

## ANALISIS TEGANGAN PIPA *COLD LEG* PADA SISTEM PENDINGIN PRIMER REAKTOR TIPE PWR

**Alim Mardhi dan Roziq Himawan**

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir – BATAN  
Komplek PUSPIPTEK SERPONG, Gedung 80, Tangerang Selatan, Banten, 15310.  
Telp.: 62-21-7560912, Fax.: 62-21-7560913, Kode Pos : 15310  
e-mail: [alim\\_m@batan.go.id](mailto:alim_m@batan.go.id)

### **ABSTRAK**

**ANALISIS TEGANGAN PIPA *COLD LEG* PADA SISTEM PENDINGIN PRIMER REAKTOR TIPE PWR.** Pipa *cold leg* adalah bagian sistem perpipaan pendingin primer yang mempunyai fungsi sangat penting terkait prinsip yang mendasar dari keselamatan reaktor. Kerusakan yang terjadi dapat menyebabkan berhentinya operasi reaktor bahkan bencana. Maka evaluasi terhadap integritas struktur dan keandalan komponen pipa *cold leg* pada saat kondisi operasi harus dilakukan sebagai jaminan terhadap keamanan sistem keselamatan reaktor. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai tingkat keamanan pipa *cold leg* saat beroperasi pada kondisi desain, operasi normal dan kondisi gempa. Metodologi yang digunakan adalah melakukan perhitungan analisa tegangan berbasis metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak PATRAN. Tahapan yang dilakukan adalah membuat model, memasukkan parameter pembebanan, menghitung nilai tegangan intensitas untuk kemudian dibandingkan dengan nilai tegangan yang diizinkan sesuai standar ASME section III. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai tegangan intensitas maksimum sebesar 30,8 Ksi pada kondisi operasi desain. Nilai ini masih dibawah tegangan intensitas yang diizinkan yaitu sebesar 36,6 Ksi. Nilai rasio tegangan maksimum hasil perhitungan terhadap tegangan yang diizinkan adalah 84,3%. Dari hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa tingkat keamanan dan integritas struktur komponen pipa *cold leg* untuk kondisi operasi normal masih dalam batas aman.

**Kata kunci:** *Cold leg*, Sistem Pendingin Primer, Metode Elemen Hingga, Analisis Tegangan.

### **ABSTRACT**

**STRESS ANALYSIS OF COLD LEG PIPE IN PWR PRIMARY COOLING SYSTEM.** *Cold leg pipe functions in primary cooling system are very important related to safety principle of nuclear reactor. The breaks of cold leg pipe could be impact to reactor shutdown and even to be a disaster. That is the reason of structural integrity and reliability evaluation in normal condition should be done to guarantee the safe level of reactor safety system. The aim of this research is to get the safety level value of cold leg under design condition, normal operation, and seismic response. The methodology for doing stress analysis is carried out by using computer code base on finite element method PATRAN. The steps are constructing the finite element model, loading input conditions parameter, and accounting the value of stress intensity to compare with allowable stress in ASME code section III. The obtained maximum stress intensity is 30,8 Ksi on design condition which is still below of the allowed stress intensity of 36.6 Ksi. Maximum stress ratio between the counting value and allowed stress is 84.3%. From these results, we can conclude that the safety level of integrity and reliability structure of cold leg pipe is still under the safety level.*

**Keywords:** *Cold leg*, Reactor Cooling System, Finite Element Method, Stress Analysis

## PENDAHULUAN

Sistem perpipaan pendingin primer reaktor memiliki fungsi sebagai media tempat transportasi siklus aliran pendingin reaktor dan sebagai penghalang keluarnya zat radioaktif ke lingkungan. Ditinjau dari aspek keselamatan reaktor, fungsi ini memenuhi dua prinsip dari tiga prinsip dasar keselamatan reaktor yaitu mengendalikan panas dari teras, dan mengungkung pelepasan produk fisi ke lingkungan. Kegagalan dalam fungsi komponen sistem perpipaan pendingin primer dapat menyebabkan berhentinya operasi reaktor atau bahkan berdampak serius seperti terlepas zat radioaktif ke lingkungan. Kerugian yang ditimbulkan tidak hanya kerugian material bahkan dapat mengancam keselamatan seluruh ekosistem disekitar reaktor. Untuk itulah evaluasi keselamatan terhadap integritas struktur komponen sistem perpipaan pendingin primer yang terkait langsung dengan operasi reaktor mutlak dilakukan.

Salah satu dari sistem perpipaan utama sistem pendingin primer reaktor tipe PWR yaitu pipa *cold leg* yang berfungsi membawa air pendingin yang sudah di serap panasnya dari pembangkit uap menuju kembali ke bejana tekan. Dalam melakukan evaluasi keselamatan pada pipa *cold leg*, ASME section III telah mensyaratkan beban yang harus dievaluasi selama masa operasi reaktor antara lain beban ekspansi thermal akibat tingginya temperatur dari air pendingin, dan beban akibat tekanan internal. Kejadian alam yang dapat berpengaruh terhadap integritas struktur seperti gempa bumi juga diperhitungkan sebagai beban yang dapat menurunkan integritas struktur komponen.

Penelitian yang telah dilakukan terkait evaluasi keselamatan pada sistem perpipaan pendingin primer reaktor antara lain dilakukan oleh Zhang Zheng Ming<sup>[1]</sup> yang mempresentasikan cara perhitungan secara sederhana analisa mekanik untuk pipa dengan kategori keselamatan kelas 1. Penelitian Zheng dilakukan pada komponen pipa kelas 1 reaktor jenis HTR-10 dengan kapasitas 10 MW. Perhitungan dilakukan menggunakan program komputer berbasis metode elemen hingga dan dari hasil perhitungan dilakukan analisis berdasarkan standar keselamatan yang disyaratkan untuk pipa kelas 1. Penelitian lain untuk sistem perpipaan kelas 1 juga pernah dilakukan oleh Hengky Poedjo R<sup>[2]</sup> terkait pengaruh gempa patahan Lembang terhadap tegangan pipa sistem pendingin primer reaktor TRIGA 2000 Bandung. Penelitian dilakukan untuk mengetahui tingkat keamanan integritas struktur pipa pendingin primer reaktor TRIGA 2000 jika terjadi gempa bumi. Analisa tegangan pipa dilakukan dengan bantuan program komputer Caesar II berbasis metode elemen hingga.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan analisis tegangan pipa *cold leg* pada sistem perpipaan pendingin reaktor jenis PWR. Perhitungan dilakukan dengan bantuan program komputer PATRAN berbasis metode elemen hingga. Tahapan yang dilakukan adalah membuat model tiga dimensi (3D) pipa *cold leg* dengan skala 1:1. Parameter pembebanan yang menjadi masukkan pada model adalah beban tekanan internal desain, beban tekanan dan temperatur kondisi *steady* pada operasi normal, beban tekanan dan temperatur transien pada saat *startup* operasi kondisi normal (*heat up*), *shutdown* operasi kondisi normal (*cold down*), dan beban akibat gempa bumi (*seismic response*). Dari hasil analisis tegangan diperoleh nilai tegangan intensitas maksimum yang akan

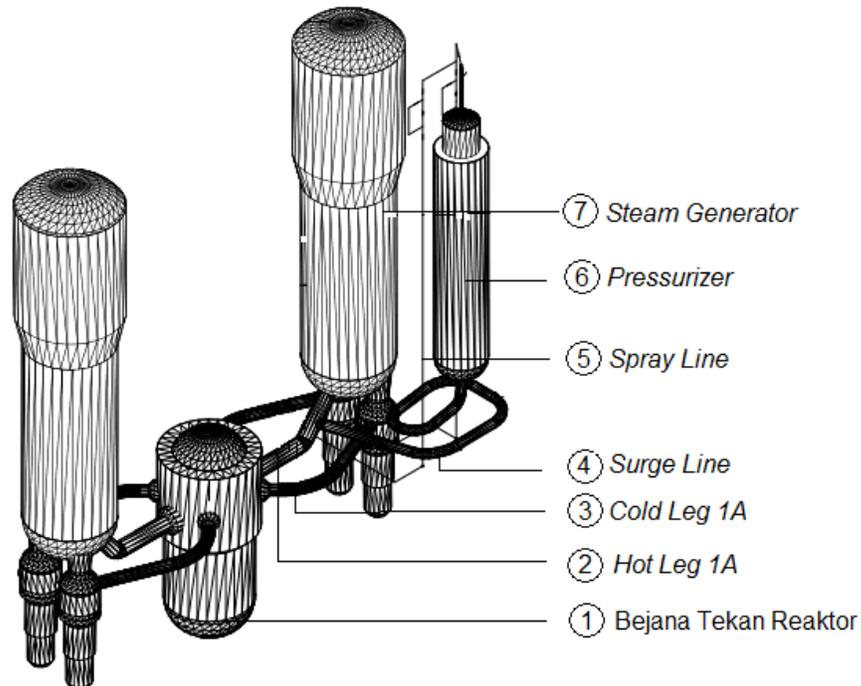
dibandingkan dengan nilai tegangan yang diizinkan sesuai standar persyaratan keselamatan yang dikeluarkan oleh *ASME Section III*.

Diharapkan dari penelitian ini diperoleh hasil analisis tegangan pada komponen, sehingga dapat menentukan tingkat keamanan dan keandalan integritas struktur terhadap beban operasi pada sistem pendingin reaktor.

## TEORI

### Sistem Perpipaan Pendingin Primer Reaktor Tipe PWR

Sistem perpipaan pendingin primer reaktor tipe PWR seperti ditampilkan pada Gambar 1, terdiri dari pipa pendingin utama berdiameter besar (*main coolant piping*) dan fasilitas pipa pendukung. Pipa utama terbagi menjadi bagian panas (*hot leg*) yang berfungsi sebagai media tempat pendingin reaktor bergerak memindahkan panas (*heat transport*) dari bejana tekan reaktor menuju pembangkit uap (*steam generator*) dan bagian dingin (*cold leg*) yaitu membawa kembali cairan pendingin yang sudah dingin ke bejana tekan. Pipa pendukung antara lain pipa *surgeline* yang menghubungkan pipa *hot leg* dan *pressurizer*, dan pipa *sprayline* yang menghubungkan pipa *cold leg* dan *steam generator*. Fungsi dari sistem perpipaan pendingin primer reaktor daya tipe PWR sangat penting yaitu sebagai *barrier* atau penghalang dari lepasnya produk fisi dan produk yang mengandung radiasi lainnya ke pengungkung baik selama operasi normal, *abnormal* bahkan kecelakaan dan kondisi pengujian.



Gambar 1. Sistem perpipaan pendingin primer reaktor tipe PWR

Dalam *ASME section III*, sistem perpipaan pendingin primer dikategorikan sebagai komponen kelas 1 yaitu termasuk dalam komponen sistem primer reaktor yang memiliki fungsi yang

sangat vital dan terkait langsung dengan sistem keselamatan operasi reaktor. Beberapa parameter operasi reaktor seperti temperatur dan tekanan dikendalikan dari sistem perpipaan ini. Kerusakan yang terjadi atau tidak berfungsinya sistem pendingin reaktor dapat menyebabkan operasi reaktor terganggu bahkan berhenti.

### Analisa Tegangan

Kondisi pembebanan yang harus dievaluasi bagi komponen kelas 1 digolongkan berdasarkan jenis pembebanan yaitu statis dan dinamis. Beban statis antara lain tekanan desain, berat struktur dan ekspansi thermal pada kondisi operasi normal. Beban dinamis adalah ekspansi thermal pada kondisi operasi transien dan beban gempa bumi.

Perhitungan analisa tegangan pada pipa dapat dilakukan secara sederhana menggunakan persamaan matematika seperti tertera dalam ASME *section* III NB3600 atau dengan menggunakan program komputer berbasis metode elemen hingga seperti PATRAN dan Caesar II. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan kelemahan seperti metode menggunakan persamaan matematika yang sederhana dan cepat namun tidak akurat dan tidak dapat menghitung untuk geometri yang rumit. Perhitungan menggunakan program komputer dapat menunjukkan nilai hasil perhitungan secara detail pada geometri yang rumit dan akurat namun kelemahannya adalah diperlukan ketelitian dan pertimbangan yang benar dalam memasukkan kondisi batas sehingga dapat mendekati keadaan sebenarnya.

Hasil perhitungan analisis tegangan pada komponen pipa kemudian di bandingkan dengan nilai tegangan yang diizinkan sesuai standar yang dipakai. ASME *section* III secara umum membuat batasan tegangan yang diizinkan seperti tertera pada Tabel 1. Batasan dibuat berdasarkan kategori tegangan menurut ASME yang terjadi pada komponen sebagai contoh tekanan internal digolongkan sebagai jenis *general primary membrane* (Pm) dengan batas tegangan yang diizinkan adalah sebesar Sm jika mengacu pada tabel ASME, atau 2/3 tegangan luluhnya atau 1/3 tegangan *ultimate* nya.

**Tabel 1. Batasan tegangan yang diizinkan<sup>[3]</sup>.**

<i>Stress Intensity</i>	Nilai Tabulasi (Sm)	Tegangan Luluh (Sy)	Tegangan <i>Ultimate</i> (Su)
<i>General Primary Membrane</i> (Pm)	Sm	2/3 Sy	1/3 Su
<i>Local Primary Membrane</i> (Pl)	1,5 Sm	Sy	1/2 Su
<i>Primary Membrane Plus Membrane</i> (Pl+Pb)	1,5 Sm	Sy	1/2 Su
<i>Primary Plus Secondary</i> (Pl+Pb)	3 Sm	2 Sy	1/2 Su

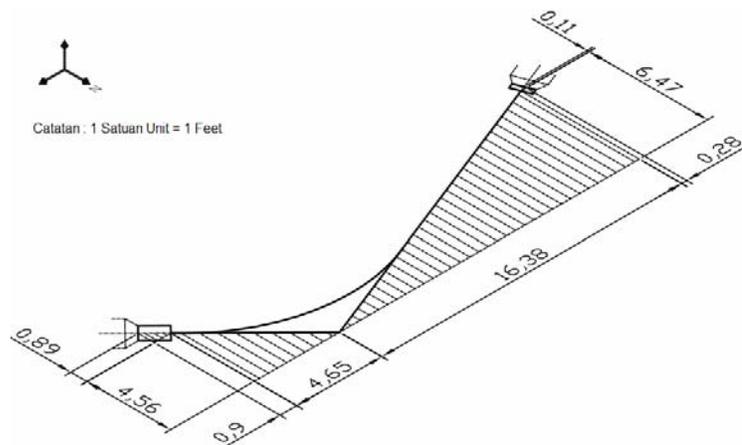
Khusus untuk sistem perpipaan pendingin primer, batasan tegangan yang diizinkan adalah sebesar 3 Sm untuk semua jenis pembebanan yang terjadi pada pipa pendingin primer<sup>[4]</sup>.

## METODOLOGI

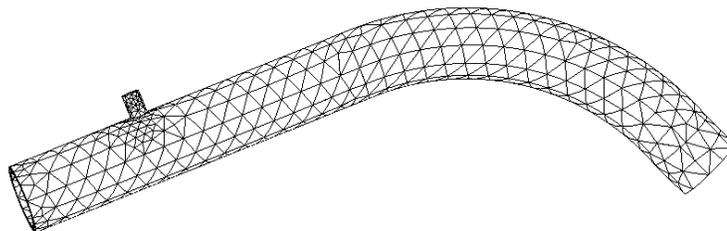
Metodologi yang digunakan pada penelitian untuk melakukan perhitungan analisis tegangan pipa *cold leg* pada sistem perpipaan pendingin reaktor jenis PWR adalah dengan bantuan program komputer PATRAN berbasis metode elemen hingga. Tahapan yang dilakukan adalah tahap *preprocessor* yang meliputi pembuatan model elemen hingga, memasukkan sifat material dan kondisi batas, dan tahap *post processor* yaitu menjalankan program untuk mendapatkan hasil perhitungan.

### Tahap *preprocessor*

Model geometri pipa *cold leg* dibuat dari gambar isometris seperti ditampilkan pada Gambar 2. Pembuatan jaring (*meshing*) dilakukan pada model geometri untuk mendapatkan elemen dan node yang berguna untuk perhitungan iterasi elemen hingga. Model elemen hingga pipa seperti ditampilkan Gambar 3 memiliki 3096 elemen bertipe Tet 10 dan 6273 Node.



**Gambar 2. Model isometris**



**Gambar 3. Model elemen hingga**

Material yang digunakan pada analisis pipa *cold leg* adalah material SA 376 316 LN dengan sifat material pada beberapa kondisi temperatur seperti ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Sifat material SA 376 TP 316LN**

No.	T ( <sup>0</sup> F)	$\alpha$ (in/in/ <sup>0</sup> F)	K (Btu/hr-inch- <sup>0</sup> F)	$\nu$	E (Psi)	Sy (Ksi)	Su (Ksi)
1.	70	-	0,642	0.3	28,3	-	-
2.	100	8,54	0,658	0.3	-	30,0	75,0
3.	200	8,76	0,683	0.3	27,6	25,5	75,0
4.	300	8,97	0,75	0.3	27,0	22,9	70,9
5.	400	9,21	0,792	0.3	26,5	21,0	67,1
6.	500	9,42	0,833	0.3	25,8	19,4	64,6
7.	600	9,60	0,875	0.3	25,3	18,3	63,1
8.	650	9,69	0,892	0.3	-	17,8	62,8
9.	700	9,76	0,917	0.3	24,8	17,3	62,5
10.	750	9,81	0,933	0.3	-	16,9	62,2
11.	800	9,90	0,958	0.3	24,1	16,6	61,7

Keterangan

- $\alpha$  : koefisien nominal ekspansi thermal ( $\times 10^{-6}$ )       $\nu$  : *poisson ratio*  
 K : konduktivitas thermal      Sy : tegangan luluh  
 E : modulus elastisitas ( $\times 10^6$ )      Su : tegangan *ultimate*

Kondisi batas untuk model ini adalah kekang kaku pada kedua sisi *flange* yang berhubungan dengan *nozzle* dengan tidak di izinkan translasi (translasi arah x, y dan z adalah 0).

Beban yang diperhitungkan pada penelitian ini mengacu pada prasyarat evaluasi beban ASME *section III* yaitu beban statis dan beban dinamis. Beban statis tidak berubah terhadap waktu atau kondisi tunak. Beban statis seperti yang ditampilkan pada Tabel 3 adalah tekanan internal desain, tekanan internal akibat operasi normal, dan beban termal pada temperatur operasi normal serta beban berat pipa sendiri.

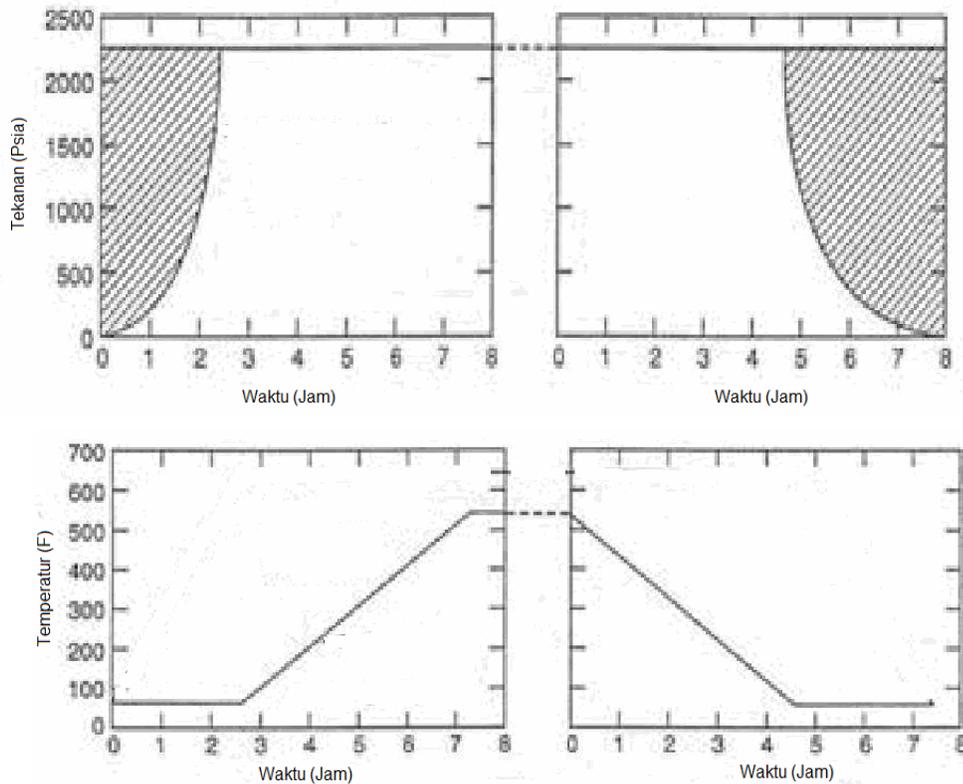
**Tabel 3. Beban statis pipa cold leg**

No	Kondisi Operasi	Tekanan		Temperatur	
		Psi	MPa	<sup>0</sup> F	<sup>0</sup> C
1.	Desain	2485	17,133	650	343,33
2.	Operasi Normal	2310	15,927	537,2	280,67
3	Berat Pipa	16677,49 Lbs			

Beban dinamis berubah terhadap waktu atau transien. Untuk kondisi operasi normal yang termasuk beban transien adalah beban akibat tekanan internal dan ekspansi thermal pada kondisi *heat up* dan *cold down* saat pengoperasian reaktor seperti ditampilkan pada Gambar 4.

Gempa bumi merupakan beban transien karena merupakan fungsi waktu. Pada penelitian ini, data gempa bumi yang digunakan adalah data laporan hasil penelitian *Seismic Hazard Analysis of*

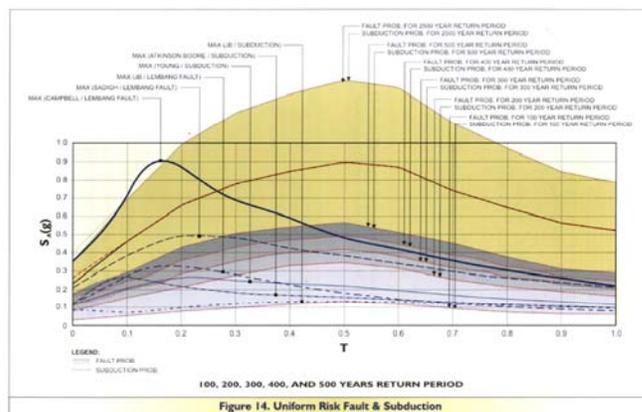
The Bandung Nuclear Site yang berisikan laporan mengenai dampak gempa yang paling berpengaruh terhadap tapak reaktor TRIGA 2000 Bandung. Gempa akibat patahan Lembang adalah potensi bahaya terbesar karena memiliki nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) terbesar di Tapak reaktor. Data ini juga pernah dipergunakan untuk perhitungan analisis tegangan pipa pendingin primer reaktor TRIGA 2000 Bandung<sup>[2]</sup>. Hasil penelitian data gempa bumi akibat patahan Lembang di tampilkan seperti pada Gambar 5 dikonversikan dalam bentuk angka tabulasi. Untuk kesesuaian dengan satuan model pipa *cold leg*, satuan data dikonversi menyesuaikan satuan pada model pipa *cold leg* seperti ditampilkan pada Tabel 4.



**Gambar 4. Beban transien kondisi *heat up* dan *cold down* reaktor**

**Tabel 4. Data beban gempa bumi**

No	Frekuensi	Amplitudo
	Hz	Inch / Jam <sup>2</sup>
1.	3,60E+07	1,04E-05
2.	3,60E+04	2,09E-05
3.	2,25E+04	2,68E-05
4.	1,80E+04	2,62E-05
5.	1,20E+04	2,09E-05
6.	9,01E+03	1,79E-05
7.	7,19E+03	1,49E-05
8.	3,60E+03	6,54E-06



Gambar 5. Data gempa bumi patahan Lembang Bandung<sup>[2]</sup>.

### Tahap *post processor*

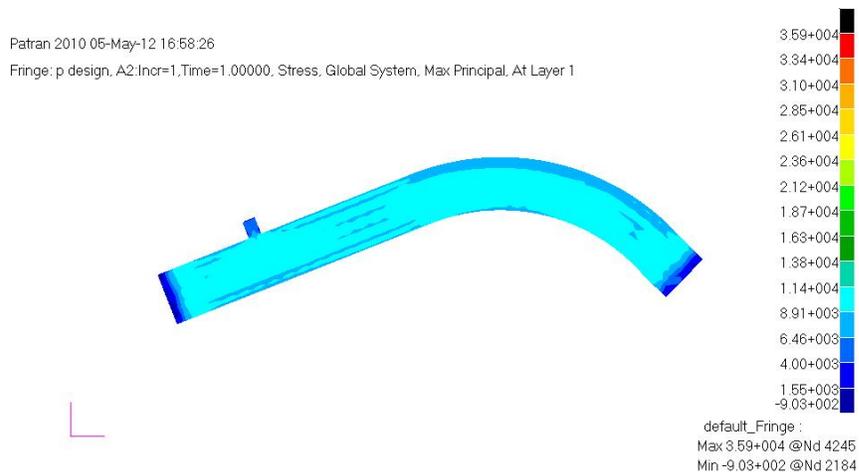
Metode analisis tegangan menggunakan pendekatan nonlinear. Untuk kondisi operasi desain dan operasi normal digunakan analisis statis, sedangkan untuk kondisi operasi *heat up* dan *cold down* digunakan analisis dinamik transien dimana variabel beban berubah terhadap waktu, dan beban akibat gempa bumi menggunakan analisis respon spektra.

Hasil analisis tegangan diambil nilai tiga tegangan *principal* yaitu tegangan *principal* maksimum ( $\sigma_1$ ), tegangan *principal* median ( $\sigma_2$ ) dan tegangan *principal* minimum ( $\sigma_3$ ). Dari ketiga nilai tegangan *principal* ini dapat dihitung nilai absolut perbedaan tegangan atau *stress difference* ( $S_{12}, S_{13}, S_{23}$ ). Nilai maksimum perbedaan tegangan ini dapat dinyatakan sebagai nilai *stress intensity* (SI) yang terjadi. Nilai *stress intensity* ini dipergunakan sebagai nilai yang dapat dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan (*allowable stress*)

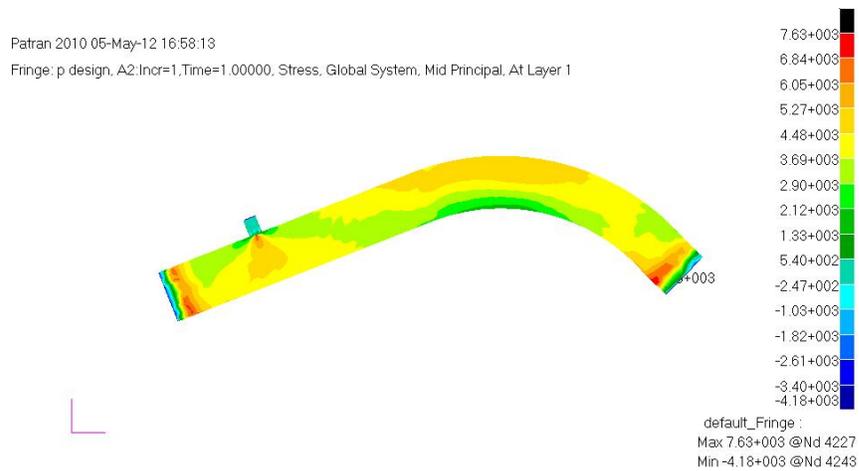
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan analisa tegangan menggunakan PATRAN direpresentasikan dalam bentuk distribusi tegangan pada tiap elemen pada model dengan rentang nilai minimum sampai dengan nilai maksimum. Keluaran dari hasil perhitungan adalah distribusi tegangan *vonmises*, *displacement*, *strain* dan sebagainya tergantung kebutuhan pengguna dalam melakukan pengolahan data hasil analisis.

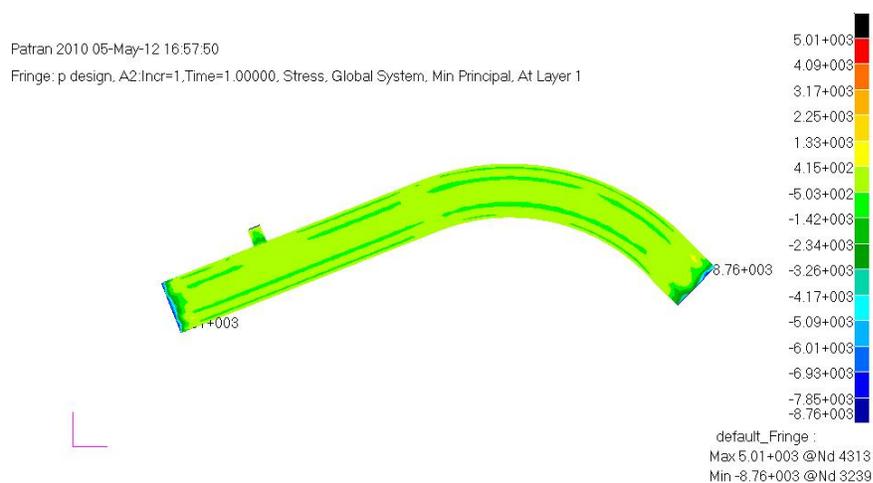
Pada hasil penelitian ini diambil nilai distribusi tegangan maksimum *principal* ( $\sigma_1$ ), tegangan *principal* median ( $\sigma_2$ ) dan tegangan *principal* minimum ( $\sigma_3$ ). Sebagai contoh hasil perhitungan dengan kondisi desain diperoleh nilai tegangan maksimum *principal* ( $\sigma_1$ ) sebesar 35,9 Ksi seperti ditampilkan pada Gambar 6, dengan posisi maksimum tegangan yang terjadi adalah pada bagian sambungan pipa injeksi aliran pendingin. Pada Gambar 7 dapat dilihat tegangan *principal* median ( $\sigma_2$ ) sebesar 7,63 Ksi. Dan pada Gambar 8 diperoleh nilai tegangan *principal* minimum ( $\sigma_3$ ) sebesar 5,01 Ksi pada posisi angkor yang dijepit.



**Gambar 6. Tegangan *principal* maksimum**



**Gambar 7. Tegangan *principal* median**



**Gambar 8. Tegangan *principal* minimum**

Dari tiga tegangan prinsipel tersebut kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai absolut perbedaan tegangan ( $S_{1,2,3}$ ). Perbedaan tegangan adalah selisih antara dua jenis

tegangan *principal* yaitu  $S_{1,2}$ ,  $S_{2,3}$ , dan  $S_{1,3}$  dengan  $S_{x,y} = \sigma_x - \sigma_y$ . Dari tiga nilai perbedaan tegangan diambil nilai absolut maksimum perbedaan tegangan yang dijadikan sebagai nilai *stress intensity* (SI) hasil perhitungan analisa tegangan.

Dari berbagai kondisi operasi diperoleh nilai tegangan intensitas seperti ditampilkan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

**Tabel 5. Nilai stress intensity akibat beban internal pressure (Psi)**

Kondisi Operasi	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$S_{1,2}$	$S_{2,3}$	$S_{1,3}$	SI
Design OPE	35900	7630	5010	28270	2620	30890	30890
Normal OPE	33400	7090	4650	26310	2440	28750	28750
Heat Up	32300	6850	4500	25450	2350	27800	27800
Cold Down	236	50,2	32,9	185,8	17,3	203,1	203,1

**Tabel 6. Nilai stress intensity akibat beban ekspansi termal (Psi)**

Kondisi Operasi	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$S_{1,2}$	$S_{2,3}$	$S_{1,3}$	SI
Normal OPE	10200	4540	1710	5660	2830	8490	8490
Heat Up	11800	1780	816	10020	964	10984	10984
Cold Down	26900	10200	1920	16700	8280	24980	24980

Berdasarkan appendix ASME section III yang tertera pada Tabel 1 di atas, persyaratan batas tegangan yang diizinkan untuk komponen kelas 1 dinyatakan sebagai nilai *stress intensity* yang diizinkan ( $S_m$ ) yang dihitung pada tegangan luluh ( $S_y$ ) untuk kondisi temperatur desain minimum. Nilai  $S_m$  dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1).

$$S_m = \frac{2}{3} S_y \text{ (pada temperatur desain minimum)} \dots \dots \dots (1)$$

dengan nilai tegangan luluh sebesar 18,3 Ksi (Tabel 2), maka diperoleh nilai  $S_m$  sebesar 12,2 Ksi. Nilai batas maksimum tegangan intensitas yang diizinkan komponen perpipaan pendingin primer kelas 1 disyaratkan sebesar 3  $S_m$ , sehingga nilai tegangan intensitas yang diizinkan pada komponen pipa *cold leg* pada penelitian ini adalah sebesar 36,6 Ksi.

Analisa perhitungan beban gempa bumi dengan bantuan PATRAN menggunakan masukkan berupa data gempa patahan Lembang Bandung yang sudah di modifikasi dalam domain frekuensi (Hz) dan percepatan (*acceleration*) dengan satuan  $\text{inch/jam}^2$ . Untuk menganalisanya dilakukan menggunakan metode respon spektra setelah sebelumnya dilakukan perhitungan modus normal untuk memperoleh data frekuensi pribadi komponen.

Dari hasil perhitungan diperoleh data maksimum translasi yang terjadi akibat beban gempa yaitu sebesar  $1,4E-5$  inch seperti ditampilkan pada Gambar 9. Untuk memperoleh tegangan yang terjadi pada posisi translasi maksimum dihitung menggunakan persamaan (2)<sup>[5]</sup>, yang merupakan hubungan antara tegangan ( $\sigma$ ), regangan ( $\epsilon$ ) dan modulus elastisitas (E).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \dots\dots\dots(2)$$

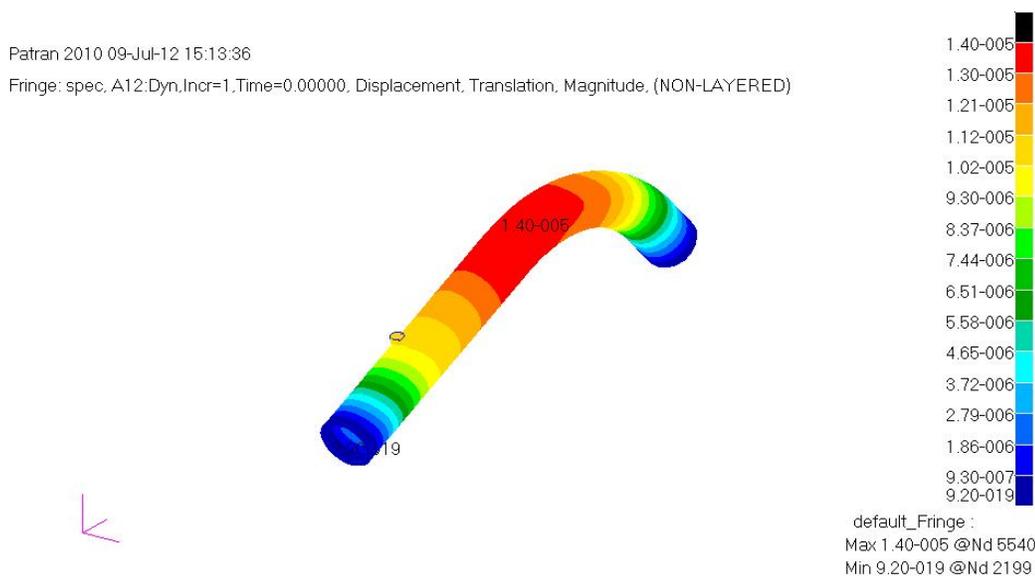
Karena:  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \dots\dots\dots(3)$

maka persamaan (2) menjadi :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\sigma}{E} \quad \text{atau} \quad \sigma = \frac{E \Delta l}{l_0} \dots\dots\dots(4)$$

dengan  $\Delta l$  adalah besar translasi yang terjadi pada model dan  $l_0$  adalah radius geometri awal sebelum translasi. Pada model diperoleh radius geometri awal  $l_0$  dari pusat sumbu sebesar 11 inch dan data modulus elastisitas diperoleh dari Tabel 3, maka dari persamaan 4 dapat dihitung tegangan maksimum yang terjadi akibat beban gempa bumi yaitu :

$$\sigma = \frac{25,3E+6 \text{ (Psi)} \times 1,4E-5 \text{ (inch)}}{11 \text{ (inch)}} \quad \sigma = 32,2 \text{ Psi}$$



**Gambar 9. Maksimum translasi akibat beban gempa bumi**

Perbandingan nilai *stress intensity* hasil perhitungan analisis tegangan dengan nilai yang diizinkan ditampilkan pada Tabel 7.

**Tabel 7. Perbandingan nilai *stress intensity* dengan tegangan yang diizinkan**

Kondisi Pembebanan	SI (Internal Pressure, Psi)	SI (Thermal Stress, Psi)	Allowable Stress (Psi)
Operasi Design	30890	Tidak Dihitung	36600
Operasi Normal	28750	8490	
Heat Up	27800	10984	
Cold Down	203,1	24980	
Gempa bumi	32,2 Psi		

Secara umum, hasil analisa tegangan diatas dapat diterima karena memiliki nilai tegangan hasil perhitungan yang masih dibawah tegangan yang diizinkan. Rasio tegangan yang terjadi pada komponen mencapai 84,39 % terhadap tegangan yang diizinkan, sehingga batas tegangan yang dalam batas aman masih ada sebesar 15,6%.

Dari hasil analisa tegangan diatas telah terjadi tegangan puncak (*peak stress*) yang tinggi dengan nilai diatas tegangan luluhnya. Walau nilai tegangan ini masih dibawah persyaratan tegangan yang diizinkan, namun harus menjadi bahan evaluasi dan dilakukan pembahasan lebih lanjut. Dengan mempertimbangkan filosofi perhitungan menggunakan kode komputer yaitu “*garbage in garbage out*”, maka parameter masukan atau *inputan* pada awal pembuatan model sampai metode analisis yang digunakan dapat menjadi bahan evaluasi untuk merevisi model perhitungan sehingga diperoleh hasil yang dapat diterima atau *valid*.

Kemungkinan pertama adalah pada pembuatan geometri untuk bagian diskontinuitas yaitu pada sambungan pipa harus disempurnakan, karena dari hasil perhitungan diatas diperoleh lokasi tegangan puncak (*peak stress*) dominan terjadi pada bagian ini. Pada kondisi sekarang, pada sambungan pipa tidak terdapat tirus atau *fillet* radius sehingga terjadi konsentrasi tegangan. Pembuatan tirus atau *fillet* secara teori digunakan untuk mengurangi terjadinya konsentrasi tegangan ini. Kemungkinan kedua adalah dengan membagi elemen dengan bagian yang lebih presisi dengan menambahkan *node*. Hal ini diharapkan dapat menghasilkan perhitungan iterasi yang lebih teliti.

## KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan analisis tegangan model pipa *cold leg* diperoleh nilai tegangan yang paling tinggi sebesar 30,8 Ksi pada kondisi operasi desain. Jika dibandingkan dengan nilai tegangan yang diizinkan sebesar 36.6 Ksi, nilai hasil analisis tegangan untuk semua kondisi operasi yaitu desain, kondisi normal, *heatup*, *colddown* dan beban gempa bumi dapat diterima karena masih dibawah batas tegangan yang diizinkan. Nilai rasio mencapai 84,39 % dari tegangan yang di izinkan atau masih ada 15,6 % tegangan yang aman.

Perlu menjadi perhatian adalah terjadinya tegangan puncak (*peak stress*) pada kondisi operasi desain yang ditandai dengan terkonsentrasi tegangan pada daerah sambungan pipa. Tegangan ini harus diperhitungkan lebih lanjut karena jika terjadi secara berulang dapat menyebabkan kegagalan fatik. Untuk itulah sebagai bahan evaluasi, model yang telah dibuat perlu disempurnakan pada bagian sambungan pipa dan perbaikan semua parameter untuk masukan kondisi batasnya untuk mendapatkan hasil perhitungan yang optimal.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. ZHANG ZHENG MING, WANG MING ZHI, HE SHU YAN, “*Simplified Method for Mechanical Analysis of Safety Class 1 Piping*”, *Transactions of The 16<sup>th</sup> International conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-16)*, Washington DC, August 2001.

- [2]. HENGKY POEDJO RAHARDJO, "Pengaruh Gempa Patahan Lembang Terhadap Tegangan Pipa Sistem Pendingin Primer Reaktor TRIGA 2000 Bandung", Prosiding Seminar Nasional Ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Surakarta, 17 Oktober 2009.
- [3]. KINS, "*Mechanical Safety Assessment For Nuclear Power Plant*", Daejon, South Korea 2010.
- [4]. *APPENDIX ASME SECTION III, "Rules For Construction of Nuclear Facility Components"*, USA 2007.
- [5]. GERE, TIMOSHENKO, HANS J, "Mekanika Bahan", Erlangga, Jakarta, 1996.

**DISKUSI/TANYA JAWAB:**

**1. PERTANYAAN: (I Gede Rasagama, Politeknik Negeri Bandung)**

- Jenis *stress* apa saja yang di analisis (tekan, tarik, geser) ?
- Kenapa *stress* pada pipa yang di bengkokkan, tidak di analisis?

**JAWABAN: (Alim Mardhi, PTRKN-BATAN)**

- Tidak semua, namun hanya mengarah kepada ketegangan utama saja (*stress akibat lubang buang emergency*)
- Tidak termasuk bagian dari makalah namun dapat menjadi bagian makalah yang lain.

**2. PERTANYAAN: (Lalu A. Vitgar, Mahasiswa UPI)**

- Jenis Material yang di uji merupakan jenis apa
- Pengujian analisis tegangan data pembandingnya di dapat dari mana?

**JAWABAN: (Alim Mardhi, PTRKN-BATAN)**

- Material tipe JA376, *sekelas austentic steel*
- Data pembandingnya adalah tegangan yang diijinkan berdasarkan ASME Section III.N6

**3. PERTANYAAN: (Maya Aprilia, Mahasiswa UPI)**

- Jenis Apakah model pipanya bisa di buat sembarang atau bentuk pipa di sesuaikan dengan kebutuhan?
- Apa yang terjadi jika kita membuat pipa tersebut tegangannya melebihi maximum, apakah akan merusak pipa tersebut?

**JAWABAN: (Alim Mardhi, PTRKN-BATAN)**

- Material Pembuatan model pipanya berdasarkan kondisi real atau nyata sesuai topik riset.
- Jika pada akhir analisis tegangan melebihi batas yang di izinkan, maka artinya pipa tersebut dalam kondisi tidak aman dan bahkan rusak atau pecah.

**4. PERTANYAAN: (Bambang galung S., PRPN-BATAN)**

- Software apa yang di pakai untuk menghitung *stress* itu apa dan persamaan ASME code yang di jadikan tahun berapa?
- Pada node nomer berapa tegangan *stress* terbesar?

**JAWABAN:** *(Alim Mardhi, PTRKN-BATAN)*

- *Software PATRAN, branded MSC software. ASME code Section III.N6 tahun 2003.*
- *Pada node di daerah T- junction karena ada diskontinuitas struktur.*