

ANALISIS *PROBABILISTIC FRACTURE MECHANICS* PADA EVALUASI KEANDALAN BEJANA TEKAN REAKTOR SECARA 3-D

Entin Hartini, Roziq Himawan, Mike Susmikanti

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir – BATAN
Kawasan Puspipstek Serpong Gd.80, Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: entin@batan.go.id

(Naskah diterima: 05-01-2018, Naskah direvisi: 19-01-2018, Naskah disetujui: 01-02-2018)

ABSTRAK

ANALISIS *PROBABILISTIC FRACTURE MECHANICS* PADA EVALUASI KEANDALAN BEJANA TEKAN REAKTOR SECARA 3-D. Analisis integritas material sangat diperlukan pada *Reactor Pressure Vessel* (RPV). Komponen tersebut merupakan *pressure boundary* yang berfungsi untuk mengungkung material radioaktif. Adanya retak pada dinding dapat mempengaruhi integritas RPV tersebut. Penelitian ini bertujuan melakukan analisis *fracture mechanics* menggunakan model probabilistik untuk evaluasi keandalan RPV. Model probabilistik digunakan untuk pendekatan karakter random dari kuantitas input seperti sifat mekanik material dan lingkungan fisik. Karakter random dari kuantitas input menggunakan teknik sampling berdasarkan *probability density function*. Material yang digunakan pada RPV adalah baja feritik (SA 533). Analisis *fracture mechanics* dilakukan berdasarkan metode elemen hingga (FEM) menggunakan perangkat lunak MSC MARC. Output dari MSC MARC adalah nilai J integral untuk mendapatkan nilai *stress intensity factor* (SIF) pada evaluasi keandalan bejana tekan reaktor 3D. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa SIF probabilistik lebih dulu mencapai nilai batas *fracture toughness* dibanding SIF deterministik. Nilai SIF yang dihasilkan dengan metode probabilistik adalah 95,8 MPa m^{0,5}, sedangkan dengan metode deterministik adalah 91,8 MPa m^{0,5}, rasio *crack* (*a/c*) semakin kecil akan dihasilkan nilai SIF yang semakin besar.

Kata kunci: *Probabilistic fracture mechanics*, bejana tekan, 3-D.

ABSTRACT

PROBABILISTIC FRACTURE MECHANICS ANALYSIS FOR THE EVALUATION OF REACTOR PRESSURE VESSEL RELIABILITY USING 3-D MODEL. *Material integrity analysis is required for the reactor pressure vessel (RPV). The component is the pressure boundary that serves to contain radioactive materials. The presence of cracks on the walls can affect the integrity of the RPV. The objective of this study is to analyze fracture mechanics using probabilistic models for the evaluation of RPV reliability. Probabilistic models are used as an analysis approach for random character of input quantities such as the mechanical properties of materials and the physical environment. The random character of input quantities was obtained by sampling technique base on probability density function. The material used in this study was ferritic steel (SA 533). Fracture mechanics analysis was performed by Finite Element Method (FEM) with MSC MARC software. The outputs of MSC MARC, which is of J integral values, were converted into stress intensity factor (SIF) for evaluating the reliability of RPV in 3D model. It is found that the calculation resulted from the SIF by probabilistic method reaches a limit value of fracture toughness earlier than the SIF by deterministic method. The SIF generated by probabilistic method is 95,8 MPa m^{0.5}, while the SIF generated by deterministic method is 91,8 MPa m^{0.5}, where lower ratio value of (a/c) will produce greater value of SIF.*

Keywords: *Probabilistic fracture mechanics, pressure vessels, 3-D.*

PENDAHULUAN

Bejana tekan merupakan komponen yang dalam pengoperasiannya menerima *internal pressure* relatif besar. Pada instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), terdapat bejana tekan berukuran besar seperti bejana tekan reaktor dan berukuran kecil seperti pin bahan bakar nuklir. Dua bejana tekan di dalam reaktor ini merupakan *pressure boundary* yang berfungsi sebagai pengungku lapis dua dan tiga terhadap bahan radioaktif yang dihasilkan pada proses reaksi berantai. Oleh karena itu, integritas *Reactor Pressure Vessel* (RPV) harus terjamin keselamatannya. Integritas RPV dapat berpengaruh dengan adanya *crack*, sehingga perlu dilakukan evaluasi keandalan material menggunakan metode *fracture mechanic* [1-3].

Model persamaan dan kondisi awal sistem tidak diketahui secara akurat sehingga berpengaruh terhadap prediksi perilaku sistem dari kemungkinan kegagalan. Kondisi ini mengakibatkan keamanan mutlak dari struktur material tidak bisa dijamin, karena tidak menggambarkan sifat material secara akurat dan ketidakpastian kondisi pembebanan. Oleh karena itu digunakan model probabilistik untuk menghitung margin keselamatan dengan memperhitungkan ketidakpastian input yang berpengaruh terhadap nilai output [1-2,4-7].

Pada perhitungan *fracture mechanics* untuk *J Integral* dari RPV, *material properties* dan *internal pressure* adalah faktor ketidakpastian dan merupakan random input. Oleh karena itu, penilaian keandalan RPV harus dilakukan dengan model probabilistik. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan dan mengevaluasi keandalan bejana tekan reaktor *Pressure Water Reactor* (PWR) dengan melakukan analisis *fracture mechanics* dengan model probabilistik. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan analisis ketidakpastian input pada *fracture mechanic* untuk mengevaluasi keandalan RPV tipe PWR 2-D dengan

beban *internal pressure* [8,9]. Penelitian lanjutan ini dilakukan untuk mengevaluasi keandalan RPV dengan model dinding bejana tekan sebagai *plate* 3-D, yang terdapat *crackfront* ke arah radial. Model 3-D dipilih karena mendekati keadaan realitas dan perhitungannya lebih teliti. Penggunaan rasio *crack* adalah untuk menguji panjang dan kedalaman kritis [7,14-15].

Bahan dari dinding bejana tekan yang dievaluasi adalah baja feritik (SA 533). Perhitungan *J integral* dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MSC MARC [16,17]. Analisis probabilistik pada *J integral* dilakukan pada ketidakpastian input untuk pembebanan dan material *properties* menggunakan teknik sampling berdasarkan *probability density function* (PDF) [11-13]. Hasil akhir dari penelitian ini adalah nilai *stress intensity factor* untuk mengevaluasi keandalan bejana tekan reaktor PWR. Output dari MSC MARC adalah nilai *J-integral*, yang kemudian diubah menjadi *stress intensity factor* (SIF) untuk mengevaluasi keandalan RPV 3-D [8,17-18].

Telah banyak model komputasi memberikan korespondensi yang baik antara nilai-nilai hasil perhitungan dan pengukuran. *Fracture mechanics* merupakan suatu metode untuk menilai kekritisan cacat dalam struktur serta dapat menggambarkan hasil secara kuantitatif *trade-off* antara tekanan, ketangguhan material, dan ukuran cacat. Proses evaluasi dengan cara metode *fracture mechanics* elastis linear tidak dapat dianggap sebagai nilai numerik konstan secara deterministik karena karakter *random*. Pendekatan untuk mengambil karakter *random* dari kuantitas input ke dalam suatu perhitungan (karakteristik material, geometri, dan efek pembebanan) mengarah ke aplikasi prinsip dan metode perhitungan dari model probabilistik [2,4-5].

Simulasi teknik sampling digunakan untuk melakukan analisis ketidakpastian input berdasarkan model probabilistik.

Simulasi sampling memerlukan beberapa persyaratan, (1) definisi variabel random dan karakteristik probabilistik dalam PDF, (2) generasi variabel random dan evaluasi untuk semua set variabel random serta informasi untuk jumlah atau banyaknya simulasi[11-13].

Adanya retak struktur di bawah ketidakpastian *mechanic*, geometri dan beban random dilambangkan dengan vektor acak X dimensi N , dimana komponen dari vektor X adalah X_1, X_2, \dots, X_N dengan karakterisasi ketidakpastian pada beban dan *material properties*. Jika ukuran crack a , elastis modulus E , besarnya stress σ^∞ dan *fracture toughness* pada crack inisiasi K_{IC} , dimodelkan sebagai variabel input random, maka $X = g(a, E, \sigma^\infty, K_{IC})$. K_{IC} adalah nilai kemampuan komponen untuk menahan perambatan crack. *Stress intensity factor* (K_I), dapat dihitung dengan menggunakan metode elemen hingga. Struktur dikatakan gagal jika $K_I > K_{IC}$. Persyaratan ini tidak dapat dipenuhi dengan pasti, karena K_I tergantung kepada vektor input dari vektor random X , dan K_{IC} merupakan variabel random [19].

Random generasi untuk input beban dan *material properties* berdasarkan PDF mengikuti persamaan 1 [8, 13].

$$x_i^j = F_j^{-1}\left(\frac{\pi_j^{(i)} - \zeta_j^i}{n}\right) \quad (1)$$

Dimana π_j uniform random permutasi independen untuk bilangan bulat $\{1,2,\dots,n\}$ dan ζ_j^i adalah $U[0,1]$ independen dari nilai random untuk π_j .

Energi rilis non linier *front crack* untuk 3-D dinyatakan sebagai J integral semi elliptic. Nilai J Integral dievaluasi di sekitar *frontcrack* dalam bentuk nilai *stress*. J integral dapat dimodifikasi secara numerik atau melalui metode elemen hingga. J Integral rerata tertimbang untuk *crack front* di sekitar segmen ΔL dinyatakan dalam persamaan 2[7].

$$J\Delta L = \int_{\Delta L} J(\mu)q d\mu \quad (2)$$

dimana q adalah rasio dari $\Delta L/\Delta a$, ΔL adalah panjang spesimen dan Δa adalah kedalaman *crack*. Sementara itu, $J(\mu)$ merupakan nilai *pointwise* dari *integral path* yang mengandung ujung *crack*, dan q adalah fungsi tertimbang. Dalam mekanika fraktur, perambatan retak eliptic diidentifikasi oleh K_I . K_I adalah besaran yang menunjukkan besarnya medan *stress* elastis. Analisis 3-D menunjukkan bahwa K_I berhubungan linier terhadap *stress* dan merupakan akar dari panjang karakteristik. Panjang karakteristik merupakan panjang crack. K_I diberikan oleh persamaan 3[7].

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}.f(a/c) \quad (3)$$

di mana a adalah panjang *crack*, σ merupakan *nominal stress*, c adalah lebar spesimen, (a/c) adalah ratio dari *crack*, sedangkan $f(a/c)$ adalah fungsi dari rasio kedalaman *crack* dan lebar dari spesimen.

Hubungan nilai K_I dengan nilai J Integral dinyatakan pada persamaan 4 [8,17-19]

$$K_I = \sqrt{\frac{EJ}{1-\nu^2}} \quad (4)$$

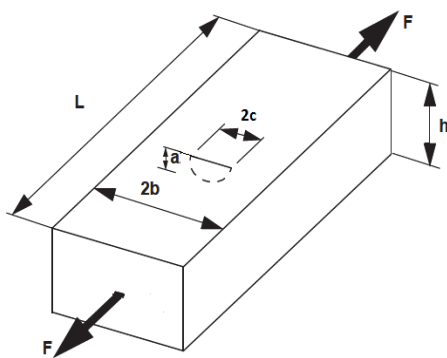
dimana E adalah Modulus young, ν merupakan *poison ratio*, dan J adalah nilai dari J integral.

METODOLOGI

MSC MARC digunakan untuk melakukan perhitungan *fracture mechanic* bejana tekan PWR. Perhitungan dilakukan secara deterministik dan probabilistik dengan carasilulasi menggunakan MSC MARC. Langkah yang dilakukan adalah *pre-processor* yang mendefinisikan geometri dan membuat *meshing*. Langkah berikutnya dilakukan adalah menentukan sifat material, menentukan posisi retak awal dan kondisi batas, mensimulasikan retak dan memilih tampilan yang akan dianalisis (J integral).

Sampel yang digunakan adalah *plate* (3-D) dinding bejana tekan reaktor PWR dari baja feritik bahan (SA 533) dengan panjang

5000 mm dan lebar 1000 mm [8]. *Poisson ratio* adalah 0,3 dan *modulus Young* (E) adalah 192×10^3 MPa[8]. Beban didistribusikan dalam komponen yang bekerja pada dinding dengan tekanan di 50MPa. Tekanan internal selama operasi reaktor adalah 14MPa-17MPa. Retak awal permukaan pada simulasi ini dianalisis menggunakan rasio *depth crack* (a) dan *length crack* (c) sebesar 0,33; 0,50; 0,67; 1. Model simulasi (*plate*) 3-D dari bejana tekan reaktor ditunjukkan pada Gambar 1[17].



Gambar 1. Geometri *plate* 3-D

dimana:

a : panjang *crack*,

c : kedalaman *crack*

b : lebar *plate*

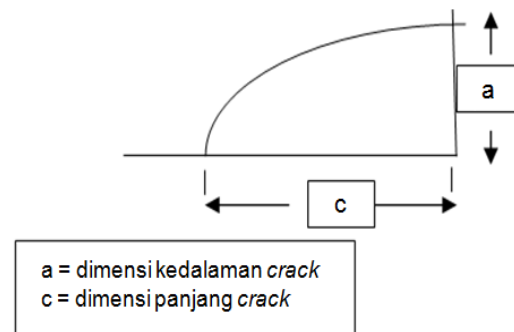
h : tebal *plate*

L : panjang *plate*

F : beban

Model *crack* semi elliptical 3 dimensi digunakan untuk analisis *plate*. Model *elliptical crack* dalam analisis ini adalah model seperempat elips. Model *crack* seperempat *elliptical* dibagi dari titik pusat

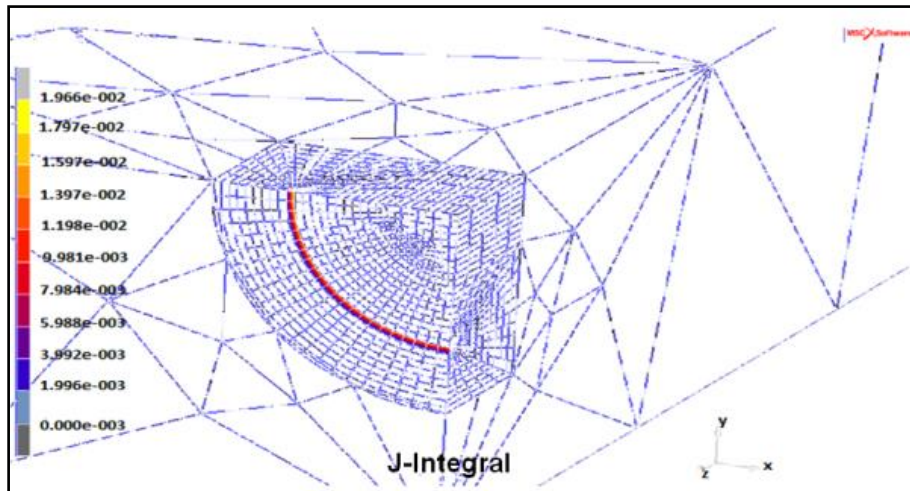
sepanjang sumbu X dan Y. Model tersebut ditunjukkan pada Gambar 2 [14-15]. Pada perhitungan J integral model probabilistik, input data dari sifat material yaitu modulus elastisitas dan parameter pembebanan melibatkan ketidakpastian. Teknik sampling berdasarkan PDF digunakan untuk mengakomodasi model ketidakpastian dari parameter yang terkait dalam perhitungan [8, 17-19]. Setelah nilai J integral dari MSC MARC diperoleh, tahap selanjutnya adalah menghitung K_I dan membandingkannya dengan K_{IC} [17].



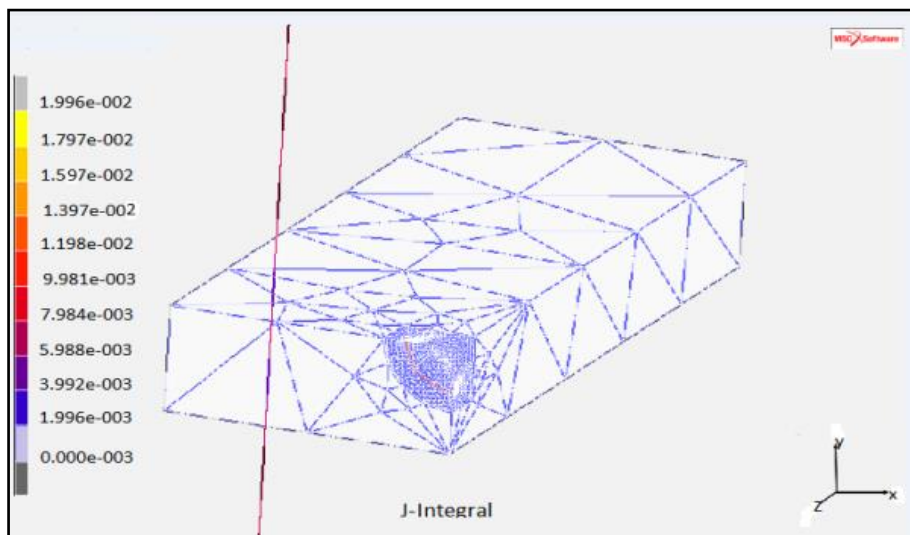
Gambar 2. Dimensi dari seperempat elips

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi perhitungan J integral diperoleh dengan MSC MARC pada pemodelan 3D dengan adanya *initial crack* pada geometri arah radial ditampilkan pada Gambar 3 dan 4. Hasil J integral diperoleh sebesar 0,02996 merupakan hasil simulasi J integral deterministik dengan rasio *crack* (a/c) = 3/3.



Gambar 3. Permukaan *crack* untuk rasio *crack* ($a/c=3/3$)

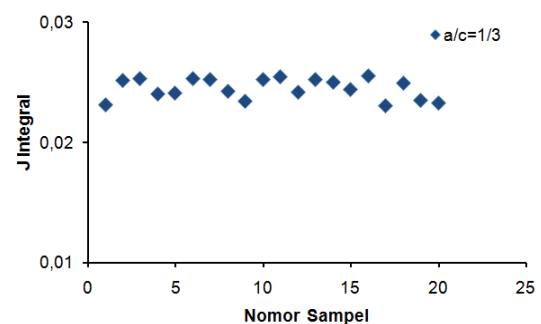


Gambar 4. J Integral untuk rasio *crack* ($a/c=3/3$)

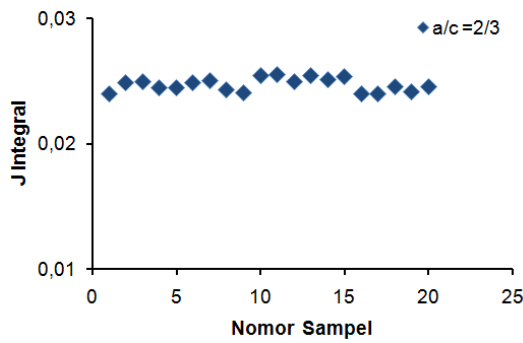
Hasil perhitungan J Integral secara probabilitas pada MSC MARC

Dalam perhitungan J integral secara probabilitas, nilai modulus dan beban pada *input* data MSC MARC diganti dengan nilai-nilai generasi sampel berdasarkan PDF dari masing-masing variabel. Hasil simulasi perhitungan J integral secara probabilitas dengan melakukan generasi sampel sebanyak 20 dengan nomor sampel 1 sampai dengan 20, dimana PDF untuk *modulus elasticity* berdistribusi normal dan pembebanan berdistribusi uniform dengan

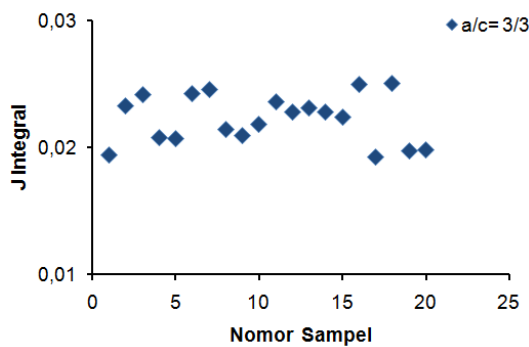
rasio *crack* (a/c) = 1/3, 2/3 dan 3/3 disajikan pada Gambar 5, 6 dan 7.



Gambar 5. J-Integral 20 sampel dengan rasio *crack* 1/3



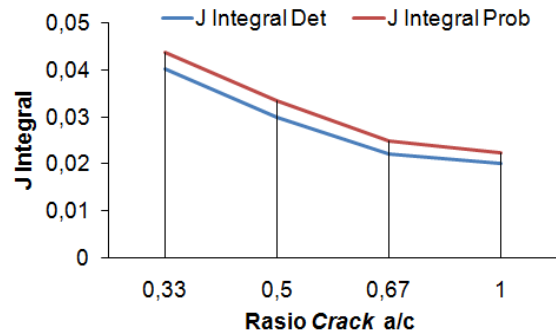
Gambar 6. J Integral 20 sampel dengan rasio crack 2/3.



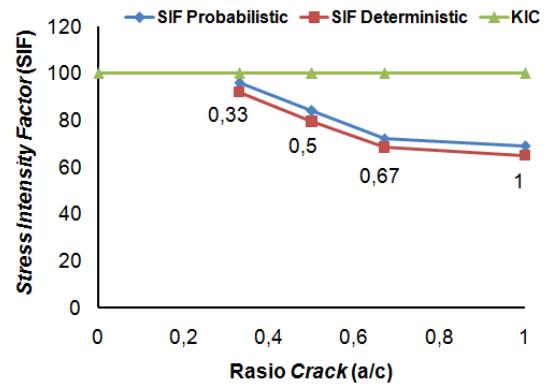
Gambar 7. J integral 20 sampel dengan rasio crack (3/3).

Berdasarkan hasil J integral probabilistik untuk rasio crack 1/3, 1/2 dan 3/3 ditunjukkan pada Gambar 5, 6 dan 7, nilai J integral probabilistik dihitung berdasarkan rerata dari nilai tersebut.

Hasil perhitungan J integral secara deterministik dan probabilistik dengan variasi rasio crack (1/3, 1/2, 2/3, 3/3) dan hasil perhitungan SIF secara deterministik dan probabilistik menggunakan MSC MARC ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9.



Gambar 8. J Integral deterministik dan probabilistik dengan rasio crack (a/c).



Gambar 9. SIF deterministik dan probabilistik dengan rasio crack (a/c).

Hasil perhitungan J integral dan SIF yang ditampilkan pada Tabel 3 sesuai dengan rumus (3) dan (4). Dimana nilai SIF tergantung dari fungsi kedalaman crack dan panjang crack. Berdasarkan Gambar 8 dan Tabel 1, rasio crack (a/c) semakin kecil maka nilai J integral dan SIF semakin besar. Jika diurutkan hasil nilai J integral dan stress intensity factor dari besar ke kecil berdasarkan rasio crack (a/c) adalah 1/3, 1/2, 2/3 dan 1.

Tabel 1. J Integral dan SIF Plate 3-D

Variabel	Rasio Crack (a/c)			
	1/3	1/2	2/3	3/3
J Integral Deterministik	0,039	0,029	0,022	0,019
J integral probabilistik	0,043	0,033	0,025	0,022
SIF Deterministik (SIF _{Det}) (MPa m ^{0,5})	91,844	79,266	68,254	64,895
SIF Probabilistik (SIF _{Prob}) (MPa m ^{0,5})	95,837	83,821	72,199	68,826

Berdasarkan Gambar 8 dan 9 dengan ratio $crack (a/c) = 1/3$, nilai J integral deterministik = 0,03998. Dari nilai J integral di atas dihitung nilai SIF (K_I) = 91,84411 MPa $m^{0.5}$. Nilai J integral probabilistik dengan input *modulus elasticity* dan pembebanan masing-masing berdistribusi normal dan uniform adalah 0,04353, diperoleh nilai SIF=95,83766 Mpa $m^{0.5}$. Berdasarkan simulasi tersebut memperlihatkan bahwa SIF probabilistik dengan rasio $crack (a/c)$ lebih mendekati nilai batas *fracture toughness* (K_{IC}) 100 MPa $m^{0.5}$ (tabel *mechanical properties* material) dibandingkan dengan SIF deterministik.

SIMPULAN

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa SIF probabilistik dengan rasio $crack (a/c)$ lebih mendekati nilai batas *fracture toughness* dibanding SIF deterministik. Pada model 3-D untuk rasio $crack (a/c)$ dengan perbandingan kedalaman $crack$ dan panjang $crack$ lebih kecil maka nilai J integral dan SIF semakin besar.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih untuk alokasi dana penelitian inipada DIPA PTKRN –BATAN 2016, Dr Syaeful Bakhri, yang telah menugaskan penelitian ini dalam kegiatan Bidang Teknologi Keselamatan Reaktor, PTKRN – BATAN, 2016.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Y. Chen, C. C. Huang, H. W. Chou, H. C. Lin, R. F. Liu, T. L. Weng, and H. J. Chang, "Reactor pressure vessel integrity assessment by probabilistic fracture mechanics a plant specific analysis," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol.117, pp. 64-69, 2014.
- [2] S. Li, H. Zhang, S. Li, Y. Wang, F. Xue, and X. Wang, "Probabilistic fracture mechanics analysis of thermally aged nuclear piping in a pressurized water reactor," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 265, pp. 611– 618, 2013.
- [3] H. W. Viehrig, E. Altstadt, M. Houska, and M. Valo, "Fracture mechanics characterisation of the beltline welding seam of the decommissioned WWER-440 reactor pressure vessel of nuclear power plant Greifswald Unit 4," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 89, pp.126-139, 2012.
- [4] K. Onizawa, H. Nishikawa, and H. Itoh, "Development of probabilistic fracture mechanics analysis codes for reactor pressure vessels and piping considering welding residual stress," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 87, pp. 2–10, 2010.
- [5] S. Sankararaman, Y. Ling, and S. Mahadevan, "Uncertainty quantification and model validation of fatigue crackgrowth prediction," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, pp. 1487–1504, 2011.
- [6] Y. Yamashita and T. Hirano, "Scatter band prediction for fracture toughness of specimens with prior load," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 86, pp. 73-89, 2012.
- [7] F. G. Albuixech, G. Qian, and M. Niffenegger, "Integrity analysis of reactor pressure vessels subjected to pressurized thermal shocks by XFEMV," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 275, pp. 336–343, 2014.
- [8] E. Hartini, R. Himawan, dan M. Susmikanti, "Uncertainty Analysis on Fracture Mechanics Assessment of Reactor Pressure Vessel: (2D) Subjected to Internal Pressure," *Tri Dasa Mega*, vol. 18, no.2, 2016.
- [9] M. Susmikanti, R. Himawan, A. Hafid, dan E. Hartini, "Evaluation On Mechanical Fracture of PWR Pressure Vessel and Modelling Based on Neural

- Network”, *Tri Dasa Mega*, vol.18, no.2, 2016.
- [10] R. Himawan dan M. Susmikanti, “Circumferential Inhomogeneity Analysis In G.A Siwabessy Reactor’s Primary Cooling Pipe,” *Tri Dasa Mega*, vol.18, no. 3, 2016.
- [11] S. Sankararaman, Y. Ling, and S. Mahadevan, “Uncertainty quantification and model validation of fatigue crack growth prediction,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 78, pp. 1487–1504, 2011.
- [12] S. Sankararaman, Y. Ling, S. Mahadevan, D. Kancev, G. Zerovnik, and M. Cepin, “Uncertainty analysis in the nuclear industry: Analytical unavailability modelling incorporating ageing of safety components,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 25, pp. 643–649, 2012.
- [13] M. Vorechovsky, “Hierarchical Refinement of Latin Hypercube Samples, Computer-Aided,” *Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 29, pp. 1–18, 2014.
- [14] R. H. A. Latiff and F. Yusof, “Method to Model Semi Elliptical Surface,” *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 222-228, 2016.
- [15] A. Sivasubramanian and G. Arunkumar, “Fracture Analysis of Three Dimensional Elliptical Crack for Al7075-T651 Plate with Holes,” *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, no. 34, pp. 1-8, 2016.
- [16] MSC Software, “*User’s Guide MARC*”, USA, 2012.
- [17] A. Gopichand, Y. Srinivas, and A.V.N.L. Sharma, “Computation Of Stress Intensity Factor Of Brass Plate With Edge Crack Using J-Integral Technique,” *International Journal of Research in Engineering and Technology*, vol. 1, pp. 261-266, 2012.
- [18] M. J. Jhung, S. H. Kim, Y. H. Choi, S. Jung, J. M. Ki, J. H. Kim, *et.al*, “Structural integrity assessment of reactor pressure vessels during pressurized thermal shock,” *Journal of Mechanical Science and Technology* vol. 22, pp. 1451-1459, 2008.
- [19] M. R. M. Akramin, A. Zulkifli, A. K. Amirruddin, N. A. Alang, and M. S. Jadin, “Hybrid Finite Element and Monte Carlo Analysis of Cracked Pipe”, *National Conference in Mechanical Engineering*, 2010, pp. 167-175.

