

## DAFTAR ISI

<b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME</b> .....	ii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN</b> .....	xvi
<b>INTISARI</b> .....	xix
<b>ABSTRACT</b> .....	xxi
<b>BAB 1</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan masalah .....	2
1.2.1 Batasan Masalah .....	3
1.3. Tujuan penelitian .....	3
1.4. Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II</b> .....	5
II.1. Penjelasan Reaktor MSR Secara Umum .....	5
II.2. Studi Pustaka pada Reaktor MSR .....	6
<b>BAB III</b> .....	8
III.1. Teori Transport Neutron .....	8
III.1.1. Fenomena <i>Transport Neutron</i> .....	8
III.1.2 Metode Monte Carlo .....	9
III.1.3. Parameter Analisis Neutronik .....	18



III.2. Artificial Neural Network.....	22
III.2.1. Langkah Simulasi ANN.....	23
III.2.2. Forward Propagation & Activation function .....	23
III.2.3. Loss Function.....	24
III.2.3. <i>Backward Propagation &amp; Optimizer</i> .....	26
III.3. Sifat atau Karakteristik Material dalam Reaktor.....	27
III.3.1.1. <sup>233</sup> U.....	28
III.3.1.2. Thorium atau <sup>232</sup> Th .....	29
III.3.1.3. Moderator.....	30
III.3.1.4. Larutan garam cair .....	32
III.3.1.5. <i>Stainless steel-304</i> .....	36
III.3.1.6. Batang Kendali .....	38
<b>BAB IV</b> .....	43
IV.1 Alat dan Bahan Penelitian.....	43
IV.2. Tata Laksana Penelitian .....	43
IV.3. Pelaksanaan Penelitian.....	58
IV.3.1. Penggunaan Perangkat Lunak.....	58
IV.3.2. Pemodelan Reaktor .....	61
IV.3.3. <i>Scoring Data</i> .....	65
IV.3.4. Normalisasi <i>Tallies</i> .....	67
IV.3.5. Depleksi dan <i>Transfer Rates</i> .....	69
<b>BAB V</b> .....	71
V.1. Hasil .....	71
V.1.1. Simulasi Awal.....	71
V.1.2. Simulasi & <i>Scoring ANN</i> .....	79



V.1.3. Validasi & Scoring.....	87
V.1.4. Hasil Analisis Neutronik simulasi FTC & Koefisien <i>Void</i> .....	101
V.1.5. Hasil Analisis Neutronik Optimasi Batang Kendali.....	104
V.1.6. Hasil Analisis Neutronik Pengurusan Bahan Bakar .....	109
V.1.7. Hasil Analisis Neutronik PPF .....	111
V.1.8. Hasil Analisis Neutronik Distribusi Spektrum Energi Neutron .....	113
V.1.9. Hasil Analisis Neutronik Simulasi Depleksi/Burnup.....	119
V.2. Pembahasan.....	124
<b>BAB VI</b> .....	127
VI.1. Kesimpulan .....	127
VI.2. Saran.....	129
<b>BAB VII</b> .....	131
<b>LAMPIRAN A</b> .....	137
<b>LAMPIRAN B</b> .....	177
<b>LAMPIRAN C</b> .....	213
<b>LAMPIRAN D</b> .....	218
<b>LAMPIRAN E</b> .....	225
<b>LAMPIRAN F</b> .....	233



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan konfigurasi dan hasil CR pada berbagai tipe reaktor MSR .....	7
Tabel 3.1 Parameter moderasi pada beberapa material moderator [38].....	32
Tabel 3.2 Persamaan viskositas terhadap suhu pada beberapa larutan garam [41]33	
Tabel 3.3 Hasil analisis impuritas pada beberapa kondisi [42].....	34
Tabel 3.4 Variasi tes korosi pada spesimen JLF-1 [42].....	35
Tabel 3.5 Parameter moderasi pada larutan FLiBe dan grafit [43].....	36
Tabel 3.6 Komposisi Material SS304 [45].....	37
Tabel 3.7 Hasil yield stress dan tensile stress pada material SS304 [44].....	37
Tabel 3.8 Karakteristik material neutron absorber [49] .....	40
Tabel 3.9 Komposisi kimia dari beberapa jenis paduan logam hastelloy [52].....	41
Tabel 3.10 Hasil test pengujian korosi pada larutan FLiBe pada suhu 750°C selama 1000 jam berdasarkan kedalaman korosi secara keseluruhan dan pada batas butiran [52] .....	42
Tabel 4.1 <i>Setting</i> OpenMC untuk simulasi awal .....	44
Tabel 4.2. Konfigurasi fraksi pada simulasi awal menggunakan OpenMC .....	45
Tabel 4.3 Konfigurasi fraksi pada simulasi menggunakan model ANN .....	47
Tabel 4.4 <i>Setting</i> OpenMC untuk validasi .....	47
Tabel 4.5 <i>Setting</i> OpenMC untuk simulasi deplesi .....	48
Tabel 4.6 <i>Setting</i> OpenMC untuk simulasi pengurasan bahan.....	49
Tabel 4.7 <i>Setting</i> OpenMC untuk perhitungan volume secara stokastik .....	49
Tabel 4.8 Komponen racun untuk ditransfer keluar sistem.....	70
Tabel 5.1 Hasil simulasi awal sebagai data training pada ANN .....	73
Tabel 5.2 Hasil simulasi/regresi dengan ANN .....	81
Tabel 5.3 Komparasi data model ANN dengan simulasi OpenMC (batch rendah) .....	84
Tabel 5.4 Error relatif Model ANN degan simulasi OpenMC ( <i>batch</i> rendah).....	86
Tabel 5.5 Hasil scoring dari data simulasi/regresi ANN .....	90
Tabel 5.6 Standar deviasi parameter keluaran (ANN) .....	91



Tabel 5.7 Hasil validasi data OpenMC .....	92
Tabel 5.8 Hasil scoring data validasi dari score tertinggi ke terendah.....	96
Tabel 5.9 Standar deviasi parameter keluaran (validasi).....	96
Tabel 5.10 Komparasi data model ANN dengan simulasi OpenMC ( <i>batch</i> tinggi) .....	98
Tabel 5.11 Error relatif Model ANN degan simulasi OpenMC ( <i>batch</i> tinggi)....	100
Tabel 5.12 Optimasi posisi batang kendali .....	104
Tabel 5.13 Deinsersi batang kendali dengan posisi teroptimasi ( <i>ring</i> ke-3).....	106
Tabel 5.14 Perhitungan persamaan non-linear dengan metode Bisection ( <i>integral control rod worth</i> ).....	108
Tabel 5.15 Simulasi pengurusan bahan bakar .....	109
Tabel 5.16 Perhitungan persamaan non-linear dengan metode Bisection ( <i>draining</i> ) .....	111
Tabel 5.17 Distribusi energi neutron 44 dan 238 grup [74] .....	115
Tabel 5.18 Hasil simulasi deplesi daya 300 MW <sub>th</sub> , Pengayaan 10,2 at% <sup>233</sup> U; tanpa <i>transfer rate</i> .....	119
Tabel 5.19 Komposisi komponen racun pada simulasi deplesi daya 300 MW <sub>th</sub> ; Pengayaan 10,2at% <sup>233</sup> U; tanpa <i>transfer rate</i> .....	120
Tabel 5.20 Hasil simulasi deplesi daya 300 MW <sub>th</sub> , Pengayaan 10,2 at% <sup>233</sup> U; dengan <i>transfer rate</i> .....	121
Tabel 5.21 Komposisi komponen racun pada simulasi deplesi daya 300 MW <sub>th</sub> ; Pengayaan 10,2 at% <sup>233</sup> U; dengan <i>transfer rate</i> .....	122
Tabel 5.22 Hasil simulasi deplesi daya 300 MW <sub>th</sub> , Pengayaan 10,4 at% <sup>233</sup> U; dengan <i>transfer rate</i> .....	123
Tabel 5.23 Hasil simulasi deplesi daya 300 MW <sub>th</sub> , Pengayaan 10,7 at% <sup>233</sup> U; dengan <i>transfer rate</i> .....	124



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Geometri silinder untuk generasi bilangan acak [12].....	12
Gambar 3.2 Geometri bola untuk generasi bilangan acak sudut polar dan azimuthal [12] .....	14
Gambar 3.3 Skema penentuan acak tipe material [12] .....	16
Gambar 3.4 Skema penentuan acak interaksi pada material tertentu [12].....	16
Gambar 3.5 Pengaruh efek Doppler pada tampang lintang absorpsi material bahan bakar [13].....	19
Gambar 3.6 Contoh <i>plotting</i> beberapa fungsi aktivasi.....	24
Gambar 3.7 Konduktivitas termal larutan FLiBe, LiF 66 at% dan BeF <sub>2</sub> 34 at% [40] .....	34
Gambar 3.8 Konduktivitas termal dari material SS304 dari suhu rendah ke suhu tinggi [46] .....	38
Gambar 4.1 Model ANN yang didefinisikan .....	46
Gambar 4.2 Bagan alir simulasi awal menggunakan OpenMC .....	50
Gambar 4.3 Bagan alir simulasi menggunakan ANN .....	51
Gambar 4.4 Bagan alir simulasi ANN untuk regresi .....	52
Gambar 4.5 Bagan alir scoring hasil regresi dengan ANN .....	53
Gambar 4.6 Bagan alir simulasi validasi dengan OpenMC .....	54
Gambar 4.7 Bagan alir scoring hasil data validasi .....	55
Gambar 4.8 Bagan alir simulasi analisis neutronik.....	56
Gambar 4.9 Bagan alir keseluruhan langkah penelitian.....	57
Gambar 4. 10 Perbandingan waktu eksekusi pada Pytorch dan Tensorflow [62].	61
Gambar 4. 11 Spesifikasi geometris dari pin bahan bakar, (a) tampang lintang radial, (b) tampang lintang aksial .....	63
Gambar 4. 12 Penampang aksial keseluruhan reaktor .....	63
Gambar 4. 13 Penampang radial batang kendali B <sub>4</sub> C .....	64
Gambar 4. 14 Skema Sederhana Reaktor MSR .....	64
Gambar 5. 1 Matriks korelasi variable masukan dan keluaran .....	75



Gambar 5.2 Pengaruh fraksi DNU-ThF <sub>4</sub> terhadap $k_{eff}$ , koefisien void dan <i>conversion ratio</i> .....	76
Gambar 5.3 Pengaruh fraksi <i>Salt-fuel</i> terhadap $k_{eff}$ , koefisien void dan <i>conversion</i> <i>ratio</i> .....	77
Gambar 5. 4 Pengaruh fraksi LiF-BeF <sub>2</sub> terhadap $k_{eff}$ , koefisien void dan <i>conversion ratio</i> .....	78
Gambar 5. 5 Pengaruh banyak <i>ring pin blanket</i> terhadap $k_{eff}$ , koefisien void dan <i>conversion ratio</i> .....	79
Gambar 5.6 Hasil <i>loss</i> and <i>test loss</i> pada training data .....	82
Gambar 5.7 Grafik <i>training loss</i> dan <i>test loss</i> pada training data .....	82
Gambar 5.8 Plot persamaan penilaian <i>scoring</i> $k_{eff}$ .....	88
Gambar 5.9 Plot normalisasi data (simulasi ANN), (a) <i>Conversion ratio</i> , (b) Koefisien <i>void</i> .....	88
Gambar 5.10 Plot besar parameter terhadap nilai <i>scoring</i> (simulasi ANN), (a) <i>Conversion ratio</i> , (b) Koefisien <i>void</i> .....	89
Gambar 5.11 Plot normalisasi data (simulasi ANN), (a) <i>Conversion ratio</i> , (b) Koefisien <i>void</i> .....	89
Gambar 5.12 Plot persamaan penilaian <i>scoring</i> $k_{eff}$ (simulasi validasi) .....	93
Gambar 5.13 Plot besar parameter $k_{eff}$ terhadap nilai <i>scoring</i> $k_{eff}$ (simulasi validasi) .....	93
Gambar 5.14 Plot normalisasi data terhadap nilai <i>scoring</i> (simulasi validasi), (a) <i>Conversion ratio</i> , (b) Koefisien <i>void</i> .....	94
Gambar 5.15 Plot normalisasi data (simulasi validasi), (a) Koefisien <i>void</i> , (b) <i>Conversion ratio</i> .....	94
Gambar 5.16 Plot besar parameter terhadap nilai <i>scoring</i> (simulasi validasi), (a) <i>Conversion ratio</i> , (b) Koefisien <i>void</i> .....	95
Gambar 5.17 Grafik hasil simulasi variasi temperatur bahan bakar terhadap reaktivitas (800-1000K, langkah 10 K) .....	102
Gambar 5.18 Grafik hasil simulasi variasi <i>void</i> bahan bakar terhadap reaktivitas (0-10%, langkah 1%).....	103



Gambar 5.19 Grafik hasil simulasi variasi temperatur bahan bakar dengan mempertimbangkan ekspansi termal terhadap reaktivitas (800-1000 K, langkah 10 K) .....	103
Gambar 5.20 Penentuan posisi batang kendali, a) ring-1, b) ring-2, c) ring-3, d) ring-4, e) ring-5, f) ring-6, g) ring-7, h) ring-8 .....	105
Gambar 5.21 Grafik hasil simulasi deinsersi batang kendali dengan posisi teroptimasi terhadap reaktivitas (ring ke-3) .....	107
Gambar 5.22 Grafik hasil simulasi pengurusan bahan bakar terhadap $k_{eff}$ .....	110
Gambar 5.23 <i>Heatmap</i> bidang-XY .....	112
Gambar 5.24 <i>Heatmap</i> bidang-XZ .....	112
Gambar 5.25 <i>Heatmap</i> bidang-YZ .....	113
Gambar 5.26 Plot bar spektrum energi neutron, (a) pin center, fuel region, (b) pin marginal, fuel region, (c) pin center, moderator region, (d) pin marginal, moderator region (238 grup) .....	116
Gambar 5.27 Plot logaritmik spektrum energi neutron, (a) <i>pin center, fuel region</i> , (b) <i>pin marginal, fuel region</i> , (c) <i>pin center, moderator region</i> , (d) <i>pin marginal, moderator region</i> (238 grup) .....	117
Gambar 5.28 Plot logaritmik spektrum energi neutron normalisasi dengan <i>lethargic width</i> , (a) <i>pin center, fuel region</i> , (b) <i>pin marginal, fuel region</i> , (c) <i>pin center, moderator region</i> , (d) <i>pin marginal, moderator region</i> (238 grup) .....	118
Gambar 5.29 Grafik hasil simulasi pengaruh pengayaan <sup>233</sup> U terhadap parameter <i>conversion ratio</i> (CR) .....	121



## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

### Lambang Romawi

A	Luas permukaan	m <sup>2</sup> atau cm <sup>2</sup>
A	Nomor massa atom yang berinteraksi	-
BR	<i>Breeding rasio</i>	-
E	Energi partikel (neutron/photon dst)	eV
g <sub>t</sub>	gradien dari loss pada iterasi-t	-
H	Ketinggian (faktor posisi)	m atau cm
k <sub>eff</sub>	Multiplikasi neutron efektif	-
L	Panjang lintasan	m atau cm
L( $\theta_t$ )	<i>Loss function</i> pada iterasi-t	-
m <sub>t</sub>	estimasi momen pertama pada iterasi-t	-
$\hat{m}_t$	estimasi momen pertama pada iterasi-t	-
N	Banyak data	-
N <sub>0</sub>	Banyak partikel awal	atom atau partikel
N <sub>i</sub>	Banyak partikel – i	atom atau partikel
P <sub>avg</sub>	Densitas daya rerata	W/cm <sup>3</sup>
P <sub>max</sub>	Densitas daya maksimum	W/cm <sup>3</sup>
R	Jari-jari (faktor posisi)	m atau cm
R <sub>a</sub>	Laju reaksi (n,absorpsi)	1/(cm <sup>3</sup> s)
R <sub>c</sub>	Laju reaksi (n,gamma)	1/(cm <sup>3</sup> s)
SDM	<i>Shutdown margin</i>	Pcm
S <sub>g</sub> <sup>ext</sup>	Sumber eksternal pemancar neutron pada energi grup-g	neutron/cm <sup>2</sup> s
T	Indeks iterasi atau epoch	-
T <sub>f</sub>	Suhu bahan bakar	K
v <sub>t</sub>	estimasi momen kedua pada iterasi-t	-
$\hat{v}_t$	estimasi momen pertama pada iterasi-t	-



$X$	Factor <i>void</i>	-
$\hat{y}$	Nilai prediksi data	-
$y_{real}$	Nilai real data	-

### Singkatan

ADAM	Adaptive Moment Estimation
ANN	Artificial Neural Network
ARI	All Rod In
ARO	All Rod Out
at%	Atomic Percent
BOC	Beginning of Cycle (reactor)
BOL	Beginning of Life (reactor)
BR	Breeding Ratio
BWR	Boiling Water Reactor
CAS	Chinese Academy of Sciences
CDF	Cumulative Density Function
CR	Conversion Ratio
CSV	Comma Separated Values
DNU	Denatured uranium ( <sup>233</sup> U)
FLiBe	Larutan garam cair LiF-BeF <sub>2</sub>
FLiNaK	Larutan garam cair LiF-NaF-KF
GB	GigaByte
GPU	Graphic Processing Unit
GWth	Gigawatt-thermal
HTR	High Temperature Reactor
INDZ(CZR-001)	Internation Nuclear Data Committee
MAE	Mean Absolute Error
MCNPX	Monte Carlo N-Particle Extended
MSE	Mean Square Error
MSR	<i>Molten Salt Reactor</i>



MWD/MTIHM	Megawatt-Day/Metric Ton Initial Heavy Metal
MWD/MTU	Megawatt-Day/Metric Ton Uranium
Mwe	Megawatt-electric
MWth	Megawatt-thermal
OpenMC	Open Source Monte Carlo (Neutronic Transport)
Pcm	percent mille (satuan reaktivitas reaktor nuklir)
PDF	Probability Density Function
PPF	Power Peaking Factor
PWR	Pressurized Water Reactor
RAM	Random Access Memory
RMSProp	Root Mean Square Propagation
SCALE	Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation (Neutronic Transport)
SDM	Shutdown Margin
SDP	Slowing Down Power
SGD	Stochastic Gradient Descent
SMR	Small Modular Reactor
Std	Standard Deviation
TMSR	Thorium based MSR
TRISO	Tristructural Isotropic (nuclear fuel)
TRW	Total Rod Worth
UI	User Interface
WSL	Windows Subsystem Linux
wt%	Weight Percent

