

## Perbandingan Analisis Numerik dan Analitikal Kekakuan Elastik Lateral Pada Jembatan Rangka Terbuka dengan Menggunakan Program Abaqus

Moh. Fadhlán Rosyidi<sup>1,\*</sup>, Hidajat Sugihardjo<sup>1</sup>, Budi Suswanto<sup>1</sup>, Ahmad Basshofi Habieb<sup>1</sup>

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [fadhlanros@gmail.com](mailto:fadhlanros@gmail.com)

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	01 Januari 2022	<i>Transverse bracings are elements that affect the lateral stability of the compression member. As in half through truss bridges, the absence of transverse bracing reduces lateral stability and compression members are susceptible to buckling. Buckling will cause damage to the entire bridge. Therefore, the elastic restraint provided by the vertical elements and floor beams is very important for the lateral stability of the half through truss bridge. This study discusses the numerical analysis of 2D wire models and numerical modification of 3D solid models using Software Abaqus. Then the results of the analysis are compared with the analytical using the Engesser Formula and previous studies conducted by Matthies. The lateral elastic stiffness produced by the 2D wire model is 6.4675 kip/in with a difference of 2.179% between numerical and analytical and 1.677% with the previous study respectively. The lateral elastic stiffness produced by the 3D solid model is 6,614 kip/in with a difference of 0.030% respectively between numerical and analytical and 0.575% with previous studies. The numerical modification model with 3D Solid will then be used as a modeling reference in further research, modification of an half through truss bridge cross section that facilitates user accessibility.</i>
Diperbaiki	11 Februari 2022	
Disetujui	11 Februari 2022	

Keywords: bridge stability, buckling, lateral elastic stiffness, Abaqus.

### Abstrak

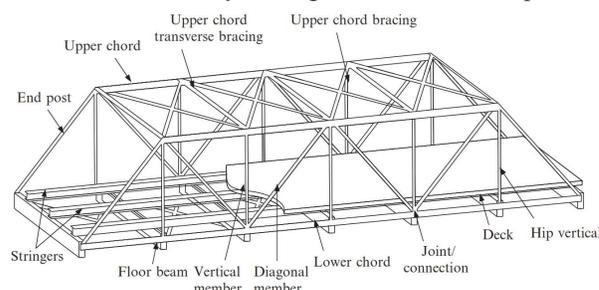
Bresing transversal merupakan elemen yang berpengaruh terhadap stabilitas lateral batang tekan atas. Seperti pada jembatan rangka terbuka, tidak adanya pengikat transversal mengurangi stabilitas lateral dan batang tekan atas rentan terhadap tekuk. Tekuk akan menyebabkan kerusakan pada seluruh jembatan. Oleh karena itu, kekangan elastis yang diberikan oleh elemen vertikal dan balok lantai sangat penting untuk stabilitas lateral jembatan rangka terbuka. Penelitian ini membahas tentang analisis numerik model 2D wire dan modifikasi numerik model 3D solid dengan menggunakan program bantu Abaqus. Kemudian hasil analisis dibandingkan dengan Analitikal menggunakan Formula Engesser dan studi terdahulu yang dilakukan oleh Matthies. Kekakuan elastik lateral yang dihasilkan oleh model 2D wire adalah 6,4675 kip/in dengan selisih masing-masing sebesar 2,179% antara numerik dengan analitikal dan sebesar 1,677% dengan studi terdahulu. Kekakuan elastik lateral yang dihasilkan oleh model 3D solid adalah 6,614 kip/in dengan selisih masing-masing sebesar 0,030% antara numerik dengan analitikal dan sebesar 0,575% dengan studi terdahulu. Model modifikasi numerik dengan 3D Solid selanjutnya akan digunakan sebagai acuan pemodelan pada penelitian lanjutan yaitu modifikasi penampang jembatan terbuka yang memudahkan aksesibilitas pengguna.

Kata kunci: stabilitas jembatan, tekuk, kekakuan elastik lateral, Abaqus

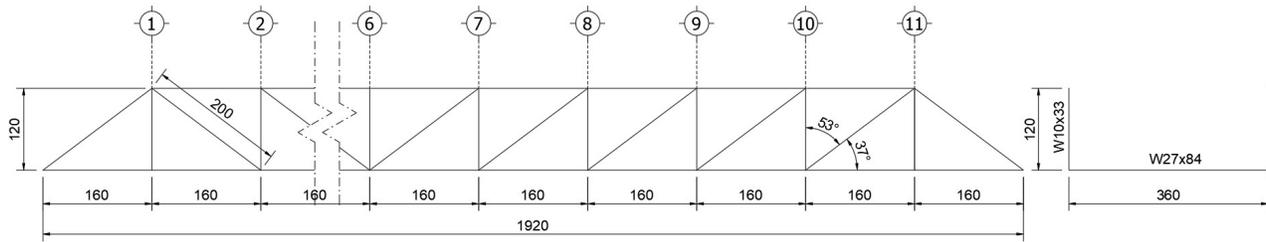
### 1. Pendahuluan

Jembatan rangka dengan penampang terbuka dapat dijumpai pada jembatan pejalan kaki, jembatan kereta api dan jembatan jalan raya. Biasanya dipakai untuk bentang jembatan yang kecil, sehingga tidak diperlukan ikatan angin atas atau bisa disebut *half through truss bridge* [1]. Komponen terlemah dari jembatan rangka terbuka adalah batang tekan dari salah satu rangkanya, untuk stabilitas komponen struktur tekan ini bergantung pada kekakuannya sendiri dan kekangan elastis yang diberikan oleh elemen vertikal dan balok lantai [2]. Namun, dengan tidak adanya pengikat transversal atas (*upper chord transverse bracing*)

terlihat pada **Gambar 1** sangat mengurangi stabilitas transversal dan akibatnya batang tekan rentan terhadap tekuk.



**Gambar 1.** Terminologi Jembatan Rangka [3]



Gambar 2. Detail Tampak Memanjang dan Melintang Jembatan (unit: in)

Tekuk dari batang tekan atas akan menyebabkan kerusakan jembatan. Oleh karena itu, stabilitas batang tekan atas sangat penting untuk jembatan rangka terbuka [4]. Kekakuan elastik lateral merupakan kontribusi dari kekakuan penampang badan vertikal, diagonal dan balok melintang pada jembatan rangka terbuka yang ditopang secara sederhana, bertindak sebagai penahan lateral dari batang tekan atas sampai batas tertentu [5]. Dalam menangani masalah ini, stabilitas batang tekan atas diselidiki dengan mengasumsikan bahwa kekangan dari anggota badan dapat diwakili oleh aksi pegas yang terletak pada bidang horizontal. Kajian analitik dasar sudah dirintis oleh engesser, dengan mengasumsikan jepit pada tengah gelagar melintang [2]. Penelitian yang dilakukan oleh Matthies [6] studi analisis untuk mencari nilai kekakuan elastik lateral,  $C$ , dengan menggunakan program bantu Ansys, berdasarkan data jembatan yang digunakan, untuk elemen rangka batang atas menggunakan profil Box 10"x10"x5/8" sedangkan untuk elemen rangka penampang vertikal dan diagonal terdiri dari profil W10x33, balok lantai menggunakan penampang profil W27x84. Dimensi jembatan dengan tinggi rangka batang 120 in, lebar jembatan 360 in dan jarak antar panel 160 in dengan jumlah panel 12. Detail dari jembatan seperti terlihat pada Gambar 2. Detail profil penampang melintang jembatan yang digunakan oleh Matthies [6] seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Detail Profil Elemen Penampang Melintang Jembatan

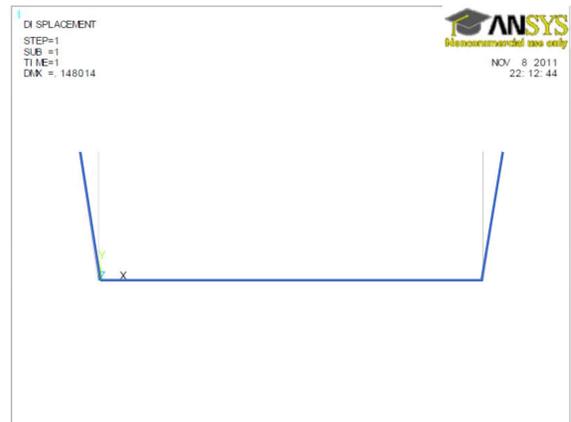
Profil	d (in)	bf (in)	tf (in)	tw (in)	Inertia, $I_{xx}$ (in <sup>4</sup> )
W10x33	9,73	7,96	0,435	0,29	166,496
W27x84	26,71	9,96	0,64	0,46	2796,998

Boundary Condition pada tumpuan dianalisis sebagai struktur yang ditopang sederhana. Pembebanan dengan beban 1 kip ditempatkan pada setiap ujung penampang vertikal seperti terlihat pada Gambar 3.

Hasil yang didapatkan berupa perpindahan arah lateral yang terjadi di ujung balok. Beban menyebabkan perpindahan sebesar 0,148014 in seperti terlihat pada Gambar 4 yang dapat digunakan untuk mencari kekakuan elastik lateral dengan mengambil beban dibagi dengan perpindahan. Menggunakan hasil dari perpindahan ujung batang vertikal untuk menghitung kekakuan, nilai dari  $C = 1 / 0,148014 = 6,576$  kip/in.



Gambar 3. Boundary Condition [6]



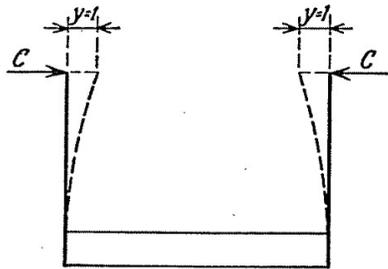
Gambar 4. Perpindahan akibat beban pada ujung batang vertikal Ansys [6]

**2. Metode**

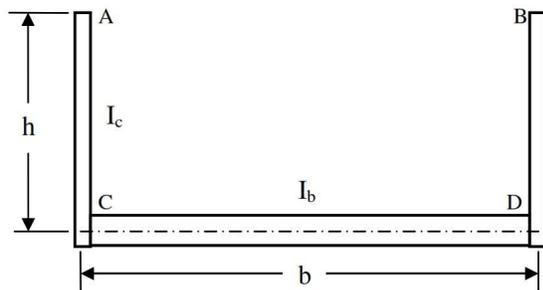
Pada penelitian ini dilakukan beberapa metode pemodelan numerik yaitu 2D Wire dan 3D Solid, perbedaan parameter kedua metode tersebut pada Abaqus yaitu Spesimen Penyusun elemen, Geometri Permodelan, dan *Boundary conditions*. Hasil kekakuan elastik lateral dari dua metode tersebut akan dibandingkan dengan perhitungan analitikal dan studi terdahulu penelitian dari Matthies [6]. Tujuan Penelitian adalah untuk mendapatkan nilai kekakuan elastik lateral berdasarkan dengan dua metode permodelan numerik tersebut dan dibandingkan dengan hasil perhitungan analitikal dan studi terdahulu.

**A. Analitikal Kekakuan Elastik Lateral**

Perhitungan kekakuan untuk *lateral supports* dari rangka batang atas yang tidak di breising dapat dihitung dengan menggunakan *energy method*. Hal ini dapat dicapai dengan menghitung gaya, *C* yang diperlukan untuk menghasilkan perpindahan satu satuan ke arah lateral pada titik panel. Nilai *C* tergantung pada kekakuan elastis struktur pendukung dan dapat didefinisikan sebagai gaya yang menghasilkan perpindahan  $y = l$  pada titik aplikasi yaitu ujung atas batang vertikal [7], seperti terlihat pada **Gambar 5**. *C* memiliki besaran gaya per satuan panjang dan dapat bervariasi antara 0 sampai  $\infty$ .

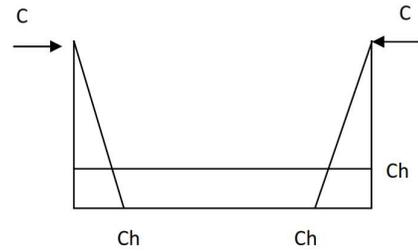


**Gambar 5.** Perpindahan lateral akibat gaya *C*,  $y=l$  [7]

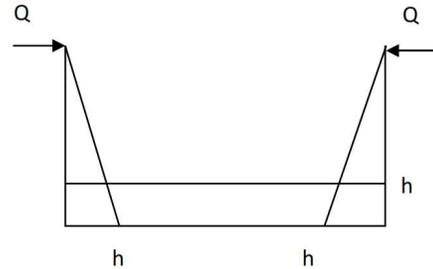


**Gambar 6.** Terminologi Melintang Jembatan

Untuk mendapatkan nilai *C*, asumsi digunakan seperti terlihat pada **Gambar 7**. Berikut ini adalah turunan dari konstanta pegas penyangga lateral jika: Sambungan antara balok vertikal dan balok lantai diasumsikan kaku.



**Gambar 7.** Momen akibat beban nyata yang diterapkan, *C*



**Gambar 8.** Momen akibat beban virtual, *Q* diasumsikan = 1

$$Q * \Delta = \int \frac{Mm}{EI} dx = \frac{2}{EI_c} \left( \frac{1}{2} Ch * h * \frac{2}{3} h \right) + \frac{1}{EI_b} (ch * b * h) \quad (1)$$

Dimana, *Q*, pada persamaan 1 adalah beban virtual yang diterapkan dalam arah horizontal pada titik-titik dimana perpindahan harus dihitung seperti terlihat pada **Gambar 8**. Dalam perhitungan ini, beban virtual, *Q*, diasumsikan nilai 1. Perhatikan bahwa,  $\Delta$ , adalah perpindahan relatif antara titik A dan B. Oleh karena itu, untuk menghitung kekakuan elastik lateral, *C*, perlu mengganti nilai 2 untuk perpindahan,  $\Delta$ , dalam persamaan 1. Ini menghasilkan persamaan 2:

$$1 * 2 = \frac{2 * Ch^3}{3EI_c} + \frac{Ch^2b}{EI_b} \quad (2)$$

Kekakuan Elastik Lateral, *C* dapat ditentukan melalui persamaan 3 [8]:

$$C = \frac{E}{h^2 \left[ \left( \frac{h}{3I_c} \right) + \left( \frac{b}{2I_b} \right) \right]} \quad (3)$$

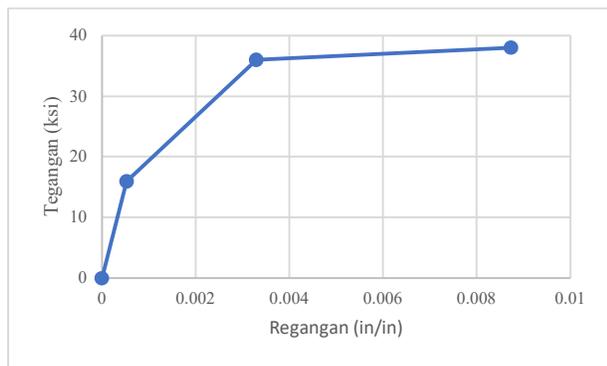
Dimana, sesuai dengan **Gambar 6** :

- C* = Kekakuan Elastik Lateral (kip/in)
- E* = Modulus Elastisitas Baja (kip/in<sup>2</sup>)
- h* = Tinggi Jembatan (in)
- b* = Lebar Jembatan (in)
- I<sub>c</sub>* = Inersia Batang Vertikal (in<sup>4</sup>)
- I<sub>B</sub>* = Inersia Balok Lantai (in<sup>4</sup>)

**B. Pemodelan Numerik 2D Wire**

Pemodelan numerik metode yang pertama dengan spesimen penyusun elemen 2D wire merupakan model dari

penelitian Matthies [6] dengan Ansys yang dimodelkan ulang dengan program bantu Abaqus. Tujuan dari metode pertama adalah sebagai pembandingan model modifikasi numerik 3D solid. Material baja disimulasikan menggunakan model material *non linier Inelastic Column Buckling* dengan tangent modulus [9]. Modulus elastisitas ( $E$ ) sebesar 29000 ksi; *poisson's ratio* sebesar 0,3; Batas proporsional ditentukan sesuai manual AISC sebesar  $0.4f_y$  [10], dan nilai untuk tegangan leleh adalah 36 ksi. Kurva tegangan-regangan seperti terlihat pada **Gambar 9**.



**Gambar 9.** Kurva Tegangan-Regangan

Geometri penampang melintang jembatan dimodelkan seluruhnya dengan *Boundary Condition* pada tumpuan dianalisis sebagai struktur yang ditopang sederhana. Pembebanan dengan beban 1 kip ditempatkan pada setiap ujung penampang vertikal. Asumsi pemodelan dapat seperti terlihat pada **Gambar 10**.

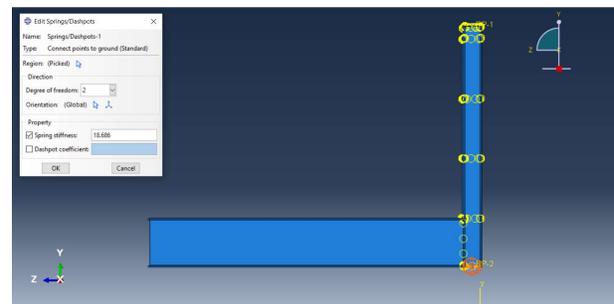


**Gambar 10.** *Boundary Condition* dan Input Pembebanan

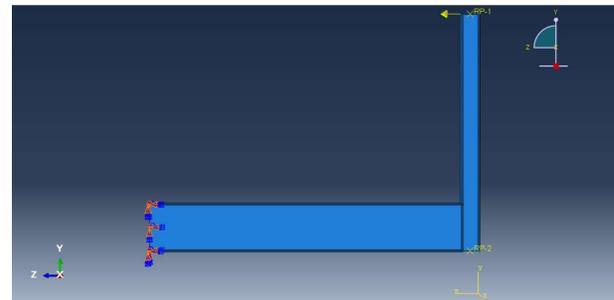
### C. Pemodelan Numerik 3D Solid

Elemen padat dengan delapan node digunakan untuk metode kedua spesimen penyusun dari penampang melintang jembatan. Tujuan digunakannya metode kedua adalah dapat memodelkan elemen penampang jembatan secara nyata dengan metode elemen hingga 3D Solid. *Input* dan *assign section property* material pada Abaqus sesuai dengan kurva

tegangan regangan seperti terlihat pada **Gambar 9**. Pemodelan geometri penampang melintang jembatan diasumsikan jepit pada tengah gelagar melintang. Pembebanan dengan beban 1 kip ditempatkan pada ujung penampang vertikal. *Interaction* atau hubungan antar elemen struktur batang vertikal dengan balok lantai menggunakan asumsi las penuh pada abaqus dimodelkan dengan *Tie Constraint*. *Boundary Condition* pada tengah gelagar melintang dianalisis sebagai jepit (*Encastre*) sedangkan pada tumpuan batang vertikal dimodelkan nilai spring vertikal hasil dari pemodelan jembatan pada SAP2000 sebesar 18,686 kip/in. Asumsi pemodelan seperti terlihat pada **Gambar 11** dan **Gambar 12**.



**Gambar 11.** Pemodelan nilai spring vertikal pada Abaqus



**Gambar 12.** *Boundary Condition* dan Input Pembebanan

## 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil berupa nilai kekakuan elastik lateral dari pemodelan kedua metode yaitu 2D wire dan 3D solid pada Abaqus yang hasil nilai tersebut akan dibandingkan dengan perhitungan analitik dan studi terdahulu penelitian dari Matthies [6]. Dari kedua model tersebut akan dibandingkan selisih perbandingan hasil kekakuan elastik lateralnya.

### A. Validasi Model Numerik 2D Wire

Dari hasil analisis numerik dengan program bantu Abaqus didapatkan hasil berupa perpindahan arah lateral yang terjadi di ujung balok. Beban menyebabkan perpindahan sebesar 0,154619 in seperti terlihat pada **Gambar 13** yang dapat digunakan untuk mencari kekakuan elastik lateral dengan

mengambil beban dibagi dengan pemindahan. Menggunakan hasil dari perpindahan ujung batang vertikal untuk menghitung kekakuan, nilai dari  $C = 1 / 0,154619 = 6,4675$  kip/in.



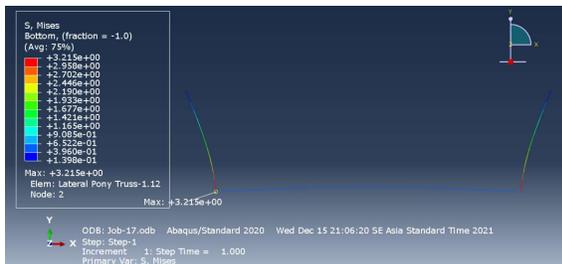
**Gambar 13.** Perpindahan akibat beban pada ujung batang vertikal 2D Wire Abaqus

Seperti terlihat pada **Tabel 2** menunjukkan hasil kekakuan elastik lateral dari Analitikal, Studi terdahulu dan Abaqus. Terlihat bahwa selisih perbandingan nilai  $C$ , antara hasil studi terdahulu Matthes [6] dengan pemodelan Abaqus sebesar 1,677% sedangkan selisih perbandingan analitikal dengan pemodelan Abaqus sebesar 2,179%.

**Tabel 2.** Hasil nilai dari kekakuan elastik lateral untuk model 2D Wire

Kekakuan Elastik Lateral, $C$ (Kip/in) Analitikal	Kekakuan Elastik Lateral, $C$ (Kip/in) Matthes	Kekakuan Elastik Lateral, $C$ (Kip/in) Abaqus
6,612	6,576	<b>6,4675</b>

Distribusi Tegangan Von Mises Model 2D Wire, terlihat pada gambar 14 distribusi tegangan Von Mises terbesar pada sambungan antara batang vertikal dengan balok lantai.

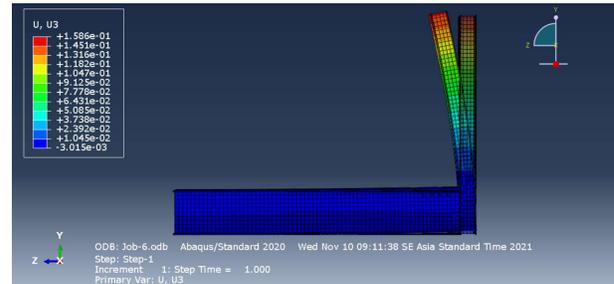


**Gambar 14.** Plot kontur tegangan Von Mises model 2D Wire

**B. Validasi Model Numerik 3D Solid**

Dari hasil analisis numerik dengan program bantu Abaqus didapatkan hasil berupa perpindahan arah lateral yang terjadi

di ujung balok. Beban menyebabkan perpindahan sebesar 0,151193 in seperti terlihat pada **Gambar 14** yang dapat digunakan untuk mencari kekakuan elastik lateral dengan mengambil beban dibagi dengan pemindahan. Menggunakan hasil dari perpindahan ujung batang vertikal untuk menghitung kekakuan, nilai dari  $C = 1 / 0,151193 = 6,614$  kip/in.



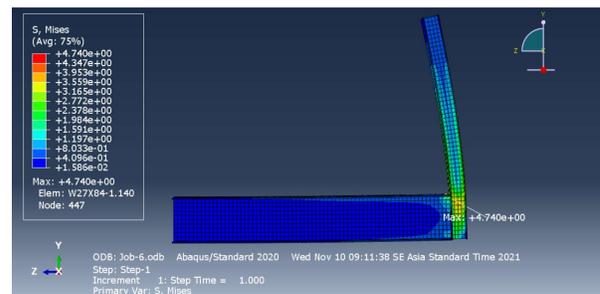
**Gambar 15.** Perpindahan akibat beban pada ujung batang vertikal 3D solid Abaqus

Seperti terlihat pada **Tabel 3** menunjukkan hasil kekakuan elastik lateral dari Analitikal, Studi terdahulu dan Abaqus. Terlihat bahwa selisih perbandingan nilai  $C$ , antara hasil studi terdahulu Matthes [6] dengan pemodelan Abaqus sebesar 0,575% sedangkan selisih perbandingan analitikal dengan pemodelan Abaqus sebesar 0,030%.

**Tabel 3.** Hasil nilai dari kekakuan elastik lateral untuk model 3D Solid

Kekakuan Elastik Lateral, $C$ (Kip/in) Analitikal	Kekakuan Elastik Lateral, $C$ (Kip/in) Matthes	Kekakuan Elastik Lateral, $C$ (Kip/in) Abaqus
6,612	6,576	<b>6,614</b>

Distribusi Tegangan Von Mises Model 3D Solid, terlihat pada gambar 16 distribusi tegangan Von Mises terbesar pada sambungan antara batang vertikal dengan balok lantai.



**Gambar 16.** Plot kontur tegangan Von Mises model modifikasi 3D solid

### C. Interpretasi Hasil Analisis

Hasil perbandingan dua metode pemodelan numerik Abaqus 2D Wire dengan 3D Solid memiliki selisih perbedaan hasil kekakuan elastik lateral sebesar 2,265% seperti terlihat pada **Tabel 4**.

**Tabel 4.** Rekapitulasi Hasil Perbandingan Model Numerik

Metode Pemodelan	Kekakuan Elastik Lateral, C (Kip/in) Analitikal	Kekakuan Elastik Lateral, C (Kip/in) Matthes	Kekakuan Elastik Lateral, C (Kip/in) Abaqus
<b>2D Wire</b>	6,612	6,576	<b>6,4675</b>
<b>3D Solid</b>	6,612	6,576	<b>6,614</b>

### 4. Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Selisih perbandingan hasil kekakuan elastik lateral numerik Abaqus model 2D Wire sebesar 6,4675 kip/in antara perhitungan analitikal sebesar 6,612 kip/in memiliki hasil yang lebih kecil sebesar 2,179%, sedangkan terhadap penelitian Matthes sebesar 6,576 kip/in memiliki hasil lebih kecil sebesar 1,677%.
- 2) Selisih perbandingan hasil kekakuan elastik lateral numerik Abaqus model 3D Solid sebesar 6,614 kip/in antara perhitungan analitikal sebesar 6,612 kip/in memiliki hasil yang lebih kecil sebesar 0,575%, sedangkan terhadap penelitian Matthes sebesar 6,576 kip/in memiliki hasil lebih kecil sebesar 0,030%.
- 3) Selisih perbandingan hasil kekakuan elastik lateral antara dua metode numerik Abaqus yaitu 2D Wire sebesar 6,4675 kip/in antara 3D Solid sebesar 6,614 kip/in memiliki hasil yang lebih kecil sebesar 2,265%. Hasil kekakuan elastik lateral Abaqus 3D solid memiliki selisih perbandingan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan 2D Wire.

- 4) Model modifikasi numerik 3D Solid selanjutnya akan digunakan sebagai acuan pemodelan pada penelitian lanjutan yaitu modifikasi penampang jembatan terbuka yang memudahkan aksesibilitas pengguna.

### Daftar Pustaka

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 8th edition, 8 ed.*, Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
- [2] P. Csagoly and B. Bakht, "Lateral Buckling of Pony Truss Bridges," Ontario Ministry of Transportation and Communications, Research Rept. 199., Ontario, 1975.
- [3] W. Lin and T. Yoda, "Truss Bridges," in *Bridge Engineering*, Matthew Deans, 2017, pp. 137-153.
- [4] Q.-J. Wen. and Z.-X. Yue, "Elastic buckling property of the upper chords in aluminum half-through truss bridges" *Structures*, vol. 27, no. 27, pp. 1919-2929, 2020.
- [5] S. M. R. Horne, "The Elastic Lateral Stability of Trusses," *The Structural Engineer*, pp. 147-155, 1960.
- [6] D. Matthes, "Lateral Buckling Analysis of a Steel Pony Truss," Iowa State University of Science and Technology, Ames, IA, 2012.
- [7] F. Bleich, *Buckling Strength of Metal Structures*, New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1952.
- [8] R. D. Ziemian, *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*, 6th ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.
- [9] T. V. Galambos and A. E. Surovek, *Structural Stability of Steel: Concepts and Applications for Structural Engineers*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [10] American Institute of Steel Construction, *Specification for Structural Steel Buildings*, 2016 ed., Chicago: American National Standards Institute, 2016.