

# Analisis Distribusi Tegangan pada Pipa dengan Cacat *Dent* Berbentuk Silindris

Sony Aria Wiryawan<sup>1</sup>, Rachmat Sriwijaya<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada  
Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika No 2, Jogjakarta, 55284, Indonesia

<sup>1</sup>sony.aria.wiryawan@mail.ugm.ac.id

<sup>2\*</sup>Penulis Korespondensi: sriwijaya@mail.ugm.ac.id

**Abstrak** - Pipa penyalur merupakan salah satu peralatan utama dalam dunia industri perminyakan yang dianggap paling aman, efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk menyalurkan fluida seperti gas dan minyak bumi. Cacat *dent* merupakan salah satu kerusakan mekanis yang banyak terjadi di jaringan perpipaan dan dapat mempengaruhi kinerja pipa secara signifikan dan bentuk cacat *dent* pada pipa penyalur yang sering ditemukan di lapangan adalah berbentuk silindris. *Dent* merupakan deformasi plastis ke arah dalam pada dinding pipa yang disebabkan oleh suatu kejadian atau tumbukan dari luar sehingga mengakibatkan perubahan bentuk dari penampang pipa dan pengurangan diameter pada bagian pipa yang terdampak. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi numerik dengan metode elemen hingga untuk mengetahui pola distribusi deformasi permanen, regangan plastis, dan tegangan sisa pada pipa penyalur dengan kondisi tanpa tekanan internal yang mengalami cacat *dent* dengan bentuk silindris. Penelitian dilakukan dengan variasi kedalaman indentasi dan panjang indenter serta mempertimbangkan kondisi pada *yield strength* dan *ultimate strength* dari material pipa SAE/AISI 1020. Beberapa kesimpulan yang didapatkan dari hasil penelitian dapat dijadikan sebagai referensi dan rekomendasi dalam pengoperasian jaringan perpipaan minyak bumi dan gas yang mengalami cacat *dent*. Perubahan kedalaman indentasi berpengaruh terhadap meningkatnya nilai deformasi permanen, regangan plastis, dan tegangan sisa. Sebaliknya, nilai deformasi permanen, regangan plastis dan tegangan sisa pada pipa dengan cacat *dent* mengalami penurunan dengan bertambah panjangnya indenter.

**Kata kunci** - cacat *dent*, silindris, metode elemen hingga, deformasi permanen, regangan plastis, tegangan sisa.

**Abstract** - The pipeline is one of main equipment in the petroleum industry which have been extensively considered the safest, efficient, economical, and environmentally friendly to distribute fluid likewise oil and gas. Dent defect is one of the most common mechanical damages to the pipelines and significantly poses negative impact to the performance of the pipelines and the dent shape which commonly encountered in the field is cylindrical-shaped dent. A dent is permanent deformation of the circular cross-section of the pipelines caused by an external load and resulting in a reduction of pipeline diameter on the dented region. In this research, numerical simulation by using finite element method was performed to thoroughly understand the distribution mechanism of permanent deformation, plastic strain, and residual stress on the non-pressurized pipelines with cylindrical-shaped dent. The research was carried out by involving variations on the denting depth and the indenter length as well as considering the conditions on the yield strength and ultimate strength of the SAE/AISI 1020 pipelines. Several conclusions obtained from the research can be further deployed as technical reference and recommendation on the pipeline's operations. The changes on the denting depth would increase the value of permanent deformation, plastic strain, and residual stress. Contrarily, the value of permanent deformation, plastic strain, and residual stress with cylindrical-shaped dent would decrease while the indenter length getting longer.

**Keywords** - dent defect, cylindrical-shaped, finite element method, permanent deformation, plastic strain, residual stress.

## I. PENDAHULUAN

Pipa penyalur merupakan salah satu peralatan utama dalam dunia industri yang dianggap paling aman, efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk menyalurkan fluida seperti gas dan minyak bumi [1]. Ketika terjadi kerusakan pada pipa penyalur, maka akan berpengaruh pada keandalannya. Hal ini dapat mengakibatkan permasalahan keamanan dan lingkungan, dan juga akan berpengaruh terhadap masalah operasional pipa. *Dent* merupakan salah satu kerusakan mekanis yang banyak terjadi pada jaringan perpipaan dan dapat mempengaruhi kinerja pipa secara signifikan. *Dent* merupakan deformasi plastis ke arah dalam pada dinding pipa yang disebabkan oleh suatu kejadian atau tumbukan dari luar sehingga mengakibatkan perubahan bentuk dari penampang pipa dan pengurangan diameter pipa pada daerah yang terdampak [2]. Beberapa kejadian yang dapat menyebabkan terbentuknya cacat *dent* pada pipa yaitu, kegiatan konstruksi dan penggalian, jangkar dan peralatan pukuk di dekat jaringan pipa lepas pantai, dan beban terkonsentrasi yang dibuat oleh ujung batu atau benda keras yang dapat membuat *dent* pada pipa yang terkubur atau berada di atas tanah [3-5]. Tegangan dan regangan yang tinggi berada di daerah *dent*.

Oleh karena itu, cacat *dent* mendapat perhatian yang cukup besar dari operator sistem perpipaan dan peneliti [6].

Ramezani dan Neitzert melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh tekanan internal dan kedalaman dent terhadap distribusi regangan pada pipa yang dikenai indenter berbentuk persegi panjang [7]. Nilai regangan akan meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan internal dan kedalaman *dent*. Zhu melakukan penelitian untuk mengetahui distribusi regangan plastis pada pipa dengan cacat *dent* [8]. Karakteristik distribusi regangan pada pipa dengan kedalaman *dent* dan tekanan internal yang bervariasi adalah sama, yaitu regangan meningkat pada daerah yang dekat *dent* dan menurun pada daerah yang jauh dari *dent*. Zhao melakukan penelitian untuk mengetahui respon regangan dari pipa API 5L X80 dengan cacat *dent* [9]. Regangan pada arah longitudinal dan *hoop* berubah seiring dengan bertambahnya kedalaman *dent*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kedalaman indentasi dan panjang indenter berbentuk silindris terhadap pola distribusi deformasi permanen, regangan plastis, dan tegangan sisa (*residual stress*) pada pipa penyalur tanpa tekanan internal yang mengalami cacat *dent*. Dalam menyelesaikan persoalan tersebut, digunakan metode simulasi elemen hingga.

## II. METODE

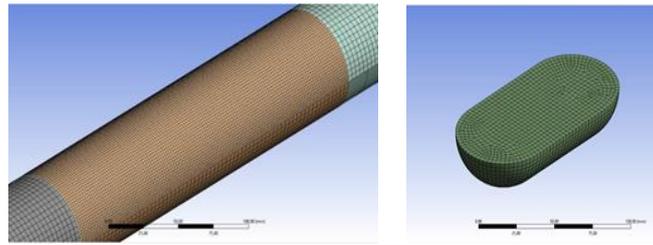
Perangkat lunak ANSYS digunakan untuk mengamati pengaruh kedalaman indentasi dan panjang indenter terhadap pola distribusi deformasi permanen, regangan plastis, dan tegangan sisa (*residual stress*) pada pipa penyalur. Material yang digunakan adalah pipa SAE/AISI 1020 yang umum digunakan dalam industri minyak dan gas bumi. Dimensi pipa yang digunakan dalam penelitian ini memiliki diameter luar (OD) 73,03 mm, tebal (t) 3,05 mm, dan panjang (L) 7303 mm. Data geometri dan properti material pipa yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada eksperimen yang dilakukan oleh Pinheiro [10] sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Pipa diasumsikan sebagai *thin-walled cylindrical pipes* karena nilai perbandingan diameter luar dan tebal (OD/t) bernilai 23,94.

TABEL I  
DATA PROPERTI MATERIAL PIPA [10]

Spesifikasi	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_u$ (MPa)
SAE/AISI 1020	202	0,3	272	387

Definisi kontak antara indenter dan pipa adalah mode *frictional* dengan koefisien gesekan sebesar 0,3. *Body sizing mesh* pada bagian pipa yang kontak dengan indenter disimulasikan lebih rapat (*finer mesh*) sedangkan mesh pada bagian pipa lainnya disimulasikan lebih renggang (*coarser mesh*) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Kondisi batas untuk pipa diaplikasikan pada bagian bawah pipa *fixed* pada arah sumbu vertikal untuk mencegah pergeseran selama proses indentasi. Penampang pada ujung-ujung pipa dianggap *constraint* kecuali ke arah vertikal untuk memungkinkan adanya tegangan tarik. Untuk indenter diberikan kondisi batas yang bebas pada arah vertikal hingga terjadi defleksi dan deformasi pada pipa sebelum akhirnya indenter naik kembali dan posisinya berada di atas pipa.

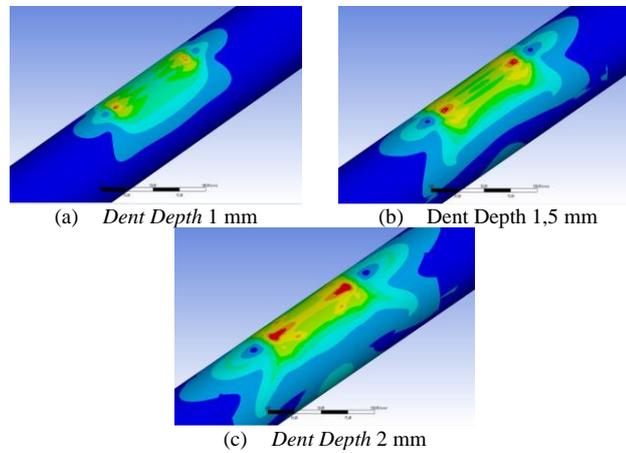
*Dent* pada pipa dibuat dengan mengaplikasikan indenter berbentuk silindris dengan variasi panjang indenter 0,5D, 1D, 1,5D, dimana D adalah diameter indenter berbentuk bulat yang digunakan dalam penelitian Pinheiro [10] yaitu sebesar 63,20 mm dan diletakkan di tengah pipa. Kedalaman indentasi diaplikasikan pada indenter dengan variasi kedalaman indentasi (*dent depth*) yaitu 1 mm, 1,5 mm, dan 2 mm dari permukaan luar pipa. Langkah simulasi proses indentasi dimulai dengan melakukan kontak antara indenter dan permukaan pipa, kemudian mengaplikasikan beban pada indenter ke arah tegak lurus pada pipa sampai kedalaman indentasi yang ditentukan. Selanjutnya indenter dijauhkan dari pipa hingga tidak ada kontak antara indenter dan pipa. Simulasi proses indentasi pada penelitian ini dilakukan pada pipa dengan kondisi tanpa tekanan internal.



Gambar 1. Meshing pada Pipa dan Indentor

### III. HASIL

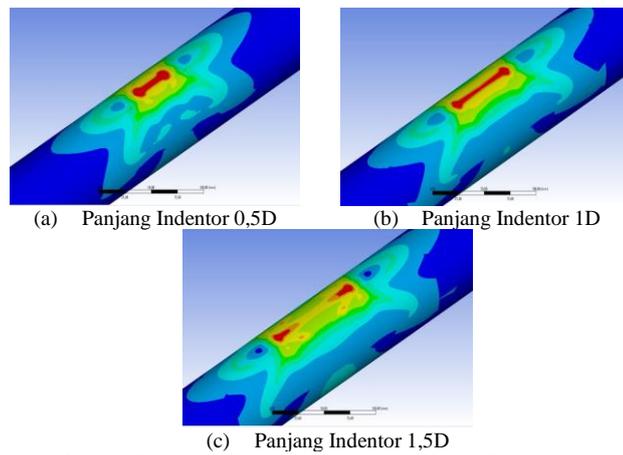
Proses simulasi indentasi dilakukan dengan memberikan kontak antara indentor dan pipa, kemudian kontak tersebut dilepaskan. Ketika indentor dilepaskan dari kontak dengan pipa, maka deformasi elastis akan hilang sehingga hanya meninggalkan deformasi permanen. Inilah yang menyebabkan adanya *dent* pada pipa. Simulasi elemen hingga dilakukan pada kedalaman indentasi 1 mm, 1,5 mm, dan 2 mm dengan variasi panjang indentor 0,5D, 1D, dan 1,5D.



Gambar 2. Tegangan Sisa pada Pipa dengan Variasi Kedalaman Indentasi

Gambar 2 menunjukkan pola distribusi tegangan von-Mises pada pipa dengan kedalaman indentasi yang berbeda pada panjang indentor yang sama. Pada kondisi tersebut indentor sudah tidak kontak dengan pipa. Dari pola distribusi tegangan von-Mises yang terjadi, diperoleh hasil bahwa daerah distribusi tegangan von-Mises pada pipa dipengaruhi oleh kedalaman indentasi. Semakin dalam indentasi yang diberikan, maka daerah distribusi tegangan von-Mises pada pipa semakin tersebar atau menjadi semakin luas. Tegangan von-Mises maksimum cenderung terjadi pada bagian pipa yang kontak dengan kedua *tangent* indentor.

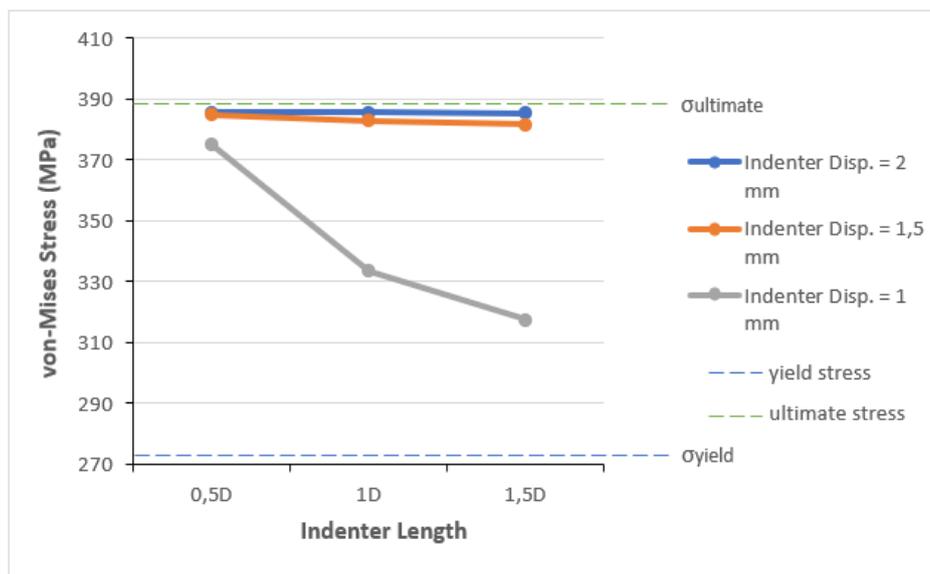
Gambar 3 menunjukkan pola distribusi tegangan von-Mises pada pipa dengan panjang indentor yang sama pada kedalaman indentasi yang sama. Pada kondisi tersebut indentor sudah tidak kontak dengan pipa. Dari pola distribusi tegangan von-Mises yang terjadi, diperoleh hasil bahwa daerah distribusi tegangan von-Mises pada pipa dipengaruhi pula oleh panjang indentor. Semakin panjang indentor yang diberikan, maka daerah distribusi tegangan von-Mises pada pipa semakin tersebar.



Gambar 3. Tegangan Sisa pada Pipa dengan Variasi Panjang Indentor

#### IV. PEMBAHASAN

Pola nilai tegangan sisa (*residual stress*) pada pipa dengan variasi kedalaman indentasi ditunjukkan pada Gambar 4. Terlihat bahwa seiring dengan meningkatnya panjang indentor akan mengakibatkan penurunan nilai tegangan sisa. Hal ini disebabkan karena luasan indentor yang semakin besar mengakibatkan beban yang mengenai pipa akan semakin terdistribusi. Dengan memvariasikan kedalaman indentasi, terlihat bahwa semakin dalam indentasi yang diberikan maka nilai tegangan sisa akan meningkat.



Gambar 4. Pola Nilai Tegangan Sisa (*Residual Stress*) pada Pipa

Nilai tegangan sisa terbesar dalam bentuk tegangan von-Mises adalah 385,62 MPa yang terjadi pada kedalaman indentasi 2 mm dengan panjang indentor 0,5D. Pipa mengalami cacat *dent* dengan dibuktikan dengan nilai stress yang lebih besar dari *yield strength* 272 MPa sehingga mengalami deformasi plastis dan juga masih dalam batas aman karena nilai stress masih dibawah nilai *ultimate strength* 387 MPa dari material pipa SAE/AISI 1020. Kondisi pembebanan diperoleh dengan pengaturan *displacement* dari indentor, sehingga tegangan von-Mises maksimum yang didapatkan tidak melebihi nilai *ultimate strength*.

## V. KESIMPULAN

Pola distribusi deformasi permanen, regangan plastis, dan tegangan sisa pada bagian pipa penyalur dengan cacat *dent* berbentuk silindris menunjukkan bahwa semakin panjang indenter akan menurunkan nilai deformasi permanen, regangan plastis, dan tegangan sisa. Sedangkan, semakin dalam indentasi yang diberikan akan menaikkan nilai deformasi permanen, regangan plastis, dan tegangan sisa. Daerah distribusi tegangan von-Mises pada pipa akan semakin tersebar atau menjadi luas seiring dengan semakin dalamnya indentasi yang diberikan. Nilai total deformasi akibat pembebanan di atas *yield strength* dari material pipa akan menyisakan deformasi permanen yang kemudian membentuk *dent* pada pipa penyalur.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin dan Industri Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada atas semua bantuan, kesempatan dan fasilitasnya. Selain itu para penulis mengucapkan terima kasih kepada Saudara Diaz Andamaz dan Saudari Faradilla Fauziyah Risnawati yang telah memberikan dukungan waktu dan tenaga dalam kegiatan penelitian ini.

## REFERENSI

- [1] J. Luo, Y. Zhang, L. Li, L. Zhu, G. Wu, Fatigue failure analysis of dented pipeline and simulation calculation, *Engineering Failure Analysis* 113 (2020) 104572.
- [2] A. Cosham, P. Hopkins, The Effect of Dents in Pipelines—guidance in the Pipeline Defect Assessment Manual, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 81 (2004) 127–139.
- [3] S. T. Yan, X. L. Shen, Z. J. Jin, on elastic-plastic collapse of subsea pipelines under external hydrostatic pressure and denting force, *Applied Ocean Research* 58 (2016) 305–321.
- [4] Y. Wu, N. Tang, P. Zhang, The comparison of dented pipeline displacement calculation methods, *Engineering Failure Analysis* 57 (2015) 562–573.
- [5] Y. Wu, J. Xiao, P. Zhang, The analysis of damage degree of oil and gas pipeline with type II plain dent, *Engineering Failure Analysis* 66 (2016) 212–222.
- [6] Y. Shuai, J. Shuai, X. Zhang, Experimental and numerical investigation of the strain response of a dented API 5L X52 pipeline subjected to continuously increasing internal pressure, *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 56 (2018) 81–92.
- [7] M. Ramezani, T. Neitzert, Effect of internal pressure and dent depth on strain distribution of pressurized pipe subjected to indentation, *Applied Mechanics and Materials* 376 (2013) 135–139.
- [8] L. Zhu, G. Wu, L. Li, J. Luo, Y. Tian, C. Xu, R. Lin, Strain evolution characteristics of X80 line pipes with plain dent, *Natural Gas Industry* 7 (2020) 49–55.
- [9] P. Zhao, J. Shuai, Z. Lv, K. Xu, Strain response of API 5L X80 pipeline subjected to indentation, *Applied Ocean Research* 94 (2020) 101991.
- [10] Pinheiro, B.C., Pasqualino, I.P., 2009, Fatigue analysis of damaged steel pipelines under cyclic internal pressure, *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, pp. 962–973