

**ANALISIS SAMBUNGAN BALOK-KOLOM BETON BERTULANG
DENGAN PEMODELAN NUMERIK BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA**

***THE BEAM-COLUMN REINFORCED CONCRETE CONNECTION ANALYSIS
IN NUMERICAL MODELING BASED ON THE FINITE ELEMENT METHOD***

Aminullah¹, Miftahul Iman^{2*}

¹Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Nahdlatul Ulama Kalimantan Selatan

²Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Borneo Tarakan

Korespondensi: miftah@borneo.ac.id

ABSTRAK

Kerusakan sistem sambungan balok-kolom beton bertulang sering kali dijumpai pada sebuah bangunan gedung seperti halnya bangunan perumahan, rumah ibadah, dan lain sebagainya. Salah satu penyebab kerusakan tersebut diduga adanya perubahan insidental posisi balok pada sambungan balok-kolom. Penelitian ini memodelkan secara numerik sambungan balok-kolom beton bertulang dengan variasi perubahan elevasi balok yang telah ditentukan berturut-turut $0,25h$; $0,50h$; $0,75h$ dan $1,00h$ dengan h adalah tinggi balok. Pemodelan numerik menggunakan idealisasi *frame* 3D dan *solid* 3D berbasis metode elemen hingga. Idealisasi *frame* 3D digunakan untuk mengevaluasi perubahan kapasitas seiring dengan perubahan elevasi balok terhadap kolom. Idealisasi *solid* 3D telah memberikan informasi tentang kontur tegangan kriteria von mises. Evaluasi kontur tegangan dilakukan pada pertemuan balok dan kolom baik pada beton dan tulangan baja. Penelitian ini juga menghasilkan kurva beban-displasemen akibat beban gravitasi dan beban lateral. Hasil penelitian menunjukkan pengaruh perubahan elevasi balok terhadap kolom mengakibatkan peningkatan kapasitas momen dan geser pada tulangan secara signifikan. Persentase kenaikan momen dan geser berturut-turut adalah 15%, 35%, dan 45% dari kapasitas balok-kolom kontrol. Keretakan paling parah terjadi ketika elevasi balok berada pada $1,00h$. Persentase konsentrasi tegangan sambungan balok-kolom berturut-turut 8,74% (CM); 9,80% ($0,25hb$); 11,09% ($0,50hb$); 12,13% ($0,75hb$); dan 13,41% ($1,00hb$) untuk perbandingan tegangan arah horisontal dan vertikal (S11/S22) pada portal beton. Persentase konsentrasi tegangan pada tulangan baja berturut-turut 4,15% (CM); 4,47% ($0,25hb$); 5,25% ($0,50hb$); 4,56% ($0,75hb$); dan 4,57% ($1,00hb$) untuk perbandingan von mises dan tegangan arah horisontal (SVM/S11).

Kata Kunci: Balok-kolom, Momen, Geser, Sambungan, Tegangan

ABSTRACT

A Damage to the reinforced concrete beam-column connection system had found in buildings such as residential buildings, houses of worship, and so on. This was caused by an incidental changed in the position of the beam elevation at the beam-column connection. The research had modelled the reinforced concrete beam-column connection with variations beam elevation, successively: h ; $2h$; and $3h$ where h was the height of the column. Modeling used 3D frame idealization and 3D solids element. The idealization of 3D frames had used to evaluate the capacity of the beam-column due to the beam elevation changed. T. The results showed that due to beam elevation chnaged had significant increased in the moment and shear capacity. The

percentage increased in moment and shear respectively were 15%, 35%, and 45% of the control beam-column. The most severe cracks were occurred when the beam elevation was at $1.00h_b$. The percentage of beam-column connection stress concentration is 8,74% (CM); 9.80% ($0.25h_b$); 11.09% ($0.50h_b$); 12.13% ($0.75h_b$); and 13.41% ($1.00h_b$) for the ratio of horizontal and vertical stresses (S_{11}/S_{22}) on concrete frames. The percentage of stress concentration in steel reinforcement is 4.15% (CM); 4.47% ($0.25h_b$); 5.25% ($0.50h_b$); 4.56% ($0.75h_b$); and 4.57% ($1.00h_b$) for the comparison of von Mises and horizontal stresses (S_{VM}/S_{11}).

Keywords: *Beam-Column, Connection, Moment, Shear, Stress*

PENDAHULUAN

Kerusakan sistem sambungan balok-kolom beton bertulang sering kali dijumpai pada sebuah bangunan gedung seperti halnya bangunan perumahan, rumah ibadah, dan lain sebagainya. Hal tersebut umumnya disebabkan adanya perubahan insidental posisi balok pada sambungan balok-kolom. Beberapa penelitian tentang balok-kolom beton bertulang, salah satunya [1] telah melakukan penelitian tentang sambungan balok-kolom. Penelitian ini mengevaluasi konfigurasi tulangan, eksentrisitas, rasio aspek sambungan (h_b/h_c), kuat tekan beton, dan beban aksial kolom tekan. Klasifikasi BCJ diperkenalkan menurut ACI 318-02 (2002) dan kode Mesir (2007).

TINJAUAN PUSTAKA

Persamaan balok-kolom telah dihasilkan [2],[3] sebagaimana yang dicantumkan dalam Persamaan (1) dan Persamaan (2).

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(F \frac{\partial w}{\partial x} \right) = P_z \quad (1)$$

Pesamaan (1) adalah persamaan diferensial dasar lentur balok-kolom orde-4 dengan EI adalah kekakuan lentur balok-kolom, F adalah gaya normal, dan P_z adalah gaya lintang.

$$w = A \cos kx + B \sin kx + Cx + D + f(x) \quad (2)$$

dengan w adalah lendutan balok kolom, A , B , C , dan D adalah konstanta yang telah ditentukan berdasarkan kondisi batas (*boundary condition*) dari balok-kolom. Fungsi $f(x)$ adalah solusi khusus untuk beban lateral $q(x)$.

Perbandingan peraturan desain sambungan balok-kolom juga telah dilakukan [4]. Edy dkk

(2015) telah melakukan penelitian tentang analisis desain hubungan balok-kolom pada Gedung Hotel Serela Lampung, yang mengacu pada, SNI 2847-2013 dan Metode ACI 352R-2002. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat perbedaan antara metode perencanaan SNI 2847-2013 dan metode ACI 352R-2002 Kedua metode perencanaan tersebut aman namun metode perencanaan ACI 352R-2002 lebih tinggi tingkat keamanannya dan dari segi efisiensi metode perencanaan SNI 2847-2013 lebih besar tingkat efisiensinya.

Sambungan Balok-Kolom

Beberapa penelitian tentang sambungan balok-kolom beton bertulang [5] juga telah dilakukan. Sambungan balok-kolom sistem rangka penahan momen. Hal ini dikenakan kekuatan besar selama guncangan tanah yang parah dan perilakunya memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon struktur. Asumsi sambungan kaku gagal mempertimbangkan efek dari gaya geser tinggi yang dikembangkan di dalam sambungan. Kegagalan geser selalu rapuh di alam yang bukan merupakan struktur yang dapat diterima kinerja terutama dalam kondisi seismik.

Penelitian lainnya juga telah dilakukan tentang perkuatan pada sambungan balok-kolom [6]. Penelitian ini mengevaluasi perkuatan sambungan balok-kolom yang merupakan elemen terlemah dari struktur dalam Gedung ketika mengalami pembebanan gempa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kekuatan spesimen SJ-01 dan SJ-03 dibandingkan dengan spesimen referensi adalah 12,74% dan 10,29%, masing-masing. Sedangkan kekuatan spesimen SJ-02 sedikit berkurang bandingkan dengan spesimen referensi

Metode Elemen Hingga

Pemodelan sambungan balok-kolom dengan menggunakan metode elemen hingga [7]. Sebuah sendi memerlukan teknik perkuatan yang efektif dan mudah dipasang. Penelitian ini menyajikan pelat

baja untuk memperkuat sambungan balok-kolom beton melalui penelitian numerik. Model elemen hingga dikembangkan menggunakan Abaqus. Hasil FEM divalidasi dengan perbandingan dengan sebelumnya uji eksperimental. Untuk tujuan ini, dua sambungan balok-kolom RC telah dianalisis, termasuk kolom balok standar asli dan baja non-standar perincian diperkuat dengan pelat baja. Perbandingan hasil dari model numerik menunjukkan bahwa pelat baja dapat meningkatkan kekuatan lateral, daktilitas, disipasi energi dan meningkatkan kekuatan geser sendi.

Pemodelan numerik sambungan balok-kolom juga telah dilakukan[8] dengan menggunakan 3 sub-rakitan balok-kolom interior pra-tekan Sebagian (SI) dan 2 sub-rakitan balok-kolom eksterior prategang sebagian (SE) terbuat dari beton bubuk reaktif sebagai benda uji yang dimodelkan secara numerik menggunakan program elemen hingga. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki perilaku model numerik SI dan SE. Hasil pemodelan numerik yang heuristik dan kurva tulang punggung dan kontur distribusi tegangan. Keluaran model numerik menunjukkan kemiripan yang baik dengan hasil eksperimen. Distribusi tegangan kontur model numerik yang berkorelasi dengan pola retakan pada sambungan zona benda uji. Perilaku model numerik SI berbeda dari model numerik SE karena berbagai tekanan pada sambungan plastik balok dan zona bersama.

Penggunaan metode elemen hingga untuk sambungan balok ke kolom pracetak juga telah dilakukan[9]. Tiga jenis sambungan balok-kolom berturut-turut: sambungan monolitik, pelat ujung, dan korbek yang telah dimodelkan dengan menggunakan tiga paket perangkat lunak berbasis metode elemen hingga dimensi (3D) Abaqus. Hasil penelitian menunjukkan perbandingan akurasi yang baik.

Sambungan balok-kolom beton bertulang (RC) terutama yang tanpa tulangan transversal pada daerah sambungan dapat menunjukkan sifat getas perilaku ketika kerusakan intensif terkonsentrasi di wilayah sendi ketika terjadi peristiwa gempa terkonsentrasi di wilayah sendi saat terjadi peristiwa gempa[10]. Analisis elemen hingga (FEA) nonlinier dari RC sambungan balok-kolom dilakukan untuk menyelidiki modus kegagalan geser sendi dalam hal kapasitas geser sendi, deformasi dan pola retak.

Kerusakan sistem sambungan balok-kolom

beton bertulang sering kali dijumpai pada sebuah bangunan gedung seperti halnya bangunan perumahan, rumah ibadah, dan lain sebagainya. Hal tersebut seringkali disebabkan adanya perubahan insidental posisi balok pada sambungan balok-kolom.

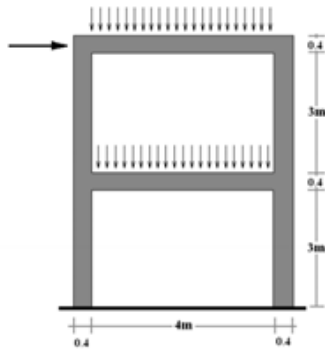
Asran dkk. (2016) telah melakukan penelitian tentang sambungan balok-kolom. Penelitian ini mengevaluasi konfigurasi tulangan, eksentrisitas, rasio aspek sambungan (hb/hc), kuat tekan beton, dan beban aksial kolom tekan. Klasifikasi BCJ diperkenalkan menurut ACI 318-02 (2002) dan kode Mesir (2007). Panjwani dan Dubey (2015) juga telah melakukan penelitian tentang sambungan balok-kolom sistem rangka penahan momen. Hal ini dikenakan kekuatan besar selama guncangan tanah yang parah dan perilakunya memiliki pengaruh yang signifikan terhadap respon struktur. Asumsi sambungan kaku gagal mempertimbangkan efek dari gaya geser tinggi yang dikembangkan di dalam sambungan. Kegagalan geser selalu rapuh di alam yang bukan merupakan struktur yang dapat diterima kinerja terutama dalam kondisi seismik. Kertas ini menyajikan tinjauan dari teori-teori yang didalilkan terkait dengan perilaku sendi. Memahami perilaku bersama adalah penting dalam melaksanakan penilaian yang tepat dalam desain sambungan. Makalah ini membahas tentang aksi seismik pada berbagai jenis sambungan dan menyoroti parameter kritis yang memengaruhi sambungan kinerja dengan referensi khusus untuk transfer ikatan dan geser

Sigit dan Ade (2016) telah melakukan penelitian tentang kekuatan sambungan balok-kolom yang merupakan elemen terlemah dari struktur dalam gedung ketika mengalami pembebanan gempa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kekuatan spesimen SJ-01 dan SJ-03 dibandingkan dengan spesimen referensi adalah 12,74% dan 10,29%, masing-masing. Sedangkan kekuatan spesimen SJ-02 sedikit berkurang dibandingkan dengan spesimen referensi

METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah pemodelan numerik sambungan balok kolom beton bertulang menggunakan metode elemen hingga. Pemodelan numerik dibantu program komputer yang berbasis metode elemen hingga seperti halnya SAP2000 dan Abaqus. Analisis struktur yang dilakukan adalah analisis statik ekuivalen dan

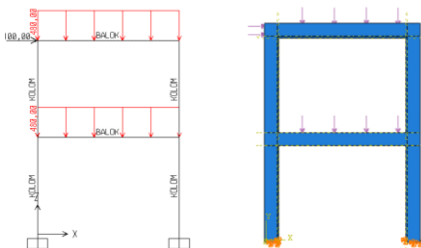
analisis modal.



Gambar 1. Prototipe portal beton bertulang

Pemodelan numerik dilakukan dalam dua idealisasi yaitu: 2D frame dan 3D solid. Pemodelan dengan idealisasi 2D frame digunakan untuk mengevaluasi gaya-gaya dalam dan displasemen yang terjadi akibat perubahan elevasi balok terhadap kolom. Displasemen dievaluasi pada salah satu nodal paling atas dari struktur portal 2D.

Pemodelan 3D solid juga telah dilakukan untuk mengevaluasi tegangan yang terjadi pada sambungan akibat pengaruh perbedaan elevasi balok terhadap kolom. Kriteria tegangan von mises digunakan untuk menganalisis tegangan dan konsentrasi tegangan yang terjadi di sekitar sambungan balok-kolom akibat perubahan elevasi balok terhadap kolom.



Gambar 2. Model portal beton bertulang.

Gambar 2 menunjukkan pemodelan struktur balok-kolom (2D-frame dan 3D-solid). System perletakan yang digunakan pada model adalah system perletakaan jepit (*fixed end supported*). Kedua model diberikan beban merata (*uniform load*) pada masing-masing permukaan balok dan beban lateral pada ujung kiri atas struktur balok-kolom.

Dimensi struktur balok-kolom beton bertulang ditentukan 400 cm x 400 cm. Tulangan baja yang digunakan berturut-turut adalah D20 untuk tulangan kolom, D16 untuk tulangan balok, dan P10 untuk tulangan sengkang. Sifat-sifat material beton bertulang disajikan pada Tabel 1.

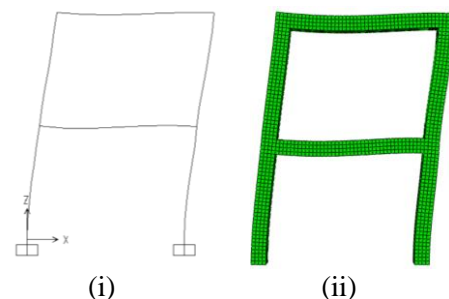
Tabel 1. Sifat-sifat material

Properties	
<u>Concrete</u>	
Poisson ratio (ν)	0,2
Comp. strength (f^c)	25 MPa
Mod. of elasticity (E_c)	23500 MPa
<u>Steel</u>	
Poisson ration (ν)	0,3
Yielding stress (F_y)	410 MPa
Yielding stress (F_y)	370 MPa
Limit stress (F_u)	470 MPa
Mod. of elasticity (E_s)	200000 MPa

Tabel 1 juga menunjukkan sifat-sifat material baja yang digunakan sebagai tulangan pada masing-masing elemen (balok-kolom). Tulangan geser (sengkang) menggunakan baja dengan tegangan leleh (F_y) adalah 370 Mpa. Modulus elastisitas beton (E_c) ditentukan oleh nilai mutu beton (f^c). Modulus elastisitas baja ditentukan berdasarkan tabel baja (AISC).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum hasil penelitian ini dikelompokkan menjadi 2 bagian, yaitu model balok-kolom kontrol (tanpa perubahan elevasi balok) dan model balok-kolom dengan perubahan elevasi balok. Perubahan elevasi balok berturut-turut 0,25h; 0,50h; 0,75h dan 1,00h dengan h adalah tinggi balok. Hasil analisis struktur juga dibedakan berturut-turut: displasemen, momen lentur, dan analisis tegangan.



Gambar 3. Deformasi model portal kontrol

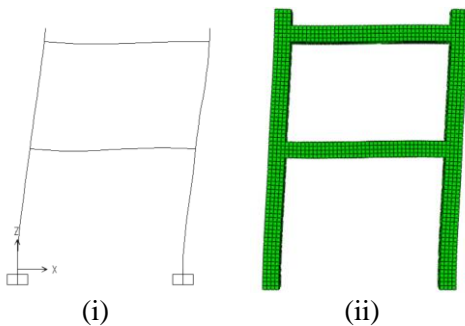
Gambar 3 menunjukkan deformasi model struktur portal kontrol akibat beban lateral. Deformasi model struktur portal 2D frame (Gambar 3(i)) sama dengan deformasi struktur portal 3D solid (Gambar 3(ii)). Displasemen terukur pada nodal teratas tercatat berturut-turut 1,79 mm (2D frame)

dan 1,74 mm (3D solid). Persentase perbedaan kedua model adalah 2,79%.

Tabel 2. Displasemen

2D Frame		3D Solid	
Elevasi	Displasemen (mm)	Elevasi	Displasemen (mm)
0,00	1,79	0,0	1,74
0,25 h_b	1,73	0,25 h_b	2,11
0,50 h_b	1,66	0,50 h_b	1,63
0,75 h_b	1,59	0,75 h_b	1,58
1,00 h_b	1,54	1,00 h_b	1,54

Tabel 2 menunjukkan adanya penurunan displasemen akibat perubahan elevasi balok terhadap kolom. Persentase penurunan displasemen rerata masing-masing model berturut turut adalah 8,94% (2D frame) dan 12,07% (3D solid). Persentase penurunan maksimum terjadi ketika elevasi balok turun 1,00 h_b berturut-turut yaitu 13,97% (2D frame) dan 11,49% (3D solid).



Gambar 4. Deformasi model 0,25h

Gambar 4 menunjukkan mode deformasi salah satu model balok-kolom dengan perubahan elevasi balok. Elevasi balok diturunkan menjadi + 6600 mm (1,00 h) dengan h adalah tinggi balok. Deformasi kedua model (2D frame dan 3D solid) relatif sama, adalah +6,20 m (0,3 h).

Beban lateral terpusat (100 kN) juga diletakkan pada elevasi yang sama dengan elevasi penurunan balok. Persentase pengaruh perubahan elevasi balok terhadap displasemen berturut-turut adalah 3,35%; 7,26%; 11,17%; dan 13,97% untuk model 2D frame dengan penurunan elevasi balok. Persentase penurunan displasemen untuk model portal 3D solid berturut-turut: 21,26%; 6,32%; 9,19% dan 11,49%.

Tabel 3. Momen lentur maksimum

Elevasi	Momen lentur (kNm)			
	Gravitasi		Lateral	
	Balok	Kolom	Balok	Kolom
0	6,84	7,10	8,60	15,24
0,25 h_b	6,80	7,14	8,46	15,05
0,50 h_b	6,75	7,19	8,31	14,87
0,75 h_b	6,70	7,23	8,17	14,68
1,00 h_b	6,66	7,28	8,02	14,49

Tabel 3 menunjukkan perubahan momen lentur maksimum yang terjadi pada balok dan kolom seiring dengan perubahan elevasi balok terhadap kolom. Momen lentur maksimum disebabkan oleh gaya gravitasi dan gaya lateral. Tabel 2 juga menunjukkan bahwa terjadi penurunan momen maksimum lapangan ($M^{(+)}$) pada elemen balok. Sebaliknya, terjadi peningkatan momen maksimum pada elemen kolom (Gambar 6). Gaya momen lentur dihasilkan oleh pemodelan struktur portal 2D frame (Gambar 7).

Analisis tegangan di sekitar sambungan balok juga telah dilakukan (Tabel 4). Kontur tegangan dibedakan menjadi dua berturut-turut kontur tegangan pada beton dan tulangan baja.

Tabel 4. Tegangan maksimum pada beton

Elevasi	S ₁₁ (MPa)		S ₂₂ (MPa)	
	S _{max}	S _{min}	S _{max}	S _{min}
0,00 h_b	12,32	12,35	13,50	13,50
0,25 h_b	15,18	15,15	16,83	16,77
0,50 h_b	11,87	11,90	13,35	13,35
0,75 h_b	11,66	11,69	13,27	13,28
1,00 h_b	11,43	11,47	13,20	13,21

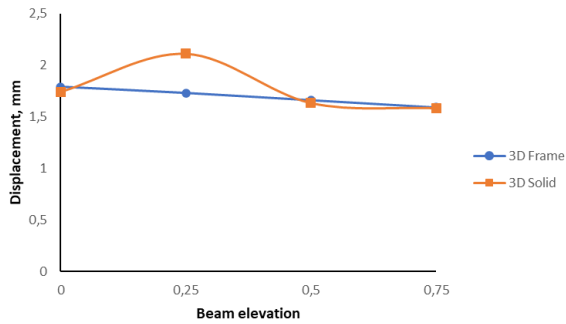
Tabel 4 menunjukkan tegangan maksimum yang terjadi pada portal beton. Tegangan maksimum dan minimum terukur berdasarkan kontur tegangan yang terjadi dalam arah-x (S_{11}) dan arah-y (S_{22}).

Tabel 5. Tegangan pada tulangan baja

Elevasi	SVM	S11
	(MPa)	(MPa)
0,00 h_b	105,9	101,5
0,25 h_b	131,9	126
0,50 h_b	104,7	99,2
0,75 h_b	104,1	99,35
1,00 h_b	103,5	98,77

Tabel 5 menunjukkan nilai tegangan yang terjadi pada tulangan baja

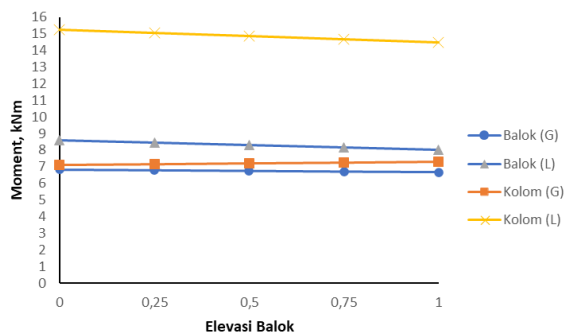
Secara umum kedua model struktur portal (2D *frame* dan 3D *solid*) menunjukkan pola deformasi yang sama. Displasemen pada salah satu nodal teratas dari kedua model relatif sama. Pengaruh penurunan elevasi balok juga telah dievaluasi dalam penelitian ini.



Gambar 8. Kurva displasemen balok-kolom

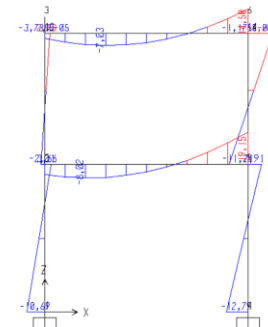
Gambar 8 menunjukkan bahwa displasemen yang terjadi pada model 2D *frame* relatif lebih kecil daripada model 3D *solid*. Hal tersebut disebabkan oleh kekakuan elemen *solid* yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan elemen *frame*. Meskipun demikian, ketika elevasi balok diturunkan $1,00h_b$ tidak terdapat perbedaan displasemen arah lateral (1,54 mm).

Momen lentur yang ditinjau adalah momen maksimum pada tengah bentang ($M^{(+)}$) pada elemen balok dan momen maksimum ($M^{(-)}$) pada elemen kolom. Tinjauan momen lentur dilakukan pada masing-masing elemen balok dan kolom akibat beban gravitasi dan beban lateral.



Gambar 5. Kurva elevasi balok-momen

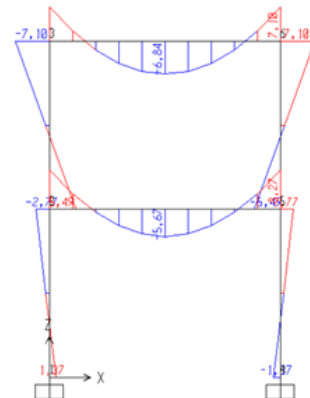
Gambar 5 menunjukkan momen tumpuan ($M^{(-)}$) pada balok 1 berkurang seiring dengan perubahan elevasi balok terhadap kolom. Sebaliknya, terjadi kenaikan momen tumpuan ($M^{(-)}$) seiring dengan perubahan elevasi balok terhadap kolom.



Gambar 6. BMD model 2D *frame* (beban lateral)

Gambar 6 menunjukkan *Bending Moment Diagram* (BMD) model struktur portal akibat beban lateral. Sebagaimana BMD akibat gaya lateral maka terdapat peningkatan momen pada kolom. Momen lentur maksimum pada elemen balok (model kontrol) akibat beban lateral tercatat 8,60 kNm. Momen maksimum yang terjadi pada kolom akibat beban yang sama tercatat 15,24 kNm.

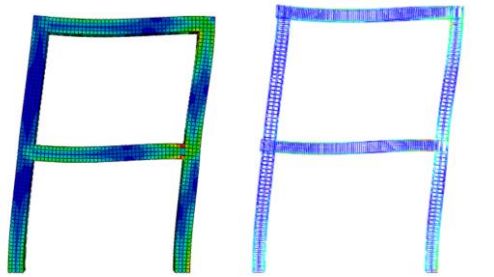
BMD akibat beban gravitasi juga telah dievaluasi (Gambar 8). Momen lentur maksimum terjadi pada elemen balok lantai 2 (6,84 kNm). Momen maksimum pada kolom akibat beban gravitasi tercatat 7,10 kNm. Persentase perbedaan momen kolom terhadap balok seiring dengan perubahan elevasi balok berturut-turut adalah 3,66% (CM); 4,76% ($0,25h_b$); 6,12% ($0,50h_b$); 7,33% ($0,75h_b$); dan 7,33% ($1,00h_b$).



Gambar 7. BMD 2D *frame* (gravitasi)

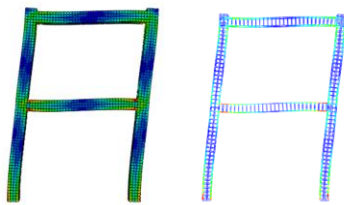
Gambar 7 juga menunjukkan bahwa bertambahnya momen pada kolom akibat beban gravitasi relatif lebih rendah daripada penambahan momen pada kolom akibat beban lateral. Persentase perbedaan penambahan momen pada kolom berturut-turut 53,41% (model kontrol); 52,56% ($0,25h_b$); 51,6% ($0,50 h_b$); 50,75% ($0,75 h_b$); dan 49,76% ($1,00 h_b$). Terdapat perbedaan tren yang sangat signifikan antara kedua tipe pembebanan

tersebut. Model portal akibat beban gravitasi cenderung mengalami peningkatan momen seiring dengan perubahan elevasi balok. Sebaliknya model portal akibat beban lateral mengalami penurunan momen kolom akibat berubahnya elevasi balok.



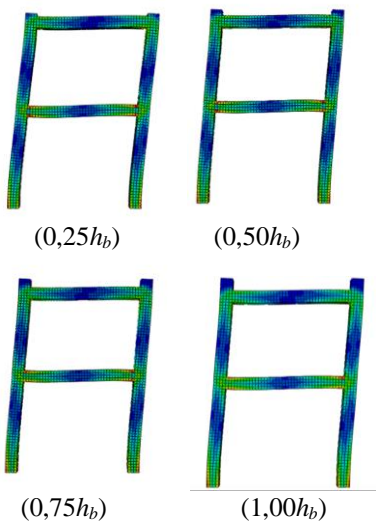
Gambar 9. Kontur tegangan model kontrol

Gambar 9 menunjukkan kontur tegangan dari sebuah portal beton bertulang tanpa penurunan elevasi balok (*control model*). Gambar 9 juga menunjukkan kontur tegangan yang bekerja pada tulangan baja. Kriteria tegangan yang digunakan di sini adalah kriteria tegangan von mises.



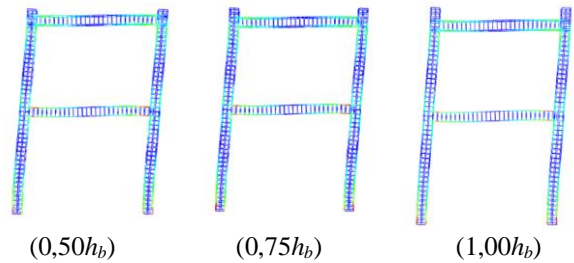
Gambar 10. Kontur tegangan model 0,25hb

Gambar 10 menunjukkan kontur tegangan pada model portal beton bertulang dengan perubahan elevasi balok. Perubahan elevasi balok ada;ah 0,25hb dengan hb adalah tinggi balok. Seperti halnya dengan model kontrol analisis tegangan juga dilakukan pada portal beton dan tulangan baja.



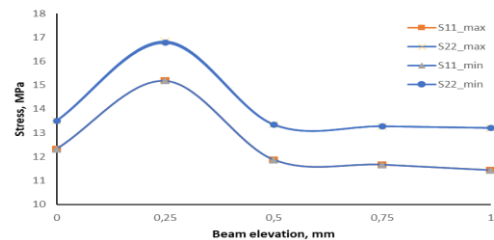
Gambar 11. Kontur tegangan model elevasi

Gambar 11 juga menunjukkan kontur tegangan pada model portal beton dengan perubahan elevasi balok beton berturut-turut 0,25hb, 0,50hb, 0,75hb, dan 1,00hb, dengan hb adalah tinggi balok. Gambar 11 juga menunjukkan perubahan konsentrasi tegangan seiring dengan perubahan elevasi balok. Konsentrasi tegangan terjadi pada pertemuan balok-kolom lantai 1 dan lantai 2.



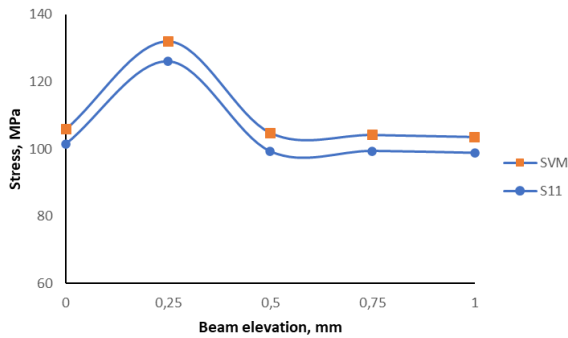
Gambar 12. Kontur tegangan baja model elevasi

Gambar 12 menunjukkan kontur tegangan yang terjadi pada tulangan baja yang dengan perubahan elevasi balok. Kontur tegangan dievaluasi berdasarkan kriteria tegangan von mises. Seperti halnya pada portal beton konsentrasi tegangan meningkat pada sambungan tulangan balok-kolom lantai 1.



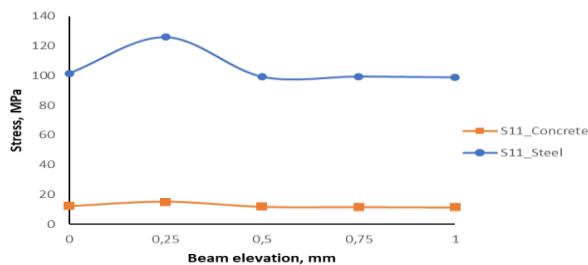
Gambar 13. Kurva perbandingan tegangan

Gambar 13 menunjukkan kurva perbandingan tegangan pada masing-masing-model portal beton bertulang dengan perubahan elevasi balok beton. Tegangan yang ditinjau adalah tegangan arah horizontal (S11) dan tegangan arah vertikal (S22). Persentase perbedaan antara tegangan dalam kedua raah tersebut berturut-turut adalah: 8,74% (CM); 9,80% (0,25hb); 11,09%(0,50hb); 12,13%(0,75hb); dan 13,41%(1,00hb). Dalam kasus ini tegangan akibat beban gravitasi relatif lebih besar daripada tegangan akibat beban lateral.



Gambar 14. Kurva perbandingan tegangan

Gambar 14 menunjukkan kurva perbandingan tegangan yang terjadi pada baja tulangan. Kontur tegangan yang ditinjau berdasarkan hasil evaluasi kriteria tegangan von mises dan tegangan utama arah horizontal (S11). Persentasi perbedaan tegangan keduanya berturut-turut adalah: 4,15%(MC); 4,47%(0,25 h_b); 5,25%(0,50 h_b); 4,56%(0,75 h_b); dan 4,57%(1,00 h_b).



Gambar 15. Perbandingan tegangan beton-baja

Gambar 15 menunjukkan perbandingan tegangan beton dan baja dalam model portal beton bertulang tanpa dan dengan perubahan elevasi balok. Kriteria tegangan ditentukan berdasarkan kriteria tegangan utama arah horizontal (S11) yang disebabkan oleh aksi beban lateral. Persentasi perbedaan keduanya ditunjukkan berturut-turut: 87,86%(CM); 87,95%(0,25 h_b); 88,03%(0,50 h_b); 88,26%(0,75 h_b); dan 88,43%(1,00 h_b).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Perubahan elevasi balok memberikan pengaruh signifikan terhadap displasemen.
2. Perubahan elevasi balok memberikan pengaruh signifikan terhadap pembesaran momen.
3. Perubahan elevasi balok memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan gaya geser.
4. Perubahan elevasi mempengaruhi signifikan

terhadap kenaikan kosentrasi tegangan pada sambungan balok kolom

5. Pola retak yang ditunjukkan hampir sama pada setiap variasi perubahan elevasi balok terhadap kolom

DAFTAR PUSTAKA

- A. Asran, H. Al-Esnawy, and S. Fayed, "A review on reinforced concrete beam-column connections," *IEEE Transl. J. Magn.Egypt*, vol. 11, pp. 1-27, April 2016 [Proc. of the 11th International Conf. on Civil and Architecture Engineering Egypt, p. 6, 2016].
- S. Timoshenko, and J.M. Gere, *Theory of elastic stability*, 2nd ed., vol. 1. McGraw-Hill: New York, 1961, pp. 2-5.
- W.F Chen, and T. Atsuta, *Theory of beam-columns in-plane behavior and design*, 1st ed., vol. 1. McGraw-Hill: New York, 1976, pp. 56-61.
- E. Ristanto, Suyadi, and L. Irianti, "Analisis joint balok-kolom dengan metode SNI 2847-2013 dan ACI 352R-2002 pada hotel Serela Lampung," *Jurnal Rekayasa Sipil dan Desain. Indonesia*, vol. 3 pp. 521-540, September 2015. (*references*)P.
- Panjwani, and S.K. Dubey, "Study of reinforced concrete beam-column joint," *Int. Journal of Engineering Research. India*, vol. 4 pp. 321-324, Juni 2016. (*references*)S.
- Hernowo, and A. Lisantono, "Retrofitting sambungan kolom-balok beton bertulang ekspansi planar segitiga dengan variasi ukuran," *Forum Teknik. Indonesia*, vol. 37 pp. 1-13, Januari 2016. (*references*)
- Y. Rahmi, A. Saputra, and S. Siswosukarto, "Numerical modelling of interior RC beam-column joints for non-engineered buildings strengthened using steel plates," *MATEC Web Conf. France*, vol. 138, pp. 1-10, August 2017 [Proc. of 6th International Conf. of Euro Asia Civil Engineering Forum South Korea, p. 258, 2017].
- B. Budiono, S.A. Nurjannah, and I. Imran, "Non-linier numerical modelling of partially pre-stressed beam-column sub-assemblages made of reactive powder concrete," *J. Eng. Technol. Sci. Indonesia*, vol. 51 pp. 28-47, January 2019. (*references*)

- S. Shukri, M. Taib, N. Taib, and N.M. Husain, "Finite element analysis on beam to column connection in IBS panel," *European Proc.. Cyprus*, vol. 11, pp. 447-458, November 2019 [Proc. of the 4th International Conf. on Rebuilding Place Malaysia, p. 6, 2019].
- M.A. Najafgholipour, S.M. Dehgan, A. Dooshabi, and A. Niroomandi, "Finite element analysis of reinforced concrete beam-column connections with governing joint shear failure mode," *Latin American Journal of Solids and Structures*. Brazil, vol. 14 pp. 1200-1225, May 2017. (*references*)