

Perbandingan Perilaku Plastis Jembatan *Box Girder* Dengan Penampang *Twin Box* dan *Cellular Box*

Yuslinda¹ Cut Meuthia Rani² Iqbal³

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sains Cut Nyak Dhien, Langsa, Indonesia

*Koresponden email: yuslinda.civil@yahoo.co.id

Diterima: 24 Juli 2023

Disetujui: 31 Juli 2023

Abstract

The purpose of this study was to analyze the comparison of plastic behavior with the bilinear model and the strain hardening of twin box and cellular box sections. The things studied are the moment-curvature relationship, plastic moment, length of inelastic region and shape factor. The bridge being analyzed has a span length of 40 meters and a width of 10 meters. The planning of the bridge cross section is carried out using the help of the SAP 2000 version 15 program, by following the procedures set out in RSNI T-03-2005. The calculated load is dead load and live load only and is based on RSNI T-02-2005. The two sections are designed to have the same yield moment (by designing the same elastic modulus of the section). For analysis using the bilinear model and the strain hardening model, the plastic moment in the cross section of the twin box is greater than that of the cellular box. The largest increase in plastic moment due to calculated strain hardening was found in the twin box section, which was 30.76%, while the smallest increase was found in the cellular box section, which was 26.42%. The biggest increase in inelastic area due to calculated strain hardening is in the cross section of the twin box. Finally, this paper compares the moment-curvature relationship of the two cross-sectional shapes using either the bilinear model or the strain hardening model.

Keywords: *Twin box, Cellular box, plastic behavior, strain hardening, plastic moment, moment-curvature relationship*

Abstrak

Tujuan penelitian ini untuk menganalisis perbandingan perilaku plastis dengan model bilinear dan *strain hardening* penampang *twin box* dan *cellular box*. Hal-hal yang dipelajari adalah hubungan momen-kelengkungan, momen plastis, panjang daerah inelastis dan faktor bentuk (*shape factor*). Jembatan yang dianalisis mempunyai panjang bentang 40 meter dan lebar 10 meter. Perencanaan penampang jembatan dilakukan dengan menggunakan bantuan program SAP 2000 versi 15, dengan mengikuti prosedur yang ditetapkan dalam RSNI T-03-2005. Beban yang diperhitungkan adalah beban mati dan beban hidup saja dan didasarkan pada RSNI T-02-2005. Kedua penampang direncanakan mempunyai momen leleh yang sama (dengan mendesain modulus penampang elastis yang sama). Untuk analisis dengan model bilinear dan model *strain hardening* momen plastis pada penampang *twin box* lebih besar dibandingkan *cellular box*. Kenaikan momen plastis terbesar akibat diperhitungkan *strain hardening* terdapat pada penampang *twin box*, yaitu sebesar 30,76%, sedangkan kenaikan terkecil terdapat pada penampang *cellular box*, yaitu sebesar 26,42%. Kenaikan daerah inelastis terbesar akibat diperhitungkan *strain hardening* terdapat pada penampang *twin box*. Akhirnya, dalam tulisan ini diperbandingkan hubungan momen-kelengkungan kedua bentuk penampang baik menggunakan model bilinear maupun menggunakan model dengan *strain hardening*.

Kata Kunci: *Twin box, Cellular box, perilaku plastis, strain hardening, momen plastis, hubungan momen-kelengkungan*

1. PENDAHULUAN

Jembatan *box girder* mempunyai beberapa bentuk penampang, yaitu *single box*, *twin box*, *multiple box*, dan *cellular box* [1]. Bentuk penampang tersebut mempengaruhi perilaku plastis sebuah gelagar walaupun gelagar tersebut didesain mempunyai momen leleh yang sama.

Hubungan tegangan-regangan baja pada saat awal pembebanan adalah linier sampai tercapainya tegangan leleh, diikuti dengan penambahan regangan tanpa terjadinya penambahan tegangan sampai suatu nilai regangan tertentu, untuk selanjutnya terjadi *strain hardening* (penambahan tegangan yang diikuti dengan penambahan regangan) sampai tercapainya tegangan maksimum. Bila terus diberi beban tegangan akan menurun sampai baja putus pada suatu nilai regangan tertentu [1]–[3]. Dalam analisis dan desain, daerah *strain hardening* tersebut tidak diperhitungkan. Model hubungan tegangan-regangan diidealisasikan berbentuk bilinear, yaitu dari titik asal sampai titik leleh dengan kemiringan garis sebesar modulus elastisitas baja; diteruskan garis lurus dalam arah mendatar dengan tegangan konstan sebesar tegangan leleh sampai baja putus [2]–[4].

Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat perbandingan kontribusi dari *strain hardening* terhadap perilaku plastis gelagar jembatan *box girder* bentuk penampang *twin box* dan *cellular box* sampai beban runtuh. Hal-hal yang dipelajari adalah besarnya momen plastis, panjang daerah inelastis, faktor bentuk (*shape factor*) dan hubungan momen-kelengkungan. Untuk tercapainya tujuan tersebut maka dalam kajian ini telah direncanakan gelagar *box girder* yaitu *twin box* dan *cellular box*. Selanjutnya dilakukan analisis penampang dengan dan tanpa memperhitungkan *strain hardening* pada hubungan tegangan-regangannya.

Perencanaan gelagar jembatan dilakukan dengan menggunakan bantuan program SAP2000 versi 15 dengan mengikuti prosedur yang ditetapkan dalam RSNI T-03-2005. Beban yang diperhitungkan adalah beban mati dan beban hidup saja dan didasarkan pada RSNI T-02-2005. Deformasi pada sebuah gelagar jembatan *box girder* terdiri atas deformasi akibat lentur dan deformasi akibat geser [13]. Dalam penelitian ini, analisis dibatasi pada deformasi akibat lentur saja, sedangkan pengaruh dari deformasi geser tidak diperhitungkan.

1.1 Jembatan Box Girder Baja

Jembatan *box girder* adalah sebuah jembatan dimana struktur atas jembatan terdiri dari balok-balok penopang utama yang berbentuk kotak berongga. *Box girder* baja umumnya berpenampang kotak atau trapesium yang berbentuk terbuka atau tertutup [5].

1.2 Konsep Perencanaan Jembatan Berdasarkan RSNI T-03-2005

Perencanaan secara PBKT atau Metode *Load and Resistance Factored Design* (LRFD) dilakukan untuk mengantisipasi suatu kondisi batas ultimit, yang terjadi antara lain:

- Terjadi keruntuhan lokal pada satu atau sebagian komponen struktur jembatan.
- Kehilangan keseimbangan statis akibat keruntuhan atau kegagalan pada sebagian komponen struktur atau keseluruhan struktur jembatan.
- Keadaan purna-elastis atau purna-teknik di mana satu bagian komponen jembatan atau lebih mencapai kondisi runtuh.
- Kerusakan akibat kelelahan dan/atau korosi sehingga terjadi kehancuran.
- Kegagalan dari pondasi yang menyebabkan pergeseran yang berlebihan atau keruntuhan bagian utama dari jembatan.

Pendekatan umum berdasarkan faktor daya tahan dan beban, atau disebut dengan *Load and Resistance Factored Design* (LRFD) ini adalah hasil penelitian dari *Advisory Task Force* yang dipimpin oleh [6]. Dalam perencanaan dengan LRFD dipersyaratkan

$$Q_u \leq \phi R_n \quad (1)$$

dimana: Q_u = beban berfaktor, ϕ = faktor reduksi kekuatan, dan R_n = kekuatan nominal.

Perencanaan berdasarkan batas layan (PBL) atau Metode *Allowable Stress Design* (ASD), dilakukan untuk mengantisipasi suatu kondisi batas layan, antara lain :

- Tegangan kerja dari suatu komponen struktur jembatan, yang melampaui nilai tegangan yang diijinkan, sehingga berpotensi mengakibatkan kelelahan pada komponen baja.

- b. Deformasi permanen dari komponen struktur jembatan, yang melampaui nilai deformasi ijinnya, Besarnya lendutan biasanya juga diperiksa pada kondisi beban kerja dan tidak boleh melebihi 1/800 panjang bentang jembatan.
- c. Vibrasi yang terjadi sehingga menimbulkan instabilitas atau kekhawatiran struktural lainnya terhadap keamanan jembatan pada kondisi layan.
- d. Bahaya permanen termasuk korosi dan kelelahan yang mengurangi kekuatan struktur dan umur layan jembatan.
- e. Bahaya banjir di daerah sekitar jembatan.

1.3 Hubungan Tegangan-Regangan Baja

Model Bilinier

[3] menyatakan untuk analisis elastis-plastis, model baja yang digunakan berupa kurva hubungan tegangan-regangan bilinier berupa dua garis lurus dan dapat dinyatakan sebagai persamaan:

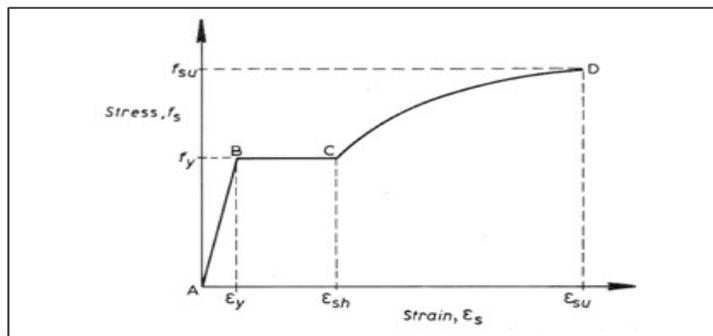
$$f_s = E_s \varepsilon_s \quad \text{untuk } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y$$

$$f_s = f_y \quad \text{untuk } \varepsilon_s > \varepsilon_y$$

dimana : f_s = tegangan baja, E_s = modulus elastisitas baja, ε_s = regangan baja, ε_y = regangan leleh baja, dan f_y = tegangan leleh.

Model Dengan Strain Hardening

[7] menyatakan *strain hardening* (pengerasan regangan) adalah penguatan baja untuk deformasi plastis (perubahan bentuk secara permanen atau tidak dapat kembali seperti semula).



Gambar 1. Hubungan tegangan-regangan dengan *strain hardening*

Hubungan tegangan-regangan dibedakan atas 3 daerah, yaitu daerah AB, BC dan CD seperti dalam Gambar 1. di bawah ini.

Daerah AB: $\varepsilon_s \leq \varepsilon_y$

$$f_s = E_s \varepsilon_s \tag{2}$$

Daerah BC: $\varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh}$

$$f_s = f_y \tag{3}$$

Daerah CD: $\varepsilon_s \geq \varepsilon_{sh}$

$$f_s = f_y \left\{ \frac{m(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2}{60(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30q + 1)^2} \right\} \tag{4}$$

$$\text{dimana } m = \frac{\left(\frac{f_{su}}{f_y}\right)(30q + 1)^2 - 60q - 1}{15q^2} \tag{5}$$

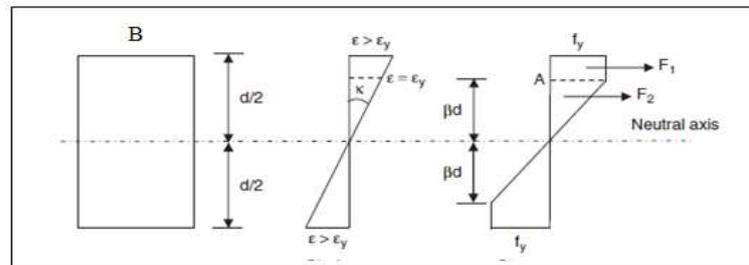
$$\text{dan } q = \varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh} \tag{6}$$

dimana : ε_{sh} = regangan pada saat *strain hardening* dimulai, f_{su} = tegangan baja putus, dan ε_{su} = regangan baja putus.

Hasil penelitian oleh [8] menyimpulkan bahwa perilaku *strain hardening* baja tidak tergantung kepada ketebalan material dan mutu baja. Hal ini memungkinkan generalisasi dari hubungan tegangan-regangan untuk baja canai panas untuk didefinisikan. Sebuah teknik pemodelan disajikan yang memungkinkan perilaku non linier momen-deformasi dari balok diprediksi secara akurat menggunakan data *mill test*.

1.4 Analisis Elastis-Plastis Penampang Bukan Persegi

Sebelum penampang mengalami leleh, analisis penampang dapat menggunakan metode elastis [3], [9].



Gambar 2. Perilaku elastis-plastis

Setelah sebagian penampang mengalami leleh, maka distribusi regangan dan tegangan sepanjang tinggi penampang diperlihatkan pada Gambar 2 [12]. Kelengkungan pada batas leleh dapat dihitung dengan persamaan:

$$k = \frac{fy}{E\beta d} \quad (7)$$

dimana : k = kelengkungan, d = tinggi penampang, β = faktor kedalaman penampang yang sudah leleh

Hubungan momen-kelengkungan untuk penampang bukan persegi dalam kondisi elastis-plastis ini dapat dibentuk dengan langkah-langkah sebagai berikut [3].

- 1) Bagi penampang atas strip-strip yang kecil dalam arah horizontal
- 2) Hitung luas penampang setiap strip
- 3) Tentukan nilai β yang menunjukkan daerah yang telah terjadi plastisifikasi. Biasanya nilai β dimulai dari 0,5
- 4) Hitung kelengkungan dengan menggunakan (Pers.7)
- 5) Hitung regangan setiap strip dengan menggunakan persamaan $\varepsilon = \kappa y$, dimana y = jarak dari pusat strip ke garis netral
- 6) Hitung tegangan untuk setiap strip menggunakan model hubungan tegangan-regangan.
- 7) Hitung gaya aksial setiap strip dengan cara mengalikan tegangan strip dengan luas penampang strip
- 8) Hitung momen setiap strip dengan cara mengalikan gaya setiap strip dengan jarak strip ke garis netral
- 9) Jumlahkan momen setiap strip. Ini merupakan kapasitas momen elastis-plastis dari penampang
- 10) Set nilai β yang lain yang lebih kecil sampai nilai $\beta = 0$ dan ulangi langkah-langkah 4-9 untuk setiap nilai β . Pada saat nilai $\beta = 0$, maka seluruh penampang telah terjadi plastifikasi, dan momen pada keadaan tersebut disebut momen plastis.

2. Metodologi

Penelitian perilaku plastis gelagar jembatan *box girder* baja ini dilakukan dengan terlebih dahulu mendesain penampang *twin box* dan *cellular box*. Desain penampang dilakukan dengan bantuan program SAP 2000 v.15 dan didasarkan pada [10] RSNI T-03-2005. Beban yang diperhitungkan untuk desain penampang hanyalah beban mati dan beban hidup dan dihitung berdasarkan RSNI T-02-2005.

2.1 Panjang dan Lebar Jembatan

Panjang jembatan ditetapkan 40 m dengan lebar lantai kendaraan 8 m ditambah trotoar pada sisi kiri dan kanan masing-masing selebar 1 meter. Jadi lebar total 10 meter.

2.2 Mutu Baja

Baja yang digunakan adalah baja mutu BJ 55 berdasarkan RSNI T-02-2005 dengan data-data sebagai berikut [11]:

Tegangan leleh (f_y) = 410 MPa

Regangan leleh (ε_y) = 0,00205

Modulus elastisitas (E) = 200.000 MPa

Angka Poison (ν) = 0,3

Tegangan putus (f_{su}) = 550 MPa

Regangan putus (ε_{su}) = 0,13

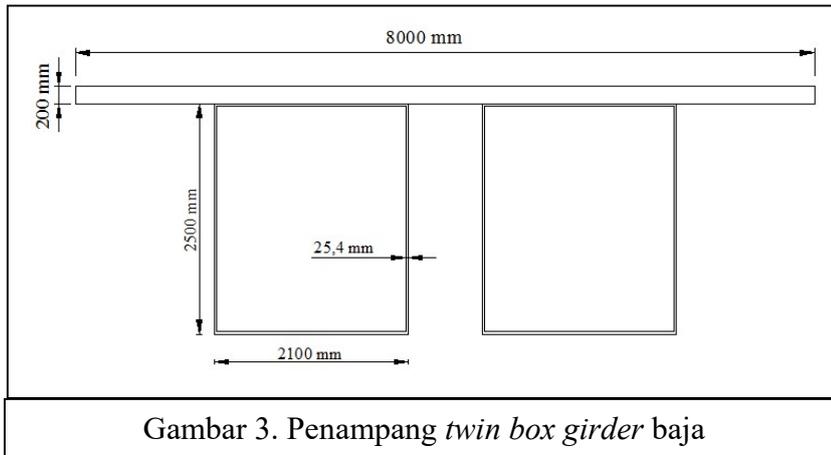
Regangan pada saat terjadi *strain hardening* (ε_{sh}) = 0,02

Modulus *strain hardening* (E_{sh}) = 10.000 MPa.

2.3 Ukuran Penampang Box Girder Baja

1. Ukuran Penampang *Twin Box Girder* Baja

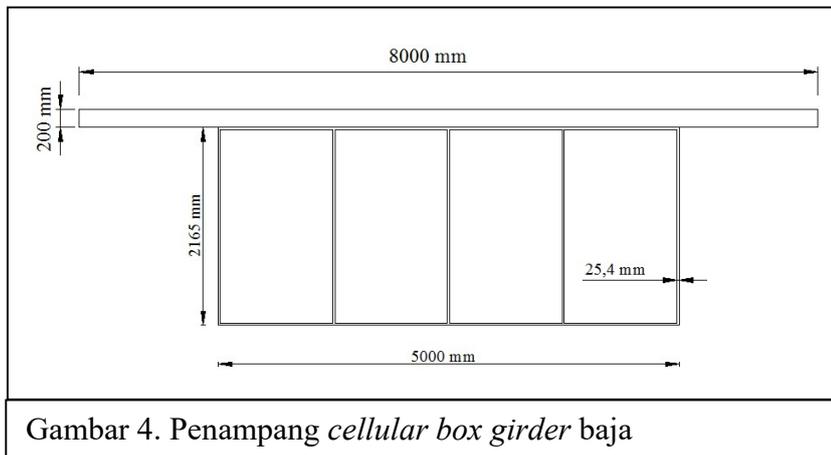
Dari hasil perencanaan didapat ukuran penampang *twin box girder* baja seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Penampang *twin box girder* baja

2. Ukuran Penampang *Cellular Box Girder* Baja

Dari hasil perencanaan didapat ukuran penampang *cellular box girder* baja seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Penampang *cellular box girder* baja

Hasil pengecekan keamanan penampang pada batas beban ultimit dan batas beban layan seperti dipersyaratkan oleh RSNI T-02-2005 diperlihatkan pada Tabel 1. Berikut :

Tabel 1. Perbandingan momen dan geser pada batas ultimit serta tegangan dan lendutan pada batas layan

Tipe penampang box girder		Twin box	Cellular box
Faktor beban	$M_u/\phi M_n$	0,589	0,381
batas ultimit	$V_u/\phi V_n$	0,171	0,114
Faktor beban	σ/σ_y	0,614	0,773
batas beban layan	δ/δ_y	0,750	0,643
	τ/τ_y	0,171	0,114
Momen leleh	M_y	147939	147986

2.4 Perhitungan Hubungan Momen-Kelengkungan

Untuk menentukan hubungan momen-kelengkungan dilakukan analisis penampang. Analisis penampang terhadap setiap penampang yang direncanakan dilakukan sebanyak dua kali, yaitu 1) dengan menggunakan model hubungan tegangan-regangan bilinear; dan 2) dengan menggunakan model hubungan tegangan-regangan yang memperhitungkan *strain hardening* [14]-[15].

Metode dan langkah-langkah analisis penampang dengan menggunakan model hubungan tegangan-regangan bilinear dilakukan berdasarkan metode yang diajukan oleh [3]. Dalam hal ini, bagian flens atas dan bawah penampang masing-masing dibagi menjadi 10 strip dan bagian webnya dibagi menjadi 180 strip.

Metode dan langkah-langkah analisis penampang dengan model hubungan tegangan-regangan yang memperhitungkan *strain hardening* diajukan oleh penulis sebagai berikut:

1. Bagi penampang atas strip-strip horizontal. Bagian flens atas dan bawah dibagi menjadi 10 strip dan bagian webnya dibagi menjadi 180 strip.
2. Tentukan nilai regangan pada serat terluar sebesar regangan leleh baja;
3. Hitung regangan rata-rata pada setiap strip;
4. Hitung tegangan rata-rata pada setiap strip dengan menggunakan hubungan tegangan-regangan yang dikemukakan oleh [7].
5. Hitung gaya-gaya dalam pada setiap strip;
6. Hitung besarnya momen akibat gaya-gaya dalam tersebut;
7. Hitung besarnya kelengkungan akibat regangan yang diberikan;
8. Perbesar nilai regangan pada serat terluar dengan tingkat kenaikan tertentu;
9. Ulangi langkah 3 sampai 8;
10. Perhitungan dihentikan apabila penampang sudah mengalami sendi plastis, yaitu regangan di seluruh penampang sudah melewati regangan leleh
11. Tentukan nilai momen plastis;
12. Gambarkan hubungan momen dan kelengkungan.

2.5 Perhitungan Panjang Daerah Inelastis

Panjang daerah inelastis didapat dengan memplot besarnya momen plastis (M_p) dan momen leleh (M_y) pada diagram momen lentur sepanjang balok. Dalam hal ini panjang daerah inelastis yang dihitung disini adalah bila beban bekerja terpusat di tengah bentang balok.

2.6 Perhitungan Faktor Bentuk

Faktor bentuk didapat dengan mengambil nilai perbandingan antara momen plastis (M_p) dan momen leleh (M_y).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Momen Plastis, Faktor Bentuk dan Panjang Daerah Inelastis

Besarnya momen plastis, faktor bentuk, panjang daerah inelastis kedua penampang *box girder* baik yang memperhitungkan *strain hardening* maupun yang tidak memperhitungkan *strain hardening* diperlihatkan pada Tabel 2. Dari Tabel 2. di bawah dapat diketahui bahwa untuk analisis tanpa memperhitungkan *strain hardening*, momen plastis penampang *twin box* lebih besar dibandingkan dengan penampang *cellular box*. Karena momen leleh kedua penampang didesain sama, maka faktor bentuk antara penampang *twin box* dengan *cellular box* ternyata hasilnya sama yaitu sebesar 1,15. Jika dibandingkan hasil ini dengan hasil perbandingan momen berfaktor terhadap tahanan momen dalam ($M_u/\phi M_n$), penampang *cellular box* mempunyai nilai rasio terkecil dibandingkan penampang *twin box*. Hal ini menunjukkan bahwa penampang dengan *twin box* yang paling aman diantara kedua penampang tersebut. Kesesuaian antara hasil analisis penampang dengan tidak memperhitungkan *strain hardening* dengan hasil analisis kekuatan berdasarkan [4] adalah karena dalam perencanaan jembatan dengan [4] hubungan tegangan-regangan baja dianggap bilinear.

Analisis dengan memperhitungkan *strain hardening*, momen plastis terbesar juga terdapat pada penampang *twin box*, akan tetapi untuk faktor bentuk berbeda dengan analisis tanpa memperhitungkan *strain hardening* yaitu penampang *twin box* mempunyai faktor bentuk lebih besar sedikit dibandingkan dengan faktor bentuk penampang *cellular box*.

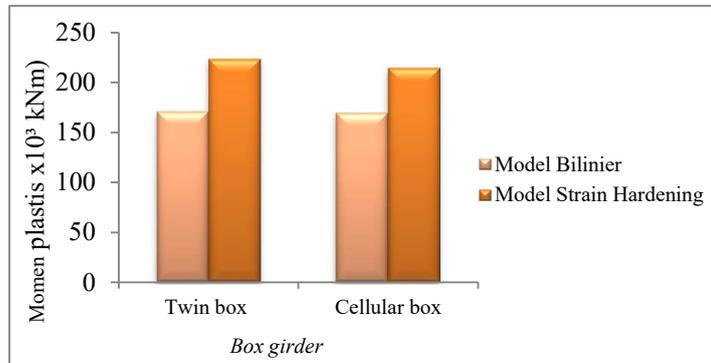
Kenaikan momen plastis terbesar akibat diperhitungkan *strain hardening* terdapat pada penampang *twin box*, yaitu sebesar 30,76 %, sedangkan kenaikan momen plastis terkecil terdapat pada penampang *cellular box*, yaitu sebesar 26,42 %.

Karena panjang daerah inelastis merupakan fungsi dari momen plastis dan momen leleh, sedangkan dalam penelitian ini momen leleh ditetapkan sama, maka penampang dengan momen plastis terbesar mempunyai panjang daerah inelastis terbesar. Dari Tabel 2. di atas dapat dilihat bahwa untuk analisis tanpa memperhitungkan *strain hardening*, daerah inelastis terbesar terdapat pada penampang *twin box*; sedangkan untuk analisis dengan memperhitungkan *strain hardening*, daerah inelastis terbesar terdapat pada penampang *twin box*.

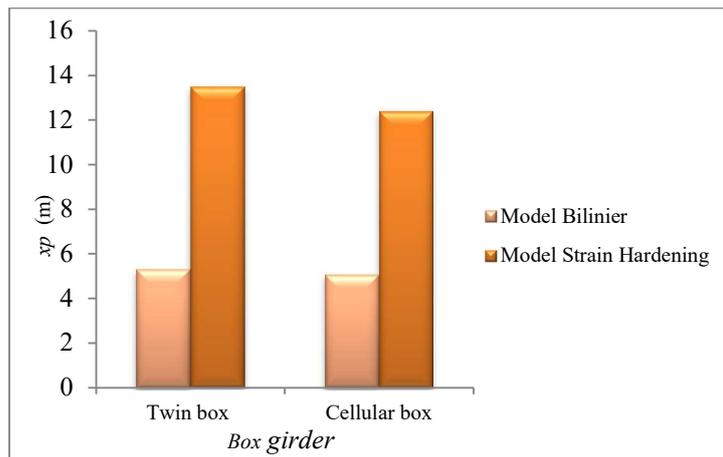
Tabel 2. Besarnya momen plastis, faktor bentuk dan panjang daerah

Penampang	Tanpa <i>strain hardening</i>			Dengan <i>strain hardening</i>			M_{ps}/M_p	s_s/s	x_{ps}/x_p
	M_p (kNm)	s	x_p (m)	M_{ps} (kNm)	s_s	x_{ps} (m)			
<i>Twin box</i>	170670	1,15	5,325	223166	1,51	13,482	1,308	1,313	2,532
<i>Cellular box</i>	169551	1,15	5,084	214346	1,45	12,381	1,264	1,261	2,435

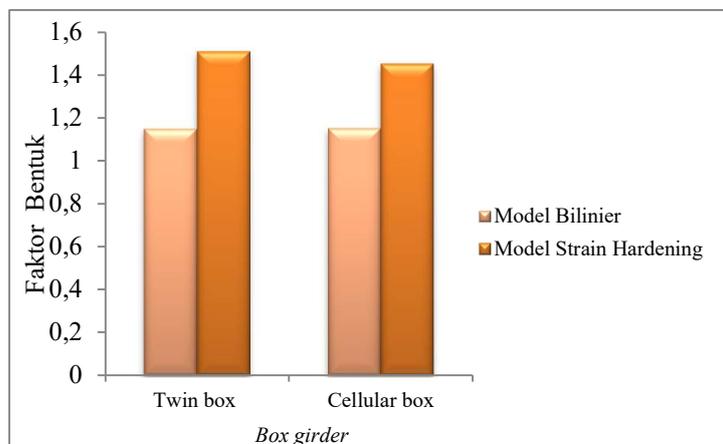
M_p = momen plastis tanpa *strain hardening*; s = faktor bentuk tanpa *strain hardening*; x_p = panjang daerah inelastis tanpa *strain hardening*; M_{ps} = momen plastis dengan *strain hardening*; x_{ps} = panjang daerah inelastis dengan *strain hardening*; s_s = faktor bentuk dengan *strain hardening*.



Gambar 5. Grafik perbandingan momen plastis penampang *twin box* dan *cellular box*



Gambar 6. Grafik perbandingan panjang daerah inelastis penampang *twin box* dan *cellular box*



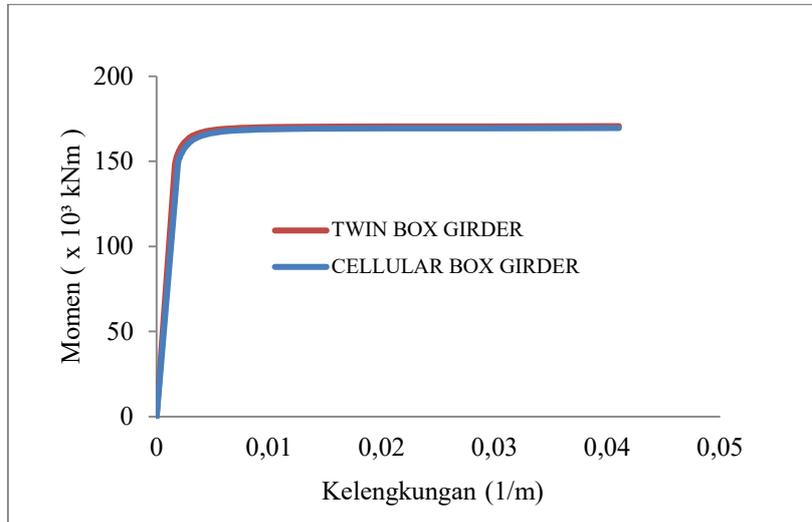
Gambar 7. Grafik perbandingan faktor bentuk penampang *twin box* dan *cellular box*

Gambar 5, 6, dan 7 memperlihatkan grafik perbandingan nilai momen plastis, panjang daerah inelastis dan faktor bentuk kedua penampang *box girder* baik yang memperhitungkan *strain hardening* maupun yang tidak memperhitungkan *strain hardening*.

3.2 Hubungan Momen-Kelengkungan

1. Efek bentuk penampang box girder terhadap momen-kelengkungan

Gambar 8. memperlihatkan perbandingan momen-kelengkungan model bilinear pada penampang *twin box* dan *cellular box*. Hubungan momen-kelengkungan kedua penampang sampai momen leleh (tercapainya leleh pada serat terluar penampang) adalah linier. Karena momen leleh penampang didesain sama, maka grafik hubungan momen-kelengkungan kedua penampang *box girder* sampai momen leleh berimpit. Besarnya momen dan kelengkungan pada titik leleh tersebut adalah 147.947 kNm dan 0,0016 /m.

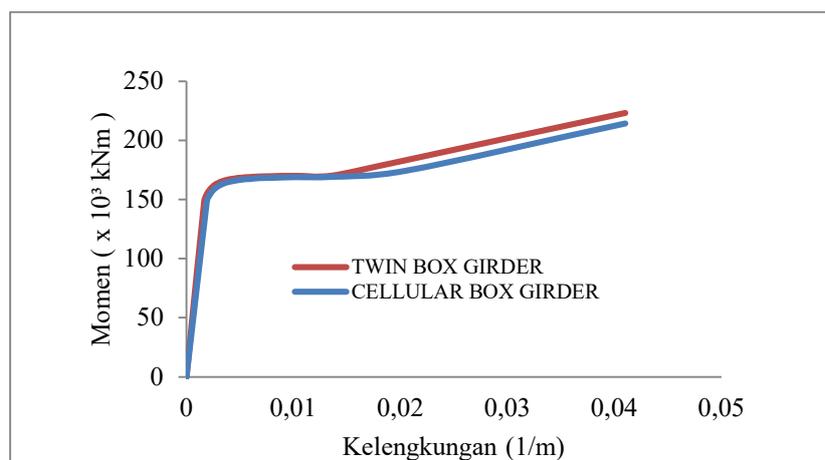


Gambar 8. Grafik perbandingan momen-kelengkungan penampang *twin box* dan *cellular box* model bilinear

Setelah momen leleh, hubungan momen-kelengkungan melengkung non linier sampai suatu nilai momen tertentu (misal titik X). Koordinat titik X untuk penampang *twin box* (0,0059 /m, 169.004 kNm) dan untuk penampang *cellular box* (0,0068 /m, 168.034 kNm). Nilai β penampang *twin box* dan *cellular box* pada titik X tersebut adalah sama yaitu 0,14 yang berarti bahwa 0,36 kali tinggi penampang di bagian atas dan bawah sudah mengalami leleh.

Setelah titik X tersebut, hubungan momen-kelengkungan kembali linier dengan penambahan momen yang sangat kecil sampai seluruh penampang mengalami leleh. Pada saat seluruh penampang mengalami leleh, momen plastis dicapai.

Grafik perbandingan momen kelengkungan model dengan *strain hardening* untuk penampang, *twin box* dan *cellular box* ditunjukkan pada Gambar 9. berikut.

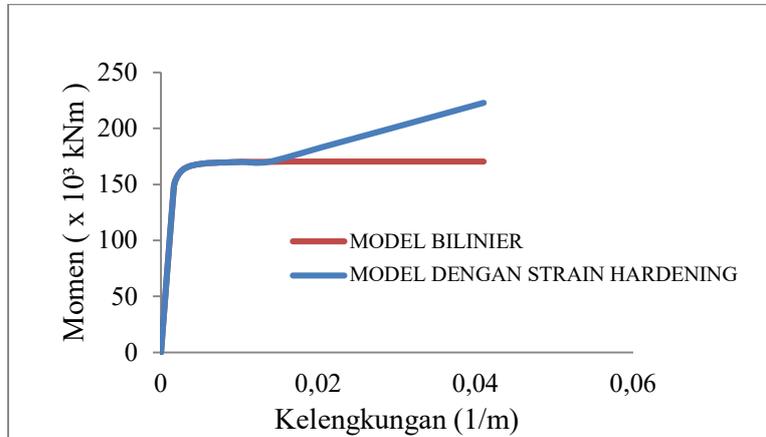


Gambar 9. Grafik perbandingan momen-kelengkungan penampang *twin box* dan *cellular box* model dengan *strain hardening*

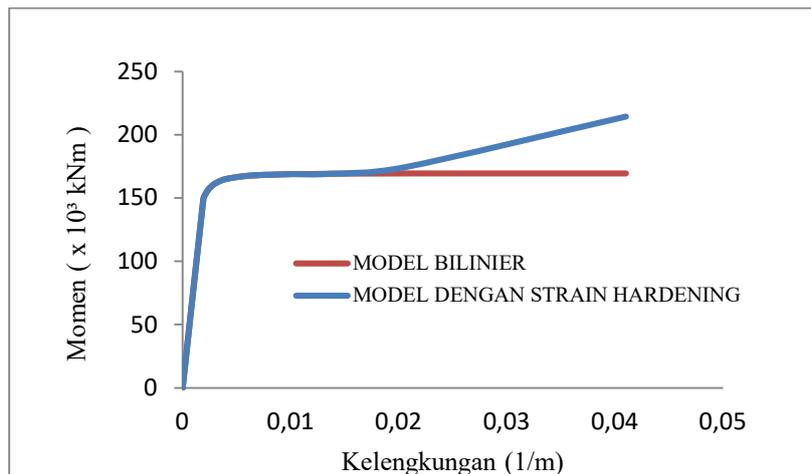
Dari gambar tersebut terlihat bahwa setelah nilai kelengkungan tertentu (misal titik Y, terjadi kenaikan momen yang sangat signifikan. Besarnya kenaikan untuk setiap penampang berbeda. Persentase kenaikan terbesar terdapat pada penampang *twin box* dan persentase terkecil pada penampang *cellular box*.

2. Efek strain hardening terhadap momen-kelengkungan

Grafik perbandingan hubungan momen-kelengkungan antara model bilinear dengan model *strain hardening* untuk keempat tipe penampang *box girder* diperlihatkan pada Gambar 10. Seperti telah dijelaskan sebelumnya dan seperti terlihat pada kedua gambar tersebut, bahwa setelah nilai kelengkungan tertentu (misal titik Y) terjadi kenaikan momen yang sangat signifikan untuk kedua penampang sampai tercapainya leleh pada semua penampang (momen plastis tercapai). Hal ini menunjukkan bahwa mulai titik Y tersebut sebagian penampang sudah mengalami *strain hardening*.



Gambar 10. Grafik perbandingan momen-kelengkungan antara model bilinear dengan *strain hardening twin box*



Gambar 11. Grafik perbandingan momen-kelengkungan antara model bilinear dengan *strain hardening cellular box*

Untuk penampang *twin box*, koordinat titik Y adalah (0,0137 /m, 170.392 kNm). Besarnya nilai β pada saat ini adalah juga 0,06 yang berarti 0,44 kali tinggi penampang di bagian atas dan bawah sudah mengalami leleh. Sedangkan untuk penampang *cellular box*, koordinat titik Y adalah (0,0137 /m, 169.204 kNm). Besarnya nilai β pada saat ini adalah juga 0,07 yang berarti 0,43 kali tinggi penampang di bagian atas dan bawah sudah mengalami leleh. Terlihat bahwa efek *strain hardening* dimulai pada nilai kelengkungan yang sama untuk kedua penampang, yaitu pada kelengkungan 0,0137 /m.

Setelah titik Y, untuk kedua penampang, penambahan momen dengan model bilinear tidak lagi signifikan sampai tercapai M_p (keseluruhan penampang mengalami leleh, sedangkan untuk model dengan *strain hardening* penambahan momennya sangat signifikan sampai tercapai M_p . Dengan M_p model yang memperhitungkan *strain hardening* untuk penampang *twin box* sebesar 223.166 kNm dan penampang *cellular box* sebesar 214.346 kNm, maka kenaikan momen terbesar sejak mulai terjadi *strain hardening* terdapat pada penampang *twin box* dan kenaikan terkecil terdapat pada penampang *cellular box*.

4. Kesimpulan

1. Untuk analisis model bilinear, M_p penampang *twin box* lebih besar sedikit dibandingkan M_p penampang *cellular box*. Hal ini sesuai dengan perhitungan kekuatan penampang berdasarkan RSNI T-03-2005 dimana penampang *twin box* mempunyai nilai $M_u/\phi M_n$ lebih kecil dibandingkan penampang *cellular box*. Hal ini menunjukkan bahwa penampang *twin box* yang paling aman dari penampang *cellular box*.
2. Untuk analisis memperhitungkan *strain hardening*, M_p terbesar *twin box* dibandingkan *cellular box*. Karena M_y kedua penampang didesain sama, *twin box* mempunyai (s) lebih besar dibandingkan *cellular box*.
3. Kenaikan M_p terbesar akibat diperhitungkan *strain hardening*: *twin box* (30,76%), sedangkan kenaikan M_p terkecil *cellular box* (26,42%). Bentuk penampang mempengaruhi kenaikan momen plastis akibat diperhitungkannya *strain hardening*.
4. Kenaikan x_p terbesar akibat diperhitungkan *strain hardening* adalah penampang *twin box*
5. Untuk analisis model bilinear hubungan momen-kelengkungan kembali linier dengan penambahan momen yang sangat kecil sampai keseluruhan penampang leleh (tercapainya M_p). Untuk analisis dengan *strain hardening*, setelah kelengkungan mencapai nilai 0,0137 /m, M_p kembali meningkat secara signifikan untuk penambahan kelengkungan selanjutnya sampai tercapai M_p .

5. Referensi

- [1] R. L. Brockenbrought, *Structural Steel Designer's Handbook*, 3rd edition. McGraw-Hill Education., 1999.
- [2] A. Setiawan, *Perencanaan Struktur Baja Dengan Metode LRFD (Berdasarkan SNI 03-1729-2002)*. Jakarta: Erlangga, 2008.
- [3] M. B. Wong, *Plastic Analysis and Design of Steel Structures*. London: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [4] RSNI T-03, *Perencanaan Struktur Baja untuk Jembatan*. Jakarta: Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah, 2005.
- [5] W. H. Chen, *Structural Engineering Handbook, 3rd edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 1999.
- [6] T. V. Galambos, "Load Factor Design of Steel Buildings," *AISC Engineering Journal*, vol. 104, no. 9, 1978.
- [7] K. J. Thompson and R. Park, "Stress-Strain Model For Grade 275 Reinforcing Steel With Cyclic Loading," *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, vol. 11, no. 2, 1978.
- [8] M. P. Byfield, J. M. Davies, and M. Dhanalakshmi, "Calculation of the strain hardening behaviour of steel structures based on mill tests," *Journal of Constructional Steelwork Research*, vol. 61, no. 2, 2005.
- [9] L. Wahyudi and S. A. Rahim, *Metode Plastis, Analisis dan Desain*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 1992.
- [10] RSNI T-02, *Standar Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional (BSN), 2005.
- [11] C. G. Salmon and J. E. Johnson, *Struktur Baja, Desain dan Perilaku*, Jilid 1. Jakarta: Erlangga, 1990.
- [12] Horne, Michael. *Plastic Theory of Structures*. 2nd ed. Elsevier Science, 2014. Web. 15 Oct. 2022.
- [13] Zainy, F., 2012, Perilaku Balok Baja dengan Penampang *Single Box*, *Twin Box*, dan *Cellular Box* Akibat Beban Tetap, Tesis, Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh.
- [14] Purwanto, 1997, Kajian *Eksperimental* Perilaku *Elastoplastis* Struktur Baja yang Dibebeani Kombinasi Lentur dan Torsi, *Thesis*, Program Pasca Sarjana, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- [15] Refinda, 1997, Pemodelan Perilaku *Elastoplastis* Penampang Balok Akibat Kombinasi Lentur dan Torsi, Teknik Sipil Rekayasa Struktur, Program Pasca Sarjana ITB, Bandung.