

## PENGARUH MODEL PERHITUNGAN *STRESS INTENSITY FACTOR* DALAM EVALUASI PENERAPAN DISAIN LBB

Roziq Himawan

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gedung 80, Serpong, Tangerang Selatan  
roziqh@batan.go.id

### ABSTRAK

**PENGARUH MODEL PERHITUNGAN *STRESS INTENSITY FACTOR* DALAM EVALUASI PENERAPAN DISAIN LBB.** *Loss of Coolant Accident (LOCA)* adalah salah satu jenis kecelakaan yang dipertimbangkan dalam melakukan analisis keselamatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Untuk menghindari terjadinya LOCA diterapkan prinsip disain *Leak Before Break (LBB)* pada pipa sistem pendingin primer. Dalam tahapan pelaksanaan evaluasi penerapan disain LBB, dilakukan perhitungan *Stress Intensity Factor (SIF)* terhadap retak yang dipostulasikan. Berdasarkan standar, perhitungan SIF retak permukaan pada pipa dihitung tidak menggunakan model pipa melainkan menggunakan model pelat. Bertolak dari hal ini, maka dilakukan penelitian dengan tujuan untuk memahami pengaruh model dalam evaluasi penerapan disain LBB. Penelitian dilakukan dengan metode simulasi numerik perhitungan SIF dengan menggunakan model pelat dan model pipa, selanjutnya membandingkan kedua hasilnya dan menganalisis parameter penentu perbedaan hasil. Retak diasumsikan sebagai retak permukaan berbentuk semi-ellips. Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk ukuran retak dan tebal ekuivalen pelat dan pipa yang sama, model pelat memberikan nilai SIF yang lebih besar sekitar 5% dibandingkan nilai SIF dalam model silinder. Hal ini menunjukkan, bahwa dengan menggunakan model pelat diperoleh nilai SIF yang lebih moderat sehingga diperoleh margin keselamatan yang lebih besar.

Kata kunci: Model pelat, *Stress Intensity Factor*, *Leak Before Break (LBB)*, Retak Permukaan.

### ABSTRACT

**INFLUENCE OF MODELLING IN *STRESS INTENSITY FACTOR* CALCULATION FOR EVALUATING LBB DESIGN.** *Loss of Coolant Accident (LOCA)* is one of accident which is considered in the safety assessment of Nuclear Power Plant (NPP). To prevent LOCA incident, *Leak Before Break (LBB)* Design is applied to the primary cooling system pipe. In the step of LBB design applicabilty assessment, *Stress Intensity Factor (SIF)* calculation is performed for postulated crack in the pipe. Standard states that SIF of surface crack on pipes are calculated using plate model rather than pipe model. Thus, this study is aimed to understand the influence of modelling in evaluation of LBB design. The study was performed by numerical simulation to calculate SIF using plate model and pipe model, then compare these two results and analyze parameter which govern them. The cracks were assumed as semi-elliptical surface crack. Simulation results show that for the same crack size and the same equivalent thickness of plate and pipe, SIF value of plate model is 5% higher than in cylinder model. It means that the use of plate model resulting a moderate SIF value, therefore a higher safety margin could be achieved.

Keywords: Plate model, *Stress Intensity Factor*, *Leak Before Break*, Surface crack.

### PENDAHULUAN

Integritas komponen dan struktur Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), seperti perpipaan sistem pendingin primer, harus selalu terjaga, dalam rangka menjamin keselamatan beroperasinya. Perpipaan sistem pendingin primer merupakan salah satu sistem keselamatan, dimana selain berfungsi untuk mengalirkan air pendingin reaktor yang berfungsi sebagai media pengambil panas juga berfungsi untuk menahan lepasan produk fisi. Terjadinya kegagalan integritas pipa seperti pecah pipa dapat memicu terjadinya *Loss of Coolant Accident (LOCA)* yang berdampak hilangnya fungsi pendinginan pada teras. Untuk mencegah terjadinya LOCA dikembangkan disain perpipaan yang menerapkan prinsip *Leak Before Break (LBB)*.

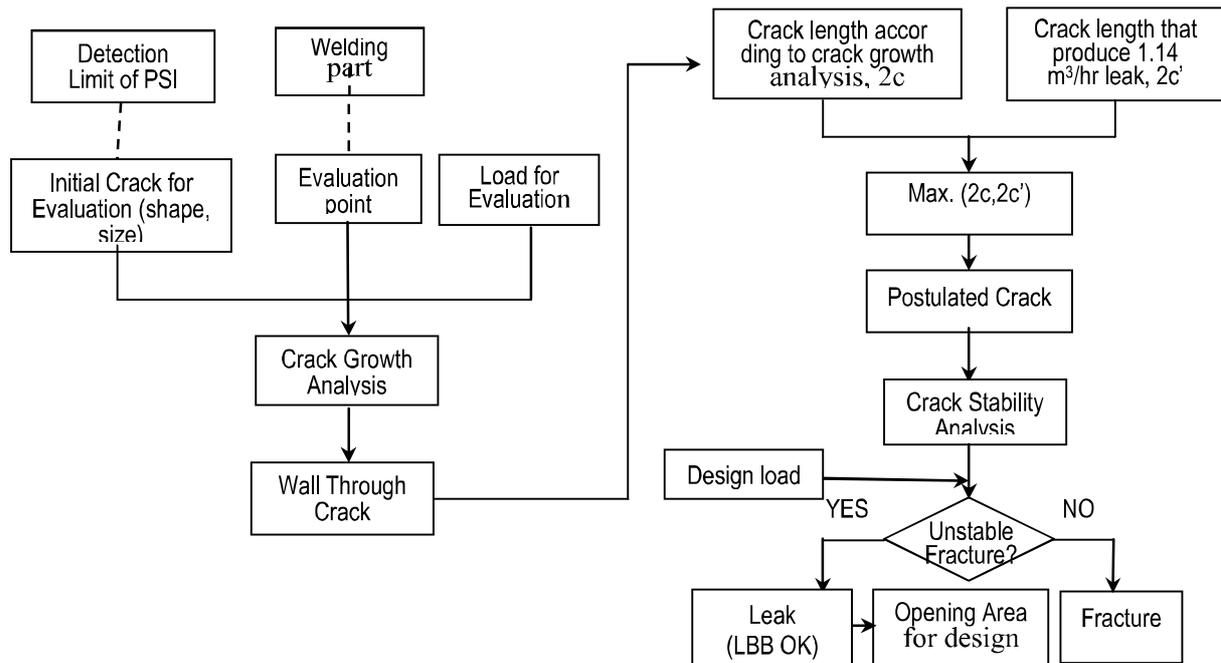
LBB adalah suatu desain pengendalian laju perambatan retak, dimana sebelum terjadi *unstable crack growth*, perambatan retak sudah menembus dinding pipa sehingga terjadi kebocoran. Dengan adanya kebocoran ini, maka secara dini reaktor dapat dipadamkan sebelum terjadinya pecah pipa skala besar. Konsep LBB merupakan salah satu upaya proteksi *Internal Hazard* sebagaimana tertuang dalam *Safety Standard* IAEA dan diterapkan oleh para produsen PLTN[1,2]. Saat ini, penelitian dan pengembangan metode disain LBB masih terus dilakukan oleh banyak peneliti. G. Iannitti, dkk. mengembangkan metode evaluasi untuk pipa dengan beban tegangan tekuk[3]. A. Barani, dkk. mengembangkan metode evaluasi dengan beban kombinasi tekuk dan tarik[4]. Joong-Hyok An, dkk. melakukan studi terhadap retak melingkar tembus pada *elbow* pipa[5]. B. Ghosh, dkk. melakukan estimasi luas bukaan pipa pada disain LBB[6]. N. Gong, dkk. melakukan studi disain LBB pada sambungan lasan antara logam yang berbeda[7]. K.P. Kou, dkk. melakukan studi terhadap LBB yang diaplikasikan untuk perpipaan di *Offshore*[8].

Dalam prosedur evaluasi disain LBB di beberapa negara[9, 10, 11], untuk perhitungan *Stress Intensity Factor* (SIF) retak pada pipa dalam evaluasi laju perambatan retak digunakan model pelat. Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya[3-8], berbagai penelitian terkait dengan perhitungan SIF menunjukkan bahwa nilai SIF dipengaruhi oleh geometri (ukuran dan bentuk) serta tegangan yang bekerja pada suatu komponen. Penggunaan model pelat dalam metode evaluasi laju perambatan retak memberikan konsekuensi perbedaan nilai SIF. Berdasarkan hal ini, maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemodelan pelat terhadap nilai SIF. Penelitian dilakukan dengan cara simulasi numerik untuk menghitung nilai SIF baik dengan model pelat maupun model pipa. Sedangkan jenis pipa yang digunakan sebagai objek perhitungan adalah beberapa pipa yang digunakan untuk perpipaan sistem pendingin primer reaktor PLTN jenis PWR.

## TEORI

Prosedur evaluasi disain LBB di negara-negara operator, secara garis besar memiliki banyak kesamaan dalam hal alur atau tahapan-tahapan evaluasi, meskipun terdapat perbedaan dalam hal nilai batas dalam masing-masing standar [9, 10, 11]. Gambar 1 memperlihatkan *flow chart* prosedur evaluasi disain LBB berdasarkan standar JSME[10]. Sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1, evaluasi disain LBB diawali dengan analisis perambatan retak. Analisis perambatan retak sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai SIF pada retak, ukuran komponen dan besarnya tegangan.

SIF adalah suatu parameter yang digunakan untuk menghitung nilai intensitas tegangan pada ujung retak (*crack tip*) akibat bekerjanya suatu beban pada material dimana retak berada. Secara teori, SIF umumnya diaplikasikan pada suatu material homogen dan linier elastis dan digunakan untuk menentukan kriteria kegagalan material getas. SIF disimbolkan dengan  $K$ .



Gambar 1. Flow Chart prosedur evaluasi disain LBB<sup>[10]</sup>

Sebagaimana telah disinggung pada pendahuluan, nilai SIF retak pada pipa dihitung berdasarkan model pelat sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 2. Besarnya SIF pada titik di bagian paling dalam (titik A) dihitung dengan persamaan sebagai berikut [12] :

$$K^A = F^A (\sigma_m + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (1)$$

$$\sigma_m = \frac{P}{2bt}, \quad \sigma_b = \frac{3M}{bt^2} \quad (2)$$

untuk  $a/c \leq 1$

$$Q = 1 + 1,464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1,65} \quad (3)$$

$$F^A = \left[ 1,13 - 0,09 \frac{a}{c} + \left\{ -0,54 + \frac{0,89}{0,2 + \frac{a}{c}} \right\} \left(\frac{a}{t}\right)^2 + \left\{ 0,5 - \frac{1}{0,65 + \frac{a}{c}} + 14 \left(1 - \frac{a}{c}\right)^{24} \right\} \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] g f_\phi f_w \quad (4)$$

$$g = 1; f_\phi = 1; f_w = \left[ \sec \left( \frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$H = 1 + \left[ -1,22 - 0,12 \frac{a}{c} \right] \frac{a}{t} + \left[ 0,55 - 1,05 \left(\frac{a}{c}\right)^{0,75} + 0,47 \left(\frac{a}{c}\right)^{1,5} \right] \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad (6)$$

untuk  $a/c > 1$ , nilai  $Q$  sama dengan pada persamaan (3)

$$F^A = \left[ \sqrt{\frac{c}{a}} \left( 1 + 0,04 \frac{c}{a} \right) + 0,2 \left(\frac{c}{a}\right)^4 \left(\frac{a}{t}\right)^2 - 0,11 \left(\frac{c}{a}\right)^4 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] g f_\phi f_w \quad (7)$$

$$g = 1; f_\phi = \sqrt{\frac{c}{a}}; f_w = \left[ \sec \left( \frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$H = 1 + \left[ -2,11 - 0,77 \frac{c}{a} \right] \frac{a}{t} + \left[ 0,55 - 0,72 \left( \frac{c}{a} \right)^{0,75} + 0,14 \left( \frac{c}{a} \right)^{1,5} \right] \left( \frac{a}{t} \right)^2 \quad (9)$$

Sedangkan nilai SIF untuk titik permukaan (Titik B), dihitung dengan persamaan berikut ini[12].

$$K^B = F^B (\sigma_m + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (10)$$

dan nilai  $\sigma_m$  sama dengan Pers. (2).

untuk  $a/c \leq 1$ , nilai  $Q, F^B$  masing-masing sama dengan Pers. (3) dan (4), sedangkan nilai  $g, f_\phi$  dan  $f_w$  dalam  $F^B$  masing-masing dinyatakan sebagai berikut:

$$g = 1,1 + 0,35 \left( \frac{a}{t} \right)^2; f_\phi = \sqrt{\frac{a}{c}}; f_w = \left[ \sec \left( \frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2} \quad (11)$$

$$H = 1 - 0,34 \frac{a}{t} - 0,11 \frac{a}{c} \frac{a}{t} \quad (12)$$

untuk  $a/c > 1$ , nilai  $Q, F^B$  masing-masing sama dengan Pers. (3) dan (7), sedangkan nilai  $g, f_\phi$  dan  $f_w$  dalam  $F^B$  masing-masing dinyatakan sebagai berikut:

$$g = 1,1 + 0,35 \frac{c}{a} \left( \frac{a}{t} \right)^2; f_\phi = 1; f_w = \left[ \sec \left( \frac{\pi c}{2b} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$H = 1 + \left[ -0,04 - 0,41 \frac{c}{a} \right] \frac{a}{t} + \left[ 0,55 - 1,93 \left( \frac{c}{a} \right)^{0,75} + 1,34 \left( \frac{c}{a} \right)^{1,5} \right] \left( \frac{a}{t} \right)^2 \quad (14)$$

Persamaan ini berlaku dengan ketentuan  $0 < \frac{a}{t} \leq 0,8$ ,  $0 < \frac{a}{c} \leq 2$ ,  $0 < \frac{c}{b} \leq 0,5$ , dengan  $a, c, b$  dan  $t$  masing-masing adalah panjang retak, dalam retak, lebar pelat dan tebal pelat

Dengan pendekatan model silinder sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3, perhitungan SIF pada titik di bagian paling dalam (titik A) dilakukan dengan persamaan sebagai berikut[14]:

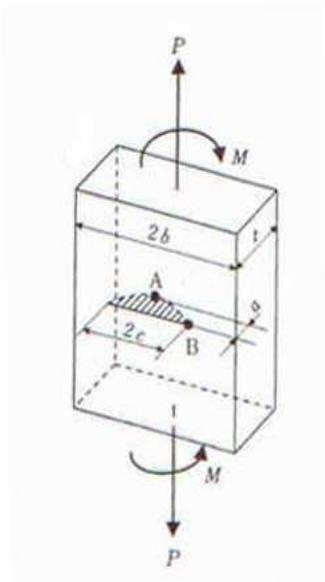
$$K^A = F_m^A \sigma_m \sqrt{\pi a} + F_{bg}^A \sigma_{bg} \sqrt{\pi a} \quad (15)$$

$$\sigma_m = \frac{P}{2\pi R t}, \quad \sigma_{bg} = \frac{M}{\pi R^2 t} \quad (16)$$

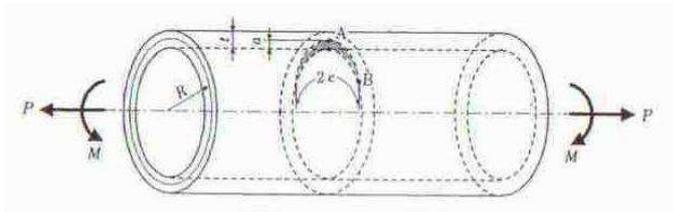
$$F_m^A = \left[ 1 + \left\{ 0,02 + 0,0103\alpha + 0,0035(1 + 0,7\alpha) (R/t - 5)^{0,7} \right\} Q^2 \right] / Q^{0,5} \quad (17)$$

$$Q = 1 + 1,464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1,65}, \quad \alpha = 2c/t \quad (18)$$

dengan  $F_{bg}^A$  adalah suatu konstanta yang nilainya merupakan fungsi dari panjang retak, kedalaman retak, tebal pipa, dan diameter dalam pipa, yang nilainya termuat dalam daftar dalam makalah acuan<sup>[13]</sup>. Persamaan ini berlaku dengan ketentuan  $0,05 \leq \frac{a}{t} \leq 0,8$ ,  $\frac{1}{6} \leq \frac{a}{c} \leq \frac{2}{3}$ ,  $5 \leq \frac{R}{t} \leq 20$  untuk beban axial, dan  $0,05 \leq \frac{a}{t} \leq 0,8$ ,  $\frac{a}{c} \leq \frac{2}{3}$ ,  $5 \leq \frac{R}{t} \leq 160$  untuk momen tekuk.  $a, c, R$  dan  $t$  masing-masing adalah panjang retak, dalam retak, jari-jari luar pipa dan tebal dinding pipa.



Gambar 2. Model Pelat



Gambar 3. Model pipa

Nilai SIF pada titik B, yang merupakan titik permukaan, dicari dengan persamaan berikut ini :

$$K^B = F_m^B \sigma_m \sqrt{\pi a} + F_{bg}^B \sigma_{bg} \sqrt{\pi t} \quad (19)$$

$$\sigma_m = \frac{P}{2\pi R t}, \quad \sigma_{bg} = \frac{M}{\pi R^2 t} \quad (20)$$

$$F_m^B = \left[ 1 + \left\{ 0,02 + 0,0103\alpha + 0,0035(1 + 0,7\alpha) (R/t - 5)^{0,7} \right\} Q^2 \right] / Q^{0,5} \quad (21)$$

$$Q = 1 + 1,464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1,65}, \quad \alpha = 2c/t \quad (22)$$

dengan  $F_{bg}^B$  adalah suatu konstanta yang nilainya merupakan fungsi dari panjang retak, kedalaman retak, tebal pipa, dan diameter dalam pipa, yang nilainya termuat dalam daftar dalam makalah acuan[13].

## TATA KERJA

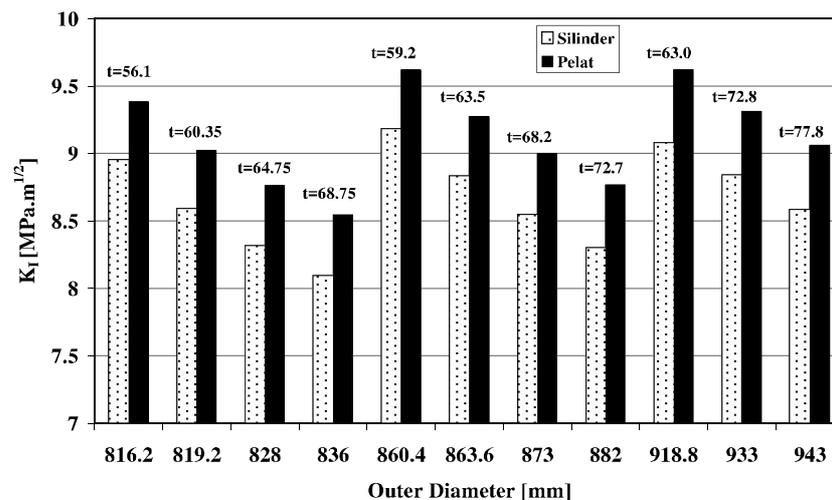
Untuk model pelat SIF dihitung menggunakan Pers. (1) dan (11) sedangkan untuk model pipa menggunakan Pers. (15) dan (19). Perhitungan dilakukan secara perhitungan manual berdasarkan persamaan tersebut menggunakan program Excel. Dalam analisis ini digunakan sebelas ukuran pipa yang digunakan dalam sistem perpipaan PLTN PWR. Pipa terbuat dari bahan baja nir karat (*stainless steel*). Untuk mengetahui besarnya pengaruh geometri, maka digunakan pipa dengan ukuran yang berbeda-beda sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 1. Dalam perhitungan, sebagai beban digunakan tekanan dalam (*internal pressure*) yang nilainya sama yaitu 15MPa. Tekanan dalam ini merupakan kondisi tekanan dalam pada saat reaktor beroperasi normal. Jenis retak yang menjadi objek perhitungan berupa retak permukaan berbentuk semi-ellips dengan ukuran sebagai berikut. Kedalaman retak sama dengan seperlima tebal pipa ( $a=0,2t$ ) dan panjang retak sebesar tebal pipa ( $2c=t$ )[10]. Dalam perhitungan SIF yang menggunakan model pelat, lebar pelat  $2b$ , sama dengan keliling pipa (untuk membuat kesetaraan, karena pipa dimodelkan dengan pelat). Untuk mengetahui pengaruh diameter pipa dan ketebalan pipa, dilakukan dua jenis simulasi, yaitu 1) simulasi perhitungan SIF dengan diameter luar tetap ( $D_o=900mm$ ) sedangkan ketebalan divariasikan, dan 2) simulasi perhitungan SIF dengan ketebalan tetap ( $t=50mm$ ) sedangkan diameter luar divariasikan.

Tabel 1. Ukuran pipa yang digunakan dalam analisis

	A	B	C	D	F	G	H	I	J	K	L
Diameter	816,2	819,2	828	836	860,4	863,6	873	882	918,8	933	943
Tebal	56,1	60,35	64,75	68,75	59,2	63,5	68,2	72,7	63	72,8	77,8

## HASIL DAN PEMBAHASAN

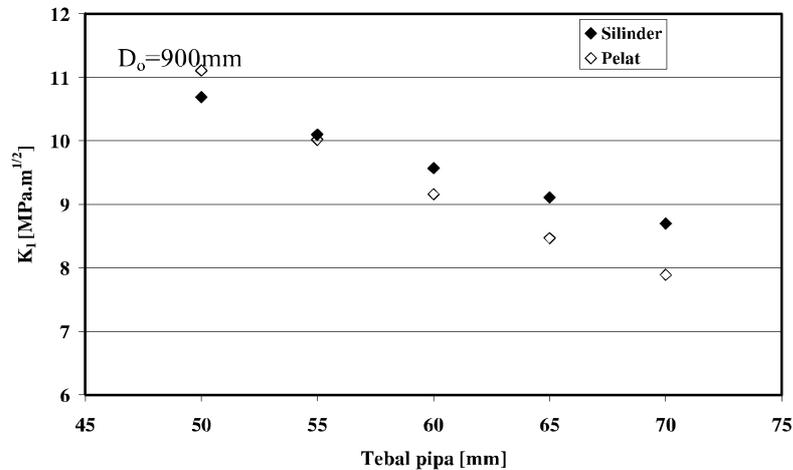
Hasil perhitungan SIF (yang dinyatakan dengan  $K_I$  pada sumbu tegak) untuk sebelas jenis ukuran pipa diperlihatkan pada Gambar 4 yang dinyatakan dengan diagram balok. Balok warna hitam dan putih bertitik masing-masing menyatakan hasil perhitungan berdasarkan model pelat dan model silinder. Ketebalan masing-masing pipa ditulis di dekat diagram. Dari Gambar 4 dapat diketahui bahwa untuk hasil perhitungan semua jenis pipa menunjukkan bahwa hasil perhitungan dengan model pelat memberikan hasil yang lebih besar dibandingkan dengan model silinder. Seiring dengan kenaikan ukuran diameter luar nilai  $K_I$  mengalami penurunan, meskipun kenaikan diameter juga diikuti oleh kenaikan ketebalan. Hal ini disebabkan faktor  $\frac{\pi c}{2b}$  pada model pelat[12] dan  $\frac{R}{t}$  pada model silinder[14] dalam perhitungan SIF.



Gambar 4. Nilai SIF untuk masing-masing jenis pipa

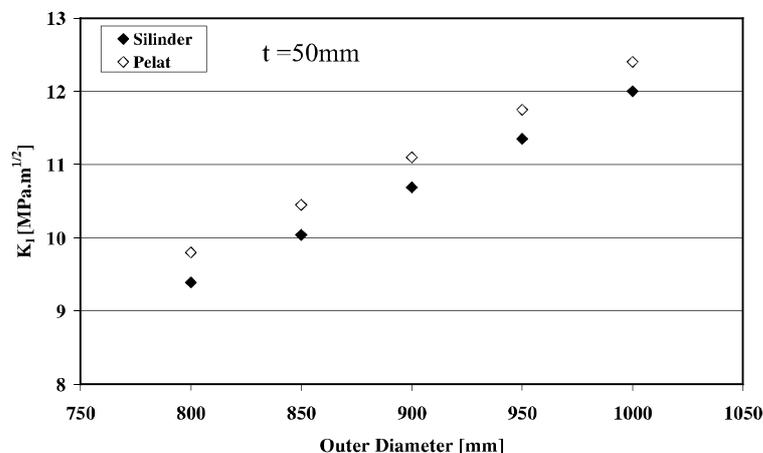
Hal ini diperjelas lagi pada pipa ukuran 860,4mm dan 933mm yang menunjukkan nilai  $K_I$  yang melonjak setelah mengalami penurunan secara gradual. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Meskipun ukuran diameter luar meningkat, namun karena ketebalan mengalami penurunan, sehingga  $K_I$  mengalami kenaikan. Selain itu, karena dalam perhitungan  $K_I$  ini menggunakan postulasi retak yang ukurannya didasarkan pada ketebalan pipa, sehingga nilai  $K_I$  diperkirakan lebih dominan dipengaruhi oleh ketebalan pipa. Apabila dilihat perbedaan nilai SIF antara model pelat dan silinder, seiring dengan kenaikan diameter luar pipa nilai  $K_I$  juga meningkat meskipun hanya kecil, sehingga dalam diagram tidak begitu terlihat dengan jelas perbedaan tersebut. Dalam standar ukuran pipa, ukuran pipa dinyatakan dengan diameter luar dan tebal pipa yang biasa disebut dengan *schedule*. Untuk diameter yang sama bisa memiliki ketebalan berbeda. Dari uraian tersebut di atas diketahui dengan jelas bahwa nilai  $K_I$  sangat dipengaruhi oleh geometri dan ukuran media tempat retak berada, disamping juga ditentukan oleh bentuk dan ukuran retak itu sendiri. Sehingga, penentuan model dalam melakukan

perhitungan  $\Delta K_I$  (perbedaan nilai *stress intensity factor* akibat beban maksimum dan beban minimum pada pembebanan fluktuasi yang mengakibatkan perambatan retak) sangat penting dan dapat berdampak pada evaluasi laju perambatan retak.



Gambar 5. Hasil simulasi perhitungan KI untuk diameter luar konstan

Gambar 5 memperlihatkan hasil simulasi perhitungan  $K_I$  untuk diameter konstan dengan memvariasikan ketebalan pipa. Seiring dengan meningkatnya ketebalan pipa, baik model pelat dan model silinder memberikan nilai selisih  $K_I$  yang semakin kecil. Namun, derajat penurunan ini, pada model pelat lebih besar dibandingkan pada model silinder sehingga pada ketebalan 55mm, nilai  $K_I$  untuk model silinder lebih besar daripada model pelat. Sebagaimana telah diuraikan di atas, yaitu nilai selisih  $K_I$  dipengaruhi  $\frac{\pi c}{2b}$  (model pelat) dan  $\frac{R}{t}$  (model silinder), dimana nilai  $b$  ekuivalen dengan keliling pipa yang juga dipengaruhi oleh jari-jari pipa, sehingga mengakibatkan penurunan selisih  $K_I$  pada pelat lebih besar. Perlu diperhatikan bahwa dalam simulasi ini nilai tekanan dalam sebagai pemicu terjadinya tegangan ditetapkan konstan. Dengan demikian, hal ini berdampak pada nilai tegangan, dimana semakin naik ketebalan pipa, mengakibatkan penurunan nilai tegangan, yang pada akhirnya mengakibatkan penurunan nilai selisih  $K_I$ . Meskipun nilai selisih  $K_I$  dipengaruhi oleh tegangan dan ukuran (Pers. (1)~(2)) namun karena nilai ukuran berada di dalam tanda akar, maka perubahan tegangan lebih dominan pengaruhnya terhadap nilai selisih  $K_I$ . Penjelasan ini juga dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena penurunan selisih  $K_I$  pada Gambar 4.



Gambar 6. Hasil simulasi perhitungan  $K_I$  untuk tebal pipa konstan

Gambar 6 memperlihatkan hasil simulasi perhitungan  $K_I$  untuk ketebalan konstan dengan memvariasikan diameter pipa. Seiring dengan meningkatnya ukuran diameter pipa, baik model pelat dan model silinder memberikan nilai  $K_I$  yang semakin besar. Selisih nilai SIF antara model pelat dan model pipa, selisih  $K_I$  cenderung mengalami penurunan seiring dengan kenaikan ukuran diameter. Hal ini dapat dijelaskan dengan penjelasan-penjelasan yang sudah disampaikan pada Gambar 4 dan 5.

Dengan memahami pengaruh ukuran (baik pipa dan retak) dan tegangan dalam perhitungan SIF, maka kita dapat memahami pula metode pemilihan pipa untuk suatu sistem perpipaan terutama sistem perpipaan yang memiliki tekanan tinggi. Misalnya, selain ukuran diameter pipa yang mengacu kepada keperluan laju alir (debit) fluida, maka *schedule* yang menyatakan tebal pipa harus dipilih berdasarkan tekanan operasi sistem tersebut.

Dari hasil-hasil perhitungan dan simulasi yang telah diperoleh di atas, khususnya pada nilai  $K_I$  dengan model pelat yang lebih tinggi dari pada dengan model pipa memberikan dampak yang menguntungkan. Karena dengan nilai  $K_I$  yang lebih tinggi berarti nilai laju perambatan diprediksi lebih besar, dan ketika retak sudah tembus yang mengakibatkan kebocoran, namun sebetulnya untuk kondisi aktual (model silinder) belum terjadi kebocoran. Sehingga dapat dinyatakan bahwa perhitungan SIF menggunakan model pelat sebagaimana diatur dalam standar [10], merupakan metode yang moderat yang memiliki margin keselamatan lebih tinggi dibanding dengan perhitungan berdasarkan model silinder apabila dilihat dari sisi disain.

## KESIMPULAN

Telah dilakukan perhitungan dan simulasi perhitungan *Stress Intensity Factor* untuk memahami pengaruh penggunaan model dalam perhitungannya. Hasil-hasil perhitungan dan simulasi memperlihatkan bahwa perhitungan *Stress Intensity Factor* menggunakan model pelat merupakan metode yang lebih moderat dibandingkan dengan model silinder. Pemilihan ini berdampak juga pada peningkatan nilai margin keselamatan dari sisi disain. Selain itu, diketahui juga bahwa dalam perhitungan *Stress Intensity Factor* dipengaruhi oleh ukuran dan tegangan yang bekerja pada pipa.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana atas dana Program Insentif Peningkatan Kinerja Perakayasa dan Peneliti Kementerian Riset dan Teknologi tahun 2012. Untuk itu, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kemenristek.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Anonymous, Protection against Internal Hazards other than Fires and Explosions, IAEA Safety Standard, Safety Guide No. NS-G-1.11, 2004.
2. Anonymous, Applicability of The Leak Before Break Concept, IAEA-TECDOC-710, 1993.
3. G. Iannitti, N. Bonora, and D. Gentile, (2012), Assessment of an engineering approach to the evaluation of the code of off-centered crack in pipes under bending for LBB design. *Engineering Fracture Mechanics* 81: 69–79.
4. A. Barani and G.H. Rahimi, (2007), Approximate Method for Evaluation of the J-Integral for Circumferentially Semi- Elliptical-Cracked Pipes Subjected to Combined Bending and Tension. *Scientia Iranica* 14 (5): 435-441.
5. J.H. An, Y.J. Kim, and P.J. Budden, (2010), Elastic stress intensity factors and crack opening displacements for circumferential through- walled cracked elbows. *Engineering Fracture Mechanics* 77: 2821–2839.

6. B. Ghosh, S.K. Bandyopadhyay, and A.K. Ghosh, (2009), Estimation of crack opening area for leak before break analysis of nuclear reactor system. *Nuclear Engineering and Design* 239 : 327–337.
7. N. Gong, G.Z. Wang, F.Z. Xuan, and S.T. Tu, (2013), Leak-before-break analysis of a dissimilar metal welded joint for connecting pipe-nozzle in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Design* 255 : 1– 8.
8. K.P. Kou and F.M. Burdekin (2008), The applicability of leak-before-break on flooded member detection for offshore structures under fatigue. *Engineering Fracture Mechanics* 75 : 31–40.
9. Anonymous, "European Safety Practices on The Application of Leak Before Break Concept", Report The Nuclear Regulators' Working Group, Task Force on Leak Before Break, January 2000.
10. Anonymous, Codes for Nuclear Power Generations Facilities, Rules on Protection Design against Postulated Pipe Rupture for Nuclear Power Plants, JSME S NDI, 2002.
11. Anonymous, Development of Technical Basis for Leak Before Break Evaluation Procedure, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
12. Newman, J.C. Jr., and Raju, I.S. (1981), An Emperical Stress Intensity Factor Equations for The Surface Cracks, *Engineering Fracture Mechanics*, 15 (1-2) : 185-192.
13. H. Kobayashi, Handbook for Structural Integrity Evaluation, 2005.
14. Zahoor, A., (1985), Closed Form Expressions for Fracture Mechanics Analysis of Cracked Pipes, *Trans. ASME, J. of Pressure Vessel Technology* 107 :.203.

### **DISKUSI / TANYA JAWAB :**

PERTANYAAN : (Anni Rahmat, PTRKN-BATAN)

- Dalam perhitngan analisis rambatan retak menggunakan metoda J-integral atau VCCT pada CBB denngan menggunakan pendekatan pelat ?

JAWABAN : ( Roziq Himawan, PTRKN-BATAN)

- Pada prinsipnya analisis perambatan retak dapat dihitung berdasarkan J-integral selain dengan metoda K1 (*stress intensity factor*) sehingga perhitungan J-integral-pun dapat juga dihitung dengan model pelat. Namun dalam standard evaluasi desain LBB yang ada (ASME) disebutkan bahwa perhitungan perambatan retak menggunakan nilai K1 sehingga dalam makalah ini dibahas tentang perhitungan K1