji balok dengan berkurangnya kemampuan benda uji balok untuk menahan beban yang terjadi karena korosi mengakibatkan berkurangnya area atau *cross-section* tulangan yang akan mempengaruhi kinerja tulangan dalam memikul beban yang terjadi.

Tabel 4. Kekakuan balok perfect bond

Benda Uji	Beban (kN)	Defleksi (mm)	Kekakuan (kN/mm)
S0	21.180	0.902	23.494
S10	17.880	0.767	23.306
S20	14.780	0.778	18.993
S30	12.110	0.658	18.410
S38	9.617	0.665	14.470
S50	5.666	0.438	12.948

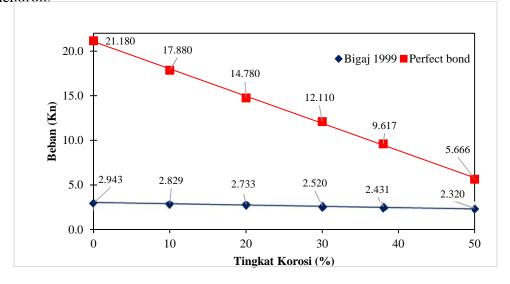
Tabel 5 menunjukan hasil penelitian berupa daktilitas dengan pemodelan bond. Berdasarkan perfect grafik perbandingan beban-defleksi semua benda uji menunjukan bahwa dengan penambahan tingkat korosi dan kualitas ikatan antara beton dan tulangan baja (bond) berpengaruh terhadap nilai daktilitas betonnya. Pada model perfect bond, hasil menunjukan seiring bertambah tingkat bond, maka daktilitas juga menurun.

Tabel 5. Daktilitas balok perfect bond

Benda Uji	Titik leleh y (mm)	Titik puncak u (mm)	Daktilitas µ= u/ y (mm)
S 0	0.106	0.902	8.545
S10	0.106	0.767	7.272
S20	0.106	0.778	7.369
S30	0.106	0.658	6.217
S38	0.106	0.665	6.270
S50	0.105	0.438	4.160

3. Kapasitas Balok

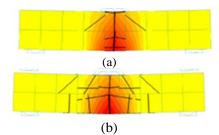
Kapasitas balok dapat ditentukan dengan parameter tingkat korosi dan kualitas ikatan antara beton dan tulangan baja. Gambar 6 menunjukkan kapasitas (load kemampuan capacity) balok bertulang dalam menerima beban berdasarkan tingkat korosi dan perbedaan antara model Bigaj 1999 dan perfect bond dengan pemodelan Atena 3D. Gambar tersebut menunjukan perilaku beton, yaitu dengan semakin bertambah tingkat korosi atau berkurangnya kualitas ikatan mengakibatkan kapasitas beton akan menurun.



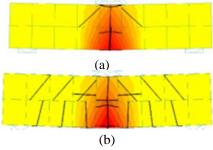
Gambar 6. Grafik *load capacity* benda uji balok

4. Pola Retak Balok Atena 3D

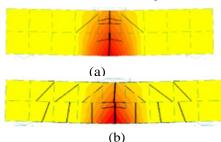
Hasil pengujian tekan satu titik menunjukan perilaku beton terhadap pola retak yang disebabkan oleh korosi. Sebagian besar pola retak yang terjadi berawal dari sisi bawah balok beton karena pada bagian tersebut mengalami karena beban tekanan di atas. Berdasarkan pengamatan secara visual tingkat korosi mempengaruhi retakan yang terjadi pada benda uji, semakin tinggi tingkat korosi maka semakin Pada banyak jumlah retakannya. pemodelan analisis menggunakan Atena 3D benda uji mengalami retak lentur dan retak geser seperti yang diperlihatkan pada Gambar 7-12. Kedua jenis retakan tersebut terjadi di semua benda uji balok, baik dari model Bigaj 1999 atau model perfect bond.



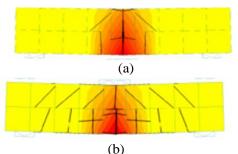
Gambar 7. Pola retak (a) benda uji B0 dan (b) benda uji S0



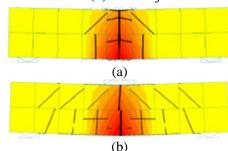
Gambar 8. Pola retak (a) benda uji B10 dan (b) benda uji S10



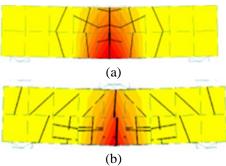
Gambar 9. Pola retak (a) benda uji B20 dan (b) benda uji S20



Gambar 10. Pola retak (a) benda uji B30 dan (b) benda uji S30



Gambar 11. Pola retak (a) benda uji B38 dan (b) benda uji S38



Gambar 12. Pola retak (a) benda uji B50 dan (b) benda uji S50

E. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian analisis elemen hingga menggunakan *software Atena 3D* pada benda uji beton yang korosi dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1. Hasil pemodelan *Bigaj 1999* dengan *Atena 3D* menunjukan *trend* atau kecenderungan penurunan kekuatan kapasitas beton di setiap tingkat korosi dan ikatan antara beton dan tulangan baja.
- 2. Tingkat kekakuan balok menurun pada pemodelan benda uji balok menggunakan *Atena 3D* dengan semakin bertambah tingkat korosi. Untuk model *Bigaj 1999* kekakuan berturut-turut mulai dari 28.136,

- 27.098, 26.103, 24.161, 23.285, dan 22.502 kN/mm. Sedangkan untuk model *perfect bond* kekakuan mulai dari 23.494, 23.306, 18.993, 18.410,14.470, dan 12.948 kN/mm.
- 3. Tingkat daktilitas balok menurun pada pemodelan benda uji balok menggunakan *Atena 3D* dengan semakin bertambah tingkat korosi. Untuk model *Bigaj 1999* nilai daktilitasnya sama yaitu 1. Sedangkan untuk model *perfect bond* daktilitasnya mulai dari 8.545, 7.272, 7.369, 6.217, 6.270, dan 4.160.
- 4. Perbedaan tingkat kekakuan dan daktilitas beton yang sangat tinggi dipengaruhi oleh kondisi ikatan tulangan baja yang berbeda. Pada material Bigai 1999 diasumsikan menggunakan ikatan tulangan dengan kualitas kurang, yang sedangkan pada material perfect bond. tulangan diasumsikan memiliki kualitas yang lebih baik.
- 5. Pola retak yang terjadi pemodelan diawali dengan retakan lentur pada bagian lentur balok selanjutnya merambat pada retak geser mengikuti beban pertama di setiap benda ujinya. Semakin bertambah tingkat korosi berkurangnya ikatan antara beton dan tulangan, maka retak yang terjadi semakin menjalar ke arah samping benda uji.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - A review. *Cement and Concrete Composites*, 25(4–5), 459-471.

- BaniAsad, E., & Dehestani, M. (2019). Incorporation of corrosion and bond-slip effects in properties of reinforcing element embedded in concrete beams. *Structures*, 20, 105-115.
- Bhalme, M., Sangtiani, S., Jayasingh, S., & Visuvasam, J. (2017). Effect of Rebar Corrosion on Flexural Strength of RC Beam Using Finite Element Analysis. International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(4), 193-200.
- Bigaj, A. (1999). Structural dependence of rotation capacity of plastic hinges in RC beams and slabs. Delft University of Technology, Netherlands.
 - ervenka, V., Jendele, L., & ervenka, J. (2013). ATENA Program Documentation. Part 1. Theory. In. Prague, Czech Republic: Cervenka Consulting Ltd.
- Christianto, S. (2017). Studi perbandingan hasil uji numerik model hubungan balok kolom dengan hasil uji eksperimental. Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.
- Devi, A. K., Ramajaneyulu, K., Sundarkumar, S., Ramesh, G., Kumar, B. B., & Moorthy, T. K. (2017). Ultimate load behaviour of reinforced concrete beam with corroded reinforcement. *Journal of The Institution of Engineers* (*India*): Series A, 98(4), 525-532.
- Fahirah, F. (2007). Korosi pada beton bertulang dan pencegahannya. *SMARTek*, 5(3), 222094.
- Fajarianto, M. F., Zaki, A., & Thamrin, R.

- (2020). Pengaruh Geometri Balok Beton Bertulang Terhadap Perilaku Lentur Menggunakan Program Atena 3D dan RCCSA. Paper presented at the 1st UMY Grace 2020, Bantul, Yogyakarta.
- Huang, L., Ye, H., Jin, X., Jin, N., & Xu, Z. (2020). Corrosion-induced shear performance degradation of reinforced concrete beams. *Construction and building materials*, 248, 118668.
- Jendele, L., & Cervenka, J. (2006). Finite element modelling of reinforcement with bond. *Computers & structures*, 84(28), 1780-1791.
- Jnaid, F., & Aboutaha, R. S. (2016). Residual flexural strength of corroded reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 119, 198-216.
- Lim, S., Akiyama, M., & Frangopol, D. M. (2016). Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling. *Engineering Structures*, 127, 189-205.
 - Neville, M. (1996). *Properties of Concrete* (Fourth and Final Edition ed.): Addison Wesley Longman Limited.
 - Njeem, W., Vadeboncoeur, A., Martín-Pérez, B., Jrade, A., & Aoude, H. (2019). Experimental And Analytical Investigation Into The Effect Of Corrosion On The Flexural Response Of Reinforced Concrete Beams. Paper presented at the CSCE Annual Conference, Montreal.
 - Obaidat, Y. T., Heyden, S., & Dahlblom, O. (2010). The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling

- retrofitted RC beams with FEM. *Composite Structures*, 92(6), 1391-1398.
- Pandit, P., & Venkataramana, K. (2019). Numerical Studies on Flexural Behaviour of Corroded Beams. Journal of Corrosion Science and Engineering, 22.
- Parameswaran, L., Kumar, R., & Sahu, G. K. (2008). Effect of carbonation on concrete bridge service life. *Journal of Bridge Engineering*, 13(1), 75-82.
- Rusyadi, S. (2014). Pengaruh Mutu Beton Terhadap Kuat Lekat Antara Beton Dan Baja Tulangan. *Rekayasa Teknik Sipil*, 3(14), 82-90.
- Siregar, A. P. (2006). Laju Korosi Tulangan Pada Mutu Beton Berbeda. *SMARTek*, 4(2), 67-76.
- Winter, G., & Nilson, A. H. (1993).

 *Perencanaan Struktur Beton Bertulang.
- Zaki, A., Chai, H. K., Behnia, A., Aggelis, D. G., Tan, J. Y., & Ibrahim, Z. (2017). Monitoring fracture of steel corroded reinforced concrete members under flexure by acoustic emission technique. Construction and building materials, 136, 609-618.
- Zaki, A., Megat Johari, M. A., Wan Hussin, W. M. A., & Jusman, Y. (2018). Experimental assessment of rebar corrosion in concrete slab using ground penetrating radar (GPR). *International Journal of Corrosion*, 2018.



© 2021 Siklus Jurnal Teknik Sipil All rights reserved. This is an open access article

distributed under the terms of the CC BY Licens (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)