

## ANALISIS KEKAUAN DAN POLA RETAK KOLOM AKIBAT ASIAL EKSENTRIS BALOK DITINJAU TERHADAP GAYA GESER KOLOM (Studi Kasus: Proyek X di Kota Tegal)

Antonius Erland Hendyayoga<sup>1</sup>, Gabriel J. P. Ghewa<sup>2</sup>, dan Hermawan<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata,  
Jl. Pawiyatan Luhur IV/1, Bendan Dhuwur, Semarang 50234, 024-8441555  
Email: <sup>1</sup>[aerlandh31@gmail.com](mailto:aerlandh31@gmail.com), <sup>2</sup>[ghewa@unika.ac.id](mailto:ghewa@unika.ac.id), <sup>3</sup>[hermawan.mrk@unika.ac.id](mailto:hermawan.mrk@unika.ac.id)

### ABSTRAK

Kegagalan dan kecacatan pekerjaan konstruksi merupakan fenomena yang umum terjadi pada dunia konstruksi. Identifikasi lebih jauh terhadap kegagalan konstruksi bangunan tanpa penanganan yang baik dapat berdampak terjadinya kegagalan bangunan pada segi teknis. Hasil pelaksanaan konstruksi Gedung Rumah Sakit X di Kota Tegal, didapati adanya eccentric beam column joint dengan balok pada struktur bekerja sebagai beban eksentris. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tahap demi tahap pengaruh dari gaya aksial eksentris yang bekerja pada balok terhadap perilaku kolom menggunakan software Abaqus CAE, menganalisis dan mengevaluasi pola retak yang terjadi pada kolom bangunan. Metode review design secara sistematis dilakukan untuk melihat perilaku kekakuan struktur dan pola retak pada kolom dengan melakukan analisis variabel 5 titik beban yaitu sentris, eksentris 10 cm, 20 cm, 30 cm, dan 45 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin jauh letak beban eksentris dari column centerline, reaksi kolom dilihat dari pola disipasi energi semakin terpusat pada area beam column joint. Grafik hubungan tegangan dan regangan meningkat secara linear hingga pada titik eksentris 45 cm terjadi peningkatan secara eksponensial. Grafik terputus saat beton mengalami keretakan dengan nilai tegangan  $25,1 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> dan regangan  $8,8 \times 10^{-4}$ . Retak pada parameter 45 cm terjadi akibat tegangan tekan dan tegangan tarik dengan keretakan joint merekah hingga 30 cm ke area joint balok G5C dan 20 cm ke area badan kolom. Hanya variabel sentris yang tidak mengalami keretakan. Eksentrisitas beban berpengaruh terhadap kekakuan dan elastisitas struktur. Nilai kekakuan dapat diperbaiki dengan meningkatkan mutu material atau dimensi penampang sesuai dengan sasaran desain struktur.

Kata kunci: eksentrisitas, kekakuan, pola retak, regangan, tegangan

### PENDAHULUAN

Kegagalan dan kecacatan pekerjaan konstruksi merupakan fenomena yang umum terjadi pada dunia konstruksi. Kegagalan dan kecacatan dapat berdampak pada pelaksanaan konstruksi dan secara simultan mempengaruhi faktor biaya, waktu, sumber daya proyek, dan keamanan pekerjaan. Kegagalan dan kecacatan pekerjaan konstruksi dapat menimbulkan kontroversi diantara pihak-pihak yang terlibat, terlebih jika situasi ini tidak ditangani maka dapat menimbulkan masalah yang lebih serius di proyek yang akan datang.

Kecacatan bangunan dapat disebabkan oleh faktor teknis maupun non teknis. Wahyono, (2018) memperlihatkan hasil penelitian mengenai framework investigasi mutu pekerjaan konstruksi bangunan publik terhadap delapan belas (18) proyek setelah Final Hand Over (FHO) yang menunjukkan bahwa 94% proyek tidak sesuai dengan persyaratan aspek teknis, pada aspek administrasi sebanyak 78% proyek tidak sesuai, dan 89% proyek tidak sesuai dengan persyaratan aspek biaya. Kegagalan konstruksi terhadap faktor teknis memperlihatkan bahwa elemen struktur terjadi penyimpangan atau deviasi dengan nilai sebesar 60,3% dari besar nilai kontrak, kemudian disusul oleh elemen atap dengan nilai sebesar 35,0%.

Penelitian mengenai analisis kegagalan konstruksi dari perspektif non teknis, didapati bahwa dari 34 proyek konstruksi yang ditinjau, sebanyak 12 proyek mengalami kegagalan konstruksi (Wiyana, 2012). Pelaksanaan penelitian dengan meninjau aspek kesesuaian fisik proyek dengan spesifikasi teknis menemukan dalam persentase 65% dari 34 proyek telah sesuai dengan spesifikasi teknis yang disebutkan dalam kontrak dan persentase 35% dari 34 proyek tidak sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah disyaratkan.

Corresponding Author

E-mail Address : [aerlandh31@gmail.com](mailto:aerlandh31@gmail.com)

Penjabaran lebih jauh faktor yang mengatur terjadinya kecacatan dan kegagalan konstruksi bangunan diperlihatkan pada Tabel 1, dengan pembagian indeks dilakukan terhadap jenis kecacatan/kegagalan konstruksi.

Tabel 1. Peringkat Indeks Relatif Jenis Kecacatan dan Kegagalan Bangunan

No.	Jenis Cacat/Kegagalan	Indeks Relatif
1	Blemishes (Scaling, Honeycomb)	0,909
2	Korosi Baja Bertulang	0,827
3	Kerusakan Permukaan Eksterior	0,813
4	Kelembaban	0,807
5	Cat Mengelupas	0,789
6	Kecacatan Atap	0,722
7	Retak (lantai, balok, dll.)	0,716
8	Spalling atau Chipping	0,700
9	Kegagalan Pondasi	0,614
10	Ketidakstabilan Struktur	0,476

(Sumber: Diolah dari Data *Rank of Relative Index for Common Types of Building Defects and Failures*, 2011)

Akumulasi dari berbagai faktor di atas menjadi perhatian bersama karena dapat berdampak pada faktor ketidakstabilan struktur dengan indeks relatif 0,476 yang menempati peringkat kesepuluh.

Pertimbangan untuk pengendalian mutu pekerjaan konstruksi, maka penelitian dengan metode review design secara sistematis dengan basis assessment dilakukan pada Proyek “X” di Kota Tegal. Penelitian yang dilakukan terkait dengan keamanan struktur akibat faktor gaya aksial eksentris yang terjadi pada kolom.



Gambar 1. Beam Column Joint Proyek “X”

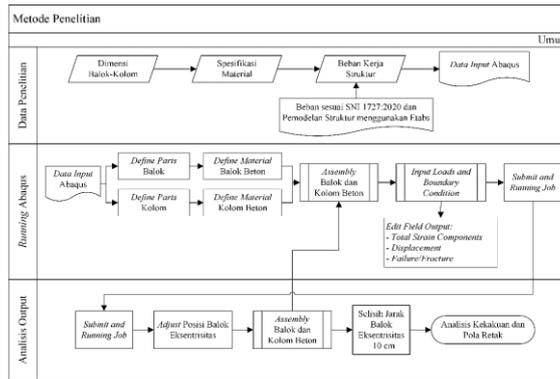
(Sumber: Foto Lapangan Peneliti, 2022)

Peletakan balok yang tidak tepat pada as atau titik berat kolom menjadi perhatian penulis sebab gaya yang bekerja pada joint menjadi bertambah dan tidak sentris.

Berdasarkan uraian temuan kasus proyek “X” dan penelitian terdahulu, pada latar belakang, tujuan dari penelitian ini, antara lain menganalisis tahap demi tahap pengaruh dari gaya aksial eksentris yang bekerja pada balok terhadap perilaku kolom menggunakan software Abaqus CAE, menganalisis dan mengevaluasi pola retak yang terjadi pada kolom bangunan dengan metode review design.

## METODE

Metode analisis yang dilakukan berbasis review design. Analisis struktur membahas mengenai dampak pada kolom yang mengalami gaya aksial eksentris terhadap kekakuan dan pola retak kolom dengan menempatkan balok sebagai gaya eksentris, dengan lima (5) parameter yaitu sentris, eksentris 10 cm, 20 cm, 30 cm, dan 45 cm sesuai shop drawing Proyek X. Diagram alur metode penelitian diperlihatkan pada Gambar 2.

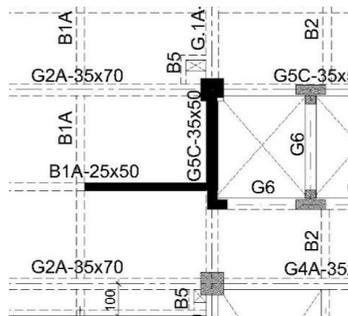


Gambar 2. Metode Penelitian

(Sumber: Metode Penelitian peneliti, 2024)

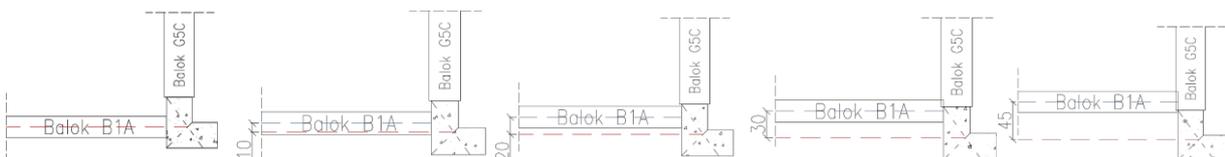
Analisis output dilakukan terhadap field output pada software Abaqus CAE. Running dilakukan berdasarkan aspek stresses, strains, displacement, forces/reactions, dan failure/fracture. Setiap hasil running, baik didapati maupun tidak didapati keretakan pada pemodelan portal, analisis dilanjutkan dengan mengelaborasi kaitan antara modulus rupture dengan dengan tegangan absolute.

Elemen struktur yang dianalisis pada beam column joint as 6B' yaitu kolom siku (KL) dengan Balok yang ditempatkan eksentris atau tidak tepat pada column centerline adalah Balok B1A. Joint as 6B' diperlihatkan pada Gambar 3, dan jarak ilustrasi parameter penelitian lokasi eksentris balok terhadap penampang kolom diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 3. As 6B' Shop drawing

(Sumber: Diolah dari Shop drawing Proyek X, 2024)



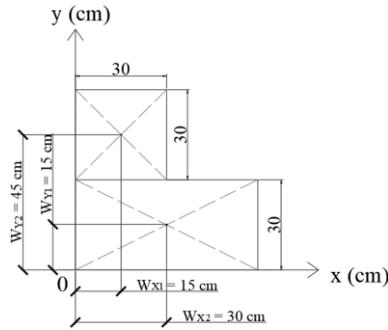
Gambar 4. Joint Eksentris Proyek X

(Sumber: Diolah dari Shop drawing Proyek X, 2024)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Olah Data Penelitian

Penampang struktur kolom siku (KL) dibagi menjadi 2 bagian untuk mencari titik berat atau column centerline menggunakan diagram kartesius dengan skala satuan centimeter (cm) pada Gambar 5.



Gambar 5. Perhitungan Column centerline

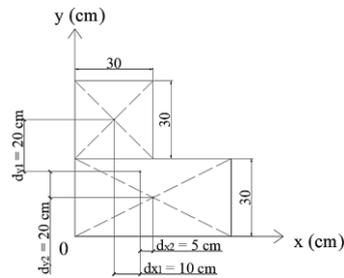
(Sumber: Diolah dari Shop drawing Proyek X, 2024)

$$x = \frac{\Sigma W_x \times A}{\Sigma A} = \frac{15 \times (30 \times 30) + 30 \times (30 \times 60)}{(30 \times 30) + (30 \times 60)} = \frac{13500 + 54000}{2700} = 25 \text{ cm}$$

$$y = \frac{\Sigma W_y \times A}{\Sigma A} = \frac{15 \times (30 \times 60) + 45 \times (30 \times 30)}{(30 \times 30) + (30 \times 60)} = \frac{40500 + 27000}{2700} = 25 \text{ cm}$$

Titik column centerline diketahui berada pada titik (25,25) berdasar perhitungan dan penggambaran pada diagram kartesius.

Perhitungan momen inersia dilakukan dengan membagi kolom siku menjadi 2 bagian seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Perhitungan Momen Inersia

(Sumber: Diolah dari Shop drawing Proyek X, 2024)

$$I_x = \left( \left( \frac{1}{12} \times b_1 \times h_1^3 \right) + A_1 \times d_{x1}^2 \right) + \left( \left( \frac{1}{12} \times b_2 \times h_2^3 \right) + A_2 \times d_{x2}^2 \right)$$

$$= \left( \left( \frac{1}{12} \times 30 \times 30^3 \right) + 900 \times (10)^2 \right) + \left( \left( \frac{1}{12} \times 60 \times 30^3 \right) + 1800 \times (5)^2 \right)$$

$$= (67.500 + 90.000) + (135.000 + 45.000)$$

$$= 337.500 \text{ cm}^4 = 3,375 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$I_y = \left( \left( \frac{1}{12} \times b_1 \times h_1^3 \right) + A_1 \times d_{y1}^2 \right) + \left( \left( \frac{1}{12} \times b_2 \times h_2^3 \right) + A_2 \times d_{y2}^2 \right)$$

$$= \left( \left( \frac{1}{12} \times 30 \times 30^3 \right) + 900 \times (20)^2 \right) + \left( \left( \frac{1}{12} \times 60 \times 30^3 \right) + 1800 \times (10)^2 \right)$$

$$= (67.500 + 360.000) + (54.000 + 180.000)$$

$$= 661.500 \text{ cm}^4 = 6,615 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

Resultan dari perhitungan momen inersia penampang kolom siku (KL) dari  $I_x$  dan  $I_y$  sebesar  $7,426 \times 10^{-3} \text{ m}^4$ .

Nilai modulus rupture atau modulus retak ( $f_r$ ) berdasarkan Persamaan 1 sebagai berikut.

$$f_r = 0,62 \times \lambda \times \sqrt{f_c'}$$

$$f_r = 0,62 \times 0,75 \times \sqrt{25 \text{ MPa}}$$

$$f_r = 2,325 \text{ MPa} = 2,325 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Nilai modulus rupture menjadi tidak spesifik karena hanya menghasilkan perhitungan angka maksimal ketahanan retak tanpa secara langsung mendefinisikan gaya yang menyebabkan terjadinya keretakan, yaitu: gaya tarik, gaya tekan, atau keduanya, sehingga dilakukan pemodelan dengan Abaqus CAE untuk mengetahui lebih detail penyebab dari terjadinya keretakan elemen struktur beton, melihat dari nilai tegangan tekan dan tegangan tarik.

### Hasil Pemodelan Software ETABS

Hasil running pemodelan struktur Gedung Rumah Sakit Proyek “X” di Kota Tegal dilakukan dengan software ETABS kemudian nilai joint reaction digunakan untuk input beban pada pemodelan Aaqus CAE. Tabel output joint load ETABS diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Output Joint Load ETABS

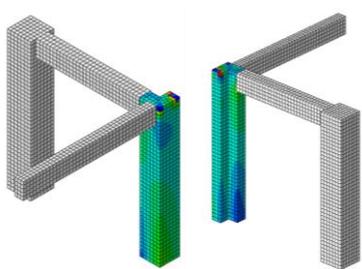
Parameter		Joint 1 (B1A-B1A) (kg)	Joint 2 (B1A-G5C) (kg)
Sentris4	U <sub>x</sub>	725,96	-
	U <sub>y</sub>	725,96	-
Eksentris 10 cm	U <sub>x</sub>	1707,81	1447,49
	U <sub>y</sub>	1707,81	1447,49
Eksentris 20 cm	U <sub>x</sub>	1708,95	1481,81
	U <sub>y</sub>	1708,95	1481,81
Eksentris 30 cm	U <sub>x</sub>	1719,98	1512,1
	U <sub>y</sub>	1719,98	1512,1
Eksentris 45 cm	U <sub>x</sub>	1720,08	1528,02
	U <sub>y</sub>	1720,08	1528,02

(Sumber: Pemodelan Software ETABS Peneliti, 2024)

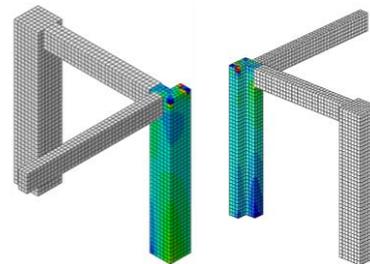
Output joint 3 yaitu titik pertemuan balok G5C dengan kolom siku (KL) tidak termasuk dalam Tabel 3 karena pada joint ini tidak terjadi pergeseran letak beban eksentris, dan besar joint load yaitu U<sub>x</sub> sebesar 6668,37 kg; U<sub>y</sub> sebesar 6668,37 kg; dan pressure load -914876,5 kg.

### Hasil Pemodelan Software Abaqus CAE

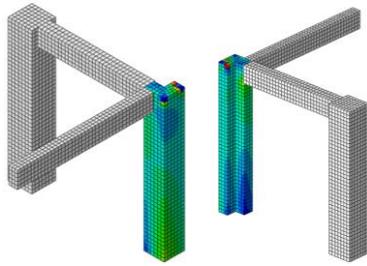
Hasil dari pemodelan pada portal beam column joint as 6B’ pada kolom siku (KL) berupa nilai tegangan absolute kemudian dilakukan perbandingan dengan nilai modulus rupture yang telah dilakukan perhitungan. Metode finite element analysis memperlihatkan Contour plot kolom KL terhadap gaya tegangan tarik dan tegangan tekan. Contour plot memperlihatkan reaksi kolom siku (KL) terhadap beban yang bekerja pada struktur, dengan melihat nilai tegangan absolute. Contour plot diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar 7. Contour plot Kolom Siku (KL) Parameter Sentris  
(Sumber: Pemodelan Abaqus CAE Proyek X, 2024)

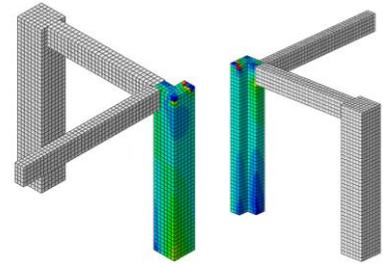


Gambar 8. Contour plot Kolom Siku (KL) Parameter Eksentris 10 cm  
(Sumber: Pemodelan Abaqus CAE Proyek X, 2024)



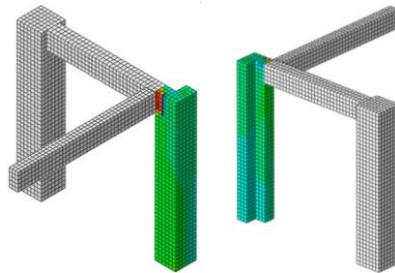
Gambar 9. Contour plot Kolom Siku (KL) Parameter Eksentris 20 cm

(Sumber: Pemodelan Abaqus CAE Proyek X, 2024)



Gambar 10. Contour plot Kolom Siku (KL) Parameter Eksentris 30 cm

(Sumber: Pemodelan Abaqus CAE Proyek X, 2024)



Gambar 12. Contour plot Kolom Siku (KL) Parameter Eksentris 45 cm

(Sumber: Pemodelan Abaqus CAE Proyek X, 2024)

Output tegangan absolute dari Abaqus CAE menghasilkan nilai negatif dan positif. Nilai tersebut merepresentasikan arah gaya yang terjadi, yaitu tarik atau tekan. Analisis perbandingan dilakukan untuk melihat perilaku kolom siku (KL) dengan mengamati rasio output dan kontur warna terhadap disipasi energi pada elemen kolom siku (KL). Selain itu, perbandingan dilakukan untuk mendeteksi terjadinya keretakan pada elemen struktur kolom siku (KL). Tabel perbandingan diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan *Modulus Rupture* dengan *Tegangan Absolute*

Parameter	$f_r$	Output Tegangan Tekan (N/m <sup>2</sup> )	Rasio	Retak atau Tidak	Output Tegangan Tarik (N/m <sup>2</sup> )	Rasio	Retak atau Tidak
	(N/m <sup>2</sup> )						
Sentris	$2,325 \times 10^6$	$2,224 \times 10^6$	0,965	Tidak Retak	$2,271 \times 10^6$	0,977	Tidak Retak
Eksentris 10 cm	$2,325 \times 10^6$	$2,313 \times 10^6$	0,995	Tidak Retak	$2,334 \times 10^6$	1,004	Retak
Eksentris 20 cm	$2,325 \times 10^6$	$2,314 \times 10^6$	0,995	Tidak Retak	$2,346 \times 10^6$	1,009	Retak
Eksentris 30 cm	$2,325 \times 10^6$	$2,316 \times 10^6$	0,996	Tidak Retak	$2,344 \times 10^6$	1,008	Retak
Eksentris 45 cm	$2,325 \times 10^6$	$9,498 \times 10^7$	40,852	Retak	$5,923 \times 10^7$	25,475	Retak

(Sumber: Olah Data Pemodelan *Software* Abaqus CAE Peneliti, 2024)

Perbandingan modulus rupture dengan tegangan absolute pada Tabel 4 memperlihatkan bahwa hanya parameter sentris yang tidak terjadi keretakan pada struktur kolom siku (KL). Menurut parameter modulus rupture sesuai SNI 2847-2019, seluruh parameter eksentris pada beam column joint mengalami keretakan.

Pada parameter eksentris 45 cm, nilai output tegangan tekan dengan nilai modulus rupture memiliki nilai rasio 40,852. Berdasarkan nilai output tegangan tarik dengan nilai modulus rupture diketahui nilai rasio sebesar 25,475. Rasio parameter eksentris ini menjadi rasio terbesar yang dihasilkan dari analisis. Hal ini terjadi karena beban eksentris berada pada posisi terjauh dari as kolom dan as balok B1A tidak tertopang oleh kolom tetapi oleh Balok G5C yang mengakibatkan output tegangan tarik dan tegangan tekan yang bekerja pada kolom meningkat secara signifikan akibat reaksi dari pergeseran balok B1A dari column centerline. Hal ini menyebabkan kolom siku (KL)

dominan menerima gaya dari balok G5C yang mengakibatkan kesetimbangan gaya dari balok B1A tidak terjadi pada area beam column joint.

Berdasarkan output grafik hubungan tegangan dan regangan dari pemodelan Abaqus CAE, data output hubungan nilai tegangan dan regangan diperlihatkan pada Tabel 4.

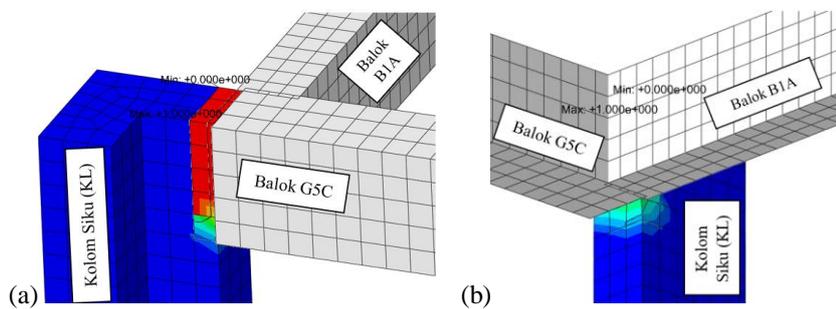
Tabel 4. Hubungan Tegangan dan Regangan

Parameter Eksentris	Nilai Tegangan (N/m <sup>2</sup> )	Nilai Regangan	Nilai Persen Regangan
Sentris	$0,225 \times 10^6$	$8,50 \times 10^{-6}$	0.00085 %
Eksentris 10 cm	$0,475 \times 10^6$	$19,5 \times 10^{-6}$	0.00195 %
Eksentris 20 cm	$0,525 \times 10^6$	$22,0 \times 10^{-6}$	0.0022 %
Eksentris 30 cm	$0,585 \times 10^6$	$23,9 \times 10^{-6}$	0.00239 %
Eksentris 45 cm	$25,1 \times 10^6$	$0,88 \times 10^{-3}$	0.088 %

(Sumber: Olah Data Pemodelan Software Abaqus CAE Peneliti, 2024)

### Analisis Pola Retak

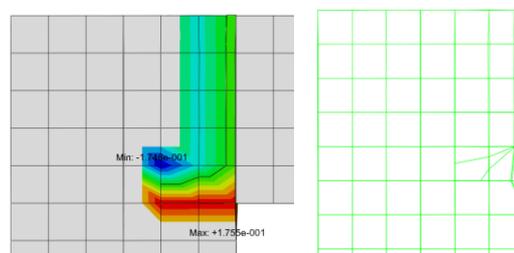
Keretakan terjadi akibat rasio tegangan tekan dan tegangan tarik yang besar dengan modulus ruptur. Pola retak parameter eksentris 45 cm pada area kegagalan di kolom siku (KL) akibat disipasi energi yang buruk pada area joint 6B' diperlihatkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Pola Retak Parameter Eksentris 45 cm

(Sumber: Pemodelan Abaqus CAE Proyek X, 2024)

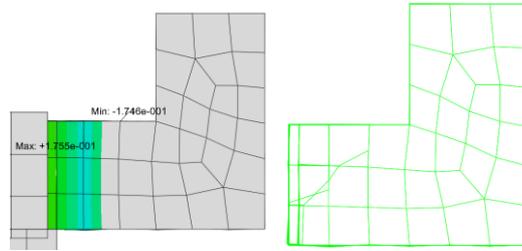
Area joint kolom siku (KL) dengan balok G5C menjadi titik terparah keretakan yang terjadi. Meshing dengan ukuran 10 cm pada setiap elemen struktur menghasilkan pengamatan pola retak yang muncul dari output Abaqus CAE yang diperlihatkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Pola Retak Parameter Eksentris 45 cm – Kolom Siku (KL) Tampak 1

(Sumber: Pemodelan Abaqus CAE Proyek X, 2024)

Gambar 14 memperlihatkan keretakan merekah dari permukaan atas kolom antar lantai dengan sambungan lantai di atasnya, mengarah ke bawah sedalam 40 cm lurus terhadap penampang, kemudian setiba di akhir dimensi balok G5C, retak merekah ke dalam badan kolom sejauh ±20 cm. Area dengan tampak ini memperlihatkan area dengan tegangan tertinggi sehingga keretakan dimungkinkan merekah pada penampang ini.

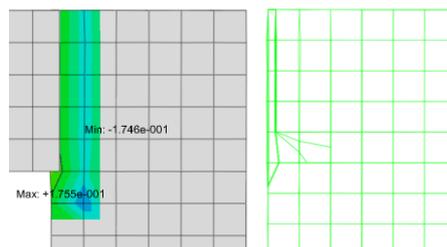


Gambar 15. Pola Retak Parameter Eksentris 45 cm – Kolom Siku (KL) Tampak 2

(Sumber: Pemodelan Abaqus CAE Proyek X, 2024)

Gambar 15 memperlihatkan retak yang signifikan sepanjang penampang melintang kolom siku (KL) sebesar 30 cm. Keretakan ini menyebabkan terjadinya pemutusan penampang kolom pada garis lurus elemen balok B1A terhadap badan kolom siku (KL). Hal ini berdampak pada penyaluran gaya atau disipasi energi pada area beam column joint yang tidak tersalurkan dengan baik.

Gambar 16 memperlihatkan bahwa rekahan retak yang terjadi tidak mengarah ke dalam badan kolom, tetapi ke arah beam column joint terutama area bawah dari elemen balok B1A dan balok G5C. Hal ini menunjukkan bahwa area ini menjadi area paling lemah dan rawan terjadi keretakan yang dapat berakibat fatal pada keruntuhan beam column joint. Retak merekah pada area terlemah pada beam column joint.



Gambar 16. Pola Retak Parameter Eksentris 45 cm – Kolom Siku (KL) Tampak 3

(Sumber: Pemodelan Abaqus CAE Proyek X, 2024)

Dolatadi, dkk., (2018) menyebutkan bahwa keretakan mengurangi kekakuan maksimum sebesar 30% pada beam column joint dengan elemen yang mengalami keretakan akan tetap stabil hingga kedalaman retak melebihi 80% dimensi kedalaman penampang. Berdasarkan pernyataan tersebut, dengan dimensi kedalaman penampang adalah 30 cm, maka kolom mengalami keruntuhan jika retak yang terjadi merekah hingga 24 cm pada penampang elemen struktur kolom siku (KL). Pernyataan Dolatadi, dkk., (2018) menjadi perhatian berdasarkan analisis yang dilakukan pada pemodelan ini. Gambar 14 – Gambar 16 mengenai pola retak yang terjadi pada kolom siku (KL) menjelaskan bahwa pola retak yang terjadi merekah lebih dari 24 cm dari permukaan penampang kolom menyimpulkan bahwa kolom siku (KL) terjadi keruntuhan.

### Evaluasi Aksial Eksentris Balok pada Beam column joint

Evaluasi terhadap diskrepansi pada peristiwa aksial eksentris balok pada beam column joint dilakukan dengan melihat tiga variabel, yaitu variabel yang mempengaruhi kekakuan struktur, hubungan kekakuan dengan eksentrisitas, dan mutu pekerjaan

Kekakuan, menurut Persamaan 3 terdiri dari variabel E dan I. Semakin besar nilai modulus elastisitas dan penampang struktur, maka kekakuan semakin baik. Modulus elastisitas pada struktur beton bertulang yang disebut juga modulus young pada perhitungan Persamaan 4 menggunakan variabel  $f_c'$ . Nilai  $f_c'$  mempengaruhi nilai modulus elastisitas material beton sehingga mutu material yang digunakan mempengaruhi modulus elastisitas. Semakin tinggi mutu beton yang digunakan, maka kuat tekan dan kuat tarik beton akan semakin tinggi. Hal itu akan berdampak pada struktur yang semakin kaku. Pada analisis ini, diketahui nilai modulus elastisitas material beton bertulang dengan mutu  $f_c'$  25 MPa adalah 23.500 N/mm<sup>2</sup>. Momen inersia berdasarkan perhitungan olah data penelitian dipengaruhi oleh dimensi penampang struktur. Semakin besar dimensi penampang elemen struktur, maka akan berdampak pada struktur yang semakin kaku. Nilai momen inersia berdasarkan arah x adalah,  $I_x = 3,375 \times 10^{-3}$

$m^4$  dan momen inersia berdasarkan arah  $y$  adalah,  $I_y = 6,615 \times 10^{-3} m^4$ . Berdasarkan nilai momen inersia tersebut, diketahui nilai resultan momen inersia  $I$  sebesar  $7,426 \times 10^{-3} m^4$ .

$$K = E \times I$$
$$K = (2,35 \times 10^{10}) \times (7,426 \times 10^{-3}) = 1,75 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

Berdasarkan perhitungan nilai kekakuan eccentric beam column joint tersebut, dapat diketahui bahwa nilai kekakuan konstan pada struktur meskipun terjadi perbedaan parameter eksentris. Nilai kekakuan tidak dipengaruhi oleh eksentrisitas yang terjadi, melainkan eksentrisitas yang terjadi dipengaruhi oleh nilai kekakuan struktur tersebut.

Melihat dari parameter kekakuan yaitu pada Persamaan 3, meningkatkan kekakuan struktur dapat dilakukan dengan tiga cara, yaitu meningkatkan modulus elastisitas material, meningkatkan nilai momen inersia, atau meningkatkan nilai keduanya. Meningkatkan modulus elastisitas dapat dilakukan dengan meningkatkan mutu material, dalam hal ini adalah mutu beton bertulang, dan meningkatkan nilai momen inersia dapat dilakukan dengan meningkatkan dimensi penampang elemen struktur.

Penelitian mengenai perilaku kolom biasanya hanya sebatas dianalisis penampang (section analysis) dengan mempertimbangkan variabel kebutuhan tulangan struktur. Pada sisi lain, engineer perlu mengontrol tegangan pada elemen struktur. Faktanya, variabel analisis material beton itu sendiri perlu dilakukan kontrol. Kontrol terhadap variabel tegangan pada material beton mengacu pada SNI 2847-2019 yang menyebutkan bahwa beton memiliki batas tegang, sedangkan variabel tegangan termasuk dalam kontrol layan. Berdasarkan pernyataan tersebut, maka penelitian ini membuktikan bahwa analisis kontrol layan kolom tidak terbatas hanya pada section properties tetapi juga pada kontrol tegang (tegangan).

## KESIMPULAN

Hanya parameter sentris yang tidak mengalami keretakan. Parameter eksentris 10 cm, 20 cm, dan 30 cm mengalami keretakan akibat tegangan tarik yang melebihi nilai modulus rupture. Parameter eksentris 45 cm mengalami keretakan akibat dari tegangan tarik dan tegangan tekan, serta rasio perbandingan tegangan dengan modulus rupture menghasilkan nilai rasio terbesar.

Semakin jauh letak beban eksentris, pola disipasi energi reaksi kolom menjadi terpusat pada area beam column joint. Hal ini ditandai dengan gradasi warna penampang kolom yang semakin heterogen seiring bertambahnya jarak eksentris. Gradasi warna tersebut menggambarkan bahwa gaya tarik dan tekan terjadi pada area tumpuan kolom, sehingga area tumpuan menjadi area kritis terhadap beban yang bekerja.

Pada parameter eksentris 45 cm, grafik hubungan nilai tegangan menurun dan nilai regangan mengalami kenaikan secara eksponensial yang menandai beton bertulang memasuki fase plastis sampai grafik terputus akibat keretakan.

Pola retak terjadi akibat tegangan dari beban yang bekerja melebihi kapasitas tegangan ultimate beton. Dimensi penampang kolom turut mempengaruhi nilai momen inersia, sehingga kedua variabel kekakuan dipengaruhi signifikan oleh beban aksial eksentris yang bekerja. Hal ini dapat diatasi dengan meningkatkan nilai dari variabel yang mempengaruhi kekakuan struktur, baik dengan meningkatkan mutu beton, meningkatkan dimensi penampang kolom struktur, atau dengan meningkatkan nilai keduanya sehingga tercapai kekakuan struktur yang diharapkan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada penulis kedua dan ketiga yang senantiasa terbuka akan pandangan dan solusi baru serta bimbingan dalam menyusun jurnal penelitian ini. Kepada Ir. Rony Winarto, S.T., selaku Project Manager dan jajaran pegawai PT. Chimarder 777 selaku kontraktor pelaksana proyek rumah sakit kota tegal yang telah berkenan memberikan gambar arsitektur, shop drawing, dan as-built drawing untuk penulis gunakan dalam penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- American Society of Civil Engineers. ACI. (2002): ACI 352R-02 recommendations for design of beam-column connections in monolithic reinforced concrete.
- Dolotadi, P.D., Khanlari, K., & Ashtiany, M. G. (2018): Sensitivity of Beam-Column Element Stiffness Matrix to the Crack Parameters. *Journal of Vibroengineering*, 1708-1719.
- Wahyono, H. L. (2018): Framework investigasi mutu pekerjaan konstruksi bangunan publik pada proses audit oleh pihak auditor dan penyidik. Semarang: Universitas Diponegoro, 184-185.

- Wiyana, Y. E. (2012): Analisis kegagalan konstruksi dan bangunan dari perspektif faktor non teknis. Wahana Teknik Sipil, ISSN: 0853-8757, 17 (1), 54-60.
- Wiyana, Y. E. (2012). Analisis kegagalan konstruksi dan bangunan dari perspektif faktor teknis. Wahana Teknik Sipil, ISSN: 0853-8757, 17 (2), 77-86.