

TINJAUAN KEKUATAN LENTUR BALOK *LEAN DUPLEX* BERPENAMPANG *HOLLOW* BERLUBANG PADA TEMPERATUR TINGGI

Naufal Zandika Fasha¹, Andy Prabowo², dan Sunarjo Leman³

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
naufal.325200034@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
andy.prabowo@ft.untar.ac.id

³Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
sunarjo@ft.untar.ac.id

Masuk: 25-06-2024, revisi: 04-07-2024, diterima untuk diterbitkan: 26-08-2024

ABSTRACT

Lean duplex cold rolled stainless steel beams are an alternative material in steel construction. This steel has a dual microstructure consisting of ferritic and austenitic phases, providing a combination of high mechanical strength and superior corrosion resistance. The cold rolled steel process plays an important role in ensuring accurate dimensions and good surface quality of these steel beams, while maintaining the desired mechanical properties. This study aims to determine the changes in flexural strength of square hollow beams against circular hollow beams that have been studied previously. In addition, this study evaluates the flexural strength equation of perforated beams in ASCE specification and validates the proposed modified equation from previous studies. A total of 120 numerical specimens having variations in cross-section and hole size as well as material temperature were made using the ABAQUS program. The numerical specimens were rectangular hollow section beams of lean duplex material. Numerical simulations were conducted to obtain the pure flexural strength value from the four-point loading method. The evaluation results show that the ASCE equation has not met the safety requirements while the proposed modified equation has met the safety requirements. The evaluation of the effect of hole shape showed that the majority of square holes had less flexural strength than circular holes.

Keywords: Stainless steel; lean duplex; rectangular web hole; elevated temperatures

ABSTRAK

Balok baja tahan karat canai dingin jenis *lean duplex* merupakan material alternatif dalam konstruksi baja. Baja ini memiliki struktur mikro ganda yang terdiri dari fase feritik dan austenitik, memberikan kombinasi kekuatan mekanis yang tinggi dan ketahanan terhadap korosi yang superior. Proses baja canai dingin memainkan peran penting dalam memastikan dimensi yang akurat dan kualitas permukaan yang baik dari balok baja ini, dengan mempertahankan sifat-sifat mekanis yang diinginkan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan kekuatan lentur balok berlubang persegi terhadap balok berlubang lingkaran yang telah diteliti sebelumnya. Selain itu penelitian ini mengevaluasi persamaan kekuatan lentur balok berlubang pada peraturan ASCE dan memvalidasi persamaan modifikasi yang diusulkan dari penelitian sebelumnya. Sebanyak 120 spesimen numerik yang memiliki variasi penampang dan ukuran lubang serta temperatur material dibuat menggunakan program ABAQUS. Spesimen numerik yang dibuat yaitu balok berpenampang hollow persegi panjang dari material *lean duplex*. Simulasi numerik yang dilakukan untuk memperoleh nilai kekuatan lentur murni dari metode pembebanan four-point loading. Hasil evaluasi menunjukkan persamaan ASCE belum memenuhi syarat keamanan sedangkan persamaan modifikasi yang diusulkan telah memenuhi syarat keamanan. Hasil evaluasi pengaruh bentuk lubang menunjukkan 60% penampang berlubang persegi memiliki kekuatan lentur lebih kecil dari penampang berlubang lingkaran (maksimal 30% lebih kecil).

Kata kunci: Baja tahan karat; *lean duplex*; badan berlubang persegi; temperatur tinggi

1. PENDAHULUAN

Untuk membuat sebuah struktur yang efektif dan efisien, maka berat sendiri elemen setiap bangunan dapat digunakan dengan bahan yang ringan namun mampu memikul beban luar yang besar. Salah satu cara yang dapat ditempuh yaitu dengan mengurangi berat sendiri dari elemen setiap bangunan, seperti menggunakan baja canai dingin sebagai alternatif pengganti material beton. Selain kayu dan beton, baja adalah salah satu material struktur yang paling sering digunakan dalam konstruksi. Hal ini karena lebih cepat dan efisien dalam prosesnya, sehingga sering digunakan dalam

proyek konstruksi dengan durasi singkat. Material baja sering digunakan dalam konstruksi atap. Material baja sendiri dibagi dapat dibagi menjadi 2 yaitu baja canai dingin dan baja gilas panas. Baja canai dingin (*cold rolled steel*) dan baja gilas panas adalah dua bentuk baja yang mengalami proses penggulungan dengan perbedaan utama dalam metode pengolahan, dimana baja canai dingin dibentuk dalam temperatur normal sedangkan baja gilas panas dibentuk dengan temperatur yang sangat tinggi.

Penggunaan struktur baja canai dingin saat ini cukup populer dalam dunia konstruksi (Sandjaya & Suryatmono, 2018), terlebih banyak permintaan kebutuhan teknologi konstruksi yang meminta suatu desain bangunan yang *safety*, *serviceability*, dan ekonomis. Pada material konstruksi terdapat salah satu jenis baja canai dingin yang sering digunakan yaitu baja tahan karat (*stainless steel*). Baja ini memiliki sifat mekanik yang kuat dan tahan terhadap korosi, yang secara signifikan mempengaruhi keandalan dan ketahanan struktur konstruksi (Huang & Young, 2019). Kekuatan tarik dan batas elastis yang tinggi dari baja tahan karat memungkinkan struktur untuk menahan beban yang diterapkan, seperti beban gravitasi, angin, dan gempa. Dengan demikian, baja tahan karat memberikan tingkat keamanan yang lebih tinggi terhadap kegagalan struktural yang dapat membahayakan pengguna (Huang & Young, 2012).

Baja tahan karat memiliki kelompok dari berbagai macam jenis, salah satunya adalah baja *lean duplex*. Baja tahan karat *lean duplex* ini memiliki kandungan nikel berkisar antara 1 hingga 5 %. Kandungan nikel yang lebih rendah membantu mengurangi biaya produksi dan membuatnya lebih ekonomis, tetapi tetap mempertahankan beberapa sifat tahan korosi dari struktur mikro duplex (Huang & Young, 2018).

Balok berlubang yang terbuat dari baja canai dingin umumnya digunakan dalam konstruksi. Lubang yang terbuat dari badan balok baja memungkinkan pemasangan sistem listrik, pipa, dan komponen lainnya melewati lubang tersebut untuk meningkatkan tampilannya. Hal ini juga dapat mengurangi tinggi lantai bangunan, berat komponennya sendiri, dan biaya material (Priestley & Prabowo, 2024).

Penelitian mengenai analisis tentang penurunan kekuatan lentur balok baja nirkarat canai dingin *lean duplex* berlubang pada temperatur tinggi masih belum banyak dilakukan khususnya pada berlubang persegi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh metode perhitungan penampang baja nirkarat canai dingin *lean duplex* berlubang persegi. Metode perhitungan berbasis persamaan DSM (Schafer, 2008).

Rumusan masalah

1. Bagaimana pola penurunan kekuatan lentur dari baja tahan karat *lean duplex* terhadap temperatur tinggi?
2. Bagaimana perilaku penampang balok baja tahan karat berlubang persegi *lean duplex* terhadap temperatur tinggi?
3. Bagaimana akurasi desain eksisting balok baja *lean duplex* berlubang persegi dari peraturan saat ini?
4. Bagaimana perbandingan besarnya kekuatan balok berlubang persegi dengan berlubang lingkaran dari penelitian Priestley dan Prabowo (2024).

Tujuan penelitian

1. Mengetahui penurunan kekuatan lentur dari baja tahan karat *lean duplex* terhadap temperatur tinggi.
2. Mengetahui perilaku penampang balok baja tahan karat berlubang persegi *lean duplex* terhadap temperatur tinggi.
3. Mengetahui akurasi desain eksisting balok baja *lean duplex* berlubang persegi dari peraturan pada saat ini.
4. Membandingkan besarnya kekuatan balok berlubang persegi dengan balok berlubang lingkaran dari penelitian Priestley dan Prabowo (2024).

2. PROPERTI MATERIAL PADA TEMPERATUR TINGGI

Ditemukan bahwa aturan desain yang ada umumnya tidak berlaku untuk sifat mekanik baja tahan karat *lean duplex* pasca kebakaran, karena aturan desain yang ada dikembangkan terutama berdasarkan baja karbon. Oleh karena itu, pemodelan properti material baja *lean duplex* pada temperatur tinggi dapat diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan Huang & Young (2014), yang juga mengusulkan beberapa nilai koefisien parameter seperti pada Tabel 1-2, serta Persamaan 1-9.

Tabel 1. Properti material baja tahan karat *lean duplex* (Huang & Young, 2014)

Tipe	E_{normal} (MPa)	$f_{0,2,normal}$ (MPa)	$f_{u,normal}$ (MPa)	$\varepsilon_{u,normal}$ (%)
<i>Lean Duplex</i>	199000	682	828	21,5

Tabel 2. Koefisien untuk baja tahan karat *lean duplex* (Huang & Young, 2014)

	T (°C)	a	b	c	n
E_T	$24 < T \leq 700$	1	24	1384	1
	$700 < T \leq 900$	0,51	700	650	1
$f_{y,T}$	$24 < T \leq 300$	1	24	284	0,75
	$300 < T \leq 600$	0,76	300	2930	1,2
	$600 < T \leq 900$	0,44	600	200	0,75
$f_{u,T}$	$24 < T \leq 400$	0,85	400	$3,25 \times 10^8$	3
	$400 < T \leq 600$	0,85	400	102560	2
	$600 < T \leq 900$	0,46	600	300	0,83
$\varepsilon_{u,T}$	$22 \leq T < 180$	1	22	480	1
	$180 \leq T < 660$	0,67	180	$5,42 \times 10^{21}$	8
	$660 \leq T \leq 960$	0,15	660	5000	1

dengan T = temperatur yang diteliti (°C), a = koefisien pada temperatur T , b = koefisien pada temperatur T , c = koefisien pada temperatur T dan n = koefisien pada temperatur T .

$$\frac{E_T}{E_0} = a - \frac{(T - b)^n}{c} \quad (1)$$

$$\frac{f_{y,T}}{f_y} = a - \frac{(T - b)^n}{c} \quad (2)$$

$$\frac{f_{u,T}}{f_u} = a - \frac{(T - b)^n}{c} \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_{u,T}}{\varepsilon_u} = a - \frac{(T - b)^n}{c} \quad (4)$$

dengan E_T = modulus elastisitas pada temperatur T (MPa), E_0 = modulus elastisitas pada temperatur normal (MPa), $f_{y,T}$ = kuat leleh pada temperatur T (MPa), f_y = kuat leleh pada temperatur normal (MPa), $f_{u,T}$ = kuat ultimit pada temperatur T (MPa), f_u = kuat ultimit pada temperatur normal (MPa), $\varepsilon_{u,T}$ = regangan ultimit pada temperatur T (%) dan ε_u = regangan ultimit pada temperatur normal (%)

$$\varepsilon_T = \frac{f_T}{E_T} + 0,002 \left(\frac{f_T}{f_{y,T}} \right)^{n_T}, \quad f_T \leq f_{y,T} \quad (5)$$

$$\varepsilon_T = \frac{f_T - f_{y,T}}{E_{y,T}} + \varepsilon_{u,T} \left(\frac{f_T - f_{y,T}}{f_{u,T} - f_{y,T}} \right)^{m_T} + \varepsilon_{y,T}, \quad f_T > f_{y,T} \quad (6)$$

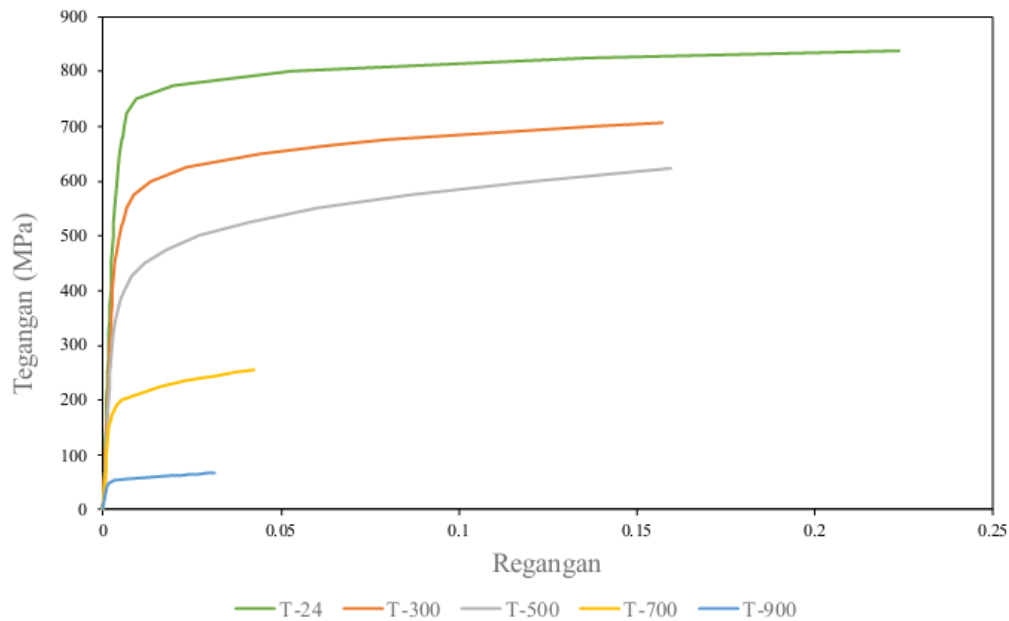
$$E_{y,T} = \frac{E_T}{1 + 0,002 n_T E_T / f_{y,T}} \quad (7)$$

$$n_T = 6 + 0,2\sqrt{T} \quad (8)$$

$$m_T = 5,6 - \frac{T}{200} \quad (9)$$

dengan ε_T = regangan pada temperatur T (%), $\varepsilon_{y,T}$ = regangan pada saat kuat leleh mencapai temperatur T (%), f_T = tegangan pada temperatur T (MPa), $E_{y,T}$ = modulus elastisitas saat kuat leleh mencapai temperatur T (MPa), n_T dan m_T adalah koefisien Chen dan Young (2006).

Setelah mendapatkan nilai tegangan regangan (*engineering stress-strain*) seperti pada Gambar 1 menggunakan Persamaan 1-9 selanjutnya dapat dicari *true stress-strain* menggunakan Persamaan 10-11.



Gambar 1. Grafik tegangan regangan

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{true}^{pl} = \ln(1 + \varepsilon) - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (11)$$

dengan σ = Tegangan (MPa), ε = Regangan (%), σ_{true} = *True stress* (MPa), ε_{true}^{pl} = *True strain* (%) dan E = Modulus elastisitas (MPa)

Seluruh nilai properti material dimasukkan ke dalam program ABAQUS (2023) melalui nilai *true stress-strain*.

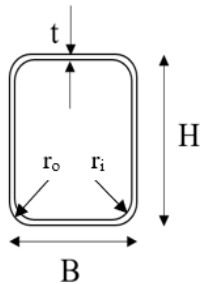
3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Huang & Young (2014) dan Chen et al. (2022) mengenai baja tahan karat *lean duplex* yang digunakan sebagai dasar studi numerik. Metodologi penelitian menggunakan studi numerik dikarenakan masih belum banyak literatur yang melakukan pengujian laboratorium untuk balok baja tahan karat *lean duplex* berlubang persegi.

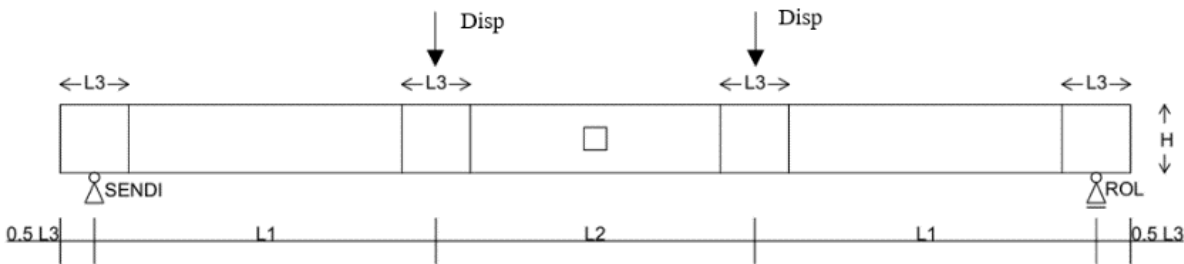
Pada penelitian ini terdapat serangkaian langkah yang harus dijalankan agar penyusunan penelitian ini bisa dilakukan dengan terstruktur. Langkah-langkah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Memahami dan menyusun studi literatur berupa buku-buku, jurnal dan artikel yang mendukung penyusunan penelitian ini.
2. Mengumpulkan dan merangkum hasil eksperimen pada penelitian Huang & Young (2014) dan Chen et al. (2022). Model diberikan nama seperti L60×40×4R90T24 dengan keterangan L adalah *lean duplex*, 60×40×4 adalah ukuran penampang (H×B×t), R90 adalah proporsi lubang sebesar 90% dan T24 adalah temperatur simulasi 24°C.
3. Bentuk penampang berada di Gambar 2, dan tampak memanjang balok berada di Gambar 3. Variasi penampang, ukuran lubang, serta temperatur material untuk simulasi numerik termuat di Tabel 3-5, yang keseluruhannya mencapai 120 spesimen numerik.
4. Membuat model balok baja berlubang persegi kelompok *lean duplex* pada program ABAQUS (Gambar 4) dan melakukan analisis kekuatan lentur menggunakan metode *four-point loading*, seperti yang dilakukan oleh Chan & Gardner (2008).
5. Melakukan analisa data-data yang diperoleh dari program ABAQUS untuk menjawab tujuan dan rumusan masalah yang telah ditentukan sebelumnya.

6. Membuat kesimpulan dari material baja tahan karat canai dingin *lean duplex* pada temperatur tinggi, perilaku balok struktural RHS, serta hasil dari keamanan desain struktur.



Gambar 2. Bentuk profil RHS



Gambar 3. Tampak memanjang dan melintang balok RHS

Tabel 3. Detail ukuran penampang RHS

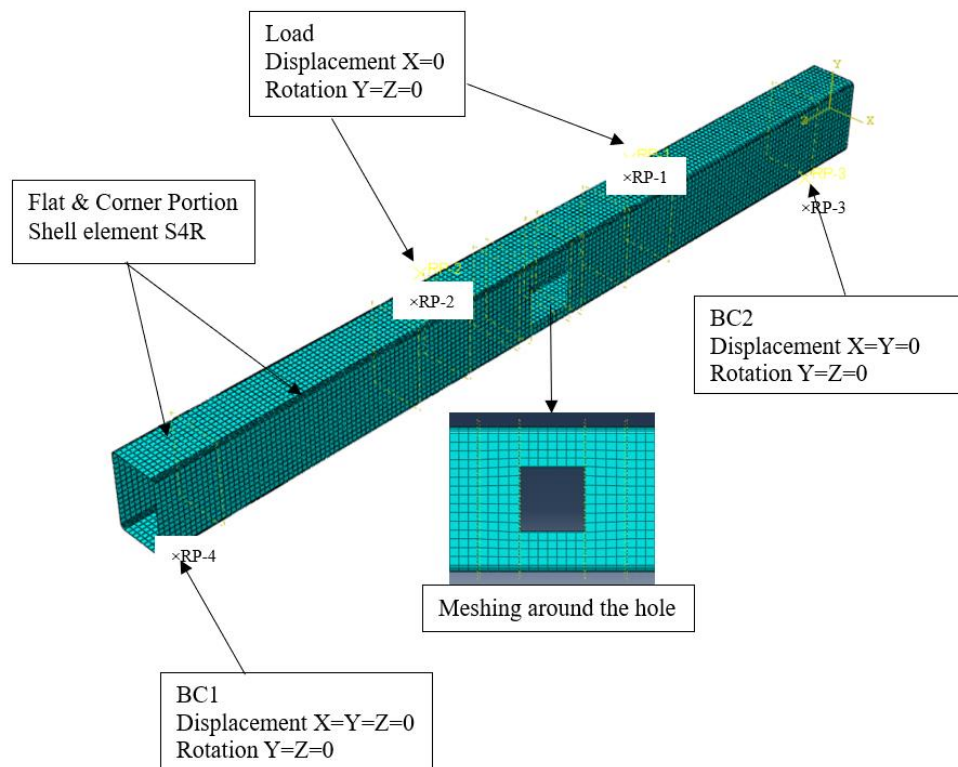
H (mm)	B (mm)	t (mm)	r _o (mm)	r _i (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)
60	40	4	7,63	4,44	410	390	90
120	80	3	6,63	4,13	410	390	90
300	120	2	6,5	4,5	1400	1400	350
380	286	2	6,5	4,5	1400	1400	350
380	152	1,5	6,25	4,75	1400	1400	350
380	380	4	7,5	3,5	1400	1400	350

Tabel 4. Proporsi ukuran lubang terhadap tinggi bersih pelat badan profil

No.	Ukuran Lubang D (%)
1	0
2	20
3	50
4	70
5	90

Tabel 5. Temperatur untuk Simulasi Numerik

No.	Temperatur (°C)
1	24
2	300
3	500
4	700
5	900

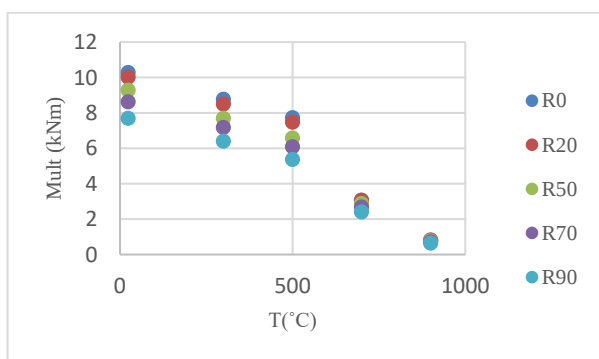


Gambar 4. Model numerik

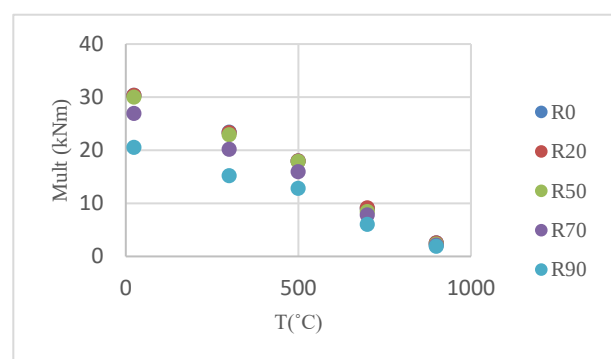
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kekuatan lentur ultimit (M_{ult})

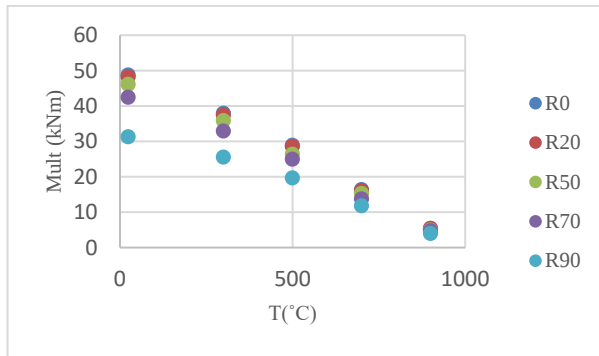
Terlihat bahwa kekuatan M_{ult} mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya ukuran lubang dan meningkatnya temperatur. Namun demikian, peningkatan nilai M_{ult} ditemukan pada penampang 120x80x3R20 dan 380x152x1,5R50 akibat dari redistribusi tegangan yang menghasilkan peningkatan nilai M_{ult} sebesar 0,99% dibandingkan dengan R0 pada setiap penampangnya. Variasi nilai M_{ult} dapat dilihat pada Gambar 5-10.



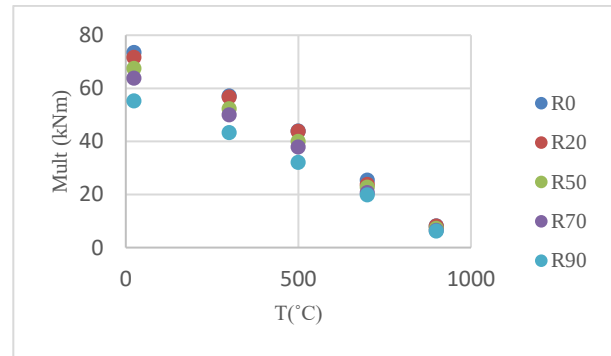
Gambar 5. Variasi nilai M_{ult} 60x40x4



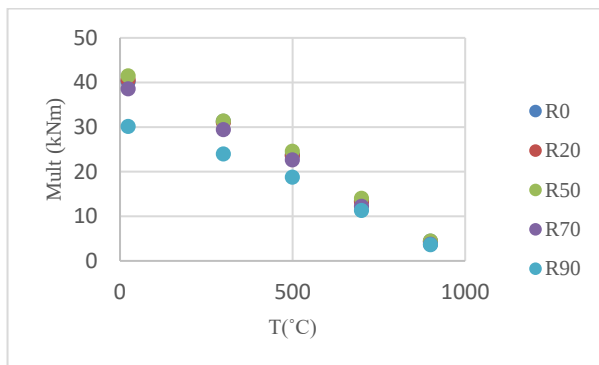
Gambar 6. Variasi nilai M_{ult} 120x80x3



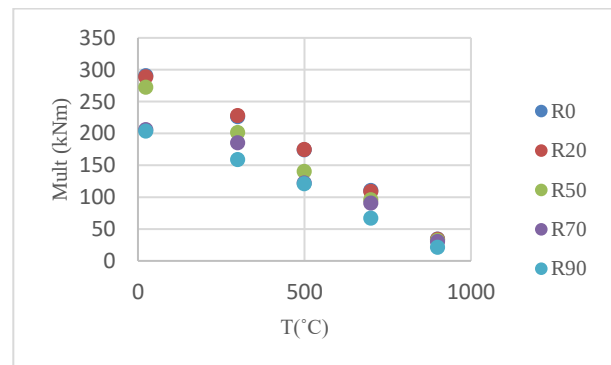
Gambar 7. Variasi nilai M_{ult} 300x120x2



Gambar 8. Variasi nilai M_{ult} 380x286x2



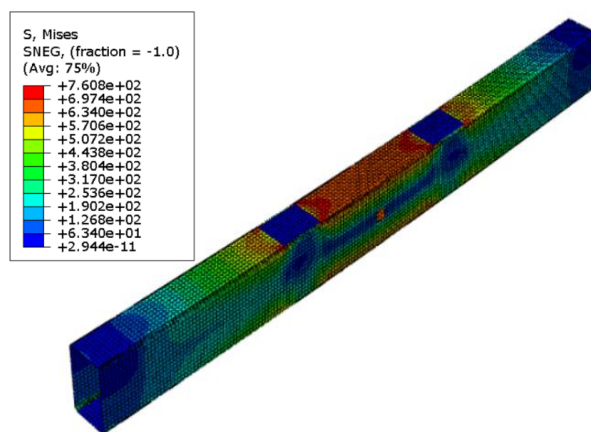
Gambar 9. Variasi nilai M_{ult} 380x152x1,5



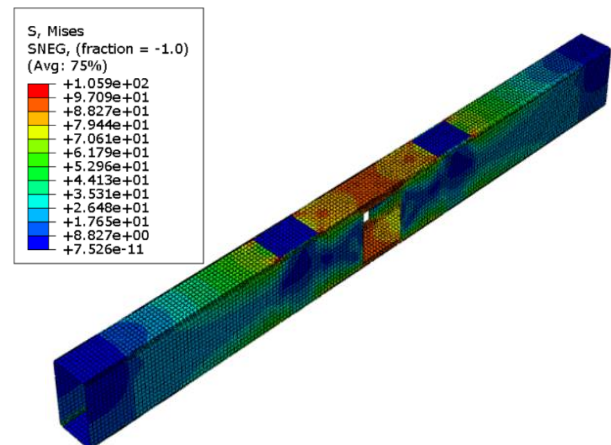
Gambar 10. Variasi nilai M_{ult} 380x380x4

Model keruntuhan ultimit

Pada Gambar 11-12 memperlihatkan contoh model keruntuhan ultimit yang umumnya terjadi pada baja tahan karat *lean duplex*. Kedua gambar menunjukkan pelelehan maksimal terjadi pada bagian sayap atas penampang akibat tekuk lokal yang diakibatkan oleh gaya tekan lentur yang dialami oleh profil tersebut.



Gambar 11. Model keruntuhan 120x80x3R20T24



Gambar 12. Model keruntuhan 120x80x3R90T24

Nilai kekuatan lentur dari persamaan DSM ASCE (2023)

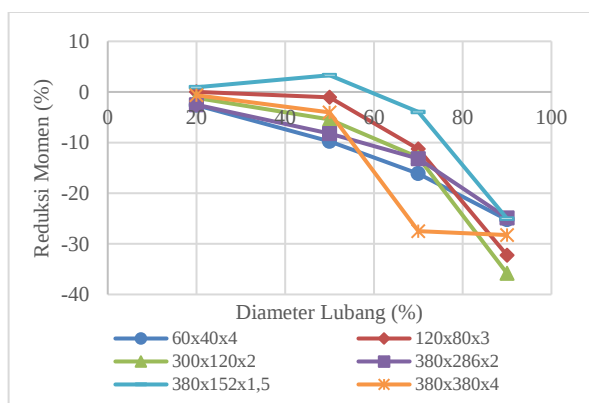
Hasil penelitian ini menunjukkan nilai M_{ASCE} untuk berbagai ukuran penampang, yang dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. M_{ASCE} penampang berlubang persegi

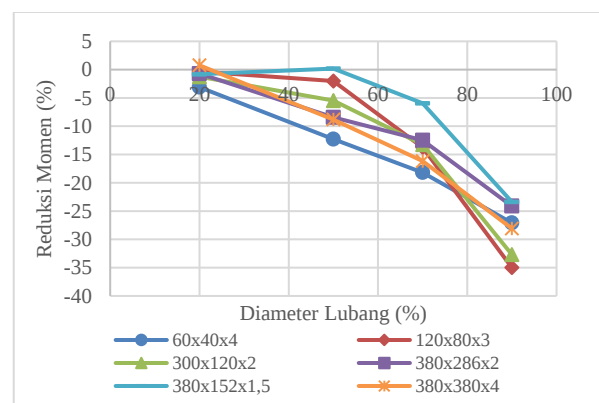
Ukuran Penampang (mm)	Lubang (%)	M_{ASCE} (kNm)				
		24°C	300°C	500°C	700°C	900°C
60x40x4	R20	6,7345	5,1288	3,7918	1,8984	0,5359
	R50	6,5737	5,0063	3,7013	1,8530	0,5231
	R70	6,3088	4,8046	3,5521	1,7784	0,5020
	R90	5,8461	4,4522	3,2916	1,6479	0,4652
120x80x3	R20	24,2742	18,6681	14,0439	7,0310	1,9849
	R50	23,8322	18,1499	13,4186	6,7180	1,8965
	R70	22,7523	17,3274	12,8105	6,4136	1,8106
	R90	20,2394	15,4137	11,3957	5,7052	1,6106
300x120x2	R20	47,0449	36,4450	27,9036	16,1798	5,0839
	R50	44,7575	34,6792	26,5623	15,4327	4,8582
	R70	47,0449	36,4450	27,9036	16,1798	5,0839
	R90	44,1869	34,2388	26,2275	15,2455	4,7360
380x286x2	R20	67,2395	52,1621	40,0566	23,5714	7,5085
	R50	67,2395	52,1621	40,0566	23,5714	7,5085
	R70	62,5249	48,5104	37,2620	21,9549	7,0017
	R90	57,4295	44,5631	34,2392	20,2010	6,4503
380x152x1,5	R20	39,3371	30,5077	23,4136	13,7360	4,3633
	R50	38,7960	30,0887	23,0925	13,5521	4,3062
	R70	39,3371	30,5077	23,4136	13,7360	4,3633
	R90	37,6121	29,1719	22,3926	13,1500	4,1810
380x380x4	R20	218,7931	169,6243	130,0795	76,0352	24,0712
	R50	218,7931	169,6243	130,0795	76,0352	24,0712
	R70	210,7178	163,3766	125,3179	73,3261	23,2358
	R90	191,1854	148,2677	113,7839	66,7383	21,1952

Perbandingan kapasitas lentur balok berlubang persegi dan lingkaran

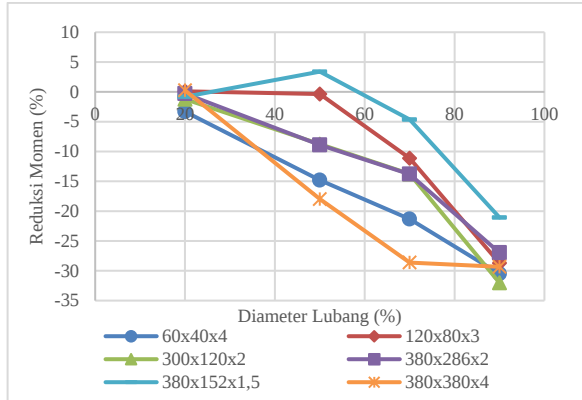
Momen ultimit (M_{ult}) pada penampang balok dengan lubang persegi dari hasil penelitian ini dibandingkan dengan M_{ult} dari balok dengan lubang lingkaran dari penelitian Priestley (2023). Dari setiap variasi ukuran lubang, perbandingan dilakukan dengan menghitung nilai persentase reduksi nilai M_{ult} berlubang persegi terhadap nilai M_{ult} berlubang lingkaran yang hasilnya ditampilkan pada Gambar 13-17. Nilai negatif menunjukkan adanya penurunan nilai M_{ult} berlubang persegi terhadap M_{ult} berlubang lingkaran.



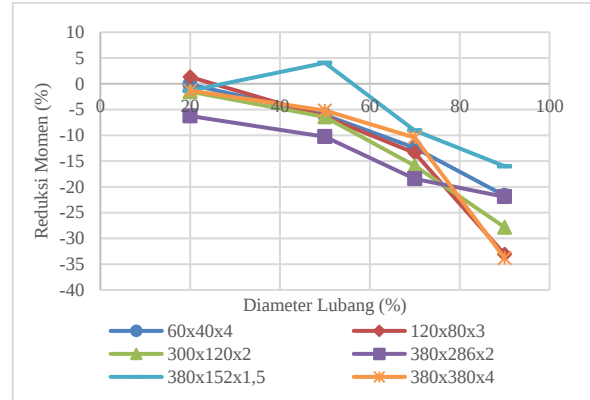
Gambar 13. Reduksi momen terhadap lubang pada temperatur 24°C



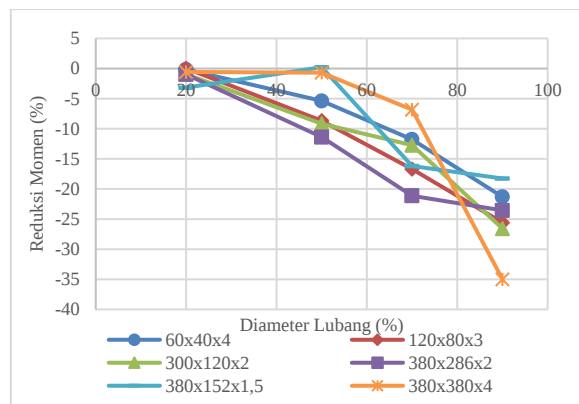
Gambar 14. Reduksi momen terhadap lubang pada temperatur 300°C



Gambar 15. Reduksi momen terhadap lubang pada temperatur 500°C



Gambar 16. Reduksi momen terhadap lubang pada temperatur 700°C



Gambar 17. Reduksi momen terhadap lubang pada temperatur 900°C Kekuatan lentur modifikasi DSM

Modifikasi persamaan DSM (M_{prop}) yang diusulkan agar nilai β_o mencapai 2,5 ditulis pada Persamaan 13-14. Persamaan ini diperoleh dari data hasil analisis ABAQUS kelas *lean duplex* berlubang lingkaran dari hasil penelitian Priestley dan Prabowo (2024).

$$\lambda_l \leq 0,667, M_{nl} = (1,4 - 1\lambda_l)M_{ne} \quad (13)$$

$$\lambda_l > 0,667, M_{nl} = \left[0,8 - 0,2 \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} \right] \left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}} \right)^{0,4} M_{ne} \quad (14)$$

Nilai kapasitas lentur dari persamaan modifikasi dapat dilihat pada Tabel 7.

Analisis keandalan

Dalam mengevaluasi rumus kapasitas penampang lentur dari balok baja berlubang kelas *lean duplex*, dilakukan analisis keandalan berdasarkan ASCE-8 (2022). Analisis keandalan ini bertujuan untuk memperoleh nilai indeks keandalan (β_o) dari rumus kapasitas yang sedang dievaluasi. Persamaan DSM menurut ASCE dapat dilihat pada Persamaan 15.

Tabel 7. M_{prop} penampang berlubang

Ukuran Penampang (mm)	Lubang (%)	M_{prop}				
		24°C	300°C	500°C	700°C	900°C
60x40x4	R20	7,7934	5,9660	4,4558	2,3156	0,6687
	R50	7,7934	5,9660	4,4558	2,3156	0,6687
	R70	7,7211	5,9122	4,4181	2,3005	0,6651
	R90	7,6867	5,8867	4,4001	2,2933	0,6634
120x80x3	R20	17,6812	13,5696	10,4236	6,1426	1,8973
	R50	17,6099	13,5477	10,3857	6,1311	1,8937
	R70	17,0969	13,1632	9,9444	5,8614	1,8297
	R90	16,5533	12,7537	9,6500	5,5645	1,7594
300x120x2	R20	36,2836	28,0840	21,4623	12,3298	3,8401
	R50	34,6015	26,7886	20,4834	11,7992	3,6844
	R70	36,2836	28,0840	21,4623	12,3298	3,8401
	R90	34,1802	26,4642	20,2380	11,6654	3,6449
380x286x2	R20	52,7852	40,9320	31,4049	18,4001	5,8379
	R50	52,7852	40,9320	31,4049	18,4001	5,8379
	R70	49,1595	38,1263	29,2621	17,1732	5,4569
	R90	45,2263	35,0819	26,9349	15,8351	5,0398
380x152x1,5	R20	30,7683	23,8502	18,2846	10,6703	3,3729
	R50	30,3564	23,5317	18,0411	10,5328	3,3307
	R70	30,7683	23,8502	18,2846	10,6703	3,3729
	R90	29,4539	22,8336	17,5095	10,2313	3,2381
380x380x4	R20	170,3794	132,0097	101,1016	58,7144	18,4755
	R50	170,3794	132,0097	101,1016	58,7144	18,4755
	R70	164,2939	127,3087	97,5308	56,7173	17,8701
	R90	149,4966	115,8784	88,8308	51,8233	16,3767

$$\beta_o = \frac{\ln \frac{C_\phi (M_m F_m P_m)}{\Phi}}{\sqrt{V_M^2 + V_F^2 + C_p V_P^2 + V_Q^2}} \quad (15)$$

dengan n = jumlah data, m = derajat kebebasan ($n - 1$), C_ϕ = koefisien kalibrasi (1,52), M_m = nilai rata-rata dari faktor material (1,10), F_m = nilai rata-rata faktor fabrikasi (1,0), P_m = nilai rata-rata dari rasio kapasitas ultimit terhadap kapasitas nominal, β_o = indeks keandalan, V_M = koefisien variasi dari faktor material (0,05), V_F = koefisien variasi dari faktor fabrikasi (0,05), C_p = faktor koreksi $((1 + 1/n)m)/(m - 2)$, V_p = koefisien variasi dari rasio kapasitas ultimit terhadap kapasitas nominal, V_Q = koefisien variasi efek beban (0,21) dan ϕ = faktor reduksi kekuatan (0,9).

Berdasarkan Tabel 8, persamaan kekuatan lentur balok RHS berlubang dinyatakan tidak aman karena nilai β_o tidak mencapai nilai 2,5, meskipun secara rata-rata, nilai kekuatan lentur dari hasil persamaan M_{ASCE} lebih kecil dari pada M_{ult} . Modifikasi persamaan DSM ASCE menjadi M_{prop} menunjukkan kenaikan nilai β_o yang melebihi nilai minimal 2,5. Persamaan M_{prop} dapat menghasilkan nilai kekuatan lentur yang jauh lebih kecil dari pada M_{ASCE} secara rata-rata. Meskipun demikian, persamaan M_{prop} memenuhi syarat keandalan dari analisis menurut persamaan β_o dari peraturan ASCE.

Tabel 8. Hasil analisis keandalan M_{ASCE} dan M_{prop}

	M_{ult}	M_{ult}
	M_{ASCE}	M_{prop}
	R20-R90	R20-R90
Jumlah Data	120	120
Mean	1,13	1,32
COV	0,211	0,156
ϕ	0,9	0,9
β_o	2,42	3,29

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Seluruh penampang menunjukkan keruntuhan akibat perilaku lentur murni yang diperoleh melalui metode *four-point loading*. Jenis keruntuhan yang diperoleh yaitu kombinasi antara tekuk lentur dan tekuk lokal.
2. Pada penampang 120x80x3R20 dan 380x152x1,5R50 terjadi redistribusi tegangan. Hal ini ditunjukkan dari adanya kenaikan nilai momen pada penampang berlubang terhadap penampang tanpa lubang, sebesar 0,99-1%
3. Dari perbandingan antara momen penampang berlubang persegi terhadap penampang berlubang lingkaran diketahui terjadinya penurunan nilai momen pada penampang berlubang persegi sebanyak 60% dari total data yang dikumpulkan. Hal ini berarti sebesar 40% dari total data menunjukkan terjadinya kenaikan nilai momen pada penampang berlubang persegi.
4. Hasil analisis keandalan dari M_{ASCE} menunjukkan bahwa persamaan M_{ASCE} terbilang tidak aman karena nilai β_o sebesar 2,42 ($<2,5$). Oleh karena itu diperlukan modifikasi persamaan kekuatan lentur M_{ASCE} . Meskipun demikian, secara rata-rata nilai M_{ASCE} lebih kecil dari nilai momen hasil ABAQUS (M_{ult}), ditunjukkan dari nilai $mean M_{ult} / M_{ASCE} > 1$.
5. Hasil analisis keandalan pada persamaan modifikasi M_{ASCE} (M_{prop}) menunjukkan bahwa persamaan M_{prop} terbilang aman karena nilai β_o sebesar 3,29 ($>2,5$).

DAFTAR PUSTAKA

- ABAQUS. (2023). *User's manual and theory manual: Dassault systemes simulia corp*. Dassault Systemes Simulia Corp.
- American Society of Civil Engineers. (2023). *Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members* (ASCE/SEI 8-22). <https://doi.org/10.1061/9780784415955>
- Chan, T. M., & Gardner, L. (2008). Bending strength of hot-rolled elliptical hollow sections. *Journal of Construction Steel Research*, 64(9), 971-986. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.11.001>
- Chen, Z., Huang, Y., & Young, B. (2022). Design of cold-formed ferritic stainless steel RHS perforated beams. *Engineering Structures*, 250, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113372>
- Huang, Y., & Young, B. (2012). Material properties of cold-formed lean duplex stainless steel sections. *Thin-Walled Structures*, 54, 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.02.003>
- Huang, Y., & Young, B. (2014). Stress-strain relationship of cold-formed lean duplex stainless steel at elevated temperatures. *Journal of Constructional Steel Research*, 92, 103-113. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.09.007>
- Huang, Y., & Young, B. (2018). Mechanical properties of lean duplex stainless steel at post-fire condition. *Thin-Walled Structures*, 130, 564-576. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.018>
- Huang, Y., & Young, B. (2019). Finite element analysis of cold-formed lean duplex stainless steel columns at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, 143, 106203. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106203>
- Priestley, K. A., & Prabowo, A. (2024). Flexural strength of RHS perforated lean duplex stainless steel beam at temperature 24-900°C. *Civil Engineering Dimension*, 26(1), 71-80. <https://doi.org/10.9744/ced.26.1.71-80>
- Sandjaya, A., & Suryatmono, B. (2018). Studi eksperimental batang tekan baja canai dingin. *Jurnal Teknik Sipil*, 25(1), 19-24.
- Schafer, B. W. (2008). Review: The direct strength method of cold-formed steel member design. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(7-8), 766-778. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.022>