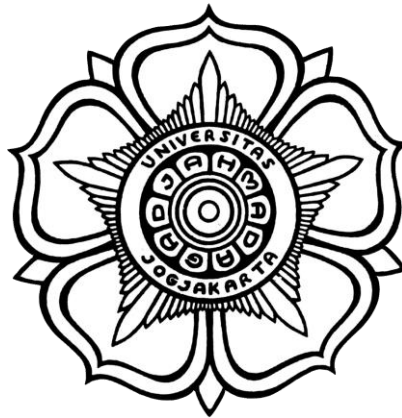


# **OPTIMASI DESAIN *BLANKET* REAKTOR FUSI ITER UNTUK PEMBIAKAN TRITIUM MENGGUNAKAN OPENMC**

## **SKRIPSI**

untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh derajat Sarjana S-1  
Program Studi Teknik Nuklir



Diajukan oleh  
Husni Naufal Zuhdi  
17/413821/TK/46261

kepada

**DEPARTEMEN TEKNIK NUKLIR DAN TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA**

**2021**

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	vi
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN .....	xii
Lambang Romawi .....	xii
Lambang Yunani .....	xiii
Singkatan .....	xiii
INTISARI.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Rumusan Masalah .....	6
I.3 Batasan Masalah .....	6
I.4 Tujuan Penelitian .....	6
I.5 Manfaat Penelitian .....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
BAB III DASAR TEORI .....	11
III.1 Interaksi Neutron dengan Materi.....	11
III.1.1 Hamburan.....	11
III.1.2 Serapan.....	12
III.1.3 Interaksi Neutron dengan Litium.....	13
III.1.4 Interaksi Neutron dengan Timbal Alam .....	14
III.2 Reaksi Fusi Nuklir.....	15
III.3 ITER .....	18
III.4 Tritium Breeding Ratio (TBR).....	22
III.5 Metode Monte Carlo dan Program OpenMC .....	23

III.5.1 Geometri .....	27
III.5.2 <i>Tally</i> .....	28
III.6 Modul Python Paramak, Paramak Neutronics, dan Neutronics Material Maker.....	29
III.6.1 Paramak .....	29
III.6.2 Paramak Neutronics .....	31
III.6.3 Neutronics Material Maker .....	32
BAB IV PELAKSANAAN PENELITIAN .....	33
IV.1 Alat dan Bahan Penelitian .....	33
IV.2 Tata Laksana Penelitian .....	34
IV.2.1 Pembuatan Model Neutronik Reaktor ITER .....	34
IV.2.2 Simulasi TBR .....	40
IV.3 Rencana Analisis Hasil .....	41
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	43
V.1 Kritikalitas Reaktor .....	43
V.2 Desain <i>Blanket</i> Pembiak ITER .....	44
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN .....	52
VI.1 Kesimpulan .....	52
VI.2 Saran.....	52
DAFTAR PUSTAKA .....	53
LAMPIRAN A LISTING PROGRAM OpenMC.....	56
LAMPIRAN B HASIL SIMULASI TBR.....	69

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b> Reaksi neutron dengan materi [20] .....	12
<b>Tabel 3.2</b> Energi Ambang dan Tampang Lintang (n,2n) untuk isotop timbal alam [22] .....	15
<b>Tabel 3.3</b> Parameter Desain ITER [25] .....	18
<b>Tabel 3.4</b> Jenis permukaan yang terdapat pada program OpenMC [31] .....	27
<b>Tabel 4.1</b> Spesifikasi reaktor ITER .....	38
<b>Tabel 5.1</b> Hasil simulasi desain <i>blanket</i> reaktor ITER dengan nilai TBR lebih dari satu .....	49
<b>Tabel 5.2</b> Perbandingan Rasio Volume Moderator Terhadap Volume Fluida <i>Blanket</i> Pembiak Utama .....	51
<b>Tabel B.1</b> Hasil Simulasi <i>blanket</i> TBR ITER menggunakan OpenMC .....	69

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1.1</b> Tampang Lintang dari berbagai reaksi fusi nuklir [9] .....	4
<b>Gambar 3.1</b> Tampang lintang interaksi neutron dengan ${}^6\text{Li}$ [9] .....	14
<b>Gambar 3.2</b> Tampang lintang interaksi neutron dengan ${}^7\text{Li}$ [9] .....	14
<b>Gambar 3.3</b> Energi ikat per penyusun inti sebagai fungsi massa atom .....	16
<b>Gambar 3.4</b> Skema tokamak [24] .....	17
<b>Gambar 3.5</b> Tampang lintang panel dinding pertama ITER [26] .....	20
<b>Gambar 3.6</b> Tangkapan Layar pengoperasian OpenMC .....	25
<b>Gambar 3.7</b> Pembacaan nilai kritikalitas menggunakan OpenMC .....	26
<b>Gambar 3.8</b> Pembacaan <i>tally</i> produksi tritium menggunakan OpenMC .....	26
<b>Gambar 3.9</b> Contoh pembuatan geometri Plasma dan <i>Blanket</i> menggunakan kelas <i>Components</i> [32] .....	30
<b>Gambar 3.10</b> Contoh pembuatan geometri <i>Submersion Tokamak</i> menggunakan kelas <i>Reactors</i> [32] .....	31
<b>Gambar 4.1</b> Diagram alir penelitian secara umum .....	34
<b>Gambar 4.2</b> Tampang Lintang ITER [26] .....	35
<b>Gambar 4.3</b> Pembuatan komponen (a) plasma, (b) dinding pertama, dan (c) <i>divertor</i> reaktor ITER .....	36
<b>Gambar 4.4</b> Tampang Lintang Reaktor ITER .....	39
<b>Gambar 4.5</b> Diagram alir simulasi TBR .....	41
<b>Gambar 4.6</b> Pembacaan berkas <i>statepoint.h5</i> .....	42
<b>Gambar 5.1</b> Plot nilai kritikalitas ITER tiap generasi neutron. ....	43
<b>Gambar 5.2</b> Hasil simulasi desain <i>blanket</i> pembiak ITER pertama .....	44
<b>Gambar 5.3</b> Hasil simulasi desain <i>blanket</i> pembiak ITER kedua .....	45
<b>Gambar 5.4</b> Hasil Simulasi desain <i>blanket</i> pembiak ITER ketiga pada rasio volume moderator bernilai 0,1 .....	47
<b>Gambar 5.5</b> Hasil Simulasi desain <i>blanket</i> pembiak ITER ketiga pada rasio volume moderator bernilai 0,3 .....	47
<b>Gambar 5.6</b> Hasil Simulasi desain <i>blanket</i> pembiak ITER ketiga pada rasio volume moderator bernilai 0,5 .....	48
<b>Gambar 5.7</b> Hasil Simulasi desain <i>blanket</i> pembiak ITER ketiga pada rasio volume moderator bernilai 0,7 .....	48
<b>Gambar 5.8</b> Hasil Simulasi untuk <i>blanket</i> ITER dengan penambahan moderator dan pengganda neutron .....	49

## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

### Lambang Romawi

<i>Lambang</i>	<i>Keterangan</i>	<i>Satuan</i>
R	Laju Reaksi	$\text{atom} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
D	Deuterium	-
T	Tritium	-
n	Neutron	-
p	Proton	-
${}^6_3\text{Li}$	Litium-6	-
${}^7_3\text{Li}$	Litium-7	-
C	Grafit	-
LiF	Litium Florida	-
Pb	Timbal	-
${}^{204}_{82}\text{Pb}$	Timbal-204	-
${}^{206}_{82}\text{Pb}$	Timbal-206	-
${}^{207}_{82}\text{Pb}$	Timbal-207	-
${}^{208}_{82}\text{Pb}$	Timbal-208	-
SS 316	Stainless Steel 316	-
$\text{Nb}_3\text{Sn}$	Niobium Timah	-
NbTi	Niobium Titanium	-

## Lambang Yunani

<i>Lambang</i>	<i>Keterangan</i>	<i>Satuan</i>
$\sigma$	Tampang lintang mikroskopis	barn ( $10^{-24} \text{ cm}^2$ )
$\Sigma$	Tampang lintang makroskopis	$\text{cm}^{-1}$
$\phi$	Fluks neutron	$\text{neutron} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$n$	Densitas nuklida	$\text{nuklida} \cdot \text{cm}^{-3}$
$\langle \sigma v \rangle$	Koefisien laju reaksi fusi	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
$\nu$	Neutrino	-
$\alpha$	Alfa	-
$\gamma$	Gamma	-

## Singkatan

ITER	<i>International Thermonuclear Experimental Reactor</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IUCN	<i>International Union for Conservation of Nature</i>
TBR	<i>Tritium Breeding Ratio</i>
TF	<i>Toroidal Field</i>
PF	<i>Poloidal Field</i>
CS	<i>Central Selenoid</i>
CCs	<i>Corector Coils</i>
HCPB	<i>Helium Cooled Pebble Bed Blanket</i>
PFC	<i>Plasma Facing Component</i>

# OPTIMASI DESAIN *BLANKET* REAKTOR FUSI ITER UNTUK PEMBIAKAN TRITIUM MENGGUNAKAN OPENMC

Husni Naufal Zuhdi

17/413821/TK/46261

Diajukan kepada Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik  
Universitas Gadjah Mada pada 01 November 2021  
untuk memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh derajat  
Sarjana Program Studi Teknik Nuklir

## INTISARI

Sumber energi dunia saat ini masih sangat bergantung kepada energi fosil. Energi fusi nuklir dari deuterium dan tritium merupakan salah satu sumber energi dengan kepadatan energi tinggi. Deuterium tersedia melimpah di air laut tetapi ketersediaan tritium terbatas. *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER) merupakan salah satu proyek reaktor fusi nuklir paling besar di dunia. Pada reaktor fusi nuklir diperlukan *blanket* pembiak tritium untuk memenuhi kebutuhan tritium. *Tritium Breeding Ratio* (TBR) menunjukkan rasio produksi dengan konsumsi tritium pada suatu reaktor fusi nuklir. Tujuan dari skripsi ini adalah untuk mendapatkan desain *blanket* pembiak ITER yang optimal.

Simulasi TBR dilakukan menggunakan program OpenMC dan Paramak. Material fluida *blanket* pembiak yang digunakan dalam skripsi ini adalah litium florida dengan pengayaan  ${}^6\text{Li}$  divariasikan pada nilai 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%. Untuk meningkatkan nilai TBR desain *blanket* pembiak ITER ditambahkan komponen moderator grafit dan pengganda neutron timbal alam pada desain *blanket* pembiak ITER. Penambahan volume moderator dilakukan dengan mengganti sebagian volume fluida *blanket* utama sedangkan penambahan volume pengganda neutron dilakukan dengan mengganti sebagian volume moderator. Variasi rasio volume moderator terhadap fluida *blanket* pembiak utama dilakukan pada nilai 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; dan 0,9 sedangkan variasi rasio volume pengganda neutron terhadap moderator dilakukan pada nilai 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; dan 0,9.

Hasil simulasi desain *blanket* pembiak ITER menunjukkan bahwa konfigurasi pengayaan  ${}^6\text{Li}$ , rasio volume moderator, dan rasio volume pengganda neutron yang optimal secara berurutan adalah 70%; 0,5; dan 0,9 dengan nilai TBR sebesar  $1,005552 \pm 0,004294$ .

**Kata kunci:** ITER, OpenMC, *tritium breeding ratio*

Pembimbing Utama : Dr. Ir. Andang Widi Harto, M.T.

Pembimbing Pendamping : Dr. Ir. Alexander Agung, S.T., M.Sc.



# **ITER FUSION REACTOR BLANKET OPTIMIZATION FOR TRITIUM BREEDING USING OPENMC**

Husni Naufal Zuhdi

17/413821/TK/46261

Submitted to the Department of Nuclear Engineering and Engineering Physics  
Faculty of Engineering Universitas Gadjah Mada on 01 November 2021  
in partial fulfillment of the requirement for the Degree of  
Bachelor of Engineering in Nuclear Engineering

## **ABSTRACT**

The present world energy source is still heavily dependent on fossil energy. Nuclear fusion energy from deuterium and tritium is one of the high-density energy sources. Deuterium is abundant in seawater, but tritium is limited. International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is one of the biggest nuclear fusion projects in the world. Nuclear fusion reactor needs tritium breeding blanket to fulfil tritium requirement. Tritium Breeding Ratio (TBR) represents a ratio between tritium production and tritium consumption in a nuclear fusion reactor. This undergraduate thesis aims is to gain optimal design for the ITER fusion reactor blanket.

TBR simulation done using OpenMC and Paramak programs. Blanket fluid material used in this undergraduate thesis is lithium fluoride with  $^6\text{Li}$  enrichment variation in these values 10%, 30%, 50%, 70%, and 90%. To increase TBR value in ITER breeder blanket design graphite moderator and natural lead neutron multiplier were added into ITER breeder blanket design. Addition of moderator volume taking place part of main fluid breeder blanket volume while the addition of neutron multiplier volume taking place part of moderator volume. Variation of moderator volume ratio against main fluid breeder blanket volume done in these values 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and 0.9 while variation of neutron multiplier volume ratio against moderator volume done in these values 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 and 0.9.

The result of the ITER breeder blanket design simulation shows that the most optimal  $^6\text{Li}$  enrichment, moderator volume ratio, and neutron multiplier volume ratio configuration sequentially is 70%, 0.5, and 0.9 with TBR value in the amount of  $1.005552 \pm 0.004294$ .

**Keywords:** ITER, OpenMC, tritium breeding ratio

Supervisor : Dr. Ir. Andang Widi Harto, M.T.

Co-supervisor : Dr. Ir. Alexander Agung, S.T., M.Sc.

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1 Latar Belakang**

Populasi manusia terus mengalami peningkatan tiap tahunnya. Berdasarkan data yang dipublikasikan oleh Bank Dunia, peningkatan populasi tahunan manusia di bumi pada tahun 2019 sebesar 1,075% sedangkan peningkatan populasi manusia di Indonesia pada tahun yang sama adalah sebesar 1,1% [1]. Hingga tahun 2019, populasi seluruh manusia di bumi diperkirakan mencapai 7,674 miliar jiwa [2]. Bila populasi manusia akan terus meningkat, maka kebutuhan hidup manusia akan mengalami peningkatan juga. Hal tersebut akan memunculkan berbagai masalah bagi generasi sekarang dan generasi masa depan. Salah satu masalah penting yang akan menjadi tantangan untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia adalah masalah ketersediaan energi.

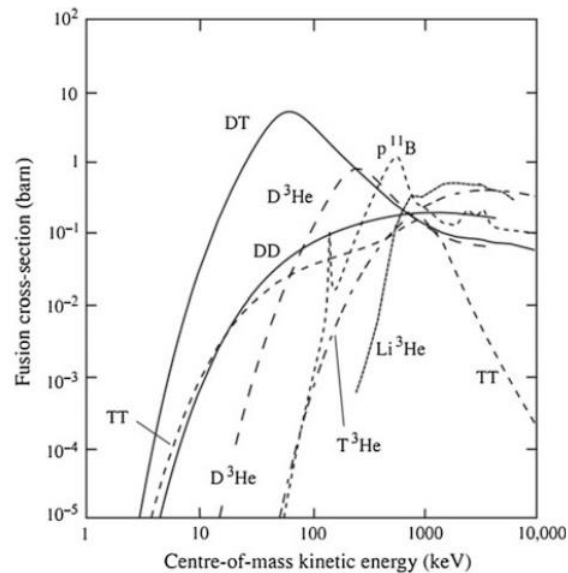
Sebagian besar energi yang kita nikmati saat ini berasal dari bahan bakar fosil seperti minyak, batu bara, dan gas alam. Energi yang berasal dari bahan bakar fosil menguasai 84,3% sumber konsumsi energi dunia. Sedangkan energi nuklir, terbarukan, dan energi rendah karbon hanya menyumbang 15,7% [3]. Jika kita terlalu bergantung kepada bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama, maka kita hanya dapat sekitar 100 tahun lagi karena minyak, batu bara, dan gas alam diperkirakan akan habis sekitar 50, 53, dan 114 tahun lagi secara berurutan [4]. Masalah tersebut akan bertambah besar mengingat konsumsi energi dunia tiap tahunnya selalu mengalami peningkatan. Berdasarkan data dari *Our World in Data*, terjadi peningkatan konsumsi energi dunia dari 2009 hingga 2019 sebesar 19% [5]. Hal tersebut dapat kita kaitkan dengan peningkatan populasi penduduk dunia saat ini. Semakin banyak populasi manusia berkorelasi dengan peningkatan permintaan kebutuhan energi. Peningkatan kebutuhan energi akan memunculkan sifat kompetitif manusia untuk saling berebut sumber daya alam, dalam hal ini sumber daya yang diperebutkan adalah energi. Laporan Perserikatan Bangsa – Bangsa dalam *The Sustainable Development Goals 2020* mendeskripsikan bahwa

terdapat setidaknya 789 juta orang yang masih kekurangan listrik [6]. Hal ini menimpa orang – orang di berbagai belahan dunia mulai dari Amerika Latin, Afrika, Asia Selatan, hingga di berbagai daerah di Indonesia. Selain kesulitan akses terhadap listrik, masyarakat juga masih mengalami kesulitan mengakses bahan bakar bersih untuk memasak. Diperkirakan terdapat 2,8 juta orang yang masih mengalami kesulitan akses terhadap bahan bakar bersih untuk memasak [6]. Mereka masih menggunakan kayu bakar ataupun biomassa tradisional lainnya untuk memasak. Mengetahui hal tersebut, penulis rasa perlunya dilakukan upaya meningkatkan ketersediaan energi untuk memenuhi kebutuhan hidup umat manusia berkelanjutan. Akan tetapi, tidak sembarang sumber energi dapat kita gunakan untuk memenuhi kebutuhan umat manusia secara berkelanjutan.

Diperlukan sumber energi yang mampu memproduksi energi untuk memenuhi kebutuhan manusia sekaligus memiliki efek negatif yang minim terhadap lingkungan. Saat ini sudah tersedia berbagai macam sumber energi yang memenuhi kriteria tersebut di antaranya adalah sumber energi surya, angin, air, geotermal, dan fisi nuklir. Energi surya, angin, air, dan geotermal termasuk dalam kelompok energi berkelanjutan atau lebih dikenal sebagai sumber energi berkelanjutan. Salah satu kelemahan dari sebagian besar energi berkelanjutan adalah tidak sanggup untuk memenuhi beban dasar kebutuhan energi. Untuk memenuhi kebutuhan beban dasar, diperlukan sumber energi yang proses pembangkitan energinya tidak tergantung dengan kondisi alam. Energi berkelanjutan seperti energi surya, angin, dan air sangat bergantung terhadap kondisi alam untuk beroperasi secara optimal. Sedangkan sumber energi geotermal hanya mampu beroperasi di tempat – tempat tertentu yang memiliki cadangan panas bumi yang berlimpah. Dua sumber energi yang mampu menyuplai beban dasar kebutuhan energi adalah sumber energi fosil dan sumber energi nuklir. Sumber energi fosil memiliki efek jangka panjang yang saat ini sudah dapat kita rasakan seperti penyakit pernapasan dan perubahan iklim [7], [8]. Sehingga tersisa satu opsi sumber energi yang mampu menjawab masalah ketersediaan energi dan perubahan iklim, yaitu sumber energi nuklir.

Terdapat dua jenis reaksi nuklir yang umum terjadi yaitu reaksi fisi (pembelahan) dan fusi (penggabungan). Reaksi fisi terjadi ketika elemen dengan nomor atom besar mengalami pembelahan inti atom dikarenakan berinteraksi dengan neutron. Reaksi fisi dapat berjalan secara berkelanjutan bila terdapat cukup neutron dalam teras reaktor untuk berinteraksi dengan inti atom ( $^{235}\text{U}$ ). Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi berada pada rentang MeV, jauh lebih besar daripada energi hasil reaksi pembakaran bahan bakar fosil yang berada pada rentang eV. Meskipun memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi, reaksi fisi nuklir menghasilkan limbah radioaktif yang memerlukan waktu ribuan tahun untuk meluruh secara alami. Bila limbah ini terlepas ke lingkungan, akan membawa efek buruk bagi manusia seperti peningkatan potensi kanker tiroid, pencemaran air tanah, dan berkurangnya tempat tinggal akibat kontaminasi limbah radioaktif. Saat ini sudah dikembangkan berbagai metode untuk pengolahan limbah radioaktif dari reaktor nuklir yang diharapkan dapat menyelesaikan permasalahan limbah radioaktif. Di sisi lain, teknologi reaktor fusi nuklir juga sedang dikembangkan hingga saat ini.

Reaksi fusi nuklir secara alami terjadi di bintang – bintang untuk menghasilkan energi dan material – material yang ada di alam semesta. Reaksi fusi terjadi ketika dua buah atom ringan seperti isotop hidrogen bergabung menjadi satu atom yang lebih berat dan melepaskan beberapa energi. Energi yang dihasilkan berada pada rentang MeV dan limbah yang dihasilkan memiliki waktu paruh yang jauh lebih pendek daripada limbah reaksi fisi. Secara alamiah, dibutuhkan suhu dan tekanan yang masif untuk memastikan reaksi fusi berjalan secara berkelanjutan. Untuk menerapkan reaksi fusi di bumi diperlukan sebuah perangkat yang mampu menghasilkan suhu dan tekanan yang mampu menopang reaksi fusi. Saat ini terdapat dua jenis reaktor fusi yang tengah dikembangkan. Jenis pertama adalah pengungkung magnetik yang menggunakan medan magnet sangat kuat untuk mengungkung plasma dalam suatu wadah. Jenis kedua adalah pengungkung inersia yang menggunakan laser untuk memanaskan dan mengompresi bahan bakar fusi hingga terjadi reaksi fusi.



**Gambar 1.1** Tampang Lintang dari berbagai reaksi fusi nuklir [9]

Deuterium (D) dan tritium (T) merupakan bahan bakar reaksi fusi nuklir yang telah digunakan pada berbagai lembaga riset reaktor fusi nuklir. Hasil reaksi fusi D dengan T akan menghasilkan partikel  $\alpha$  dengan energi sebesar 3,5 MeV serta sebuah neutron dengan energi sebesar 14,1 MeV. Pertimbangan penggunaan D dan T sebagai material bahan bakar yang akan difusikan karenaampang lintang fusi untuk unsur D-T merupakanampang lintang yang paling besar nilainya dan mampu bereaksi pada temperatur terendah bila dibandingkan dengan reaksi fusi lainnya [10]. Gambar 1.1 menunjukkanampang lintang berbagai reaksi fusi nuklir.

Meskipun reaksi D-T merupakan reaksi fusi yang paling memungkinkan bila dilihat dariampang lintang dan temperaturnya. Reaksi D-T memerlukan setidaknya deuterium dan tritium sebagai bahan bakar. Deuterium tersedia banyak pada air laut dengan ketersediaan 150 ppm sedangkan tritium merupakan unsur radioaktif dengan waktu paruh 12,323 tahun yang sangat jarang terbentuk di permukaan bumi [9]. Untuk mengatasi kelangkaan tritium diusulkan penyusunan *blanket* pembiak yang terintegrasi dengan reaktor fusi nuklir. Di dalam *blanket*

tersebut terkandung litium yang dapat berinteraksi dengan neutron dari reaksi fusi nuklir menghasilkan tritium. Parameter yang mampu menunjukkan performa pembiakan tritium pada *blanket* pembiak adalah *Tritium Breeding Ratio* (TBR). Diperlukan nilai TBR lebih dari satu untuk mengoperasikan reaktor fusi nuklir secara berkelanjutan. Akan tetapi, *blanket* pembiak memerlukan komponen lain untuk mendapatkan nilai TBR lebih dari satu yang di antaranya terdiri dari moderator dan pengganda neutron. Salah satu kandidat material *blanket* pembiak, moderator, dan pengganda neutron secara berurutan adalah LiF grafit, dan timbal alam. LiF dalam bentuk garam cair memiliki keunggulan berupa nilai TBR lebih tinggi daripada *blanket* pembiak padat [11] dan mudah dilakukan proses pemisahan tritium dari *blanket* pembiak [9]. Grafit telah digunakan secara umum pada reaktor fisi sebagai moderator neutron dan akan dilakukan penambahan moderator grafit pada desain *blanket* pembiak. Terakhir akan dilakukan penambahan pengganda neutron timbal alam untuk meningkatkan jumlah neutron termal dalam *blanket* pembiak [9].

Salah satu megaprojek reaktor fusi nuklir yang paling maju adalah *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER). ITER adalah riset fusi nuklir internasional dengan anggota terdiri dari negara Amerika Serikat, China, India, Jepang, Korea Selatan, Rusia, dan Uni Eropa yang bertujuan untuk mengembangkan dan mendemonstrasikan teknologi energi fusi nuklir. Salah satu tujuan dibangunnya ITER adalah untuk menguji teknologi *blanket* pembiak tritium yang memungkinkan produksi tritium bersamaan dengan pembakaran bahan bakar fusi [12]. Mengadopsi tujuan di atas, penelitian ini diharapkan mampu menyumbang kontribusi berupa desain *blanket* pembiak tritium yang optimal untuk ITER.

## I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh pengayaan  $^6\text{Li}$  pada fluida *blanket* pembiak terhadap nilai TBR?
2. Bagaimana pengaruh moderator grafit terhadap nilai TBR?
3. Bagaimana pengaruh pengganda neutron timbal alam terhadap nilai TBR?
4. Bagaimana kombinasi pengayaan  $^6\text{Li}$ , moderator grafit dan pengganda neutron timbal alam yang optimal?

## I.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Pemodelan reaktor fusi nuklir berdasarkan ITER dengan bentuk plasma *Single-Null* yang telah disederhanakan tanpa sistem magnet.
2. Tritium yang bocor diabaikan dalam penelitian ini.
3. Penelitian ini hanya meliputi aspek neutronik pada reaktor ITER.
4. Pemodelan dilakukan menggunakan program OpenMC versi 0.13.0dev.

## I.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan di atas, penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui pengaruh pengayaan  $^6\text{Li}$  pada fluida *blanket* pembiak terhadap nilai TBR.
2. Mengetahui pengaruh moderator grafit terhadap nilai TBR.
3. Mengetahui pengaruh pengganda neutron timbal alam terhadap nilai TBR.
4. Mengetahui kombinasi pengayaan  $^6\text{Li}$ , moderator grafit dan pengganda neutron timbal alam yang optimal dengan nilai pengayaan  $^6\text{Li}$  paling rendah dan nilai TBR lebih dari satu.

### **I.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan mampu membantu perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang energi fusi nuklir serta mampu meningkatkan ketertarikan mahasiswa dan masyarakat secara umum terhadap teknologi reaktor fusi nuklir. Selain itu, penelitian secara khusus diharapkan mampu mendapatkan kombinasi pengayaan  $^6\text{Li}$ , moderator grafit dan pengganda neutron timbal alam yang optimal untuk memenuhi kebutuhan tritium pada reaktor fusi nuklir.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Salah satu penelitian *blanket* reaktor fusi nuklir pertama dilakukan pada *International Tokamak Reactor* (INTOR) di Illionis, Amerika Serikat pada tahun 1982 [11]. Penelitian bertujuan untuk menentukan jenis material *blanket* dan pengganda neutron yang optimal. Jenis material *blanket* yang memiliki nilai TBR terbaik dan dinyatakan menarik dalam penelitian tersebut adalah  $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$  dan  $\text{Li}_2\text{O}$  (+Be) dengan nilai TBR yang bisa dicapai adalah 1,3 untuk kedua material. Dalam penentuan pengganda neutron untuk reaktor fusi nuklir, digunakan fluida *blanket* pembiak  $\text{LiAlO}_2$  dengan pengayaan  $^6\text{Li}$  sebesar 90%. Pengganda neutron yang mampu menghasilkan nilai TBR paling tinggi adalah Pb dan Be dengan ketebalan dan nilai TBR pada ketebalan tersebut masing – masing pengganda neutron adalah 8 cm dengan 1,2 dan 5 cm dengan 1,8 [11]. Selain temuan di atas, penelitian tersebut menunjukkan bahwa ketebalan dinding pertama dan pendinding berbanding terbalik dengan nilai TBR, ketebalan pengganda neutron berbanding lurus dengan nilai TBR, material *blanket* metal cair menghasilkan nilai TBR lebih tinggi daripada material metal padat, dan pengayaan  $^6\text{Li}$  tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai TBR [11], [13], [14].

Penelitian yang dilakukan oleh Koichi Maki pada tahun 1986 dengan judul “*Energy multiplication in high tritium breeding ratio blanket with front breeder zone for fusion reactors*” menunjukkan bahwa penambahan satu zona pembiak dengan ketebalan 1 cm sebelum zona pengganda neutron dalam modul *blanket* pembiak mampu meningkatkan nilai TBR 20-40% dan nilai pengganda energi sebesar 5% [15]. Dalam penelitian tersebut digunakan material *blanket* dan pengganda neutron berupa  $\text{Li}_2\text{O}$  dan Be. Temuan lainnya dari penelitian tersebut adalah pengganda neutron Be lebih baik dalam menggandakan energi daripada pengganda neutron Pb, pengayaan  $^6\text{Li}$  hingga 50% hanya menaikkan 5%

pengganda energi, dan kanal pendingin dalam pengganda neutron memiliki efek yang kecil terhadap pengganda energi [15].

Beberapa penelitian simulasi neutronik juga dilakukan untuk menentukan nilai TBR pada tokamak ITER dengan menggunakan jenis *blanket Helium Cooled Pebble Bed Blanket* (HCPB) yang sedang dikembangkan. Penelitian yang dilakukan oleh Soltani, Behrooz dan Habibi, Morteza [16] menggunakan desain modul *blanket* yang tersusun dari kombinasi : litium alam,  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  (20%), moderator dan pengganda neutron Be. Simulasi dijalankan menggunakan kode MCNP-4C menggunakan pustaka data nuklir END/B-VII.1. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan nilai TBR yang dicapai untuk jenis *blanket* HCPB tersebut adalah 1,14 [16]. Penelitian serupa yang dilakukan oleh Zandi, N et al. menyimulasikan jenis *blanket* HCPB pada tokamak ITER menggunakan material *blanket* berupa  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  dan pengganda neutron Be. Simulasi neutronik dijalankan menggunakan kode MCNPX dan dilanjutkan simulasi sistem pendingin dengan COMSOL *Multiphysics*. Didapat nilai TBR sebesar 1,14 dari penelitian tersebut [17].

Penelitian yang dilakukan oleh Maymunah, Indah Rosidah et al. berhasil menentukan nilai TBR untuk tokamak ITER. Pada penelitian tersebut digunakan material *blanket* berupa  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  berbentuk padat dan pengganda neutron Be atau Pb. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa ketebalan *blanket* pembiak berbanding lurus dengan nilai TBR, pengayaan  $^6\text{Li}$  dengan nilai TBR tertinggi berada pada rentang 60% karena pada pengayaan melebihi 60% populasi  $^7\text{Li}$  yang dapat berperan sebagai moderator tambahan mulai berkurang, dan penggunaan material Pb sebagai pengganda neutron mampu meningkatkan nilai TBR sebanyak 5% [18]. Nilai TBR yang didapat dari penelitian tersebut adalah 1,22 – 1,55 [18].

Beberapa penelitian rekayasa *blanket* ITER untuk menentukan desain yang optimal juga telah dilakukan. Penelitian yang dilakukan oleh Wijaya, Stevan menggunakan material *blanket* sekaligus pendingin berupa Litium Florida, pengganda neutron  $\text{Be}_2\text{C}$ , dan karbon sebagai moderator. Simulasi dilakukan

menggunakan kode MCNPX dan didapat nilai TBR untuk pengayaan  ${}^6\text{Li}$  sebesar 15% adalah 1,042 [13]. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Ali, Muhamad menggunakan material *blanket* dan pengganda neutron berupa garam cair  $\text{FliBe}$  serta bola grafit sebagai moderator. Simulasi dilakukan menggunakan kode MCNPX dan didapat nilai TBR sebesar 1,107 untuk konfigurasi pengayaan  ${}^6\text{Li}$  100% dan komposisi  $\text{BeF}_2\text{:LiF}$  75:25 [14].

Penelitian yang dilakukan oleh Hernández, F.A. menunjukkan performa dari tiap kandidat material *blanket* dan pengganda neutron untuk tokamak EU DEMO. Penelitian tersebut dijalankan menggunakan kode MCNP5-1.60 dengan jenis modul *blanket* HCPB. Nilai TBR untuk material *blanket*  $\text{LiF}$  dengan pengayaan  ${}^6\text{Li}$  60% dan untuk material *blanket*  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  dengan pengayaan  ${}^6\text{Li}$  90% dan pengganda neutron timbal alam cair secara berurutan sebesar 1,21 dan 1,15 [19].

Penelitian ini akan menggunakan  $\text{LiF}$  sebagai fluida *blanket* pembiak, timbal alam sebagai pengganda neutron, grafit sebagai reflektor dan moderator, berilium sebagai PFC,  $\text{CuCrZr}$  sebagai penyerap kalor, dan SS316 sebagai material *divertor*, bejana vakum, dan dinding pertama.

## **BAB III**

### **DASAR TEORI**

#### **III.1 Interaksi Neutron dengan Materi**

Neutron adalah salah satu partikel penyusun inti atom selain proton. Neutron memiliki karakteristik tidak bermuatan dan hanya berinteraksi dengan inti melalui gaya inti. Tidak seperti partikel bermuatan, neutron tidak perlu berinteraksi dengan penghalang Coulomb. Hal ini berakibat pada nilaiampang lintang reaksi nuklir neutron lebih tinggi daripada partikel bermuatan. Ampang lintang suatu reaksi nuklir menunjukkan probabilitas suatu reaksi terjadi untuk setiap neutron yang berinteraksi dengan target nuklida pada suatu luasan tertentu. Satuan untuk ampang lintang adalah barn. Terdapat dua jenis interaksi neutron dengan materi yaitu hamburan dan tangkapan.

##### **III.1.1 Hamburan**

Pada interaksi hamburan, neutron berinteraksi dengan nuklida dan kedua partikel muncul pada akhir reaksi. Hamburan biasa dinotasikan sebagai reaksi (n, n). Interaksi hamburan dapat dibagi menjadi hamburan elastik dan tidak elastik. Dalam hamburan elastik, energi kinetik keseluruhan dari kedua partikel yang bertumbukan tetap. Energi kinetik partikel terdistribusi ulang antara dua partikel mengikuti hukum konservasi energi dan momentum linear. Pada interaksi hamburan tidak elastik, sebagian energi kinetik neutron berpindah ke nuklida dan mengakibatkan nuklida ter eksitasi. Setelah tumbukan terjadi, nuklida yang ter eksitasi akan kembali ke tingkat energi dasar dengan mengeluarkan satu atau lebih sinar gamma [20].

### III.1.2 Serapan

Interaksi serapan terjadi ketika neutron diserap oleh nuklida tetapi satu atau lebih partikel lain muncul setelah interaksi terjadi. Interaksi serapan lebih sering terjadi pada neutron lambat. Pada sebagian besar material, reaksi tangkapan radiatif merupakan reaksi yang paling memungkinkan dan memerankan peran penting dalam atenuasi atau perisai neutron [20]. Reaksi tangkapan radiatif terjadi ketika nuklida menyerap neutron dan memancarkan sinar gamma. Reaksi ini dilambangkan dengan  $(n, \gamma)$ .

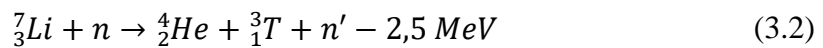
Selain reaksi tangkapan radiatif, terdapat reaksi produksi partikel bermuatan, reaksi pengganda neutron dan reaksi fisi. Reaksi produksi partikel bermuatan terjadi ketika nuklida menyerap neutron dan memancarkan partikel bermuatan seperti partikel alfa dan proton. Reaksi partikel alfa dan partikel proton secara berurutan dilambangkan dengan  $(n, \alpha)$  dan  $(n, p)$ . Reaksi pengganda neutron terjadi ketika nuklida menyerap neutron dan mengeluarkan dua atau lebih neutron. Reaksi serapan yang terakhir adalah reaksi fisi. Reaksi fisi terjadi bila nuklida material fisil menyerap neutron kemudian mengeluarkan dua atau lebih neutron diikuti dengan pecahnya nuklida menjadi dua nuklida dengan nomor massa dan atom yang lebih rendah daripada nuklida awal. Tabel 3.1 menunjukkan beberapa contoh reaksi neutron dengan materi.

**Tabel 3.1** Reaksi neutron dengan materi [20]

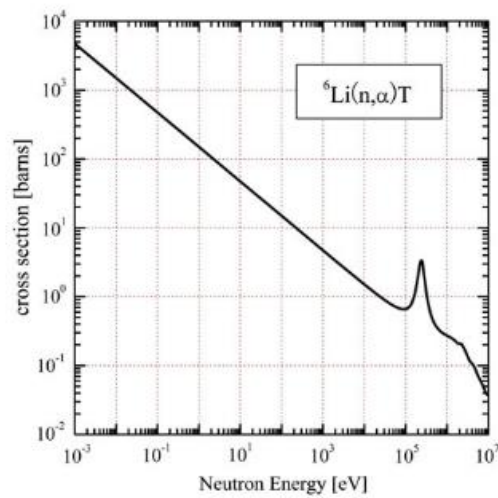
Reaksi	Nama	Lambang
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^A_ZX + n$	Reaksi hamburan elastik	$(n, n)$
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^{A+1}_ZX + \gamma$	Reaksi tangkapan radiatif	$(n, \gamma)$
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^{A-1}_{Z-1}X + p$	Reaksi produksi proton	$(n, p)$
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^{A-1}_ZX + 2n$	Reaksi pengganda neutron	$(n, 2n)$
$n + {}^A_ZX \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}Y_1 + {}^{A_2}_{Z_2}Y_2 + n + n + ..$	Reaksi Fisi	$(n, \text{fisi})$

### III.1.3 Interaksi Neutron dengan Litium

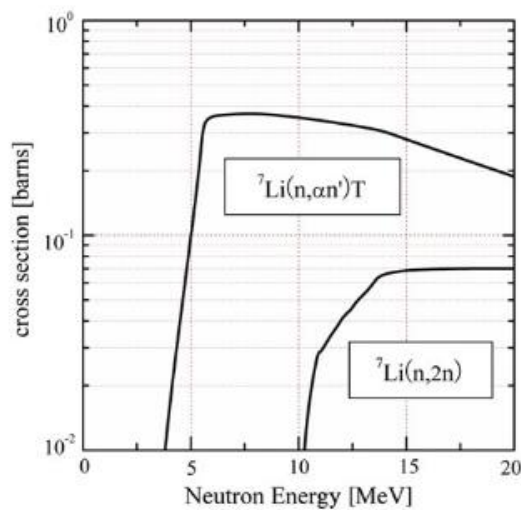
Litium merupakan unsur kimia dengan nomor atom 3 dan termasuk dalam golongan logam alkali. Pada kondisi suhu dan tekanan standar litium berbentuk solid dan memiliki massa jenis sebesar  $0,534 \text{ g/cm}^3$ . Litium memiliki dua isotop yaitu  ${}^6\text{Li}$  dan  ${}^7\text{Li}$ . Kandungan isotop litium masing – masing pada litium alam adalah 7,5% untuk  ${}^6\text{Li}$  dan 92,5% untuk  ${}^7\text{Li}$  [9]. Kegunaan litium dalam reaktor fusi nuklir adalah untuk memproduksi T dengan melakukan reaksi litium dengan neutron, seperti reaksi berikut.



Pada Persamaan 3.1 diproduksi satu T untuk setiap neutron yang bereaksi, sedangkan pada Persamaan 3.2 dihasilkan T dengan n yang dapat digunakan untuk menginduksi reaksi produksi T selanjutnya. Meskipun Persamaan 3.2 terlihat menguntungkan, reaksi tersebut membutuhkan energi 2,5 MeV yang pada akhirnya akan menurunkan daya keluaran reaktor fusi nuklir. Selain itu, Persamaan 3.2 membutuhkan neutron dengan energi tinggi seperti yang terlihat pada Gambar 3.2. Nilaiampang lintang reaksi produksi tritium tertinggi pada  ${}^7\text{Li}$  adalah berkisar pada 0,6 – 0,7 barn untuk energi neutron berada pada nilai 5 – 6 MeV. Sedangkan Persamaan 3.1 terjadi dengan neutron termal seperti yang terlihat pada Gambar 3.1. Nilaiampang lintang reaksi produksi tritium pada  ${}^6\text{Li}$  meningkat seiring dengan berkurangnya energi neutron yang berinteraksi dengan  ${}^6\text{Li}$ . Pada spektrum neutron termal, neutron dengan energi 0,025 eV, nilaiampang lintang produksi T pada  ${}^6\text{Li}$  berada pada nilai  $10^3$  barn. Perbedaan nilaiampang lintang yang sangat jauh ini serta pertimbangan pengurangan daya keluaran reaktor fusi nuklir bila mengandalkan produksi T menggunakan  ${}^7\text{Li}$  membuat penggunaan  ${}^6\text{Li}$  lebih menguntungkan untuk produksi T sehingga diperlukan pengayaan  ${}^6\text{Li}$  pada sistem *blanket* reaktor fusi nuklir.



**Gambar 3.1** Tampang lintang interaksi neutron dengan  ${}^6\text{Li}$  [9]



**Gambar 3.2** Tampang lintang interaksi neutron dengan  ${}^7\text{Li}$  [9]

#### III.1.4 Interaksi Neutron dengan Timbal Alam

Timbal merupakan elemen dengan nomor atom 82 dan termasuk dalam golongan logam berat yang memiliki massa jenis lebih tinggi dari sebagian elemen pada umumnya. Timbal pada kondisi suhu dan tekanan standar berada pada fase solid dan memiliki massa jenis sebesar  $11,34 \text{ g/cm}^3$ . Timbal alam tersusun dari berbagai isotop timbal yaitu  ${}^{204}\text{Pb}$  (1,4%),  ${}^{206}\text{Pb}$  (24,1%),  ${}^{207}\text{Pb}$  (22,1%), dan  ${}^{208}\text{Pb}$  (52,10%) [21].

Salah satu interaksi neutron dengan isotop – isotop timbal alam adalah reaksi pengganda neutron. Pada timbal alam, reaksi pengganda neutron ( $n, 2n$ ) dapat terjadi dengan nilai batas ambang energi sekitar 7 – 8 MeV seperti yang terlihat pada Tabel 3.2.

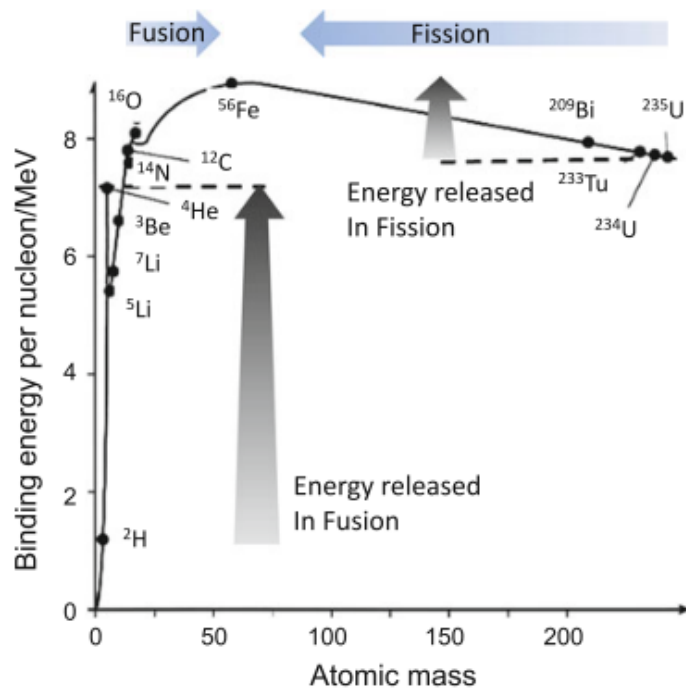
**Tabel 3.2** Energi Ambang dan Tampang Lintang ( $n,2n$ ) untuk isotop timbal alam [22]

Isotop	Reaksi	Energi Ambang (MeV)	Tampang Lintang pada 14 MeV (b)
$^{204}\text{Pb}$	(n, 2n)	8,436	2,178
$^{206}\text{Pb}$		8,126	2,252
$^{207}\text{Pb}$		6,771	2,280
$^{208}\text{Pb}$		7,404	2,147

### III.2 Reaksi Fusi Nuklir

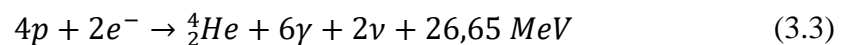
Reaksi fusi nuklir adalah reaksi penggabungan dua nuklida ringan menjadi satu nuklida dengan massa yang lebih besar diikuti dengan beberapa partikel elementer seperti neutron dan neutrino. Reaksi fusi nuklir terjadi ketika energi kedua nuklida melebihi energi penghalang Coulomb pada kedua nuklida. Energi yang dihasilkan pada reaksi fusi nuklir dapat ditentukan berdasarkan energi ikat dari kedua nuklida ringan dikurangi dengan energi ikat dari nuklida maupun partikel elementer hasil reaksi fusi nuklir. Energi ikat merupakan energi yang diperlukan untuk memecah inti atom menjadi elemen penyusun inti yang terdiri dari proton dan neutron. Gambar 3.3 menunjukkan grafik energi ikat per penyusun inti sebagai fungsi massa atom.





**Gambar 3.3** Energi ikat per penyusun inti sebagai fungsi massa atom

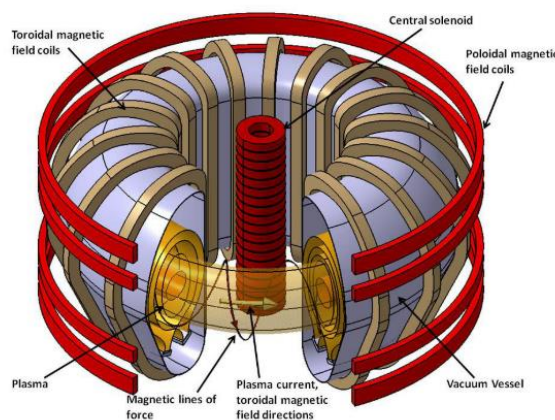
Reaksi fusi secara alami terjadi di bintang di seluruh alam semesta termasuk di matahari. Reaksi fusi nuklir yang terjadi di matahari sangat kompleks akan tetapi dapat direpresentasikan menggunakan Persamaan 3.3. Waktu reaksi dari reaksi fusi nuklir di matahari membutuhkan waktu jutaan hingga miliaran tahun [9].



Untuk mereplika reaksi fusi nuklir yang terjadi di matahari sangat sulit dan hampir tidak mungkin. Dibutuhkan reaksi fusi nuklir yang lebih mudah dilakukan di bumi. Gambar 1.1 menunjukkan tampang lintang dari berbagai reaksi fusi nuklir yang mungkin dilakukan di bumi. Salah satu reaksi fusi nuklir yang memiliki tampang lintang tertinggi adalah reaksi fusi nuklir D-T.

Deuterium (D) dan Tritium (T) adalah isotop alami hidrogen dengan massa atom masing – masing adalah 2 dan 3. Reaksi fusi nuklir D-T dilakukan dengan memberikan energi kinetik yang cukup melewati penghalang Coulomb pada tiap reaktan. Energi penghalang Coulomb yang perlu dilewati untuk reaksi fusi nuklir D-T bernilai 0,1 MeV [9]. Setelah penghalang Coulomb terlewati , gaya inti kuat akan menjadi lebih dominan daripada gaya elektromagnetik dan menggabungkan kedua reaktan menjadi  ${}^5\text{He}^*$ .  ${}^5\text{He}^*$  memiliki waktu paruh yang sangat singkat dan akan meluruh menghasilkan partikel  $\alpha$  dan neutron dengan energi masing – masing partikel sebesar 3,5 MeV dan 14,1 MeV [23].

Reaktor fusi nuklir terbagi menjadi dua jenis yaitu pengungkung magnetik dan pengungkung inersia. Pengungkung magnetik menggunakan medan magnet yang sangat kuat untuk mengungkung plasma D-T dalam suatu bejana vakum sedangkan pengungkung inersia menggunakan laser untuk memanaskan dan mengompresi pelet bahan bakar fusi nuklir. Jenis pengungkung magnetik pada umumnya menggunakan struktur berbentuk torus yang disebut tokamak. Plasma yang terkungkung di dalam tokamak dapat dibentuk dengan memutar kumparan solenoid yang terdapat di tengah bejana vakum dibantu dengan kumparan medan magnet berbentuk torus dan kumparan magnet poloidal di luar bejana vakum. Gambar 3.4 menunjukkan skema tokamak secara umum.



**Gambar 3.4** Skema tokamak [24]

### III.3 ITER

*International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER) adalah riset fusi nuklir internasional dan megaprojek yang bertujuan untuk mengembangkan dan mendemonstrasikan teknologi energi fusi. Megaprojek ini melakukan konstruksi pertamanya di Cadarache, Prancis pada tahun 2013 dan direncanakan akan selesai pada tahun 2025. ITER merupakan reaktor fusi nuklir pengungkung magnetik berbentuk tokamak yang didesain untuk menghasilkan pulsa panjang, plasma yang memanjang (*elongated*), dan menggunakan *divertor* tipe *single null*. Pulsa panjang berkorelasi dengan waktu bakar yang relatif cukup panjang untuk tokamak, yaitu 400 detik hingga 600 detik [25]. Tabel 3.3 menunjukkan parameter desain ITER.

**Tabel 3.3** Parameter Desain ITER [25]

Parameter	Nilai
Daya Fusi	500 MW
Arus Plasma	15 MA
Medan Magnet Toroidal	5,3 T
Radius Mayor	620 cm
Radius Minor	200 cm
<i>Elongation</i>	1,7
<i>Triangularity</i>	0,33
Waktu Bakar	400-600 s
Faktor Perolehan Energi Fusi	10

Secara umum, reaktor tokamak merupakan pengungkung plasma berbentuk donat yang dikelilingi oleh magnet kuat untuk menjaga bentuk plasma. ITER terdiri dari beberapa komponen utama yang terdiri dari bejana vakum, sistem *blanket*, *divertor*, sistem magnet, *cryostat*, sistem pendingin, penggerak

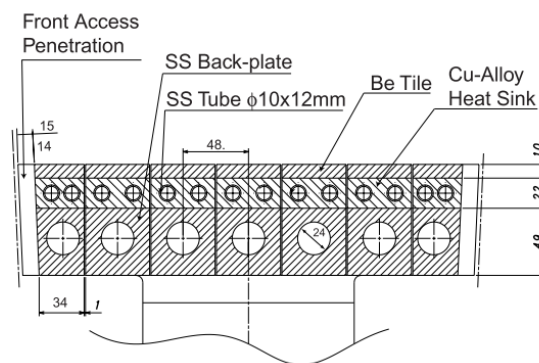
arus, dan pemanas tambahan. Bejana vakum ITER memiliki peran penting dalam mengungkung plasma, melindungi sistem magnet, dan menopang sistem lainnya. Terdapat sembilan sektor bejana vakum yang masing – masing memiliki berat sekitar 500 ton [25] dengan berat total bejana vakum sebesar 8.448 ton [26]. Bagian bejana vakum lainnya berupa perisai primer, perisai masukan feromagnetik, dan penyambung saluran, secara berurutan, menggunakan material SS 30467, SS 430, dan SS 304 [26].

*Divertor* adalah komponen dalam sebuah tokamak dan stellarator yang berfungsi untuk membuang material limbah selama waktu operasi. Material yang dibuang melalui *divertor* dapat berupa sisa pembakaran plasma berupa He, material yang terdegradasi akibat berinteraksi dengan plasma, dan impuritas yang terkandung dalam plasma. Konfigurasi *divertor* ITER berjenis *single null* yang terdiri dari kaset – kaset modular dengan komponen yang mampu menahan fluks neutron serta kalor yang tinggi. Terdapat 54 buah kaset pada ITER yang dipasang pada bagian bawah bejana vakum. Material penyusun *divertor* ITER terdiri dari Alloy tungsten dan karbon sebagai *Plasma Facing Component* (PFC), Alloy tembaga untuk pembuang kalor, dan SS 316 LN untuk struktur utama *divertor* [26].

Sistem Magnet ITER terdiri dari 18 kumparan superkonduktor medan toroid (TF), sebuah kumparan superkonduktor solenoid (CS), enam kumparan superkonduktor medan poloidal (PF), dan 18 kumparan superkonduktor koreksi (CCs). Kumparan TF memiliki bentuk panekuk berlubang yang diselimuti oleh jaket SS sirkuler di dalam pelat radial beralur. Kumparan CS terdiri dari 5 modul *hexa-pancake* dan 1 modul *quad-pancake*. Sedangkan kumparan PF berbentuk panekuk dobel. Kedua kumparan CS dan TF beroperasi pada medan tinggi dan menggunakan superkonduktor tipe Nb<sub>3</sub>Sn. Kumparan PF dan CCs menggunakan superkonduktor NbTi. Semua kumparan beroperasi dengan cara didinginkan menggunakan helium superkritis hingga suhu 4,4 K [26].

Sistem *blanket* pada dasarnya berfungsi untuk menyediakan perlindungan termal dan nuklir utama untuk bejana dan komponen eksternal ITER. Konsep

dasar dari sistem *blanket* adalah menerapkan konfigurasi modular dengan sistem pemasangan mekanik. Modul *blanket* akan terpasang langsung pada bejana vakum dan akan terhubung dengan suplai air pendingin yang terdapat di belakang modul [26]. Komponen modul *blanket* secara garis besar terdiri dari dinding pertama, moderator, pengganda neutron, fluida *blanket* pembiak, dan reflektor.



**Gambar 3.5** Tampang lintang panel dinding pertama ITER [26]

Dinding pertama merupakan bagian modul *blanket* yang akan menjadi perisai termal dan neutron pertama pada sistem *blanket*. Pada ITER, dinding pertama terdiri dari PFC, pembuang kalor, dan struktur yang masing – masing tersusun dari material berilium, CuAl25 atau CuCrZr, dan SS 316LN. Tampang lintang dinding pertama ITER diilustrasikan pada Gambar 3.5. Penggunaan berilium sebagai material penghadap plasma dikarenakan berilium memiliki ketahanan tinggi terhadap medan magnet yang intens dan berfluktuasi, kontaminasi plasma yang rendah, dan penahanan bahan bakar fusi yang rendah [27].

Moderator pada reaktor fusi nuklir memiliki peran serupa pada reaktor fisi nuklir yaitu untuk memperlambat neutron hingga menjadi neutron berenergi rendah. Proses moderasi terjadi ketika neutron berenergi tinggi berinteraksi hamburan dengan materi. Pada kasus reaksi fisi nuklir, energi kinetik rerata neutron yang dipancarkan pada reaksi fisi oleh  $^{235}\text{U}$  berkisar 2 MeV. Energi

tersebut perlu diturunkan hingga bernilai 0.025 eV untuk melanjutkan reaksi fisi di nuklida lainnya. Rentang energi tersebut disebut neutron termal [20]. Pada reaktor fusi nuklir, moderator yang terletak pada sistem *blanket* berfungsi untuk menurunkan energi neutron dari hasil reaksi fusi nuklir di plasma supaya dapat berinteraksi dengan  ${}^6\text{Li}$  untuk memproduksi tritium. Material moderator memiliki tampang lintang hamburan yang tinggi dan massa atom yang kecil [28].

Pengganda Neutron merupakan komponen dalam sistem *blanket* yang memiliki peran untuk meningkatkan jumlah neutron pada sistem *blanket*, terutama pada komponen fluida *blanket* pembiak. Proses penggandaan neutron terjadi ketika neutron diserap oleh materi dan menghasilkan dua neutron baru atau lebih. Material pengganda neutron yang baik harus memiliki tampang lintang ( $n$ ,  $2n$ ) dan/atau ( $n$ ,  $3n$ ) yang tinggi serta nilai batas ambang energi tidak melebihi 10 MeV [11].

Fluida *blanket* pembiak merupakan tempat terjadinya pembiakan tritium pada reaktor fusi nuklir. Terletak di dalam sistem *blanket*, fluida *blanket* pembiak tersusun dari material dengan tampang lintang produksi tritium yang tinggi. Proses produksi tritium memanfaatkan neutron dari reaksi fusi nuklir pada plasma D-T yang telah diturunkan energinya oleh moderator dan bila perlu telah digandakan oleh pengganda neutron. Tritium yang telah diproduksi akan dipisahkan untuk digunakan kembali sebagai bahan bakar reaktor fusi nuklir.

Desain modul *blanket* yang terdapat pada dokumen *ITER EDA Documentation Series No.24* memiliki tujuan untuk mengecilkan, (a) biaya modul, (b) limbah radioaktif, dan (c) beban elektromagnetik akibat disrupsi [26]. Eksperimen untuk *blanket* pembiak tritium ITER akan dilakukan setelah tujuan dari desain modul *blanket* ITER terpenuhi. Saat ini sudah dilakukan beberapa penelitian untuk menghasilkan modul *blanket* yang mampu memproduksi tritium secara berkelanjutan untuk bahan bakar reaktor fusi nuklir. Bagian modul *blanket* yang dapat divariasikan untuk mencapai produksi tritium yang berkelanjutan adalah moderator, pengganda neutron, fluida *blanket* pembiak, dan/atau reflektor.

Salah satu parameter penting yang mendeskripsikan performa pembiakan tritium pada suatu sistem *blanket* adalah *tritium breeding ratio* (TBR). Untuk mewujudkan reaktor fusi nuklir yang mampu beroperasi secara berkelanjutan, dibutuhkan nilai parameter TBR lebih dari satu.

### III.4 Tritium Breeding Ratio (TBR)

*Tritium Breeding Ratio* (TBR) merupakan parameter yang merepresentasikan perbandingan antara laju produksi tritium yang dihasilkan pada sistem *blanket* dengan pembakaran tritium dalam plasma. Parameter TBR akan menentukan keberlanjutan pembakaran plasma pada tokamak. Pada tokamak, nuklida yang berperan dalam produksi tritium adalah  ${}^6\text{Li}$  dan  ${}^7\text{Li}$ . Untuk menghitung laju reaksi pembuatan tritium dari masing – masing nuklida  ${}^6\text{Li}$  dan  ${}^7\text{Li}$  digunakan Persamaan 3.4 dan 3.5. Ruas sebelah kiri Persamaan 3.4 dan 3.5 menunjukkan laju reaksi produksi tritium untuk masing - masing isotop sedangkan ruas sebelah kanan menunjukkan integrasi neutron tiap waktu yang berinteraksi dengan  ${}^6\text{Li}$  dan  ${}^7\text{Li}$  pada posisi ( $\vec{r}$ ) dengan satuan cm, arah gerak ( $\vec{\Omega}$ ) dengan satuan sr, dan energi (E) dengan satuan eV [9]. Jenis interaksi neutron dengan  ${}^6\text{Li}$  dan  ${}^7\text{Li}$  dilambangkan dengan tampang lintang makroskopis  $\Sigma_{{}^6\text{Li}}$  dan  $\Sigma_{{}^7\text{Li}}$  dengan satuan  $\text{cm}^{-2}$  sedangkan fluks neutron dilambangkan dengan  $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega})$  dengan satuan  $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}\text{eV}^{-1}\text{sr}^{-1}$ .

$$R_T({}^6\text{Li}) = \iiint \Sigma_{{}^6\text{Li}} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) dE d\Omega d\vec{r} \quad (3.4)$$

$$R_T({}^7\text{Li}) = \iiint \Sigma_{{}^7\text{Li}} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) dE d\Omega d\vec{r} \quad (3.5)$$

dengan

$$\Sigma_{^6_3\text{Li}} = n_{^6_3\text{Li}}(\vec{r})\sigma_{^6_3\text{Li}}(E) \quad (3.6)$$

$$\Sigma_{^7_3\text{Li}} = n_{^7_3\text{Li}}(\vec{r})\sigma_{^7_3\text{Li}}(E) \quad (3.7)$$

$n_{^6_3\text{Li}}$  dan  $n_{^7_3\text{Li}}$  adalah densitas nuklida  $^6\text{Li}$  dan  $^7\text{Li}$  pada material *blanket* pembiak dengan satuan  $\text{cm}^{-3}$ .

Untuk menghitung laju pembakaran deuterium dan tritium dalam plasma dapat digunakan persamaan berikut:

$$R_{DT} = \int n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{DT} d\vec{r} \quad (3.8)$$

$\langle \sigma v \rangle_{DT}$  adalah koefisien laju reaksi dari reaksi fusi nuklir D-T pada plasma dengan satuan  $\text{cm}^3\text{s}^{-1}$  sedangkan  $n_D$  dan  $n_T$  adalah densitas nuklida deuterium dan tritium pada plasma dengan satuan  $\text{cm}^{-3}$ . Koefisien laju reaksi fusi nuklir merupakan hasil kali tampang lintang reaksi fusi dengan kecepatan relatif rerata antara dua spesies nuklida [9].

Dari persamaan 3.4, 3.5 dan 3.8 TBR dapat dirumuskan menjadi:

$$TBR = \frac{R_T(^6_3\text{Li}) + R_T(^7_3\text{Li})}{R_{DT}} = \frac{\sum_6^7 \iiint \Sigma_{^i_3\text{Li}} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) dE d\Omega d\vec{r}}{\int n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{DT} d\vec{r}} \quad (3.9)$$

### III.5 Metode Monte Carlo dan Program OpenMC

Metode Monte Carlo merupakan metode stokastik untuk menyelesaikan masalah transpor partikel. Pelaksanaan metode Monte Carlo melibatkan serangkaian proses untuk memproduksi kejadian secara acak dan mengulangi



kejadian tersebut  $N$  kali dengan tiap pengulangan tidak berkaitan satu sama lain antar pengulangan. Metode Monte Carlo meniru eksperimen di laboratorium. Semakin besar jumlah pengulangan yang dilakukan, semakin besar pula tingkat kepercayaan hasil simulasi [29]. Terdapat berbagai macam program untuk melakukan simulasi neutronik menggunakan metode Monte Carlo yang telah dikembangkan oleh berbagai lembaga di dunia. Beberapa program tersebut adalah *Monte Carlo N-Particle Transport* (MCNP), Tripoli-4<sup>®</sup>, *FLUktuierende KAskade* (FLUKA), dan *Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS). Salah satu kekurangan dari sebagian besar program transpor partikel adalah memiliki sifat tertutup sehingga diperlukan lisensi untuk menggunakan program tersebut. Meskipun begitu, terdapat sebuah program transpor partikel yang tersedia secara terbuka untuk digunakan dan dikembangkan oleh siapa pun.

OpenMC adalah sebuah kode simulasi transpor Monte Carlo untuk neutron dan foton yang dikembangkan oleh komunitas. Program ini pertama kali dikembangkan oleh anggota *Computational Reactor Physics Group* (CRPG) di *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) pada awal 2011 dan pertama kali rilis ke publik pada Desember 2012 [30]. OpenMC bersifat sumber terbuka dan setiap orang dapat berkontribusi untuk memperbarui dan mengembangkan program ini. Berbagai universitas, laboratorium, dan organisasi telah berkontribusi terhadap perkembangan OpenMC. OpenMC mampu melaksanakan simulasi *fixed source*, nilai eigen  $k$ , dan perkalian subkritis pada model yang dibangun menggunakan *Constructive Solid Geometry* (CSG) ataupun *Computer Aided Design* (CAD). OpenMC mendukung transpor energi kontinu maupun *multigroup*. Data interaksi partikel untuk energi kontinu diambil berdasarkan format HDF5 bawaan yang dapat digenerasi dari berkas ACE yang diproduksi oleh NJOY *Nuclear Data Processing*. OpenMC juga mendukung komputasi paralel via model pemrograman MPI dan OpenMP [30].

Untuk melakukan simulasi neutronik menggunakan OpenMC dibutuhkan berkas *geometry.xml*, *materials.xml*, dan *settings.xml* yang masing – masing mengandung informasi terkait geometri, material, dan pengaturan simulasi



batas *cell* dan OpenMC akan menghitung ulang lokasi *cell* beserta tampang lintang yang bergantung terhadap energi tempat partikel berada. Bila jarak partikel terhadap tumbukan selanjutnya kurang dari jarak partikel terhadap batas *cell*, partikel akan mengalami tumbukan. Kemudian OpenMC akan menentukan nuklida yang akan bertumbukan dengan partikel berdasarkan data tampang lintang makroskopis nuklida. Setelah ditentukan nuklida yang akan bertumbukan, OpenMC menentukan interaksi partikel dengan nuklida berdasarkan data tampang lintang mikroskopis. Proses ini akan diulang hingga partikel mati [30].

Hasil simulasi program OpenMC disimpan dalam berkas *StatePoint* yang dapat diakses menggunakan program OpenMC. Gambar 3.7 dan 3.8 menunjukkan pembacaan nilai kritikalitas dan *tally* produksi tritium menggunakan OpenMC.

```
# Import modul OpenMC
import openmc

# Membaca berkas hasil simulasi
sp = openmc.StatePoint('statepoint.10.h5')

# Menampilkan perhitungan kritikalitas reaktor
print(f"Hasil perhitungan kritikalitas : {sp.k_combined}")

Hasil perhitungan kritikalitas : (1.347+/-0.027)e-05
```

**Gambar 3.7** Pembacaan nilai kritikalitas menggunakan OpenMC

```
# Import modul OpenMC
import openmc

# Membaca berkas statepoint hasil simulasi
sp = openmc.StatePoint('statepoint.20.h5')

# Mengambil perhitungan tally yang diinginkan
# Nama Tally = blanket_fluid_mat_(n,Xt)
# Jenis Tally = (n,Xt) atau Produksi Tritium
tally = sp.get_tally(name='blanket_fluid_mat_(n,Xt)', scores=['(n,Xt)'])

# Menampilkan hasil perhitungan tally
print(f"Hasil perhitungan tally : {tally.mean[0][0][0]} +- {tally.std_dev[0][0][0]}")

Hasil perhitungan tally : 1.0157208215812368 +- 0.003447210961987757
```

**Gambar 3.8** Pembacaan *tally* produksi tritium menggunakan OpenMC

### III.5.1 Geometri

OpenMC menggunakan teknik *Constructive Solid Geometry* (CSG) untuk membangun berbagai model 3D kompleks dalam ruang 3D. Pada model CSG, semua objek dideskripsikan sebagai gabungan dan/atau perpotongan dari *half-spaces* yang terbuat dari berbagai permukaan. Setiap permukaan membagi ruang 3D menjadi dua *half-spaces*. Permukaan dapat didefinisikan sebagai kumpulan titik yang mengikuti persamaan  $f(x, y, z) = 0$  dengan  $f(x, y, z)$  adalah fungsi dari permukaan. Koordinat dengan nilai  $f(x, y, z) < 0$  disebut sebagai *half-space* negatif dan koordinat dengan nilai  $f(x, y, z) > 0$  disebut *half-space* positif [31]. Tabel 3.4 menunjukkan tipe permukaan yang terdapat pada program OpenMC.

**Tabel 3.4** Jenis permukaan yang terdapat pada program OpenMC [31]

Permukaan	Pengenal	Persamaan	Parameter
Bidang tegak lurus sumbu x	x-plane	$x - x_0 = 0$	$x_0$
Bidang tegak lurus sumbu y	y-plane	$y - y_0 = 0$	$y_0$
Bidang tegak lurus sumbu z	z-plane	$z - z_0 = 0$	$z_0$
Bidang sembarang	plane	$Ax + By + Cz = D$	$A \ B \ C \ D$
Silinder tak terbatas sejajar dengan sumbu x	x-cylinder	$(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2$	$y_0 \ z_0 \ R$
Silinder tak terbatas sejajar dengan sumbu y	y-cylinder	$(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2$	$x_0 \ z_0 \ R$
Silinder tak terbatas sejajar dengan sumbu z	z-cylinder	$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2$	$x_0 \ y_0 \ R$
Bola	sphere	$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2$	$x_0 \ y_0 \ z_0 \ R$
Kerucut sejajar dengan sumbu x	x-cone	$(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2(x - x_0)^2$	$x_0 \ y_0 \ z_0 \ R^2$
Kerucut sejajar dengan sumbu y	y-cone	$(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2(y - y_0)^2$	$x_0 \ y_0 \ z_0 \ R^2$

**Tabel 3.4** Jenis permukaan yang terdapat pada program OpenMC (lanjutan) [31]

Permukaan	Pengenal	Persamaan	Parameter
Kerucut sejajar dengan sumbu z	z-cone	$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2(z - z_0)^2$	$x_0 \ y_0 \ z_0 \ R^2$
Permukaan kuadrat umum	quadric	$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fxz + Gx + Hy + Jz + K$	$A \ B \ C \ D \ E \ F \ G \ H \ J \ K$

Pada OpenMC, setiap permukaan yang didefinisikan akan diberi sebuah identitas berupa bilangan bulat. Identitas tersebut dapat digunakan untuk membuat sel dari *half-space* yang ingin digunakan dengan cara menuliskan identitas dan tanda positif/negatif. Sel adalah kombinasi *half-space* yang dibuat dari berbagai permukaan untuk mendefinisikan daerah dalam ruang 3D dengan komposisi material, semesta ataupun kisi seragam. Daerah dapat didefinisikan menggunakan operator gabungan, potongan, dan komplemen.

Selain menggunakan CSG, OpenMC juga mendukung penggunaan geometri *Computer Aided Design* (CAD). Untuk memanfaatkan fitur geometri CAD diperlukan alat tambahan berupa program *Direct Accelerated Geometry Monte Carlo* (DAGMC) yang berfungsi untuk merepresentasikan geometri CAD dalam permukaan berformat *mesh* [31].

### III.5.2 Tally

OpenMC memungkinkan perhitungan parameter fisik menggunakan *Tally*. Filosofi *tally* pada OpenMC adalah untuk menyediakan fleksibilitas maksimum ketika memilih *tally* bersamaan dengan dukungan skalabilitas [31]. Berbagai *tally* pada simulasi Monte Carlo dapat dituliskan menggunakan persamaan berikut:

$$X = \underbrace{\int dr \int d\Omega \int dE}_{\text{filter}} \underbrace{f(r, \Omega, E)}_{\text{skor}} \phi(r, \Omega, E) \quad (3.10)$$

Untuk menggunakan tally diperlukan informasi filter untuk menentukan daerah ruang fase dan rentang energi dan fungsi skor yang akan digunakan. OpenMC menyediakan fungsi – fungsi berikut yang dapat digunakan sebagai skor *tally*: fluks, laju reaksi total, laju reaksi hamburan, produksi neutron dari hamburan, momen hamburan tinggi, laju reaksi (n,xn), laju reaksi tangkapan, laju reaksi fisi, laju produksi neutron dari fisi, dan arus permukaan. Variabel – variabel berikut dapat digunakan sebagai filter *tally*: semesta, material, sel, sel kelahiran (partikel), permukaan, *mesh*, energi sebelum tumbukan, energi setelah tumbukan, sudut polar, sudut azimuth, dan kosinus perubahan sudut akibat hamburan. Nilai *tally* OpenMC secara bawaan memiliki tingkat kepercayaan 95% [31].

### **III.6 Modul Python Paramak, Paramak Neutronics, dan Neutronics Material Maker**

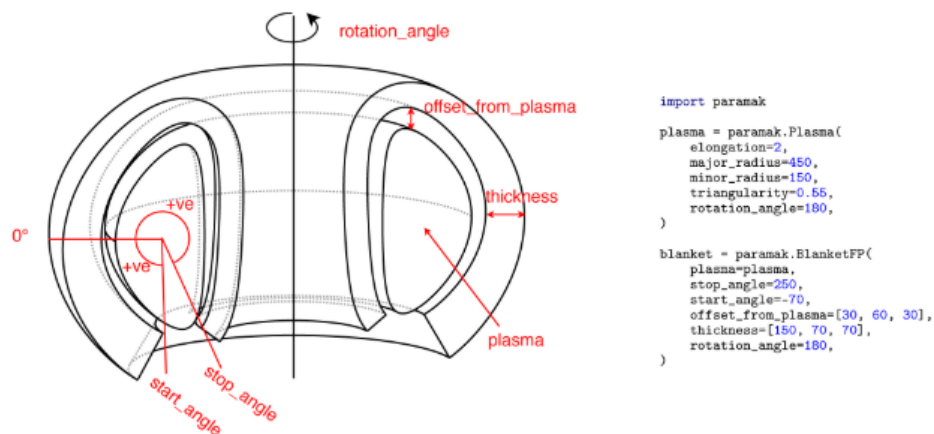
#### **III.6.1 Paramak**

Paramak merupakan modul python sumber terbuka untuk membuat model 3D CAD reaktor fusi nuklir. Modul ini pertama kali dikembangkan oleh Jonathan Shimwell. Perkembangan kode Paramak telah di ulas secara internal oleh tim Riset Insinyur Perangkat Lunak *United Kingdom Atomic Energy Authority* (UKAEA) dan oleh perusahaan eksternal PullRequest [32], [33]. Tujuan Paramak adalah untuk menyediakan geometri untuk studi parameter reaktor fusi nuklir. Geometri dari Paramak dapat digunakan untuk pembelajaran dan rekayasa neutronik karena dokumen CAD dapat secara otomatis dikonversi menjadi model neutronik DAGMC.

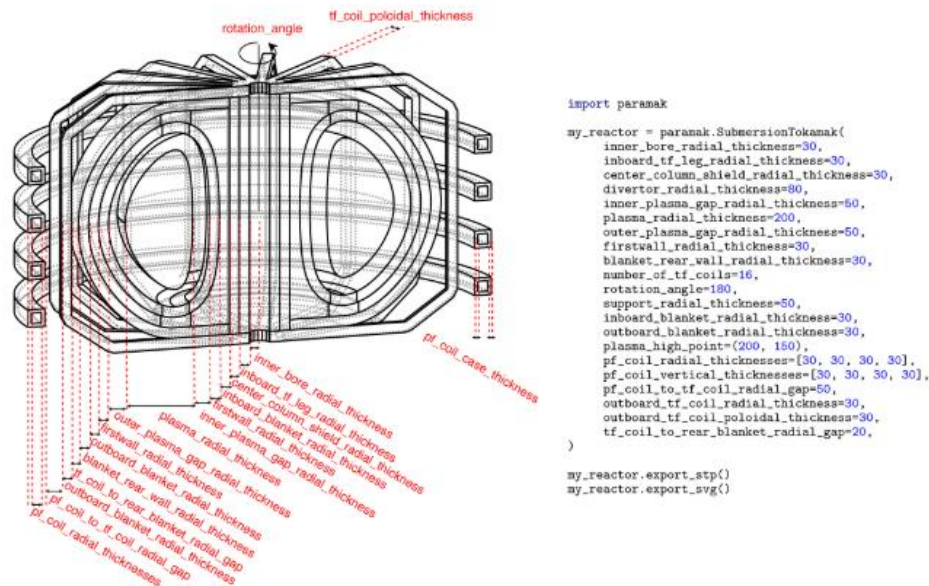
Secara umum Paramak bekerja dengan cara membaca argumen masukan dan membentuk objek 3D. Paramak terdiri dari tiga kelas utama: *Shapes*, *Components*, dan *Reactors*. Kelas *Shapes* merupakan kelas dengan paling sederhana yang tersedia dalam Parmak. Untuk membuat *Shapes* dibutuhkan koordinat titik – titik 2D yang akan dihubungkan menggunakan garis lurus, kurva *spline*, dan/atau lingkaran. *Shapes* dapat diubah menjadi volume 3D dengan

memanfaatkan operasi tolak, sapu, dan rotasi. *Shapes* juga dapat mengoperasikan operasi boolean seperti gabungan dan potongan [32], [33].

Kelas *Components* mewarisi fitur dari kelas *Shapes* untuk membuat volume 3D dari komponen – komponen yang terdapat pada reaktor fusi nuklir. *Components* memiliki 34 jenis komponen yang dapat digunakan. Kombinasi dari berbagai komponen dapat digunakan untuk menyusun volume 3D suatu reaktor fusi nuklir. Untuk membangun volume 3D reaktor fusi nuklir tanpa menyusun satu persatu komponennya, dapat digunakan kelas *Reactors*. Masukan yang diperlukan untuk membangun sebuah volume 3D reaktor fusi nuklir berbeda – beda dan tergantung pada jenis reaktor yang akan dibuat. Jenis reaktor fusi nuklir yang dapat dibuat menggunakan kelas *Reactors* adalah: *Ball Reactor*, *Segmented Blanket Ball Reactor*, *Single Null Ball Reactor*, *Sibmersion Tokamak*, *Single Null Sibmersion Tokamak*, *Center Column Study Reactor*, *EU Demo Reactor*, *ITER Reactor*, *SPARC Reactor* [32], [33]. Gambar 3.9 dan 3.10 menunjukkan penggunaan kelas *Components* dan *Reactors*.



**Gambar 3.9** Contoh pembuatan geometri Plasma dan *Blanket* menggunakan kelas *Components* [32]



**Gambar 3.10** Contoh pembuatan geometri *Submersion Tokamak* menggunakan kelas *Reactors* [32]

Volume geometri 3D CAD reaktor fusi nuklir yang sudah siap disimpan dalam berkas *dagmc.h5m* beserta berkas *geometry.xml* yang memberitahu program OpenMC bahwa terdapat berkas *dagmc.h5m* yang siap digunakan. Berkas *dagmc.h5m* merupakan hasil konversi geometri 3D CAD menjadi bentuk *mesh* yang dapat digunakan untuk simulasi neutronik menggunakan OpenMC.

### III.6.2 Paramak Neutronics

Paramak Neutronics atau sekarang disebut OpenMC-DAGMC-Wrapper merupakan modul python untuk melakukan simulasi neutronik menggunakan OpenMC dan DAGMC. Modul ini awalnya merupakan salah satu kelas dari modul python Paramak yang memisahkan diri. Paramak Neutronics membuat berkas masukan *settings.xml* dan *tallies.xml* kemudian menggunakan berkas *dagmc.h5m*, *geometry.xml*, dan *materials.xml* dari OpenMC maupun modul python pihak ketiga untuk membuat model simulasi neutronik yang lengkap. Hasil simulasi model neutronik dapat disimpan dalam format berkas h5 dan dapat dikonversi menjadi berkas vtk, png, dan JSON [34].



Berkas yang dibuat oleh Paramak Neutronics terdiri dari *settings.xml* yang berisikan diantaranya data sumber, jenis partikel, dan jenis permasalahan yang akan diselesaikan dan *tallies.xml* yang berisikan filter dan skor *tally* yang digunakan.

### III.6.3 Neutronics Material Maker

Neutronics Material Maker adalah modul python yang pertama kali dibuat oleh Johnatan Shimwell untuk membuat berbagai material di berbagai kode simulasi Monte Carlo seperti OpenMC, Serpent, MCNP, Shift dan Fispact [35]. Modul ini menyediakan berbagai pustaka material neutronik dan memungkinkan pengguna untuk menambahkan material secara manual. Massa jenis material yang dibuat menggunakan Neutronics Material Maker dapat divariasikan berdasarkan suhu, tekanan, dan pengayaan isotop tertentu [35]. Berkas yang dapat dibuat menggunakan Neutronics Material Maker adalah *materials.xml* yang mengandung data material nuklida pada simulasi.

## **BAB IV**

### **PELAKSANAAN PENELITIAN**

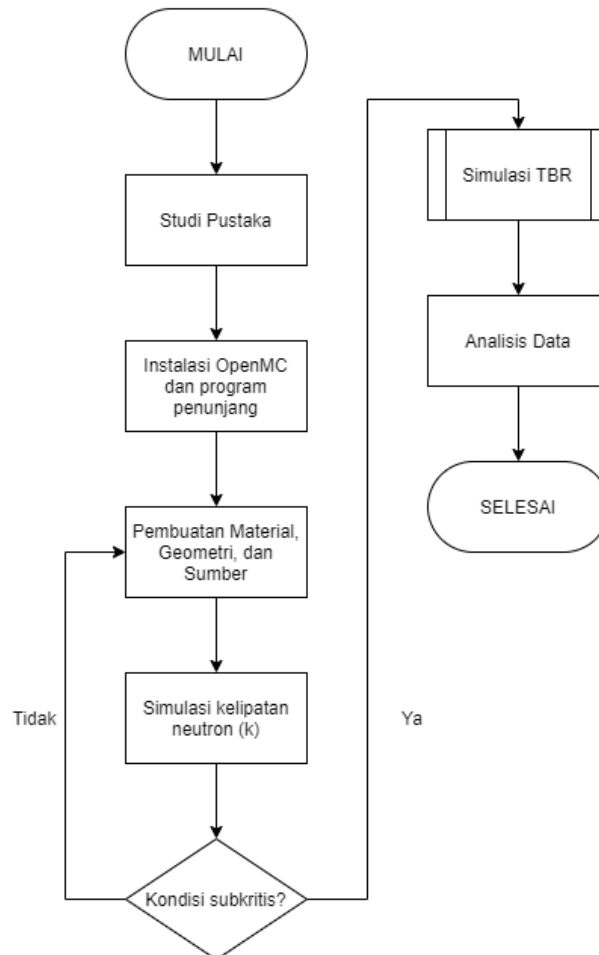
#### **IV.1 Alat dan Bahan Penelitian**

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Laptop pribadi dengan spesifikasi prosesor 8 CPU (2 GHz) dan 8 GB RAM.
2. Layanan komputasi awan dengan spesifikasi 40 vCPU dan 40 GB RAM.
3. Program OpenMC versi 0.13.0.dev untuk melakukan simulasi neutronik.
4. Data tampang lintang nuklir ENDF/B-VIII.0 dalam format HDF5.
5. Modul dan pustaka untuk bahasa pemrograman python 3.8 yang terdiri dari :
  - a. OpenMC versi 0.13.0.dev
  - b. Paramak versi 0.2.10
  - c. Paramak Neutronics versi 0.0.7
  - d. Neutronics Material Maker versi 0.3.7
  - e. Numpy versi 1.21.1
  - f. Scipy versi 1.5.3
  - g. Pandas versi 1.2.3
  - h. h5py versi 3.2.1
  - i. matplotlib versi 3.4.1
  - j. uncertainties versi 3.1.5
  - k. lxml versi 4.6.3
  - l. Cython versi 0.29.22
  - m. Vtk versi 9.0.3
  - n. Pytest versi 6.2.3
  - o. Jinja2 versi 3.0.1
  - p. Tables versi 3.6.1
  - q. Ipkernel
  - r. Cadquery2
  - s. Jupyter lab

## IV.2 Tata Laksana Penelitian

Berikut adalah diagram alir penelitian secara umum:

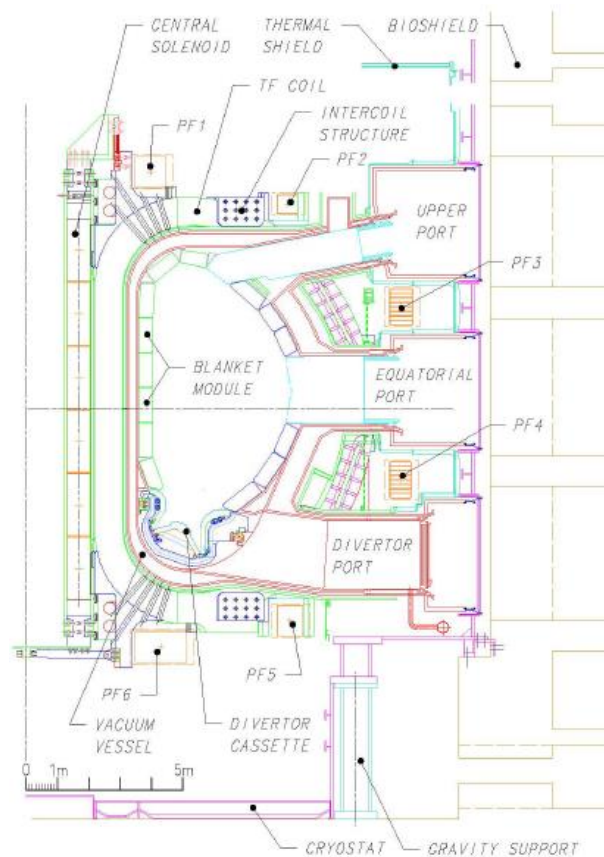


**Gambar 4.1** Diagram alir penelitian secara umum

### IV.2.1 Pembuatan Model Neutronik Reaktor ITER

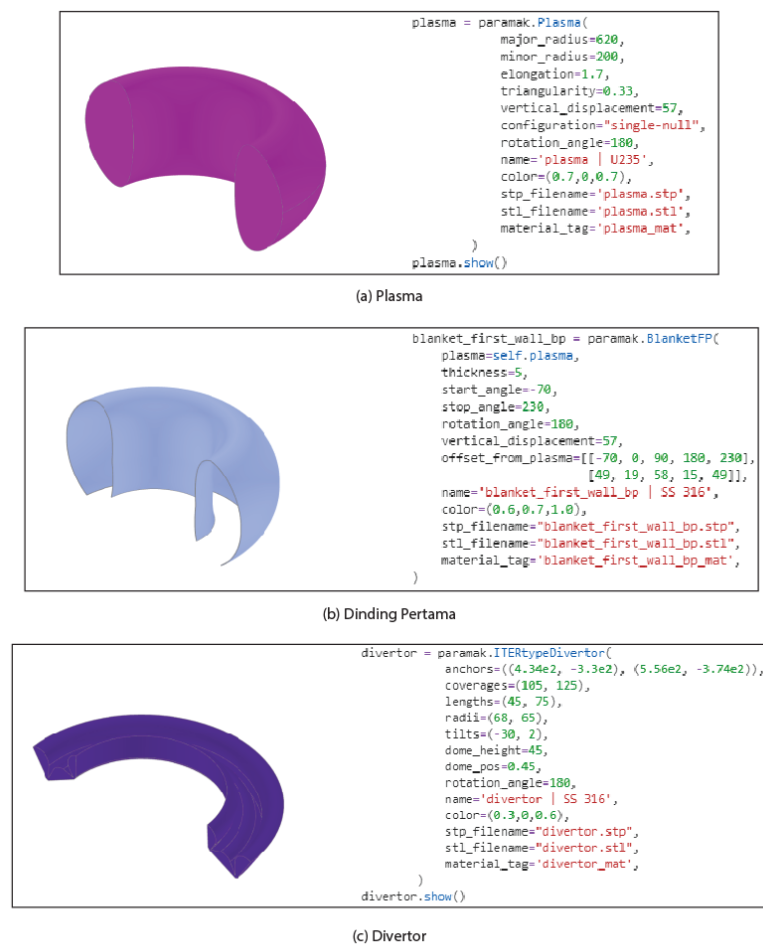
Model reaktor ITER yang akan disimulasikan dalam penelitian ini merupakan modifikasi dari model reaktor ITER yang disediakan dari modul python Paramak yang mengacu pada dokumen *ITER Project: International Cooperation and Energy Investment* [10] dan *ITER EDA Documentation Series No. 24* [26]. Pada model reaktor ITER asli yang tersedia terdapat komponen – komponen berikut: plasma, *blanket*, *divertor*, bejana vakum, sistem magnet, *port*,

*cryostat*, pendukung gravitasi, dan perisai biologis seperti yang tertera pada Gambar 4.2. Modifikasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dengan menghilangkan komponen sistem magnet, *port*, *cryostat*, pendukung gravitasi, dan perisai biologis serta menyederhanakan kumpulan modul *blanket* menjadi satu sistem *blanket* yang terdiri dari dinding pertama, fluida *blanket* pembiak depan, fluida *blanket* pembiak utama, moderator, dan reflektor. Komponen sistem magnet, *port*, *cryostat*, pendukung gravitasi, dan perisai biologis dihilangkan karena tidak mempengaruhi kondisi neutronik pada reaktor ITER. Penyederhanaan modul *blanket* menjadi sistem *blanket* dilakukan untuk mempermudah pemodelan ITER sembari mendapatkan hasil simulasi semirip mungkin dengan kondisi asli. Komponen yang menjadi fokus pada penelitian ini adalah sistem *blanket*.



**Gambar 4.2** Tampang Lintang ITER [26]

Penyusunan berkas *materials.xml* dapat dilakukan menggunakan modul python Neutronic Material Maker sedangkan penyusunan berkas *geometry.xml* dan *dagmc.h5m* dilakukan menggunakan modul python Paramak. Komponen reaktor ITER disusun satu persatu menggunakan kelas *Shapes* dan *Components*. Penelitian ini akan menggunakan kelas *Components BlanketFP*, *ITERtypeDivertor*, dan *Plasma* untuk membuat geometri *blanket*, *divertor*, dan plasma. Untuk membuat geometri bejana vakum akan digunakan kelas *Shapes RotateMixedShape* dan *RotateSplineShape*. Gambar 4.3 menunjukkan penggunaan kelas *Components BlanketFP*, *ITERtypeDivertor*, dan *Plasma* pada penelitian ini.



**Gambar 4.3** Pembuatan komponen (a) plasma, (b) dinding pertama, dan (c) *divertor* reaktor ITER

Pembuatan berkas *tally.xml* dan *settings.xml* dapat dilakukan menggunakan modul python Paramak Neutronic. *Tally* yang akan digunakan adalah *tally* produksi tritium dari reaksi tangkapan (n, Xt) dengan X adalah *wild card* untuk seluruh reaksi tangkapan neutron yang memiliki hasil reaksi berupa tritium. Satuan *tally* (n, Xt) adalah tritium per partikel sumber dengan partikel sumber yang digunakan adalah neutron. Sumber neutron yang digunakan berupa sumber titik yang tersebar di dalam sel plasma dengan energi tunggal 14,1 MeV. Plasma dimodelkan sebagai sel dengan material  $^{235}\text{U}$  berdensitas  $10^{-6}$  g/cc dengan tujuan sebagai sumber neutron. Neutron dari plasma dapat dianggap sebagai tritium yang digunakan sebagai bahan bakar reaksi fusi karena tiap reaksi fusi D-T akan menghasilkan sebuah neutron dan partikel  $\alpha$ . Simulasi kritikalitas akan dilakukan sebanyak 10 *batch* dengan tiap *batch* akan menghasilkan dua generasi neutron dengan tiap generasi akan menyimulasikan 600000 neutron. Untuk memastikan bahwa simulasi telah konvergen, akan diplot nilai kritikalitas pada tiap generasi neutron. Simulasi TBR akan dilakukan sebanyak 20 *batch* dengan tiap *batch* akan menyimulasikan 5000 neutron.

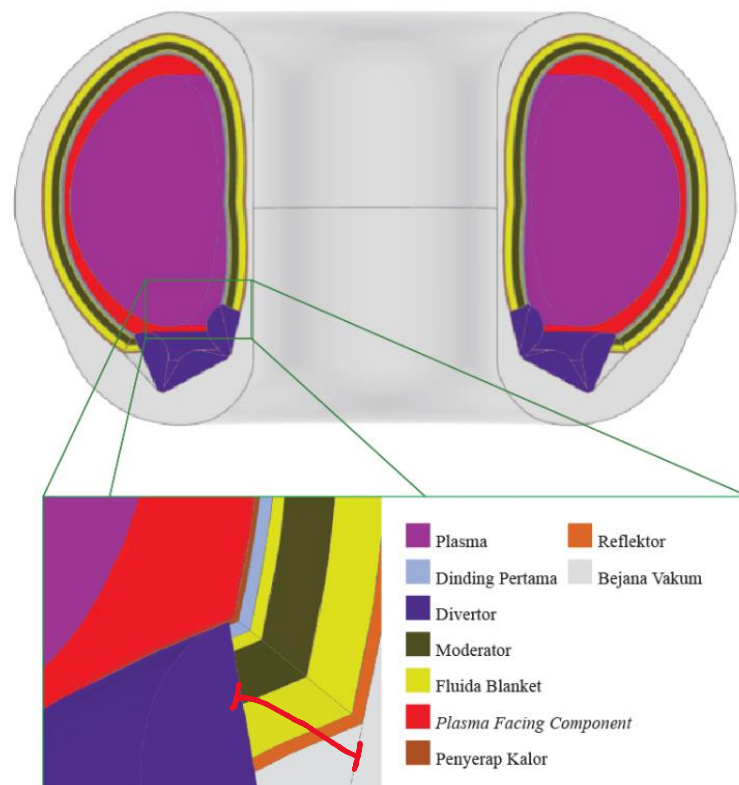
Model reaktor ITER yang telah dimodifikasi mengandung komponen – komponen berikut: plasma, *divertor*, bejana vakum, dinding pertama, fluida *blanket* pembiak depan, fluida *blanket* pembiak utama, moderator, dan reflektor. Tabel 4.1 dan Gambar 4.3 menunjukkan spesifikasi reaktor ITER dan tampang lintang reaktor ITER yang digunakan pada penelitian ini.

**Tabel 4.1** Spesifikasi reaktor ITER

Parameter	Nilai		
<b>Plasma Facing Component</b>			
Ketebalan	1 cm		
Material	Be	1,848 g/cc	
<b>Penyerap Kalor</b>			
Ketebalan	2 cm		
Material	CuCrZr	8,9 g/cc	
<b>Back Plate Dinding Pertama</b>			
Ketebalan	4 cm		
Material	SS 316 L	8 g/cc	
<b>Fluida Blanket Pembiak Depan</b>			
Ketebalan	5 cm		
Material	LiF	1200 K	2,635 g/cc
Pengayaan <sup>6</sup> Li	[10% , 30%, 50%, 70%, 90%]		
<b>Fluida Blanket Pembiak Utama</b>			
Ketebalan	[3 cm, 9 cm, 15 cm, 21 cm, 27 cm, 30 cm]		
Material	LiF	1200 K	2,635 g/cc
Pengayaan <sup>6</sup> Li	[10% , 30%, 50%, 70%, 90%]		
<b>Moderator dan Pengganda Neutron</b>			
Ketebalan	[3 cm, 9 cm, 15 cm, 21 cm, 27 cm]		
Material Moderator	Grafit	600 K	2,23 g/cc
Material Pengganda Neutron	Pb Alam		11,35 g/cc
Rasio Volume Pengganda Neutron : Moderator	[10% , 30%, 50%, 70%, 90%]	[3,142 g/cc; 4,966 g/cc; 6,790 g/cc; 8,614 g/cc; 10,438 g/cc]	
<b>Reflektor</b>			
Ketebalan	15 cm		
Material	Grafit	2,23 g/cc	

**Tabel 4.1** Spesifikasi reaktor ITER (lanjutan)

<b><i>Divertor</i></b>		
Material	SS 316 L	8 g/cc
<b>Bejana Vakum</b>		
Material	SS 316 L	8 g/cc
<b>Plasma</b>		
Material	$^{235}\text{U}$	$10^{-6}$ g/cc
Radius mayor	620 cm	
Radius minor	200 cm	
Konfigurasi	<i>Single Null</i>	
<i>Elongation</i>	1.7	
<i>Triangularity</i>	0,33	

**Gambar 4.4** Tampang Lintang Reaktor ITER

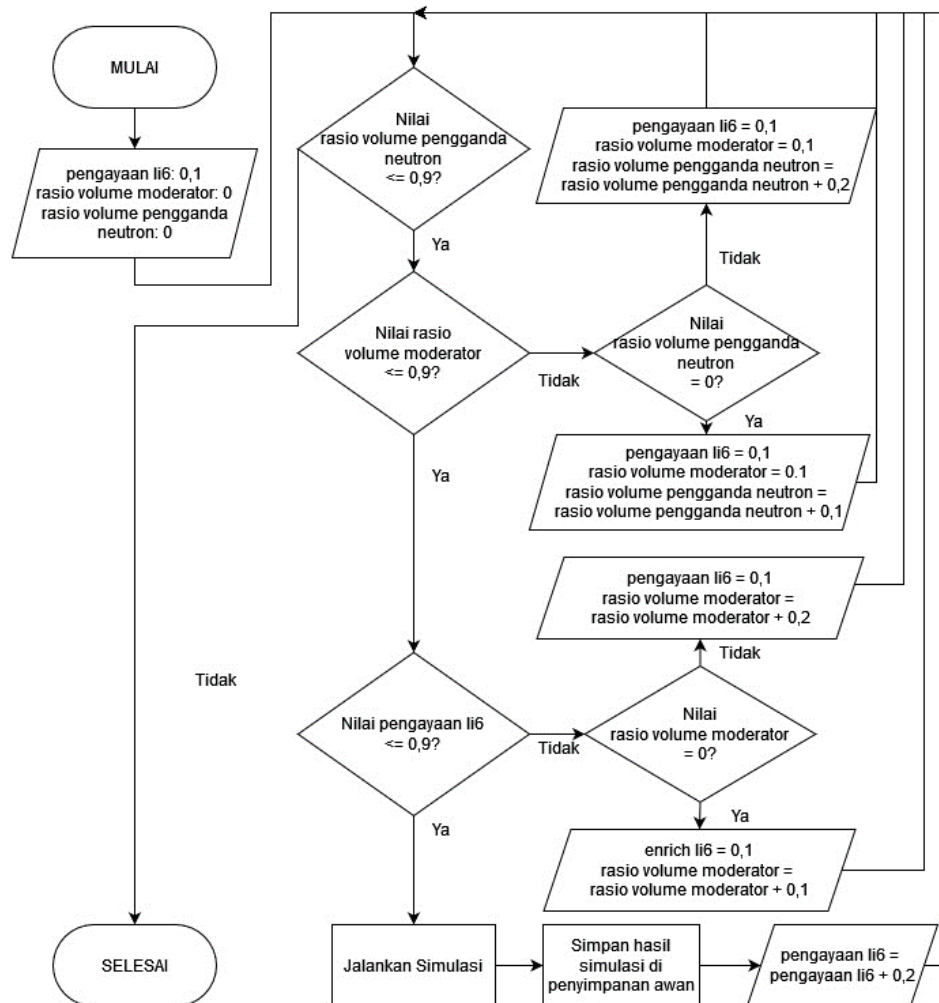


#### IV.2.2 Simulasi TBR

Terdapat tiga variabel bebas yang dioptimalkan pada penelitian ini, yaitu: pengayaan  $^6\text{Li}$ , rasio volume moderator, dan rasio volume pengganda neutron. Pengayaan  $^6\text{Li}$  menunjukkan rasio atomis antara isotop  $^6\text{Li}$  dengan  $^7\text{Li}$  yang terdapat pada fluida *blanket* pembiak. Rasio volume moderator menunjukkan perbandingan volume antara komponen moderator dengan fluida *blanket* pembiak. Kemudian, rasio volume pengganda neutron menunjukkan perbandingan volume komponen moderator dengan komponen pengganda neutron. Tabel 4.2 menunjukkan variabel bebas yang akan diujikan. Gambar 4.4 menampilkan diagram alir simulasi TBR.

**Tabel 4.2** Rentang nilai variabel bebas

<b>Variabel Bebas</b>	<b>Rentang Nilai</b>
Pengayaan $^6\text{Li}$	0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9
Rasio Volume Moderator	0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9
Rasio Volume Pengganda Neutron	0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9



**Gambar 4.5** Diagram alir simulasi TBR

### IV.3 Rencana Analisis Hasil

Berkas hasil simulasi kritikalitas dan TBR secara berurutan adalah berkas *statepoint.h5* dan *result.json*. Berkas *statepoint.h5* dapat diakses menggunakan program OpenMC untuk diambil nilai kritikalitas beserta standar deviasinya sedangkan berkas *result.json* dapat diakses menggunakan modul python untuk diambil nilai TBR beserta standar deviasinya. Gambar 3.7 dan Gambar 4.6 secara berurutan menunjukkan pembacaan berkas *statepoint.h5* dan *result.json*. Hasil simulasi TBR akan dikumpulkan dalam satu tabel dan dilakukan penyajian hasil penelitian dalam bentuk grafik. Akan dicari pengaruh dari pengayaan  ${}^6\text{Li}$  pada

fluida *blanket* pembiak, moderator grafit, dan pengganda neutron timbal alam terhadap nilai TBR. Kriteria desain *blanket* pembiak ITER yang optimal adalah memiliki pengayaan  ${}^6\text{Li}$  terendah dan nilai TBR lebih dari satu.

```
"blanket_fluid_mat_(n,Xt)": {           # Nama_cell(Skor Tally)
  "events per source particle": {       # Satuan tally
    "result": 0.8680110754248446,      # Hasil perhitungan tally
    "std. dev.": 0.0031391419992027074 # Standar deviasi tally
  }
},
```

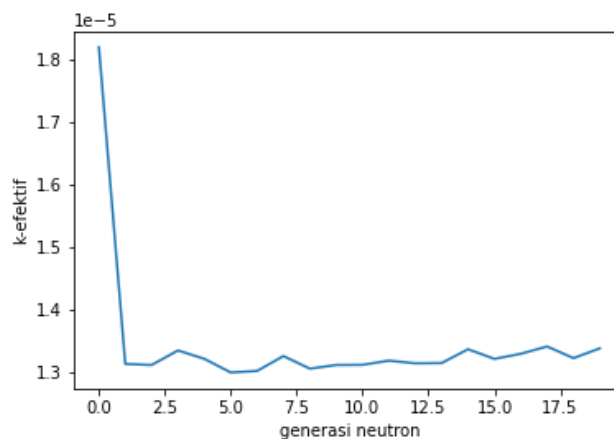
**Gambar 4.6** Pembacaan berkas *statepoint.h5*

## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### V.1 Kritikalitas Reaktor

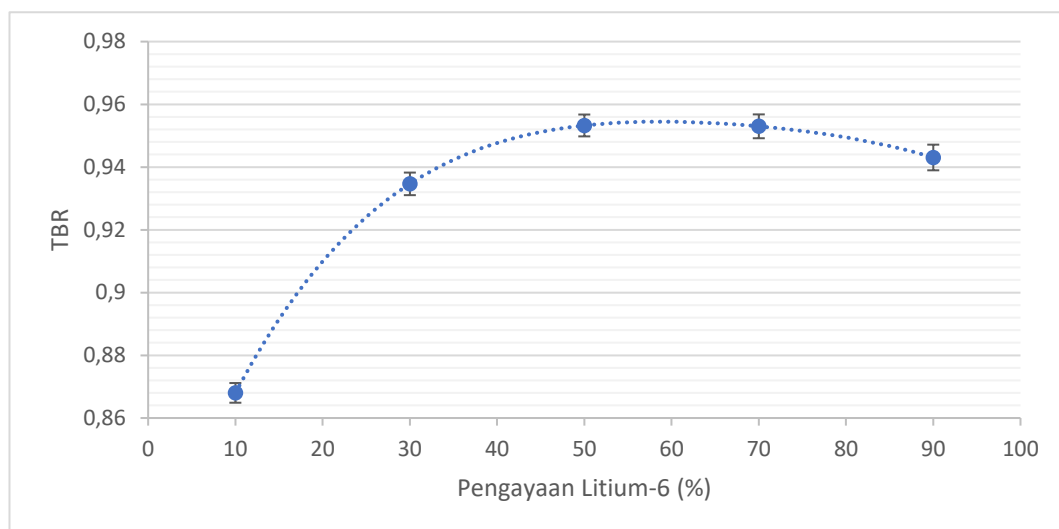
Perhitungan kritikalitas ITER dilakukan pada konfigurasi *blanket* pengayaan  ${}^6\text{Li}$  10%, rasio volume moderator 0, rasio volume pengganda neutron 0. Didapat nilai kritikalitas ( $k_{eff}$ ) reaktor sebesar 0,0000135 dengan standar deviasi sebesar 0,0000003 pada tingkat kepercayaan 95%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi reaktor ITER adalah sub kritis sehingga reaksi fisi berantai tidak dapat terjadi. Hasil plot nilai kritikalitas reaktor ITER pada tiap generasi neutron ditampilkan pada Gambar 5.1. Berdasarkan hasil plot tersebut, didapat bahwa hasil simulasi kritikalitas telah konvergen.



**Gambar 5.1** Plot nilai kritikalitas ITER tiap generasi neutron.

## V.2 Desain *Blanket* Pembiak ITER

Hasil simulasi TBR akan digunakan untuk menentukan desain *blanket* pembiak ITER yang optimal. Desain *blanket* pembiak ITER yang optimal memiliki nilai TBR lebih dari satu dengan pengayaan  $^6\text{Li}$  serendah mungkin. Seluruh hasil simulasi TBR menggunakan OpenMC memiliki tingkat kepercayaan sebesar 95%. Desain *blanket* pembiak ITER pertama terdiri dari komponen fluida *blanket* pembiak saja. Variabel bebas yang akan di optimasi adalah pengayaan  $^6\text{Li}$  pada fluida *blanket* pembiak. Pengayaan  $^6\text{Li}$  divariasikan pada nilai 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%. Gambar 5.2 menunjukkan hasil simulasi untuk desain *blanket* pembiak ITER pertama.

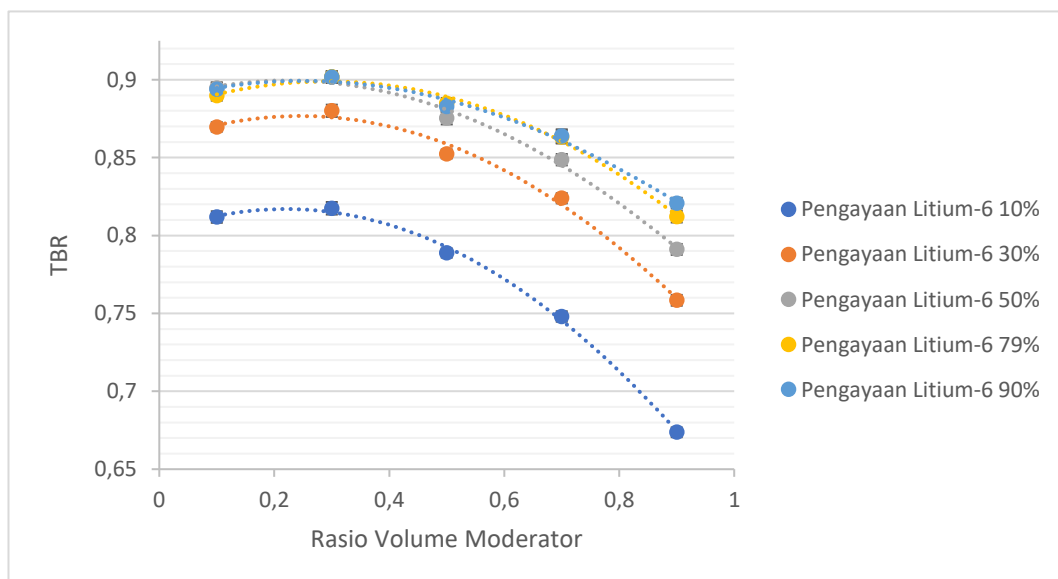


**Gambar 5.2** Hasil simulasi desain *blanket* pembiak ITER pertama

Hasil simulasi TBR untuk desain *blanket* pembiak ITER pertama menunjukkan bahwa pengaruh pengayaan  $^6\text{Li}$  terhadap nilai TBR bersifat non linear dengan nilai TBR tertinggi dengan nilai  $0,953263 \pm 0,003482$  didapat pada pengayaan  $^6\text{Li}$  sebesar 50%. Sebelum mencapai nilai pengayaan  $^6\text{Li}$  50%, terjadi peningkatan nilai TBR karena masih terdapat  $^7\text{Li}$  yang mampu bertindak sebagai moderator untuk menurunkan energi neutron dari plasma D-T hingga menjadi neutron termal. Seiring dengan peningkatan pengayaan  $^6\text{Li}$ , populasi  $^7\text{Li}$  pada

fluida *blanket* pembiak mengalami penurunan. Penurunan nilai TBR setelah pengayaan  ${}^6\text{Li}$  50% terjadi karena  ${}^7\text{Li}$  berkurang seiring dengan peningkatan pengayaan  ${}^6\text{Li}$ . Penurunan  ${}^7\text{Li}$  mengakibatkan efek moderasi neutron berkurang sehingga neutron cepat pada fluida *blanket* pembiak lebih dominan daripada neutron termal. Tampang lintang reaksi produksi tritium  ${}^6\text{Li}$  untuk neutron cepat jauh lebih kecil daripada untuk neutron termal yang berakibat pada penurunan nilai TBR. Desain *blanket* pembiak ITER pertama belum memenuhi kriteria desain *blanket* pembiak ITER yang optimal. Untuk mendapatkan desain *blanket* pembiak ITER yang optimal dibutuhkan komponen yang mampu menurunkan energi neutron. Pada optimasi desain *blanket* pembiak ITER berikutnya dilakukan penambahan moderator grafit yang berfungsi untuk menurunkan energi neutron.

Desain *blanket* kedua pada penelitian ini menambahkan moderator grafit di antara fluida *blanket* pembiak depan dan fluida *blanket* pembiak utama. Variabel bebas yang di optimasi pada desain *blanket* pembiak ITER kedua adalah pengayaan  ${}^6\text{Li}$  dan Rasio Volume Moderator. Rasio Volume moderator divariasikan pada nilai 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; dan 0,9. Gambar 5.3 menunjukkan hasil simulasi untuk *blanket* dengan moderator tanpa pengganda neutron.



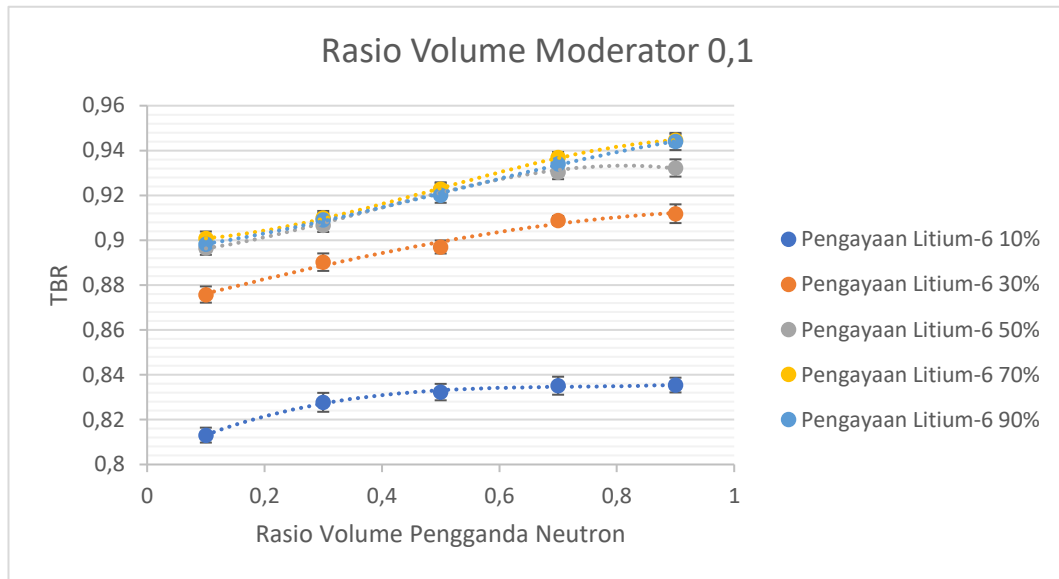
**Gambar 5.3** Hasil simulasi desain *blanket* pembiak ITER kedua

Hasil simulasi TBR desain *blanket* pembiak ITER kedua menunjukkan terjadi penurunan nilai TBR setelah ditambah komponen moderator grafit dan terjadi peningkatan nilai TBR seiring dengan peningkatan pengayaan  $^6\text{Li}$ . Didapat nilai TBR tertinggi pada rasio volume moderator sebesar 0,3 pada pengayaan  $^6\text{Li}$  70% dengan nilai TBR sebesar  $0,901755 \pm 0,003576$ . Penurunan nilai TBR berkorelasi dengan peningkatan rasio volume moderator sedangkan pengayaan  $^6\text{Li}$  berkorelasi dengan peningkatan nilai TBR.

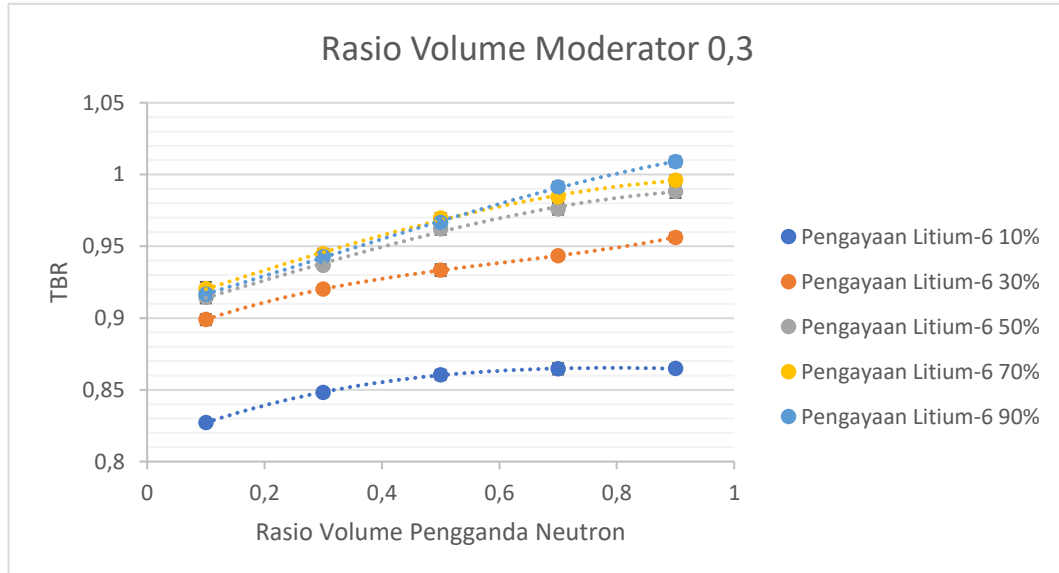
Sebelum mencapai nilai rasio volume moderator 0,3 terjadi peningkatan nilai TBR seiring dengan peningkatan rasio volume moderator. Persentase peningkatan nilai TBR sebelum nilai rasio volume moderator 0,3 adalah 0,97%, sangat kecil bila dibandingkan dengan persentase penurunan nilai TBR setelah nilai rasio volume moderator 0,3 dengan nilai 13,07%. Penyebab turunnya nilai TBR setelah dilakukan penambahan moderator grafit adalah fluks neutron termal yang masuk ke dalam sel fluida *blanket* pembiak mengalami penurunan yang drastis akibat efek moderasi neutron yang berlebih oleh moderator grafit dan  $^7\text{Li}$ .

Desain *blanket* pembiak ITER kedua belum memenuhi kriteria desain *blanket* pembiak ITER yang optimal, alih – alih mengalami penurunan nilai TBR yang cukup drastis. Diperlukan peningkatan fluks neutron pada komponen fluida *blanket* pembiak untuk meningkatkan nilai TBR. Pada optimasi desain *blanket* pembiak ITER berikutnya ditambahkan pengganda neutron timbal alam pada komponen moderator grafit.

Desain *blanket* pembiak ITER ketiga pada penelitian ini menambahkan pengganda neutron timbal alam pada komponen moderator grafit. Variabel bebas yang merepresentasikan pengganda neutron timbal alam adalah rasio volume pengganda neutron divariasikan pada nilai 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; dan 0,9. Variabel bebas yang akan di optimasi pada desain *blanket* pembiak ITER ketiga terdiri dari pengayaan  $^6\text{Li}$ , rasio volume moderator, dan rasio volume pengganda neutron. Gambar 5.4 – 5.8 menunjukkan hasil simulasi untuk *blanket* ITER dengan penambahan moderator dan pengganda neutron.

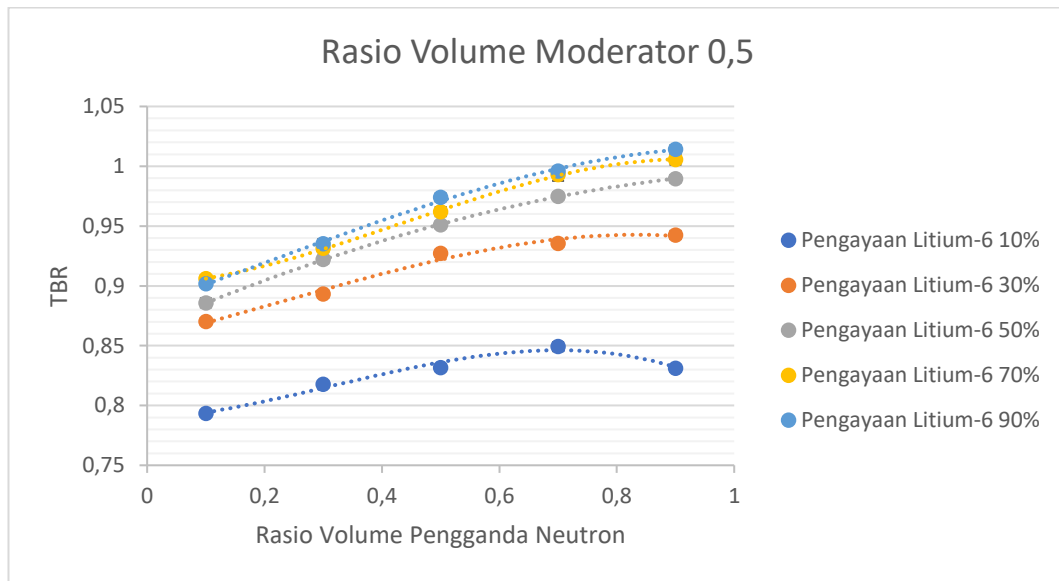


**Gambar 5.4** Hasil Simulasi desain *blanket* pembiak ITER ketiga pada rasio volume moderator bernilai 0,1

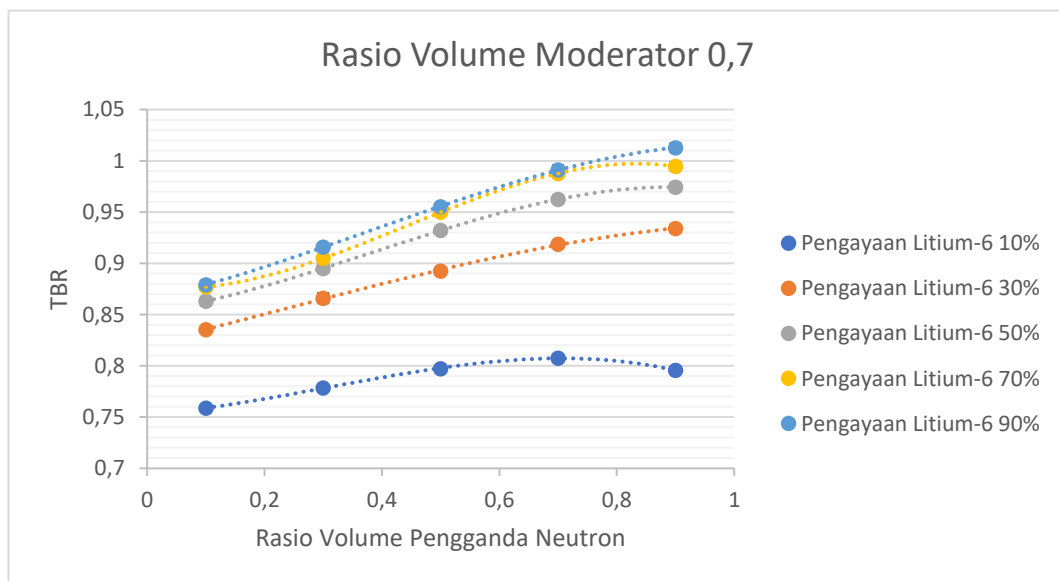


**Gambar 5.5** Hasil Simulasi desain *blanket* pembiak ITER ketiga pada rasio volume moderator bernilai 0,3

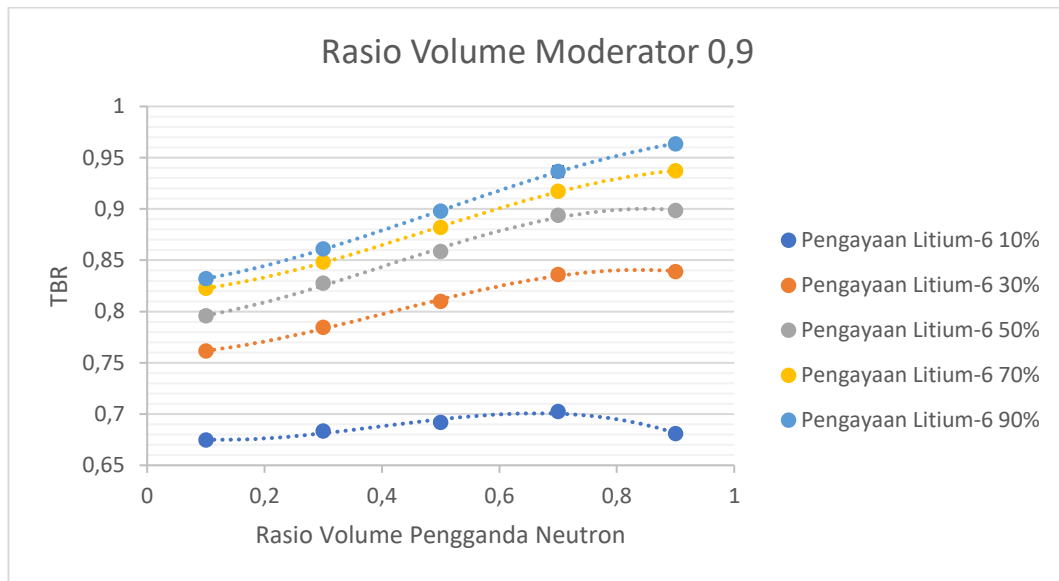




**Gambar 5.6** Hasil Simulasi desain *blanket* pembiak ITER ketiga pada rasio volume moderator bernilai 0,5



**Gambar 5.7** Hasil Simulasi desain *blanket* pembiak ITER ketiga pada rasio volume moderator bernilai 0,7



**Gambar 5.8** Hasil Simulasi untuk *blanket* ITER dengan penambahan moderator dan pengganda neutron

Penambahan pengganda neutron pada komponen moderator meningkatkan nilai TBR. Desain *blanket* pembiak ITER yang memenuhi kriteria desain *blanket* pembiak ITER optimal ditampilkan pada Tabel 5.1.

**Tabel 5.1** Hasil simulasi desain *blanket* reaktor ITER dengan nilai TBR lebih dari satu

Pengayaan ${}^6\text{Li}$ (%)	Rasio Volume Moderator	Rasio Volume Pengganda Neutron	TBR
90	0,5	0,9	$1,014225 \pm 0,003413$
90	0,7	0,9	$1,012842 \pm 0,004387$
90	0,3	0,9	$1,008993 \pm 0,003505$
70	0,5	0,9	$1,005552 \pm 0,004294$

Seluruh desain *blanket* dengan nilai TBR lebih dari satu memiliki rasio volume pengganda neutron 0,9 , pengayaan  ${}^6\text{Li}$  70% - 90%, rasio volume moderator 0,3 – 0,7. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengaruh pengganda neutron dan pengayaan  ${}^6\text{Li}$  pada desain *blanket* pembiak ITER ketiga adalah

berbanding lurus dengan nilai TBR sedangkan pengaruh moderator bersifat non linear karena penambahan moderator hingga nilai tertentu mampu meningkatkan nilai TBR akan tetapi mengalami penurunan nilai TBR setelahnya.

Peningkatan nilai TBR seiring dengan peningkatan pengganda neutron sesuai dengan data tampang lintang timbal alam pada Tabel 3.2. Neutron dari plasma D-T dengan energi 14,1 MeV memiliki energi yang cukup untuk melakukan reaksi pengganda neutron dengan timbal alam. Peningkatan jumlah neutron yang masuk ke dalam sel fluida *blanket* pembiak mampu meningkatkan nilai TBR. Energi neutron yang dihasilkan dari reaksi pengganda neutron berada pada nilai 3,5 MeV. Neutron tersebut termoderasi oleh grafit di moderator dan litium florida di fluida *blanket* pembiak sebelum melakukan reaksi produksi tritium dengan  ${}^6\text{Li}$ .

Peningkatan pengayaan  ${}^6\text{Li}$  mampu meningkatkan nilai TBR karena neutron cepat dari plasma D-T dan reaksi pengganda neutron telah termoderasi menjadi neutron termal. Nilai tampang lintang produksi tritium  ${}^6\text{Li}$  bernilai 100 kali lebih besar untuk neutron termal daripada untuk neutron cepat. Peningkatan nilai TBR akibat peningkatan pengayaan  ${}^6\text{Li}$  sudah sesuai dengan grafik tampang lintang pada Gambar 3.1.

Rasio volume moderator mempengaruhi jumlah dan energi neutron yang masuk ke dalam sel fluida *blanket* pembiak utama. Nilai rasio volume moderator yang terlalu kecil akan meminimalkan efek moderasi neutron sehingga neutron yang masuk ke dalam sel fluida *blanket* pembiak utama masih tergolong neutron cepat. Padahal seperti yang sudah ditulis di atas, nilai tampang lintang produksi tritium  ${}^6\text{Li}$  lebih tinggi untuk neutron termal. Bila nilai rasio volume moderator terlalu tinggi, efek moderasi neutron menjadi lebih dominan daripada efek penggandaan neutron. Neutron dari plasma D-T yang awalnya berenergi 14,1 MeV dapat termoderasi hingga energi neutron berada di bawah nilai batas ambang reaksi (n, 2n) timbal alam. Akibat dari moderasi berlebih ini adalah reaksi penggandaan neutron timbal alam dan nilai TBR mengalami penurunan. Mengacu

pada Tabel 5.1, nilai rasio volume moderator yang optimal untuk moderator grafit dengan pengganda neutron timbal alam adalah 0,5.

**Tabel 5.2** Perbandingan Rasio Volume Moderator Terhadap Volume Fluida *Blanket* Pembiak Utama

<b>Desain <i>Blanket</i> Optimal ke-</b>	<b>Rasio Volume Moderator</b>	<b>Rasio Volume Pengganda Neutron</b>	<b>Rasio Volume Moderator terhadap Volume Fluida <i>Blanket Pembiak</i> Utama</b>
2	0,3	-	0,3
3	0,5	0,9	0,05

Pada desain *blanket* pembiak ITER kedua nilai rasio volume moderator yang optimal adalah 0,3 sedangkan pada desain *blanket* pembiak ITER ketiga nilai rasio volume moderator yang optimal adalah 0,5 dengan 0,9 volume moderator adalah pengganda neutron timbal alam. Dengan mengecualikan pengganda neutron pada moderator, persentase volume moderator terhadap volume fluida *blanket* pembiak utama pada desain *blanket* pembiak ketiga adalah 0,05 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.2. Penurunan volume moderator terjadi karena neutron dengan energi 14,1 MeV dari plasma D-T berinteraksi dengan timbal alam menghasilkan dua neutron dengan energi rerata 3,5 MeV. Neutron dari hasil interaksi penggandaan neutron memiliki energi yang lebih kecil daripada neutron plasma D-T. Adanya penurunan energi neutron mengakibatkan nilai rasio volume moderator optimal menurun antara desain *blanket* pembiak ITER kedua dengan desain *blanket* pembiak ITER ketiga.

Berdasarkan hasil penelitian desain *blanket* pembiak ITER ketiga didapat desain *blanket* pembiak ITER yang optimal dengan konfigurasi pengayaan  $^6\text{Li}$ , rasio volume moderator, dan rasio volume pengganda neutron masing – masing sebesar 70%, 0,5, dan 0,9.

## **BAB VI**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **VI.1 Kesimpulan**

- a. Pengaruh pengayaan  ${}^6\text{Li}$  terhadap nilai TBR pada desain *blanket* pembiak ITER pertama, kedua, dan ketiga secara berurutan adalah bersifat non linear, berbanding lurus, dan berbanding lurus.
- b. Pengaruh moderator grafit terhadap nilai TBR pada desain *blanket* pembiak ITER kedua dan ketiga secara berurutan adalah berbanding terbalik dan bersifat non linear dengan nilai optimal sebesar 0,5.
- c. Pengaruh pengganda neutron timbal alam terhadap nilai TBR pada desain *blanket* pembiak ITER ketiga adalah berbanding lurus.
- d. Desain *blanket* pembiak ITER yang optimal adalah untuk konfigurasi pengayaan  ${}^6\text{Li}$ , rasio volume moderator, dan rasio volume pengganda neutron masing – masing sebesar 70%, 0,5, dan 0,9 dengan nilai TBR sebesar  $1,005552 \pm 0,004294$ .

#### **VI.2 Saran**

- a. Perlu dilakukan analisis neutronik dengan memperhitungkan faktor kebocoran, pembakaran, dan penyimpanan tritium. Faktor - faktor tersebut diperlukan untuk mendapatkan hasil analisis neutronik yang lebih akurat.
- b. Peningkatan detail geometri *blanket* reaktor ITER seperti pemisahan sistem *blanket* menjadi modul – modul *blanket* perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil analisis neutronik maupun termal yang lebih akurat. Modul python paramak sudah disediakan beberapa alat untuk melakukan segmentasi *blanket*.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] The World Bank. *Population growth*. Diakses dari <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW>, 12 Februari 2021.
- [2] The World Bank. *Population, total*. Diakses dari <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>, 12 Februari 2021.
- [3] H. Ritchie. *Energy Mix*. Diakses dari <https://ourworldindata.org/energy-mix>, 12 Februari 2021.
- [4] H. Ritchie. *How long before we run out of fossil fuels?*. Diakses dari <https://ourworldindata.org/how-long-before-we-run-out-of-fossil-fuels>, 22 Juli 2021.
- [5] H. Ritchie dan M. Roser. *Energy Production and Consumption*. Diakses dari <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>, 22 Juli 2021.
- [6] United Nations. *The Sustainable Development Goals Report 2020*. New York, United Nations, 2020.
- [7] U.S. Environmental Protection Agency. *Overview of Greenhouse Gases*. Diakses dari <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>, 22 Juli 2021.
- [8] U.S. Environmental Protection Agency. *Particulate Matter (PM) Basics*. Diakses dari <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>, 22 Juli 2021.
- [9] T. Tanabe. *Tritium: Fuel of fusion reactors*. Tokyo, Springer, 2016.
- [10] S. Orlandi. "ITER Project: International Cooperation and Energy Investment" *Springer Proceedings in Physics*, vol. 243, pp. 169–191, 2020.
- [11] M. A. Abdou, "TRITIUM BREEDING IN FUSION REACTORS" *International Conference of Nuclear Data for Science and Technology* Illinois, 1982.
- [12] ITER. *WHAT WILL ITER DO ?*. Diakses dari <https://www.iter.org/sci/Goals>, 22 Juli 2021.
- [13] S. WIJAYA. "Optimasi Desain Geometri Blanket Reaktor Fusi Untuk Pembiakan Tritium Menggunakan Metode Monte Carlo" Universitas Gadjah Mada, 2015.
- [14] M. Ali. "Optimasi Fraksi Berilium Pada Desain Blanket Reaktor Fusi Untuk Mencapai Pembiakan Tritium Menggunakan Metode Monte Carlo" Universitas Gadjah Mada, 2017.

- [15] K. Maki. "Energy multiplication in high tritium breeding ratio blanket with front breeder zone for fusion reactors," *Journal Nuclear Science and Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 72–80, 1988.
- [16] N. Zandi, H. Sadeghi, M. Habibi, I. Jalali, dan M. Zare. "Blanket Simulation and Tritium Breeding Ratio Calculation for ITER Reactor" *Journal Fusion Energy*, vol. 34, no. 6, pp. 1365–1368, 2015.
- [17] B. Soltani dan M. Habibi. "Tritium Breeding Ratio Calculation for ITER Tokamak Using Developed Helium Cooled Pebble Bed Blanket (HCPB)" *Journal Fusion Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 604–607, 2015.
- [18] I. R. Maymunah, Z. Suud, dan P. I. Yazid. "Optimization of tritium breeding and shielding analysis to plasma in ITER fusion reactor," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1677, 2015.
- [19] F. A. Hernández dan P. Pereslavitsev. "First principles review of options for tritium breeder and neutron multiplier materials for breeding blankets in fusion reactors" *Fusion Engineering and Design*, vol. 137, pp. 243–256, 2018.
- [20] N. Tsoulfanidis dan S. Landsberger. *Measurement detection of radiation*. 4th ed. Boca Raton, CRC Press, 2015.
- [21] D. Weis. "Lead Isotopes," in *Encyclopedia of Geochemistry: A Comprehensive Reference Source on the Chemistry of the Earth*, Springer International Publishing, pp. 1–5, 2017.
- [22] Japan Atomic Energy Agency. *JENDL-4.0*. Diakses dari <https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html>, 30 Agustus 2021.
- [23] E. Morse. *Nuclear Fusion*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2018.
- [24] M. Kikuchi, K. Lackner, dan M. Quang. *Fusion Physics*. Vienna, IAEA, 2012.
- [25] D. J. Campbell. "The first fusion reactor: ITER" *Europhys. News*, vol. 47, no. 5–6, pp. 28–31, 2016.
- [26] (IAEA) The International Atomic Energy Agency. *ITER EDA DOCUMENTATION SERIES No. 24*, First Edit. Vienna: The International Atomic Energy Agency, 2002.
- [27] J. Heirbaut. *How to Line a Thermonuclear Reactor*. Diakses dari <https://www.sciencemag.org/news/2012/08/how-line-thermonuclear-reactor>, 22 Juli 2021.
- [28] G. F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement Third Edition*. John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [29] E. M. A. Hussein. *Radiation Mechanics: Principles and Practice*, Amsterdam, Elsevier Ltd, 2007.
- [30] P. K. Romano, N. E. Horelik, B. R. Herman, A. G. Nelson, B. Forget, dan

- K. Smith. “OpenMC: A state-of-the-art Monte Carlo code for research and development” *Annals of Nuclear Energy*, vol. 82, pp. 90–97, 2015.
- [31] Massachusetts Institute of Technology and OpenMC contributors. *The OpenMC Monte Carlo Code*. Diakses dari <https://docs.openmc.org/en/stable/index.html>, 03 September 2021.
- [32] J. Shimwell *et al.* “The Paramak: Automated parametric geometry construction for fusion reactor designs” *F1000Research*, vol. 10, 2021.
- [33] UKAEA and Paramak Contributors. *Paramak - Paramak 1.0 documentation*. Diakses dari <https://paramak.readthedocs.io/en/main/index.html>, 05 September 2021.
- [34] Paramak-neutronics contributors. *openmc-dagmc-wrapper - Paramak-neutronics 1.0 documentation*. Diakses dari <https://paramak-neutronics.readthedocs.io/en/latest/>, 05 September 2021.
- [35] neutronics-material-maker contributors. *Neutronics Material Maker - NeutronicsMaterialMaker 1.0 documentation*. Diakses dari <https://neutronics-material-maker.readthedocs.io/en/latest/>, 05 September 2021.



## LAMPIRAN A

### LISTING PROGRAM OpenMC

```

import argparse
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

import openmc
import paramak
import paramak_neutronics as nparamak
import neutronics_material_maker as nmm

def create_materials(enrich_Li, neutron_multi):
    """Set the materials required to run TBR calculation

    Parameters:
    -----
    enrichment_Li : int, required
        Value of Li-6 enrichment in the Breeder Blanket.
        Example
            enrichment_Li=10 mean 10% enrichment of Li-6
    neutron_multi : float, optional
        Percentage of neutron multiplier (Natural Pb) in Moderator.
        Calculated by volume.
        Default = 0 (%).
        Example
            neutron_multi=0.5 mean 50% of moderator volume is Natural Pb.
    """
    # Plasma Material
    plasma_mat = nmm.Material(
        name='U235',
        isotopes={'U235':1},
        density=1e-6,
        percent_type='ao',
        density_unit='g/cm3'
    )
    plasma_mat.name = 'plasma_mat'
    plasma_mat.openmc_material

    # Plasma Facing Material
    blanket_pfc_mat = nmm.Material.from_library('Beryllium')
    blanket_pfc_mat.name = 'blanket_pfc_mat'

```

```

blanket_pfc_mat.openmc_material

# Cooper Alloy Heat Sink
blanket_heat_sink_mat = nmm.Material.from_library('CuCrZr')
blanket_heat_sink_mat.name = 'blanket_heat_sink_mat'
blanket_heat_sink_mat.openmc_material

# Blanket Fluid Material
blanket_fluid_mat = nmm.Material.from_library(name='Lithium Fluoride',
                                              enrichment=enrich_Li,
                                              enrichment_target='Li6',
                                              enrichment_type='ao',
                                              temperature=1200,
                                              temperature_to_neutronics_code=True,
                                              )
blanket_fluid_mat.name = 'blanket_fluid_mat'
blanket_fluid_mat.openmc_material

# Neutron Multiplier and Moderator Material
neutron_multi_mat = nmm.Material.from_library(name='Lead')
neutron_multi_mat.name = 'neutron_multi_mat'

mod_mat = nmm.Material(
    name='Graphite',
    elements={'C':1},
    density=2.23,
    percent_type='ao',
    density_unit='g/cm3'
)
mod_mat.name = 'mod_mat'

blanket_mod_mat = nmm.Material.from_mixture(materials=[neutron_multi_mat, mo
d_mat],
                                              fracs=[neutron_multi, (1-neutron_multi)],
                                              percent_type='vo',
                                              temperature=600,
                                              temperature_to_neutronics_code=True,)
blanket_mod_mat.name = 'blanket_mod_mat'
blanket_mod_mat.openmc_material

# Reflector Materials
blanket_ref_mat = nmm.Material(
    name='Graphite',
    elements={'C':1},
    density=2.23,

```

```

        percent_type='ao',
        density_unit='g/cm3'
    )
    blanket_ref_mat.name = 'blanket_ref_mat'
    blanket_ref_mat.openmc_material

    # First Wall Material
    blanket_first_wall_bp_mat = nmm.Material.from_library('Steel, Stainless 316'
)
    blanket_first_wall_bp_mat.name = 'blanket_first_wall_bp_mat'
    blanket_first_wall_bp_mat.openmc_material

    # Divertor Material
    divertor_mat = nmm.Material.from_library('Steel, Stainless 316')
    divertor_mat.name = 'divertor_mat'
    divertor_mat.openmc_material

    # Vaccum Vessel Material
    vac_vessel_mat = nmm.Material.from_library('Steel, Stainless 316')
    vac_vessel_mat.name = 'vac_vessel_mat'
    vac_vessel_mat.openmc_material

    materials = [plasma_mat,
                  blanket_fluid_mat,
                  blanket_mod_mat,
                  blanket_ref_mat,
                  blanket_first_wall_bp_mat,
                  blanket_pfc_mat,
                  blanket_heat_sink_mat,
                  divertor_mat,
                  vac_vessel_mat]

    return materials

# Make a ITER Tokamak Geometry Class
class ITERTokamak_mod(paramak.Reactor):
    """Create ITER geometry without TF Coils and PF Coils. This class modified
    from ITERTokamak function from paramak package"""

    def __init__(
        self,
        rotation_angle: float = 360.,
        blanket_mod_ratio: float = 0.,
    ):
        super().__init__([])

```

```

self.rotation_angle = rotation_angle
self.blanket_mod_ratio = blanket_mod_ratio

def create_vessel_components(self) -> list:
    """Creates a 3d solids for each vessel component.

    Returns:
        A list of CadQuery solids: A list of 3D solid volumes
    """
    offset_r = [59, 29, 68, 25, 59]

    # Blanket first wall back-plate
    blanket_first_wall_bp = paramak.BlanketFP(
        plasma=self.plasma,
        thickness=5,
        start_angle=-70,
        stop_angle=230,
        rotation_angle=self.rotation_angle,
        vertical_displacement=self.plasma.vertical_displacement,
        offset_from_plasma=[[-70, 0, 90, 180, 230], [49, 19, 58, 15, 49]],
        name='blanket_first_wall_bp | SS 316',
        color=(0.6,0.7,1.0),
        stp_filename="blanket_first_wall_bp.stp",
        stl_filename="blanket_first_wall_bp.stl",
        material_tag='blanket_first_wall_bp_mat',
    )

    # Blanket plasma facing material
    blanket_pfc = paramak.BlanketFP(
        plasma=self.plasma,
        thickness=1,
        start_angle=-70,
        stop_angle=230,
        rotation_angle=self.rotation_angle,
        vertical_displacement=self.plasma.vertical_displacement,
        offset_from_plasma=[[-70, 0, 90, 180, 230], [46, 16, 55, 12, 46]],
        name='blanket_pfc | Beryllium',
        color=(1,0,0),
        stp_filename="blanket_pfc.stp",
        stl_filename="blanket_pfc.stl",
        material_tag='blanket_pfc_mat',
    )

    # Blanket heat sink

```

```

blanket_heat_sink = paramak.BlanketFP(
    plasma=self.plasma,
    thickness=2,
    start_angle=-70,
    stop_angle=230,
    rotation_angle=self.rotation_angle,
    vertical_displacement=self.plasma.vertical_displacement,
    offset_from_plasma=[[-70, 0, 90, 180, 230], [47, 17, 56, 13, 47]],
    name='blanket_heat_sink | CuCrZr',
    color=(0.7,0.3,0),
    stp_filename="blanket_heat_sink.stp",
    stl_filename="blanket_heat_sink.stl",
    material_tag='blanket_heat_sink_mat',
)

# Front Breeder Zone
front_breeder = paramak.BlanketFP(
    plasma=self.plasma,
    thickness=5,
    start_angle=-70,
    stop_angle=230,
    rotation_angle=self.rotation_angle,
    vertical_displacement=self.plasma.vertical_displacement,
    offset_from_plasma=[[-70, 0, 90, 180, 230], [54, 24, 63, 20, 54]],
    name='front_breeder | LiF',
    color=(0.9,0.9,0),
    stp_filename="front_breeder.stp",
    stl_filename="front_breeder.stl",
    material_tag='blanket_fluid_mat',
)

# Blanket reflector
blanket_ref = paramak.BlanketFP(
    plasma=self.plasma,
    thickness=5,
    start_angle=-70,
    stop_angle=230,
    rotation_angle=self.rotation_angle,
    vertical_displacement=self.plasma.vertical_displacement,
    offset_from_plasma=[[-70, 0, 90, 180, 230], [99, 69, 108, 65, 99]],
    name='blanket_ref | Graphite',
    color=(0.9,0.4,0),
    stp_filename="blanket_ref.stp",
    stl_filename="blanket_ref.stl",
    material_tag='blanket_ref_mat',
)

```

```

)

# SN Divertor
divertor = paramak.ITERtypeDivertor(
    anchors=((4.34e2, -3.3e2), (5.56e2, -3.74e2)),
    coverages=(105, 125),
    lengths=(45, 75),
    radii=(68, 65), # radii=(68, 65),
    tilts=(-43, 9), # tilts=(-30, 2),
    dome_height=45,
    dome_pos=0.45,
    rotation_angle=self.rotation_angle,
    name='divertor | SS 316',
    color=(0.3,0,0.6),
    stp_filename="divertor.stp",
    stl_filename="divertor.stl",
    material_tag='divertor_mat',
)

# Vacuum vessel
divertor.points # trigger the building of the points for divertor
# the inner part of the vacuum vessel is computed from the outer
# points of the blanket and the divertor
vac_vessel_inner = paramak.RotateMixedShape(
    points=blanket_ref.outer_points + divertor.casing_points,
    rotation_angle=self.rotation_angle,
)

vac_vessel = paramak.RotateSplineShape(
    points=[
        (327.77, 36.5026668124882),
        (327.77, 73.37741270075162),
        (327.77, 108.31180820215741),
        (327.77, 143.2462037035632),
        (327.77, 178.18059920496898),
        (327.77, 213.11499470637477),
        (327.77, 248.04939020778068),
        (327.77, 282.98378570918646),
        (327.77, 317.9181812105922),
        (328.6121587814181, 368.23899806938385),
        (336.18303032328333, 422.4306297110355),
        (350.4835654579176, 457.5437492206628),
        (371.95910957013655, 492.47041663587777),
        (404.3208742000702, 522.0151685493631),
        (439.6516080621078, 544.4559826211985),
    ]
)

```

(474.98234192414554, 556.3610266211815),  
 (510.2245275810152, 564.0927634387052),  
 (545.6438096482208, 565.1200145185009),  
 (565.832800426528, 563.1864687746993),

(580.9745435102584, 559.4390362932862),  
 (616.3052773722961, 548.4109567158157),  
 (651.6360112343338, 533.224020531035),  
 (686.9667450963714, 515.3041214328789),  
 (722.297478958409, 492.23516177329117),  
 (757.6282128204466, 466.8689289401416),  
 (792.9589466824843, 437.10619055069265),  
 (825.7660566972336, 403.7167485984509),  
 (853.525919017406, 369.42176700251196),  
 (877.9209495411939, 333.90960594986575),  
 (898.9511482685972, 300.5186330502012),  
 (916.616515199616, 265.2383422522439),  
 (932.5994662324425, 230.72194441870647),  
 (946.0587934179808, 193.1122328856627),  
 (956.1532888071343, 156.87835598377137),  
 (962.8829523999035, 118.10702768634405),  
 (967.9302000944803, 80.39197257542594),  
 (968.7714080435763, 38.24754419835381),

(968.7714080435763, 25.77097437642317),  
 (964.5653682980957, -1.670738783514139),  
 (956.9944967562304, -29.93883090626548),  
 (956.1532888071343, -34.59540221679083),  
 (946.0587934179808, -71.15339839027786),  
 (931.7582582833464, -104.25874435511184),  
 (914.9340993014238, -139.91477225259314),  
 (898.9511482685972, -174.48160361826422),  
 (883.8094051848669, -213.64300914878197),  
 (867.8264541520404, -248.21908241802464),  
 (851.0022951701176, -284.2078188440911),  
 (834.1781361881949, -319.9470238737184),  
 (818.1951851553683, -359.0978394110024),  
 (800.5298182243495, -391.2313539579658),  
 (776.1347877005617, -427.87174371008393),  
 (744.1688856349085, -460.45530873911446),  
 (708.8381517728709, -490.0255912806248),  
 (673.5074179108332, -512.7040543014494),  
 (638.1766840487956, -528.371873327094),  
 (602.8459501867579, -539.0490644239661),  
 (567.5152163247203, -546.1219131278361),

```

        (532.1844824626827, -548.9566889080664),
        (496.85374860064496, -547.7514325554811),
        (461.52301473860734, -541.3971156414638),
        (426.1922808765697, -527.596464992453),
        (390.8615470145321, -501.2796363633471),
        (360.57806084707124, -468.0473902249954),
        (340.389070068764, -431.4355817359209),
        (329.87397070506233, -399.072068113844),
        (327.770950832322, -357.4796824533661),
        (327.770950832322, -311.73270913617455),
        (327.770950832322, -276.79831363476876),
        (327.770950832322, -241.86391813336297),
        (327.770950832322, -206.92952263195718),
        (327.770950832322, -171.99512713055117),
        (327.770950832322, -137.06073162914538),
        (327.770950832322, -102.12633612773948),
        (327.770950832322, -67.19194062633369),

    ],
    cut=[vac_vessel_inner], # to make a hollow shape
    rotation_angle=self.rotation_angle,
    name='vac_vessel | SS 316',
    color=(0.9,0.9,0.9),
    stp_filename='vac_vessel.stp',
    stl_filename='vac_vessel.stl',
    material_tag='vac_vessel_mat',
)

if self.blanket_mod_ratio == 0:

    # Blanket Fluid
    blanket_fluid = paramak.BlanketFP(
        plasma=self.plasma,
        thickness=40,
        start_angle=-70,
        stop_angle=230,
        rotation_angle=self.rotation_angle,
        vertical_displacement=self.plasma.vertical_displacement,
        offset_from_plasma=[[-70, 0, 90, 180, 230], offset_r],
        name='blanket_fluid | LIF',
        color=(0.9,0.9,0),
        stp_filename="blanket_fluid.stp",
        stl_filename="blanket_fluid.stl",
        material_tag='blanket_fluid_mat',
    )

```



```

        return [divertor, blanket_fluid, front_breeder, blanket_ref, blanket_
_heat_sink, blanket_pfc, blanket_first_wall_bp, vac_vessel, vac_vessel_inner]

```

```

# Blanket Fluid

```

```

blanket_fluid = paramak.BlanketFP(
    plasma=self.plasma,
    thickness=40*(1-self.blanket_mod_ratio),
    start_angle=-70,
    stop_angle=230,
    rotation_angle=self.rotation_angle,
    vertical_displacement=self.plasma.vertical_displacement,
    offset_from_plasma=[[-
70, 0, 90, 180, 230], [x+40*(self.blanket_mod_ratio) for x in offset_r]],
    name='blanket_fluid | LiF',
    color=(0.9,0.9,0),
    stp_filename="blanket_fluid.stp",
    stl_filename="blanket_fluid.stl",
    material_tag='blanket_fluid_mat',
)

```

```

# Blanket Moderator

```

```

blanket_mod = paramak.BlanketFP(
    plasma=self.plasma,
    thickness=40*(self.blanket_mod_ratio),
    start_angle=-70,
    stop_angle=230,
    rotation_angle=self.rotation_angle,
    vertical_displacement=self.plasma.vertical_displacement,
    offset_from_plasma=[[-70, 0, 90, 180, 230], offset_r],
    name='blanket_mod | Graphite (+ Pb)',
    color=(0.3,0.3,0),
    stp_filename="blanket_mod.stp",
    stl_filename="blanket_mod.stl",
    material_tag='blanket_mod_mat',
)

```

```

        return [divertor, blanket_fluid, front_breeder, blanket_ref, blanket_mod
, blanket_heat_sink, blanket_pfc, blanket_first_wall_bp, vac_vessel, vac_vessel_
inner]

```

```

def create_plasma(self) -> list:
    """Creates a 3d solids for the plasma.

```

```

Returns:
    A list of CadQuery solids: A list of 3D solid volumes
    """

self.plasma = paramak.Plasma(
    major_radius=6.2e2,
    minor_radius=200,
    elongation=1.7,
    triangularity=0.33,
    vertical_displacement=5.7e1,
    configuration="single-null",
    rotation_angle=self.rotation_angle,
    name='plasma | U235',
    color=(0.7,0,0.7),
    stp_filename='plasma.stp',
    stl_filename='plasma.stl',
    material_tag='plasma_mat',
)

return [self.plasma]

def create_solids(self):
    """Creates a 3d solids for each component.

    Returns:
        A list of CadQuery solids: A list of 3D solid volumes
        """

    plasma = self.create_plasma()
    vessel = self.create_vessel_components()

    shapes_and_components = plasma + vessel[:-1]
    self.shapes_and_components = shapes_and_components

    return shapes_and_components

def create_source():
    # initialises a new source object
    source = openmc.Source()

    # the distribution of radius
    radius = openmc.stats.Discrete([420, 500, 560, 600, 620, 640, 680, 740, 820]
    , [0.2, 0.5, 1, 1, 1, 1, 1, 0.5, 0.2])

    # the distribution of source z values

```



```

        cell_tallies=['(n,Xt)'],
        photon_transport=False,
    )

    geometry.export_h5m(include_plasma=True)

    return my_model

geometry = ITERTokamak_mod(360, mod_ratio)
my_model = nparamak.NeutronicsModel(
    geometry = geometry,
    source = create_source(),
    simulation_batches = batch,
    simulation_particles_per_batch = part_batch,
    materials = {'plasma_mat':materials[0],
                 'divertor_mat':materials[7],
                 'blanket_fluid_mat':materials[1],
                 'blanket_ref_mat':materials[3],
                 'blanket_mod_mat':materials[2],
                 'blanket_pfc_mat':materials[5],
                 'blanket_heat_sink_mat':materials[6],
                 'blanket_first_wall_bp_mat':materials[4],
                 'vac_vessel_mat':materials[8]},
    cell_tallies=['(n,Xt)'],
    photon_transport=False,
)

geometry.export_h5m(include_plasma=True)

return my_model

if __name__ == '__main__':
    # Set up command-line arguments for generating and running the model
    parser = argparse.ArgumentParser()
    parser.add_argument('--
batch', type=int, required=True, help="Number of batch in simulation")
    parser.add_argument('--
part_batch', type=int, required=True, help="Number of particle per batch")
    parser.add_argument('--
enrich_Li', type=float, required=True, help="Percentage of li-6 enrichment")
    parser.add_argument('--
neutron_multi', type=float, help="Percentage of neutron multiplier (Pb) in moder
ator")

```

```

    parser.add_argument('--
mod_ratio', type=float, help="Percentage of moderator relative to blanket fluid"
)
    args = parser.parse_args()
    model = create_model(args.batch, args.part_batch, args.enrich_Li, args.mod_r
atio, args.neutron_multi)
    model.simulate(export_h5m=False)

    # open the results file
    sp = openmc.StatePoint('statepoint.' + str(args.batch) + '.h5')
    tbr_tally = sp.get_tally(scores=['(n,Xt)'])
    df = tbr_tally.get_pandas_dataframe()
    tbr_tally_result = df['mean'].sum()
    print('The tritium breeding ratio was found, TBR = ',tbr_tally_result)

```

**LAMPIRAN B**  
**HASIL SIMULASI TBR**

**Tabel B.1** Hasil Simulasi *blanket* TBR ITER menggunakan OpenMC

No	Pengayaan <sup>6</sup> Li (%)	Rasio Moderator (%)	Rasio Pengganda Neutron (%)	TBR
0	0,1	0	0	0,868011 ± 0,003139
1	0,1	0	0,1	0,868074 ± 0,003898
2	0,1	0	0,3	0,872378 ± 0,002893
3	0,1	0	0,5	0,864755 ± 0,003406
4	0,1	0	0,7	0,867452 ± 0,003762
5	0,1	0	0,9	0,875115 ± 0,003405
6	0,1	0,1	0	0,811878 ± 0,003708
7	0,1	0,1	0,1	0,813102 ± 0,003326
8	0,1	0,1	0,3	0,827722 ± 0,004223
9	0,1	0,1	0,5	0,832287 ± 0,003664
10	0,1	0,1	0,7	0,835138 ± 0,004013
11	0,1	0,1	0,9	0,835424 ± 0,003291
12	0,1	0,3	0	0,817487 ± 0,004034
13	0,1	0,3	0,1	0,827214 ± 0,00224
14	0,1	0,3	0,3	0,848194 ± 0,002747
15	0,1	0,3	0,5	0,860513 ± 0,00346
16	0,1	0,3	0,7	0,864625 ± 0,003975
17	0,1	0,3	0,9	0,864865 ± 0,002764
18	0,1	0,5	0	0,78876 ± 0,00296
19	0,1	0,5	0,1	0,793468 ± 0,002479
20	0,1	0,5	0,3	0,817685 ± 0,002604
21	0,1	0,5	0,5	0,8316 ± 0,002929
22	0,1	0,5	0,7	0,849183 ± 0,003786
23	0,1	0,5	0,9	0,83119 ± 0,00287

**Tabel B.1** Hasil Simulasi *blanket* TBR ITER menggunakan OpenMC (lanjutan)

No	Pengayaan ${}^6\text{Li}$ (%)	Rasio Moderator (%)	Rasio Pengganda Neutron (%)	TBR
24	0,1	0,7	0	$0,748022 \pm 0,003357$
25	0,1	0,7	0,1	$0,758748 \pm 0,003352$
26	0,1	0,7	0,3	$0,778568 \pm 0,00332$
27	0,1	0,7	0,5	$0,797251 \pm 0,002887$
28	0,1	0,7	0,7	$0,807701 \pm 0,003515$
29	0,1	0,7	0,9	$0,795606 \pm 0,002417$
30	0,1	0,9	0	$0,673701 \pm 0,00314$
31	0,1	0,9	0,1	$0,674602 \pm 0,003204$
32	0,1	0,9	0,3	$0,683338 \pm 0,002535$
33	0,1	0,9	0,5	$0,691678 \pm 0,003048$
34	0,1	0,9	0,7	$0,702488 \pm 0,002609$
35	0,1	0,9	0,9	$0,680809 \pm 0,002868$
36	0,3	0	0	$0,934646 \pm 0,003598$
37	0,3	0	0,1	$0,933479 \pm 0,003637$
38	0,3	0	0,3	$0,937928 \pm 0,004075$
39	0,3	0	0,5	$0,934796 \pm 0,003462$
40	0,3	0	0,7	$0,934324 \pm 0,003326$
41	0,3	0	0,9	$0,935387 \pm 0,003919$
42	0,3	0,1	0	$0,869691 \pm 0,003021$
43	0,3	0,1	0,1	$0,87579 \pm 0,003619$
44	0,3	0,1	0,3	$0,890232 \pm 0,003896$
45	0,3	0,1	0,5	$0,896989 \pm 0,002908$
46	0,3	0,1	0,7	$0,908869 \pm 0,001948$
47	0,3	0,1	0,9	$0,911833 \pm 0,00418$
48	0,3	0,3	0	$0,880068 \pm 0,003924$
49	0,3	0,3	0,1	$0,898905 \pm 0,003831$
50	0,3	0,3	0,3	$0,920093 \pm 0,002572$

**Tabel B.1** Hasil Simulasi *blanket* TBR ITER menggunakan OpenMC (lanjutan)

No	Pengayaan ${}^6\text{Li}$ (%)	Rasio Moderator (%)	Rasio Pengganda Neutron (%)	TBR
51	0,3	0,3	0,5	$0,933397 \pm 0,00411$
52	0,3	0,3	0,7	$0,943356 \pm 0,002582$
53	0,3	0,3	0,9	$0,95622 \pm 0,003186$
54	0,3	0,5	0	$0,852376 \pm 0,002882$
55	0,3	0,5	0,1	$0,870099 \pm 0,00287$
56	0,3	0,5	0,3	$0,893191 \pm 0,002924$
57	0,3	0,5	0,5	$0,92718 \pm 0,003022$
58	0,3	0,5	0,7	$0,935546 \pm 0,002905$
59	0,3	0,5	0,9	$0,94255 \pm 0,003464$
60	0,3	0,7	0	$0,82391 \pm 0,003264$
61	0,3	0,7	0,1	$0,835453 \pm 0,002965$
62	0,3	0,7	0,3	$0,866091 \pm 0,004926$
63	0,3	0,7	0,5	$0,892559 \pm 0,003258$
64	0,3	0,7	0,7	$0,918591 \pm 0,002979$
65	0,3	0,7	0,9	$0,934027 \pm 0,003746$
66	0,3	0,9	0	$0,758409 \pm 0,003468$
67	0,3	0,9	0,1	$0,761559 \pm 0,002661$
68	0,3	0,9	0,3	$0,784483 \pm 0,003217$
69	0,3	0,9	0,5	$0,809846 \pm 0,002918$
70	0,3	0,9	0,7	$0,836 \pm 0,003878$
71	0,3	0,9	0,9	$0,838862 \pm 0,003291$
72	0,5	0	0	$0,953263 \pm 0,003482$
73	0,5	0	0,1	$0,950131 \pm 0,003216$
74	0,5	0	0,3	$0,94662 \pm 0,004488$
75	0,5	0	0,5	$0,949549 \pm 0,004201$
76	0,5	0	0,7	$0,949952 \pm 0,003658$
77	0,5	0	0,9	$0,949128 \pm 0,003198$
78	0,5	0,1	0	$0,894743 \pm 0,003382$



**Tabel B.1** Hasil Simulasi *blanket* TBR ITER menggunakan OpenMC (lanjutan)

No	Pengayaan ${}^6\text{Li}$ (%)	Rasio Moderator (%)	Rasio Pengganda Neutron (%)	TBR
79	0,5	0,1	0,1	$0,896595 \pm 0,003086$
80	0,5	0,1	0,3	$0,906702 \pm 0,003013$
81	0,5	0,1	0,5	$0,922704 \pm 0,003129$
82	0,5	0,1	0,7	$0,930362 \pm 0,00313$
83	0,5	0,1	0,9	$0,932225 \pm 0,00385$
84	0,5	0,3	0	$0,901653 \pm 0,003594$
85	0,5	0,3	0,1	$0,91449 \pm 0,004215$
86	0,5	0,3	0,3	$0,93676 \pm 0,002481$
87	0,5	0,3	0,5	$0,962236 \pm 0,004205$
88	0,5	0,3	0,7	$0,976059 \pm 0,004055$
89	0,5	0,3	0,9	$0,988243 \pm 0,004579$
90	0,5	0,5	0	$0,875314 \pm 0,003999$
91	0,5	0,5	0,1	$0,885776 \pm 0,003783$
92	0,5	0,5	0,3	$0,922072 \pm 0,003282$
93	0,5	0,5	0,5	$0,951033 \pm 0,002799$
94	0,5	0,5	0,7	$0,974843 \pm 0,003095$
95	0,5	0,5	0,9	$0,989604 \pm 0,003123$
96	0,5	0,7	0	$0,84868 \pm 0,003645$
97	0,5	0,7	0,1	$0,863197 \pm 0,004185$
98	0,5	0,7	0,3	$0,895065 \pm 0,003871$
99	0,5	0,7	0,5	$0,932114 \pm 0,003498$
100	0,5	0,7	0,7	$0,962393 \pm 0,003738$
101	0,5	0,7	0,9	$0,97437 \pm 0,004079$
102	0,5	0,9	0	$0,791084 \pm 0,003501$
103	0,5	0,9	0,1	$0,795806 \pm 0,004273$
104	0,5	0,9	0,3	$0,827613 \pm 0,003191$
105	0,5	0,9	0,5	$0,858421 \pm 0,003078$

**Tabel B.1** Hasil Simulasi *blanket* TBR ITER menggunakan OpenMC (lanjutan)

No	Pengayaan ${}^6\text{Li}$ (%)	Rasio Moderator (%)	Rasio Pengganda Neutron (%)	TBR
106	0,5	0,9	0,7	$0,893832 \pm 0,003098$
107	0,5	0,9	0,9	$0,898567 \pm 0,002884$
108	0,7	0	0	$0,95299 \pm 0,003802$
109	0,7	0	0,1	$0,947487 \pm 0,003256$
110	0,7	0	0,3	$0,950494 \pm 0,003206$
111	0,7	0	0,5	$0,952849 \pm 0,004004$
112	0,7	0	0,7	$0,950188 \pm 0,003812$
113	0,7	0	0,9	$0,946343 \pm 0,003097$
114	0,7	0,1	0	$0,889826 \pm 0,003254$
115	0,7	0,1	0,1	$0,900805 \pm 0,003091$
116	0,7	0,1	0,3	$0,909915 \pm 0,003149$
117	0,7	0,1	0,5	$0,922773 \pm 0,002668$
118	0,7	0,1	0,7	$0,936936 \pm 0,002433$
119	0,7	0,1	0,9	$0,944612 \pm 0,002683$
120	0,7	0,3	0	$0,901775 \pm 0,003576$
121	0,7	0,3	0,1	$0,920412 \pm 0,004756$
122	0,7	0,3	0,3	$0,944793 \pm 0,0035$
123	0,7	0,3	0,5	$0,969793 \pm 0,003336$
124	0,7	0,3	0,7	$0,984491 \pm 0,004736$
125	0,7	0,3	0,9	$0,995924 \pm 0,003419$
126	0,7	0,5	0	$0,884828 \pm 0,003468$
127	0,7	0,5	0,1	$0,905919 \pm 0,002946$
128	0,7	0,5	0,3	$0,931572 \pm 0,003548$
129	0,7	0,5	0,5	$0,962066 \pm 0,003864$
130	0,7	0,5	0,7	$0,993001 \pm 0,005239$
131	0,7	0,5	0,9	$1,005552 \pm 0,004294$
132	0,7	0,7	0	$0,863318 \pm 0,004219$
133	0,7	0,7	0,1	$0,877068 \pm 0,00368$

**Tabel B.1** Hasil Simulasi *blanket* TBR ITER menggunakan OpenMC (lanjutan)

No	Pengayaan <sup>6</sup> Li (%)	Rasio Moderator (%)	Rasio Pengganda Neutron (%)	TBR
134	0,7	0,7	0,3	0,904822 ± 0,003456
135	0,7	0,7	0,5	0,950008 ± 0,003373
136	0,7	0,7	0,7	0,987643 ± 0,003765
137	0,7	0,7	0,9	0,994566 ± 0,003919
138	0,7	0,9	0	0,812073 ± 0,003704
139	0,7	0,9	0,1	0,822767 ± 0,003811
140	0,7	0,9	0,3	0,848313 ± 0,003345
141	0,7	0,9	0,5	0,881948 ± 0,002961
142	0,7	0,9	0,7	0,917258 ± 0,003702
143	0,7	0,9	0,9	0,937164 ± 0,002761
144	0,9	0	0	0,943055 ± 0,004092
145	0,9	0	0,1	0,945547 ± 0,003885
146	0,9	0	0,3	0,948713 ± 0,004638
147	0,9	0	0,5	0,947243 ± 0,005056
148	0,9	0	0,7	0,946469 ± 0,003567
149	0,9	0	0,9	0,947171 ± 0,004372
150	0,9	0,1	0	0,89391 ± 0,004338
151	0,9	0,1	0,1	0,89825 ± 0,003342
152	0,9	0,1	0,3	0,909116 ± 0,003063
153	0,9	0,1	0,5	0,920132 ± 0,003435
154	0,9	0,1	0,7	0,934157 ± 0,003656
155	0,9	0,1	0,9	0,944037 ± 0,003833
156	0,9	0,3	0	0,901694 ± 0,00375
157	0,9	0,3	0,1	0,916691 ± 0,004102
158	0,9	0,3	0,3	0,94276 ± 0,003438
159	0,9	0,3	0,5	0,966685 ± 0,003465
160	0,9	0,3	0,7	0,991248 ± 0,003629

**Tabel B.1** Hasil Simulasi *blanket* TBR ITER menggunakan OpenMC (lanjutan)

No	Pengayaan ${}^6\text{Li}$ (%)	Rasio Moderator (%)	Rasio Pengganda Neutron (%)	TBR
161	0,9	0,3	0,9	$1,008993 \pm 0,003505$
162	0,9	0,5	0	$0,882663 \pm 0,003253$
163	0,9	0,5	0,1	$0,901835 \pm 0,002836$
164	0,9	0,5	0,3	$0,935165 \pm 0,003886$
165	0,9	0,5	0,5	$0,974005 \pm 0,003353$
166	0,9	0,5	0,7	$0,995918 \pm 0,003552$
167	0,9	0,5	0,9	$1,014225 \pm 0,003413$
168	0,9	0,7	0	$0,863758 \pm 0,004415$
169	0,9	0,7	0,1	$0,879116 \pm 0,004074$
170	0,9	0,7	0,3	$0,916043 \pm 0,003167$
171	0,9	0,7	0,5	$0,955368 \pm 0,003024$
172	0,9	0,7	0,7	$0,99124 \pm 0,0045$
173	0,9	0,7	0,9	$1,012842 \pm 0,004387$
174	0,9	0,9	0	$0,820799 \pm 0,003428$
175	0,9	0,9	0,1	$0,831957 \pm 0,003844$
176	0,9	0,9	0,3	$0,860989 \pm 0,003255$
177	0,9	0,9	0,5	$0,897946 \pm 0,003625$
178	0,9	0,9	0,7	$0,936581 \pm 0,005278$
179	0,9	0,9	0,9	$0,963604 \pm 0,002832$