

EVALUASI DESAIN KONDISI TUNAK KEPALA PENUTUP BEJANA TEKAN REAKTOR DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Alim Mardhi dan Roziq Himawan

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310
e-mail: alim_m@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI DESAIN KONDISI TUNAK KEPALA PENUTUP BEJANA TEKAN REAKTOR DENGAN METODE ELEMEN HINGGA. Integritas struktur dan keamanan komponen bejana tekan reaktor khususnya kepala penutup harus benar-benar terjamin untuk menunjang aspek sistim keselamatan reaktor. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai tingkat keamanan komponen dengan cara melakukan evaluasi terhadap desain. Metodologi yang digunakan adalah membuat simulasi permodelan dua dimensi (2D) komponen kepala penutup menggunakan perangkat lunak PATRAN untuk menghitung nilai distribusi tegangan akibat tekanan dalam dan tegangan termal kondisi tunak dengan skenario kondisi operasi reaktor dalam keadaan normal, keadaan kelebihan tekanan dan kondisi kehilangan cairan pendingin. Tahapan yang dilakukan adalah membuat model untuk kemudian dimasukkan sifat material, kondisi batas dan tegangan untuk mendapatkan keluaran berupa nilai distribusi tegangan. Nilai ini akan dianalisis dan dibandingkan dengan nilai batas tegangan yang diizinkan sesuai standar ASME section III. Dari perhitungan menggunakan perangkat lunak PATRAN berbasis metode elemen hingga diperoleh distribusi tegangan masih dibawah tegangan yang diizinkan yaitu sebesar 2 kali tegangan luluh yaitu sebesar 496 MPa. Namun terdapat tegangan puncak (*peak stress*) pada daerah yang kritis sebesar 499 MPa. Tegangan ini harus dianalisis lebih lanjut dengan analisis fatik untuk mendapatkan tingkat keamanannya. Secara umum jika dibandingkan dengan tegangan yang diizinkan maka hasil evaluasi desain komponen ini dapat disimpulkan bahwa integritas struktur komponen tersebut masih dalam batas aman.

Kata kunci: Kepala Penutup, Bejana Tekan Reaktor, Metode Elemen Hingga, Evaluasi Desain.

ABSTRACT

DESIGN EVALUATION CLOSURE HEAD COMPONENT REACTOR PRESSURE VESSEL IN STEADY STATE USING FINITE ELEMENT METHOD. *Structural integrity and safety of reactor pressure vessel components, especially the closure head must be fully guaranteed to support aspects of reactor safety systems The purpose of this study is to obtain the value of security level of the component by evaluating design. The methodology used is to make simulation modeling two dimension (2D) component of the closure head using PATRAN software to calculate the value of the stress due to pressure and thermal stress in steady state condition, with a scenario of reactor operating condition in normal, over pressure, and lost of cooling accident. The first step is creating a model for later incorporated with material properties, boundary conditions, and loading to obtain a value of stress distribution. This value will be analyzed and compared with the allowable value according to requirements in ASME section III. From calculations using PATRAN obtain the value is still below the allowable stress 496 MPa or two times of yield stress point. But there is a peak stress 499MPa on the critical area. This stress should be analyzed further by the fatigue analysis to obtain the level of safety. In general when compared with the allowable stress, the evaluation design of this component can be concluded that the structural integrity of the component is still in safe limit.*

Keywords: Closure Head, Reactor Pressure Vessel, Finite Element Method, Design Evaluation.

1. PENDAHULUAN

Integritas struktur dan keamanan komponen bejana tekan reaktor harus benar-benar terjamin untuk menunjang aspek sistim keselamatan reaktor. Untuk mendapatkan tingkat keamanannya maka diperlukan evaluasi terhadap desain.

Persyaratan yang harus dipenuhi dalam melakukan evaluasi desain komponen mengacu pada kode ASME section III yaitu persyaratan untuk tingkat keselamatan desain dan operasi komponen-komponen pada instalasi nuklir. Evaluasi desain komponen dapat dilakukan dari sisi integritas sifat material yaitu mengevaluasi perubahan sifat material yang menyusun komponen terhadap perubahan kondisi lingkungan operasi. Dan evaluasi berdasarkan beban mekanikal yang diterima oleh struktur yaitu menghitung beban-beban yang diberikan baik dari struktur komponen itu sendiri seperti berat dan massa juga beban dari luar seperti tekanan, tarikan, beban thermal dan sebagainya.

Langkah pertama yang dilakukan adalah menganalisa tegangan pada daerah yang kritis dan potensi mengalami kegagalan. Berdasarkan dokumen IAEA-TECDOC 1556, salah satu komponen RPV yang mendapatkan perhatian khusus dalam evaluasi analisis tegangan adalah sistem komponen kepala penutup (*closure head system*) bejana tekan reaktor, yang terdiri dari kubah penutup (*head dome*) dan *flange*, baut penahan (*stud bolt*), gasket, dan dinding bejana tekan. Pada komponen ini memiliki potensi untuk terjadinya konsentrasi tegangan yang tinggi disebabkan oleh terjadi pembebanan yang sangat kompleks pada komponen yaitu pembebanan aksial, lentur, tekanan dalam dan tegangan termal ketika bejana tekan beroperasi^[1].

Parameter yang di evaluasi adalah nilai tegangan utama (*prinsiple stress*) arah radial yang terjadi pada komponen untuk selanjutnya dihitung dan dibandingkan dengan intensitas tegangan yang diizinkan (*allowable stress*). Perhitungan ini dapat dilakukan dengan metoda elemen hingga menggunakan perangkat lunak antara lain PATRAN. Penelitian tentang komponen kepala penutup (*closure head*) menggunakan perangkat lunak berbasis metoda elemen hingga telah banyak dilakukan. Metoda permodelan dapat secara keseluruhan *sealing system* atau terpisah per komponen. T Smolnicki (2007)^[2] membuat permodelan baut yang terpasang pada sistem kepala penutup dengan fleksibilitas yang besar dimana baut terkena beban aksial, lentur, torsi dan dinamik. Hasil akhirnya adalah mendapatkan tegangan bolak-balik dan tegangan rata-rata untuk dapat digunakan sebagai parameter dalam menghitung kegagalan fatiknya. Tengjiau Lin (2006)^[3] lebih spesifik lagi melakukan analisis 3D sistem komponen kepala penutup bejana tekan reaktor pada kondisi transien. T Lin melakukan permodelan 3D dan memvalidasi hasil permodelannya dengan eksperimen dengan membuat model bejana tekan reaktor 300 MW dengan skala 1:4.

Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga dengan dibantu perangkat lunak PATRAN. Tahapan yang dilakukan adalah membuat simulasi permodelan dua dimensi (2D) sistem kepala penutup (*closure head system*) bejana tekan reaktor EPR-UK jenis reaktor air bertekanan (*pressurizer water reactor*) buatan Flamanville Francis dengan model skala 1:1. dan melakukan masukkan berupa pembebanan pada kondisi operasi normal, kondisi kelebihan tekanan dan kondisi kehilangan cairan pendingin atau LOCA. Perhitungan dilakukan dengan asumsi kondisi tunak yaitu kondisi sesaat hanya pada satu beban tertentu. Dari perhitungan diharapkan diperoleh nilai distribusi tegangan untuk dapat dibandingkan dengan nilai standar keselamatan komponen yang disyaratkan oleh ASME Section III.

Diharapkan dari penelitian ini diperoleh metode evaluasi desain dari aspek desain sistem keselamatan komponen dan dapat melakukan perhitungan dan analisis tegangan pada komponen

kepala penutup (*closure head system*) bejana tekan reaktor sehingga dapat menentukan tingkat keamanan dan keandalan integritas struktur komponen terhadap beban operasi.

2. TEORI

2.1. Analisa Tegangan

Tujuan utama melakukan evaluasi desain adalah untuk menentukan apakah komponen dapat bertahan dan aman selama kondisi beroperasi dan tidak mengalami kegagalan atau rusak yang dapat berakibat fatal baik terhadap keseluruhan sistem atau bahkan terhadap keselamatan operator. Untuk itu yang paling mendasar dalam melakukan evaluasi desain adalah melakukan perhitungan dan analisis tegangan-tegangan yang berkerja pada komponen dan membandingkan hasil perhitungan tegangannya dengan nilai batas yang diizinkan (*allowable stress*).

Untuk komponen bejana tekan reaktor, tegangan yang terjadi antara lain disebabkan oleh tekanan dalam (*internal pressure*) yang menekan dinding bejana tekan dan tegangan termal (*thermal stress*) akibat ekspansi struktur yang disebabkan perbedaan temperatur.

Akibat tekanan dalam akan terjadi distribusi tegangan pada arah radial dan tangensial. Untuk perhitungan tegangan yang terjadi pada arah radial kepala penutup berbentuk *hemispherical* dapat menggunakan persamaan 1^[4].

$$S_R = \frac{PR_i^3}{R_o^3 - R_i^3} \left(1 - \frac{R_o^3}{R^3} \right) \quad (1)$$

keterangan:

- S_R : Tegangan arah radial (MPa)
 P : Tekanan dalam (MPa)
 R_i : Jari-jari bagian dalam dinding
 R_o : Jari-jari bagian luar dinding

Tegangan termal terjadi karena perbedaan temperatur yang menyebabkan struktur mengalami ekspansi namun dibatasi oleh pengekanng baik dari faktor geometri komponen atau memang ada struktur tambahan seperti baut yang mengikat. Tegangan termal dapat dihitung menggunakan persamaan 2^[5].

$$\sigma_t = E \alpha (\Delta T) \quad (2)$$

keterangan:

- σ_t = Tegangan Termal (MPa)
 E = Modulus Elastisitas (Mpa)
 α = Koefisien Muai Termal (m / m °C)
 ΔT = Perbedaan Temperatur (°C)

Dalam *ASME section III* dijelaskan tiga jenis beban untuk bejana tekan reaktor yaitu *primary stress*, *secondary stress*, dan *peak stress*. *Primary stress* berdasarkan arah gaya terbagi menjadi dua yaitu *primary membrane stress* dan *bending stress* (Pb). *Primary membrane stress* dibagi lagi menjadi dua jenis berdasarkan lokasinya yaitu *general primary membrane stress* (Pm)

dan *local primary membrane stress* (P1). Jenis tegangan yang lain adalah *Secondary stress* (Q) yaitu beban yang di sebabkan karena adanya pengekangan sendiri (*self constraint*) oleh komponen atau pengekangan lingkungan. Jika pengekangan ini hilang dengan sendirinya atau dilepas, maka tegangan akan hilang. Untuk komponen kepala penutup berbentuk *hemispherical* dengan sambungan *flange* yang mendapatkan tekanan dalam (*internal pressure*) menghasilkan jenis tegangan *local primary membrane stress* (P1) dan *Secondary stress* (Q).

Nilai tegangan hasil analisis kemudian dibandingkan dengan nilai batas tegangan yang diizinkan (*allowable stress*). Nilai batas ini dapat berupa nilai *stress intensity* (Sm) atau dapat langsung dibandingkan dengan nilai tegangan luluh material (Sy) seperti ditampilkan pada Tabel.1. Untuk komponen kepala penutup criteria nilai batas tegangan yang diizinkan adalah dua kali nilai tegangan luluhnya (2 Sy) atau tiga kali nilai stress intensity (3 Sm).

Tabel 1. Parameter Evaluasi Analisis Tegangan^[6].

Stress Intensity	Tabulated Value	Yield Strength	Ultimate Tensile Strength
General Primary Membrane(P_m)	S_m	$2/3 S_y$	$1/3 S_u$
Local Primary Membrane(P_l)	$1.5 S_m$	S_y	$(1/2) S_u$
Primary Membrane Plus Membrane ($P_l + P_b$)	$1.5 S_m$	S_y	$(1/2) S_u$
Primary Plus Secondary ($P_l + P_b$)	$3 S_m$	$2 S_y$	$(1/2) S_u$

2.2. Metoda Elemen Hingga (*Finite Element Method*)

Metoda elemen hingga adalah metoda numerik untuk mendapatkan pendekatan solusi dari masalah-masalah praktis dalam keteknikan dan analisis ilmiah antara lain masalah dalam bidang mekanika struktur, perpindahan panas, mekanika fluida dan banyak lagi.

Philosofi dasar dari metode elemen hingga adalah dilakukan diskritisasi dan aproksimasi terhadap struktur menjadi elemen-elemen yang lebih kecil. Untuk saling berhubungan antara satu elemen dengan elemen yang lain terdapat *node*. Pada *node* inilah terjadi perpindahan parameter antar elemen.

Untuk mendapatkan permodelan yang mendekati kondisi sebenarnya, setiap elemen diberikan kondisi batas. Kondisi batas dapat berupa parameter pembebanan, sifat material, atau kondisi lingkungan. Sebagian model memiliki kondisi-kondisi tertentu yang membatasi (*constraint*) sifat-sifatnya, sebagai contoh ujung dari batang kantilever yang di ikat kaku pada dinding memiliki kondisi batas berupa kekang kaku (*fixed constraint*) pada enam derajat kebebasan yaitu translasi arah x, y, z dan rotasi dengan sumbu x, y dan z.

Perangkat lunak PATRAN berbasis metode elemen hingga mempermudah pengguna untuk membuat model, melakukan perhitungan dan analisis untuk berbagai masalah khususnya perhitungan analisis tegangan struktur dan termal.

Tahapan dalam penggunaan PATRAN adalah membuat model. Model dapat berupa satu dimensi (1D), dua dimensi (2D) atau tiga dimensi (3D). Model ini kemudian didiskritisasi mejadi elemen-elemen dan diberi masukkan kondisi batas. Masing-masing dimensi memiliki tipe elemen dan topologi yang khusus. Tipe elemen dan topologinya membantu pengguna mendefinisikan karakteristik fisik dari model dan responnya terhadap suatu pembebanan. Beban yang sama yang diterapkan pada tipe elemen berbeda akan menghasilkan respon yang berbeda. Tipe elemen ini bisa di atur sifat dan parameternya seperti ketebalan, konstanta juga termasuk sifat material untuk elemen-elemen khusus. Macam-macam tipe elemen berdasarkan dimensi model ditampilkan pada Tabel.2.

Setelah model telah selesai, hal terakhir yang dilakukan adalah menganalisis model sesuai kebutuhan. Untuk program PATRAN, ada beberapa jenis solusi yang bisa di lakukan antara lain solusi linear statis, nonlinear statis, respon frekuensi dan sebagainya.

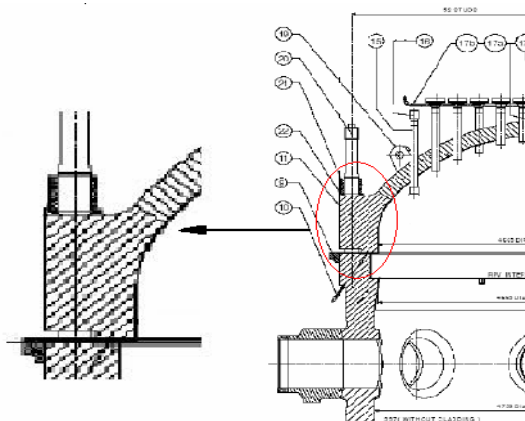
Tabel. 2 Tipe elemen berdasarkan dimensi model

Dimensi	Tipe
0D (Point)	<i>Massa, Grounded Spring, Grounded Damper</i>
1D (Garis)	<i>Beam, Rod, Spring, Damper, Gap, Massa 1D</i>
2D (Bidang)	<i>Shell, Bending Panel, 2D-Solid, Membrane, Panel Geser</i>
3D (Volume)	<i>Solid</i>

2.3. Geometri Kepala peutup (*Closure Head*)

Geometri dan ukuran dimensi komponen kepala penutup pada penelitian ini menggunakan gambar desain bejana tekan reaktor EPR-UK yang merupakan reaktor daya tipe PWR buatan Flamanville Francis. Reaktor ini telah digunakan pada beberapa Negara di Eropa seperti Inggris dan Francis dan juga Amerika Serikat. Gambar kepala penutup untuk bejana tekan reaktor EPR-UK ditampilkan seperti pada Gambar 1^[7].

Komponen kepala penutup terdiri dari kubah penutup (*head dome*) dan *flange*, baut penahan (*stud bolt*), gasket, dan dinding bejana tekan. Jenis material penyusun dan sifat-sifatnya ditampilkan dalam Tabel 3^[8,9].



Gambar. 1. Komponen Closure Head

Tabel 3. Sifat-sifat Material Komponen Kepala Penutup.

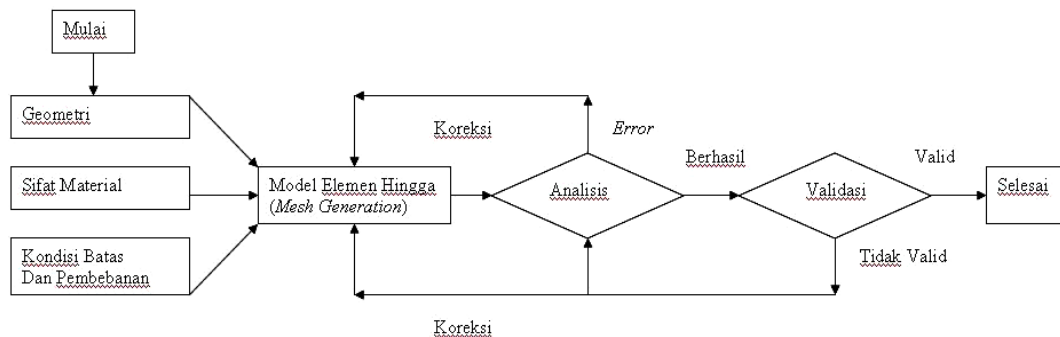
No	Sifat Material	Head Dome & Flange	Stud Bolt	Gasket	Dinding Vessel
1.	Kode	ASTM 105	ASTM SA193B7	ASTM A182F316	SA 533 Grade B
2.	E (GPa)	183	168	164	173
3.	Poisson Ratio; ν	0.3	0.3	0.3	0.3
4.	k (W/m °C)	47	37	20	38.8
5.	ρ (kg/m ³)	7861	7900	7817	7800
6.	cp (J/g °C)	447.98	460	461	
7.	α (m / m °C)	12.5 e-6	14.1 e-6	3.0 e-6	
8.	Yield Stress (Tegangan yang diizinkan ; MPa)	248.2	723.9	206.8	290

3. METHODOLOGI

3.1. Permodelan Elemen Hingga

Tahapan yang dilakukan dalam permodelan elemen hingga menggunakan program perangkat lunak berbasis metode elemen hingga PATRAN adalah dimulai dengan pembuatan geometri, pembuatan jaring (*mesh generation*) berupa rangkaian elemen dan *node*, memasukkan sifat material, kondisi batas dan terakhir analisis. Setelah analisis berhasil, tahapan selanjutnya adalah melakukan validasi untuk mendapatkan keabsahan (validitas) hasil analisis yaitu dengan membandingkan nilai hasil analisis dengan nilai perhitungan numerik. Secara sistematis tahapan-tahapan dalam permodelan elemen hingga ditampilkan dalam Gambar 2.

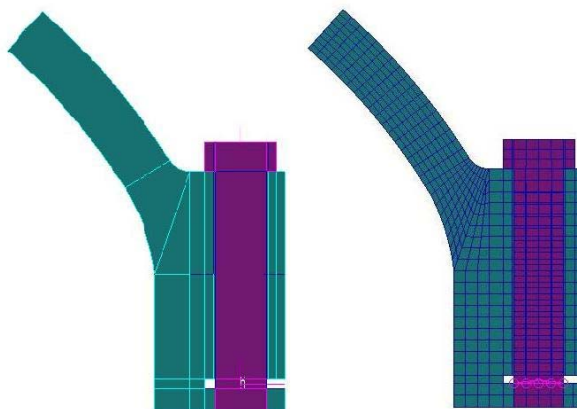
Desain model komponen kepala penutup menggunakan model geometri dua dimensi (2D). Model yang dibuat berupa komponen kubah penutup (*head dome*) dan *flange*, baut penahan (*stud bolt*), gasket, dan dinding bejana tekan seperti ditampilkan pada Gambar 3. Pada model ini, gasket tidak dimodelkan secara detail seperti aslinya namun hanya merupakan bagian dari cincin yang melingkar antara kubah penutup dan dinding bejana tekan yang dibawah. Juga pada model ini tidak di buat analisis kontak antara masing-masing komponen, sehingga tidak dapat melihat detail interaksi baik berupa tegangan ataupun deformasi pada permukaan yang terjadi kontak.



Gambar 2. Diagram Alir Permodelan Metode Elemen Hingga

Pembuatan jaring (*meshing*) dilakukan menggunakan jenis elemen shell dengan topologi quad 4, yaitu berbentuk quadrilateral dengan empat node dan empat sisi. Total elemen yang terbentuk sejumlah 989 elemen dan 1305 node. Semua elemen dimasukkan sifat material tergantung

modelnya seperti yang tertera pada Tabel 3. Semua elemen menggunakan koordinat *cylindrical* yaitu pergerakan arah radial, sudut dan kedalaman.



Gambar 3. Model Komponen Kepala Penutup (Closure Head)

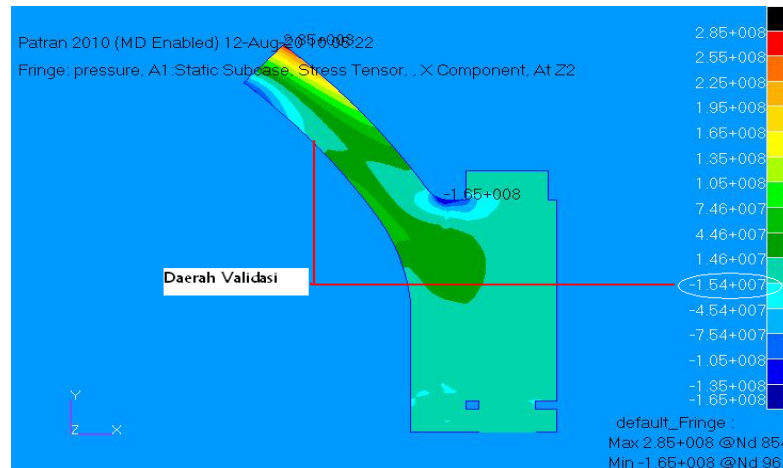
Pembebanan pada yang diberikan dibagi dengan dua skenario kondisi. Kondisi pertama pembebanan pada kondisi operasi normal. Tekanan dalam (*internal pressure*) diberikan sebesar 15 MPa, temperatur operasi dinding bagian dalam sebesar 300°C, temperatur awal sebesar 20°C dan temperatur dinding bagian luar sebesar 25°C. Kondisi kedua untuk tekanan diskenariokan kejadian tekanan berlebih (*over pressure*) sesaat sebelum katup darurat bejana tekan dibuka. Dari dokumen keselamatan SAR 1400 diperoleh tekanan pada saat kondisi ini sebesar 110% tekanan desain (17 MPa), sehingga tekanan dalam yang diterapkan adalah sebesar 18.7 MPa. Untuk skenario kondisi ekstrim temperatur dipilih skenario bejana tekan kehilangan cairan pendingin (LOCA) akibat pecahnya pipa utama (primer) dimana temperatur pada kelongsong sebesar 930°C^[10]. Pada penelitian ini dengan tidak memperhitungkan perpindahan panas yang terjadi antara kelongsong dan dinding bejana tekan, temperatur pada dinding bejana tekan diberikan sebesar 930°C dan temperatur awal merupakan temperatur kondisi operasi normal sebesar 300°C serta suhu dinding bagian luar sebesar 127°C^[11].

Kondisi batas model ini adalah untuk potongan geometri diberlakukan constraint kaku (*fixed*) pada arah normal bidang potong dan sumbu z serta diizinkan untuk translasi bebas arah radial. Setelah semua parameter lingkungan telah dimasukkan, model di analisis menggunakan solusi linear elastis. Pertimbangan menggunakan solusi linear elastis adalah dengan asumsi tidak terjadi perubahan deformasi plastis dan kekuatan struktur komponen akan dievaluasi menggunakan batas aman parameter tegangan luluhnya (*yield stress*).

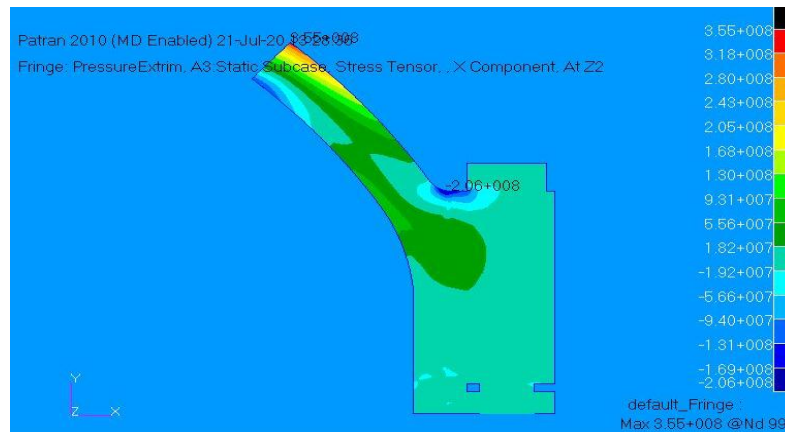
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan perhitungan menggunakan perangkat lunak PATRAN dengan memasukkan parameter dan kondisi batas seperti yang tertera pada bagian metodologi. Hasil yang diperoleh seperti ditampilkan pada Gambar 4 dan 5 yaitu distribusi tegangan akibat pengaruh tekanan untuk

kondisi operasi normal normal (15 Mpa) dan kondisi operasi pada saat tekanan berlebih (*over pressure*) yaitu sebesar 110% dari tekanan desain (18.7 MPa).

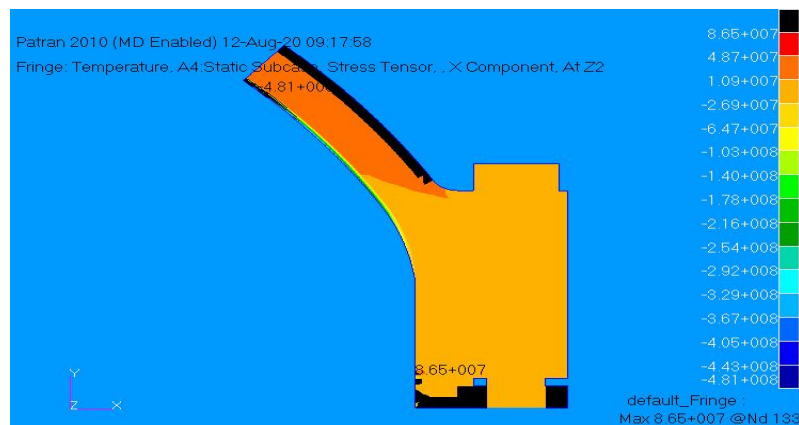


Gambar 4. Distribusi tegangan akibat pengaruh tekanan kondisi operasi normal



Gambar 5. Distribusi tegangan pengaruh tekanan berlebih (*over pressure*)

Gambar 6 dan 7 merupakan distribusi tegangan thermal pada dinding bagian dalam dengan masing-masing untuk kondisi operasi normal (300°C) dan kondisi pada saat kehilangan cairan pendingin (930°C). Untuk mempermudah validasi hasil dan mempersempit pokok bahasan, nilai tegangan yang ditampilkan hanya nilai distribusi tegangan pada arah radial saja.



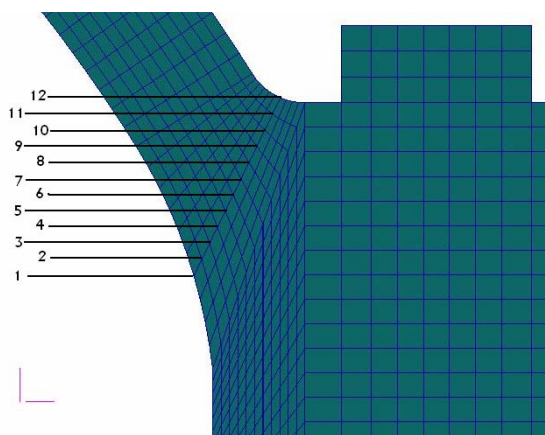
Gambar 6. Distribusi tegangan pada temperatur kondisi operasi normal



Gambar 7. Distribusi tegangan pada temperatur kondisi kehilangan cairan pendingin.

Sebelum melakukan analisis lebih lanjut, hasil perhitungan diatas divalidasi menggunakan persamaan 2^[4]. Persamaan ini dapat menghitung nilai tegangan arah radial (S_R) akibat tekanan yang diberikan pada dinding bagian dalam tutup bejana tekan reaktor (*closure head*) yang berbentuk *hemispherical*. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai tegangan arah radial untuk dinding permukaan bagian dalam sebesar -15 MPa dan dari hasil perhitungan PATRAN diperoleh hasil sebesar -15,4 MPa, tingkat kesalahan perhitungan sebesar 2% sehingga dapat diterima kevalidannya untuk dilakukan analisis.

Selanjutnya untuk analisis lebih lanjut dipilih daerah yang terjadi diskontinyu material yaitu pada daerah sambungan. Pada daerah ini pada saat proses manufaktur adalah sambungan antara kubah atas (*doom*) dan kepala *flange* (*flange head*) sehingga merupakan daerah yang kritis untuk terjadi kegagalan akibat terjari konsentrasi tegangan baik pada saat proses produksi maupun dari sisi geometri yang berbentuk radius. Gambar daerah yang menjadi pokok analisis ditampilkan pada Gambar 8.

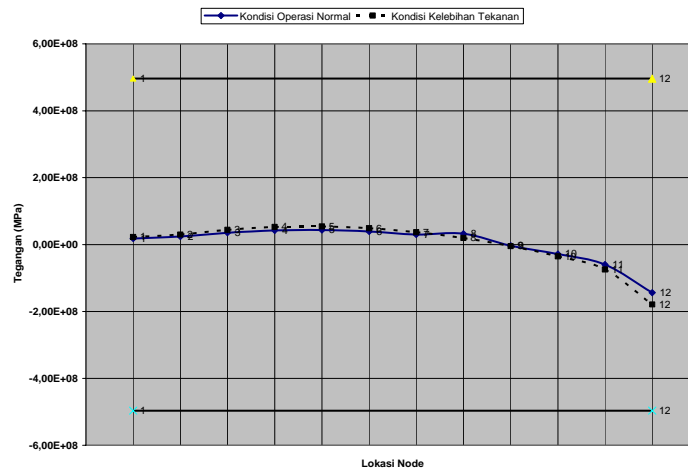


Gambar 8. Lokasi Node pada daerah diskontinyu

Sebagaimana disebutkan pada dasar teori, nilai tegangan hasil analisis kemudian akan dibandingkan dengan nilai batas tegangan yang diizinkan (*allowable stress*). Untuk komponen kepala penutup criteria nilai batas tegangan yang diizinkan adalah dua kali nilai tegangan luluhnya (2 S_y) atau tiga kali nilai stress intensity (3 S_m). Nilai ini diperoleh dari persyaratan ASME yang

mempertimbangkan faktor diskontinyu pada kepala penutup. Tegangan yang terjadi tergolong *secondary stress*. Nilai tegangan luluh untuk komponen kepala penutup (*head*) adalah sebesar 248,2 MPa, berarti nilai batas aman 2Sy adalah sebesar 496 MPa.

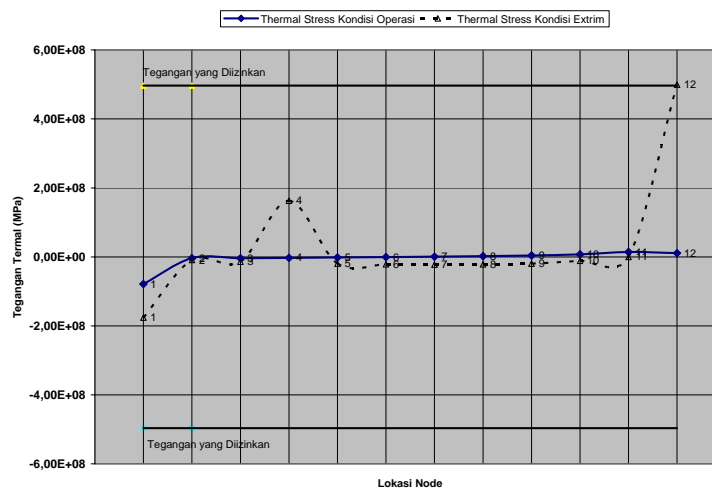
Pada Gambar 9. ditampilkan nilai distribusi tegangan akibat pengaruh tekanan dari dua skenario kondisi operasi. Tegangan pada dinding bagian dalam mengalami tarikan (*tensile*) dan bagian luar mengalami kompresi. Hal terpenting pada grafik ini adalah nilai batas tegangan masih dibawah batas tegangan yang diizinkan sehingga dapat dinyatakan aman.



Gambar 9. Grafik distribusi tegangan pengaruh tekanan pada daerah diskontinyu

Untuk distribusi tegangan akibat pengaruh tegangan thermal baik kondisi operasi normal dan kondisi operasi ekstrim diperoleh distribusi tegangan seperti ditampilkan pada Gambar 10.

Yang menjadi perhatian adalah terjadinya *peak stress* pada dinding luar bejana tekan yaitu sebesar 499 MPa. Secara umum *peak stress* tidak membahayakan dengan syarat terjadi hanya satu kali dan akan hilang jika temperatur sudah kembali normal. Namun untuk keamanan maka perlu dianalisis lebih lanjut dengan analisis fatik karena *peak stress* adalah salah satu parameter untuk terjadinya kegagalan fatik jika terjadi berulang.



Gambar. 10. Grafik distribusi tegangan thermal pada daerah diskontinyu

Untuk hasil evaluasi integritas struktur akibat beban tekanan dalam dan beban thermal komponen kepala penutup khususnya pada daerah yang kritis atau terjadi diskontinyu material. dari berbagai kondisi dapat dilihat dari keseluruhan grafik diatas. Nilai parameter untuk menyatakan staus komponen masih dalam batas aman atau tidak adalah nilai tegangan yang diizinkan sebagaimana dijelaskan dalam dasar teori.

Dari dua grafik diatas, semua kurva kecuali kurva beban thermal akibat untuk skenario kondisi ekstrim yaitu skenario kehilangan cairan pendingin (*LOCA*) dapat dinyatakan aman. Hal ini dibuktikan dengan kurva distribusi tegangan berada dibawah batas nilai tegangan yang diizinkan. Karena pemilihan bagian dari komponen adalah bagian yang paling kritis dan masih dapat dikategorikan aman maka dapat diambil hasil analisis untuk komponen secara umum adalah integritas struktur komponen pada model diatas dapat dinyatakan masih aman.

5. KESIMPULAN

Evaluasi desain komponen closure head pada bejana tekan reaktor dilakukan untuk mendapatkan tingkat keamanan dalam integritas struktur komponen. Evaluasi desain komponen dapat dilakukan dengan cara menghitung beban mekanikal yang diterima oleh struktur pada daerah yang paling kritis untuk dibandingkan hasilnya dengan nilai tegangan yang diizinkan atau secara konvensional adalah nilai tegangan luluh material (*yield stress*).

Pada komponen *closure head* bejana tekan reaktor telah dilakukan evaluasi desain dengan memasukkan parameter beban tekanan dan beban thermal pada kondisi operasi normal dan kondisi abnormal dan dilakukan perhitungan menggunakan metode elemen hingga.

Hasil perhitungan menunjukkan nilai maksimum distribusi tegangan pada daerah kritis komponen kepala penutup sebesar 499 MPa diatas batas tegangan yang diizinkan sebesar 496 MPa. Hal ini mesti dianalisis lebih lanjut dengan analisis fatik karena pada dasarnya puncak tegangan ini (*peak stress*) tidak akan berpengaruh jika hanya dalam waktu singkat tetapi jika terus berulang maka dapat menjadi inisiasi kegagalan fatik. Secara umum distribusi tegangan masih berada dibawah batas tegangan yang diizinkan sehingga dapat disimpulkan bahwa kondisi komponen masih dalam keadaan aman.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IAEA, "Assesment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: PWR Pressure Vessel, Austria, 2007.
- [2]. T.Smolnicki, E. Rusinski, J Karlinski, "FEM Modelling of Fatigue Loaded Bolted Flange Joints", *Journal of Achievements in Material and Manufacturing Engineering*, Volume 22, Issue 1, May 2007.
- [3]. Tengjiao Lin, Runfang Li, H.Long, "Three Dimensional Transient Sealing Analysis of The Bolted Flange Connentions Of Reactor Pressure Vessel". *Nuclear Engineering and Design*, Volume 236, Page 2599-2607, 2006.
- [4]. Somnath C, "Pressure Vessel Design and Practice", CRC Press Inc. 2005. Page 77.

- [5]. Gere, Timoshenko, Hans J, “ Mekanika Bahan”, Erlangga, Jakarta, Halaman 75. 1996.
- [6]. ASME Section III, “*Rules For Construction of Nuclear Facility Components*”, USA 2007.
- [7]. UK-EPR, “Fundamental Safety Overview”, Volume 2: Design and Safety, Sub-Chapter:E3, Page 18.
- [8]. Muhammad Abid Sajid Iqbal, “ *Nonlinear Finite Element Analysis of Gasketed Flange Joints under Combined Internal Pressure and Different Thermal Loading Conditions*”, Failure of Engineering Materials & Structures, UET TAXILA Mechanical Engineering Department, PHd Thesis.
- [9]. Jin-Su Kim, Jae-Boong Choi, YJ Kim, YW Park, “Investigation on Constraint Effect of Reactor Pressure Vessel Under Pressurized Thermal Shock” *Nuclear Engineering and Design*, Volume 219, Page 197-206, 2002.
- [10]. Mulya Juarsa, Anhar R Antariksawan, “Studi Perpindahan Panas Selama *Rewetting* Pada Simulasi Pendinginan Pasca LOCA”, Seminar Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar IPTEK Nuklir, Yogyakarta, 2006.
- [11]. J.S Kim, T.E Jin, “*Study For Thermal and Structural Behaviour of Reactor Pressure Vessel Under External Reactor Vessel Cooling*”, *Transactions of The 15th International conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15)*, Seoul, Korea, August 15-20. 1999.

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Ali Usman, FMIPA-UNY)

- Metode Elemen Hingga itu apa?
- Mengapa analisisnya dibuat di daerah kritis?

JAWABAN: (Alim Mardhi, PTRKN-BATAN)

- *Metode Elemen Hingga (MEH) adalah metode numerik berupa diskritisasi (pembagian-pembagian) sesuai model menjadi elemen-elemen kecil, sehingga dapat digunakan untuk membuat perhitungan lebih presisi dan dapat mengetahui nilai tegangan pada semua tempat yang diinginkan.*
- *Kalau di daerah kritis sudah dinyatakan aman, maka tentunya di daerah lain juga aman.*