

Perhitungan *Shutdown Margin* Teras NuScale Menggunakan OpenMC

Hadi Razaqiyanto¹, Mohammad Ali Shafii^{1,*}, Helen Rafliis²

¹Laboratorium Fisika Nuklir, Departemen Fisika,

Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163

² Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir (P2STPIBN)

Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Bapeten), Jalan Gajah Mada No.8, Jakarta Pusat, 11140

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 02 Maret 2023

Direvisi: 30 April 2023

Diterima: 13 Agustus 2023

Kata kunci:

CRA
NuScale
OpenMC
SDM
Simulasi

Keywords:

CRA
NuScale
OpenMC
SDM
Simulation

Penulis Korespondensi:

Mohammad Ali Shafii
Email: mashafii@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Salah satu parameter keselamatan reaktor yang penting untuk dipelajari adalah masalah *shutdown margin* (SDM). Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan desain keselamatan reaktor NuScale yang efektif dalam tinjauan parameter nilai SDM. Perhitungan SDM dilakukan menggunakan OpenMC yaitu kode pemrograman berdasarkan metode Monte Carlo. OpenMC merupakan kode perhitungan *open source* yang mempunyai keunggulan dalam akses modifikasi desain geometri teras reaktor. Jenis reaktor yang digunakan dalam simulasi ini adalah NuScale *Small Modular Reactor* (SMR) yang termasuk jenis reaktor *Pressurized Water Reactor* (PWR). Simulasi teras NuScale dirancang sesuai dengan *General Design Criterion* (GDC) yaitu susunan teras yang memiliki *Control Rod Assemblies* (CRA) *regulating bank* (RB) dan *CRA shutdown bank* (SB) serta bahan bakar UO₂ dengan pengkayaan < 4,9%. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai SDM NuScale sebesar 17743 pcm. Nilai SDM teras NuScale ini menunjukkan bahwa reaktor NuScale yang diteliti telah memenuhi batas desain keselamatan yang cukup untuk semua tingkat daya dan mode pengoperasian.

One of the important reactor safety parameters to study is the issue of shutdown margin (SDM). This study aims to obtain an effective safety design of the NuScale reactor in reviewing the SDM value parameter. SDM calculations are performed using OpenMC, which is a programming code based on the Monte Carlo method. OpenMC is an open source calculation code that has the advantage of access to modifications to the reactor core geometry design. The type of reactor used in this simulation is the NuScale Small Modular Reactor (SMR) which is a Pressurized Water Reactor (PWR) type of reactor. The NuScale core simulation was designed in accordance with the General Design Criterion (GDC), which is a core arrangement that has a Control Rod Assemblies (CRA) regulating bank (RB) and CRA shutdown bank (SB) and UO₂ fuel with an enrichment of <4.9%. From the calculation results, the SDM value of NuScale is 17743 pcm. This NuScale core SDM value indicates that the NuScale reactor under study complied with the sufficient safety design limits for all power levels and operating modes.

Copyright © 2023 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Small Modular Reactor (SMR) adalah reaktor nuklir maju yang memiliki kapasitas daya hingga 300 MWe per unit, yaitu sekitar sepertiga dari kapasitas pembangkitan reaktor tenaga nuklir tradisional (Rr and Sahala M, 2012). Prinsip kerja SMR NuScale sama dengan *Pressurized Water Reactor* (PWR) yang menggunakan air ringan sebagai pendingin dan moderator reaktor. NuScale merupakan reaktor yang didesain oleh NuScale Power Inc, Amerika Serikat (Reyes Jr and Lorenzini, 2010). Konfigurasi teras NuScale terdiri dari 37 *fuel assemblies* (FA) dan desain susunan perangkat bahan bakar 17×17 , dengan bahan bakar ^{235}U yang diperkaya di bawah 4,95%. Kontrol reaktivitas dicapai dengan cara mengkategorikan 16 batang kendali (*Control Rod Assemblies*, CRA). Batang kendali terdiri dari selongsong yang berisi material bahan penyerap neutron, berfungsi untuk mengendalikan reaksi berantai di dalam reaktor (Waluyo and Khakim, 2019). Pada NuScale batang kendali terbagi menjadi *regulating bank* (RB) untuk pengaturan daya dibawah operasi pembangkit normal, dan *shutdown bank* (SB) yang digunakan untuk pengaturan daya selama kejadian *shutdown* dan *scram*. Setiap CRA berisi 24 CR pin yang mengandung 2 neutron penyerap, perak-indium-kadmium (AIC) di bagian bawah batang dengan panjang 40 cm, dan boron karbida (B_4C) di bagian atas batang dengan panjang 160 cm (NuScale Power, 2020).

Batang kendali memiliki reaktivitas untuk menentukan besar kekuatan serap neutron. Untuk nilai reaktivitas di dalam teras sangat ditentukan oleh geometri dan jenis material yang digunakan sebagai penyerap pada batang kendali. Kemampuan pemadaman operasi reaktor dari sistem reaktor dilihat dari nilai SDM, sebagai besarnya reaktivitas batang kendali. Nilai reaktivitas negatif dari batang kendali digunakan untuk menghitung *shutdown margin* (SDM). Perhitungan reaktivitas diperoleh dari perbandingan k_{eff} pada posisi kritis sebelumnya dan k_{eff} akhir yang ditunjukkan pada Persamaan (1)

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (1)$$

dengan ρ adalah reaktivitas dan k_{eff} adalah faktor multiplikasi neutron efektif. Faktor multiplikasi neutron efektif merupakan salah satu metode untuk mengukur perubahan jumlah neutron dalam teras reaktor dengan mempertimbangkan berbagai cara neutron dapat diproduksi atau hilang.

Salah satu parameter keselamatan yang penting untuk dibahas adalah kemampuan mengendalikan populasi neutron sepanjang reaktor beroperasi. Parameter yang dilihat adalah reaktivitas lebih (*core excess*) dan *shutdown margin* (SDM). SDM adalah jumlah reaktivitas yang mengakibatkan reaktor menjadi subkritis atau akan menjadi subkritis saat ketika semua batang kendali tersisip penuh ke dalam teras kecuali sebuah batang kendali yang paling reaktif tertarik penuh dari teras reaktor (BAPETEN, 2012). Perhitungan SDM yang dilakukan oleh Waluyo (2016) memperlihatkan batang kendali yang telah dimodifikasi pada reaktor TRIGA 2000 Bandung dengan menggunakan SCALE 6.1. Modifikasi batang kendali tersebut adalah sebagai salah satu analisis keselamatan untuk menjamin keselamatan saat pengoperasian reaktor TRIGA 2000.

Penelitian ini membahas bagaimana pengaruh penarikan batang kendali (*control rod assemblies*, CRA) untuk menghitung SDM teras NuScale dengan menggunakan OpenMC. Hasil perhitungan SDM teras NuScale merupakan tahap awal uji keselamatan dalam membuat desain reaktor yang efektif. OpenMC merupakan kode perhitungan *open source* yang mempunyai keunggulan dalam akses untuk memodifikasi maupun mengubah simulasi desain teras sesuai dengan kebutuhan peneliti, tanpa harus memiliki akses khusus dengan instansi terkait (Romano and Forget, 2012). Penelitian ini juga merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Guo dkk (2020) yang telah menggunakan OpenMC untuk menghitung dampak operasi kompensasi batang kendali pada karakteristik neutronik teras *small modular liquid-metal fast reactor* (SMFR).

II. METODE

Penelitian ini dilakukan di Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir (P2STPIBN) Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) dan Laboratorium Fisika Nuklir Departemen Fisika Universitas Andalas. Alat dan bahan yang digunakan yaitu perangkat keras (*hardware*) berupa *personal computer* (PC) berbasis operasi linux Ubuntu 20.04 LTS dan perangkat

lunak (*software*) yang terdiri dari paket program OpenMC dengan *library* (ENDF/B-VII.1) yang berfungsi untuk melakukan analisis neutronik tingkat kekritisan reaktor NuScale, dan Notepad++ dengan bahasa pemrograman Python3 digunakan untuk membuat file XML sebagai *input* OpenMC.

2.1 Spesifikasi Desain Teras NuScale

Pada penelitian ini menggunakan reaktor NuScale sebagai teras yang akan disimulasikan menggunakan OpenMC. Teras NuScale berpedoman pada *general design criterion* (GDC). Konfigurasi teras NuScale terdiri 37 FA yang 16 diantaranya CRA yaitu *regulating bank* dan *shutdown bank*. FA 17× 17 terdiri dari *fuel pin* dengan pengayaan UO₂ 4,05% dan 2,6%, dan *instrumentation guide tube*. CRA terdiri dari *fuel pin* dengan pengayaan UO₂ 4,05% dan 4,55%, CR *pin* dengan campuran material AIC dan B₄C, dan *instrumentation guide tube*. Parameter teras NuScale dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter teras NuScale

Parameter	Nilai
Teras	
Diameter teras (cm)	150,495
Diameter teras aktif (cm)	200
FA	
Jumlah FA	37
Total area cross section teras aktif (m ²)	1,711
Panjang FA (m)	238,76
Susunan <i>fuel pin</i>	17×17
Jumlah <i>instrument guide tube</i>	24
Material bahan bakar	UO ₂
Konsentrasi Gd ₂ O ₃	Diatas 8%
CRA	
Jumlah CRA	16
Material penyerap atas	B ₄ C
Material penyerap bawah	AIC (perak-indium-kadmium)
Panjang CRA (cm)	239,6998
Panjang B ₄ C (cm)	157,48
Panjang AIC	30,48

2.2 Perhitungan *Shutdown Margin* (SDM)

Perhitungan SDM menggunakan OpenMC melalui beberapa tahap yaitu membuat *input* data material, pemodelan geometri, dan kemudian dilanjutkan dengan analisis perhitungan SDM .

1. *Input* data material pada OpenMC

Data material yang dimasukkan di dalam pemodelan adalah jenis material atau unsur penyusun yang ada di teras NuScale dan juga densitas dari masing-masing material yang ada di reaktor NuScale.

2. Pemodelan Geometri dengan OpenMC

Pemodelan teras reaktor NuScale dengan OpenMC dibuat setelah mendapatkan data geometri dan material penyusunnya. Teras NuScale terdiri atas 37 FA diantaranya 16 CRA, 264 *fuel pin*, 24 *instrument guide tube*, dan 24 CR *pin* untuk CRA. Setiap *fuel pin* terdiri atas kolom bertumpuk, pelet keramik silinder dari uranium dioksida yang diperkaya dengan gadolinia sebagai *burnable absorber* yang bercampur homogen dalam bahan bakar pada lokasi susunan pengayaan $\leq 4,95\%$ saat NuScale dalam kondisi setimbang.

3. Analisis perhitungan data

Tahap analisis dilakukan setelah *running* dan *output* simulasi model teras telah memenuhi syarat nilai $k_{eff} \geq 0,99$. Dari hasil *output* OpenMC diperoleh nilai k_{eff} *collision*, k_{eff} *track-length*, k_{eff} *absorption*, k_{eff} *combined*, dan *leakage fraction*. Selanjutnya dari hasil tersebut diperoleh nilai reaktivitas batang kendali. SDM dihitung setelah mendapatkan reaktivitas total dari batang kendali, reaktivitas batang kendali terbesar, dan reaktivitas lebih teras. Untuk mendapatkan nilai SDM dapat dihitung menggunakan Persamaan (2).

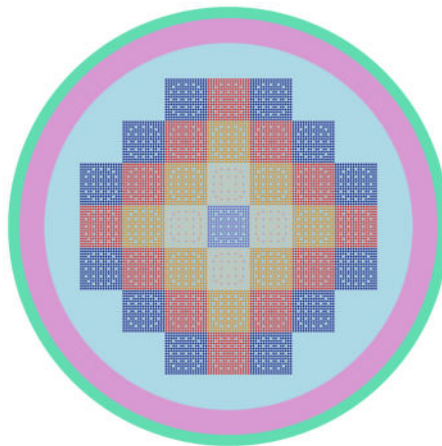
$$SDM = \rho_{tot} - \rho_{stuck} - C_{ex} \quad (2)$$

Dengan SDM nilai *shutdown margin*, ρ_{tot} merupakan reaktivitas total dari batang kendali, ρ_{stuck} reaktivitas batang kendali terbesar diantara batang kendali yang digunakan, dan C_{ex} adalah reaktivitas lebih teras (*core excess*).

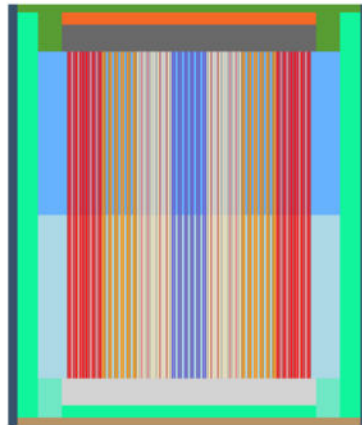
III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Desain Model Teras

Desain model teras (*core*) NuScale dengan menggunakan OpenMC memanfaatkan teknik susunan geometri OpenMC dikenal sebagai *constructive solid geometry* (CSG) model tiga dimensi kompleks dalam ruang (Romano and Forget, 2012). Simulasi teras NuScale pada OpenMC mendefinisikan *fuel pin*, *instrumentation guide tube*, dan *CR pin*, untuk dipanggil berulang dalam suatu geometri kisi (*lattice*) *assemblies* dalam geometri berbentuk pola segi empat. Kisi segi empat ini merupakan susunan 17×17 komponen *pin* penyusun CRA dan FA yang dapat dilihat dari Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1 Desain Teras Tampak Atas



Gambar 2 Desain teras tampak samping

Bahan bakar yang digunakan adalah UO_2 dengan pengayaan (4,05%; 4,55%; dan 2,06%). Untuk fuel pin yang ada pada FA A02, FA B02 dan FA C02 menggunakan *burnable poison* gadolinia (Gd_2O_3). Penggunaan gadolinia dicampurkan secara homogen dengan UO_2 dalam *fuel pin* untuk menahan reaktivitas (NuScale Power, 2012). Bahan penyerap yang digunakan pada campuran penyerap CRA *pin* yaitu perak-indium-kadmium (AIC) dengan komposisi 80% perak, 15% indium, dan 5% kadmium. Sedangkan untuk bahan-bahan komponen teras lainnya mengikuti material yang digunakan pada teras PWR konvensional.

3.2 *Settings* Simulasi Teras

OpenMC membutuhkan input *settings.xml* untuk menjalankan simulasi teras yang akan di jalankan. *Input settings.xml* berfungsi untuk menentukan distribusi sumber dan berapa banyak partikel yang akan dijalankan, dan ini opsional tergantung dari model teras yang disimulasikan (Romano *et al.*, 2015). *Input settings.xml* untuk simulasi teras NuScale pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 *Settings input* simulasi teras NuScale

<i>Settings</i>	Nilai
<i>Batches</i>	200
<i>Inactive</i>	20
Partikel	10000

Penelitian ini menggunakan *settings input* 200 *batches* dengan 20 *inactive* dengan jumlah partikel per *batches* sebesar 10000. Jumlah partikel aktif mempengaruhi tingkat ketidakpastian stokastik dalam simulasi, untuk itu digunakan jumlah partikel lebih banyak untuk menghasilkan ketidakpastian yang lebih kecil dari hasil *tally*. Pada proses *tally running* program, hasil dari reaksi fisi berupa neutron fisi, koordinat spasial fisi, energi fisi, arah neutron fisi, dan berat neutron yang digunakan untuk menghitung jumlah generasi berikutnya (Romano and Forget, 2012).

Tabel 3 *Output k_{eff}* Simulasi OpenMC

Estimator	Nilai
k_{eff} collision	$1,01675 \pm 0,00075$
k_{eff} absorption	$1,01728 \pm 0,00073$
k_{eff} track-length	$1,01622 \pm 0,00097$
k_{eff} teras	$1,01697 \pm 0,00060$

Pada Tabel 3 terdapat nilai k_{eff} collision sebesar $1,01675 \pm 0,00075$ yang menyatakan jumlah neutron yang dihasilkan dari seluruh proses fisi karena tumbukan. Nilai k_{eff} absorption sebesar $1,01728 \pm 0,00073$ yang menyatakan interaksi antara neutron dengan bahan fisil selama simulasi. Nilai k_{eff} track-length sebesar $1,01622 \pm 0,00097$ yang menyatakan perpindahan neutron selama simulasi untuk berpindah tempat di dalam bahan fisil pada suatu jarak tertentu dari posisi semula. Kombinasi dari ketiga estimator diperoleh nilai k_{eff} teras sebesar $1,01697 \pm 0,00060$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa teras berada pada mode operasi, sehingga berdasarkan nilai k_{eff} teras, *settings* dari simulasi dapat digunakan untuk menghitung nilai reaktivitas batang kendali teras NuScale.

3.3 Hasil Perhitungan

Perhitungan SDM dapat dilakukan setelah mendapat nilai reaktivitas total batang kendali dan juga reaktivitas lebih (*core excess*). Reaktivitas lebih pada simulasi didapatkan pada saat kondisi batang kendali *fully-up* adalah 1668,68 pcm, yang merupakan kondisi batang kendali masih berada diluar teras. Sehingga, reaktor pada kondisi superkritis. Reaktivitas lebih dikendalikan oleh penambahan boron terlarut ke pendingin dan racun yang dapat terbakar hal ini termasuk dalam persyaratan batang kendali. Nilai reaktivitas batang kedali terbesar diantara batang kendali yang digunakan yaitu saat CRA SB grup 3 sebesar 4675,87 pcm. Reaktivitas total batang kendali merupakan nilai reaktivitas saat kondisi batang kendali *fully-down*. Berdasarkan informasi dari Tabel 4 nilai reaktivitas total batang kendali sebesar 1668,68 pcm saat semua CRA pada posisi *fully down* berada pada kondisi subkritis dimana kondisi tersebut menuju ke sistem pemadaman reaktor.

Tabel 4 Hasil perhitungan k_{eff} dan perhitungan reaktivitas batang kendali

Kondisi	k_{eff}	Reaktivitas (pcm)
Grup 1	0,98608	1411,65
Grup 2	0,96770	3337,81
Grup 3	0,95533	4675,87
Grup 4	0,95608	4593,76
All-in	0,80588	24088
All-out	1,01697	1668,68

Nilai SDM yang didapatkan dari simulasi teras NuScale dengan kondisi operasi teras yaitu sebesar 17743 pcm. Nilai SDM ini menunjukkan bahwa simulasi memiliki batas desain keselamatan yang memadai untuk semua tingkat daya dan mode pengoperasian. Hal ini dipengaruhi posisi CRA RB dan CRA SB yang berada pada pengayaan UO_2 yang tinggi efektif digunakan untuk operasi reaktor dan *shutdown* reaktor.

IV. KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa simulasi penyederhanaan model batang kendali yang homogen pada tingkat pin dapat digunakan untuk operasi reaktor dan *shutdown* reaktor. Nilai SDM yang didapat dari perhitungan adalah 17743 pcm. Nilai SDM teras NuScale ini menunjukkan bahwa reaktor NuScale ini telah memenuhi batas desain keselamatan yang memadai untuk semua tingkat daya dan mode pengoperasian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada pihak Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir (P2STPIBN) Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) yang telah menyediakan sarana dan prasarana sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik dan terima kasih untuk semua pihak yang telah membantu kelancaran dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- BAPETEN. (2012), “Kepala badan pengawas tenaga nuklir republik indonesia”, *Standar Kegiatan Usaha Dan Standar Produk Pada Penyelenggaraan Perizinan Berusaha Berbasis Risiko Sektor Ketenaganukliran*, pp. 2–3.
- NuScale Power, L. (2012), “Rod Ejection Accident Methodology”, *United States Nuclear Regulatory Commission*.
- NuScale Power, L. (2020), *NuScale Plant Design Overview*, Washington, OC, USA.
- Reyes Jr, J.. and Lorenzini, P. (2010), “NuScale Power: A modular”, *Nuclear News*, Vol. 53, p. 7.
- Romano, P.K. and Forget, B. (2012), “The OpenMC Monte Carlo particle transport code”, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 51, pp. 274–281, doi: 10.1016/j.anucene.2012.06.040.
- Romano, P.K., Horelik, N.E., Herman, B.R., Nelson, A.G., Forget, B. and Smith, K. (2015), “OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development”, *Annals of Nuclear Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 82, pp. 90–97, doi: 10.1016/j.anucene.2014.07.048.
- Rr, A.P.R. and Sahala M, K. (2012), “Studi Prospek PLTN Daya Kecil Nuscale di Indonesia”, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, Vol. 14 No. 1, pp. 57–64.
- Waluyo, A. and Khakim, A. (2019), “Perhitungan Reaktivitas Batang Kendali HTR-10 dengan Menggunakan SCALE”, *Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir 2019*, Pontianak, pp. 313–319.