



e-ISSN Number
2655 2967

Available online at <https://jurnal.teknologiindustriumi.ac.id/index.php/JCPE/index>

Journal of Chemical Process Engineering

Volume 7 Nomor 1 (2021)



SINTA Accreditation
Number 28/E/KPT/2019

Analisa Tegangan Panas Housing Batang Kendali Reaktor Nuklir Dalam Batas Desain SA403X

*(Thermal Stress Analysis of Nuclear Reactor Control Rod Housing
Within SA403X's Design Limits)*

Anni Rahmat^{1*}, Yuni Kurniati¹, Fahmi Alfa Muslimu²

¹Departemen Teknik Kimia, Universitas Internasional Semen Indonesia, Jl. Veteran (PT. Semen Indonesia Persero Tbk) Gresik Jawa Timur 61122, Indonesia

²Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran-BRIN, Jl. Kw. Puspipetek No.30, Muncul, Kec. Setu, Kota Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

Inti Sari

Batang kendali reaktor Nuklir adalah satu komponen yang digunakan untuk mengendalikan populasi neutron yang beredar dalam teras reaktor nuklir. Untuk memenuhi desain PLTN tipe PWR perlu dibuat sebuah prototype housing batang kendali. Oleh karena itu dalam rangka pembuatan prototype housing batang kendali di perlukan sebuah pradesain yaitu berupa pemodelan integritas housing batang kendali dengan menggunakan metode element hingga. Simulasi perpindahan panas dan mekanik pada housing batang kendali reaktor nuklir tipe PWR telah dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak Ansys. Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui distribusi temperatur selama operasi dan distribusi tegangan vonmises pada kondisi tegangan panas yang terjadi pada housing batang kendali reaktor dengan tujuan untuk mengetahui integritas strukturnya. Simulasi dilakukan dengan kondisi temperatur operasi 280 °C dan tekanan 15 MPa dan adanya faktor konveksi pada temperatur 60 °C serta pada kondisi unsteady state. Dalam simulasi di dapatkan hasil bahwa distribusi temperatur pada housing batang kendali berada pada range 170 °C – 280 °C dengan distribusi tegangan Vonmises pada tegangan panas paling rendah adalah 2 MPa dan tegangan Vonmises pada tegangan panas tertinggi sebesar 217 MPa. Dengan menggunakan teori kegagalan tegangan luluh dan distorsi energi maka tegangan panas (dalam vonmises) yang ada pada housing batang kendali masih dalam batas aman karena tegangan yang terjadi masih di bawah tegangan luluh dari bahan SA403X.

Kata Kunci: Housing Batang kedali; Integritas Struktur; metode elemen hingga

Key Words : Stem housing; Structural Integrity; finite element method

Abstract

Control rod nuclear reactor is one of part for control of neutron population in core reactor. To fulfill the requirement PWR type nuclear power plant design, it is necessary to make a prototype control rod housing. Therefore, in order to manufacture a control rod housing prototype, a pre-design is needed, namely modeling the integrity of the

Published by

Department of Chemical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Universitas Muslim Indonesia, Makassar

Address

Jalan Urip Sumohardjo km. 05 (Kampus 2 UMI)
Makassar- Sulawesi Selatan

Phone Number

+62 852 5560 3559
+62 823 4988 0792

Corresponding Author

*anni.rahmat@uisi.ac.id,



Journal History

Paper received : 23 September 2021
Received in revised : 06 Desember 2021
Accepted : 07 April 2022

control rod housing using the finite element method. Simulation of heat transfer and mechanics on the control rod housing of the PWR type nuclear reactor has been carried out using the finite element method with the help of Ansys software. This simulation was carried out to determine the temperature distribution during operation and the distribution of the Vonmises stress in thermal stress condition that occurred in the reactor control rod housing in order to determine the structural integrity. Simulations were carried out with operating temperature conditions of 280 °C and pressure of 15 MPa and the presence of a convection factor at a temperature of 60 C and in unsteady state conditions. In the simulation, it is found that the temperature distribution in the control rod housing is in the range of 170 °C – 280 °C with the lowest Vonmises stress in thermal stress condition distribution is 2 MPa and the highest Vonmises stress is 217 MPa. By using the failure theory of yield stress and energy distortion, the stress on the control rod housing is still within safe limits because the stress that occurs is still below the yield stress of the SA403X material.

PENDAHULUAN

Housing batang kendali reaktor adalah salah satu bagian dari alat keselamatan pada reaktor Nuklir [1]. Batang kendali berfungsi untuk mengontrol populasi neutron yang ada dalam teras reaktor nuklir. Pada saat keadaan kritis dan reaktor memproduksi panas dan pembelahan inti batang kendali reaktor nuklir tipe PWR berada pada posisi di atas teras reaktor, sedangkan saat kondisi teras kelebihan populasi neutron batang kendali akan di turunkan dan menyerap neutron sehingga laju pembelahan inti karena reaksi uranium dengan neutron cepat dapat di hentikan.

Sejak tahun 1978 isu keselamatan mengenai dampak bahaya tegangan panas yang terjadi pada komponen reaktor terus mendapat perhatian. Batang kendali yang notabnya terletak pada bejana tekan reaktor pun mengalami hal yang sama dengan bejana tekan reaktor sehingga perlu untuk di evaluasi. Temperatur yang tinggi saat operasi PLTN akan membuat terjadinya tegangan panas pada beberapa komponen yang berada pada bejana tekan reaktor nuklir tak terkecuali komponen bagian dari batang kendali, sehingga perlu untuk di evaluasi integritas struktur yang terjadi. Tegangan panas yang dialami oleh housing batang kendali berkombinasi dengan tekanan sistem pada bejana tekan reaktor menyebabkan material housing batang kendali reaktor menerima tegangan yang lebih besar. Oleh karena itu kajian tentang integritas struktur dari material housing batang kendali perlu dikaji sehingga integritas struktur dari desain material housing batang kendali dapat diketahui.

Salah satu metode yang dapat dilakukan untuk melakukan perhitungan integritas struktur material housing batang kendali ini adalah dengan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak berbasis numerik. Analisa awal yang

akan di lakukan adalah analisa perpindahan panas yang terjadi pada material housing sehingga akan di dapatkan distribusi temperatur pada bagian tampang lintang material housing. Dengan perhitungan numerik distribusi temperatur akan di konversi menjadi sebuah tegangan regangan yang dialami oleh material housing. Perhitungan ini akan memberikan informasi yang dapat dilakukan analisa apakah tegangan yang terjadi akan mmbuat material housing mengalami kegagalan atau material housing masih dalam batas aman.

Perbedaan tegangan yang terjadi pada housing batang kendali selama reaktor beroperasi di karenakan adanya perbedaan temperatur yang dialami oleh material housing [2]. Tegangan ini akan bersifat permanen dan tidak bisa di hilangkan akan tetapi hanya bisa di distribusikan secara merata ke seluruh bagian housing. Untuk mengetahui lebih jelas proses terjadinya tegangan dapat digambarkan secara sistematis, pada saat proses pemanasan sebuah logam sehingga logam akan mengalal intensitas temperatur yang berbeda beda pada setiap titik atau area tertentu. Area yang mengalami intensitas temperatur yang lebih tinggi akan mengalami tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan area yang memiliki intensitas temperatur lebih rendah. Pada area dengan intensitas temperatur yang lebih tinggi akan mengalami sebuah tegangan tarik sedangkan area dengan intensitas temperatur yang rendah akan mengalami tegangan tekan. Tegangan tarik dan tegangan tekan yang terjadi selama reaktor beroperasi ini menghasilkan resultan tegangan yang secara permanen akan tertanam pada material housing dan seluruh komponen dari bejana tekan reaktor nuklir sebuah PLTN.

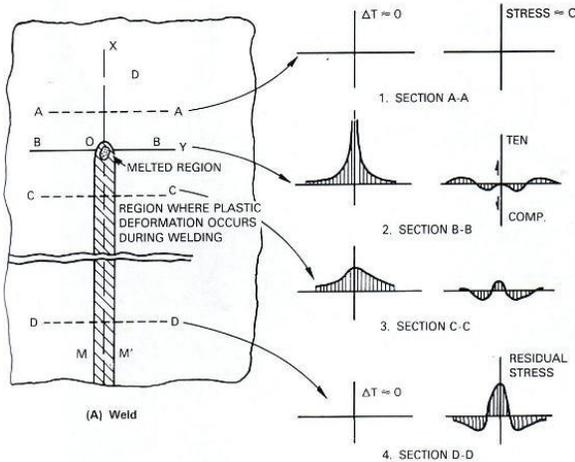
Selama reaktor beroperasi housing batang kendali akan mengalami distribusi temperatur yang berbeda beda, dalam skematis gambar 1 di atas di

asumsikan bahwa daerah A-A adalah daerah yang dekat dengan sumber panas sedangkan daerah C-C adalah daerah yang jauh dari sumber panas :

A-A : Daerah yang belum tersentuh panas

A-A : Daerah dengan intensitas temperatur tertinggi

B-B : Daerah terjadinya deformasi



C-C : Daerah yang sudah mengalami pendinginan

Gambar 1. Distribusi Temperatur dan Tegangan selama pemanasan [3]

Perpindahan panas yang terjadi pada batang kendali meliputi dua jenis perpindahan yaitu secara konduksi dan konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi dikarenakan adanya perbedaan temperatur yang dialami oleh batang kendali dimana semakin dekat dengan teras reaktor maka area batang kendali akan semakin menerima intensitas temperatur yang lebih tinggi [4]. Secara numerik persamaan dasar perpindahan panas secara konduksi pada batang kendali sama dengan perpindahan panas pada benda pejal dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya adalah material, faktor geometri dan adanya perbedaan temperatur oleh Kreith persamaan ini di tulis dengan numenklatur dibawah ini.[5]

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = Q_G + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (1)$$

Persamaan Kreith ini juga menjadi model numerik yang sama dengan yang ada dalam metode numerik Ansysy dalam menyelesaikan perpindahan panas secara konduksi akan tetapi di tulis dengan nomenklatur yang berbeda yaitu :[5]

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = q + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

Selain perpindahan panas secara konduksi, housing batang kendali juga akan mengalami perpindahan panas secara konveksi dimana dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$q = h_c [T_B - T_s] \rightarrow -[D] \left\{ \begin{matrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{matrix} \right\} = h_c [T_B - T_s] \quad (3)$$

Dari output temperatur ini maka dapat dihitung distribusi tegangan karena adanya pengaruh gradient temperatur, yaitu dengan empiris [6]:

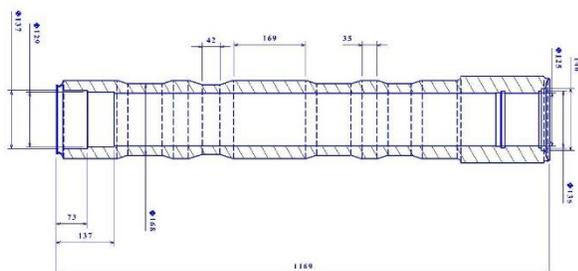
$$\sigma = [K] [\epsilon^{el}] \quad (4)$$

Distribusi tegangan pada sumbu kerja ini akan membentuk resultan tegangan yang dapat di hitung sehingga dapat digunakan sebagai tolak ukur integritas struktur melalui teori kegagalan bahan. Teori kegagalan yang sesuai digunakan untuk analisa kegagalan pada housing ini adalah teori kegagalan distorsi energi yang dikemukakan oleh Hengky-Von Mises dan Hubler dimana menyatakan bahwa kegagalan material dapat terjadi jika energi distosi persatuan volume sama atau lebih besar dibandingkan dengan distosi persatuan volume pada saat pengujian tensile, atau dengan kata lain jika intensitas tegangan luluh lebih besar dibandingkan dnegan tegangan vonmises maka material masih dalam keadaan yang terjaga integritasnya atau aman.

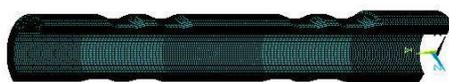
METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode simulasi menggunakan ANSYS dengan model elemen hingga. Geometri dari housing batang kendali terlebih dahulu dibuat selanjutnya di lakukan pembentukan element dengan pemilihan derajat kebebasan berupa *temperature* dan *displacement*. Pada element yang telah terbentuk di bebaskan variable kondisi operasi reaktor nuklir tipe PWR dan selanjutnya di hitung distribusi tegangan panasnya.

Pada simulasi analisa tegangan panas housing batang kendali ini model geometri yang digunakan mengacu pada desain seperti pada gambar 2. Faktor geometri berupa dimensi dari housing batang kendali di gambar dengan jalan melakukan drawing menggunakan bantuan perangkat lunak Ansys. Geometri housing batang kendali seperti terlihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. Geometri Housing Batang Kendali



Gambar 3 .Geometri Potongan Housing Batang Kendali

Housing batang kendali terbuat dari material modifikasi type 403 martensitic stainless steel sesuai dengan yang di syaratkan oleh ASME III agar material bahan housing batang kendali tahan terhadap pengetasan dan dapat mencapai integritas strukturnya. Sifat material housing batang kendali seperti pada tabel 1.

Tabel 1. Material Properties SA403 [7]

Temperatur (°C)	21	260	371
Modulus Elastis E (GPa)	195	178	171
Poisson Rasio (ν)	0,3	0,3	0,3
Konduktivitas termal (W/m K)	14,9	18,8	20,4
Spesifik heat S (J/g K)	0,44	0,46	0,50
Berat Jenis (Kg/cm ³)	8000	8000	8000
Thermal expansion (1/K.10E6)	1,53	1,75	1,8

Desain housing batang kendali yang ada di gambar dalam bentuk model geometri tiga dimensi. housing batang kendali tidak digambar secara penuh akan tetapi dilakukan pemotongan geometri setengah bagian. Hal ini dilakukan agar visualisasi intensitas temperatur dan tegangan yang terjadi di penampang dapat terlihat dengan jelas. Bagian yang tidak di gambarkan dapat diwakili dengan boundary condition simetrik sehingga hasil simulasi tidak berbeda dengan penggambaran secara penuh.

Pada simulasi ini akan di gunakan elemen yang memiliki node dengan derajat kebebasan temperatur dan desplacement solid 45 dan solid 70 yang dilakukan penggabungan untuk tiap jenis simulasi (*thermal-structure*) penggunaan element yang memiliki derajat kebebasan temperature dan displacement merujuk pada jurnal Ade Prihantoro yang menyatakan perlunya di pertimbangan derajat kebebasan pada analisa panas agar dapat di ubah pada derajat kebebasan yang dapat digunakan untuk menghitung tegangan [8]. Derajat kebebasan ini hanya bisa di capai dengan melakukan analisisgabungan thermal dan structure pada model ansys. Pengerjaan geometri dan perhitungan thermal dilakukan secara simultan dan analisa tegang dilakukan secara paralel dengan menjadikan output dari analisa thermal menjadi input dari analisa struktur tanpa merubah jumlah elemen, bentuk elemen hanya mengganti element dari derajat kebebasan temperatur menjadi elemen dengan node yang memiliki derajat kebebasan desplacement.

Pada bagian preprocessor beban yang diberikan adalah temperatur operasi reaktor nuklir berupa internal pressure yaitu tekanan bejana tekan reaktor pada saat operasi normal sebesar 15 Mpa. Beban ini diberikan pada seluruh permukaan bagian dalam dari potongan housing batang kendali. Selain pressure sebesar 15 Mpa beban berupa temperatur operasi normal reaktor sebesar 280 °C juga diberikan pada permukaan bagian dalam [9]. Pembebanan ini dimaksudkan untuk melakukan ke kondisi aktual yang ada pada operasi PLTN.

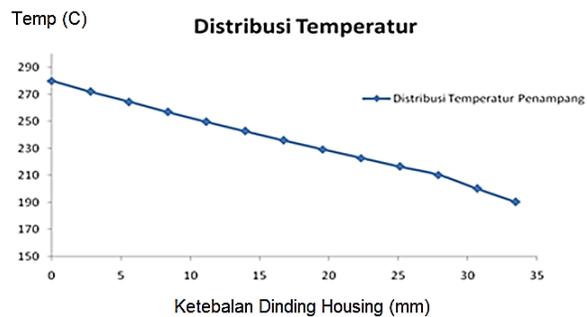
HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Temperatur dan Tegangan

Hasil simulasi perpindahan panas untuk menghitung distribusi temperatur menghasilkan gradient temperatur yang relatif sama sedang

intensitas temperatur akan semakin menurun pada permukaan dinding bagian luar dari housing batang kendali. Temperatur tertinggi terjadi di bagian dalam dengan nilai sama dengan temperatur operasi reaktor yaitu 280 °C, akan tetapi karena adanya perpindahan panas karena konveksi maka terjadi penurunan intensitas temperatur pada permukaan dinding luar.

Intensitas temperatur dinding bagian luar juga dipengaruhi oleh faktor geometri dari housing batang kendali, dari hasil simulasi di ketahui semakin tebal akan di dapatkan intensitas temperatur yang semakin rendah. Hasil intensitas temperatur dinding bagian luar housing batang kendali berada pada range 170°C-218 °C.

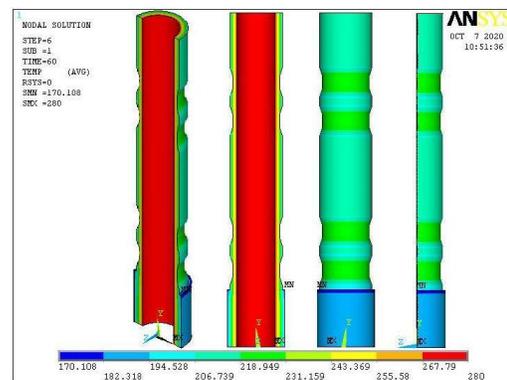


Gambar 4. Distribusi Temperatur Pada Penampang Housing batang Kendali

Dari gambar 4, dapat di ketahui dengan jelas faktor konduksi lebih dominan terjadi akan tetapi pengaruh dari faktor konveksi juga dapat terlihat dengan jelas dengan adanya penurunan yang signifikan dari adanya kontak langsung dinding bagian luar housing batang kendali dengan fluida yang bergerak. Hasil simulasi yang terjadi sesuai dengan hipotesa awal dimana semakin tebal faktor geometri housing maka akan semakin tinggi gradient temperaturnya atau di dapatkan hasil penurunan intensitas tegangan yang lebih besar dibanding dengan area yang memiliki ketebalan lebih kecil. Kombinasi konduksi dan konveksi ini dapat terlihat dengan jelas pada kontur distribusi temperatur yang terjadi dimana terdapat pola kontur yang cenderung memiliki pola lengkungan pada daerah mendekati bagian terluar dari dinding housing batang kendali. Sedangkan pada bagian dalam dominasi perpindahan panas karena konduksi terlihat dengan jelas karena pola kontur garis lurus hampir tidak ada lengkungan pola kontur, hal ini dapat di lihat pada gambar 5

.Validasi nilai temperatur dilakukan dengan menggunakan perhitungan numerik dan didapatkan selisih target kurang dari satu persen atau dengan kata lain error simulasi adalah kurang dari 0,01.

Distribusi temperatur yang dialami oleh housing batang kendali memiliki gradien temperatur yang berbeda beda. Sesuai dengan hukum teori tegangan regangan, adanya perbedaan temperatur akan membuat sebuah benda pejal mengalami tegangan yang berbeda beda pula dari setiap sumbunya. Tegangan yang berbeda beda dari setiap sumbu kerja ini dikarenakan adanya perbedaan temperatur dari tiap titik serta adanya ekspansi termal dari material housing

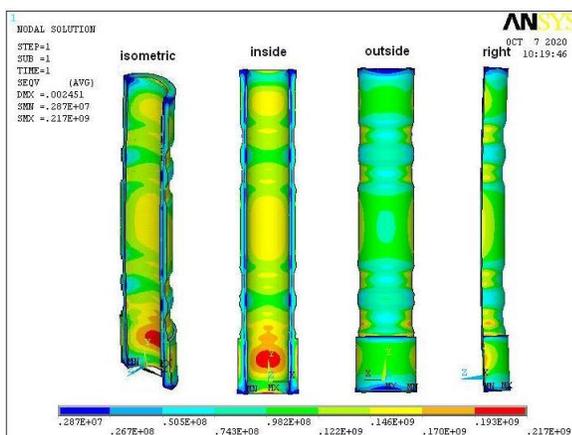


Gambar 5. Kontur Distribusi Temperatur Housing Batang Kendali Dari Berbagai Pandangan

Berdasarkan teori tegangan regangan diketahui bahwa semakin tinggi gradient temperatur maka akan di dapatkan nilai tegangan yang semakin tinggi dikarenakan secara empiris nilai tegangan sebanding dengan gradient temperatur dari perpindahan panas yang terjadi dalam sistem. Jika diperhatikan pada gambar 5, dapat diketahui gradient temperatur tertinggi terletak pada bagian bawah dari housing, maka distribusi tegangan yang terjadi pada housing batang kendalipun akan ada pada daerah bagian bawah. Secara kualitatif hasil simulasi distribusi tegangan yang terjadi di housing batang kendali memiliki pola yang identik dengan teori ini sehingga dapat dikatakan simulasi pada penelitian ini telah memiliki tingkat kesalahan yang kecil. Untuk verifikasi secara katuat terhadap distribusi tegangan ini perlu dilakukan pengukuran secara langsung dengan menggunakan strain gage sehingga validasi secara aktual dapat dilakukan, akan tetapi dalam penelitian ini simulasi dilakukan untuk rancang bangun

batang kendali sehingga validasi dengan menggunakan strain gage belum dapat dilakukan. Distribusi tegangan vonmises pada housing batang kendali dapat di lihat pada gambar 6 dengan intensitas tegangan vonmises terbesar ada pada bagian bawah dari model geomteri yang dibangun.

Dari gambar 6 hasil simulasi diketahui tegangan vonmises pada kondisi tegangan panas tertinggi adalah 217 MPa yaitu terjadi pada bagian bawah dari housing batang kendali. Hal ini sesuai hipotesa yang di skenarioikan dan sesuai teori dimana intensitas tegangan tertinggi terjadi pada area atau bagian yang memiliki distorsi geometri yang paling kompleks [10]. Pada simulasi tegangan panas ini dapat di ketahui intensitas tegangan tertinggi terjadi pada bagian housing yang memiliki perubahan ketebalan, adanya fillet dan lekukan sedangkan area yang tidak banyak mengalami perubahan geometri cenderung memiliki nilai tegangan yang lebih rendah dikarenakan resultan gaya yang bekerja tidak memiliki orientasi sudut dan sumbu yang kompleks. Jika dibandingkan dengan nilai dari tegangan luluh SA403x sebesar 310 MPa maka pemilihan bahan SA403x sebagai kandidat bahan dari housing batang kendali masih masuk dalam batas desain sesuai dengan dokumen ASME III.



Gambar 6. Distribusi Tegangan Vonmises pada kondisi tegangan panas Housing Batang Kendali

KESIMPULAN

Gradient temperatur mengakibatkan perubahan terhadap nilai dan pola distribusi tegangan pada housing batang kendali PLTN. Intensitas tegangan pada housing batang kendali PLTN mengalami kenaikan sebanding dengan faktor geometri, semakin banyak ditemukan distorsi geometri maka intensitas

tegangan akan semakin naik, sedangkan untuk pola distribusi tegangan pada bagian yang tidak mengalami distorsi atau cenderung homogen akan diperoleh tegangan dengan pola intensitas rendah dan lebih homogen [11]. Untuk bahan yang telah dipilih dalam pemodelan housing batang kendali PLTN, tegangan bending dan tegangan lokal intensitasnya masih dibawah batas tegangan luluh bahan sehingga masih memenuhi kreterian integritas struktur dan keselamatan berdasarkan ASME

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepada Laboran Lab Virtual Universitas Internasional Semen Indonesia (Imam Mahmudin), penulis mengucapkan terimakasih atas diskusi ilmiah yang dapat memperkuat teori pada penelitian ini serta melakukan kolaborasi simulasi dan pemodelan yang saat ini masih berjalan untuk kegiatan validitas interaksi temperatur, tegangan dan laju alir air pada komponen batang kendali.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASME Section III, *Rules For Construction of Nuclear Facility Components*. USA, 2017.
- [2] J. S. Kim, J. B. Choi, Y. J. Kim, and Y. W. Park, "Investigation on constraint effect of reactor pressure vessel under pressurized thermal shock," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 219, no. 3, pp. 197–206, 2002, doi: 10.1016/S0029-5493(02)00282-0.
- [3] S. Rahmat A., Abdul F., "Pemodelan Balst Furnace dengan Menggunakan Reduktor Arang Sawit," 2015.
- [4] "The Reactor Coolant System and Related Systems," in *Fundamental Safety Overview Vol.2 Design and Safety*, United Kingdom.
- [5] S. Moaveni, *Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS*. Prentice Hall, 2003.
- [6] *Ansys inc. : Documentation and Theory Of Finite Element Methode*. USA, 2019.
- [7] International Atomic Energy Agency (IAEA), "Components Important to Safety : PWR Pressure Vessels," *Assess. Manag. Ageing Major Nucl. Power Plant Components Important to Saf. PWR Press. Vessel.*, no. June, p. 35, 2007.
- [8] A. Prihantoro and E. Afrizal, "Proceeding of

- Ocean, Mechanical and Aerospace-Science and Engineering-Analysis of Weld Strength Through Finite Element Method Using Abaqus Program and Comparing with Experiment Testing,” vol. 5, no. 1, pp. 103–Tegangan Pada Desain RPV,” pp. 502–510, 2010.
- [10] Stephen Timoshenko, *Strenght of Material Problem and Aplication*. USA: Van Nostrand, 2015.
- 108, 2018, [Online]. Available: www.isomase.org..
- [9] A. Rahmat, A. Rahmat, B. B. Joint, W. Transition, and R. P. V Analysis, “Distribusi
- [11] M. Joun, I. Choi, J. Eom, and M. Lee, “Finite element analysis of tensile testing with emphasis on necking,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 1, pp. 63–69, 2007, doi: 10.1016/j.commatsci.2007.03.002.