

Analisis Faktor Intensitas Tegangan untuk Pipa Elbow dengan Retakan

Bianlala B. Susetyo¹, Rachmat Sriwijaya^{2*}

Departemen Teknik Mesin dan Industri Universitas Gadjah Mada
Universitas Gadjah Mada, Jalan Grafika No 2, Yogyakarta, Indonesia 55284

¹bianlala.susetyo@mail.ugm.ac.id

^{2*}Penulis Korespondensi: sriwijaya@gadjahmada.edu

Abstrak- Sistem perpipaan merupakan salah satu peralatan pendukung untuk menunjang kegiatan operasi pada proses produksi di berbagai industri. Sistem perpipaan berfungsi untuk mengalirkan fluida hasil produksi dan memerlukan kriteria keselamatan yang tinggi dengan memperhatikan berbagai faktor yang dapat mempengaruhi integritas dan keandalannya. Salah satu bagian yang sering dijumpai pada sistem jaringan perpipaan adalah pipa *elbow*. Pipa elbow digunakan untuk mengubah arah aliran fluida. Sifat kekakuan pada pipa elbow relatif lebih kecil dibandingkan dengan pipa lurus, sehingga lebih rentan terhadap timbulnya tegangan yang berakibat pada deformasi dan timbulnya retakan pada pipa. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan studi analisis mekanika perpatahan dengan metode faktor intensitas tegangan untuk mengevaluasi retakan berbentuk *semi-ellips* pada posisi *intrados* dari pipa *elbow* dengan bahan material austenik *stainless steel Z2CND18.12N*. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa faktor intensitas tegangan pada daerah retakan dari pipa elbow semakin bertambah besar seiring dengan pertambahan panjang retaknya. Hubungan antara faktor intensitas tegangan dan laju pertumbuhan retak berbanding lurus dan memenuhi kaidah hukum dan persamaan Paris-Erdogan.

Kata kunci- Pipa Elbow, Retak, Faktor Intensitas Tegangan, Faktor Bentuk Geometri, Metode Elemen Hingga

Abstract— Piping system is one of major component to support production activities in various industries. Piping system is used to transport production fluids with high safety properties over long distances. It needs to address multiple factors that may affect its integrity and reliability. One of the most common part of piping system is elbow pipe. Elbow pipe is used to change the direction of production fluids. Its stiffness is less in comparison with straight pipe having the same cross-section and material properties, inducing significantly higher stresses and deformations which may lead to failure. The objective of this research is to conduct study analysis on fracture mechanics, based on stress intensity factor, to evaluate semi-elliptical crack at intrados of elbow pipe with austenitic stainless steel material Z2CND18.12N. Finite element method is used to simulate stress distribution on the elbow pipe and obtain the stress intensity factor around the crack area. The result shows that the stress intensity factor of elbow pipe increases along with the growth of crack length. The geometry shape factor of elbow pipe with crack at intrados are obtained. The evolutions of crack length growth rate with stress intensity factor of elbow pipe conform to the unified Paris-Erdogan equation.

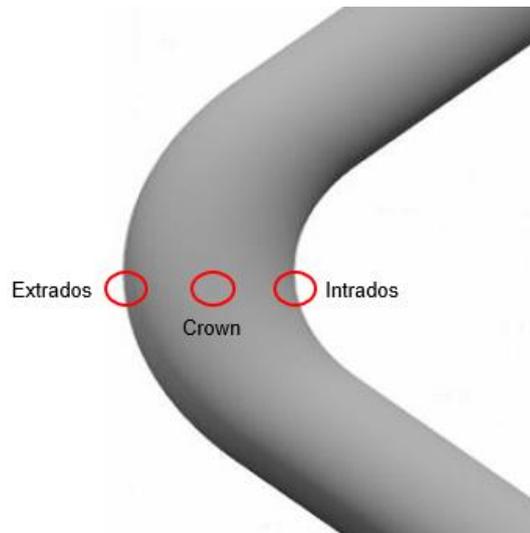
Keywords- Elbow pipe, Crack, Stress Intensity Factor, Geometry Shape Factor, Finite Element Method

I. PENDAHULUAN

Proses produksi di industri energi memerlukan berbagai peralatan pendukung untuk menunjang kegiatan operasi. Salah satu peralatan pendukung tersebut adalah sistem jalur perpipaan. Sistem perpipaan berfungsi untuk mengalirkan fluida hasil produksi dari suatu tempat ke tempat yang lain. Sistem tersebut memerlukan kriteria keselamatan yang tinggi dengan memperhatikan berbagai faktor yang dapat mempengaruhi integritas dan keandalan. Kegagalan pada sistem perpipaan dapat memberikan efek negatif pada kegiatan operasi dan lingkungan di sekitarnya.

Salah satu bagian yang sering dijumpai pada sistem jaringan perpipaan adalah pipa *elbow* atau pipa lengkung. Pipa *elbow* merupakan bagian pada sistem perpipaan yang digunakan untuk mengubah arah aliran fluida. Pipa *elbow* memiliki fleksibilitas yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan pipa lurus pada luas penampang dan material yang sama.

Sifat kekakuan pada pipa *elbow* relatif lebih kecil dibandingkan dengan pipa lurus, sehingga lebih rentan terhadap timbulnya tegangan yang berakibat pada deformasi dan timbulnya retakan pada pipa. Selain itu ada juga fenomena korosi yang dapat mempercepat terjadinya retakan dan berakhir pada kegagalan pipa. Keretakan pada pipa *elbow* dapat terjadi di bagian *intrados*, *extrados* ataupun *crown* seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bentuk geometri pipa *elbow*

Besar dan posisi retak yang berbeda tersebut akan menghasilkan pola perambatan retak yang berbeda juga di lokasi *intrados* seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Retak pada *intrados* pipa *elbow* [1].

Distribusi tegangan yang terjadi di sekitar lokasi retakan pun memberikan karakteristik yang berbeda. Kemunculan retak dan perambatannya pada suatu material dapat diperkirakan melalui prinsip mekanik perpatahan, dimana salah satu metodenya adalah dengan menggunakan analisa *stress intensity factor* (K_I) atau faktor intensitas tegangan.

Faktor intensitas tegangan merupakan parameter dalam analisa retak yang mendeskripsikan tegangan yang terjadi pada ujung retak. Parameter ini biasanya digunakan juga untuk menentukan sifat dari proses perpatahan dan tingkat kelelahannya pada perambatan retak. Analisa tegangan dan perpindahan dalam perhitungan mekanika perpatahan, serta pembebanan pada ujung retak dapat dikategorikan menjadi tiga jenis deformasi. Jenis yang paling dominan untuk pembentukan inisiasi retak adalah pada mode pembukaan

yang disebabkan oleh tegangan tarik yang tegak lurus terhadap arah perambatan retak, atau biasa disebut juga sebagai K_I . Dimana K_I adalah besar faktor intensitas tegangan untuk mode I (*opening*), σ adalah *applied stress* atau tegangan, a adalah setengah dari panjang retak, dan $f(\lambda)$ adalah faktor bentuk geometri dari benda yang mengalami retak. Nilai faktor intensitas tegangannya dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut ini.

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(\lambda) \quad (1)$$

Dengan melihat distribusi tegangan yang terjadi dan nilai faktor intensitas tegangan berdasarkan panjang dan kedalaman retak, karakteristik pertumbuhan retak yang muncul pada pipa elbow dapat diprediksikan selama siklus beban tertentu. Caiming dkk. [1-4] telah melakukan eksperimen pertumbuhan retak yang terjadi pada posisi retakan di *intrados* dari pipa *elbow*. Eksperimen tersebut menguji pertumbuhan retak untuk suatu spesimen pipa *elbow* dengan memberikan besaran beban tertentu secara periodik. Namun penelitian tersebut tidak mencakup pertumbuhan retak dan distribusi tegangan yang terjadi apabila diamati dengan menggunakan faktor intensitas tegangan.

Tujuan penelitian ini adalah melakukan studi analisis mekanika perpatahan dengan metode faktor intensitas tegangan untuk mengevaluasi retakan berbentuk *semi-ellips* pada posisi *intrados* dari pipa *elbow* dengan bahan material austenik *stainless steel Z2CND18.12N*. Pipa *elbow* dan retakan akan dimodelkan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS 19. Variasi panjang dan kedalaman retak yang diambil menggunakan hasil ekseperimen dari penelitian [1]. Nilai faktor intensitas tegangan yang diperoleh dari simulasi ANSYS akan dibandingkan dengan nilai faktor intensitas tegangan yang diperoleh secara teoritis dari persamaan matematika. Perbedaan antara kedua nilai diatas akan direpresentasikan sebagai faktor bentuk geometri dari pipa *elbow* tersebut dan dapat digunakan untuk memperkirakan pertumbuhan retak yang akan terjadi kedepannya.

II. METODE

Penelitian ini melakukan simulasi *finite element analysis* dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS untuk mengetahui nilai faktor intensitas tegangan yang terjadi di sekitar daerah retakan pada posisi *intrados* dan *crown* dari pipa *elbow* berbahan austenik *stainless steel Z2CND18.12 N*. Tekanan internal pada pipa dijaga konstan pada 17,5 MPa dan beban eksternal yang bekerja pada ujung atas pipa adalah antara 10-20 kN, sesuai dengan *setup* eksperimen pada penelitian sebelumnya [1].

Pemodelan pipa elbow dibuat dengan menggunakan properti material dan spesifikasi seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.

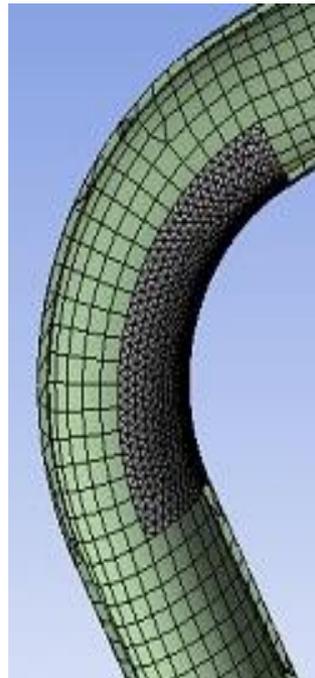
Young's modulus , E	195 GPa	Parameter	Ukuran
Yield strength , σ_y	300 MPa	Diameter Luar Pipa Elbow	76 mm
Ultimate strength , σ_u	590 MPa	Ketebalan Pipa (Wall Thickness)	4.5 mm
Elongation , ψ	52%	Bending Radius	95 mm
Poisson's ratio , ν	0.3	Panjang Pipa dari ujung sampai cross section	100 mm



Gambar 3. Properti material & spesifikasi dari pipa *elbow* [1].

Sebelum retakan dibuat dan disimulasikan pada pipa *elbow*, terlebih dahulu dilakukan analisis distribusi tegangan untuk posisi *intrados*. Analisis ini diperlukan untuk mendapatkan gambaran keseluruhan tegangan yang bekerja pada daerah *intrados* berdasarkan tekanan internal dan beban eksternal di ujung atas pipa. Tegangan ini merupakan nilai σ yang akan dimasukkan kedalam persamaan (1) untuk memperoleh nilai K_I sesuai dengan variasi panjang retaknya.

Selanjutnya model retakan dibuat pada posisi *intrados* dari pipa *elbow*. Variasi panjang dan kedalaman retaknya adalah (10;1,85), (13,00;3), (18,35;3,81), (25,36;4,20) untuk posisi *intrados*. Variasi panjang dan kedalaman retak ini mengikuti hasil eksperimen yang diperoleh dalam [1]. Konfigurasi *meshing* pada daerah retakan perlu dibuat kerapatan yang lebih detil untuk memperoleh hasil simulasi dan perhitungan nilai faktor intensitas tegangan yang lebih akurat. *Meshing* untuk retakan pada posisi *intrados* dapat diamati pada Gambar 4.



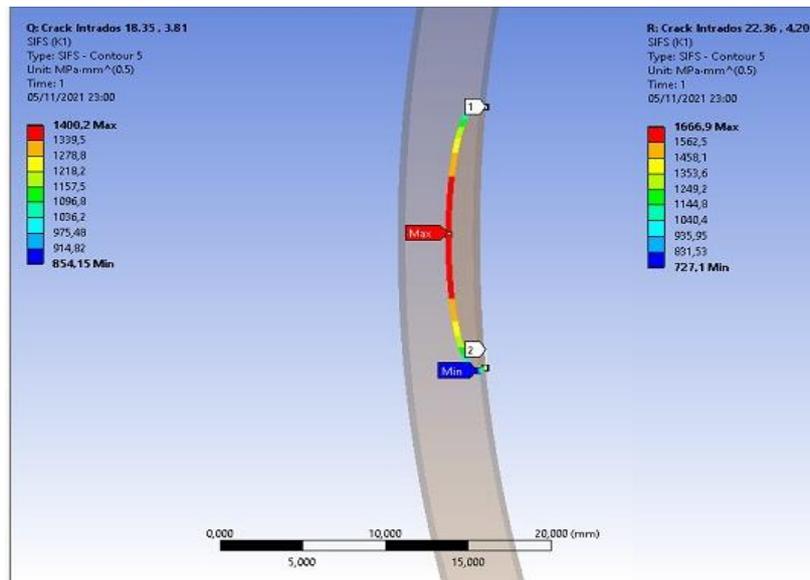
Gambar 4. Konfigurasi *meshing* untuk retakan pada *intrados*.

III. HASIL

Berdasarkan simulasi ANSYS untuk retakan dengan variasi panjang dan kedalaman retak, diperoleh hasil simulasi untuk posisi *intrados* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan Tabel I.

Hasil berikut menunjukkan bahwa faktor intensitas tegangan pada daerah retakan *intrados* mempunyai nilai yang semakin besar seiring dengan pertambahan panjang retak. Nilai faktor intensitas tegangan maksimumnya terletak di tengah-tengah daerah retakan, dimana pada posisi ini memiliki kedalaman retak yang paling dalam.

Dengan diperolehnya nilai K_I faktor intensitas tegangan dari hasil simulasi ANSYS, maka nilai faktor bentuk geometri pipa elbow untuk setiap variasi panjang retaknya dapat dihitung dengan kembali menggunakan persamaan (1). Sehingga diperoleh nilai faktor bentuk geometri dari pipa elbow dengan retakan pada posisi *intrados*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel II.



Gambar 5. Hasil simulasi faktor intensitas tegangan K_I untuk retakan pada posisi *intrados*

TABEL I
HASIL SIMULASI FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN K_I DENGAN ANSYS PADA POSISI *INTRADOS*

Parameter	Variasi Retak			
	Intrados (Panjang Retak ; Kedalaman Retak)			
Panjang & Kedalaman Retak	Gambar (a) (10 ; 1,85)	Gambar (b) (13 ; 3)	Gambar (c) (18,35 ; 3,81)	Gambar (d) (22,36 ; 4,2)
K simulasi Ansys (Faktor Intensitas Tegangan)	951,28	1159	1400,2	1666,9

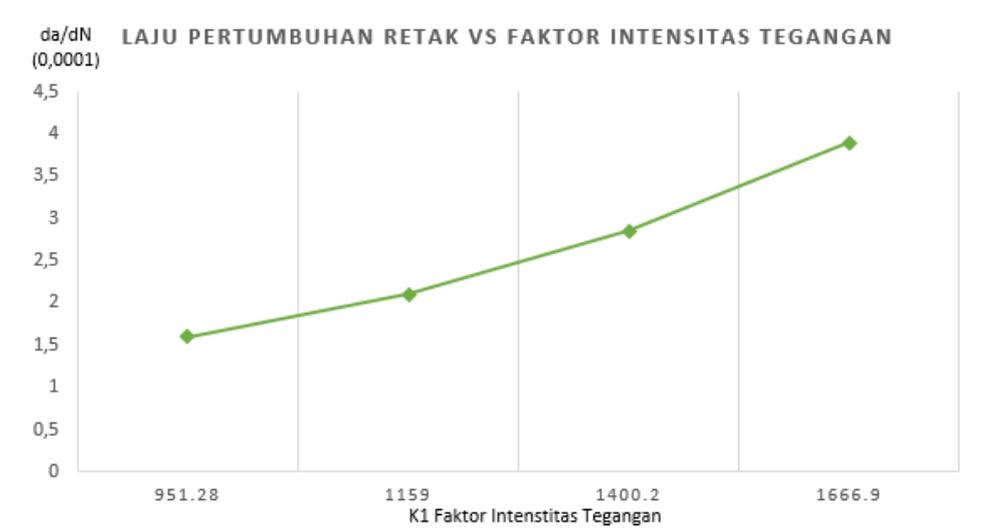
TABEL II
FAKTOR BENTUK GEOMETRI PADA PIPA *ELBOW* DENGAN RETAKAN PADA POSISI *INTRADOS*

Parameter	Variasi Retak				
	Intrados (Panjang Retak ; Kedalaman Retak)				
Panjang & Kedalaman Retak	(10 ; 1,85)	(13 ; 3)	(18,35 ; 3,81)	(22,36 ; 4,2)	
Faktor Bentuk Intrados $f(\lambda)$	2,05	2,19	2,23	2,41	
K simulasi Ansys (Faktor Intensitas Tegangan)	1,398	1,496	1,498	1,483	1,464

Nilai faktor bentuk pada pipa *elbow* dengan retakan pada posisi *intrados* juga meningkat seiring pertambahan panjang retaknya.

IV. PEMBAHASAN

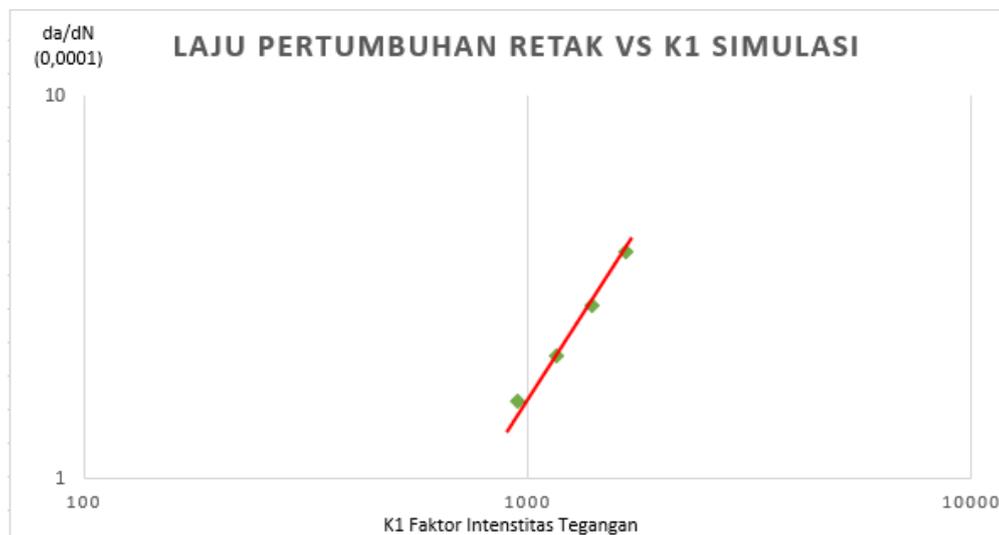
Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai faktor intensitas tegangan K_I untuk pipa *elbow* dengan retakan pada posisi *intrados*. Dari persamaan (1), nilai σ dan panjang retak berbanding lurus dengan nilai K_I faktor intensitas tegangannya. Laju pertumbuhan retak da/dN didapatkan dari hasil eksperimen [1]. Laju pertumbuhan retak cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya panjang retak. Semakin panjang retakan yang terbentuk, maka semakin besar pula nilai laju pertumbuhan retaknya. Bila dikaitkan dengan faktor intensitas tegangan K_I , maka didapatkan hasil bahwa nilai faktor intensitas tegangan K_I juga berbanding lurus dengan laju pertumbuhan retak, seperti yang dapat diamati pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Perbandingan nilai faktor intensitas tegangan K_1 terhadap laju pertumbuhan retak

Semakin besar bertambahnya panjang retak dan nilai faktor intensitas tegangan, laju pertumbuhan retak yang terjadi pada pipa elbow juga semakin meningkat. Fenomena ini sesuai dengan hukum Paris atau yang biasa disebut juga dengan persamaan Paris-Erdogan seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2).

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (2)$$



Gambar 7. Perbandingan nilai faktor intensitas tegangan K_1 terhadap laju pertumbuhan retak.

V. KESIMPULAN

Faktor intensitas tegangan untuk pipa *elbow* dengan retakan pada posisi *intrados* dapat ditentukan dengan menggunakan *software* ANSYS. Hubungan antara faktor intensitas tegangan dengan laju pertumbuhan retak pada pipa elbow adalah berbanding lurus dan memenuhi hukum persamaan Paris-Erdogan yang dapat dirumuskan sesuai dengan persamaan $\frac{da}{dN} = C \Delta K^m$.

Penelitian ini berhasil mengevaluasi retakan berbentuk *semi-ellips* pada posisi *intrados* dari pipa *elbow* dengan bahan material austenik *stainless steel Z2CND18.12N* dengan menggunakan analisis mekanika perpatahan berbasis pada faktor intensitas tegangan. Hasil analisis faktor intensitas tegangan beserta dengan faktor bentuk geometrinya dapat digunakan untuk memperkirakan pertumbuhan retak pada pipa *elbow* tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Teknik Mesin Dan Industri Universitas Gadjah Mada dan PT Chevron Pacific Indonesia yang telah memberikan fasilitas dan dukungan finansial untuk menyelesaikan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Saudara Iqbal Faisal dan Saudara Rahman Wijaya yang telah membantu pelaksanaan penelitian dari sisi simulasi ANSYS.

REFERENSI

- [1] Caiming, L., Bingbing, L., Yebin, C., & Xu, C., "Fatigue Crack Propagation Behavior of Pressurized Elbow Pipes Under Cyclic Bending", *Thin-Walled Structures*, 154, 2020.
- [2] Caiming, L., D.J. Yu, W. Akram, & Xu, C., "Thermal aging effect on the ratcheting behavior of pressurized elbow pipe", *ASME J. Pressure Vessel Technol.* 140 (2), 021604, 2018.
- [3] Caiming, L., Bingbing, L., Yebin, C., & Xu, C., "Ratcheting behavior of pressurized-bending elbow pipe after thermal aging", *Int. J. Pres. Ves. Pip.* 169 160–169, 2019.
- [4] Caiming, L., D.J. Yu, W. Akram, Y.B. Cai, & Xu, C., "Ratcheting behavior of pressurized elbow pipe at intrados under different loading paths", *Thin-Walled Structures* 138. 293–301, 2018, 2019.