

# Analisis Distribusi Tegangan Pipa Berlubang Elips yang Diperkuat dengan Tambalan

Hendrik Setyawan<sup>1</sup>, Rachmat Sriwijaya<sup>2\*</sup>

<sup>1,2</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika No. 2, Yogyakarta 55281, Indonesia

<sup>1</sup>[hendrik.setyawan@mail.ugm.ac.id](mailto:hendrik.setyawan@mail.ugm.ac.id)

<sup>2\*</sup>Penulis Korespondensi: [sriwijaya@mail.ugm.ac.id](mailto:sriwijaya@mail.ugm.ac.id)

**Abstrak** - Pipa merupakan salah satu peralatan penting dalam transportasi hasil produksi minyak dan gas bumi demi ketahanan energi nasional. Pipa polietilena semakin banyak dipergunakan karena tahan terhadap korosi, abrasi, dan benturan, sehingga biaya perawatan pipa-pipa berbahan polietilena lebih rendah dibandingkan menggunakan jenis pipa berbahan logam, terutama untuk distribusi gas di perumahan. Salah satu bentuk kerusakan pada pipa polietilena yang di benam dalam tanah adalah terjadinya retakan yang apabila di biarkan terus menerus akan menyebabkan lubang pada pipa. Kebocoran pipa karena lubang ini dapat mengganggu jalannya proses produksi, mencemari lingkungan atau bahkan membahayakan terhadap masyarakat sekitar. Perbaikan pipa dengan bentuk tambalan yang berbeda akan menyebabkan distribusi tegangan yang berbeda juga pada pipa tersebut. Perbedaan nilai distribusi tegangan ini akan mempengaruhi *integrity* pipa untuk menyalurkan fluida dalam pipa, sehingga analisis mengenai pengaruh bentuk dan ukuran tambalan terhadap distribusi tegangan von Mises pada pipa menjadi salah satu hal penting yang dapat dilakukan untuk mengetahui kehandalan pipa guna mendukung kelancaran proses produksi dan jaminan keselamatan yang tinggi. Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi mengenai pengaruh bentuk sudut dan lebar tambalan dan ukuran panjang tambalan terhadap distribusi tegangan Von Mises pada pipa dalam tanah yang memiliki lubang elips dengan metode elemen hingga. Hasil penelitian menunjukkan penambahan *patch* dengan ukuran geometri yang sesuai pada proses penguatan pipa yang berlubang elips dapat mengurangi maksimum tegangan Von Mises yang terjadi sehingga potensi kerusakan pipa akibat beban internal dan eksternal bisa dicegah. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa semakin panjang area yang dilindungi tambalan (*patch*), maka semakin bagus juga perlindungan terhadap pipa. Demikian juga semakin besar sudut (lebar) tambalan yang dipasang akan dapat menurunkan maksimum tegangan von Mises yang terjadi.

**Kata kunci** - pipa polietilena, lubang elips, Von Mises, tambalan, elemen hingga

**Abstract** - Pipelines is one of essential equipment in the transportation of oil and gas production for the national energy security. Polyethylene pipes are increasingly being used because they are resistant to corrosion, abrasion, and impact, so the maintenance costs for polyethylene pipes are lower than using metal pipes, especially for gas distribution in housing community. One form of damage at buried polyethylene pipes is the occurrence of cracks which if left continuously will cause holes in the pipe. Pipelines leakage due to this hole can disrupt the production process, pollute to the environment or even endanger the surrounding community. Pipeline repair using different geometries of patch will cause different stress distributions in the pipe. The difference in value the distribution of stresses that might affect integrity pipe to distribute fluid in a pipe, and an analysis of the shape and size of patch to the distribution of von mises stresses at the being one of the important things can do to know integrity of the pipelines to support the smooth production process and guarantee high safety. In this research, a simulation will be carried out on the effect of the shape (angle and width) of the patch and the length size of the patch on the von Mises stress distribution in a buried polyethylene pipe that having an elliptical hole using the finite element method. The results showed that the reinforced using of a patch with the appropriate geometry size in the process of strengthening the elliptical perforated pipe can reduce the maximum Von Mises stress that occurs so that the potential for pipe damage due to internal and external loads can be prevented. This research also shows that the length size protected area of the patch, the better the protection for the pipe. Likewise, the larger the angle (width) of the patch that is installed will be able to reduce the maximum Von Mises stresses that occurs.

**Keywords** – polyethylene pipe, elliptical hole, von mises, patches, finite element

## I. PENDAHULUAN

Operasi lapangan industri minyak dan gas membutuhkan sarana penunjang untuk menyalurkan minyak atau gas dari lapangan operasi menuju ke titik penjualan. Perpipaan merupakan fasilitas penyalur minyak dan gas yang banyak digunakan dikarenakan lebih murah biaya pembangunan dan perawatannya, juga memiliki resiko operasi yang lebih rendah dibanding fasilitas penyalur lainnya. Secara umum, pembangunan dan pengoperasian suatu fasilitas perpipaan tidak hanya bermanfaat dalam operasi perusahaan minyak dan gas saja, namun juga memberi peluang dalam pengembangan suatu daerah dikarenakan pembangunan

fasilitas pipa akan selalu diikuti dengan pembukaan lahan dan pembuatan jalan aksesnya sehingga masyarakat lambat laun akan berbondong-bondong menempati area sekitar jalan pipa tersebut. Hal tersebut di satu sisi menguntungkan pengembangan daerah namun di sisi lain akan membuat perusahaan mengalami kesulitan dalam mengoperasikan dan merawat pipa tersebut.

Salah satu bentuk kerusakan pada pipa polietilena yang di benam dalam tanah adalah terjadinya retakan (*crack*) yang apabila di biarkan terus menerus akan menyebabkan lubang pada pipa. Kebocoran pipa karena lubang ini dapat mengganggu jalannya proses produksi, mencemari lingkungan atau bahkan membahayakan terhadap masyarakat sekitar. Metode perbaikan yang umum di lakukan untuk pipa mengalami kerusakan karena terjadinya lubang elips adalah dengan melakukan penambalan (*patching*). Penelitian mengenai tegangan pada pipa bawah tanah dengan memperhitungkan beban lalu-lintas, tekanan di dalam pipa, modulus tanah, densitas tanah, koefisien tekanan lateral tanah, diameter dan ketebalan pipa serta kedalaman pipa bawah tanah dilakukan oleh Merlin dkk. [1]. Mereka mengembangkan model yang divalidasi menggunakan aplikasi finite element dan memiliki akurasi yang cukup tinggi untuk memprediksi tegangan pada berbagai kondisi pipa bawah tanah. Khademi-Zahedi [2 - 5] membuat analisa aplikasi finite element mengenai distribusi tegangan pada pipa polietilena yang dibenam di tanah yang di pengaruhi oleh gaya internal maupun gaya eksternal pada pipa. Distribusi tegangan pada penelitian tersebut di titikberatkan pada area pipa yang mengalami kerusakan dan menggunakan pendekatan eliminasi efek tegangan dari pengaruh suhu karena asumsi yang dipakai ialah pipa berbahan polietilena dan dibenamkan di dalam tanah pada kedalaman tertentu yang mana penyebaran suhu akan homogen.

Bentuk tambalan (*patch*) mempengaruhi terhadap besaran maksimum von Mises *stress* pada pipa [2-3]. Perbaikan pipa dengan bentuk dan ukuran geometris tambalan yang berbeda akan menyebabkan distribusi tegangan yang berbeda juga pada pipa tersebut. Perbedaan nilai distribusi tegangan ini akan mempengaruhi *integrity* pipa untuk menyalurkan fluida dalam pipa, sehingga analisis mengenai pengaruh bentuk dan ukuran tambalan terhadap distribusi tegangan pada pipa menjadi salah satu hal penting yang dapat di lakukan untuk mengetahui kehandalan pipa.

Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengetahui pengaruh perlindungan dengan menggunakan bentuk dan ukuran tambalan yang berbeda pada pipa polietilena yang berlubang elips.

Beberapa hal yang akan diamati pada penelitian ini adalah:

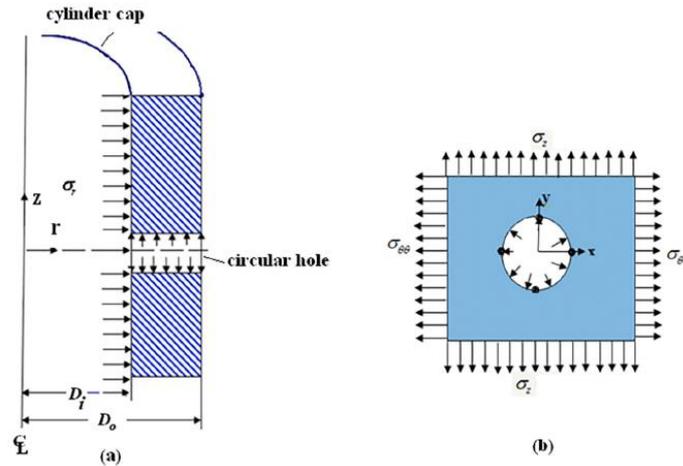
1. Mengetahui pengaruh variasi panjang tambalan terhadap distribusi tegangan pada pipa yang memiliki lubang elips.
2. Mengetahui pengaruh variasi bentuk tambalan terhadap distribusi tegangan pada pipa yang memiliki lubang elips.

## II. METODE

Di dalam penelitian ini akan dipergunakan pendekatan secara simulasi numeris dengan *software Finite Element Ansys 19.2* dengan penggunaan pemodelan beban internal dari tekanan operasi dan beban eksternal dari kondisi tanah dan kendaraan untuk mempelajari karakter mekanis dan efektifitas dari pipa yang sudah mendapatkan penguatan dengan pemasangan *patch*. Di dalam simulasi ini akan dilihat karakteristik tegangan Von Mises yang dialami oleh pipa dengan beberapa alternatif pengaruh geometri dari tambalan yang terpasang.

Khademi-Zahedi [2-3] membuat analisa aplikasi finite element mengenai distribusi tegangan pada pipa polietilena yang dibenam di tanah yang di pengaruhi oleh gaya internal maupun gaya eksternal pada pipa. Distribusi tegangan pada penelitian tersebut di titikberatkan pada area pipa yang mengalami kerusakan dan menggunakan pendekatan eliminasi efek tegangan dari pengaruh suhu karena asumsi yang dipakai ialah pipa

berbahan polietilena dan ditanamkan di dalam tanah pada kedalaman tertentu yang mana penyebaran suhu akan homogen.



Gambar 1. (a) Silinder atau pipa di bawah pengaruh tekanan internal. (b) Distribusi tegangan hoop dan tegangan aksial silinder atau pipa pada bidang x-y [2-3].

Seperti yang ditunjukkan di Gambar 1, untuk pipa silinder besar yang tidak terkubur dengan lubang melingkar kecil, tegangan hoop, radial, dan longitudinal maksimum dinyatakan oleh Khademi-Zahedi [2-3]. Penelitian ini mencari distribusi tegangan yang terjadi pada pipa polietilena PE80 dengan dengan variasi geometri tambalan PE100 menggunakan analisa metode hingga dengan menggunakan basis data penelitian Khademi-Zahedi dkk. [2-3] yang meliputi properti material, geometri pipa, kondisi batas, tahapan simulasi proses dan pemberian tekanan. Asumsi dan kondisi batas meliputi data properti material, geometri pipa, beban pada pipa dan hal lainnya ditunjukkan pada Tabel I.

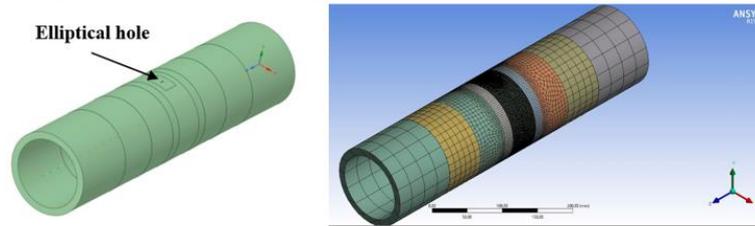
TABEL I  
DATA GEOMETRI PIPA, PROPERTI MATERIAL PIPA DAN SPESIFIKASI SYSTEM [2-3].

<b>Pipa:</b>	
Material pipa	PE80B (MDPE)
Panjang pipa, l	500 mm
Diameter luar pipa, $D_o$	122,936 mm
Diameter dalam pipa, $D_i$	101,6 mm
Rasio diameter luar terhadap tebal pipa, $D_{SDR}$	1,21
Diameter <i>circular hole</i> (defect)	5 mm
Rasio <i>minor</i> dan <i>major diameter</i> pada <i>defect</i> (a/b)	0,2
Tekanan <i>internal</i>	4 Bar (405.300 Pa)
<b>Beban:</b>	
Beban statis (kolom tanah)	Merujuk pada Tabel II.
Kedalaman pipa dalam tanah	125 cm
Beban dinamis (kendaraan)	544.780 Pa
<b>Patch:</b>	
Jenis <i>patch</i>	<i>Cylindrical/ saddle fusion patch</i>
Material <i>patch</i>	PE100 (HDPE)
Panjang <i>patch</i>	76 mm

### 1. Pemodelan pipa yang memiliki defect dengan tekanan internal

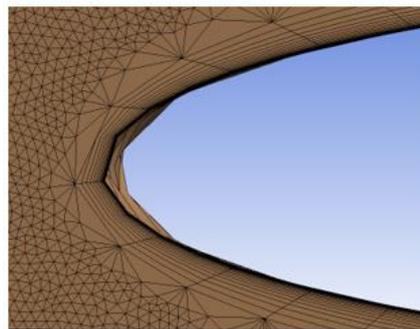
Pipa yang digunakan dalam penelitian ini berbahan PE80 dengan diameter luar,  $D_o = 122,936$  mm dan diameter dalam  $D_i = 101,6$  mm. Pipa memiliki elliptical hole dengan variasi rasio diameter r yaitu: 0,2 dengan diameter pendek 1 mm dan diameter panjang 5 mm. Pemodelan pipa dengan elliptical hole yang

dipengaruhi tekanan internal di tunjukkan pada Gambar 2. Posisi pipa dikubur di dalam tanah sedalam 125 cm dan pada kedalaman ini perubahan cuaca di permukaan tanah tidak akan mempengaruhi suhu pipa.



Gambar 2. Pemodelan pipa yang memiliki lubang elips dengan tekanan internal.

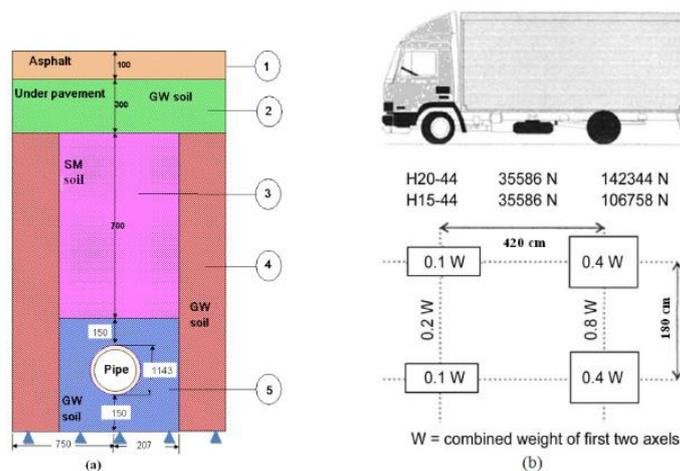
Pada simulasi yang dilakukan, pada area sekitar lubang elips dilakukan *mesh smoothing* dengan memperkecil ukuran *mesh* untuk meningkatkan akurasi *finite element analysis* dan memperhalus distribusi tegangan. Salah satu tahapan dalam *mesh smoothing* digunakan *inflation layer* untuk menunjukkan adanya penurunan secara bertahap dari pinggiran lubang ke dalam lubang elips sehingga lebih mencerminkan kondisi yang sebenarnya. Pada kedua ujung elips, *mesh* diperkecil menjadi 0,03 mm dan *inflation layer* dibentuk pada keliling pinggiran elips menuju ke dalam lubang seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. *meshing* di ujung retak.

## 2. Pemodelan pipa dengan beban eksternal

Dimensi parit dan sekeliling pipa dipilih berdasarkan Gambar 4 (a). Pada penelitian ini pemodelan beban kendaraan dianggap sama yaitu menggunakan truk H20 berdasarkan standar American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) [6]. Berdasarkan standar AASHTO tersebut, pemuatan roda untuk truk H20 dihitung berdasarkan Gambar 4 (b), dimana magnitud beban akibat truk H20 dianggap sebesar 544,780 Pa.



Gambar 4. (a) Dimensi saluran parit tanah dan pipa yang dinyatakan dalam satuan mm, (b) Beban kendaraan yang melintas [2-3].

Pipa itu sendiri dikelilingi oleh berbagai lapisan tanah di mana properti dari setiap lapisan dicantumkan pada Tabel II.

TABEL II  
KARAKTERISTIK LAPISAN TANAH DI SEKITAR PIPA [2-3].

Nomor Lapisan	Jenis tanah	Modulus elastisitas (MPa)	Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	Rasio Poisson
1	Aspal	173.0	2 200	0.35
2	GW tanah dengan kepadatan Proctor 90%	6.9	1 700	0.20
3	Tanah SM dengan kepadatan Proctor 90%	6.9	1 900	0.35
4	GW tanah dengan kepadatan Proctor 95%	15.0	2 000	0.35
5	GW tanah dengan kepadatan Proctor 85%	4.8	1.600	0.20

### 3. Pemodelan pipa yang di perbaiki (patched)

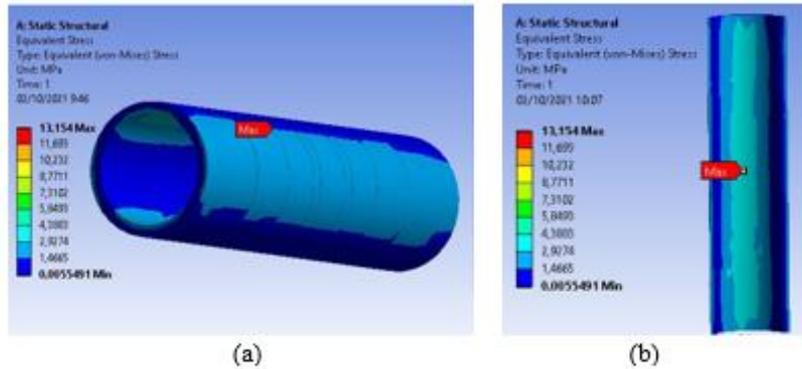
Pipa yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipa PE80 yang memiliki *elliptical hole* yang ditambal dengan sistem *patch* dari material HDPE (PE100). Pengaruh beban lalu lintas, berat tanah, perubahan suhu pipa, tekanan bagian dalam, dan adanya *patch* pada area yang rusak semuanya dimasukkan untuk menyelidiki efek keseluruhannya pada distribusi tegangan pada pipa polietilena yang diperbaiki. Meskipun pipa dikubur di dalam tanah pada kedalaman 125 cm dan memiliki suhu harian yang konstan, tetapi adanya perubahan musim dalam setiap tahunnya dapat menyebabkan terjadinya perubahan siklus suhu tahunan di dalam tanah sebesar -22°C. Dengan adanya kondisi tersebut, maka perlu dilakukan analisis *thermal stress* pada pipa yang sudah diberi tambalan untuk memastikan efektivitasnya.

Untuk mendapatkan hasil yang baik dan memudahkan proses simulasi, *Mesh* lebih kecil yang diterapkan pada area sekitar cacat dan untuk area yang di luar cacat menggunakan *mesh* yang lebih kasar. Untuk mendapatkan hasil yang akurat, model yang dilakukan dijalankan berdasarkan kondisi *mesh* yang berbeda sampai konvergensi yang memadai tercapai. Ilustrasi dari proses pemodelan pipa yang sudah di perbaiki dengan *saddle fusion patch*.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses simulasi tahap pertama yaitu mencari besaran von mises pada pipa dengan lubang elips tanpa tambalan dan akan dibandingkan dengan jurnal referensi. Distribusi tegangan pada pipa bagian permukaan luar pipa maupun bagian permukaan dalam pipa diperlihatkan pada Gambar 5. Tegangan von Mises maksimum terjadi pada bagian lubang elips pada pipa. Tegangan maksimum terletak pada bagian yang diberi warna merah, yaitu di ujung lubang elips. Besarnya tegangan von Mises maksimum pada simulasi berbanding terbalik dengan rasio diameter (a/b) lubang elips tersebut. Hasil simulasi untuk seluruh variasi

rasio diameter (a/b) lubang elips dibandingkan dengan jurnal referensi [4-5], perbedaan maksimum antara hasil simulasi dan jurnal referensi adalah 2,31% sehingga model yang dibuat valid untuk dilanjutkan.



Gambar 5. (a) Distribusi tegangan pada permukaan bagian luar pipa (b) Distribusi tegangan pada permukaan bagian dalam pipa.

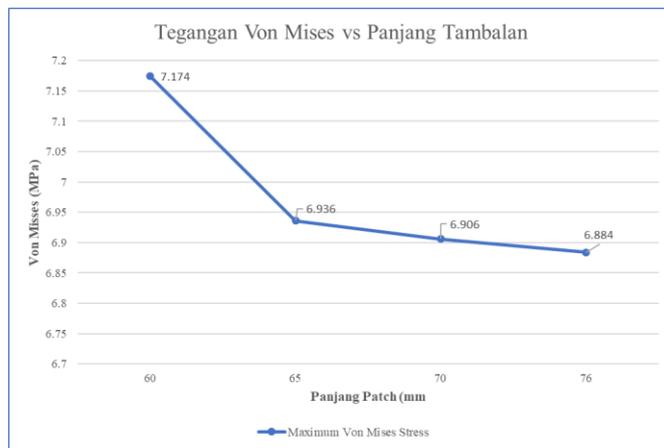
Hasil simulasi dengan adanya penambahan tambalan dengan material PE100 pada pipa dengan material PE80 dan pengaruh penambahan tambalan terhadap distribusi tegangan pada bagian pipa yang ditambal (di bawah tambalan). Dari hasil simulasi, didapat adanya penurunan nilai maksimum tegangan von Mises dari 13,154 MPa sebelum dilakukan penambalan menjadi 6,976 MPa setelah pipa dengan lubang elips ditambal dengan tambalan (*patch*).

Hasil proses simulasi untuk distribusi tegangan di sekitar lubang elips pada pipa dengan tambalan di mana tegangan maksimum terjadi pada ujung retak. Hasil simulasi untuk seluruh variasi rasio diameter (a/b) lubang elips pada pipa yang diperkuat dengan tambalan dibandingkan dengan jurnal referensi [4-5] dan perbedaan maksimum adalah 3,54% sehingga model yang dibuat dianggap sudah sesuai dengan model yang dibuat oleh peneliti sebelumnya.

Variasi panjang tambalan (*patch*) dilakukan dengan mengubah panjang secara teratur yang mulai dari panjang tambalan 76 mm, 70 mm, 65 mm dan 60 mm dengan mempertahankan rasio diameter lubang elips pada 0,2 dan ketebalan tambalan (*patch*) pada tebal 40 mm. Hasil simulasi distribusi tegangan von Mises dari variasi panjang tambalan diperlihatkan pada Gambar 6. Peningkatan konsentrasi tegangan pada kedua ujung lubang elips ketika panjang tambalan (*patch*) berkurang. Besarnya tegangan von Mises maksimum yang terjadi untuk setiap simulasi dengan perubahan panjang tambalan (*patch*) diperlihatkan pada Tabel III dan diplot pada Gambar 6. Kenaikan tegangan von Mises makin tinggi ketika panjang tambalan (*patch*) berkurang dari 65 mm menjadi 60 mm. Dari hasil simulasi di atas diketahui terjadinya pertambahan tegangan von Mises maksimum yang disebabkan adanya pengurangan panjang tambalan.

TABEL III  
HASIL SIMULASI VARIASI PANJANG TAMBALAN (*PATCH*) TERHADAP VON MISES STRESS

Simulasi ke-	Variasi Panjang Patch (mm)	Maximum Von Mises (MPa)
1	60	7.174
2	65	6.936
3	70	6.906
4	76	6.884



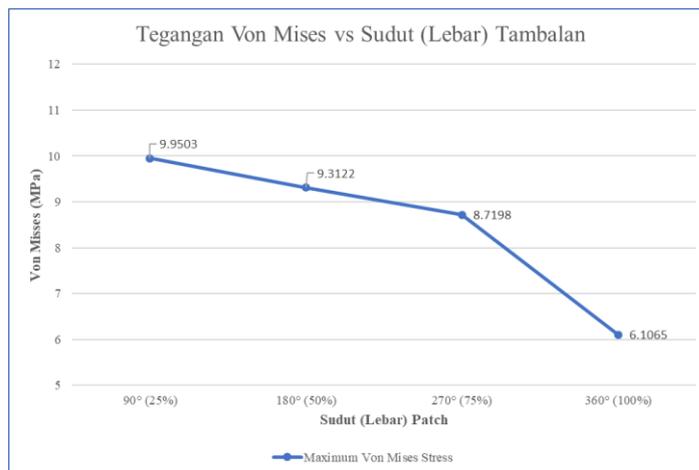
Gambar 6. Grafik variasi panjang tambalan (*patch*) terhadap tegangan von Mises maksimum.

Variasi sudut (lebar) tambalan dilakukan dengan mempertahankan rasio diameter lubang elips pada 0,2 dan ketebalan tambalan pada tebal 50 mm dengan mengubah sudut (lebar) secara teratur yang meliputi 360° (100%), 270° (75%), 180° (50%) dan 90° (25%).

Dengan adanya pengurangan ukuran sudut (lebar) tambalan, distribusi tegangan yang tadinya tersebar ke seluruh bagian pipa, berubah menjadi lebih kecil atau terkumpul di kedua ujung lubang elips. Besarnya tegangan Von Mises maksimum yang terjadi untuk perubahan sudut (lebar) tambalan (*patch*) diperlihatkan pada Tabel IV. dan pada Gambar 7.

TABEL IV  
HASIL SIMULASI VARIASI SUDUT (LEBAR) TAMBALAN (*PATCH*) TERHADAP VON MISES

Simulasi ke-	Variasi Panjang Patch (mm)	Maximum Von Mises (MPa)
1	60	7.174
2	65	6.936
3	70	6.906
4	76	6.884



Gambar 7. Grafik variasi sudut (lebar) tambalan (*patch*) terhadap tegangan von Mises maksimum.

Besarnya tegangan von Mises maksimum dengan ketebalan tambalan 50 mm adalah 6,1065 MPa, di mana tegangan ini sudah di atas tegangan maksimum yang diizinkan, yaitu 6,4 MPa [4-5]. Setelah dilakukan pengurangan sudut (lebar) tambalan menjadi 270° (75%), tegangan von Mises maksimum

langsung naik menjadi 8,7198 MPa dimana nilai tersebut sudah di atas tegangan maksimum yang diizinkan, yaitu 6,4 MPa. Hasil simulasi yang diperoleh menunjukkan kesesuaian dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya [4-5], di mana pengurangan sudut (lebar) tambalan (patch) pada pipa dengan lubang elips, akan memperbesar tegangan von Mises maksimum yang terjadi pada pipa.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pendekatan secara simulasi numeris dengan *software Finite Element Ansys 19.2* pada pipa polietilena berlubang elips yang diperkuat dengan variasi geometri dapat diambil kesimpulan bahwa distribusi tegangan akan berubah atau menyebar jika pipa berlubang elips di perkuat dengan tambalan dengan geometri yang berbeda. Untuk mengetahui geometri yang sesuai harus diketahui distribusi tegangan pada pipa induk yang mempunyai catat lubang elips.

Geometri panjang tambalan (*patch*) pada pipa PE80 yang memiliki lubang elips akan mempengaruhi nilai maksimum tegangan Von Mises pada pipa tersebut. Semakin panjang tambalan, nilai maksimum tegangan von Mises pada lubang elips akan semakin menurun. Perubahan sudut (lebar) tambalan (*patch*) pada pipa PE80 yang memiliki lubang elips juga akan mempengaruhi nilai besarnya maksimum tegangan Von Mises yang terjadi pada pipa, dimana semakin lebar sudutnya maka nilai maksimum tegangan von Mises yang terjadi pada pipa akan semakin turun.

#### 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. Terima Kasih juga disampaikan kepada Diaz Andamaz dan Faisal Adinegoro atas sarannya selama proses simulasi Ansys.

#### REFERENSI

- [1] Merrin, J., Hung, H. P., Rajeev, P., Robert, D. J., & Kodikara, J. (2014). *Stress Analysis of Buried Pipes*.
- [2] Khademi-Zahedi, R. (2018). Application of the finite element method for evaluating the stress distribution in buried damaged polyethylene gas pipes. *Underground Space*, 4(1), 59- 71. doi:10.1016/j.undsp.2018.05.002
- [3] Khademi-Zahedi, R., & Alimouri, P. (2018). Finite element analysis to the effect of Thermo- Mechanical loads on stress distribution in buried polyethylene gas pipes jointed by electrofusion sockets, repaired by pe patches. *energies*, 11(10), 2818. <https://doi.org/10.3390/en11102818>
- [4] Khademi Zahedi, R., Alimouri, P., Khademi Zahedi, H., & Shishesaz, M. (2019). Investigating peak stresses in fitting and repair patches of buried polyethylene gas pipes. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(1), 147–168. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0587-6>
- [5] Khademi-Zahedi, R., & Shishesaz, M. (2019). Application of a finite element method to stress distribution in buried patch repaired polyethylene gas pipes. *Underground Space*, 4(1), 48-58. doi:10.1016/j.undsp.2019.05.001
- [6] ASHTO *Guide for Design of Pavement Structures*. (1993). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.