

ANALISIS PENGARUH BEBAN EKSTERNAL TERHADAP DISTRIBUSI REGANGAN PADA PIPA MELALUI PENDEKATAN *FINITE ELEMENT METHOD*

Faradilla Fauziyah Risnawati*, Muhammad Arif Nur Huda, Galuh Zuhria Kautzar,
Diama Rizky Septiawan

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang

*E-mail: faradilla.fauziyah@polinema.ac.id

Abstrak: Penelitian ini menganalisis pengaruh beban eksternal terhadap distribusi regangan plastis pada pipa baja API 5L X80 menggunakan *Finite Element Method*. Beban eksternal direpresentasikan melalui proses indentasi menggunakan indenter berbentuk *spherical* dengan variasi diameter 75 mm, 100 mm, dan 125 mm, serta kedalaman indentasi 2 mm, 3 mm, dan 4 mm. Simulasi dilakukan pada kondisi tanpa tekanan internal untuk mengevaluasi distribusi regangan plastis yang terbentuk setelah pembebanan. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan kedalaman indentasi secara signifikan meningkatkan nilai maksimum regangan plastis dan memperluas area deformasi plastis pada dinding pipa. Sebaliknya, peningkatan diameter indenter cenderung menurunkan nilai maksimum regangan plastis, namun memperluas area distribusi regangan. Konsentrasi regangan maksimum ditemukan pada sisi *dent (flank)* dibandingkan pusat (*root*), yang berkaitan dengan bentuk indenter *spherical* yang mendistribusikan beban ke area transisi. Temuan ini menegaskan pentingnya parameter geometri dent dalam memprediksi respon regangan plastis pada pipa, sehingga dapat digunakan sebagai acuan untuk evaluasi integritas struktural pipa dalam aplikasi industri minyak dan gas.

Kata Kunci: Pipa, indenter, *finite element method*, regangan plastis

Abstract: This study aims to analyse the effect of external loading on the distribution of plastic strain in API 5L X80 steel pipes using the Finite Element Method. External loading was modelled through an indentation process using a spherical indenter with diameter variations of 75 mm, 100 mm, and 125 mm, and indentation depths of 2 mm, 3 mm, and 4 mm. The simulation was conducted under zero internal pressure conditions to evaluate the plastic strain distribution formed after loading. The results show that increasing the indentation depth significantly increases the maximum plastic strain value and expands the deformation area on the pipe wall. Conversely, increasing the indenter diameter tends to reduce the maximum plastic strain value but broadens the affected area of strain distribution. The maximum strain concentration is located at the dent's flank rather than the root, which is caused by the load distribution from the spherical indenter toward the transition area. These findings highlight the importance of dent geometry parameters in predicting the plastic strain response of pipes, providing valuable insights for assessing the structural integrity of pipelines in oil and gas industry applications.

Keywords: Pipe, indenter, finite element method, plastic strain

PENDAHULUAN

Pipa merupakan salah satu infrastruktur terpenting dalam sistem transportasi fluida pada industri minyak dan gas, karena dinilai aman, efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan. Perannya mencakup seluruh rantai produksi, mulai dari sektor hulu, proses pengolahan, hingga distribusi pada sektor hilir, untuk menyalurkan minyak mentah, produk olahan, maupun gas alam secara berkesinambungan. Jalur pemasangannya sangat bervariasi, baik di darat, bawah tanah, maupun bawah laut, sehingga menghadapi pipa pada berbagai kondisi operasional dan lingkungan yang dapat memengaruhi keandalannya. Tantangan ini semakin besar mengingat keterbatasan pemantauan secara langsung dan berkelanjutan, terutama di lokasi-lokasi yang terpencil atau sulit dijangkau (Allouti dkk., 2012). Kerusakan pada pipa tidak hanya berpotensi mengganggu kelancaran operasi, tetapi juga dapat menimbulkan masalah keselamatan, pencemaran lingkungan, dan kerugian ekonomi akibat kebocoran, ledakan, atau penghentian operasi dalam jangka waktu lama. Keandalan sistem perpipaan sendiri telah menjadi perhatian utama dalam desain, konstruksi, hingga perawatannya (Antaki, 2003).

Salah satu bentuk kerusakan mekanis yang sering dijumpai pada jaringan perpipaan adalah cacat *dent*, yaitu deformasi plastis ke arah dalam pada dinding pipa akibat benturan atau beban eksternal. Cacat ini dapat terjadi selama proses pemasangan, pengoperasian, maupun perawatan pipa, dengan penyebab yang beragam seperti aktivitas konstruksi, jatuhnya jangkar kapal, tersangkutnya peralatan penangkap ikan, atau tekanan dari benda keras pada pipa yang tertanam (Cosham & Hopkins, 2004). Keberadaan *dent* dapat menurunkan integritas struktural pipa dengan meningkatkan konsentrasi tegangan yang memicu retak dan kebocoran, menyebabkan kerusakan fatik akibat fluktuasi tekanan internal, mempercepat terjadinya *stress corrosion cracking* pada material yang kurang ulet, serta mengganggu pengoperasian alat inspeksi internal seperti *Pipeline Inspection Gauge* (PIG) yang dibutuhkan untuk mendeteksi kerusakan (Ramezani & Neitzert, 2013).

Fenomena yang terjadi pada pipa dengan cacat *dent* melibatkan distribusi regangan plastis yang kompleks. Pada kondisi ini, efek *strain hardening* dapat mengubah sifat mekanik material, khususnya *yield strength*, yang memengaruhi kemampuan pipa dalam menahan beban berikutnya (Allouti dkk., 2012). Studi menunjukkan bahwa bentuk dan ukuran *dent* memiliki pengaruh signifikan terhadap lokasi konsentrasi regangan. Shuai dkk. (2018) mengungkapkan bahwa pada pipa API 5L X52, regangan maksimum justru terjadi pada sisi *dent* (*flank*) dibandingkan pada titik terdalamnya (*root*). Zhu dkk. (2020) juga menunjukkan bahwa semakin dalam *dent* pada pipa X80, semakin tinggi regangan plastis yang terbentuk baik pada arah aksial maupun radial, yang pada akhirnya meningkatkan risiko kegagalan lokal.

Pipa *dent* akibat beban eksternal telah banyak dikaji dalam kondisi bertekanan internal, karena tekanan fluida menjadi faktor dominan yang mempercepat kegagalan struktural (Shuai dkk., 2018; Zhao dkk., 2020). Namun, dalam praktik lapangan, pipa juga sering berada dalam kondisi tanpa tekanan internal, misalnya ketika dilakukan instalasi awal, inspeksi, aktivitas perawatan, atau penghentian operasi (*shutdown*). Pada fase ini, pipa sangat rentan terhadap pengaruh beban eksternal seperti tumbukan peralatan berat, jatuhnya jangkar, maupun tekanan dari benda keras pada tanah atau dasar laut. Beban eksternal pada kondisi tanpa tekanan internal dapat menghasilkan deformasi permanen berupa *dent*, yang berpotensi menjadi titik awal kelemahan material ketika pipa kembali beroperasi di bawah tekanan fluida.

Urgensi penelitian pada kondisi tanpa tekanan internal terletak pada pentingnya memahami karakteristik deformasi awal dan distribusi regangan plastis akibat beban eksternal murni. Fenomena ini dapat menentukan kualitas integritas awal pipa sebelum memasuki fase operasi. Apabila deformasi permanen tidak terdeteksi atau tidak dievaluasi dengan baik, maka risiko kegagalan dini akan meningkat ketika pipa menerima kombinasi tekanan internal dan beban siklik operasional. Ramezani dan Neitzert (2013) menunjukkan bahwa interaksi antara tekanan internal dan deformasi akibat indentasi menimbulkan perilaku regangan yang kompleks. Oleh karena itu, pemahaman awal mengenai distribusi regangan plastis tanpa tekanan internal penting untuk memisahkan kontribusi murni beban eksternal dari pengaruh tekanan fluida. *Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration* (PHMSA, 2020) juga menyebutkan bahwa lebih dari 20% kegagalan pipa di Amerika Serikat disebabkan oleh kerusakan eksternal, termasuk akibat aktivitas konstruksi dan beban mekanis lingkungan, sehingga penelitian dalam kondisi ini sangat relevan.

Pemilihan pipa baja API 5L X80 pada penelitian ini didasarkan pada karakteristik mekaniknya yang memiliki kekuatan tinggi, ketangguhan yang baik, serta ketahanan terhadap beban eksternal dan kondisi operasi berat. Material ini banyak digunakan pada jaringan perpipaan jarak jauh bertekanan tinggi di industri minyak dan gas. Selain itu, Shuai dkk. (2021) melaporkan bahwa pipa X80 memiliki kinerja unggul dalam menahan deformasi lokal seperti *compressive buckling* pada kondisi pembebanan kompleks, termasuk saat terjadi korosi dan momen lentur, sehingga relevan untuk dianalisis dalam konteks pengaruh beban eksternal terhadap distribusi regangan plastis.

Finite Element Method (FEM) telah banyak digunakan untuk menganalisis respons mekanik pipa akibat beban eksternal karena kemampuannya memodelkan interaksi kompleks antara geometri *dent*, mekanisme kontak, dan sifat material nonlinier. Dengan FEM, distribusi regangan plastis, tegangan Von Mises, dan profil deformasi dapat diprediksi secara lebih akurat dibandingkan dengan metode empiris semata (Fish & Belytschko, 2007). Selain itu, teori mekanika material menunjukkan bahwa deformasi plastis dan perilaku tegangan-regangan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh interaksi antara beban dan sifat material, yang dapat dianalisis dengan pendekatan mekanika lanjutan (Boresi & Schmidt, 2003). Walaupun sejumlah penelitian telah membahas pengaruh variasi

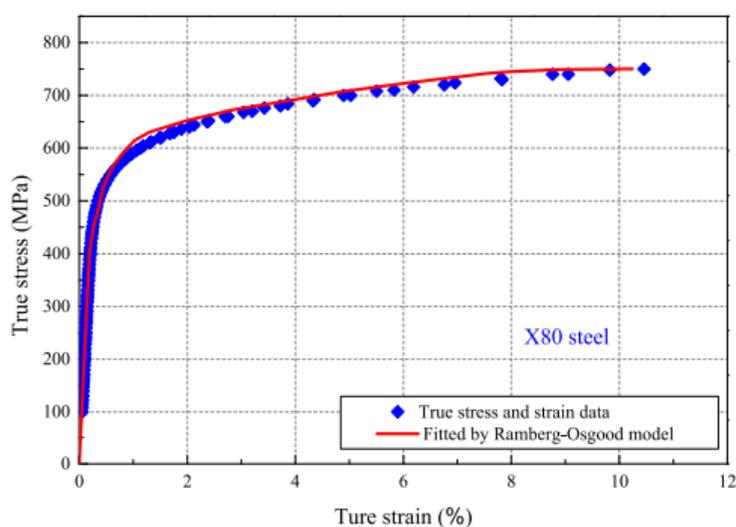
kedalaman dan diameter indentor terhadap perilaku pipa, sebagian besar fokus pada kondisi pipa yang bertekanan internal. Karakteristik distribusi regangan pada pipa dengan *dent* akibat beban eksternal tanpa tekanan internal masih jarang dikaji secara rinci.

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kedalaman dan diameter indentor terhadap distribusi regangan plastis pada pipa baja API 5L X80 yang dibebani secara eksternal dalam kondisi tanpa tekanan internal. Simulasi dilakukan menggunakan metode FEM untuk memperoleh pemahaman yang lebih detail mengenai pengaruh parameter geometri *dent* terhadap lokasi dan intensitas regangan plastis. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan dalam evaluasi integritas pipa serta memberikan masukan teknis bagi perancangan dan strategi perawatan di industri minyak dan gas.

METODE

Penelitian ini dilakukan menggunakan *Finite Element Method* (FEM) dengan perangkat lunak *ANSYS 2020* untuk menganalisis pengaruh variasi diameter indentor dan kedalaman indentasi terhadap distribusi regangan plastis pada pipa. Pemodelan geometri pipa dan indentor dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks 2019*, kemudian geometri yang sudah dibuat diimpor ke *ANSYS* untuk proses pra-pemrosesan, pembebanan, dan analisis hasil.

Material yang digunakan adalah pipa baja API 5L X80 yang umum diaplikasikan pada industri minyak dan gas bumi. Data sifat mekanik material, dimensi pipa, serta parameter simulasi diperoleh berdasarkan hasil eksperimen yang dilaporkan oleh Shuai dkk. (2021) dalam kajiannya mengenai perilaku pipa X80 terhadap beban mekanis. Pemilihan pipa API 5L X80 didasarkan pada sifat mekaniknya yang memiliki kekuatan tinggi, ketangguhan yang baik, serta ketahanan yang memadai terhadap beban eksternal dan kondisi operasi berat, sehingga banyak digunakan pada sistem perpipaan jarak jauh dengan tekanan tinggi. Diagram tegangan-regangan dan sifat mekanik pipa API 5L X80 didapatkan dari penelitian Shuai dkk. (2021) sebagaimana tercantum dalam Gambar 1 dan Tabel 1.

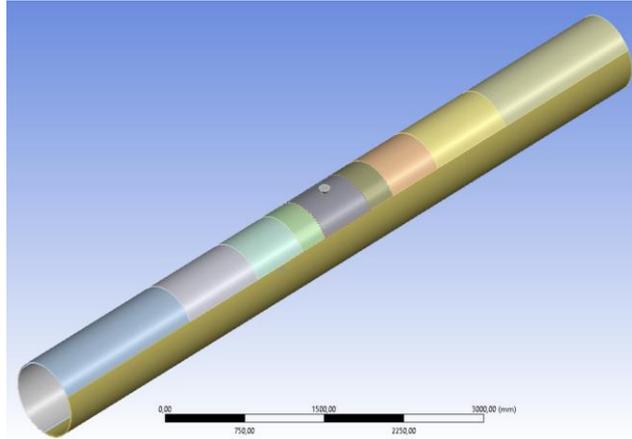


Gambar 1. Diagram tegangan-regangan pipa API 5L X80 (Shuai dkk., 2021)

Tabel 1. Sifat Mekanik Material Pipa API 5L X80 (Shuai dkk., 2021)

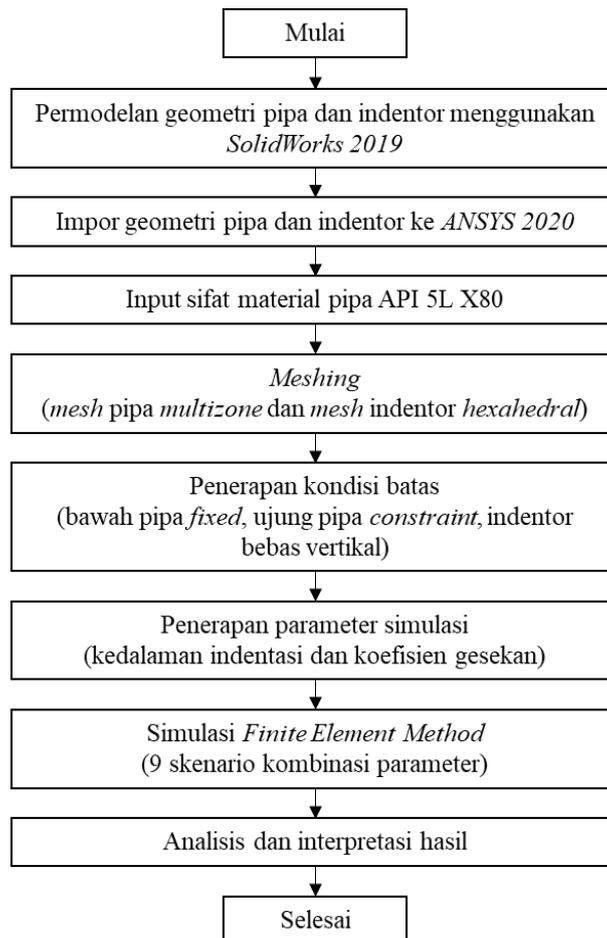
Parameter	Nilai
Modulus elastisitas (E)	208 GPa
Rasio Poisson (ν)	0,3
Tegangan luluh (σ_y)	527 MPa
Tegangan <i>ultimate</i> (σ_u)	742 MPa

Model geometri pipa dan indentor hasil pemodelan CAD ditunjukkan pada Gambar 2. Proses pembentukan *dent* dilakukan dengan indentor pejal berbentuk bola yang ditempatkan di tengah pipa. Variasi diameter indentor yang digunakan adalah 75 mm, 100 mm, dan 125 mm, sedangkan variasi kedalaman indentasi ditetapkan sebesar 2 mm, 3 mm, dan 4 mm dari permukaan luar pipa.



Gambar 2. Permodelan geometri pipa dan indenter

Kontak antara indenter dan pipa dimodelkan sebagai *frictional contact* dengan koefisien gesekan 0,3. Kondisi batas pipa ditetapkan dengan bagian bawah pipa difiksasi pada arah sumbu vertikal untuk mencegah pergeseran selama proses indentasi, sementara ujung-ujung pipa dibatasi pergerakannya (*constraint*) kecuali pada arah vertikal untuk memungkinkan timbulnya tegangan tarik. Indenter diberikan kondisi batas bebas pada arah vertikal hingga mencapai kedalaman indentasi yang diinginkan, kemudian diangkat kembali hingga tidak terjadi kontak dengan pipa. *Meshing* yang digunakan pada pipa adalah *multizone* dan pada indenter adalah *hexahedral*. Parameter penelitian dan jenis perangkat yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

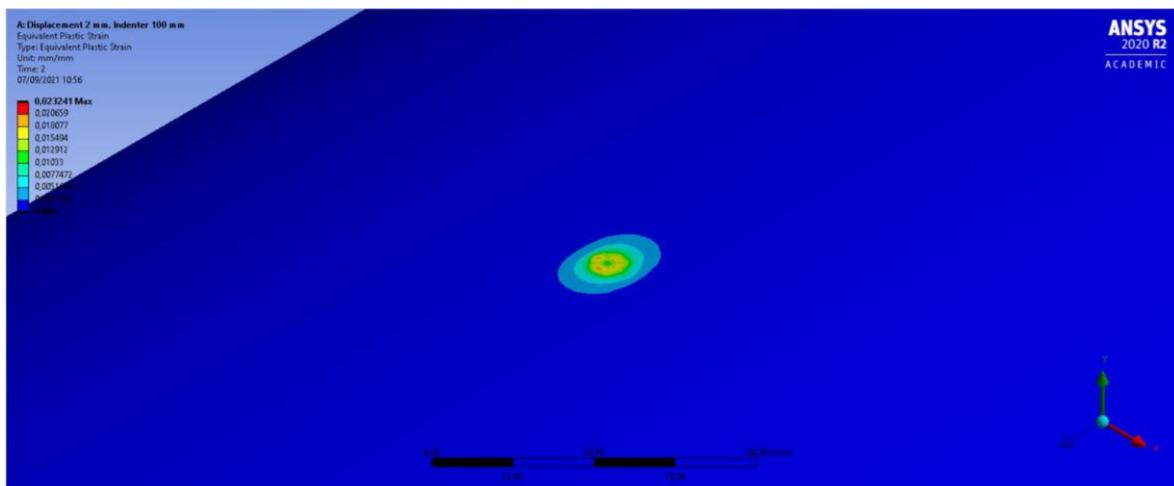
Parameter/Perangkat	Spesifikasi / Jenis
Perangkat lunak FEM	ANSYS 2020
Perangkat lunak CAD	SolidWorks 2019
Diameter luar pipa (D)	720 mm
Tebal dinding pipa (t)	8,1 mm
Panjang pipa (L)	7466 mm
Diameter indenter	75 mm, 100 mm, 125 mm
Kedalaman indentasi	2 mm, 3 mm, 4 mm
Kondisi kontak	Gesek (<i>frictional</i>), $\mu = 0,3$
Kondisi pembebanan	<i>Displacement-controlled</i>
Jenis <i>mesh</i> pipa	<i>Multizone</i>
Jenis <i>mesh</i> indenter	<i>Hexahedral</i>
Tekanan internal	0 MPa (tanpa tekanan)

Setiap kombinasi diameter indenter dan kedalaman indentasi disimulasikan secara terpisah, sehingga total terdapat 9 skenario simulasi. Hasil keluaran yang digunakan adalah distribusi regangan plastis. Tahapan keseluruhan prosedur penelitian ini digambarkan secara ringkas dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.

HASIL DAN DISKUSI

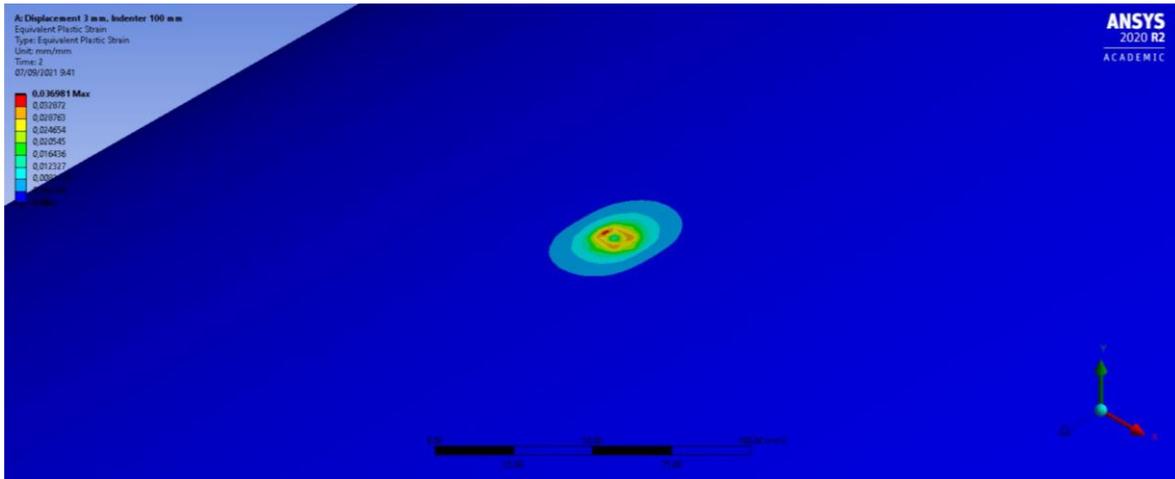
Hasil

Simulasi diawali dengan membentuk kontak antara indenter dan permukaan pipa, kemudian kontak tersebut dihilangkan. Saat indenter dilepaskan, deformasi elastis yang terjadi akan kembali, sehingga yang tersisa hanyalah deformasi permanen yang membentuk *dent* pada pipa. *Finite Element Method* (FEM) dilakukan dengan variasi kedalaman indentasi 2 mm, 3 mm, dan 4 mm, serta diameter indenter 75 mm, 100 mm, dan 125 mm.

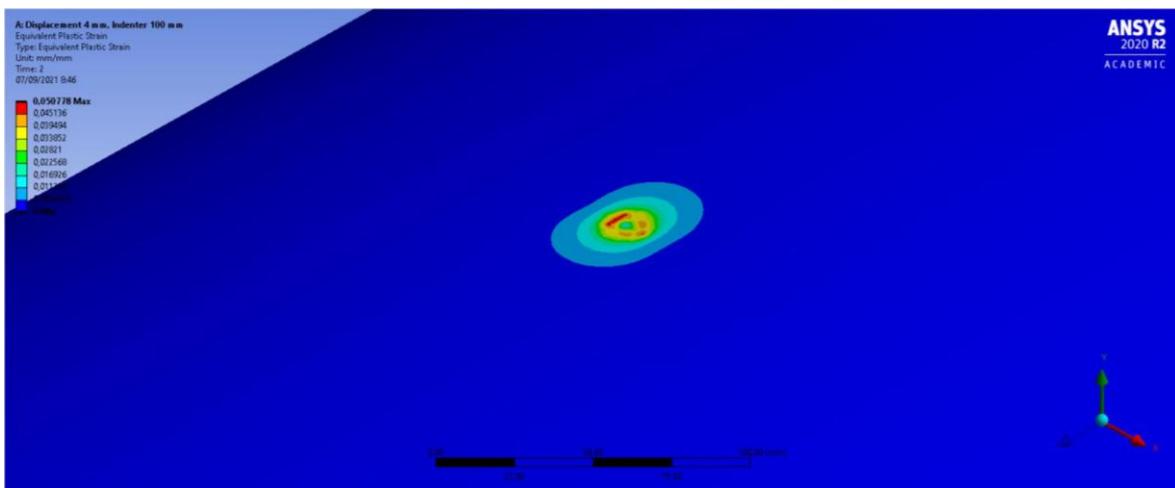


Gambar 4. Regangan plastis dengan diameter indenter 100 mm dan kedalaman indentasi 2 mm

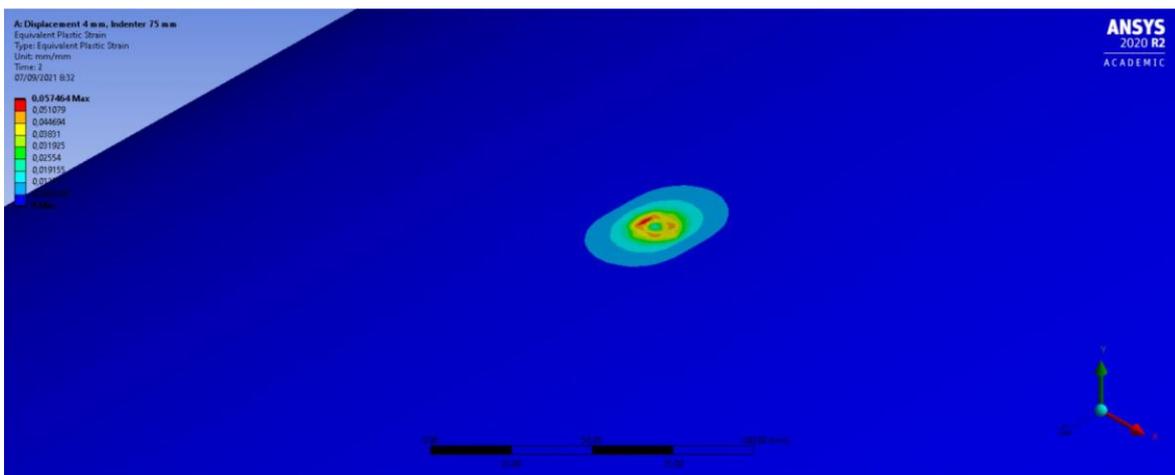
Hasil simulasi pada Gambar 4, 5, dan 6 menunjukkan pengaruh kedalaman indentasi terhadap distribusi regangan plastis pada pipa dengan diameter indenter tetap 100 mm. Pada kedalaman 2 mm (Gambar 4), regangan plastis baru mulai terjadi di sisi *dent* (*flank*). Ketika kedalaman ditingkatkan menjadi 3 mm (Gambar 5), area distribusi regangan plastis meluas, disertai peningkatan nilai maksimum regangan. Kondisi paling kritis ditunjukkan pada kedalaman 4 mm (Gambar 6), di mana regangan plastis menyebar lebih luas dan mencapai nilai puncak tertinggi, menandakan deformasi permanen yang signifikan. Perbandingan ini mengindikasikan bahwa semakin dalam indentasi yang diberikan, semakin besar intensitas dan cakupan regangan plastis, sehingga risiko kerusakan struktural pipa meningkat secara proporsional dengan kedalaman deformasi.



Gambar 5. Regangan plastis dengan diameter indenter 100 mm dan kedalaman indentasi 3 mm



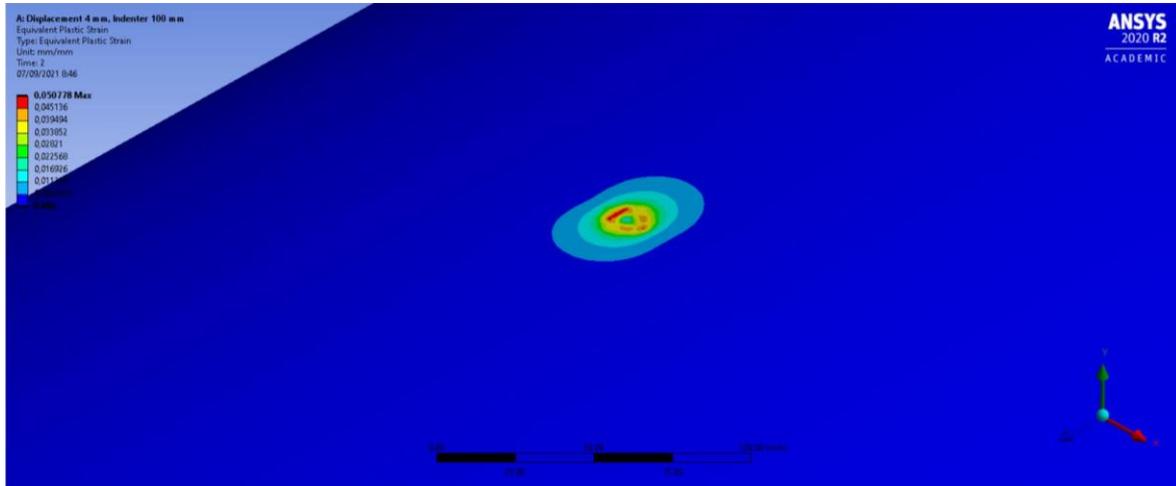
Gambar 6. Regangan plastis dengan diameter indenter 100 mm dan kedalaman indentasi 4 mm



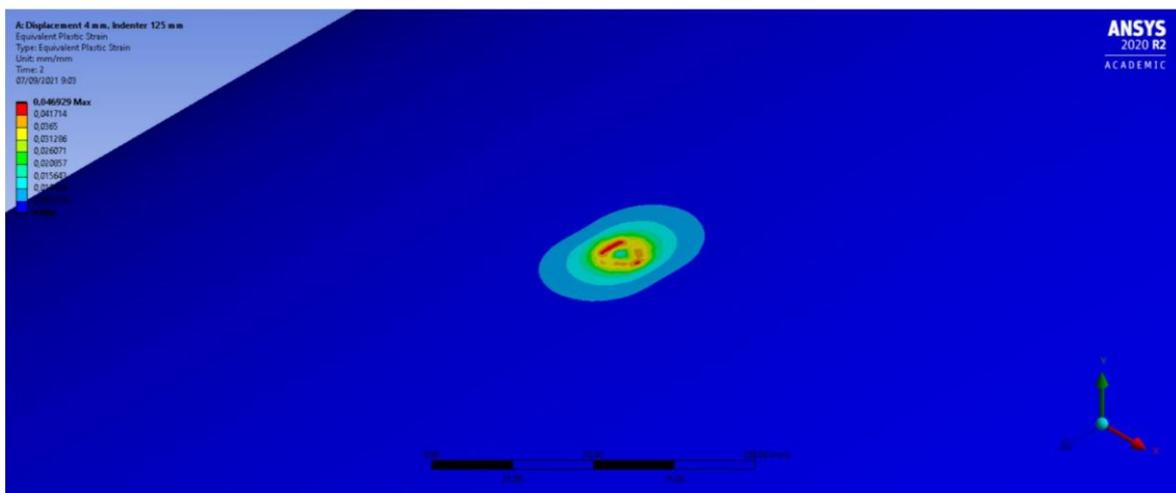
Gambar 7. Regangan plastis dengan diameter indenter 75 mm dan kedalaman indentasi 4 mm

Hasil simulasi pada Gambar 7, 8, dan 9 memperlihatkan pengaruh variasi diameter indenter terhadap distribusi regangan plastis pada pipa dengan kedalaman indentasi tetap 4 mm. Pada diameter indenter 75 mm (Gambar 7), konsentrasi regangan plastis relatif tinggi namun area distribusi masih sempit di sekitar sisi *dent* (*flank*). Ketika diameter indenter ditingkatkan menjadi 100 mm (Gambar 8), area distribusi regangan plastis menjadi lebih luas, sementara nilai maksimumnya mulai menurun

karena beban terdistribusi lebih merata. Kondisi ini semakin jelas pada diameter indenter 125 mm (Gambar 9), di mana area regangan plastis mencakup wilayah yang lebih besar namun nilai regangan maksimum semakin kecil akibat berkurangnya konsentrasi beban pada satu titik. Perbandingan ini menunjukkan bahwa semakin besar diameter indenter, semakin luas area yang terdampak regangan plastis, tetapi intensitas regangan maksimum cenderung menurun.



Gambar 8. Regangan plastis dengan diameter indenter 100 mm dan kedalaman indentasi 4 mm



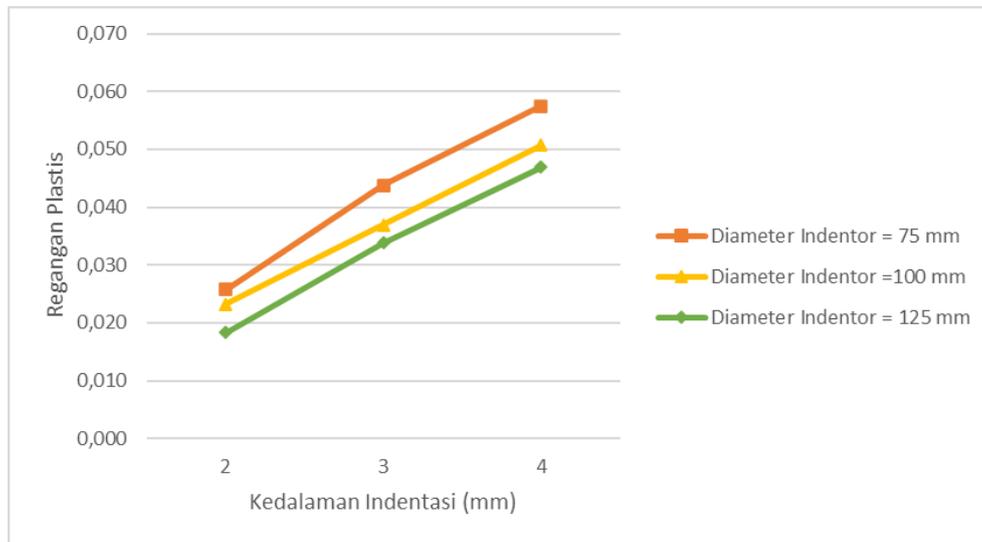
Gambar 9. Regangan plastis dengan diameter indenter 125 mm dan kedalaman indentasi 4 mm

Tabel 3. Data hasil simulasi pada pipa

Diameter Indenter (mm)	Kedalaman Indentasi (mm)	Regangan Plastis
75	2	0,026
	3	0,044
	4	0,057
100	2	0,023
	3	0,037
	4	0,051
125	2	0,018
	3	0,034
	4	0,047

Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi regangan tidak terletak pada bagian pusat indentasi, melainkan pada area sisi samping *dent*. Kondisi ini dipengaruhi oleh bentuk indenter yang

spherical, sehingga beban tidak terfokus pada satu titik pusat, melainkan terdistribusi ke area sekitarnya. Akibatnya, regangan maksimum pada pipa terbentuk di wilayah transisi antara bagian *dent* dan permukaan pipa yang tidak terdeformasi.



Gambar 10. Tren nilai regangan plastis

Seluruh data hasil simulasi regangan plastis pada pipa API 5L X80 dengan variasi kedalaman indentasi dan diameter indenter ditunjukkan pada Tabel 3, sedangkan tren hubungan antarparameter divisualisasikan pada Gambar 10. Dari tabel terlihat bahwa peningkatan kedalaman indentasi dari 2 mm hingga 4 mm secara konsisten menghasilkan kenaikan nilai regangan plastis maksimum pada semua variasi diameter indenter. Grafik pada Gambar 10 memperjelas kecenderungan ini, di mana regangan plastis meningkat hampir linier terhadap kedalaman indentasi. Selain itu, pengaruh diameter indenter juga tampak jelas, di mana diameter yang lebih kecil menghasilkan regangan plastis maksimum lebih tinggi akibat konsentrasi beban yang sempit, sedangkan diameter yang lebih besar menurunkan intensitas regangan namun memperluas area distribusinya. Penyajian grafik ini memberikan gambaran komprehensif mengenai kecenderungan data numerik pada Tabel 3 dan mempertegas peran dominan kedalaman indentasi terhadap intensitas regangan plastis.

Diskusi

Peningkatan kedalaman indentasi terbukti secara langsung berkontribusi pada meningkatnya intensitas maupun luasan distribusi regangan plastis pada pipa. Fenomena ini menunjukkan bahwa kedalaman deformasi memiliki pengaruh yang sangat dominan terhadap konsentrasi regangan pada pipa dengan cacat *dent*. Semakin dalam penetrasi yang dihasilkan oleh indenter, semakin besar pula deformasi plastis yang dialami material di sekitar area kontak. Kondisi ini sejalan dengan temuan Zhu dkk. (2020) yang melaporkan bahwa regangan plastis cenderung meningkat secara konsisten seiring bertambahnya kedalaman *dent*, baik pada arah aksial maupun radial, dengan konsentrasi regangan terbesar terlokalisasi di sekitar zona deformasi.

Sebaliknya, pengaruh variasi diameter indenter menunjukkan hubungan terbalik terhadap nilai maksimum regangan plastis. Peningkatan diameter indenter menghasilkan distribusi beban kontak pada area yang lebih luas, sehingga konsentrasi regangan pada satu titik menurun. Meskipun demikian, distribusi regangan menjadi lebih merata dan meliputi area yang lebih besar di sekitar *dent*. Hasil ini sejalan dengan temuan Zhao dkk. (2020), yang mengonfirmasi bahwa radius indenter yang lebih besar mampu menurunkan intensitas konsentrasi tegangan lokal, namun secara bersamaan memperluas zona yang terdampak oleh regangan plastis.

Selain itu, hasil simulasi juga mengungkapkan bahwa puncak regangan plastis justru terjadi di sisi *dent* (*flank*) dan bukan di pusat (*root*). Pola ini berkaitan erat dengan geometri indenter berbentuk *spherical*, yang menyebabkan distribusi beban tidak terfokus di titik terdalam, melainkan menyebar ke area transisi antara zona deformasi dan bagian pipa yang masih berada dalam kondisi elastis. Fenomena ini konsisten dengan pengamatan Shuai dkk. (2018), yang menemukan bahwa pada pipa

dengan *dent* akibat pembebanan menggunakan indenter berbentuk bola, distribusi regangan maksimum cenderung terletak pada daerah peralihan di tepi deformasi, bukan di pusat cekungan.

Secara keseluruhan, temuan ini menegaskan bahwa parameter geometri dent, khususnya kedalaman dan diameter indenter, merupakan faktor kunci yang menentukan karakteristik regangan plastis pada pipa. Peningkatan kedalaman dent secara signifikan meningkatkan intensitas regangan plastis (Zhu dkk., 2020), sementara peningkatan diameter indenter cenderung menurunkan nilai puncak regangan, namun memperluas area pengaruh deformasi (Zhao dkk., 2020). Implikasi dari hasil ini sangat penting bagi analisis keandalan pipa, karena pemahaman terhadap pengaruh kedua parameter ini dapat digunakan untuk memprediksi tingkat kerusakan dan merancang strategi mitigasi yang tepat.

SIMPULAN

Hasil analisis menggunakan *Finite Element Method* menunjukkan bahwa kedalaman dan diameter indenter memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi serta intensitas regangan plastis pada pipa API 5L X80. Peningkatan kedalaman indentasi secara konsisten meningkatkan nilai maksimum regangan plastis dan memperluas area deformasi, sedangkan peningkatan diameter indenter cenderung menurunkan nilai maksimum regangan plastis namun memperbesar luas area distribusinya. Konsentrasi regangan plastis tidak terletak pada pusat *dent*, melainkan pada sisi transisi antara area terdeformasi dan bagian pipa yang tidak mengalami deformasi, yang disebabkan oleh bentuk indenter *spherical* yang mendistribusikan beban secara merata di sekitar titik kontak. Temuan ini mengindikasikan bahwa pengendalian parameter geometri *dent* menjadi aspek krusial dalam memprediksi respon regangan plastis pipa terhadap beban eksternal, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam evaluasi integritas pipa pada industri minyak dan gas. Inspeksi visual maupun *Non-Destructive Testing* (NDT) pada pipa direkomendasikan difokuskan pada area *flank dent* sebagai titik kritis konsentrasi regangan. Deteksi dini perlu dilakukan terutama jika kedalaman deformasi mendekati batas kritis standar industri. Pendekatan ini dapat membantu mencegah kegagalan dini serta meningkatkan efektivitas program pemeliharaan berbasis integritas pipa.

DAFTAR RUJUKAN

- Allouti, M., Schmitt, C., Pluvinage, G., Gilgert, J., & Hariri, S. (2012). Study of the influence of dent depth on the critical pressure of pipeline. *Engineering Failure Analysis*, 21, 40–51.
- American Petroleum Institute. (2012). *Specification for Line Pipe: API Specification 5L (45th ed.)*. Washington, DC: Author.
- Antaki, G. (2003). *Piping and Pipeline Engineering: Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair*. Charleston, SC: CPT Press.
- ASME. (2019). *ASME B31.4 – Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*. New York, NY: The American Society of Mechanical Engineers.
- Ma, B. (2018). Influence of plastic deformation capacity on failure behavior of pipelines. *Materials Science and Engineering*, 301, 012151.
- Boresi, A. P., & Schmidt, R. J. (2003). *Advanced Mechanics of Materials*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Cosham, A., & Hopkins, P. (2004). The effect of dents in pipelines — Guidance in the pipeline defect assessment manual. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 81, 127–139.
- Fish, J., & Belytschko, T. (2007). *A First Course in Finite Elements*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
- Hafez, K. (2021). The role of a plain dent on the failure mode of a crude oil pipeline. *Engineering Failure Analysis*, 122, 105291.
- Luo, J., Zhang, Y., Li, Y., Zhu, L., & Wu, G. (2020). Fatigue failure analysis of dented pipeline and simulation calculation. *Engineering Failure Analysis*, 113, 104572.
- PHMSA. (2020). *Pipeline Failure Causes by Category*. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, U.S. Department of Transportation.
- Ramezani, M., & Neitzert, T. (2013). Effect of internal pressure and dent depth on strain distribution of pressurized pipe subjected to indentation. *Applied Mechanics and Materials*, 376, 135–139.

- Shuai, Y., Shuai, J., & Zhang, X. (2018). 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, 81–92.
- Shuai, Y., Wang, X., Feng, C., Zhu, Y., Wang, C., Sun, T., Han, J., & Cheng, Y. (2021). A novel strain-based assessment method of compressive buckling of X80 corroded pipelines subjected to bending moment load. *Thin-Walled Structures*, 167, 108172.
- Zhao, P., Shuai, J., Lv, Z., & Xu, K. (2020). Strain response of API 5L X80 pipeline subjected to indentation. *Applied Ocean Research*, 94, 101991.
- Zhu, L., Wu, G., Li, L., Luo, J., Tian, Y., Xu, C., & Lin, R. (2020). Strain evolution characteristics of X80 line pipes with plain dent. *Natural Gas Industry*, 7, 49–55.