

ANALISIS MATERIAL DAN GEOMETRI ELASTOMER PADA SAMBUNGAN SIPHONIC ROOF OUTLET UNTUK MENCEGAH KEBOCORAN BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA

*Muhammad Syaichur Rohman¹, Ojo Kurdi², Achmad Widodo²

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: Syaichurrohman321@gmail.com

Abstrak

Sistem drainase *siphonic roof outlet* (SRO) beroperasi dengan memanfaatkan tekanan negatif, sehingga menuntut kinerja sealing yang sangat baik pada komponen sambungannya untuk mencegah kebocoran udara maupun air. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan material dan desain geometri elastomer yang optimal pada sambungan SRO menggunakan simulasi *Finite Element Method* (FEM) dengan perangkat lunak ANSYS *Static Structural*. Variasi yang diteliti meliputi jenis kekerasan material *Ethylene Propylene Diene Monomer* (EPDM Shore A60, A65, dan A70), jumlah *groove*, dan bentuk geometri *groove*. Hasil uji konvergensi elemen menunjukkan hasil stabil pada 578.196 elemen. Hasil simulasi menunjukkan bahwa material EPDM Shore A65 memiliki distribusi tegangan dan deformasi arah sumbu-Y yang paling merata. Berdasarkan variasi jumlah *groove*, peningkatan jumlah *groove* justru menyulitkan pencapaian tekanan kontak minimum yang dibutuhkan. Desain geometri yang paling optimal adalah variasi geometri *groove* 2 yang menghasilkan tekanan kontak sebesar 1,3 MPa. Penggabungan variasi terbaik (EPDM Shore A65 dengan geometri *groove* 2) menunjukkan performa sealing yang sangat baik dengan pencapaian nilai tekanan kontak di atas batas minimum yaitu sekitar 1,4 MPa.

Kata Kunci: *contact pressure, elastomer; epdm; metode elemen hingga; siphonic roof outlet*

Abstract

The *siphonic roof outlet* (SRO) drainage system operates by utilizing negative pressure, thus demanding excellent sealing performance on its joint components to prevent air and water leaks. This study aims to determine the optimal elastomer material and geometric design for SRO joints using *Finite Element Method* (FEM) simulation with ANSYS *Static Structural* software. The variations studied include the hardness of *Ethylene Propylene Diene Monomer* material (EPDM Shore A60, A65, and A70), the number of grooves, and the geometric shape of the grooves. The element convergence test showed stable results at 578,196 elements. Simulation results indicate that the EPDM Shore A65 material has the most even stress distribution and Y-axis deformation. Based on the groove quantity variation, increasing the number of grooves actually makes it harder to achieve the minimum required contact pressure. The most optimal geometric design is groove geometry variation 2, which produced a contact pressure of 1.3 MPa. Combining the best variations (EPDM Shore A65 with groove geometry 2) demonstrated excellent sealing performance, achieving a contact pressure value above the minimum threshold of approximately 1.4 MPa.

Keywords: *contact pressure; elastomer; epdm; finite element method; siphonic roof outlet*

1. Pendahuluan

Curah hujan yang ekstrem di Indonesia dapat menyebabkan genangan di atap rumah maupun gedung-gedung yang tinggi, yang secara tidak langsung dapat menyebabkan tambahan beban pada struktur bangunan [1]. Untuk mengatasi masalah tersebut, sistem drainase sifonik menjadi solusi yang lebih efektif dibandingkan sistem gravitasi

konvensional karena kapasitas aliran airnya jauh lebih tinggi meskipun area drainasenya sebanding [2]. Sistem sifonik beroperasi pada tekanan yang lebih rendah dibandingkan tekanan atmosfer, menciptakan efek hisap (vakum) dengan kondisi pipa terisi penuh air atau dikenal sebagai aliran *full bore* [3].

Komponen utama dalam sistem ini adalah *Siphonic Roof Outlet* (SRO). Dalam operasionalnya, elastomer pada sambungan SRO berfungsi krusial untuk menjaga integritas sambungan antar komponen agar tetap kedap selama sistem beroperasi dalam kondisi vakum [4]. Elastomer harus mampu menahan deformasi akibat tekanan negatif serta beban mekanis dari gaya penjepitan (*pretension*) baut pada sambungan *flange* [5]. Penggunaan material seperti EPDM (*Ethylene Propylene Diene Monomer*) sering dipilih karena ketahanannya yang luar biasa terhadap cuaca dan oksidasi [6].

Jika elastomer mengalami kegagalan fungsi atau desain geometri yang tidak tepat, maka kebocoran udara dapat terjadi dan menggagalkan efek sifonik secara keseluruhan [7]. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis material elastomer yang tepat dan desain geometri yang optimal untuk mencegah kebocoran pada sistem SRO melalui pendekatan numerik *Finite Element Method* (FEM) [8]. Analisis difokuskan pada perilaku mekanik berupa distribusi tegangan, deformasi, dan tekanan kontak (*contact pressure*) guna menjamin performa penyegelan (*sealing*) yang maksimal [9].

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik berbasis *Finite Element Method* (FEM) dengan perangkat lunak ANSYS *Workbench* R2 2023 [8]. Fokus utama adalah mengevaluasi tekanan kontak (*contact pressure*) pada elastomer guna menjamin kedekatan sistem.

2.1 Properti Material

Material elastomer yang dianalisis adalah EPDM dengan variasi kekerasan Shore A60, A65, dan A70. Sifat mekanik karet dimodelkan menggunakan persamaan *Hyperelastic Mooney-Rivlin* untuk menangkap perilaku material pada deformasi besar [10]. Parameter konstanta material (C_{10} , C_{01}) disesuaikan untuk merepresentasikan kekerasan yang berbeda [11].

2.2 Model Geometri

Model geometri yang dianalisis dalam penelitian ini difokuskan pada rakitan (*assembly*) komponen *Siphonic Roof Outlet* (SRO) yang terdiri dari penampang *body*, baut pengikat, dan komponen kritis berupa elastomer. Dalam pemodelan ini, komponen *body* SRO dan baut dianggap sebagai benda kaku (*rigid body*) untuk memusatkan analisis deformasi pada komponen elastomer yang bersifat fleksibel.

Untuk mendapatkan desain penyekat yang optimal dalam mencegah kebocoran, dilakukan modifikasi desain pada bagian permukaan kontak elastomer melalui variasi jumlah dan bentuk *groove*. Variasi pertama dilakukan dengan membandingkan desain awal (*baseline*) yang memiliki 4 *groove* dengan desain pengembangan yang memiliki 6 dan 7 *groove*. Selain jumlahnya, penelitian ini juga menguji dua variasi bentuk geometri profil *groove*, yaitu Geometri 1 dan Geometri 2, guna mengevaluasi distribusi tekanan kontak yang paling efektif terhadap luasan permukaan sambungan.

2.3 Simulation Setup

Tahap awal simulasi dilakukan dengan proses diskritisasi atau *meshing* pada model geometri SRO. Komponen elastomer dan bagian struktural lainnya didekati menggunakan elemen tetrahedrons 10-node yang memiliki akurasi tinggi untuk pemodelan material *hyperelastic* dan geometri yang kompleks. Ukuran elemen ditentukan melalui uji independensi *mesh* guna memastikan bahwa hasil simulasi tidak lagi dipengaruhi oleh kerapatan elemen. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan ukuran elemen hingga nilai *Equivalent Von-Mises Stress* menunjukkan tren yang stabil. Berdasarkan grafik uji konvergensi, hasil dinyatakan konvergen pada jumlah elemen sebanyak 578.196 dengan ukuran elemen (*element size*) sebesar 4 mm. Setup ini memberikan keseimbangan optimal antara akurasi numerik dan efisiensi waktu komputasi.

Setelah proses *meshing* selesai, interaksi antar permukaan diatur untuk merepresentasikan kondisi fisik sambungan. Kontak antara elastomer dengan *body* SRO didefinisikan sebagai *frictional contact* dengan koefisien gesek 0,3, sementara baut diatur sebagai *bonded* terhadap lubang baut guna menyederhanakan transmisi gaya [12]. Kondisi batas diterapkan dengan memberikan *fixed support* pada bagian dasar SRO agar model tetap diam secara struktural.

Pembebanan diberikan melalui fitur *bolt pretension* pada delapan baut untuk mensimulasikan gaya penjepitan yang menciptakan kompresi pada elastomer.

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan data kuantitatif hasil simulasi numerik untuk mengevaluasi performa penyegelan elastomer SRO. Analisis dilakukan dengan membandingkan parameter mekanis seperti *Equivalent Von-Mises Stress*, *Directional Deformation*, dan *Contact Pressure* pada setiap variasi.

3.1 Hasil Simulasi Baseline

Simulasi baseline menggunakan material EPDM Shore A70 dengan konfigurasi 4 *groove* menghasilkan nilai *Equivalent Von-Mises Stress* maksimum sebesar 345,05 MPa yang terpusat pada area kontak baut. Meskipun material mampu menahan beban, distribusi *Contact Pressure* menunjukkan ketidakrataan yang signifikan, di mana nilai tekanan pada area di antara baut menurun drastis hingga mencapai 0 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kondisi standar, gaya jepit dari 8 baut belum mampu memberikan tekanan kontak yang kontinu di seluruh lingkaran elastomer untuk melawan tekanan vakum operasional.

3.2 Hasil Variasi Jumlah Groove

Eksperimen pada variasi jumlah *groove* (6 dan 7) menunjukkan bahwa penambahan luasan kontak berbanding terbalik dengan intensitas tekanan kontak. Pada variasi 7 *groove*, meskipun distribusi tegangan lebih tersebar, nilai *Contact Pressure* puncak mengalami penurunan hingga di bawah 0,5 MPa pada area kritis. Secara teknis, fenomena ini terjadi karena beban *bolt pretension* yang sama harus didistribusikan ke area permukaan yang lebih luas ($P = F/A$), sehingga tekanan efektif untuk menyumbat celah udara menjadi tidak mencukupi untuk mencapai syarat *air-tightness*.

3.3 Hasil Variasi Kekerasan Material

Hasil simulasi pada tiga tingkat kekerasan menunjukkan karakteristik deformasi yang berbeda. Material Shore A70 menunjukkan *Directional Deformation* sumbu-Y yang kecil namun kaku, sedangkan Shore A60 mengalami deformasi hingga 0,12 mm yang memicu risiko *buckling*. Material Shore A65 terpilih sebagai yang paling optimal dengan nilai deformasi yang stabil dan mampu menghasilkan *Equivalent Stress* sebesar 290,46 MPa. Karakteristik Shore A65 memberikan keseimbangan antara fleksibilitas untuk mengisi kekasaran permukaan sambungan dan kekuatan struktural untuk menahan beban jepit.

3.4 Hasil Variasi Geometri Groove

Modifikasi geometri menjadi desain "Geometri 2" terbukti secara signifikan meningkatkan efisiensi penyegelan. Profil ini mampu mengonsentrasikan gaya mekanis pada puncak *groove*, sehingga menghasilkan peningkatan *Contact Pressure* dari semula 0,6 MPa pada desain *baseline* menjadi 1,3 MPa. Peningkatan sebesar 116% ini memastikan bahwa tekanan kontak yang dihasilkan jauh melampaui tekanan negatif sistem (0,08 MPa), yang secara teknis meminimalkan peluang infiltrasi udara ke dalam aliran sifonik.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik dan analisis yang telah dilakukan terhadap komponen elastomer pada sambungan *Siphonic Roof Outlet* (SRO), dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- EPDM Shore A65 merupakan material yang paling efektif dibandingkan Shore A60 dan A70. Secara teknis, material ini menghasilkan distribusi tegangan sebesar 290,46 MPa dan deformasi yang stabil, sehingga mampu mengisi celah sambungan dengan lebih rapat tanpa risiko *buckling* yang dapat memicu kebocoran.
- Penambahan jumlah *groove* secara berlebihan (hingga 7 *groove*) tanpa disertai peningkatan gaya jepit baut justru menurunkan performa penyegelan. Hal ini disebabkan oleh distribusi beban yang terlalu luas sehingga nilai tekanan kontak puncak menurun hingga di bawah 0,5 MPa, yang tidak mencukupi untuk kondisi *air-tight*.
- Modifikasi profil pada desain Geometri 2 terbukti mampu meningkatkan *Contact Pressure* secara signifikan sebesar 116% dibandingkan desain *baseline* (dari 0,6 MPa menjadi 1,3 MPa). Desain ini berhasil memfokuskan gaya mekanis pada area krusial untuk menciptakan hambatan terhadap tekanan vakum sistem.

- d. Kombinasi terbaik diperoleh dari penggunaan material EPDM Shore A65 dengan desain Geometri 2 yang menghasilkan tekanan kontak stabil sebesar 1,4 MPa. Nilai tersebut jauh melampaui tekanan operasional sistem sifonik (0,08 MPa), sehingga konfigurasi ini dinyatakan sangat aman dan direkomendasikan untuk mencegah kebocoran udara maupun air pada sambungan SRO.

5. Daftar Pustaka

- [1] BMKG, "Informasi Iklim dan Curah Hujan Tahunan Indonesia," Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika, 2024.
- [2] J. C. López-Patiño, J. García-Bellido, dan R. Romero, "Hydraulic performance of siphonic roof drainage systems," *Journal of Building Engineering*, 2023.
- [3] R. Fucik dan J. Rucka, "Numerical and experimental analysis of siphonic roof drainage systems," *Water Resources Management*, 2019.
- [4] 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*, 2013.
- [5] 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, 2025.
- [6] V. Tulus dan P. Sidabutar, "Karakteristik Sifat Fisik Elastomer NBR dan EPDM Untuk Pembuatan Seal / O-Ring Untuk Suku Cadang Otomotif," *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*, 2014.
- [7] A. Zikri dan A. Kurdi, "Experimental investigation of Siphonic Roof Outlet performance with modified finless design," *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2023.
- [8] E. Oñate, *Structural Analysis with the Finite Element Method*, Barcelona: Springer, 2013.
- [9] P. Jaszak, J. Skrzypacz, A. Borawski, dan R. Grzejda, "Methodology of Leakage Prediction in Gasketed Flange Joints at Pipeline Deformations," *Materials*, vol. 15, no. 12, 2022.
- [10] D. Lalo dan M. Greco, "Rubber bushing hyperelastic behavior based on shore hardness and uniaxial extension," *COBEM*, 2018.
- [11] S. C. Liu et al., "Mechanically strong, stretchable and self-healable silicone elastomers with designed dynamic networks," *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2025.
- [12] Parker, *Parker O-Ring Handbook*, USA: Parker Hannifin Corporation, 2021.