PENGARUH KETEBALAN GASKET TERHADAP TEGANGAN VON MISES DAN GESER SAMBUNGAN FLANGE 10 INCI BERBASIS CALCULIX/FREECAD

Ridho Syauki Futaki[1], Maulana Alief Milan Waluya[1,*]
[1]Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Kabupaten Blora, Jawa Tengah 58315
**E-mail: maulanaalief0909@gmail.com*

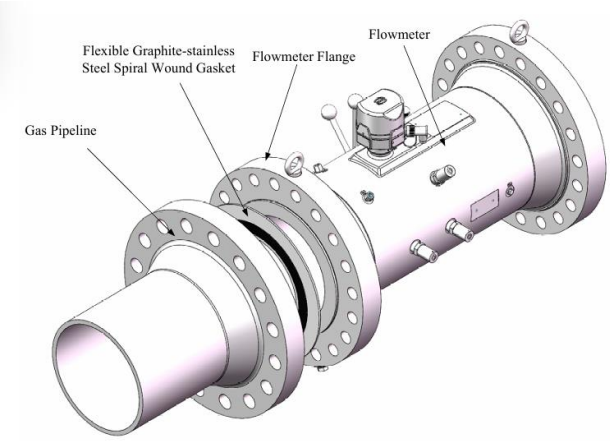
ABSTRAK

Sambungan flange berbaut dengan gasket datar banyak digunakan pada sistem perpipaan kilang, dan ketebalan gasket ikut menentukan besar tegangan yang timbul pada sambungan. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh ketebalan gasket terhadap tegangan von Mises dan tegangan geser maksimum pada gasket datar cincin nominal 10 inci Class 150. Dua ketebalan baku ASME B16.21, yaitu 1/8 inci (3,175 mm) dan 1/16 inci (1,5875 mm), dimodelkan dengan metode elemen hingga pada FreeCAD menggunakan solver CalculiX. Kedua model menerima pembebanan simultan berupa tekanan internal 30 kPa, kenaikan temperatur dari 300 K menjadi 330 K, dan gaya pra-tegang baut 1,5 kN pada masing-masing dari dua belas lubang baut. Pengurangan ketebalan dari 1/8 inci menjadi 1/16 inci menaikkan tegangan von Mises maksimum sebesar 2,62%, dari 33,56 kPa menjadi 34,44 kPa, dan menaikkan tegangan geser maksimum sebesar 2,63%, dari 19,37 kPa menjadi 19,88 kPa, sedangkan tegangan minimum justru turun 3,81% dan 1,43%. Konsentrasi tegangan tertinggi muncul di sekitar tepi lubang baut pada kedua model. Pada lokasi tersebut rasio dua kali tegangan geser maksimum terhadap tegangan von Mises mencapai 1,1544 dan 1,1545 atau berada dalam 0,03% dari batas teoretis 1,1547, sehingga keadaan tegangan di tepi lubang baut didominasi geser. Pengurangan ketebalan melebarkan rentang tegangan dari 24,78 kPa menjadi 26,00 kPa tanpa mengubah tegangan puncak secara berarti, sehingga pada tingkat pembebanan yang ditinjau ketebalan gasket bukan penentu utama tegangan puncak sambungan.

Kata kunci: gasket datar, ketebalan gasket, metode elemen hingga, tegangan von Mises, CalculiX.

1. PENDAHULUAN

Sambungan flange berbaut memungkinkan penyambungan dan pembongkaran pipa maupun peralatan proses pada industri minyak dan gas, petrokimia, serta pembangkit tenaga. Gasket datar bekerja sebagai elemen penyekat yang menahan fluida bertekanan agar tidak keluar melalui celah antara kedua permukaan flange. Kerapatan sambungan bergantung pada tegangan kontak yang terbentuk ketika gaya pra-tegang baut menekan gasket, sehingga kebocoran muncul begitu tegangan kontak turun di bawah nilai minimum yang dituntut material gasket. Kebocoran sambungan flange masih menjadi salah satu penyebab gangguan pada sistem perpipaan penunjang di kilang dan menuntut penghentian operasi untuk pengencangan ulang atau penggantian gasket. Aplikasi gasket pada sambungan flange ditunjukkan pada Gambar 1 [1].



Gambar 1. Aplikasi gasket pada sambungan flange pipa

Ketebalan gasket mengendalikan dua mekanisme yang saling berlawanan. Gasket yang tebal menyimpan regangan elastis lebih besar sehingga mampu mengakomodasi ketidakrataan permukaan flange, tetapi volume material yang lebih besar juga mengalami kompresi berlebih dan relaksasi tegangan sehingga tegangan kontak menurun seiring waktu operasi. Gasket yang tipis menahan relaksasi lebih baik karena regangan total yang tersimpan lebih kecil, tetapi kekakuan aksialnya lebih tinggi sehingga gaya pra-tegang baut yang sama menghasilkan tegangan lokal yang lebih besar di sekitar lubang baut [2]. Kenaikan temperatur memperumit keseimbangan tersebut karena baut, flange, dan gasket memuai dengan laju berbeda dan mengubah tegangan kontak yang tersisa [6]. ASME B16.21 membakukan ketebalan gasket datar nonlogam pada 1/16 inci dan 1/8 inci, sehingga kedua nilai tersebut menjadi pilihan praktis yang paling sering dipertimbangkan di lapangan [3].

Metode elemen hingga memungkinkan evaluasi medan tegangan akibat kombinasi tekanan internal, gaya pra-tegang baut, dan beban termal tanpa pengujian fisik. FreeCAD dengan solver CalculiX menyediakan rantai kerja pemodelan sampai pasca-proses yang bersifat sumber terbuka, sehingga analisis struktural dapat direproduksi tanpa lisensi perangkat lunak komersial dan dapat diterapkan pada unit pemeliharaan yang anggaran perangkat lunaknya terbatas [4], [5].

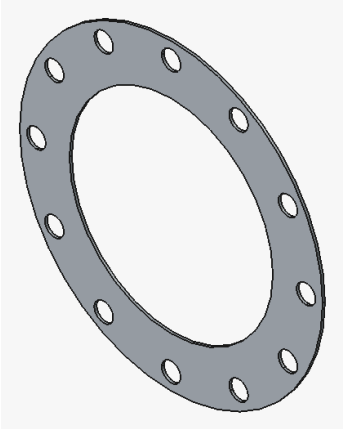
Penelitian terdahulu mengelompok pada tiga tema. Tema pertama membahas distribusi tegangan kontak gasket sebagai penentu kinerja penyekatan, dengan geometri dan susunan inti gasket terbukti mengubah tingkat kerapatan sambungan [2], [9]. Tema kedua menelaah pengaruh parameter struktural sambungan, mencakup ketebalan gasket pada sambungan flange gearbox [7] dan mutu baut pada sambungan flange tipe L [8], yang keduanya melaporkan kenaikan tegangan von Mises ketika kekakuan relatif antar komponen berubah. Tema ketiga meninjau beban termal dan kondisi lapangan, dengan model kopel termal-struktural menunjukkan penurunan tegangan kontak gasket pada temperatur tinggi [6] dan studi kasus kebocoran mengaitkan kegagalan penyekatan dengan kondisi baut, gasket, serta beban termal yang bekerja bersamaan [10].

Ketiga tema tersebut belum dipertemukan pada satu kasus uji. Perbandingan langsung antara dua ketebalan baku ASME B16.21, yaitu 1/8 inci dan 1/16 inci, pada gasket datar cincin nominal 10 inci Class 150 yang menerima tekanan internal, gaya pra-tegang baut, dan kenaikan temperatur secara simultan belum tersedia, terutama jika analisis dikerjakan dengan rantai elemen hingga sumber terbuka dan dinilai melalui tegangan von Mises serta tegangan geser maksimum sekaligus.

Penelitian ini membandingkan tegangan von Mises dan tegangan geser maksimum pada gasket datar nominal 10 inci dengan ketebalan 1/8 inci dan 1/16 inci menggunakan metode elemen hingga berbasis FreeCAD dan CalculiX. Analisis menerapkan tekanan internal 30 kPa, kenaikan temperatur dari 300 K menjadi 330 K, dan gaya pra-tegang baut 1,5 kN per lubang baut. Hasilnya digunakan untuk menetapkan besar kenaikan tegangan akibat pengurangan ketebalan dan untuk menyusun dasar teknis pemilihan ketebalan gasket serta penetapan torsi pengencangan baut pada pemeliharaan sambungan flange.

2. METODE

Penelitian ini menerapkan metode elemen hingga (finite element method, FEM) untuk mengevaluasi pengaruh ketebalan gasket terhadap respons tegangan sambungan flange berbaut. Objek yang dianalisis berupa flat ring gasket untuk flange pipa nominal 10 inci dengan geometri mengacu pada ASME B16.21 konfigurasi Class 150 [3]. Gasket memiliki diameter dalam 273,05 mm, diameter luar 339,85 mm, dan dua belas lubang baut yang terdistribusi merata pada bolt circle sesuai jumlah baut flange nominal 10 inci Class 150. Dua konfigurasi dimodelkan dengan ketebalan 1/8 inci (3,175 mm) dan 1/16 inci (1,5875 mm), sedangkan seluruh parameter geometris lain dibuat identik agar perbedaan respons tegangan hanya berasal dari variasi ketebalan. Geometri gasket yang dianalisis ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri Gasket Datar Cincin Nominal 10 Inci Class 150

Gasket dimodelkan menggunakan material CalculiX-Steel dengan sifat yang dirangkum pada Tabel 1. Modulus Young 210 GPa dan rasio Poisson 0,30 menetapkan kekakuan elastis model, sedangkan koefisien ekspansi termal 12 µm/m·K menentukan regangan yang timbul akibat kenaikan temperatur sebesar 30 K.

Tabel 1. Sifat Material Gasket CalculiX-Steel

Parameter	Nilai
`Modulus Young, E (GPa)	210
Rasio Poisson, ν	0,30
Koefisien ekspansi termal, α (µm/m·K)	12

Simulasi dijalankan pada FreeCAD dengan solver CalculiX (CCX). Kedua model menggunakan elemen tetrahedral orde dua yang dibangkitkan pada tingkat kehalusan Moderate

dengan ukuran elemen maksimum 1000 mm, laju pertumbuhan 0,30, satu segmen per sisi, dua segmen per radius, dan fitur Optimize diaktifkan. Dengan pengaturan yang sama, model gasket 1/8 inci menghasilkan 46.144 node, 16.244 elemen segitiga permukaan, dan 21.702 elemen tetrahedral, sedangkan model gasket 1/16 inci menghasilkan 111.051 node, 37.988 elemen segitiga permukaan, dan 53.669 elemen tetrahedral. Jumlah node pada model yang lebih tipis menjadi 2,4 kali lebih besar karena pembangkit mesh membatasi ukuran elemen menurut dimensi lokal benda, sehingga tebal 1,5875 mm memaksa elemen yang jauh lebih kecil untuk menjaga rasio bentuk yang wajar pada arah tebal. Elemen orde dua dipilih karena fungsi bentuk kuadratiknya menangkap gradien tegangan di sekitar lubang baut dengan jumlah elemen yang jauh lebih sedikit dibandingkan elemen orde satu. Diskretisasi yang dihasilkan terlihat pada kontur hasil simulasi di Gambar 3 dan Gambar 4.

Tekanan internal, gaya pra-tegang baut, dan beban termal diterapkan secara simultan pada kedua konfigurasi, dengan parameter geometri dan pembebanan selengkapnya dirangkum pada Tabel 2. Gaya pra-tegang baut bekerja pada kedua belas lubang baut dan ditandai dengan panah merah pada tampilan model, sedangkan tekanan internal bekerja pada permukaan diameter dalam dan ditandai dengan panah biru, seperti terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Analisis menggunakan pendekatan statis linear dalam satu langkah pembebanan. Model mengasumsikan material berperilaku elastis linear tanpa plastisitas maupun relaksasi, tidak memodelkan kontak antara gasket dan permukaan flange, serta memperlakukan gaya baut sebagai beban permukaan terbagi rata pada tiap lubang tanpa memodelkan batang baut. Asumsi tersebut membatasi hasil pada perbandingan relatif antar ketebalan dan bukan pada prediksi tegangan kontak absolut.

Tabel 2. Parameter Geometri dan Pembebanan

Parameter	Nilai
Diameter dalam gasket (mm)	273,05
Diameter luar gasket (mm)	339,85
Jumlah lubang baut	12
Ketebalan gasket varian 1, t (in / mm)	1/8 / 3,175
Ketebalan gasket varian 2, t (in / mm)	1/16 / 1,5875
Tekanan internal, P (kPa)	30
Suhu awal / suhu kerja, T (K)	300 / 330
Gaya baut per lubang, F (kN)	1,5

Parameter keluaran yang dievaluasi mencakup tegangan von Mises dan tegangan geser maksimum. Tegangan von Mises merangkum keadaan tegangan tiga sumbu menjadi satu nilai ekuivalen yang sebanding dengan energi distorsi, sehingga nilainya menunjukkan seberapa dekat suatu titik terhadap luluh menurut kriteria energi distorsi. Besaran tersebut dihitung dari tegangan utama seperti pada Persamaan 1.

$$\sigma_{\mathrm{vm}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}} \qquad (1)$$

Pada Persamaan 1, σ1, σ2, dan σ3 menyatakan tegangan utama maksimum, menengah, dan minimum dalam kPa, sedangkan σvm menyatakan tegangan von Mises dalam kPa. Tegangan geser maksimum mewakili tegangan geser terbesar pada bidang mana pun yang melalui titik

tinjau dan menjadi ukuran kecenderungan material bergeser, dihitung seperti pada Persamaan 2.

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2)$$

Pada Persamaan 2, τmax menyatakan tegangan geser maksimum dalam kPa dan nilainya ditentukan oleh selisih tegangan utama ekstrem. Perbandingan kedua besaran tersebut menunjukkan karakter keadaan tegangan pada suatu titik, seperti dinyatakan pada Persamaan 3.

$$R = \frac{2\tau_{\max}}{\sigma_{\mathrm{vm}}} \quad (3)$$

Pada Persamaan 3, R menyatakan rasio tanpa satuan antara dua kali tegangan geser maksimum dan tegangan von Mises. R bernilai 1,000 pada tarik satu sumbu murni dan mencapai nilai tertinggi 2/√3 atau 1,155 pada geser murni, sehingga nilai R yang mendekati 1,155 menandai titik yang keadaan tegangannya didominasi geser. Nilai minimum dan maksimum tegangan diambil dari hasil simulasi, sedangkan sebaran tegangan dianalisis melalui kontur dan histogram magnitudo tegangan. Deformasi divisualisasikan dengan faktor skala 100 kali untuk memperjelas bentuk terdeformasi tanpa mengubah nilai perpindahan aktual.

3. PEMBAHASAN

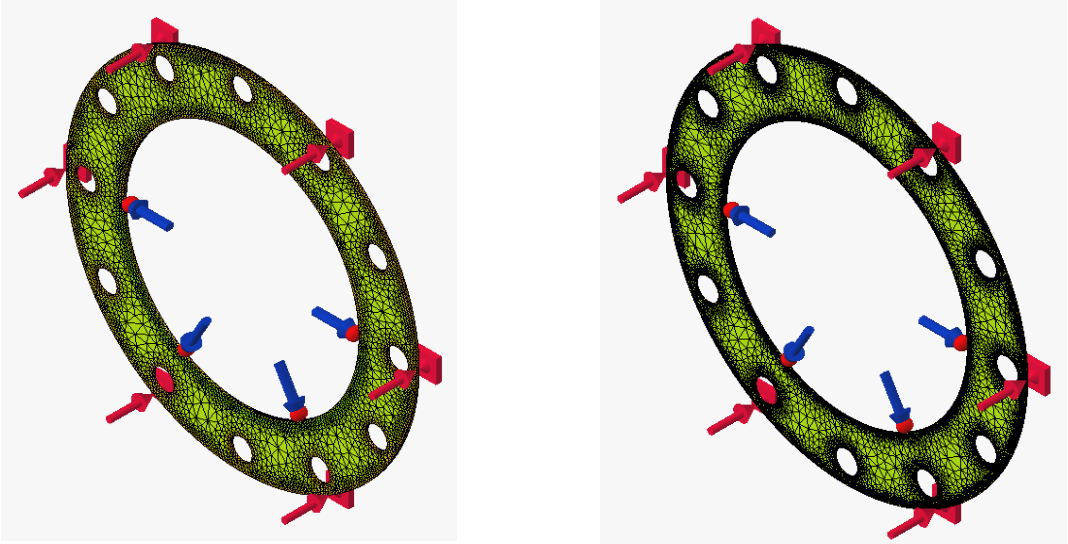
Pengurangan ketebalan gasket dari 1/8 inci menjadi 1/16 inci menaikkan tegangan puncak dan sekaligus menurunkan tegangan terendah pada kondisi pembebanan yang sama. Tegangan von Mises maksimum naik dari 33,56 kPa menjadi 34,44 kPa atau sebesar 2,62%, sedangkan tegangan geser maksimum naik dari 19,37 kPa menjadi 19,88 kPa atau sebesar 2,63%. Pada nilai minimum, tegangan von Mises turun 3,81% dari 8,78 kPa menjadi 8,44 kPa dan tegangan geser turun 1,43% dari 4,83 kPa menjadi 4,76 kPa. Tabel 3 merangkum keempat perbandingan tersebut. Pengurangan ketebalan sebesar 50% hanya menaikkan tegangan puncak sebesar 2,6%, jauh di bawah kenaikan dua kali lipat yang akan terjadi jika beban dipikul sebagai tegangan membran yang berbanding terbalik dengan luas penampang. Rentang antara tegangan minimum dan maksimum melebar dari 24,78 kPa menjadi 26,00 kPa, sehingga pengurangan ketebalan lebih mengubah keseragaman medan tegangan daripada besar tegangan puncaknya.

Tabel 3. Ringkasan Tegangan von Mises dan Tegangan Geser Maksimum

Parameter	Gasket 1/8 In.	Gasket 1/16 In.	Perubahan (%)
Tegangan von Mises minimum (kPa)	8,78	8,44	-3,81
Tegangan von Mises maksimum (kPa)	33,56	34,44	+2,62
Tegangan geser minimum (kPa)	4,83	4,76	-1,43
Tegangan geser maksimum (kPa)	19,37	19,88	+2,63

Kontur tegangan von Mises pada Gambar 3 memperlihatkan tegangan tertinggi terpusat pada cincin material di sekitar tepi lubang baut, sedangkan bagian gasket yang jauh dari lubang baut menahan tegangan yang hampir seragam. Pola tersebut muncul karena gaya pra-tegang baut masuk ke dalam gasket melalui luas tumpu yang sempit di sekeliling lubang, sehingga lintasan gaya menyempit dan kerapatan garis gaya meningkat tepat di tepi lubang. Gasket 1/16 inci menahan tegangan puncak yang lebih tinggi dibandingkan gasket 1/8 inci pada posisi yang

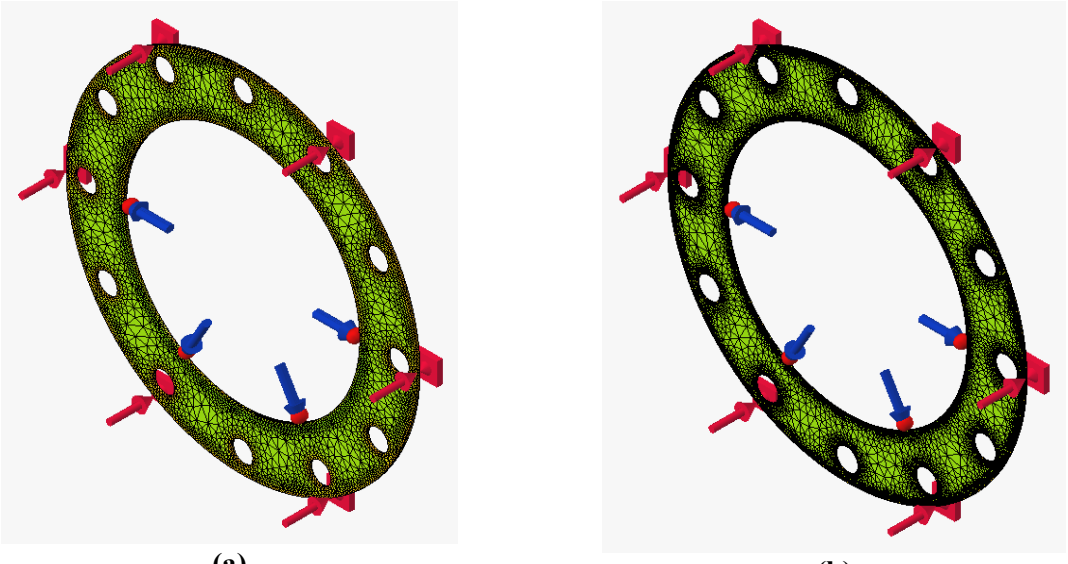
sama, meskipun selisihnya hanya 2,62%. Gawande melaporkan arah kecenderungan yang sama berupa kenaikan tegangan von Mises pada sambungan flange gearbox seiring penurunan ketebalan gasket [7], sedangkan Waleed dan Lee menunjukkan perubahan kekakuan relatif antar komponen sambungan memindahkan lokasi tegangan puncak ke daerah sekitar baut [8].



(a) **(b)**

Gambar 3. Kontur tegangan von Mises: (a) gasket 1/8 inci ; (b) gasket 1/16 inci

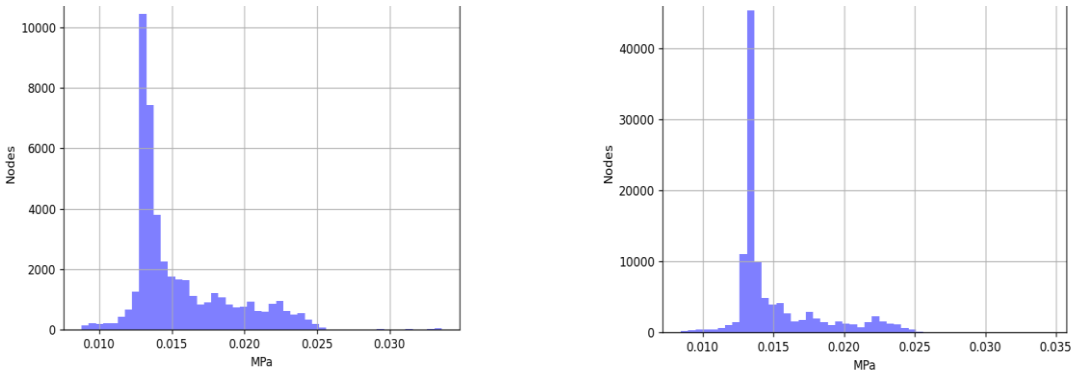
Kontur tegangan geser maksimum pada Gambar 4 memusat pada lokasi yang sama dengan kontur tegangan von Mises, yaitu pada tepi lubang baut. Nilai puncaknya naik dari 19,37 kPa pada gasket 1/8 inci menjadi 19,88 kPa pada gasket 1/16 inci. Kesamaan lokasi puncak kedua besaran menunjukkan satu mekanisme tunggal, yaitu penyempitan lintasan gaya baut, yang mengendalikan baik tegangan ekuivalen maupun tegangan geser pada model.



(a) **(b)**

Gambar 4. Kontur tegangan geser maksimum: (a) gasket 1/8 inci ; (b) gasket 1/16 inci

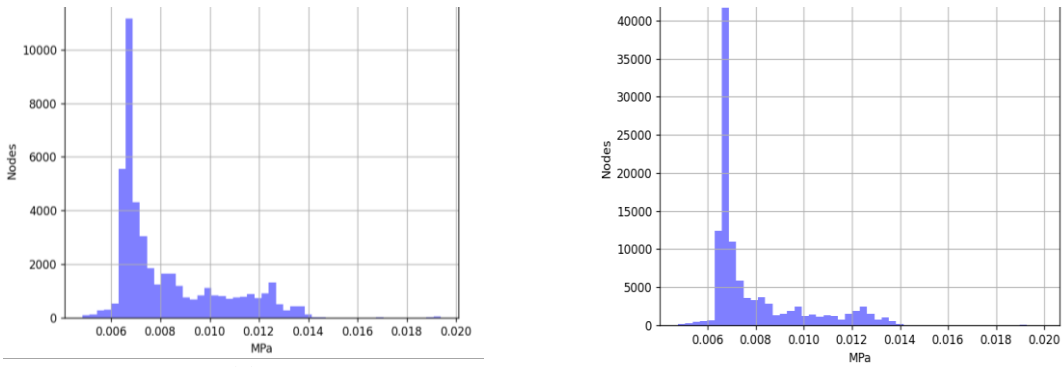
Histogram pada Gambar 5 memperlihatkan sebaran tegangan von Mises yang terbagi menjadi satu populasi utama dan satu ekor tegangan tinggi. Modus kedua model berada pada tegangan sekitar 13 kPa, sedangkan tegangan maksimum mencapai 33,56 kPa pada gasket 1/8 inci dan 34,44 kPa pada gasket 1/16 inci atau sekitar 2,6 kali nilai modus. Bin modus menampung sekitar 10.400 node dari total 46.144 node pada gasket 1/8 inci dan sekitar 45.000 node dari total 111.051 node pada gasket 1/16 inci, atau sekitar 23% dan 41% dari seluruh node. Sebaran tersebut menjelaskan mengapa kenaikan tegangan puncak sebesar 2,62% tidak mengubah tegangan rata-rata secara berarti, karena kenaikan hanya terjadi pada populasi node yang jumlahnya kecil di sekitar lubang baut.



(a) **(b)**

Gambar 5. Histogram Distribusi Tegangan von Mises: (a) gasket 1/8 inci ; (b) gasket 1/16 inci

Histogram tegangan geser maksimum pada Gambar 6 mengikuti pola sebaran yang sama, dengan modus sekitar 6,7 kPa pada kedua model. Pada node bertegangan maksimum, Persamaan 3 menghasilkan R sebesar 1,1544 untuk gasket 1/8 inci dan 1,1545 untuk gasket 1/16 inci. Kedua nilai berada dalam 0,03% dari batas teoretis 1,1547, sehingga keadaan tegangan di tepi lubang baut praktis merupakan geser murni dan bukan tarik satu sumbu. Kapasitas sambungan pada lokasi tersebut karenanya ditentukan oleh kekuatan geser material gasket, yang pada material lembaran umumnya lebih rendah daripada kekuatan tariknya.



(a) **(b)**

Gambar 6. Histogram Distribusi Tegangan Geser Maksimum: (a) gasket 1/8 inci ; (b) gasket 1/16 inci

Pengurangan ketebalan gasket sebesar 50% menaikkan tegangan von Mises maksimum sebesar 2,62% dan tegangan geser maksimum sebesar 2,63% pada kondisi pembebanan yang sama, dengan kenaikan terkurung di tepi lubang baut. Besaran kenaikan tersebut kecil, sehingga pada tekanan internal 30 kPa dan gaya baut 1,5 kN per lubang yang ditinjau, ketebalan gasket bukan penentu utama tegangan puncak sambungan. Temuan yang lebih berguna bagi pengelola sambungan flange adalah lokasi tegangan puncak yang konsisten berada di tepi lubang baut dan sifatnya yang didominasi geser, sehingga pemeriksaan kebocoran dan penilaian kondisi gasket bekas pakai sebaiknya diarahkan ke daerah sekeliling lubang baut dan bukan ke permukaan penyekat di sisi dalam. Lu dan rekan menunjukkan kebocoran sambungan flange di lapangan umumnya berasal dari kombinasi kondisi baut, gasket, dan beban termal yang bekerja bersamaan [10], sehingga pada tingkat pembebanan ini gaya baut dan beban termal perlu dikendalikan lebih ketat daripada pemilihan ketebalan gasket.

4. SIMPULAN

Pengurangan ketebalan gasket datar nominal 10 inci dari 1/8 inci menjadi 1/16 inci menaikkan tegangan von Mises maksimum sebesar 2,62%, dari 33,56 kPa menjadi 34,44 kPa, dan menaikkan tegangan geser maksimum sebesar 2,63%, dari 19,37 kPa menjadi 19,88 kPa, pada tekanan internal 30 kPa, kenaikan temperatur 30 K, dan gaya baut 1,5 kN per lubang. Tegangan minimum justru turun 3,81% dan 1,43%, sehingga pengurangan ketebalan melebarkan rentang tegangan dari 24,78 kPa menjadi 26,00 kPa tanpa mengubah tegangan puncak secara berarti. Kedua model memusatkan tegangan di tepi lubang baut dengan rasio dua kali tegangan geser maksimum terhadap tegangan von Mises sebesar 1,1544 dan 1,1545, atau dalam 0,03% dari batas geser murni 1,1547, sehingga lokasi tersebut menjadi titik kritis sambungan. Penerapan praktisnya, pemeriksaan gasket bekas pakai dan penelusuran kebocoran sebaiknya diarahkan ke daerah sekeliling lubang baut. Hasil ini bersifat komparatif karena model menggunakan material elastis linear, satu langkah pembebanan, penyederhanaan gaya baut tanpa pemodelan batang baut dan kontak flange, serta diskretisasi mesh yang tidak identik antar kedua konfigurasi, yaitu 46.144 node pada gasket 1/8 inci dan 111.051 node pada gasket 1/16 inci. Penelitian lanjutan sebaiknya menerapkan pemodelan kontak gasket terhadap flange, sifat material non-linear atau hiperelastis yang mewakili gasket lembaran non-logam, dan studi kepekaan mesh agar nilai tegangan absolut dapat digunakan untuk verifikasi terhadap kriteria kerapatan sambungan.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] X. Liu, Q. Bu, S. Luan, X. Cao, Y. Zhang, C. Mu, J. Lin, dan Y. Shi, “Analysis of sealing characteristics of hydraulic clamping flange connection mechanism,” Processes, vol. 14, no. 1, art. 72, 2026, doi: 10.3390/pr14010072.

[2] P. Jaszak dan R. Grzejda, “Symmetric and asymmetric semi-metallic gasket cores and their effect on the tightness level of the bolted flange joint,” Materials, vol. 18, no. 11, art. 2624, 2025, doi: 10.3390/ma18112624.

[3] ASME B16.21-2021, Nonmetallic Flat Gaskets for Pipe Flanges. New York, NY, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2021.

[4] R. R. Pambudi dan A. Ayende, “Numerical framework for multi-pass SMAW pre-WPS development on SA-36 low carbon steel,” Journal of Welding Technology, vol. 8, no. 1, 2026, doi: 10.30811/jowt.v8i1.9252.

[5] G. Dhondt dan K. Wittig, CalculiX: A Three-Dimensional Structural Finite Element Program. [Daring]. Tersedia: https://www.calculix.de. Diakses: 10 Agustus 2026.

[6] H. Xu, P. Jiao, C. Zheng, J. Shi, dan Y. Zhang, "Multi-objective optimization of a high-temperature flange–bolt–gasket system based on a cyclic symmetric thermal–structural coupling model," Symmetry, vol. 18, no. 8, art. 1252, 2026, doi: 10.3390/sym18081252.
[7] S. H. Gawande, "Study on the effect of gasket thickness for bolted gearbox flange joint," SN Applied Sciences, vol. 1, art. 32, 2019, doi: 10.1007/s42452-018-0030-y.
[8] M. Waleed dan D. Lee, "Investigation of bolt grade influence on the structural integrity of L-type flange joints using finite element analysis," Journal of Marine Science and Engineering, vol. 13, no. 7, art. 1346, 2025, doi: 10.3390/jmse13071346.
[9] P. Jaszak, A. Piwowar, dan M. Bieganowski, "Influence of sealing surface microstructure characteristics on flow resistance and leakage between contact surfaces," Materials, vol. 18, no. 19, art. 4474, 2025, doi: 10.3390/ma18194474.
[10] K. Lu, J. Dong, A. Zhang, dan B. Gao, "Analysis on the leakage of the flange connection of the water-containing hydrofluoric acid pipeline," Processes, vol. 9, no. 11, art. 1986, 2021, doi: 10.3390/pr9111986.
[11] R. R. Pambudi dan R. Alexander, "Comparative finite element analysis of IIW linear stress extrapolation and Haibach methods for structural hot-spot stress prediction in welded plate joints," Journal of Welding Technology, vol. 8, no. 1, 2026, doi: 10.30811/jowt.v8i1.9504.

Daftar Simbol

P	=	Tekanan internal, kPa
T	=	Suhu, K
ΔT	=	Selisih suhu (T kerja - T awal), K
F	=	Gaya baut per lubang, kN
t	=	Ketebalan gasket, mm
σ_{vm}	=	Tegangan von Mises, kPa
$\tau_{\max}$	=	Tegangan geser maksimum, kPa
σ_i	=	Tegangan utama ke-i (i = 1, 2, 3), kPa
R	=	Rasio 2τmax terhadap σvm, tanpa satuan
E	=	Modulus Young, GPa
ν	=	Rasio Poisson, tanpa satuan
α	=	Koefisien ekspansi termal, μm/m·K