

## INITIAL GEOMETRIC IMPERFECTIONS AKIBAT TEKUK SINGLE CURVATURE MOMENT PADA BALOK BAJA SEDERHANA

Erlina Yanuarini<sup>1</sup>, Yanuar Setiawan<sup>2</sup>, Tri Widya Swastika<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Politeknik Negeri Jakarta, Jurusan Teknik Sipil, Kukusan, Beji, Depok, 16425

e-mail : [erlina.yanuarini@sipil.pnj.ac.id](mailto:erlina.yanuarini@sipil.pnj.ac.id), [yanuar.setiawan@sipil.pnj.ac.id](mailto:yanuar.setiawan@sipil.pnj.ac.id),  
[tri.widyaswastika@sipil.pnj.ac.id](mailto:tri.widyaswastika@sipil.pnj.ac.id)

### ABSTRACT

Steel beams are susceptible to initial geometric imperfections due to improper fabrication and installation processes. Consequently, long steel beams without stiffening are prone to bending due to lateral torsion. The purpose of this study is to determine the effect of variations in the initial geometric imperfections of Single Curvature-Moment (SCM) on the moment, total displacement, displacement in the X direction ( $U_1$ ), displacement in the Y direction ( $U_2$ ), and twist. This study used an RH profile with a compact flange and web. The boundary condition used is a simple beam with an initial geometric imperfection due to single moment-curvature (SCM) bending. The variations used are the initial geometric imperfections values of SCM 0 mm (without initial geometric imperfections), SR5 (with initial geometric imperfections of 5 mm), and SR10 (with initial geometric imperfections of 10 mm). Initial geometric imperfections of SCM in steel beam decreased moment capacities up to more than 2% in elastic conditions and 12% in plastic states. This SR10 beam is also a beam that has a displacement of the X-axis ( $U_1 = -203,960$  mm), a displacement of the Y-axis ( $U_2 = -255,615$  mm), and the most significant twist ( $28,179^\circ$ ).

**Keywords:** buckle, initial geometric imperfections, Single Curvature-Moment

### ABSTRAK

Balok baja rentan mengalami initial geometric imperfections akibat proses pabrikasi maupun pemasangan yang kurang tepat. Sementara balok baja yang panjang tanpa pengaku rentan mengalami tekuk akibat torsi lateral. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan dampak variasi besarnya initial geometric imperfections Single Curvature-Moment (SCM) terhadap momen, displacement total, displacement arah X ( $U_1$ ), displacement arah Y ( $U_2$ ), dan twist. Penelitian ini menggunakan profil RH dengan sayap dan badan yang kompak. Boundary condition yang digunakan adalah balok sederhana dengan initial geometric imperfections akibat tekuk single moment curvature (SCM). Variasi yang digunakan adalah besarnya nilai initial geometric imperfections SCM 0 mm (tanpa initial geometric imperfections), SR5 (dengan initial geometric imperfections 5 mm), dan SR10 (dengan initial geometric imperfections 10 mm). Dari hasil penelitian diketahui bahwa pada kondisi elastis, leleh, maupun plastis, balok dengan initial geometric imperfections SCM menunjukkan penurunan kapasitas momen mengalami penurunan hingga mencapai lebih dari 2% pada kondisi elastis dan 12% pada kondisi plastis. Balok SR10 juga merupakan balok yang memiliki displacement arah sumbu X ( $U_1 = -203,960$  mm), displacement arah sumbu Y ( $U_2 = -255,615$  mm), dan twist yang paling paling besar ( $28,179^\circ$ ).

**Kata kunci:** tekuk, initial geometric imperfections, Single Curvature Moment

## PENDAHULUAN

Profil H atau I *beam* sering digunakan sebagai balok struktur utama dari suatu bangunan maupun jembatan [1],[2].

Balok bentang panjang tanpa pengaku lateral ( $L_b > L_r$ ) rentan mengalami *lateral torsional buckling*. Panjang balok tanpa pengaku lateral dinamakan panjang tanpa di-*bresing* ( $L_b$ ). Dimana  $L_r$  adalah suatu batasan tentang tekuk torsi lateral kondisi *inelastic* (plastis) tanpa adanya pengaku [3]. Semakin panjang balok baja maka ketidaksempurnaan geometri awal (*initial geometric imperfections*) dari struktur tersebut pada saat pabrikasi sangat mungkin terjadi [4]. Hal tersebut kadang tidak bisa dihindari, sehingga diperlukan analisis khusus untuk melihat pengaruhnya terhadap momen nominal dan *displacement* akibat ketidaksempurnaan geometri tersebut.

Ketidaksempurnaan awal pada balok baja akibat tekuk oleh momen-momen ujung yang sama pada kondisi elastis membuat suatu balok I tidak dapat mencapai momen lelehnya [5]. Momen nominal pada batas tekuk torsi lateral biasanya lebih kecil dari momen nominal lentur pada keadaan batas leleh [6]. Adapun persamaan untuk mencari nilai momen nominal lentur menurut SNI 1729-2015 dapat dilihat melalui persamaan berikut ini:

$$M_n = M_p = Z_x F_y \quad (1.1)$$

$$M_y = F_y \cdot S_x \quad (1.2)$$

Ketidaksempurnaan awal pada balok baja akibat tekuk oleh momen-momen ujung yang sama juga membawa pengaruh pada *displacement* baik itu dalam arah vertikal, arah horizontal, maupun arah longitudinal, maupun rotasi pada sumbu Z (*twist*) seperti dalam penelitian yang dilakukan oleh Dermihan, dkk [7]. Adapun bentuk ketidaksempurnaan awal baik berupa ketidaklurusan awal ( $u_0$ ) maupun *twist*

( $\gamma_0$ ) awal pada suatu balok [8],[9] ditunjukkan pada Gambar 1.

$$u_0 = \delta_0 \cdot \sin \frac{\pi z}{L} \quad (1.3)$$

$$\gamma_0 = \theta_0 \cdot \sin \frac{\pi z}{L} \quad (1.4)$$

$$EI_y \frac{d^2 u}{dz^2} + (\gamma + \gamma_0) M_0 = 0 \quad (1.5)$$

$$GJ \frac{d\gamma}{dz} - \left( \frac{du}{dz} + \frac{du_0}{dz} \right) M_0 = 0 \quad (1.6)$$

$$\frac{\delta_0}{\theta_0} = \frac{(M_0)_{cr}}{\left( \frac{\pi^2 EI_y}{L^2} \right)} \quad (1.7)$$

*Single curvature-moment* terjadi karena adanya beban momen di kedua ujung suatu balok yang besar dan arahnya sama-sama membentuk suatu *displacement* tunggal (*single curvature*) [10]. Untuk dapat meminimalisir besarnya biaya produksi yang ditimbulkan akibat sering adanya produk yang gagal karena adanya ketidaksempurnaan dari suatu struktur profil tertentu, akibat pengaruh dari *initial geometric imperfections* dari suatu struktur perlu dianalisis [6],[11],[12]. Ketidaksempurnaan awal pada balok baja juga akan membawa pengaruh pada rotasi balok tersebut di sepanjang bentang. Jadi, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan dampak variasi besarnya *initial geometric imperfections Single Curvature-Moment* (SCM) terhadap kapasitas momen, *displacement* arah X (U1), *displacement* arah Y (U2), dan *twist*.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian analisis dengan bantuan *software finite element* ABAQUS [13]. Profil balok baja yang digunakan sebagai model adalah  $RH 708 \times 302 \times 15 \times 28$  dengan mutu baja  $E = 210000 MPa$ ,  $\nu = 0,3$  dengan kekuatan leleh  $F_y = 345 MPa$  dan  $F_y = 513 MPa$ . Adapun data material untuk kondisi elastis yang

digunakan adalah data material pada kondisi real yang didapatkan dari hasil pengujian material di lapangan, seperti yang digunakan pada penelitian sebelumnya [9],[14]. Balok baja dengan profil  $RH 708 \times 302 \times 15 \times 28$  dimodelkan dalam bentuk *solid*. Perilaku *initial geometric imperfections* dalam bentuk *single curvature moment* didapatkan dari analisis *buckle* dengan beban  $M$  yang sama besar nilainya di ujung-ujung baloknya. Dalam penelitian ini *boundary condition* yang digunakan adalah *boundary condition* pertama (BC1), nilai  $U1=0$ ;  $U2=0$ ;  $U3=0$  di RP1; dan  $UR3=0$ , sedangkan untuk *boundary condition* kedua (BC2), nilai  $U1=0$ ;  $U2=0$ ; dan  $UR3=0$  di RP2. RP1 dan RP2 adalah titik pusat profil RH di ujung-ujung baloknya, seperti tampak pada Gambar 1. *Boundary condition* yang digunakan pada Tahap 1 dan Tahap 2 adalah sama.

Panjang balok untuk ketiga model dalam penelitian ini sama sebesar  $L=10m$ . Variasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah besar *initial geometric imperfections* akibat tekuk *single moment curvature* yaitu sebesar 0 mm, 5 mm, dan 10 mm. Dalam perencanaan balok baja, *initial geometric imperfections* yang diijinkan adalah 1/1000 panjang balok baja diantara 2 tumpuan tanpa pengaku ( $L = L_b$ ) [15]. Artinya jika panjang model yang digunakan adalah 10m, maka maksimum *initial geometric imperfections*-nya adalah 10 mm. Variasi model yang digunakan dalam model dapat diketahui melalui Tabel 1. Ketentuan sumbu axis yang digunakan dalam penelitian ini, untuk arah 1 mewakili sumbu X, arah 2 mewakili sumbu Y, dan arah 3 mewakili sumbu Z [13] seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.

Analisis tahap pertama dengan metode analisis *buckle* menggunakan beban awal yang diberikan sebesar  $M1= 1$  di RP1 dan  $M= -1$  di RP2 dalam satuan N

dan mm untuk menentukan besar *Eigen value*. *Eigen value* sangat diperlukan dalam analisis *buckle* karena dapat memodelkan *mode shape* suatu model struktur [6],[12],[16]. Pada analisis tahap pertama menggunakan *properties* elastis dari profil baja tersebut. Setelah didapatkan nilai *Eigen value* maka nilai *Eigen value* tersebut diinputkan sebagai beban momen  $M1$  di RP1 dan  $M2$  di RP2 dengan metode analisis *statis risk* dengan menyertakan *initial geometric imperfections*-nya (NLGEOM= ON) [17]. Pada analisis tahap kedua menggunakan *properties* material elastis dan juga plastis. Penelitian yang sama menggunakan *statis risk* juga pernah dilakukan sebelumnya untuk mendapatkan perilaku kondisi *inelastic* pada pipa baja berlubang akibat adanya *nonlinear geometry* [18].

Batasan masalahnya dalam penelitian ini adalah:

1. *Initial geometric imperfections* yang digunakan berbentuk *single curvature moment* untuk model SR5 dan SR10 dan tumpuan sendi rol (balok sederhana)
  2. Hanya membandingkan sumbu kuat ( $M1$ ) pada kondisi elastis ( $2\%M_p$ ), leleh ( $M_y$ ), dan plastis ( $M_p$ ).
  3. *Displacement* total ( $U$ ), *displacement* arah X ( $U1$ ), *displacement* arah Y ( $U2$ ), dan *twist* (rotasi) dibahas hanya sampai balok SR0 mencapai  $M_p$ .
  4. Balok baja yang digunakan tanpa diberikan pengaku lateral
- Jadi, penerapan variasi tersebut diharapkan dapat mengetahui bagaimana pengaruh *initial geometric imperfections* tersebut terhadap momen arah sumbu kuat ( $M1$ ), *displacement* arah 1 ( $U1$ ), *displacement* arah 2 ( $U2$ ), dan *twist* (rotasi) pada balok sederhana.

## HASIL dan PEMBAHASAN

Analisis tahap pertama *buckle* akibat *single moment curvature* menghasilkan bentuk *initial geometric imperfections*

seperti pada Gambar 3.a. Pada Gambar 3.b dan Gambar 3.c menggambarkan U1 dan U2 di sepanjang bentang pada ujung atas profil dengan bentuk *initial geometric imperfections* yang sama, tetapi dengan besaran yang berbeda, yaitu 5 mm untuk SR5 dan 10 mm untuk SR10 mm. Berdasarkan hasil di atas, dapat diketahui bahwa untuk *initial geometric imperfections* SCM menghasilkan *displacement* arah U1 lebih besar dari pada arah U2. Besar *displacement* awal U1 pada ujung kanan sayap profil lebih kecil dibandingkan dengan besar *displacement* awal U1 pada ujung kanan bawah sayap profil. Hal ini terjadi karena adanya beban momen yang searah dan sama besar dengan analisis tekuk (*buckle*).

Analisis tahap pertama dengan *step buckle* menghasilkan *Eigen value* sebesar  $2,3559 \times 10^9$  dengan input beban dan material dalam satuan N dan mm. *Eigen value* diinputkan sebagai beban saat analisis *buckle step static risk*.

### Kapasitas Momen Nominal

Profil balok  $RH 708 \times 302 \times 15 \times 28$  merupakan profil yang mempunyai badan kompak dan sayap kompak. Panjang profil balok adalah  $L_b = 10 \text{ m}$ , sedangkan batasan untuk panjang tanpa pengaku untuk tekuk torsi lateral adalah  $L_r = 8,333 \text{ m}$ . Bila  $L_b > L_r$  maka perhitungan momen nominal lentur ( $M_n$ ) akibat tekuk torsi lateral harus diperhitungkan. Hasil perhitungan matematis tanpa adanya *initial geometric imperfections*, momen nominal pada kondisi plastis adalah sebesar  $M_n = M_p = 7344 \text{ cm}^3 \times 345 \text{ MPa} = 2534 \text{ kNm}$  dan saat terjadi leleh pertama kali pada serat terluar sebesar  $M_n = M_y = 6504 \text{ cm}^3 \times 345 \text{ MPa} = 2244 \text{ kNm}$ .

Analisis dengan *software finite element* diperoleh dari tahap analisis kedua, *step static risk*. Kapasitas momen balok baja dalam kondisi elastis ( $2\%M_p$ ),

leleh ( $M_y$ ), dan plastis ( $M_p$ ) disajikan dalam Tabel 2. Dari Tabel 2 diketahui bahwa bila balok tanpa *initial geometric imperfections single curvature moment* (SR0) pada kondisi elastis  $M1 = 2\%M_p$  mempunyai momen sebesar 506,73 kNm. Sedangkan balok dengan *initial geometric imperfections* 5 mm (SR5) mempunyai momen sebesar 500,6 kNm (1,210%). Balok dengan *initial geometric imperfections* 10 mm (SR0) mempunyai momen sebesar 482,2 kNm (2,867%).

Pada kondisi leleh, balok SR0 memiliki momen sebesar 2244 kNm, sesuai dengan perhitungan matematisnya. Sedangkan balok SR5 memiliki momen sebesar 2211,5 kNm (1,448%) dan balok SR5 memiliki momen sebesar 2196,3 kNm (2,126%). Pada kondisi plastis ketika balok tanpa *initial geometric imperfections* SR0 memiliki momen sebesar 2244 kNm yang besarnya sama dengan nilai  $M_p$ . Sedangkan balok SR5 hanya memiliki momen maksimum/*ultimate* sebesar 2227,36 kNm (1,448%) dan balok SR10 memiliki momen *ultimate* sebesar 2215,39 kNm (2,126%).

Pada kondisi elastis kapasitas momen untuk balok dengan *initial geometric imperfections* SCM menunjukkan penurunan yang relatif kecil (5%), selaras dengan penelitian yang sebelumnya untuk balok dalam kondisi elastis [6]. Serupa dengan kondisi tersebut, untuk kondisi leleh, kapasitas momen dengan *initial geometric imperfections* SCM juga menunjukkan penurunan yang relatif kecil (kurang dari 5%). Namun pada kondisi leleh, balok dengan *initial geometric imperfections* SR5 dan SR10 tidak mampu mencapai momen lelehnya, terlebih momen plastisnya. Penurunan momen juga terlihat signifikan yaitu sebesar 12% (lebih dari 10%) untuk balok dengan *initial geometric imperfections* SCM. Perbedaan besar *initial geometric*

*imperfections* tidak menunjukkan efek yang signifikan jika dibandingkan hasil M1 untuk balok SR5 dan SR10. Sehingga dengan Batasan maksimum *initial geometric imperfections* 1/1000 L untuk kondisi elastis, kapasitas momen dengan initial geometri tersebut masih bisa dikatakan cukup bagus pada kondisi elastis sebelum terjadinya *buckle*, namun tidak pada kondisi plastis. Balok SR10 mengalami penurunan momen kapasitas yang lebih besar daripada SR5, dengan adanya *initial geometric imperfections* sebesar 10 mm. Dari ketiga kondisi, baik elastis, leleh, maupun plastis, balok dengan *initial geometric imperfections* SCM menunjukkan penurunan kapasitas momen.

#### **Displacement Arah Sumbu X (U1) dan Sumbu Y (U2)**

Titik (*node*) di ujung kanan bawah dari penampang profil RH 708 × 302 × 15 × 28 digunakan untuk menunjukkan pengaruh *displacement* maksimum, karena pada ujung tersebut mengalami *displacement* yang paling besar. Gambar 4.a menunjukkan momen arah sumbu kuat (M1) terhadap *displacement* arah X (U1) baik pada kondisi elastis maupun plastis untuk ketiga model balok. Titik acuan yang digunakan untuk penyajian data, diambil pada titik(*node*) di ujung sayap kanan bawah yang terletak di tengah bentang ( $\frac{1}{2}L$ ). Balok tanpa *initial geometric imperfections* (SR0) memiliki nilai U1 = 0 baik pada kondisi elastis maupun plastis (Gambar 5). Sehingga dapat dikatakan bahwa balok SR0 tidak mengalami *displacement* arah sumbu X (U1) yang artinya pada balok tersebut tidak terjadi *twist* (rotasi). Sedangkan pada balok dengan *initial geometric imperfections* SCM (SR5 dan SR 10) mempunyai *displacement* pada arah sumbu X (U1) baik pada kondisi elastis maupun kondisi plastis (Gambar 5). Pada kondisi elastis balok SR0 mempunyai nilai U1 = -0,019 mm, SR5

= -0,852 mm, dan SR10 mempunyai nilai U1 = -1,687 mm (paling maksimum). Pada kondisi plastis, U1 sangat terlihat besar sekali perbedaannya balok dengan *initial geometric imperfections*, untuk SR0 U1 = -0,463 mm, sedangkan SR5 U1 = 202,335 mm dan SR 10 U1 = 203, 960 mm (lihat Tabel 5). Balok SR10 dengan *initial geometric imperfections* sebesar 10 mm, mempunyai *displacement* arah sumbu X (U1) yang paling besar. Jadi adanya *initial geometric imperfections* pada suatu balok memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada *displacement* arah sumbu X (U1).

Gambar 4.b dan Gambar 6 menunjukkan bahwa pada momen yang sama misalnya 506,73 kNm (kondisi elastis) terlihat bahwa untuk balok SR10 (13,318 mm) memiliki nilai U2 yang lebih lebih besar dari pada balok SR5 (13,181 mm) dan SR0 (13,058 mm), namun tidak signifikan perbedaannya. Begitu pula saat M1 SR0 mencapai leleh pertama kali ( $M_y$ ) dan M1 SR5 dan M1 SR10 mencapai *ultimate* ( $M_{cr}$ ) (Gambar 6), perbedaan yang terjadipun tidak signifikan. Namun ketika dalam kondisi plastis, perbedaan U2 terlihat cukup signifikan (lihat Gambar 6). Balok SR5 memiliki *displacement* U2 yang lebih besar daripada balok SR0 (tanpa *initial geometric imperfections* SCM). Jadi, *initial geometric imperfections* SCM juga memperbesar *displacement* U2 pada suatu balok dalam kondisi elastis, terlebih pada kondisi elastis.

#### **Rotasi Pada Sumbu Z (Twist)**

*Twist* yang dianalisis dalam penelitian berada di tengah bentang ( $\frac{1}{2}L$ ). *Twist* diketahui dari besar *displacement* yang ada di tengah sayap atas profil balok, dibandingkan dengan *displacement* di tengah sayap bawah profil balok, seperti yang terlihat pada Gambar 7.

Namun karena balok dimodelkan dalam bentuk *solid extrusion*, sulit mendapatkan nilai tepat di ujung tengahnya, karena berdampak pada konvergensi saat analisis. Nilai *displacement* di tengah profil atas balok diperoleh dari nilai *displacement* rata-rata di kiri dan di kanan sayap atas profil balok. Perhitungan yang sama juga diberikan untuk balok yang berada di sayap bawah. Hubungan antara momen dengan *twist* tampak pada Gambar 8.

Gambar 8 menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya momen, maka *twist* untuk balok dengan *initial geometric imperfections* SCM (SR5 dan SR10) dalam analisis tekuk lebih besar dari pada balok tanpa *initial geometric imperfections* (SR0). Seperti yang terlihat pada Gambar 9, pada kondisi elastis,  $twist\ SR0 = 0^\circ$ ,  $twist\ SR5 = 0,042^\circ$ ,  $twist\ S10 = 0,086^\circ$ . Saat SR0 mencapai leleh pertama kali,  $twist\ SR0 = 0,006$ , sementara  $twist\ SR5 = 0,342^\circ$ ,  $twist\ S10 = 0,433^\circ$  saat mencapai *ultimate*. Pada kondisi plastis ketika M1 SR0 mencapai  $M_p$ , maka dihasil  $twist\ SR0 = -0,038^\circ$ , sedangkan  $twist\ SR5=27,371^\circ$  dan  $twist\ SR10=28,179^\circ$ . Tanda minus di sini hanya menunjukkan arah sumbu yang berlawanan. Jika minus artinya ke samping kiri dan positif ke samping kanan. Balok dengan *initial geometric imperfections* SCM memiliki *twist* yang semakin membesar saat M1 membesar, terlebih lagi saat melampaui momen kritis maksimumnya  $M_{cr}$ . Balok SR10 dengan *initial geometric imperfections* sebesar 10 mm, mempunyai *twist* ( $\gamma$ ) yang paling besar dibandingkan dengan balok SR0 dan SR5. Dari Gambar 10.a, 10.b 10.c terlihat dengan jelas perbedaan ketiga model saat kondisi plastis (gambar dengan skala tertentu). Jadi *initial geometric imperfections* SCM memperbesar *twist* pada balok baik pada kondisi elastis, terlebih lagi pada kondisi plastis.

## KESIMPULAN

Pada kondisi elastis, leleh, maupun plastis, balok dengan *initial geometric imperfections* SCM menunjukkan penurunan kapasitas momen hingga mencapai lebih dari 2% pada kondisi elastis dan 12% pada kondisi plastis. Dari ketiga model balok, balok SR10 dengan *initial geometric imperfections* sebesar 10 mm, memiliki penurunan kapasitas momen yang lebih besar dibandingkan dengan balok SR0 dan SR5. Balok SR10 juga merupakan balok yang memiliki *displacement* arah sumbu X (U1), *displacement* arah sumbu Y (U2), dan juga *twist* yang paling paling besar.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. V. Galambos and A. E. Surovek, *Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers*. 2008.
- [2] J. P. S. de Oliveira, A. F. G. Calenzani, R. H. Fakury, and W. G. Ferreira, "Elastic critical moment of continuous composite beams with a sinusoidal-web steel profile for lateral-torsional buckling," *Eng. Struct.*, vol. 113, pp. 121–132, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.01.021.
- [3] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1729: Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural* Badan Standardisasi Nasional. Jakarta, 2015.
- [4] F. Papp, "Buckling assessment of steel members through overall imperfection method," *Eng. Struct.*, vol. 106, pp. 124–136, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.10.021.
- [5] Z. Kala, "Elastic lateral-torsional buckling of simply supported hot-rolled steel I-beams with random imperfections," *Procedia*

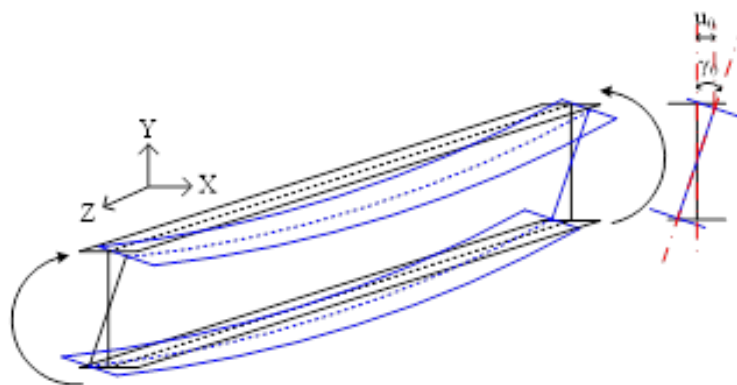
- Eng.*, vol. 57, pp. 504–514, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.04.065.
- [6] M. Šorf and M. Jandera, “Lateral-torsional buckling of slender cross-section stainless steel beams,” *Structures*, vol. 28, no. December 2019, pp. 1466–1478, 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.09.073.
- [7] A. L. Demirhan, H. E. Eroğlu, E. O. Mutlu, T. Yilmaz, and Ö. Anil, “Experimental and numerical evaluation of inelastic lateral-torsional buckling of I-section cantilevers,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 168, 2020, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.105991.
- [8] W. F. Chen and E. M. Lui, *Structural Stability, Theory and Implementation*. New York, 1987.
- [9] E. Yanuarini and : Cheng-Cheng Chen, “The Effects of Initial Imperfection Shapes to Steel Beam Behavior,” National Taiwan University of Science and Technology, 2012.
- [10] A. Samanta and A. Kumar, “Distortional buckling in monosymmetric I-beams,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 44, no. 1, pp. 51–56, 2006, doi: 10.1016/j.tws.2005.09.007.
- [11] M. R. Karamooz Ravari *et al.*, “On the effects of geometry, defects, and material asymmetry on the mechanical response of shape memory alloy cellular lattice structures,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 2, 2016, doi: 10.1088/0964-1726/25/2/025008.
- [12] S. Novoselac, T. Ergić, and P. Baličević, “Linear and nonlinear buckling and post buckling analysis of a bar with the influence of imperfections,” *Teh. Vjesn.*, vol. 19, no. 3, pp. 695–701, 2012.
- [13] Simulia Dassault Systèmes Corp, *Abaqus Analysis User’s Manual*. 2016.
- [14] Y. Bu and L. Gardner, “Local stability of laser-welded stainless steel I-sections in bending,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 148, pp. 49–64, 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.05.010.
- [15] American Institute of Steel Construction, *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, 2010.
- [16] C. N. Thombare, K. K. Sangle, and V. M. Mohitkar, “Nonlinear buckling analysis of 2-D cold-formed steel simple cross-aisle storage rack frames,” *J. Build. Eng.*, vol. 7, pp. 12–22, 2016, doi: 10.1016/j.jobe.2016.05.004.
- [17] F. H. Abed, M. H. AlHamaydeh, and S. A. Barakat, “Nonlinear Finite-Element Analysis of Buckling Capacity of Pretwisted Steel Bars,” *J. Eng. Mech.*, vol. 139, no. 7, pp. 791–801, 2013, doi: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0000528.
- [18] A. Franus and Ł. Kowalewski, “An efficiency comparison of numerical implementation approaches of hyperelastic constitutive model in ABAQUS/Standard,” in *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 196, pp. 0–7, doi: 10.1051/matecconf/201819601052.

Tabel 1. Variasi Model Penelitian

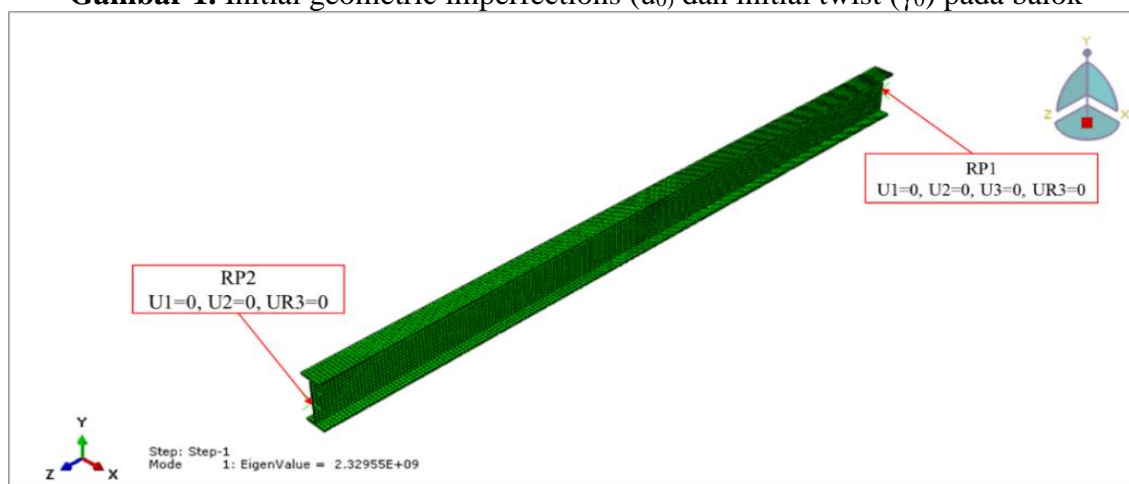
Model	Simbol	Variabel tetap	Variabel berubah = besar <i>initial geometric imperfections</i> akibat <i>buckle single moment curvature</i>
1	SR0	<i>Boundary condition,</i>	U= 0 mm
2	SR5	beban, <i>Eigen value</i>	U= 5 mm
3	SR10		U= 10 mm

Tabel 2. Kapasitas Momen dalam Kondisi Elastis, Leleh, dan Plastik

Model	M1 (elastis) kNm	Perbedaan M1 (elastis) % = $\frac{M1_{SR0e} - M1_{SRe}}{M1_{SR0e}}$	M1 (leleh) kNm	Perbedaan M1 (leleh) % = $\frac{M1_{SR0y} - M1_{SRy}}{M1_{SR0y}}$	M1 (plastis) kNm	Perbedaan M1 (plastis) % = $\frac{M1_{SR0p} - M1_{SRp}}{M1_{SR0p}}$
SR0	506,73	0,000%	2244,00	0,000%	2534,27	0,000%
SR5	500,60	1,210%	2211,50	1,448%	2227,36	12,111%
SR10	492,20	2,867%	2196,30	2,126%	2215,39	12,583%

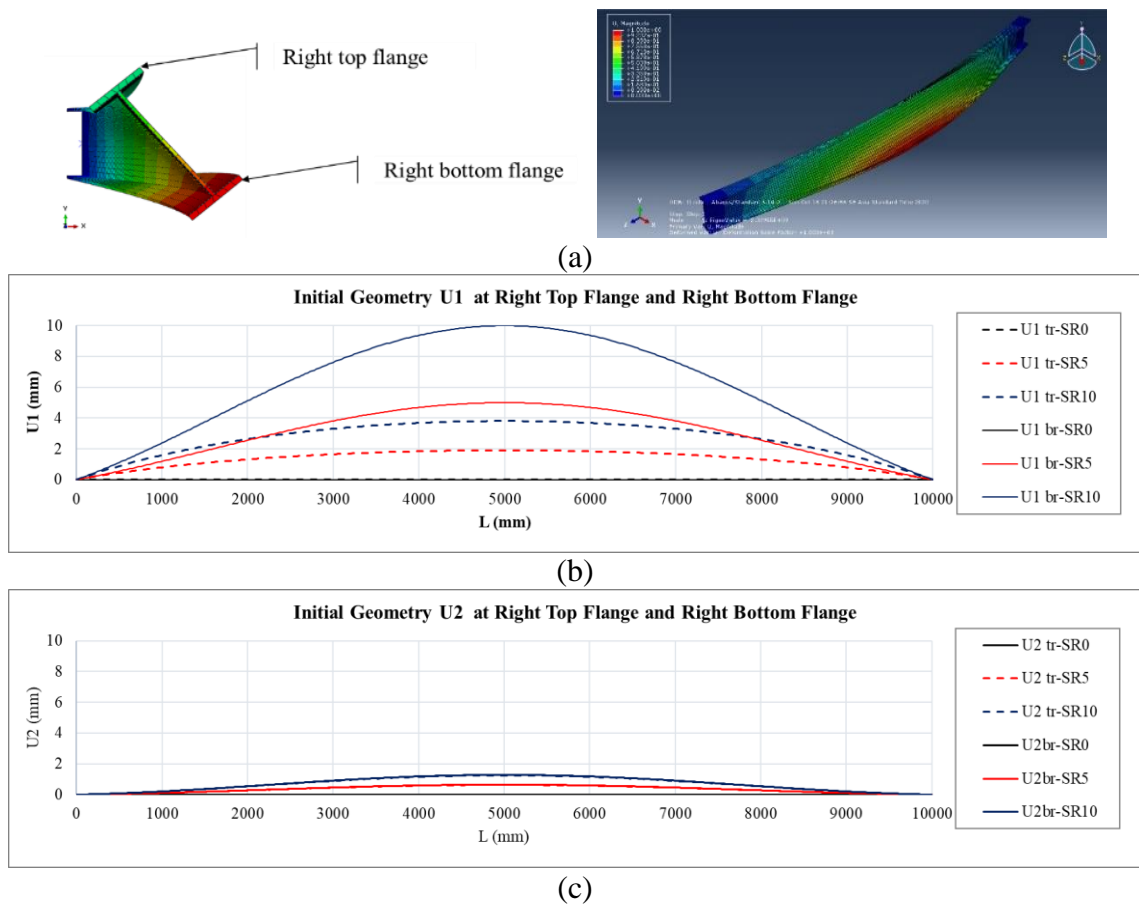


Gambar 1. Initial geometric imperfections ( $u_0$ ) dan initial twist ( $\gamma_0$ ) pada balok

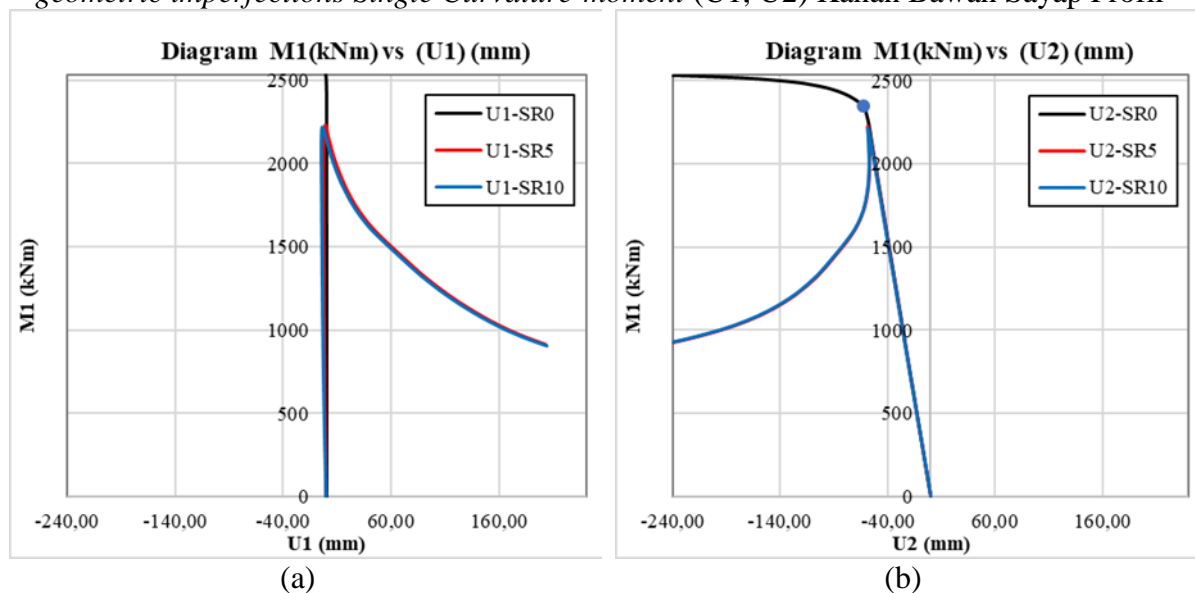


Gambar 2. Gambar Balok Sederhana dengan *Boundary Condition*-nya

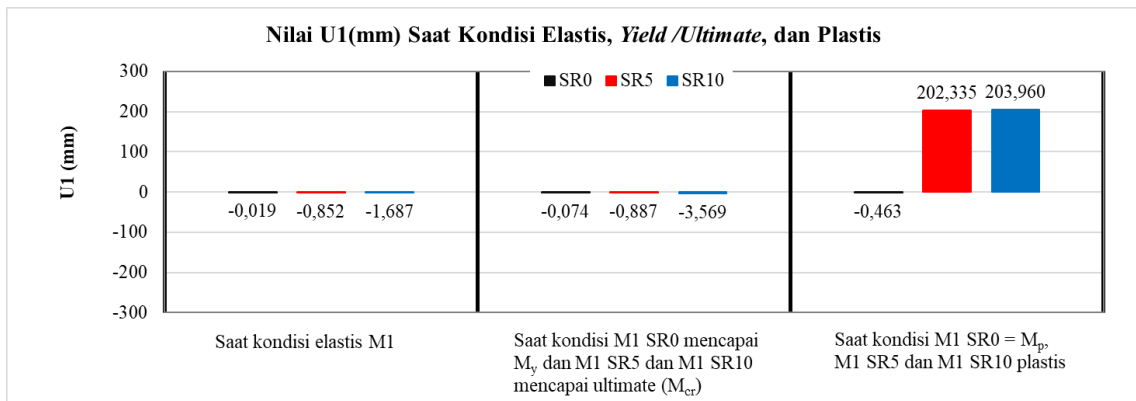




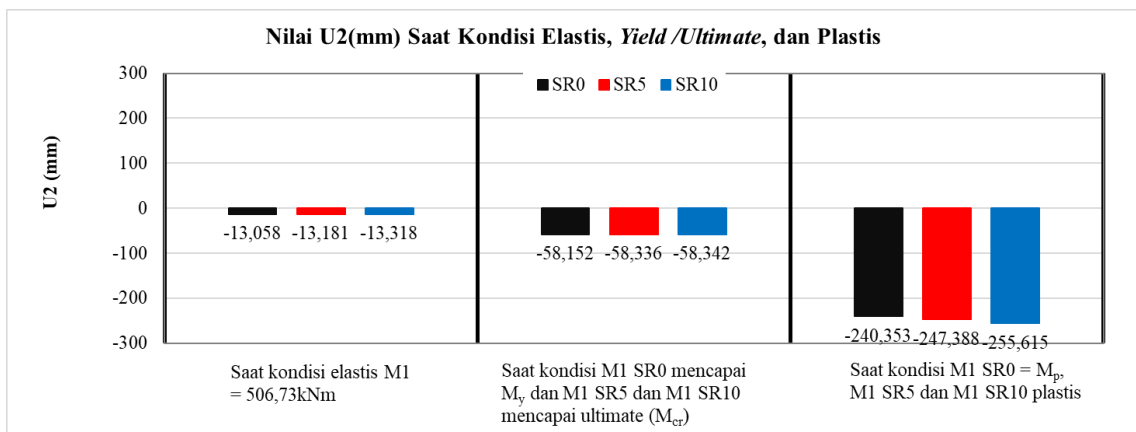
**Gambar 3.a** Gambar Initial geometric imperfections SCM, **3.b** Initial geometric imperfections Single Curvature-Moment (U1, U2) di Kanan Atas Sayap Profil, **3.c** Initial geometric imperfections Single Curvature-moment (U1, U2) Kanan Bawah Sayap Profil



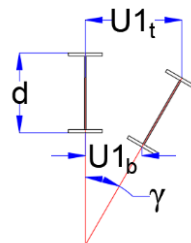
**Gambar 4.a** Diagram Momen Arah Sumbu Kuat (M1) vs U1, **4.b** Diagram Momen Arah Sumbu Kuat (M1) vs U2



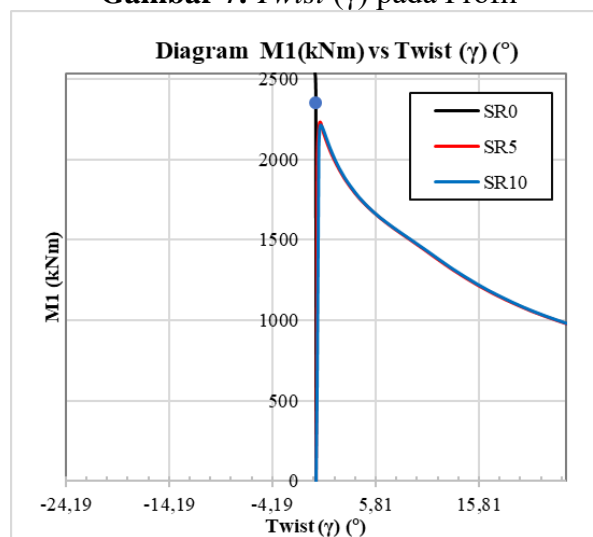
**Gambar 5.** Nilai U1 (mm) Saat Kondisi Elastis, Yield /Ultimate, dan Plastik



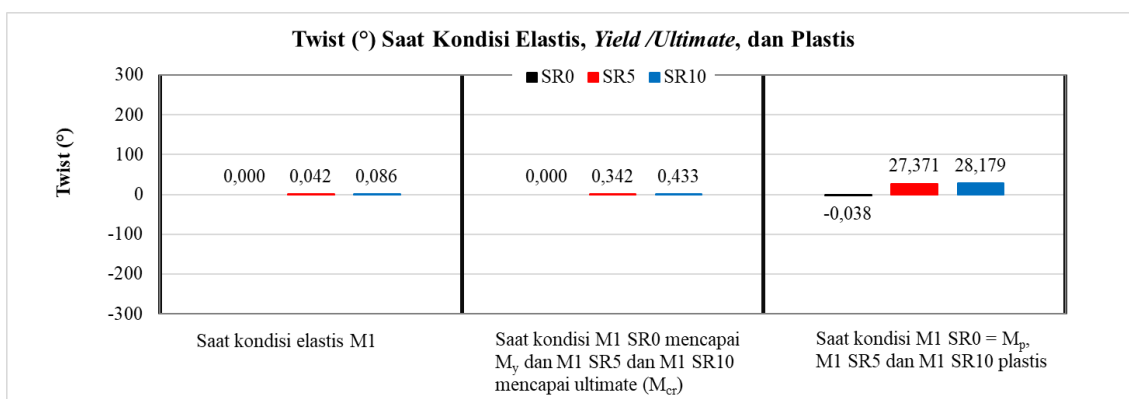
**Gambar 6.** Nilai U2 (mm) Saat Kondisi Elastis, Yield /Ultimate, dan Plastik



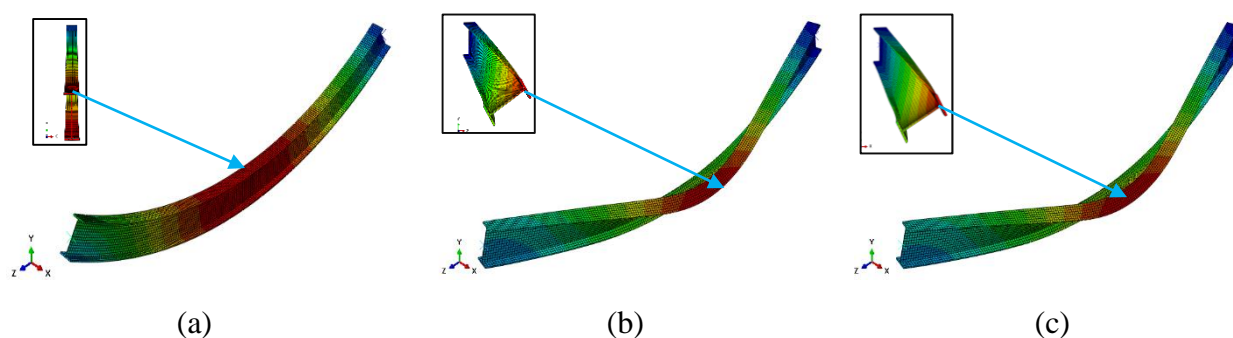
**Gambar 7.** Twist ( $\gamma$ ) pada Profil



**Gambar 8.** Diagram Momen Arah Sumbu Kuat (M1) vs Twist ( $\gamma$ )



**Gambar 9.** Twist (°) Saat Kondisi Elastis, Yield /Ultimate, dan Plastik



**Gambar 10.a** Displacement Balok SR0; **10.b** Displacement Balok SR5; **10.c** Displacement Balok S10