

ANALISIS PERFORMA SAMBUNGAN *SIPHONIC ROOF OUTLET* DAN VARIASI DESAIN SAMBUNGAN UNTUK MENCEGAH KEBOCORAN BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA

*Adi Dangan Mukti¹, Achmad Widodo², Ojo Kurdi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: adidangan03@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa sambungan *Siphonic Roof Outlet* (SRO) dan mengevaluasi variasi desain baut guna mencegah kebocoran akibat distribusi tegangan yang tidak merata. Masalah utama pada sistem SRO adalah kebocoran di area sambungan yang dapat mengganggu efek vakum aliran. Analisis dilakukan melalui pendekatan simulasi *Finite Element Method* (FEM) menggunakan perangkat lunak ANSYS dengan material *Stainless Steel* 304. Simulasi pada desain baseline menunjukkan adanya risiko kebocoran karena nilai *contact pressure* di beberapa area *groove* mencapai 0 MPa, tidak memenuhi standar keamanan minimum 1,1 MPa. Optimasi torsi baut dilakukan untuk mendapatkan gaya prategang yang ideal, di mana nilai 1,8 Nm (1500 N) memberikan hasil paling stabil. Variasi desain dilakukan dengan memodifikasi jumlah baut (9, 10, 11, dan 12) serta menambahkan *washer* berdiameter luar 22 mm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi 10 baut dengan penambahan *washer* 22 mm pada torsi 1,8 Nm merupakan desain paling optimal. Desain ini berhasil menghasilkan tegangan ekuivalen maksimum sebesar 301,51 MPa dan deformasi sebesar 0,17 mm. Yang terpenting, distribusi *contact pressure* pada seluruh jalur *seal* mencapai status *sticking* dengan nilai minimum 1,1 MPa, sehingga secara efektif dapat mencegah potensi kebocoran dan menjaga keandalan operasional sistem drainase sifonik.

Kata Kunci: *contact pressure; equivalent stress; finite element method; siphonic roof outlet*

Abstract

This study aims to analyze the performance of Siphonic Roof Outlet (SRO) connections and evaluate bolt design variations to prevent leakage caused by uneven stress distribution. The primary issue in SRO systems is leakage at the connection area, which can disrupt the vacuum flow effect. The analysis was conducted using a Finite Element Method (FEM) simulation approach via ANSYS software with Stainless Steel 304 material. Simulations on the baseline design revealed a leakage risk, as contact pressure in several groove areas reached 0 MPa, failing to meet the minimum safety standard of 1.1 MPa. Bolt torque optimization was performed to obtain the ideal preload force, where a value of 1.8 Nm (1500 N) yielded the most stable results. Design variations were implemented by modifying the number of bolts (9, 10, 11, and 12) and adding washers with an outer diameter of 22 mm. Simulation results indicated that the configuration of 10 bolts with the addition of 22 mm washers at 1.8 Nm torque is the most optimal design. This design successfully produced a maximum equivalent stress of 301.51 MPa and a deformation of 0.17 mm. Most importantly, the contact pressure distribution across all seal tracks achieved sticking status with a minimum value of 1.1 MPa, effectively preventing potential leakage and maintaining the operational reliability of the siphonic drainage system.

Keywords: *contact pressure; equivalent stress; finite element method; siphonic roof outlet*

1. Pendahuluan

Sistem drainase atap sifonik merupakan teknologi modern yang memanfaatkan prinsip tekanan negatif atau vakum untuk mengalirkan air hujan secara efisien. Dibandingkan sistem konvensional, sistem ini memungkinkan penggunaan pipa berdiameter lebih kecil serta pemasangan horizontal tanpa kemiringan, sehingga cocok untuk bangunan bentang lebar. Namun, kinerja sistem sangat bergantung pada integritas komponen Siphonic Roof Outlet (SRO) dalam menjaga aliran tetap penuh (*full bore flow*) tanpa masuknya udara dari luar [1]. Kebocoran pada sambungan SRO dapat menghilangkan efek sifonik dan secara signifikan menurunkan kapasitas aliran [2].

Permasalahan kebocoran umumnya disebabkan oleh distribusi tekanan kontak (*contact pressure*) yang tidak merata pada permukaan gasket atau seal, terutama pada sambungan dengan beban prategang baut. Kebocoran akan terjadi ketika tekanan kontak turun di bawah tekanan internal fluida yang harus ditahan [3]. Oleh karena itu, analisis distribusi tegangan pada sambungan menjadi krusial dalam memastikan kekedapan sistem [4]. Metode numerik seperti Finite Element Method (FEM) memungkinkan evaluasi yang lebih efisien melalui visualisasi distribusi tegangan Von-Mises dan deformasi, serta identifikasi area dengan konsentrasi tegangan tinggi yang berpotensi menyebabkan kegagalan material [5][6][7].

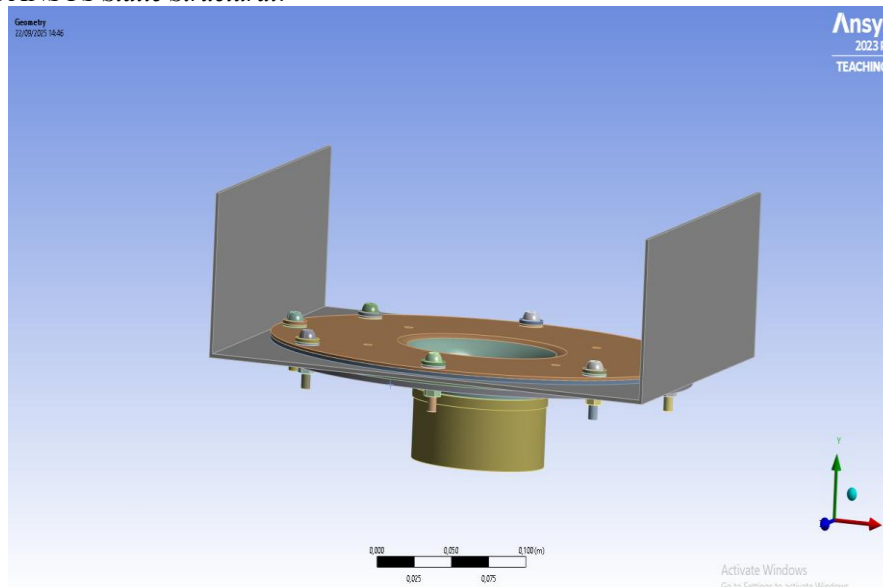
Optimasi desain sambungan SRO melibatkan penentuan nilai torsi baut yang tepat serta konfigurasi komponen seperti jumlah baut dan penggunaan washer untuk meratakan distribusi beban. Torsi yang tidak sesuai dapat menyebabkan deformasi berlebih atau tekanan yang tidak cukup pada gasket [8][9]. Oleh karena itu, desain harus memastikan tegangan tetap berada dalam batas elastis material Stainless Steel 304 untuk mencegah deformasi permanen [10]. Penelitian ini menggunakan simulasi ANSYS untuk membandingkan berbagai desain dan menentukan konfigurasi optimal yang mampu menjaga *contact pressure* di atas batas aman guna mencegah kebocoran.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini berfokus pada simulasi numerik komponen SRO untuk mendapatkan tegangan Von-Mises dan pola distribusi kontak tekanan.

2.1 Model Geometri

Model geometri SRO dikembangkan berdasarkan desain asli (*SRO Baseline*) yang terdiri dari komponen utama berupa *base plate*, talang (*gutter*), baut (*bolt*), dan sistem pengunci. Fokus pemodelan dilakukan pada area sambungan baut yang menjadi titik kritis potensi kebocoran. Geometri dibuat menggunakan software CAD dan kemudian diimpor ke dalam lingkungan ANSYS *Static Structural*.

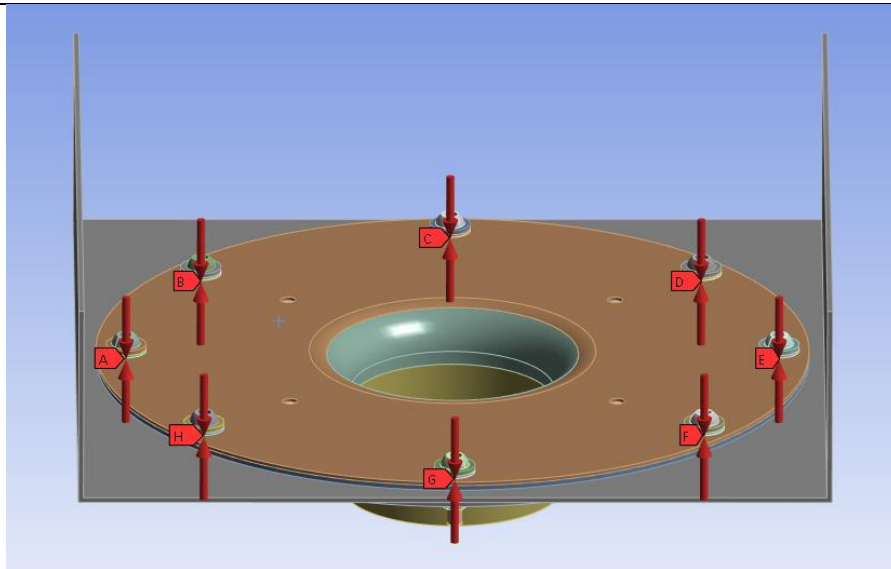


Gambar 1. Modeling Sambungan SRO

2.2 Simulation Setup

Proses simulasi dilakukan menggunakan modul *Static Structural* pada perangkat lunak ANSYS R2 2023. Tahapan awal dimulai dengan pendefinisian kontak antar komponen. Kontak pada area baut dan *washer* terhadap pelat didefinisikan sebagai *Bonded* untuk merepresentasikan sambungan yang kaku, sementara kontak pada area seal atau *groove* didefinisikan sebagai *Frictional* dengan koefisien gesek sebesar 0,2 untuk mengamati perilaku pergeseran dan tekanan kontak.

Kondisi batas (*boundary conditions*) diterapkan dengan memberikan *Fixed Support* pada bagian bawah kerah (*collar*) SRO untuk mengunci pergerakan model. Beban prategang baut diterapkan menggunakan fitur *Bolt Pretension*. Besar gaya prategang ditentukan berdasarkan target torsi pengencangan. Dalam penelitian ini, dilakukan simulasi bertahap pada nilai prategang 500 N hingga 2500 N guna menemukan nilai optimal. Gaya prategang sebesar 1500 N (setara dengan torsi 1,8 Nm) digunakan sebagai acuan utama dalam evaluasi variasi desain sambungan karena memberikan persebaran *contact pressure* yang paling ideal sebelum mencapai batas luluh material.



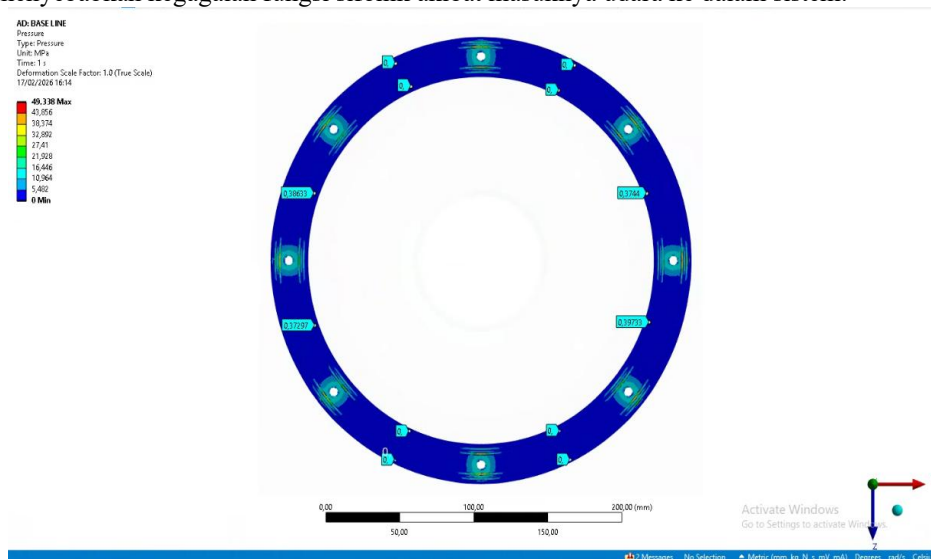
Gambar 2. Bolt Pretention

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini memaparkan data hasil simulasi numerik yang mencakup analisis desain *baseline*, optimasi nilai torsi baut, serta evaluasi terhadap berbagai variasi desain sambungan. Pembahasan difokuskan pada kemampuan setiap konfigurasi dalam memenuhi kriteria kedapn (sealing performance) berdasarkan distribusi *contact pressure* pada area *groove*.

3.1 Hasil Simulasi *Baseline*

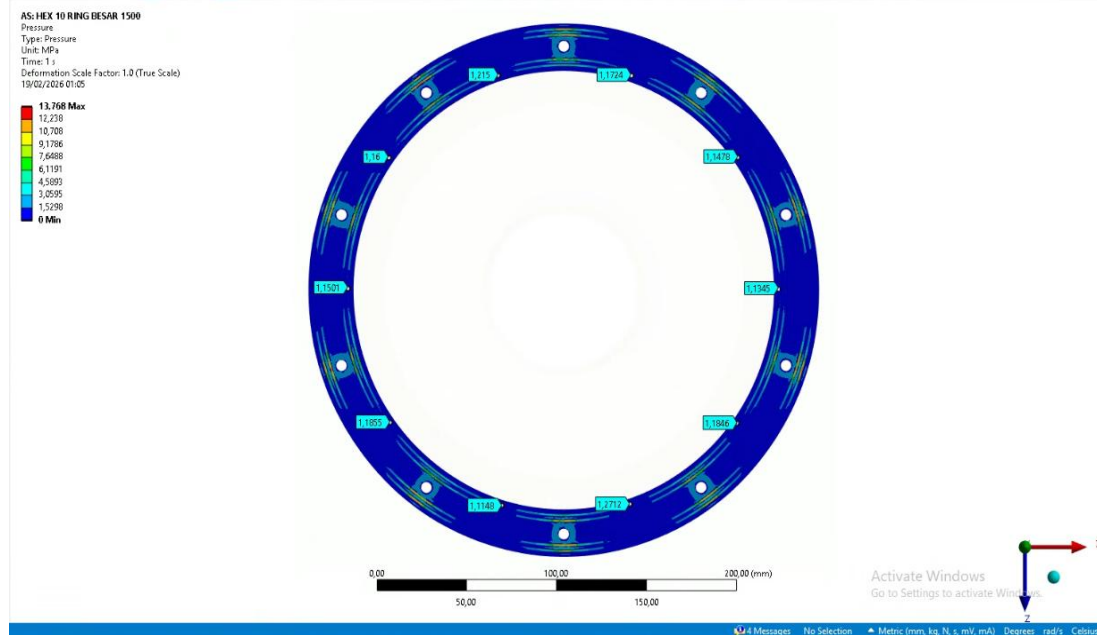
Desain *baseline* menggunakan konfigurasi 8 baut tanpa komponen tambahan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain ini menunjukkan performa yang kurang memadai. Terdapat area pada *groove* (jalur *seal*) yang memiliki nilai *contact pressure* sebesar 0 MPa, yang berarti terjadi celah mikro (*gap*) antara pelat talang dan *base plate*. Kondisi ini berisiko tinggi menyebabkan kegagalan fungsi sifonik akibat masuknya udara ke dalam sistem.



Gambar 3. Equivalent Stress Base Line

3.2 Variasi Terbaik

Penambahan *washer* dengan diameter luar (*Outer Diameter*) 22 mm memberikan perubahan signifikan pada profil distribusi tekanan. *Washer* berfungsi memperluas area distribusi beban dari kepala baut ke permukaan pelat talang. Dengan menggunakan 10 baut dan *washer* OD 22 mm pada torsi 1,8 Nm, tegangan ekuivalen maksimum terpantau sebesar 301,51 MPa dengan deformasi minimal 0,17 mm. Keunggulan utama variasi ini adalah tercapainya *contact pressure* minimum sebesar 1,1 MPa pada seluruh jalur *seal*. Status kontak pada area kritis menunjukkan kondisi sticking, yang menandakan sambungan sangat rapat dan aman dari kebocoran.



Gambar 4. Contact Pressure Jumlah Baut 10 + Washer OD 22 mm

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis performa sambungan *Siphonic Roof Outlet* (SRO) menggunakan metode elemen hingga, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

- a. Desain sambungan *baseline* memiliki risiko kebocoran yang signifikan karena distribusi tekanan kontak yang tidak merata, di mana beberapa titik pada jalur *seal* (*groove*) memiliki nilai *contact pressure* sebesar 0 MPa.
- b. Konfigurasi desain terbaik diperoleh pada variasi 10 baut dengan penambahan washer OD 22 mm pada torsi 1,8 Nm. Konfigurasi ini menghasilkan dengan nilai *contact pressure* minimum sebesar 1,1 MPa, tegangan ekuivalen maksimum sebesar 301,51 MPa dan deformasi minimal 0,17 mm.

5. Daftar Pustaka

- [1] R. Fucik dan J. Rucka, "Numerical and experimental analysis of siphonic roof drainage systems," *Journal of Building Engineering*, vol. 25, hal. 100813, 2019.
- [2] J. C. López-Patiño, J. García-Bellido, dan R. Romero, "Hydraulic performance of siphonic roof drainage systems," *Water*, vol. 15, no. 3, hal. 587, 2023.
- [3] M. Abid dan M. A. Khan, "Analysis of bolted flange joints for leakage behavior under internal pressure and bolt tightening," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 111–112, hal. 246–256, 2013.
- [4] T. Sawa, K. Maruyama, dan M. Abid, "A study on contact stress distributions and sealing performance in bolted joints," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 139, no. 2, hal. 021202, 2017.
- [5] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, 6th ed. Stamford: Cengage Learning, 2017.
- [6] E. Oñate, *Structural Analysis with the Finite Element Method*. Barcelona: Springer, 2013.
- [7] W. D. Pilkey dan D. F. Pilkey, *Peterson's Stress Concentration Factors*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
- [8] K. Maruyama dan T. Sawa, "Finite element analysis of gasketed pipe flange connections under internal pressure and bolt preload," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 130, no. 2, hal. 021202, 2008.
- [9] Y. Xu, L. Zhang, dan H. Li, "Multi-objective optimization of bolt preload in flange joints using finite element method and point cloud measurement," *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 230, hal. 104063, 2024.
- [10] H. K. Versteeg dan W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Pearson Education, 2007.