

EFEK KOMBINASI BEBAN AKSIAL DAN LENTUR SERTA VARIASI BENTUK DAN UKURAN LUBANG TERHADAP KONSENTRASI TEGANGAN PADA BALOK BAJA BERLUBANG

M. Sukrawa, A. A. N. A. Angga Pradhana, G. Pringgana, K. Sudarsana, I G. A. Susila, dan I A. M. Budiwati

*Program Studi Magister Teknik Sipil Universitas Udayana, Denpasar
Email: msukrawa@unud.ac.id*

ABSTRAK

Penelitian terkait konsentrasi tegangan pada balok baja berlubang biasanya dilakukan pada balok sederhana tanpa pengaruh beban aksial. Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan struktur rangka baja 2 (dua) lantai untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi beban aksial dan lentur terhadap konsentrasi tegangan di sekitar lubang pada balok baja. Lubang yang ditinjau meliputi lubang persegi dan lingkaran, dengan dan tanpa perkuatan di sekitar lubang, dengan dimensi lubang 0,3 H, 0,5 H, dan 0,7 H. H adalah tinggi balok. Jenis perkuatan yang ditinjau yaitu All Around (AA), Long Horizontal (LH), dan Doubler Plate (DP). Hasil analisis struktur rangka menunjukkan bahwa peningkatan gaya aksial balok akibat beban gempa sebesar 17%, mengakibatkan peningkatan tegangan pada lubang persegi sebesar 9%. Tegangan di sekitar lubang lingkaran lebih kecil dibandingkan dengan tegangan pada lubang persegi. Tegangan maksimal pada lubang lingkaran masing-masing sebesar 0,35 fy, 0,43 fy, dan 0,69 fy untuk dimensi lubang 0,3 H, 0,5 H, dan 0,7 H. Pada lubang persegi, tegangan maksimal yang terjadi pada dimensi lubang 0,3 H adalah 0,57 fy, sedangkan pada dimensi lubang 0,5 H dan 0,7 H tegangan yang terjadi melampaui tegangan leleh. Pada lubang persegi 0,5 H, penambahan perkuatan AA dan LH menghasilkan tegangan yang lebih kecil dari tegangan leleh, sedangkan pada lubang 0,7 H perkuatan di sekitar lubang tidak efektif.

Kata kunci: balok baja berlubang, beban aksial, Metode Elemen Hingga, perkuatan

EFFECT OF COMBINED AXIAL AND BENDING LOADS AND VARYING SHAPES AND SIZES OF OPENING ON STRESS CONCENTRATION IN STEEL BEAM WITH WEB OPENING

ABSTRACT

Research related to stress concentrations in perforated steel beams is usually carried out on simple beams without the influence of axial loads. In this study, modeling of 2-story steel frame structures was carried out to evaluate the effect of the combination of axial and flexural loads on the stress concentration around the opening in the steel beam. The observed opening includes square and circular opening, with and without reinforcement around the opening, with opening dimensions of 0.3 H, 0.5 H, and 0.7 H. H is the height of the beam. The types of reinforcement are All Around (AA), Long Horizontal (LH), and Doubler Plate (DP). The analysis results showed that 17% increase in beam axial force due to earthquake load, resulting in stress increase of 9% in square opening. The maximum stress around circular opening is smaller than that on the square one. The maximum stresses in the circular openings are 0.35 fy, 0.43 fy, and 0.69 fy for opening dimensions of 0.3 H, 0.5 H and 0.7 H, respectively. In the square opening, the maximum stress in 0.3 H opening is 0.57 fy, while for opening dimension of 0.5 H and 0.7 H the stresses exceeds the yield stress of the steel. Addition of AA and LH reinforcement in 0.5 H square opening, results in stresses lower than fy, whereas for the 0.7 H opening the reinforcement around the hole is ineffective.

Keywords: steel beam with web opening, opening reinforcement, axial force, Finite Element Method, web opening

1 PENDAHULUAN

Lubang pada balok baja struktural pada bangunan bertingkat bermanfaat dalam memaksimalkan ketinggian ruangan karena pekerjaan mekanikal, elektrik dan plumbing bisa melalui lubang. Oleh karena itu banyak penelitian telah dilakukan terkait lubang pada baja struktural. Morkhede dan Gupta (2015) melakukan pengujian perilaku balok baja berlubang dengan variasi bentuk lubang yang diberikan beban vertical tegak lurus balok baja. Muhtarom (2015) juga melakukan pengujian balok baja berlubang dengan variasi jumlah lubang dengan beban tegak lurus balok baja. Selain kedua penelitian tersebut, hampir semua penelitian yang dilakukan hanya memperhitungkan beban lentur tanpa beban aksial, baik dengan maupun tanpa perkuatan di sekitar lubang. Pada kenyataannya pada saat bangunan menerima beban gempa, balok akan mengalami beban aksial bersamaan dengan beban momen dan geser. Beban aksial bisa sangat besar, tergantung dari besarnya gaya gempa yang terjadi. Oleh karenanya beban aksial pada elemen struktur perlu diperhitungkan dalam pemodelannya, terutama pada balok baja berlubang karena gaya aksial dapat meningkatkan tegangan maksimum di sekitar lubang (Timoshenko and Goodier, 1987 dan Sukrawa, 2017).

Dalam penelitian sebelumnya oleh Sukrawa (2017) efek beban aksial dikerjakan pada ujung balok secara terpisah, bukan sebagai bagian dari struktur rangka sehingga tidak jelas seberapa besar efek beban gempa terhadap peningkatan tegangan di sekitar lubang. Pada penelitian ini, balok baja berlubang dianalisis sebagai rangka baja pada bangunan 2 (dua) lantai yang dibebani gempa, menggunakan software ANSYS (ANSYS, 2010). Pengaruh perkuatan di sekitar lubang untuk berbagai tipe dan ukuran lubang juga ditinjau sehingga diperoleh hasil yang lebih lengkap.

2 TEORI TENTANG MODA KERUNTUHAN PADA BALOK BAJA BERLUBANG

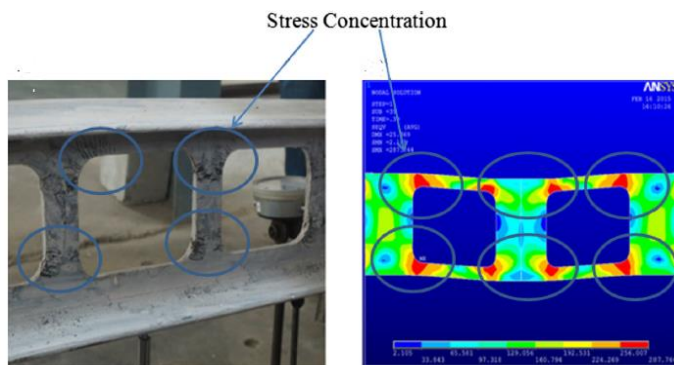
Moda keruntuhan balok baja berlubang dapat diilustrasikan dalam Gambar 1. Keruntuhan dapat disebabkan oleh beberapa factor berikut ini.

Rasio momen dan gaya geser. Distribusi tegangan di sekitar lubang dipengaruhi oleh rasio momen dan gaya geser (M/V). Pada M/V yang semakin berkurang, gaya geser dan gaya momen sekunder meningkat, mengakibatkan gaya Vierendeel sehingga *top tee* dan *bottom tee* akan mengalami perubahan yang signifikan. (AISC, 2003).

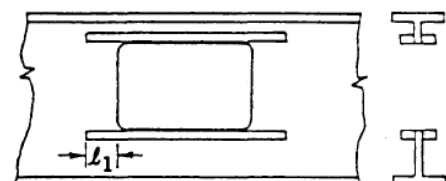
Moda keruntuhan. Mode keruntuhan dipengaruhi oleh proporsi dari *top tee* dan *bottom tee*, serta ukuran lubang pada balok baja. Kegagalan dapat terjadi pada sudut – sudut dari lubang, diikuti dengan lelehnya badan dari balok baja. Kekuatan dari balok baja berlubang juga ditentukan oleh tekuk yang terjadi pada penampang langsing.

Bentuk lubang dan jumlah lubang. Secara umum, lubang dengan bentuk lingkaran menunjukkan perilaku yang lebih baik dibandingkan dengan bentuk persegi panjang yang berukuran sama atau lebih kecil (Sukrawa, 2017). Penelitian oleh Morkhede & Gupta (2015) juga menyatakan bahwa bentuk lubang lingkaran paling efektif diikuti oleh bentuk hexagonal, octagonal. Jika jumlah lubang lebih dari satu, kekuatan balok baja dapat berkurang, khususnya apabila jarak antar lubang tersebut terlalu dekat, karena mekanisme plastis dapat terjadi sebagai akibat interaksi dari dua buah lubang. Bagian dari balok baja di antara kedua lubang tersebut bisa juga menjadi tidak stabil dan sayap balok dapat mengalami kelelahan akibat gaya geser (SCI, 2011).

Perkuatan pada lubang. Kapasitas penampang balok berlubang dapat ditingkatkan dengan penambahan perkuatan pada lubang. Gambar 2 menunjukkan perkuatan balok baja berlubang menggunakan pelat baja yang dilas pada bagian atas dan bawah dari lubang (AISC, 2003). Selain perkuatan tersebut, masih banyak jenis perkuatan yang dapat dilakukan seperti penambahan plat pada balok baja, mempertebal badan dari balok baja, dan yang lainnya.



Gambar 1 Konsentrasi tegangan pada sudut lubang



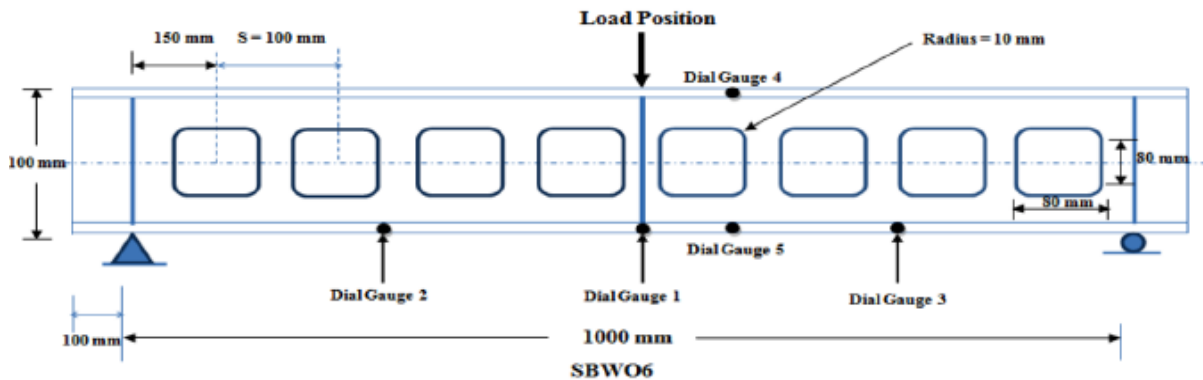
Gambar 2 Perkuatan pada lubang

3 METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, pengaruh lubang pada plat badan balok baja IWF dianalisis dengan menggunakan software metode element hingga ANSYS, dengan variasi pemodelan numerik meliputi variasi bentuk lubang, variasi ukuran lubang dan perkuatan yang efektif digunakan untuk memperkuat balok baja berlubang. Sebagai langkah awal dilakukan validasi teknik pemodelan dengan membandingkan hasil model dengan hasil pengujian. Setelah itu dilakukan pemodelan struktur berupa balok baja yang merupakan bagian dari struktur rangka bangunan 2 (dua) lantai. Model menggunakan SAP 2000 (CSI, 2016) juga dibuat untuk mendapatkan dimensi awal balok dan kolom.

3.1 Model Validasi.

Validasi model yang dibuat mengacu pada spesimen SBW06 yang diuji oleh Morkhade dan Gupta (2015) berupa balok baja dengan tinggi penampang 100 mm dengan lebar sayap atas dan bawah sebesar 55mm, ketebalan plat badan 4,7 mm, dan ketebalan plat sayap 5,0 mm dimodelkan pada program ANSYS. Mutu material yang digunakan yaitu pada sayap didapatkan tegangan leleh (F_y) sebesar 364 MPa, tegangan ultimit (F_u) sebesar 491 MPa, dan modulus elastisitas sebesar 2.04×10^5 MPa, sedangkan pada badan balok baja didapatkan tegangan leleh sebesar 329.5 MPa, tegangan ultimit sebesar 440 MPa, dan modulus elastisitas sebesar 1.99×10^5 MPa.

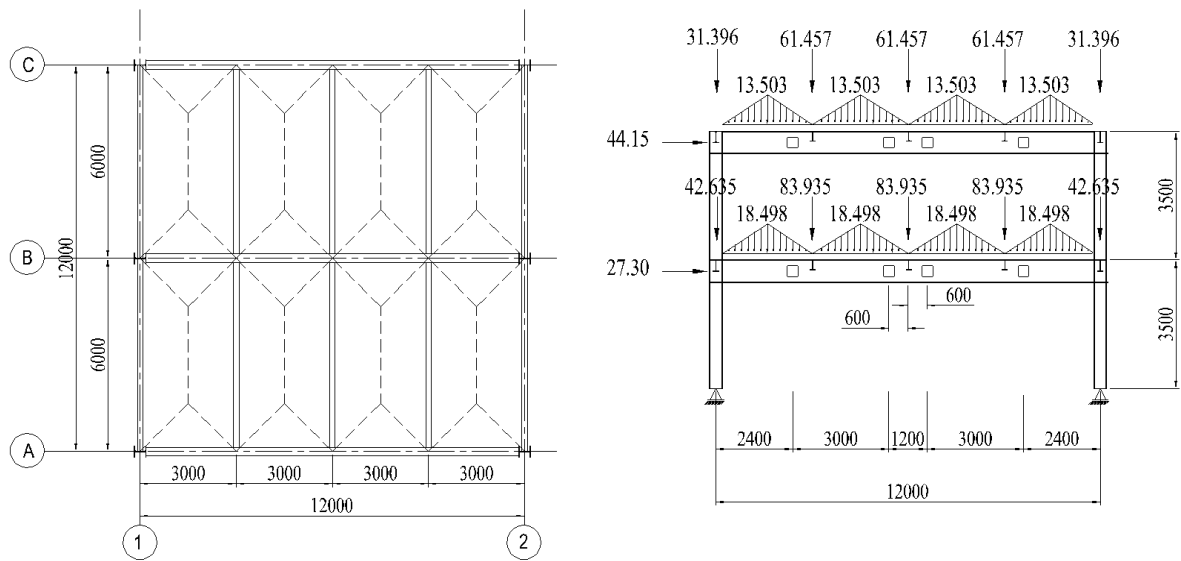


Gambar 3 Eksperimental Balok baja berlubang

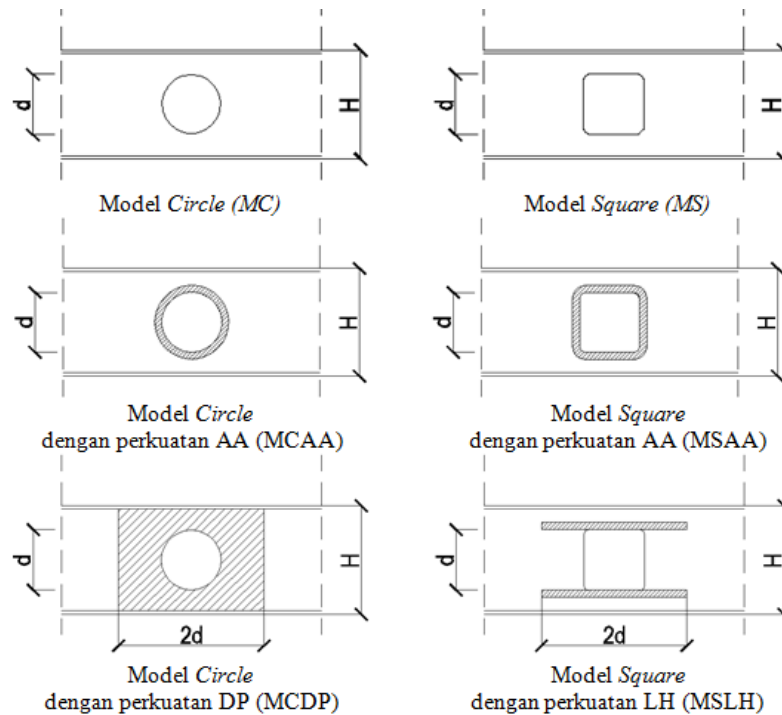
Sumber: Morkhade dan Gupta (2015)

3.2 Model Rangka Dua Lantai dengan Balok Berlubang

Model struktur yang digunakan merupakan potongan dari sebuah bangunan 2 (dua) lantai dengan dimensi struktur dan beban yang digunakan ditampilkan pada Gambar 4. Lubang yang ditinjau meliputi lubang persegi sama sisi dan lingkaran dengan dimensi $0,3 H$, $0,5 H$, dan $0,7 H$ (Gambar 5). H adalah tinggi balok. Jenis perkuatan yang ditinjau yaitu *All Around* (AA), *Long Horizontal* (LH), dan *Doubler Plate* (DP). Material baja yang digunakan memiliki grade 50, dengan tegangan leleh, F_y , sebesar 344,74 MPa, dan tegangan ultimit, F_u , sebesar 448,16 MPa, dan modulus elastisitas yang digunakan sebesar 200.000 MPa. Hubungan balok – kolom pada rangka baja dianggap kaku (di las). Sebelum struktur dimodelkan pada program ANSYS, struktur terlebih dahulu dimodelkan menggunakan program SAP2000 (CSI,2016). Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan dimensi struktur yang efektif sesuai dengan kriteria desain struktur. Pada bentuk lubang persegi, dimodelkan juga perkuatan di sekitar lubang berupa perkuatan *All Around* (AA), dan *Long Horizontal* (LH). Sedangkan pada bentuk lubang lingkaran dimodelkan perkuatan *All Around* (AA), dan *Doubler Plate* (DP)



Gambar 4 Pemodelan rangka; Kiri: Denah Struktur. Kanan: Pembebanan pada rangka (kN)

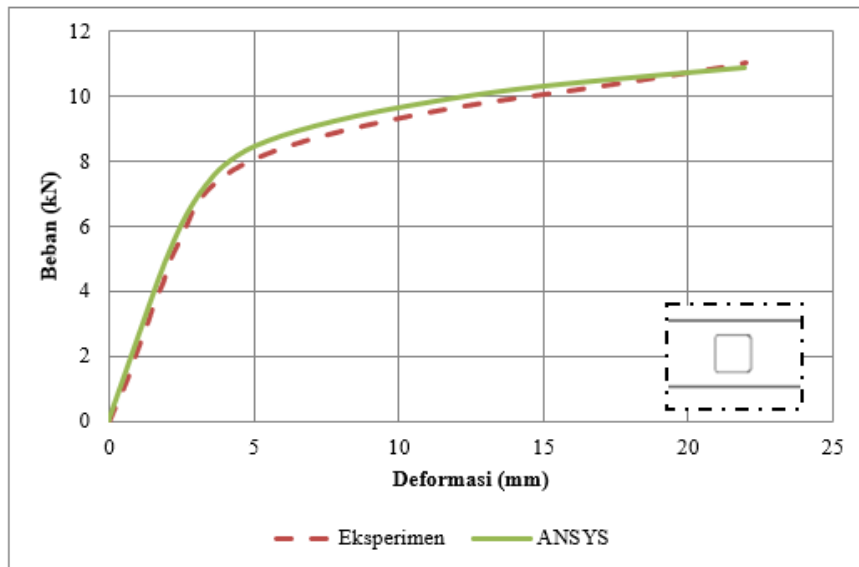


Gambar 5 Detail ukuran perkuatan pada balok baja berlubang.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Model Validasi

Hasil pemodelan spesimen SBW06 menunjukkan kurva beban – deformasi yang hampir sama dengan kurva eksperimen, terutama pada saat bagian elastis. Perbedaan mulai terlihat saat balok baja diberikan beban ± 7.28 kN dimana pada model ANSYS balok baja mengalami deformasi sebesar 3,36 mm, sedangkan balok eksperimen sudah mengalami deformasi sebesar 3,59 mm. Sedangkan pada bagian plastis terdapat perbedaan pada grafik, namun perbedaan tersebut tidak signifikan. Simpangan maksimal yang terjadi pada eksperimen sebesar 21.25mm pada beban 10,88kN, sedangkan pada model ANSYS, simpangan maksimal terjadi sebesar 21,95 mm pada beban 10,88 Kn. Hasil ini menunjukkan bahwa model ANSYS dapat menirukan perilaku dan kinerja struktur hasil pengujian di laboratorium.



Gambar 6 Kurva beban – deformasi model validasi

4.2 Model Rangka

4.2.1 Pemodelan Pada SAP2000

Model struktur dibuat dalam bentuk 3D dan dianalisis hanya berdasarkan kriteria stress ratio yaitu tidak melebihi 1,00. Pembahasan lebih lengkap terkait model ini dilaporkan oleh Pradhana (2019). Model struktur dan SR yang didapat ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Dimensi struktur

LANTAI	ELEMEN	DIMENSI	SR
Lantai 1	Kolom	HP 14x89	0,59 – 0,83
	Balok utama	W 24x68	0,36 – 0,66
	Balok Anak	W 12x26	0,34 – 0,43
Lantai 2	Kolom	HP 14x89	0,41 – 0,74
	Balok Utama	W 24x55	0,41 – 0,66
	Balok Anak	W 12x26	0,23 – 0,35

Setelah didapatkan dimensi struktur pada program SAP2000, gaya yang bekerja akibat beban DL dan DL+E dicatat sebagai dasar acuan perilaku struktur struktur balok baja berlubang. Gaya yang bekerja pada struktur ditampilkan pada Tabel 2

Tabel 2 Gaya yang bekerja pada balok atap bagian tepi (hasil pemodelan SAP2000)

Gaya	DL	DL+E	Rasio (DL/DL+E)
Aksial (kN)	145.47	170.43	1.17
Geser (kN)	120.63	131.52	1.09
Momen (kNm)	62.36	25.40	0.41

4.2.2 Pemodelan Pada ANSYS

Model struktur dengan bentuk penampang persegi sama sisi dan lingkaran dimodelkan, kemudian tegangan yang terjadi di sekitar lubang pada balok atap bagian tepi diamati dan dibandingkan. Tegangan yang terjadi pada model struktur ditampilkan pada Tabel 3.

4.2.2.1. Pengaruh Bentuk lubang

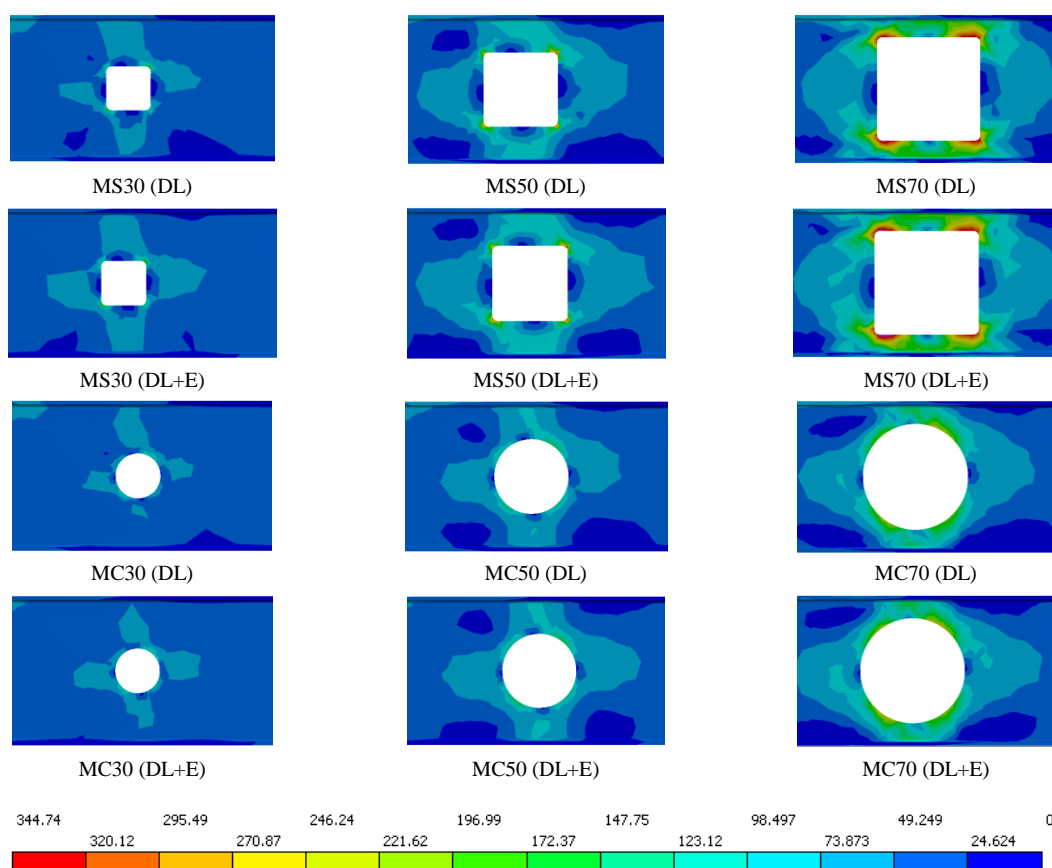
Tabel 3 menunjukkan tegangan yang terjadi di sekitar lubang pada balok atap bagian tepi dan balok lantai bagian tengah pada berbagai ukuran lubang. Tegangan maksimal yang terjadi pada lubang lingkaran jauh lebih kecil dibandingkan dengan lubang persegi, dengan kontur tegangan pada masing – masing model struktur ditampilkan

pada Gambar 7. Pada bentuk lubang persegi, terjadi konsentrasi tegangan di bagian sudut – sudut lubang, dan semakin terlihat jelas pada ukuran lubang 0,7H. Sedangkan pada bentuk lubang lingkaran, konsentrasi tegangan juga terlihat terjadi pada bagian diagonal lubang, namun tegangan yang dihasilkan tidak sebesar tegangan pada bentuk lubang persegi.

Tabel 3 Tegangan pada balok atap bagian tepi

LUBANG	BEBAN	LUBANG PERSEGI		LUBANG LINGKARAN	
		σ (Mpa)	Rasio	σ (Mpa)	Rasio
0,3 H	DL	198	0,57 Fy	121	0,35 Fy
	DL+E	215	0,62 Fy	127	0,37 Fy
0,5 H	DL	359	1,04 Fy	147	0,43 Fy
	DL+E	377	1,09 Fy	153	0,44 Fy
0,7 H	DL	413	1,20 Fy	240	0,69 Fy
	DL+E	413	1,20 Fy	256	0,74 Fy

Keterangan: Fy = 344.74 MPa



Gambar 7 Tegangan di sekitar lubang pada balok atap bagian tepi

Tabel 3 juga menunjukkan rasio tegangan yang terjadi di sekitar lubang dengan tegangan leleh (Fy). Pada lubang lingkaran, rasio yang terjadi sebesar 0,35 Fy, 0,43 Fy, 0,69 Fy pada posisi lubang di balok atap bagian tepi pada ukuran lubang 0,3H, 0,5 H, dan 0,7 H. Dari data tersebut, bentuk lubang lingkaran menunjukkan perilaku yang baik dengan keseluruhan model struktur belum mencapai tegangan leleh baja. Sedangkan pada lubang persegi, tegangan yang terjadi sebesar 0,57 Fy, 1,04 Fy, dan 1,20 Fy pada posisi lubang di balok atap bagian tepi. Dimensi 0,5H dan 0,7H pada lubang persegi menghasilkan tegangan yang melebihi tegangan leleh balok baja. Oleh karena itu perkuatan pada balok baja berlubang sangat diperlukan untuk mencegah kegagalan struktur terutama pada bentuk persegi yang berukuran besar (lebih dari 0,5H)

Rata – rata tegangan yang dihasilkan lubang lingkaran pada balok atap bagian tepi lebih kecil 47% dibandingkan lubang persegi, baik pada beban DL, maupun beban DL+E. Sedangkan pada balok lantai bagian tengah, lubang lingkaran menghasilkan tegangan 35% lebih kecil. Sehingga penggunaan bentuk lingkaran sangat disarankan pada aplikasi dilapangan dibandingkan dengan bentuk persegi. Untuk diketahui bahwa lubang lingkaran dengan diameter sama dengan ukuran lubang persegi memiliki luas penampang lubang yang lebih kecil dari penampang lubang persegi. Hal ini mengisyaratkan bahwa tegangan yang lebih besar pada lubang persegi juga disebabkan oleh luas penampang lubang yang lebih besar, disamping karena faktor bentuknya.

4.2.2.2. Pengaruh Perkuatan pada Lubang Persegi

Tabel 4 menunjukkan pengaruh penambahan perkuatan pada bentuk lubang persegi. Penambahan kedua jenis perkuatan (AA dan LH) menunjukkan hasil yang memuaskan, dimana tegangan yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan tegangan pada lubang tanpa perkuatan. Pada lubang persegi 0,5 H, penambahan perkuatan AA dan LH menghasilkan tegangan yang lebih kecil dari tegangan leleh, sedangkan pada lubang 0,7 H perkuatan di sekitar lubang tidak efektif dimana tegangan yang terjadi lebih besar dari tegangan leleh baja. Penambahan perkuatan pada balok persegi juga efektif mengurangi lendutan balok.

Tabel.4 Tegangan di sekitar lubang pada balok atap bagian tepi pada lubang kotak

LUBANG	BEBAN	MS		MSAA		MSLH	
		σ (Mpa)	Rasio	σ (Mpa)	Rasio	σ (Mpa)	Rasio
0,3H	DL	198	0,57 Fy	144	0,42 Fy	175	0,51 Fy
	DL+E	215	0,62 Fy	148	0,43 Fy	182	0,53 Fy
0,5H	DL	359	1,04 Fy	269	0,78 Fy	299	0,87 Fy
	DL+E	377	1,09 Fy	277	0,80 Fy	310	0,90 Fy
0,7H	DL	413	1,20 Fy	344	1,00 Fy	375	1,09 Fy
	DL+E	413	1,20 Fy	343	0,99 Fy	377	1,09 Fy

Keterangan: Fy = 344.74 MPa

4.2.3. Pengaruh Perkuatan pada Lubang Lingkaran

Walaupun keseluruhan model lubang lingkaran tanpa perkuatan menunjukkan hasil yang memuaskan, lubang lingkaran juga tetap diberikan tambahan perkuatan berupa AA dan DP untuk mengetahui pengaruh penambahan perkuatan pada masing – masing ukuran lubang.

Tabel.5 Tegangan di sekitar lubang pada balok atap bagian tepi pada lubang lingkaran

LUBANG	BEBAN	MC		MCAA		MCDP	
		σ (Mpa)	Rasio	σ (Mpa)	Rasio	σ (Mpa)	Rasio
0,3H	DL	121	0,35 Fy	82	0,24 Fy	29	0,09 Fy
	DL+E	127	0,37 Fy	85	0,25 Fy	30	0,09 Fy
0,5H	DL	147	0,43 Fy	117	0,34 Fy	34	0,10 Fy
	DL+E	153	0,44 Fy	119	0,35 Fy	34	0,10 Fy
0,7H	DL	240	0,69 Fy	173	0,50 Fy	64	0,19 Fy
	DL+E	256	0,74 Fy	176	0,51 Fy	60	0,17 Fy

Keterangan: Fy = 344.74 MPa

Tabel 5 menunjukkan pengaruh penambahan perkuatan pada bentuk lubang lingkaran. Dari tabel tersebut, penambahan Kedua jenis perkuatan yang diberikan (AA dan DP) menghasilkan tegangan yang lebih kecil dibandingkan dengan lubang tanpa perkuatan, dengan perkuatan DP menunjukkan tegangan terkecil. Penambahan Perkuatan AA pada balok atap bagian tepi dapat menurunkan tegangan yang terjadi sebesar 27%, dan penambahan perkuatan DP dapat menurunkan tegangan hingga 75% dibandingkan dengan lubang tanpa perkuatan.

5. KESIMPULAN

Penelitian tentang efek kombinasi beban aksial dan lentur serta variasi bentuk dan ukuran lubang terhadap distribusi tegangan pada balok berlubang telah dilakukan dengan memodel rangka dua lantai menggunakan software ANSYS. Untuk mevalidasi model telah dibuat model balok sederhana yang telah diuji oleh peneliti lain. Dari hasil analisis diperoleh beberapa kesimpulan berikut.

1. Model elemen hingga menggunakan software ANSYS dapat menirukan grafik beban simpangan balok baja berlubang dengan baik sampai diluar batas elastis.
2. Kombinasi beban aksial dan lentur pada balok baja berlubang terbukti menghasilkan tegangan maksimum yang lebih besar dari tegangan akibat beban lentur saja. Peningkatan gaya aksial balok sebesar 17%, mengakibatkan peningkatan tegangan maksimal sebesar 9%. Hal ini mengisyaratkan perlunya peninjauan kembali ketentuan terkait balok berlubang yang mengacu pada pengujian balok sederhana tanpa beban aksial.
3. Tegangan yang terjadi pada lubang berbentuk lingkaran lebih kecil dibandingkan dengan tegangan pada lubang persegi dengan tinggi yang sama. Hasil ini sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya.
4. Pada lubang lingkaran, tegangan yang terjadi pada lubang masih lebih kecil dari tegangan leleh. Sedangkan pada lubang persegi dengan dimensi lubang 0,5H atau lebih besar sudah memerlukan perkuatan.
5. Pada lubang lingkaran, tegangan maksimal yang terjadi masing – masing sebesar 0,35 fy, 0,43 fy, dan 0,69 fy pada dimensi lubang 0,3H, 0,5H, dan 0,7H. Pada lubang persegi, tegangan maksimal yang terjadi pada dimensi lubang 0,3 H adalah 0,57 fy, sedangkan pada dimensi lubang 0,5 H dan 0,7 H tegangan yang terjadi melampaui tegangan leleh.
6. Penambahan perkuatan AA dan LH pada lubang persegi 0,5 H, menghasilkan tegangan yang lebih kecil dari tegangan leleh, sedangkan pada dimensi lubang 0,7 H perkuatan di sekitar lubang tidak lagi efektif. Ini berarti bahwa lubang persegi dengan dimensi melampaui 0,5H atau lebih harus direncanakan dengan teliti.
7. Lubang pada balok baja mengakibatkan peningkatan deformasi pada balok. Semakin besar ukuran lubang pada balok baja, maka deformasi pada balok baja juga semakin besar. Penambahan perkuatan pada balok baja berlubang terbukti dapat mengurangi deformasi yang terjadi pada balok baja.

DAFTAR PUSTAKA

- AISC, (2003). *Steel and Composite Beams with Web Openings*. Kansas: American Institute of Steel Construction.
- ANSYS, Inc, 2010. [Online]
Available at: http://inside.mines.edu/~apetrell/ENME442/Labs/1301_ENME442_lab7.pdf
[Accessed 28 November 2018].
- CSI, 2016. *Analysis References Manual*. Berkeley: Computers and Structures, Inc.
- Morkhade, S. G. & Gupta, L. M., 2015. “An experimental and parametric study on steel beams with web opening”. *Int J Adv Struct Eng*, Volume 7, p. 249–260.
- Muhtarom, A., 2015. “Studi Perilaku Balok Kastela Bentang Pendek Dengan Variasi Dimensi Lubang Heksagonal Menggunakan Metode Elemen Hingga”. *Cantilever*, 4(1), pp. 7-13
- Pradhana, AAN. A., 2019. “Pemodelan elemen hingga balok baja berlubang dengan variasi bentuk dan ukuran lubang dengan memperhitungkan beban aksial”. Tesis, Program Magister Teknik Sipil FT Unud.
- SCI, 2011. *Design of Composite Beam with Large Web Opening*. Berkshire: Steel Construction Institute.
- Sukrawa, M., 2017. “Finite Element Modelling of Reinforced Large-Opening on the Web of Steel Beam Considering Axial Forces”. *AIP Conference Proceedings* **1903**, 020018 (2017); doi: 10.1063/1.5011498
- Timoshenko S.P. and Goodier N.J. 1987. *Theory of Elasticity*, Third Edition, Mc Graw Hill, Inc.