KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

ANALISIS DISTRIBUSI TEGANGAN PADA SAMBUNGAN PIPA *HIGH PRESSURE* AKIBAT PENAMBAHAN *STIFFENER* MENGGUNAKAN *ANSYS*

Ridho Ogarbel Putera[1], Waskito[2], Delima Yanti Sari[3], Wanda Afnison[4]
Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang[1,2,3,4]
e-mail: ridho.ogarbelputera24@gmail.com[1,2,3,4]

Diterima: *4/11/2026*; Direvisi: *11/11/2026*; Diterbitkan: *15/11/2026*

ABSTRAK

Sambungan flange pada sistem perpipaan bertekanan tinggi rentan mengalami konsentrasi tegangan akibat diskontinuitas geometri yang dapat memengaruhi integritas struktural. Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi tegangan serta mengevaluasi pengaruh variasi jumlah dan ketebalan *stiffener plate* terhadap tegangan Von Mises, faktor konsentrasi tegangan (SCF), dan deformasi pada *weld neck flange* ASME B16.5 Class 900 NPS 6 berbahan ASTM A105. Penelitian menggunakan metode elemen hingga melalui ANSYS Workbench modul *Static Structural* dengan tekanan internal 15,3 MPa dan prategangan baut sebesar 50% tegangan luluh baut. Enam konfigurasi dianalisis, meliputi satu model tanpa penguatan dan lima variasi *stiffener*. Hasil simulasi menunjukkan penurunan tegangan maksimum sebesar 9,31–15,87% dan deformasi sebesar 22,24–25,60% dibandingkan konfigurasi tanpa penguatan. Konfigurasi delapan *stiffener* setebal 12 mm menghasilkan tegangan maksimum terendah sebesar 202,47 MPa, sedangkan konfigurasi dua belas *stiffener* setebal 4 mm menghasilkan indeks efisiensi penguatan tertinggi. Namun, hasil studi konvergensi *mesh* menunjukkan bahwa kestabilan numerik belum terpenuhi secara konsisten. Oleh karena itu, hasil perbandingan konfigurasi masih bersifat sementara dan memerlukan pengujian numerik lanjutan.

Kata Kunci: *Tegangan Von Mises, Sambungan Flange, Stiffener Plate, Metode Elemen Hingga, ANSYS*

ABSTRACT

High-pressure piping flange connections are susceptible to stress concentration due to geometric discontinuities, which may affect structural integrity. This study aims to analyze stress distribution and evaluate the effects of variations in the number and thickness of stiffener plates on Von Mises stress, stress concentration factor (SCF), and deformation in an ASME B16.5 Class 900 NPS 6 weld neck flange made of ASTM A105 steel. The study employed the finite element method using the Static Structural module in ANSYS Workbench, with an internal pressure of 15.3 MPa and a bolt pretension of 50% of the bolt yield strength. Six configurations were analyzed, consisting of one unreinforced model and five stiffener variations. The simulation results showed reductions in maximum stress of 9.31–15.87% and deformation of 22.24–25.60% compared with the unreinforced configuration. The configuration with eight 12-mm-thick stiffeners produced the lowest maximum stress of 202.47 MPa, whereas the configuration with twelve 4-mm-thick stiffeners achieved the highest reinforcement efficiency index. However, the mesh convergence study indicated that numerical stability had not been consistently achieved. Therefore, comparisons among configurations remain preliminary and require further numerical investigation.

Keywords: *Von Mises Stress, Flange Joint, Stiffener Plate, Finite Element Method, ANSYS*

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

PENDAHULUAN

Sistem perpipaan merupakan komponen vital pada industri minyak dan gas, petrokimia, serta pembangkit listrik karena berfungsi menyalurkan fluida pada tekanan dan temperatur yang sering kali tinggi. Pada kondisi high pressure, integritas struktural setiap komponen menentukan keselamatan operasi, sebab kegagalan dapat berujung pada korban jiwa, kerusakan aset, dan pencemaran lingkungan (Nelson et al., 2023; Oh et al., 2022). Di antara komponen sistem perpipaan, sambungan flange merupakan titik kritis karena bersifat dapat dibongkar-pasang sehingga mengandung diskontinuitas geometri yang memicu konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, analisis terhadap distribusi tegangan pada sambungan flange diperlukan untuk memahami respons strukturalnya ketika menerima beban selama kondisi operasi.

Sambungan flange menerima beban majemuk berupa tekanan internal, prategangan baut, dan beban eksternal, sehingga distribusi tegangannya bersifat tiga dimensi dan tidak seragam. Standar B16.5 dari American Society of Mechanical Engineers (ASME, 2017) menetapkan dimensi dan peringkat tekanan (pressure class) flange. Namun, Bouzid et al. (2024) menunjukkan melalui model analitis yang divalidasi dengan simulasi elemen hingga pada weld neck flange SA105 Class 900 bahwa peringkat tekanan saja tidak menggambarkan tegangan yang sesungguhnya dialami flange, dan bahwa prategangan baut memengaruhi rotasi flange serta tegangan pada komponen sambungan. Dai et al. (2023) melaporkan bahwa puncak tegangan pada dinding tabung terjadi di dekat flange dan kembali ke tegangan nominal pada jarak yang lebih jauh, sedangkan Si et al. (2024) menemukan bahwa tebal flange, jumlah baut, dan posisi baut memengaruhi perilaku sambungan flange tabung baja, dengan kegagalan berupa deformasi berlebih pelat flange atau luluhnya tabung.

Salah satu pendekatan untuk mengurangi konsentrasi tegangan pada area transisi pipa dan flange adalah penambahan *stiffener plate*. Elemen penguat ini secara teoritis dapat meningkatkan kekakuan lokal dan mengubah jalur penyaluran beban pada sambungan, sehingga berpotensi mengurangi tegangan pada bagian tertentu dari struktur. Konsentrasi tegangan dinyatakan melalui faktor konsentrasi tegangan (stress concentration factor, SCF), yaitu rasio tegangan lokal maksimum terhadap tegangan nominal (Sambo et al., 2023; Diao et al., 2024), dan telah dikaji antara lain pada sambungan las pipa dan tangki bertekanan internal (Lotsberg, 2008; Xia et al., 2024). Akan tetapi, modifikasi geometri dapat mengubah jalur aliran tegangan dan menimbulkan konsentrasi tegangan baru bila tidak dirancang dengan tepat. Metode elemen hingga lazim digunakan untuk menelaah hal tersebut karena mampu memodelkan geometri tiga dimensi dan kontak antarkomponen, termasuk untuk studi parametrik sambungan flange berbaut dengan ANSYS (Anuj et al., 2022; Khan & Ahmed, 2023; Elkhlaidy et al., 2023; Xie et al., 2024; Mitsyuk & Mitsyuk, 2025; Lee et al., 2024).

Meskipun penelitian mengenai integritas struktural sambungan flange telah banyak dilakukan, kajian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh kombinasi jumlah dan ketebalan *stiffener plate* segitiga radial pada leher *weld neck flange* untuk aplikasi bertekanan tinggi masih perlu dikembangkan. Penelitian ini berfokus pada analisis parametrik enam konfigurasi, yaitu satu model tanpa penguatan dan lima variasi *stiffener*, menggunakan ANSYS *Workbench*. Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi parametrik kombinasi jumlah dan ketebalan *stiffener plate* segitiga radial pada leher *weld neck flange*, dengan mempertimbangkan respons tegangan, deformasi, kebutuhan relatif material penguat, serta sensitivitas hasil simulasi terhadap ukuran mesh. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan tegangan Von Mises maksimum pada konfigurasi tanpa penguatan, menganalisis pengaruh variasi jumlah dan ketebalan stiffener terhadap tegangan dan deformasi, serta mengevaluasi konfigurasi penguatan berdasarkan kinerja struktural dan efisiensi penggunaan material.

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian numerik-komputasional berpendekatan kuantitatif-deskriptif dengan desain parametrik. Penelitian dilaksanakan selama empat bulan di Laboratorium Komputasi dan Simulasi, Departemen Teknik Mesin, Universitas Negeri Padang. Simulasi memakai ANSYS Workbench 2026 R1 modul *Static Structural*. Model tiga dimensi dibuat dengan SolidWorks 2025 berdasarkan dimensi hasil pengukuran lapangan di PT PA3 dan mengacu pada *weld neck flange* ASME B16.5 Class 900 NPS 6 (ASME, 2017). Parameter geometri, material, variasi, dan pembebanan dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Model, Variasi Stiffener, dan Pembebanan

Parameter	Nilai / Spesifikasi
Jenis flange	Weld neck flange, ASME B16.5 Class 900, NPS 6
Dimensi pipa	OD 168,3 mm; tebal dinding 10,97 mm
Dimensi flange	OD 381 mm; tebal 45 mm; 8 baut stud M30
Material flange, pipa, stiffener	ASTM A105 (E = 200 GPa; ν = 0,3; σ_y = 250 MPa)
Material baut	ASTM A193 B7 (E = 200 GPa; σ_y = 723 MPa)
Tekanan internal	15,3 MPa (153 bar), Class 900 pada 38 °C
Prategangan baut	361,5 MPa (50% σ_y baut)
Variasi stiffener (jumlah × tebal)	V1: 4 × 20 mm; V2: 6 × 16 mm; V3: 8 × 12 mm; V4: 10 × 8 mm; V5: 12 × 4 mm

Parameter pada Tabel 1 menjadi dasar penyusunan model numerik untuk mengevaluasi respons struktural sambungan flange terhadap penambahan elemen penguat. Keseragaman material pada komponen utama diperlukan agar perbedaan respons yang diperoleh dapat lebih difokuskan pada perubahan konfigurasi geometri. Kombinasi pembebanan diterapkan untuk merepresentasikan kondisi kerja sambungan berbaut, sehingga pengaruh tekanan internal dan gaya pengencangan baut dapat diperhitungkan secara bersamaan. Sementara itu, variasi dimensi penguat dirancang untuk mengamati bagaimana perubahan distribusi elemen penguat memengaruhi kekakuan dan konsentrasi tegangan pada struktur.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah konfigurasi *stiffener plate* yang mencakup kombinasi jumlah dan ketebalan pelat segitiga yang dipasang secara radial dan simetris pada leher *flange*. Kedua parameter tersebut divariasikan secara bersamaan dalam lima konfigurasi (V1–V5), selain model *baseline* tanpa penguatan. Dengan rancangan ini, analisis difokuskan pada pengaruh kombinasi jumlah dan ketebalan penguat, sehingga pengaruh independen masing-masing parameter belum dapat ditentukan. Variabel terikat meliputi tegangan Von Mises maksimum ($\sigma_{VM,maks}$), faktor konsentrasi tegangan (SCF), dan deformasi total maksimum (δ_{maks}).

Seluruh parameter lain dijaga tetap agar perbedaan hasil hanya berasal dari *stiffener*. Kondisi batas diterapkan dengan memberikan tumpuan tetap (*fixed support*) pada salah satu ujung pipa, sedangkan ujung lainnya menggunakan *frictionless support*. Bidang potong model diberikan kondisi simetri sesuai dengan representasi geometri yang digunakan. *Gasket* dimodelkan menggunakan elemen kontak untuk merepresentasikan interaksi antara permukaan flange dan *gasket*. Pemodelan kontak serta hubungan antarkomponen disesuaikan dengan kondisi sambungan yang dianalisis dengan mengacu pada pendekatan pemodelan sambungan flange berbaut yang digunakan dalam penelitian terdahulu (Anuj et al., 2022; Khan & Ahmed, 2023).

Ukuran *mesh* ditentukan melalui studi konvergensi dengan menguji ukuran elemen dari 10 hingga 5 mm. Evaluasi dilakukan berdasarkan perubahan tegangan Von Mises maksimum ($\sigma_{VM,maks}$) antartingkat diskretisasi dengan batas perubahan sebesar 5% (Kikale et al., 2024;

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

Zhang et al., 2025). Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi sensitivitas tegangan terhadap ukuran elemen. Karena perubahan tegangan pada beberapa tingkat diskretisasi masih melampaui batas yang ditetapkan, kestabilan numerik model belum dapat dinyatakan tercapai. Oleh karena itu, hasil simulasi pada penelitian ini diperlakukan sebagai hasil numerik sementara dan memerlukan pengujian konvergensi lanjutan. Tegangan nominal diambil sebagai tegangan lingkar pada dinding dalam pipa menurut solusi Lamé:

$$\sigma_{nominal} = P\,(r_o^2 + r_i^2) / (r_o^2 - r_i^2) \quad (1)$$

dengan P adalah tekanan internal, serta r_o dan r_i berturut-turut jari-jari luar dan dalam pipa. Indikator kinerja dihitung dengan persamaan berikut.

$$SCF = \sigma_{VM,maks} / \sigma_{nominal} \quad (2)$$

$$SF = \sigma_y / \sigma_{VM,maks} \quad (3)$$

$$\text{Reduksi (\%)} = (\sigma_{VM,baseline} - \sigma_{VM,variasi}) / \sigma_{VM,baseline} \times 100\% \quad (4)$$

$$\eta = (\sigma_{VM,baseline} - \sigma_{VM,variasi}) / \Sigma t,\ \ \Sigma t = n \times t \quad (5)$$

dengan SF adalah faktor keamanan terhadap luluh pada analisis linear elastik, σ_y tegangan luluh material, η efisiensi material (MPa/mm), Σt total ketebalan *stiffener*, n jumlah, dan t tebal *stiffener*. Indeks efisiensi penguatan (η) digunakan untuk membandingkan besarnya reduksi tegangan terhadap total ketebalan nominal *stiffener* (Σt). Nilai Σt digunakan sebagai indikator relatif jumlah material dengan asumsi bahwa tinggi dan lebar pelat segitiga pada seluruh konfigurasi adalah sama. Oleh karena itu, η menunjukkan efisiensi relatif berdasarkan parameter geometri tersebut, bukan pengukuran langsung terhadap volume atau massa material.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Konvergensi *Mesh* dan Verifikasi Model

Keandalan hasil simulasi perlu diperiksa melalui studi konvergensi *mesh* untuk mengetahui sensitivitas tegangan maksimum terhadap tingkat diskretisasi model. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan respons tegangan pada beberapa tingkat kerapatan *mesh* menggunakan kriteria perubahan maksimum 5% antartingkat berturut-turut. Hasil pengujian konvergensi *mesh* disajikan pada Tabel 2 sebagai dasar penentuan ukuran elemen yang digunakan dalam analisis seluruh konfigurasi. Pemeriksaan ini penting untuk memastikan bahwa perbandingan respons struktural antarvariasi tidak semata-mata dipengaruhi oleh perbedaan pengaturan *mesh*.

Tabel 2. Hasil Studi Konvergensi *Mesh* pada Model Variasi

Ukuran *mesh* (mm)	Jumlah elemen	$\sigma_{VM,maks}$ (MPa)	Perubahan (%)	Kriteria ≤ 5%
10	31.036	212,50	–	–
9	33.112	206,21	−2,96	Ya
8	36.048	224,17	+8,71	Tidak
7	41.554	214,10	−4,49	Ya
6	53.972	221,18	+3,31	Ya
5	63.184	182,93	−17,29	Tidak

Hasil studi konvergensi pada Tabel 2 menunjukkan bahwa perubahan tegangan Von Mises maksimum belum memenuhi kriteria konvergensi secara konsisten pada seluruh tingkat diskretisasi. Perubahan terbesar terjadi pada ukuran mesh 5 mm, yaitu sebesar 17,29% dibandingkan ukuran 6 mm, sedangkan perubahan pada ukuran 8 mm mencapai 8,71%. Fluktuasi tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan maksimum masih sensitif terhadap perubahan ukuran elemen. Dengan demikian, ukuran mesh yang diuji belum dapat memberikan

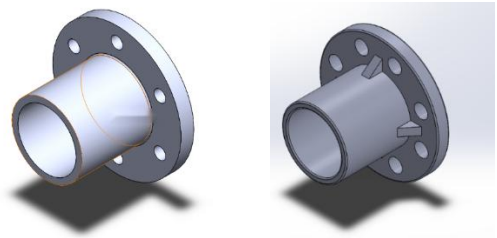
Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

bukti kestabilan numerik yang memadai, sehingga hasil perbandingan antarvariasi perlu ditafsirkan sebagai hasil sementara. Pengujian konvergensi lanjutan dengan penghalusan mesh lokal pada daerah konsentrasi tegangan diperlukan untuk memastikan kestabilan hasil.

Hasil Simulasi Baseline dan Variasi Stiffener

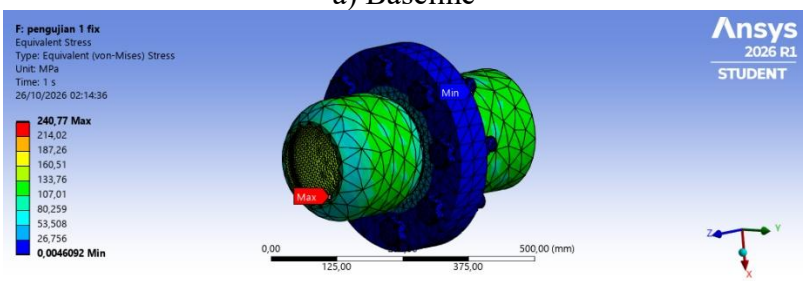
Model tiga dimensi yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Gambar 1 untuk memperlihatkan perbedaan geometri antara konfigurasi tanpa penguatan dan konfigurasi yang menggunakan stiffener plate. Pemodelan dilakukan dengan mempertahankan geometri utama sambungan flange agar perubahan respons struktural dapat dikaitkan dengan penambahan elemen penguat. Penempatan pelat penguat dilakukan secara radial dan simetris pada bagian leher flange. Perbedaan susunan geometri tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi pengaruh konfigurasi penguatan terhadap distribusi tegangan pada sambungan.



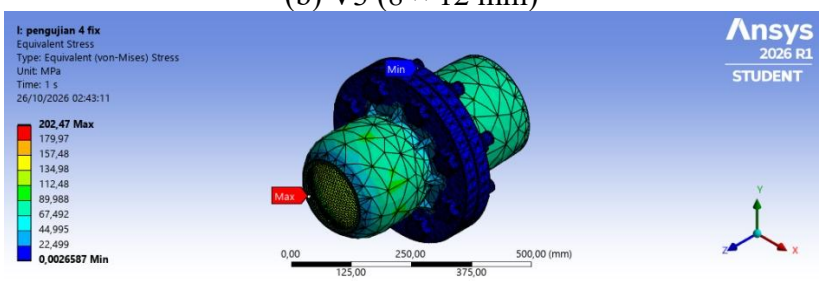
Gambar 1. Model 3D Flange: (a) Tanpa Stiffener dan (b) Dengan Stiffener Plate (Contoh Konfigurasi)

Pada konfigurasi baseline, tegangan Von Mises maksimum mendekati tegangan luluh ASTM A105 dengan faktor keamanan hanya sedikit di atas satu (Tabel 3). Kondisi ini menunjukkan bahwa sambungan tanpa penguatan memiliki margin keamanan yang relatif rendah terhadap kondisi luluh material. Untuk mengetahui lokasi terjadinya konsentrasi tegangan, distribusi tegangan pada konfigurasi baseline dibandingkan dengan konfigurasi V3. Perbandingan kontur tegangan kedua konfigurasi tersebut ditampilkan pada Gambar 2.

a) Baseline



(b) V3 (8 × 12 mm)



Gambar 2. Kontur Tegangan Von Mises (MPa): (a) Baseline dan (b) V3

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

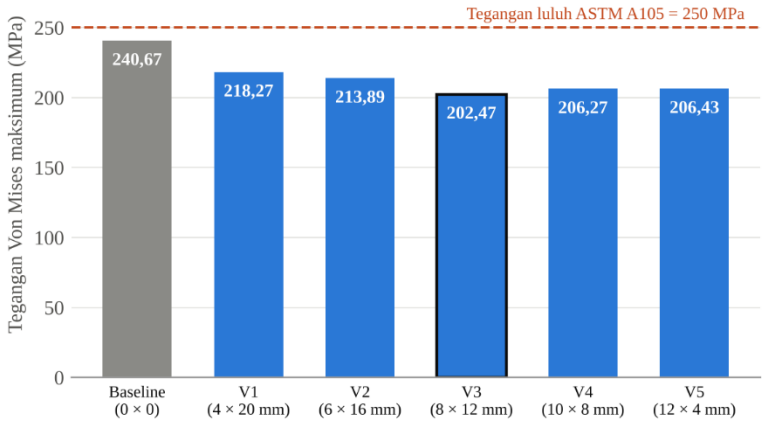
KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

Pola kontur pada Gambar 2 menunjukkan bahwa distribusi tegangan tidak merata pada seluruh bagian sambungan. Daerah dengan intensitas tegangan tertinggi terlihat berada di sekitar ujung pipa yang berdekatan dengan tumpuan tetap. Lokasi tersebut menunjukkan bahwa kondisi penumpuan berpotensi memengaruhi nilai tegangan maksimum global yang diperoleh dari simulasi. Oleh karena itu, interpretasi pengaruh stiffener perlu mempertimbangkan kemungkinan kontribusi kondisi batas terhadap tegangan maksimum, terutama ketika mengevaluasi konsentrasi tegangan pada daerah leher flange. Perbandingan nilai tegangan Von Mises maksimum, SCF, dan SF pada setiap konfigurasi disajikan dalam Tabel 3 sebagai dasar untuk mengidentifikasi efektivitas masing-masing variasi penguatan.

Tabel 3. Tegangan Von Mises Maksimum, Reduksi, SCF, dan Faktor Keamanan

Konfigurasi	Jumlah × tebal (mm)	$\sigma_{VM,maks}$ (MPa)	Reduksi (%)	SCF	SF
Baseline	0 × 0	240,67	–	2,18	1,04
V1	4 × 20	218,27	9,31	1,98	1,15
V2	6 × 16	213,89	11,13	1,94	1,17
V3	8 × 12	202,47	15,87	1,84	1,23
V4	10 × 8	206,27	14,29	1,87	1,21
V5	12 × 4	206,43	14,23	1,87	1,21

Hasil pada Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh konfigurasi penguatan menghasilkan tegangan maksimum yang lebih rendah dibandingkan model *baseline*. Respons tersebut memperlihatkan bahwa efektivitas penguatan tidak hanya ditentukan oleh jumlah pelat, tetapi juga oleh kombinasi jumlah dan ketebalannya. Konfigurasi V3 menghasilkan tegangan maksimum terendah, sedangkan V4 dan V5 memperlihatkan nilai yang relatif berdekatan. Meskipun demikian, perbedaan tegangan antarvariasi perlu ditafsirkan secara hati-hati karena kestabilan numerik model belum sepenuhnya terpenuhi. Untuk memperjelas perbedaan respons tegangan maksimum antarkonfigurasi, hasil simulasi pada Tabel 3 disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Tegangan Von Mises Maksimum Pada Setiap Konfigurasi

Visualisasi pada Gambar 3 menunjukkan bahwa setiap konfigurasi penguatan menghasilkan respons tegangan yang berbeda, dengan kecenderungan penurunan hingga konfigurasi tertentu sebelum kembali mengalami perubahan. Pola tersebut mengindikasikan bahwa penambahan jumlah pelat tidak selalu meningkatkan efektivitas distribusi beban, sehingga pemilihan konfigurasi perlu mempertimbangkan keseimbangan antara pengurangan

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

tegangan dan penggunaan material. Untuk memperjelas efektivitas masing-masing konfigurasi, evaluasi juga dilakukan berdasarkan deformasi total sebagai indikator kekakuan sambungan dan efisiensi penggunaan material. Hasil perbandingan kedua parameter tersebut disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Deformasi Total dan Indeks Efisiensi Penguatan

Konfigurasi	Σt (mm)	δ_{maks} (mm)	Reduksi deformasi (%)	η (MPa/mm)
Baseline	–	0,055292	–	–
V1	80	0,042997	22,24	0,280
V2	96	0,041332	25,25	0,279
V3	96	0,041430	25,07	0,398
V4	80	0,041390	25,14	0,430
V5	48	0,041140	25,60	0,713

Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa perubahan deformasi dan indeks efisiensi penguatan memiliki kecenderungan yang berbeda. Penurunan deformasi relatif besar terjadi setelah penambahan penguatan awal, sedangkan perubahan pada konfigurasi berikutnya cenderung lebih kecil. Sementara itu, indeks efisiensi penguatan menunjukkan bahwa konfigurasi dengan total ketebalan lebih rendah dapat menghasilkan reduksi tegangan relatif lebih besar terhadap kebutuhan ketebalan penguat. Temuan ini memperlihatkan adanya pertukaran antara pengurangan tegangan dan kebutuhan relatif material, meskipun perbandingan tersebut masih bergantung pada kestabilan hasil simulasi.

Pembahasan

Verifikasi Model dan Ketidakpastian Numerik

Dengan rasio diameter terhadap tebal sekitar 15, pipa tergolong berdinding tebal sehingga solusi Lamé lebih tepat daripada teori dinding tipis. Kesesuaian tegangan lingkar hasil simulasi dengan solusi Lamé menunjukkan bahwa respons tegangan pada bagian pipa lurus yang dievaluasi telah mendekati solusi analitis. Namun, pemeriksaan tersebut belum membuktikan ketepatan seluruh kondisi batas dan pemodelan kontak pada sambungan flange. Verifikasi ini juga tidak secara langsung menguji ketelitian tegangan pada daerah transisi geometri yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan. Hal tersebut perlu diperhatikan karena hasil studi konvergensi masih memperlihatkan sensitivitas tegangan maksimum terhadap perubahan diskretisasi lokal (Kikale et al., 2024; Zhang et al., 2025).

Hasil studi konvergensi menunjukkan bahwa tegangan maksimum masih mengalami perubahan yang cukup besar pada beberapa tingkat diskretisasi. Oleh karena itu, ketidakpastian numerik belum dapat ditentukan secara memadai hanya berdasarkan hasil pengujian pada satu konfigurasi. Perbedaan tegangan antarvariasi, khususnya antara V3, V4, dan V5, perlu ditafsirkan secara hati-hati karena selisih nilainya relatif kecil. Untuk memperoleh perbandingan yang lebih meyakinkan, diperlukan pengujian konvergensi pada setiap konfigurasi dengan pengaturan mesh dan kondisi pembebanan yang konsisten.

Pengaruh Penambahan Stiffener Terhadap Tegangan

Penurunan $\sigma_{VM,maks}$ pada seluruh variasi (Tabel 3 dan Gambar 3) menunjukkan bahwa penambahan penguat memengaruhi respons tegangan maksimum struktur secara keseluruhan. Secara mekanis, *stiffener* berpotensi meningkatkan kekakuan lentur lokal pada leher flange dan

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

mengubah jalur penyaluran beban dari *hub* menuju badan flange serta dinding pipa. Namun, karena lokasi tegangan maksimum global berada di sekitar ujung pipa dekat tumpuan tetap, penurunan tersebut belum dapat secara langsung diartikan sebagai pengurangan konsentrasi tegangan pada daerah leher flange. Evaluasi lebih lanjut terhadap tegangan lokal pada area transisi diperlukan untuk memastikan efektivitas penguatan pada lokasi yang menjadi sasaran desain.

Temuan bahwa flange Class 900 dapat mencapai tegangan mendekati luluh pada tekanan peringkatnya konsisten dengan kesimpulan Bouzid et al. (2024) bahwa peringkat tekanan saja tidak mencerminkan tegangan aktual pada flange SA105 dan bahwa kondisi pemasangan baut turut menentukan tegangan (Khan & Ahmed, 2023; Elkhlaidy et al., 2023). Hal ini mendukung perlunya evaluasi numerik, bukan hanya mengandalkan peringkat standar (ASME, 2017). Adapun nilai SCF acuan Lotsberg (2008) berasal dari sambungan las pipa dan tangki, sehingga kesesuaiannya dengan SCF *baseline* penelitian ini hanya menunjukkan orde besaran yang sama dan bukan validasi kuantitatif untuk *weld neck flange*. Dengan demikian, interpretasi nilai tegangan dan SCF perlu didasarkan pada karakteristik geometri serta kondisi pembebanan sambungan yang dianalisis.

Lokasi puncak tegangan perlu dicermati dalam menafsirkan hasil. Dai et al. (2023) menunjukkan bahwa puncak tegangan pada dinding tabung berada di dekat flange dan kembali ke tegangan nominal pada jarak yang lebih jauh dari sambungan. Pada penelitian ini kontur memperlihatkan puncak di ujung pipa dekat tumpuan tetap, bukan pada leher flange, yang mengindikasikan bahwa pada panjang pipa dan kondisi batas yang dipakai, efek tumpuan kemungkinan memengaruhi tegangan maksimum global (Zheng et al., 2024; Yang et al., 2025). Penurunan tegangan akibat *stiffener* di sini karena itu lebih tepat dipahami sebagai pengaruh *stiffener* terhadap respons struktur secara keseluruhan, sedangkan peredaman *hot spot* pada *hub* memerlukan pembacaan tegangan lokal pada area tersebut.

Pengaruh Jumlah dan Ketebalan Stiffener

Hubungan antara konfigurasi *stiffener* dan tegangan maksimum tidak monoton. Tegangan turun dari V1 ke V3 seiring bertambahnya jumlah *stiffener* meskipun pelat semakin tipis, kemudian naik sedikit pada V4 dan V5. Selisih V4 dan V5 hanya 0,08% sehingga keduanya dapat dianggap setara. Karena jumlah dan tebal berubah bersamaan, pengaruh keduanya dipisahkan dengan membandingkan konfigurasi yang memiliki Σt sama. V3 menghasilkan tegangan 5,34% lebih rendah daripada V2 (Σt sama), dan V4 menghasilkan tegangan 5,50% lebih rendah daripada V1 (Σt sama). Pada konfigurasi dengan total ketebalan nominal penguat yang sama, susunan *stiffener* yang lebih banyak dan lebih tipis menghasilkan tegangan maksimum yang lebih rendah dibandingkan susunan dengan jumlah pelat lebih sedikit dan ketebalan lebih besar. Hasil ini menunjukkan bahwa distribusi spasial penguat berpotensi memberikan pengaruh terhadap respons tegangan selain dimensi ketebalan masing-masing pelat.

Menambah jumlah dengan menipiskan pelat tidak dapat dilakukan tanpa batas. Pada V4 dan V5, Σt turun sehingga kontribusi kekakuan tiap pelat berkurang dan tegangan tidak lagi menurun. Dengan demikian terdapat titik optimum antara jumlah dan ketebalan yang pada penelitian ini berada di sekitar V3. Penyebab pasti naiknya tegangan pada V4 dan V5, misalnya munculnya konsentrasi tegangan baru di tepi pelat tipis, belum dapat dipastikan dan memerlukan pengamatan kontur lokal. Pandangan bahwa respons sambungan ditentukan oleh beberapa parameter geometri sekaligus sejalan dengan Si et al. (2024), yang menemukan bahwa

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

tebal *flange* dan jumlah baut sama-sama memengaruhi perilaku sambungan *flange* tabung baja (Xia et al., 2024; Diao et al., 2024).

Pengaruh Terhadap Deformasi Total

Penambahan *stiffener* pertama memberikan reduksi deformasi terbesar, sedangkan dari V2 hingga V5 deformasi hampir tidak berubah (selisih sekitar 0,7%). Hasil tersebut mengindikasikan bahwa penambahan jumlah stiffener setelah konfigurasi V2 memberikan tambahan pengurangan deformasi yang relatif kecil. Kondisi ini menunjukkan kecenderungan berkurangnya manfaat tambahan (*diminishing returns*) terhadap kekakuan global sambungan pada konfigurasi penguatan berikutnya. Perilaku ini berbeda dengan tegangan: deformasi terendah dicapai pada V5, sedangkan tegangan terendah pada V3.

Deformasi mencerminkan kekakuan global, sementara tegangan maksimum ditentukan oleh sebaran beban lokal, sehingga keduanya perlu ditinjau bersama dalam memilih desain. Besar deformasi yang hanya berorde seperseratus milimeter menunjukkan bahwa kriteria penentu pada penelitian ini adalah tegangan, bukan deformasi. Karena Bouzid et al. (2024) menunjukkan bahwa prategangan baut memengaruhi rotasi *flange*, kenaikan kekakuan akibat *stiffener* berpotensi memengaruhi kerapatan *gasket* (Xie et al., 2024; Xing et al., 2024). Pengaruh tersebut tidak dianalisis dan perlu dikaji pada penelitian lanjutan.

Efisiensi Material dan Konfigurasi Optimal

Berdasarkan hasil pada Tabel 4, konfigurasi V5 menghasilkan indeks efisiensi penguatan tertinggi, sedangkan V3 menghasilkan tegangan maksimum terendah. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya pertukaran antara pencapaian pengurangan tegangan dan kebutuhan relatif ketebalan penguat. V5 membutuhkan total ketebalan nominal sebesar 48 mm, lebih rendah dibandingkan V3 sebesar 96 mm, tetapi menghasilkan tegangan maksimum yang sedikit lebih tinggi. Meskipun demikian, keunggulan relatif V5 belum dapat dipastikan karena kestabilan numerik hasil simulasi masih memerlukan pengujian lebih lanjut.

Dengan mempertimbangkan hasil tersebut, V3 dapat dipandang sebagai konfigurasi dengan kinerja pengurangan tegangan terbaik berdasarkan hasil simulasi yang tersedia, sedangkan V5 menunjukkan potensi efisiensi penguatan berdasarkan indeks yang digunakan. Kedua konfigurasi belum dapat ditetapkan sebagai desain paling optimal karena evaluasi masih dibatasi oleh ketidakpastian numerik dan belum mencakup pertimbangan volume material aktual, fabrikasi, serta ketahanan lelah sambungan las. Oleh karena itu, pemilihan konfigurasi perlu mempertimbangkan kebutuhan kinerja struktural dan persyaratan penerapan praktis. Perbandingan lebih lanjut juga diperlukan untuk memastikan bahwa keunggulan numerik setiap konfigurasi tetap konsisten ketika parameter desain dan kondisi operasional diperluas.

Secara praktis, pilihan antara V3 dan V5 perlu mempertimbangkan fabrikasi. Dua belas pelat setipis 4 mm menambah jumlah pengelasan pada leher flange dan lebih rentan terhadap distorsi las serta tekuk lokal. Selain itu, pelat yang dilas pada leher flange menambah detail las yang perlu dikaji ketahanan lelahnya sebelum dipakai pada sistem dengan tekanan siklik. Hal-hal ini tidak dianalisis pada penelitian ini sehingga perlu dipertimbangkan secara terpisah sebelum diterapkan (Bozkurt & Nash, 2024; Świt & Szczecina, 2025; Kuscu & Singh, 2024).

Keterbatasan Penelitian

Hasil penelitian perlu diinterpretasikan dengan memperhatikan beberapa keterbatasan. Pertama, jumlah dan ketebalan *stiffener* divariasikan secara bersamaan sehingga pengaruh independen masing-masing parameter belum dapat dipisahkan. Kedua, total ketebalan penguat

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

(Σt) hanya digunakan sebagai indikator relatif dengan asumsi dimensi tinggi dan lebar pelat segitiga sama pada seluruh konfigurasi, bukan sebagai ukuran langsung volume atau massa material. Ketiga, analisis menggunakan pendekatan linear elastik dengan pembebanan tekanan internal dan prategangan baut, tanpa mempertimbangkan momen lentur, gaya aksial, beban termal, dan kelelahan. Keempat, setiap konfigurasi hanya dianalisis melalui satu model simulasi, sedangkan hasil konvergensi mesh belum menunjukkan kestabilan numerik secara konsisten. Kelima, tegangan maksimum global berada di sekitar ujung pipa dekat tumpuan tetap, sehingga nilainya berpotensi dipengaruhi oleh kondisi batas dan belum sepenuhnya merepresentasikan konsentrasi tegangan lokal pada leher flange.

KESIMPULAN

Penambahan *stiffener plate* segitiga radial pada model *weld neck flange* ASME B16.5 Class 900 NPS 6 menunjukkan potensi untuk menurunkan tegangan Von Mises maksimum dan deformasi total dibandingkan konfigurasi tanpa penguatan. Berdasarkan hasil simulasi, seluruh variasi menghasilkan penurunan tegangan maksimum sebesar 9,31–15,87% dan deformasi total sebesar 22,24–25,60%. Konfigurasi delapan *stiffener* dengan ketebalan 12 mm menghasilkan tegangan maksimum terendah sebesar 202,47 MPa, sedangkan konfigurasi dua belas *stiffener* dengan ketebalan 4 mm menghasilkan indeks efisiensi penguatan tertinggi sebesar 0,713 MPa/mm. Temuan ini menunjukkan bahwa penambahan penguat berpotensi memperbaiki respons struktural sambungan, meskipun kestabilan numeriknya masih perlu dikonfirmasi.

Pengaruh kombinasi jumlah dan ketebalan *stiffener* terhadap respons struktural menunjukkan pola yang tidak monoton. Pada konfigurasi dengan total ketebalan nominal penguat yang sama, penggunaan pelat yang lebih banyak dan lebih tipis menghasilkan tegangan maksimum yang lebih rendah dibandingkan penggunaan pelat yang lebih sedikit dan lebih tebal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa V3 memiliki kinerja pengurangan tegangan terbaik, sedangkan V5 menunjukkan indeks efisiensi penguatan tertinggi. Namun, penentuan konfigurasi yang paling optimal belum dapat dilakukan karena hasil konvergensi *mesh* belum menunjukkan kestabilan numerik secara konsisten.

Penelitian selanjutnya perlu memisahkan pengaruh jumlah dan ketebalan *stiffener* melalui rancangan variasi parameter yang lebih terkontrol. Pengujian konvergensi mesh pada setiap konfigurasi, evaluasi tegangan lokal pada daerah leher flange, serta validasi eksperimental diperlukan untuk meningkatkan keandalan hasil simulasi. Selain itu, pengaruh beban eksternal, temperatur, ketahanan lelah sambungan las, dan variasi geometri penguat perlu dipertimbangkan dalam pengembangan desain yang lebih optimal. Pengembangan tersebut diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi konfigurasi penguatan yang lebih akurat dan dapat dipertanggungjawabkan untuk penerapan pada sistem perpipaan bertekanan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

American Society of Mechanical Engineers. (2017). *Pipe flanges and flanged fittings: NPS ½ through NPS 24 metric/inch standard (ASME B16.5-2017).* ASME.

Anuj, P., Sangeetha, N., Ashraf, S. R., Vasanthkumar, R., & Babin, T. (2022). Investigation of sealing performance with bolted flange joints with gasket using FEA method. *International Journal of Vehicle Structures & Systems, 14*(7), 855–859. https://doi.org/10.4273/ijvss.14.7.05

Bozkurt, M., & Nash, D. (2024). Stress linearization application of oblique nozzles with welded pad reinforcement in cylindrical pressure vessels. *Proceedings of the Institution of*

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 238(5), 1642–1654. https://doi.org/10.1177/09544062231187726

Bouzid, A.-H., Bouzid, S., & Benfriha, K. (2024). On the strength and tightness of ASME B16.5 and B16.47 Series A standard flanges. *Journal of Pressure Vessel Technology, 146*(1), 011301. https://doi.org/10.1115/1.4063890

Dai, K., Du, H., Luo, Y., Han, R., & Li, J. (2023). Stress distribution prediction of circular hollow section tube in flexible high-neck flange joints based on the hybrid machine learning model. *Materials, 16*(20), 6815. https://doi.org/10.3390/ma16206815

Diao, Y., He, S., Wang, Y., & Tu, L. (2024). Experimental and numerical investigations on stress concentration factors of concrete filled steel tube X-joints. *Scientific Reports, 14*, 11415. https://doi.org/10.1038/s41598-024-62312-8

Elkhlaidy, M., Carnicero, A., & Perera, R. (2023). Influence of flange geometric configuration and bolt stress on joint integrity during assembly using FEA. *International Journal of Pressure Vessels and Piping, 202*, 104912. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104912

Khan, K. A., & Ahmed, I. (2023). Combined loading performance analysis of gasketed bolted flange joints with emphasis on bolt scattering. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences, 17*(3), 9564–9575. https://doi.org/10.15282/jmes.17.3.2023.3.0757

Kikale, S., Katkati, A., Kulkarni, A., Mache, A., Deshpande, A., & Shinde, S. (2024). Mesh convergence study on side bracket using hex-dominant and tetrahedron-dominant mesh. *International Journal of Vehicle Structures & Systems, 16*(6), 837–840. https://doi.org/10.4273/ijvss.16.6.05

Kuscu, K., & Singh, M. (2024). Evaluation of stresses in saddle (Q-lip) type nozzles with weaker material strength compared to the pressure vessel shell. In *Proceedings of the ASME 2024 Pressure Vessels & Piping Conference* (Paper No. PVP2024-122693). https://doi.org/10.1115/PVP2024-122693

Lee, C.-H., Chou, H.-W., & Huang, C.-C. (2024). Structural integrity analysis with crack propagation for reactor pressure vessel nozzles based on XFEM. *International Journal of Pressure Vessels and Piping, 207*, 105109. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.105109

Lotsberg, I. (2008). Stress concentration factors at welds in pipelines and tanks subjected to internal pressure and axial force. *Marine Structures, 21*(2–3), 138–159. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.12.002

Mitsyuk, S. V., & Mitsyuk, D. V. (2025). Analysis of the stress–strain state of a flanged connection based on an analytical approach using the finite element method and comparison with experimental data. *Strength of Materials and Theory of Structures, 115*, 157–163. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.115.157-163

Nelson, N. R., Siva Prasad, N., & Sekhar, A. S. (2023). Structural integrity and sealing behaviour of bolted flange joint: A state of art review. *International Journal of Pressure Vessels and Piping, 204*, 104975. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104975

Oh, C., Lee, S., & Jhung, M. J. (2022). Analytical method to estimate cross-section stress profiles for reactor vessel nozzle corners under internal pressure. *Nuclear Engineering and Technology, 54*(1), 401–413. https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.001

Sambo, M. A., Kol, G. R., & Betchewe, G. (2023). Analysis of stress concentration factors due to in-plane bending and out-of-plane bending loads on tubular TY-joints of offshore structures. *Journal of Marine Science and Application, 21*, 78–94. https://doi.org/10.1007/s11804-022-00303-9

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888

KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
Vol. 6, No. 4, Oktober-Desember 2026
e-ISSN : 2809-4042 | p-ISSN : 2809-4034
Online Journal System : https://jurnalp4i.com/index.php/knowledge

Si, J., Liu, W., Zhu, L., Zhu, Y., Zhao, G., Hong, J., & Zhang, C. (2024). Experimental study on mechanic behavior of flange joint for steel tube under axial tension. *Buildings, 14*(8), 2282. https://doi.org/10.3390/buildings14082282

Świt, G., & Szczecina, M. (2025). Numerical study of the reinforcing pads geometry of pressure vessels. *Materials, 18*(10), 2318. https://doi.org/10.3390/ma18102318

Xia, Q., Ma, L., Li, G., Hu, C., Zhang, L., Xu, F., & Liu, Z. (2024). Stress concentration factors of concrete-filled double-skin tubular K-joints. *Buildings, 14*(5), 1363. https://doi.org/10.3390/buildings14051363

Xie, J., Lu, Z., Cao, J., Guo, Z., Kang, X., Zhang, Z., & Wang, T. (2024). Simulation and experimental study on contact pressure distribution of contact interface in single and double bolted connection structures. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 43*(1), 123–143. https://doi.org/10.1177/14613484231209300

Xing, W. C., Wang, J., & Wang, Y. Q. (2024). An effective model for bolted flange joints and its application in vibrations of bolted flange joint multiple-plate structures: Theory with experiment verification. *Applied Mathematical Modelling, 126*, 482–505. https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.11.013

Yang, Y., Min, S., Peng, Y., Wang, H., & Chen, C. (2025). Experimental and numerical investigation on stress concentration factor of large-scale welded tubular T-joints. *Ocean Engineering, 320*, 120337. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120337

Zhang, S., De Waele, W., & Hectors, K. (2025). HFJOINT: A high-fidelity numerical modeling tool for stress concentration factor analysis of welded tubular joints. *Advances in Engineering Software, 211*, 104046. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2025.104046

Zheng, Y., Chen, Z., Qian, H., Wang, P., & Cao, Z. (2024). A shell equilibrium modeling for stress distribution of offshore tubular joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping, 212*(Part A), 105334. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105334

Copyright (c) 2026 KNOWLEDGE: Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan
https://doi.org/10.51878/knowledge.v5i4.16888