

OPTIMASI DESAIN BLANKET REAKTOR FUSI ITER UNTUK PEMBIAKAN TRITIUM MENGGUNAKAN OPENMC

Husni Naufal Zuhdi¹, Andang Widi Harto², Alexander Agung³

^{1,2,3} Departemen Teknik Nukir dan Teknik Fisika FT UGM
Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA

¹husninaufalz@gmail.com

²andang@ugm.ac.id

³ a_agung@ugm.ac.id

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* reaktor fusi ITER yang optimal.

Simulasi TBR dilakukan menggunakan program OpenMC dan Paramak. Material fluida *blanket* yang digunakan dalam skripsi ini adalah Litium Florida dengan pengayaan ⁶Li divariasikan pada nilai 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%. Untuk meningkatkan nilai TBR desain *blanket* reaktor fusi ITER ditambahkan komponen moderator grafit dan pengganda neutron timbal alam pada desain reaktor fusi 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* utama dilakukan pada nilai 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90% sedangkan variasi rasio volume pengganda neutron terhadap moderator dilakukan pada nilai 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%.

Hasil simulasi desain *blanket* reaktor fusi ITER menunjukkan bahwa konfigurasi pengayaan ⁶Li, rasio volume moderator, dan rasio volume pengganda neutron yang optimal secara berurutan adalah 70%, 50%, dan 90% dengan nilai TBR sebesar $1,005552 \pm 0,004294$.

Kata kunci— ITER, OpenMC, *tritium breeding ratio*.

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. The aim of this undergraduate thesis 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 ⁶Li enrichment variation in these values 10%, 30%, 50%, 70%, and 90%. To increase TBR value in ITER fusion reactor blanket design, graphite moderator and natural lead neutron multiplier were added into ITER fusion reactor design. Addition of moderator volume taking place part of main fluid blanket volume while the addition of neutron multiplier volume taking place part of moderator volume. Variation of moderator volume ratio against main fluid blanket volume done in these values 10%, 30%, 50%, 70%, and 90% while variation of neutron multiplier volume ratio against moderator volume done in these values 10%, 30%, 50%, 70%, and 90%.

The result of the ITER fusion reactor blanket design simulation shows that the most optimal ⁶Li enrichment, moderator volume ratio, and neutron multiplier volume ratio configuration sequentially is 70%, 50%, and 90% with TBR value in the amount of 1.005552 ± 0.004294 .

Keywords— ITER, OpenMC, *tritium breeding ratio*

I. PENDAHULUAN

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 juta jiwa [2]. Salah satu masalah penting yang akan menjadi tantangan untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia adalah masalah ketersediaan energi.

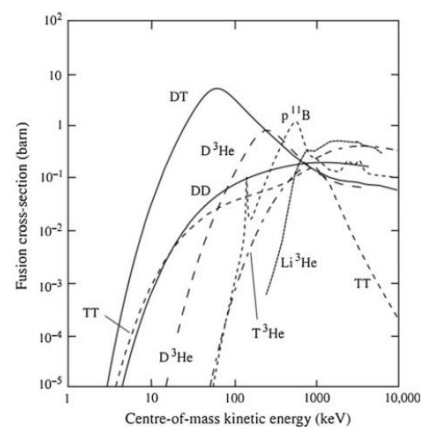
Sebagian besar energi yang kita nikmati saat ini berasal dari bahan bakar fosil seperti minyak, batu bara, dan gas alam. Energi yang berasal dari bahan bakar fosil menguasai 84,3% sumber konsumsi energi dunia. Sedangkan energi nuklir, terbarukan, dan energi rendah karbon hanya menyumbang 15,7% [3]. Jika 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. Mengetahui hal tersebut, perlu 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. Terdapat satu permasalahan besar lainnya apabila kita sembarangan memilih dan menggunakan energi. Masalah tersebut adalah Perubahan Iklim.

Perubahan Iklim dapat diartikan sebagai terjadinya perubahan keadaan iklim yang dapat diidentifikasi oleh perubahan rerata dan/atau variabilitas dari sifat – sifat iklim pada waktu yang cukup lama, biasanya beberapa dekade atau lebih [6]. Beberapa indikator terjadinya perubahan iklim antara lain adalah peningkatan suhu udara rerata, perubahan siklus air, perubahan tingkat keasaman air laut, dan perubahan ketinggian permukaan air laut. Berdasarkan laporan penilaian keenam IPCC diperkirakan bila tidak dilakukan perubahan yang signifikan guna mengatasi perubahan iklim, maka suhu permukaan bumi dapat meningkat hingga 3,5°C pada tahun 2100 [7]. Dampak negatif dari peningkatan suhu permukaan bumi pada akhirnya akan menuntun manusia beserta spesies – spesies lainnya kepada kerentanan hingga kepunahan.

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. 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, pemanasan global, dan perubahan iklim. 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 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 Tampang Lintang dari berbagai reaksi fusi nuklir [8]

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 α 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 karena tampang lintang fusi untuk unsur D-T merupakan tampang lintang yang paling besar nilainya dan mampu bereaksi pada temperatur terendah bila dibandingkan dengan reaksi fusi lainnya [9].

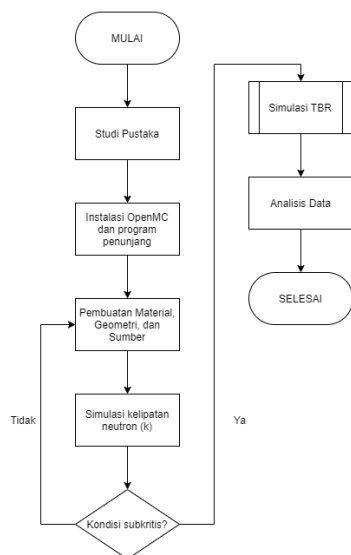
Meskipun reaksi D-T merupakan reaksi fusi yang paling memungkinkan bila dilihat dari tampang lintang dan temperaturnya. Reaksi D-T memerlukan setidaknya deuterium dan tritium sebagai bahan bakar. Deuterium tersedia banyak pada air laut dengan ketersediaan 150 ppm sedangkan tritium merupakan unsur radioaktif dengan waktu paruh 12,323 tahun yang sangat jarang terbentuk di permukaan bumi [8]. 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.

Salah satu megaprojek reaktor fusi nuklir yang paling maju adalah ITER. ITER adalah riset fusi nuklir internasional 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 [10]. Hingga saat ini masih belum dipastikan desain *blanket* pembiak tritium yang akan digunakan pada ITER. Untuk itu perlu dilakukan penelitian untuk menguji *blanket* pembiak tritium yang optimal pada reaktor ITER. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan desain *blanket* reaktor ITER yang optimal menggunakan material LiF sebagai fluida *blanket*, timbal alam sebagai penganda neutron, dan grafit sebagai reflektor dan moderator.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Tata Laksana Penelitian

Berikut adalah diagram alir penelitian secara umum:



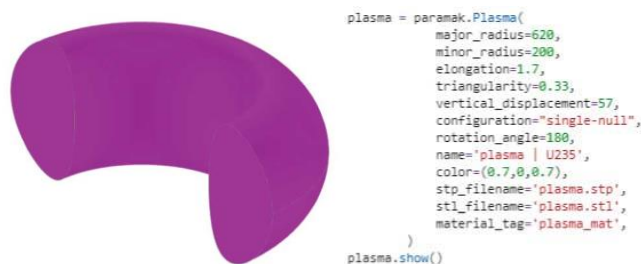
Gambar 2 Diagram alir penelitian secara umum

B. Pembuatan Model Neutronik Reaktor ITER

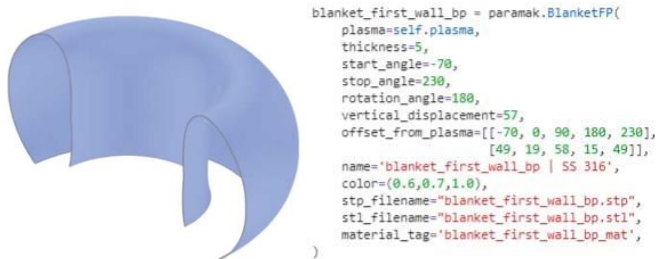
Model reaktor ITER yang akan disimulasikan dalam penelitian ini merupakan modifikasi dari model reaktor ITER yang disediakan dari modul python Paramak [11] yang mengacu pada dokumen *ITER Project: International Cooperation and Energy Investment* dan *ITER EDA DOCUMENTATION SERIES No. 24* [9], [12]. Pada model reaktor ITER asli yang tersedia terdapat komponen – komponen berikut: plasma, *blanket*, *divertor*, bejana vakum, dan sistem magnet. Modifikasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah menghilangkan komponen sistem magnet dan merincikan komponen *blanket*. Komponen sistem magnet dihilangkan karena tidak mempengaruhi kondisi neutronik pada reaktor ITER. Perincian *blanket* dilakukan untuk mendapatkan hasil simulasi yang semirip mungkin dengan kondisi nyata.

Program OpenMC [13] akan digunakan melakukan simulasi neutronik. OpenMC membutuhkan berkas masukan berupa *geometry.xml*, *materials.xml*, dan *settings.xml* yang masing – masing mengandung informasi terkait geometri, material, dan pengaturan simulasi neutronik yang akan dilakukan. Untuk melakukan simulasi neutronik menggunakan geometri 3D CAD diperlukan program DAGMC dan berkas *dagmc.h5m*. Berkas *dagmc.h5m* merupakan hasil konversi geometri 3D CAD menjadi bentuk *mesh* yang dapat digunakan untuk simulasi neutronik menggunakan OpenMC. Untuk melakukan perhitungan *tally* maka perlu berkas tambahan bernama *tallies.xml* yang berisikan filter dan skor *tally* yang akan digunakan dalam simulasi.

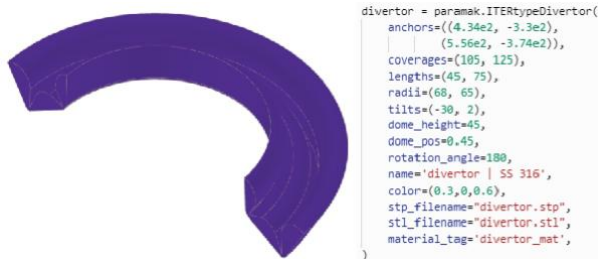
Penyusunan berkas *materials.xml* dapat dilakukan menggunakan modul python Neutronic Material Maker sedangkan penyusunan berkas *geometry.xml* dan *dagmc.h5m* dilakukan menggunakan modul python Paramak. Komponen reaktor ITER disusun satu persatu menggunakan kelas *Shapes* dan *Components*. Penelitian 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 3 – 5 menunjukkan penggunaan kelas *Components BlanketFP*, *ITERtypeDivertor*, dan *Plasma* pada penelitian ini.



Gambar 3 Pembuatan komponen plasma reaktor ITER



Gambar 4 Pembuatan komponen dinding pertama reaktor ITER



Gambar 5 Pembuatan komponen *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}U berdensitas 10-6 g/cc. Simulasi kritikalitas akan dilakukan sebanyak 3 *batch* dengan tiap *batch* akan menyimulasikan 50000 neutron sedangkan simulasi TBR akan dilakukan sebanyak 20 *batch* dengan tiap *batch* akan menyimulasikan 5000 neutron

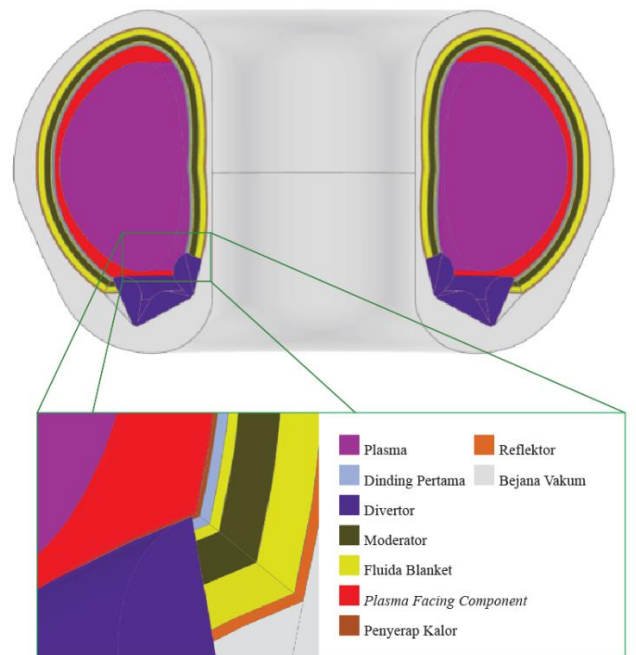
Model reaktor ITER yang telah dimodifikasi mengandung komponen – komponen berikut: plasma, *divertor*, bejana vakum, dinding pertama, fluida *blanket* depan, fluida *blanket* utama, moderator, dan reflektor. Tabel I dan Gambar 6 menunjukkan spesifikasi reaktor ITER dan tampak lintang reaktor ITER yang digunakan pada penelitian ini.

TABEL I
SPESIFIKASI REAKTOR ITER

Parameter	Nilai		
Plasma Facing Component			
Ketebalan	1 cm		
Material	Be	1,848 g/cc	
Penyerap Kalor			
Ketebalan	2 cm		
Material	CuCrZr	8,9 g/cc	
Back Plate Dinding Pertama			
Ketebalan	4 cm		
Material	SS 316 L	8 g/cc	
Fluida Blanket Depan			
Ketebalan	5 cm		
Material	LiF	1200 K	2,635 g/cc
Pengayaan ^6Li	[10% , 30%, 50%, 70%, 90%]		

TABEL I
SPESIFIKASI REAKTOR ITER (LANJUTAN)

Fluida Blanket Utama			
Ketebalan	[3 cm, 9 cm, 15 cm, 21 cm, 27 cm, 30 cm]		
Material	LiF	1200 K	2,635 g/cc
Pengayaan ⁶ Li	[10% , 30%, 50%, 70%, 90%]		
Moderator dan Pengganda Neutron			
Ketebalan	[3 cm, 9 cm, 15 cm, 21 cm, 27 cm]		
Material Moderator	C	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]	
Reflektor			
Ketebalan	15 cm		
Material	Grafit	2,23 g/cc	
Divertor			
Material	SS 316 L	8 g/cc	
Bejana Vakum			
Material	SS 316 L	8 g/cc	
Plasma			
Material	²³⁵ U	10 ⁻⁶ g/cc	
Radius mayor	620 cm		
Radius minor	200 cm		
Konfigurasi	Single Null		
Elongation	1.7		
Triangularity	0.33		

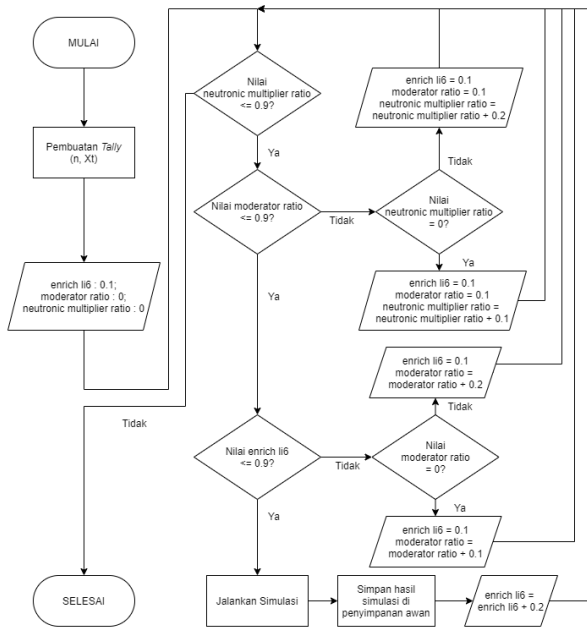


Gambar 6 Tampang Lintang Reaktor ITER

C. Simulasi TBR

Simulasi neutronik untuk menentukan nilai TBR akan dilakukan pada mesin virtual yang terdapat pada layanan komputasi awan *Google Cloud Platform* (GCP) dan *Amazon Web Services* (AWS). Terdapat tiga variabel bebas yang akan divariasikan dalam penelitian ini, yaitu: pengayaan ^6Li (*enrich li6*), rasio volume moderator dengan fluida *blanket* (*moderator ratio*), dan rasio volume pengganda neutron dengan moderator

(*neutronic multiplier ratio*). Tabel I menunjukkan spesifikasi variabel bebas yang akan diujikan. Gambar 7 menampilkan diagram alir simulasi TBR.



Gambar 7 Diagram alir simulasi TBR

D. Analisis Hasil

Hasil simulasi akan dikumpulkan dalam satu tabel dan dilakukan penyajian hasil penelitian dalam bentuk grafik. Akan dicari seberapa besar pengaruh dari pengayaan ${}^6\text{Li}$ pada fluida *blanket*, rasio volume moderator dengan fluida *blanket*, dan rasio volume pengganda neutron dengan moderator terhadap nilai TBR. Akan ditentukan desain *blanket* yang memiliki nilai TBR optimal dengan nilai TBR melebihi satu.

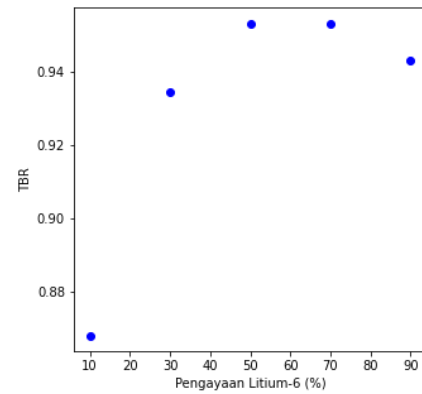
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kritikalitas Reaktor

Perhitungan kekritisitas reaktor ITER dilakukan pada konfigurasi *blanket* pengayaan ${}^6\text{Li}$ 10%, rasio volume moderator dengan fluida *blanket* 0%, rasio volume pengganda neutron dengan moderator 0%. Didapat nilai kritikalitas (k_{eff}) reaktor sebesar 0,0000181 dengan standar deviasi sebesar 0,0000007. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kondisi reaktor ITER adalah sub kritis sehingga reaksi fisi berantai tidak dapat terjadi.

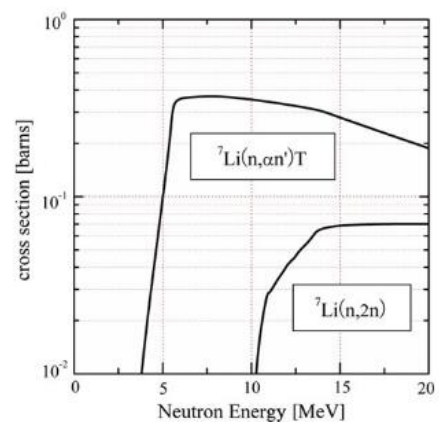
B. Desain Blanket ITER

Desain *blanket* awal penelitian dibuat tanpa adanya moderator grafit dan pengganda neutron timbal alam. Pengayaan ${}^6\text{Li}$ divariasikan pada nilai 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%. Gambar 8 menunjukkan hasil simulasi untuk desain *blanket* tanpa moderator dan pengganda neutron.



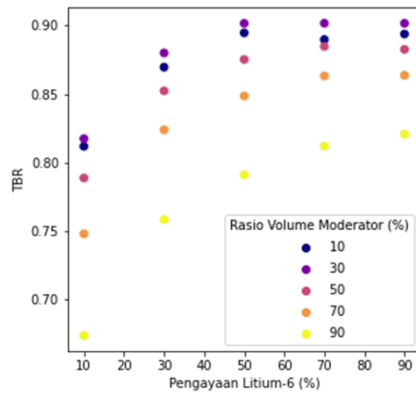
Gambar 8 Hasil simulasi desain *blanket* ITER tanpa moderator dan pengganda neutron

Nilai TBR untuk desain awal menunjukkan bahwa pengayaan ${}^6\text{Li}$ paling optimal berada pada nilai pengayaan 6Li 50% dengan nilai TBR sebesar $0,953263 \pm 0,003482$. Terjadinya penurunan nilai TBR setelah pengayaan ${}^6\text{Li}$ 50% terjadi karena sebagian besar neutron yang masuk ke daerah fluida *blanket* masih memiliki energi tinggi. Pada energi tinggi, reaksi produksi tritium yang dominan berasal dari isotop ${}^7\text{Li}$ sesuai dengan dataampang lintang pada Gambar 9 sehingga peningkatan pengayaan ${}^6\text{Li}$ berakibat pada penurunan nilai TBR. Neutron berenergi tinggi memiliki permasalahan keselamatan pada reaktor ITER sehingga energi neutron perlu diturunkan. Pada desain *blanket* berikutnya akan ditambahkan moderator grafit untuk menurunkan energi neutron.



Gambar 9 Tampang lintang interaksi neutron dengan ${}^7\text{Li}$ [8]

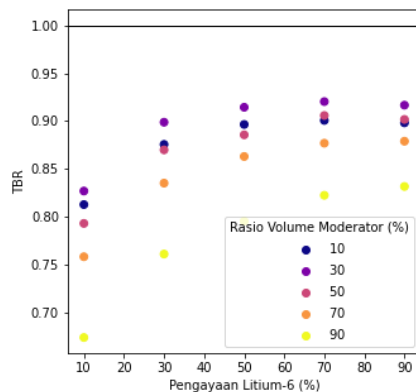
Desain *blanket* kedua penelitian ini akan menambahkan moderator grafit di antara fluida *blanket* depan dan fluida *blanket* utama. Volume moderator akan mengambil volume fluida *blanket* utama dengan rasio 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%. Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi untuk *blanket* dengan moderator tanpa pengganda neutron.



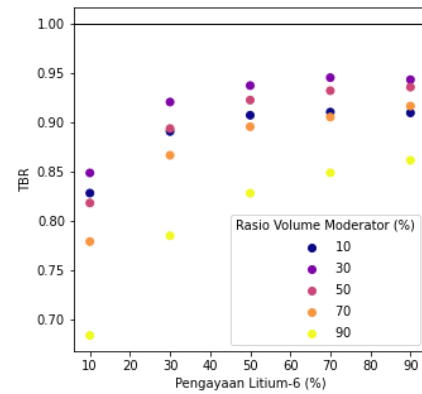
Gambar 10 Hasil simulasi desain *blanket* dengan moderator tanpa pengganda neutron

Hasil simulasi desain *blanket* kedua menunjukkan terjadi penurunan nilai TBR setelah ditambah komponen moderator grafit. Didapat nilai TBR tertinggi pada rasio volume moderator sebesar 30% pada pengayaan ${}^6\text{Li}$ 70% dengan nilai TBR sebesar 0.901755 ± 0.003576 . Penurunan nilai TBR yang cukup besar ini semakin besar efeknya seiring dengan peningkatan rasio volume moderator. Kemungkinan penyebab turunnya nilai TBR setelah dilakukan penambahan moderator grafit adalah fluks neutron termal yang masuk ke dalam sel fluida *blanket* mengalami penurunan yang drastis akibat efek moderasi neutron. Pengurangan fluks neutron pada fluida *blanket* dapat diatasi dengan menambahkan pengganda neutron timbal alam pada komponen moderator.

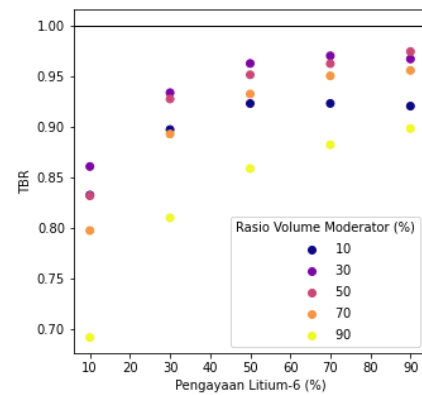
Desain *blanket* terakhir pada penelitian ini akan menambahkan pengganda neutron timbal alam pada komponen moderator grafit. Rasio volume pengganda neutron dengan moderator akan divariasikan pada nilai 10%, 30%, 50%, 70%, dan 90%. Dilakukan juga variasi volume moderator dengan fluida *blanket* utama dengan nilai yang sama pada desain *blanket* kedua. Gambar 11 – 15 menunjukkan hasil simulasi untuk *blanket* ITER dengan penambahan moderator dan pengganda neutron.



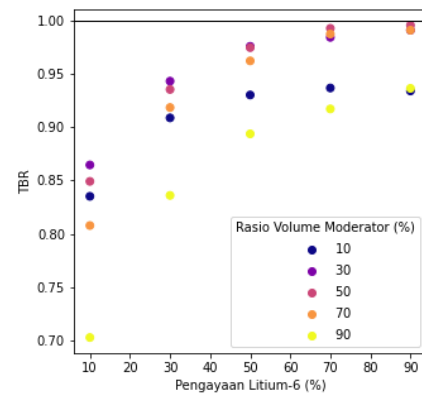
Gambar 11 Hasil Simulasi untuk *blanket* ITER dengan penambahan moderator dan pengganda neutron. Rasio volume pengganda neutron sebesar 10%



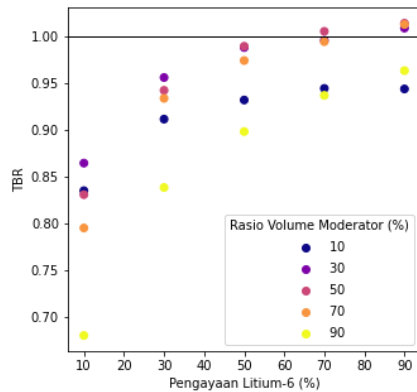
Gambar 12 Hasil Simulasi untuk *blanket* ITER dengan penambahan moderator dan pengganda neutron. Rasio volume pengganda neutron sebesar 30%



Gambar 13 Hasil Simulasi untuk *blanket* ITER dengan penambahan moderator dan pengganda neutron. Rasio volume pengganda neutron sebesar 50%



Gambar 14 Hasil Simulasi untuk *blanket* ITER dengan penambahan moderator dan pengganda neutron. Rasio volume pengganda neutron sebesar 70%



Gambar 15 Hasil Simulasi untuk *blanket* ITER dengan penambahan moderator dan pengganda neutron. Rasio volume pengganda neutron sebesar 90%

Penambahan pengganda neutron pada komponen moderator meningkatkan nilai TBR *blanket* reaktor ITER. Dengan mengganti 90% volume moderator dengan timbal alam, didapatkan desain *blanket* reaktor ITER dengan nilai TBR lebih dari satu yang ditampilkan pada Tabel II.

TABEL II
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	50	90	$1,014225 \pm 0,003413$
90	70	90	$1,012842 \pm 0,004387$
90	30	90	$1,008993 \pm 0,003505$
70	50	90	$1,005552 \pm 0,004294$

Seluruh desain *blanket* dengan nilai TBR lebih dari satu memiliki rasio volume pengganda neutron 90% , pengayaan ${}^6\text{Li}$ 70% - 90%, rasio volume moderator 30 – 70%. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan pengganda neutron dan pengayaan ${}^6\text{Li}$ berbanding lurus dengan peningkatan nilai TBR sedangkan penambahan rasio volume moderator hingga nilai tertentu mampu meningkatkan nilai TBR akan tetapi mengalami penurunan nilai TBR setelahnya.

TABEL III
ENERGI AMBANG DAN TAMPANG LINTANG (n,2n) UNTUK
ISOTOP TIMBAL ALAM [14]

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

Peningkatan nilai TBR seiring dengan peningkatan pengganda neutron sesuai dengan dataampang lintang timbal alam pada Tabel III. 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* mampu meningkatkan nilai TBR desain *blanket*. 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* sebelum melakukan reaksi pembuatan 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.

Rasio volume moderator mempengaruhi jumlah dan energi neutron yang masuk ke dalam sel fluida *blanket* utama. Nilai rasio volume moderator yang terlalu kecil akan meminimalkan efek moderasi neutron sehingga neutron yang masuk ke dalam sel fluida *blanket* utama masih tergolong neutron cepat. Padahal seperti yang sudah penulis sebutkan 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. Nilai rasio volume moderator yang paling optimal untuk moderator grafit dengan pengganda neutron timbal alam adalah 50%.

Pada desain *blanket* kedua nilai rasio volume moderator yang optimal adalah 30% sedangkan pada desain *blanket* ketiga nilai rasio volume moderator yang paling optimal adalah 50% dengan 90% volume moderator adalah pengganda neutron timbal alam. Dengan mengecualikan pengganda neutron pada moderator, persentase volume moderator optimal pada desain *blanket* ketiga adalah sebesar 5%. 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.

Berdasarkan hasil penelitian desain *blanket* ITER yang telah dilakukan didapat desain *blanket* ITER yang optimal dengan konfigurasi pengayaan ${}^6\text{Li}$, rasio volume moderator, dan rasio volume pengganda neutron masing – masing sebesar 70%, 50%, dan 90%.

IV. KESIMPULAN

Optimasi desain *blanket* ITER dengan material LiF sebagai fluida *blanket*, timbal alam sebagai pengganda neutron, dan grafit sebagai reflektor dan moderator telah dilakukan. Dari penelitian ini diketahui bahwa pengaruh pengayaan ${}^6\text{Li}$ berbanding lurus dengan nilai TBR *blanket* ITER, pengaruh rasio volume pengganda neutron timbal alam berbanding lurus

dengan nilai TBR *blanket* ITER, dan nilai rasio volume moderator grafit paling optimal berada pada nilai 50% dari total volume fluida *blanket* utama. Variabel yang paling berpengaruh terhadap nilai TBR *blanket* ITER secara berurutan adalah rasio volume pengganda neutron, pengayaan ^6Li , dan rasio volume moderator.

Desain *blanket* ITER yang paling optimal adalah untuk konfigurasi pengayaan ^6Li , rasio volume moderator, dan rasio volume pengganda neutron masing – masing sebesar 70%, 50%, dan 90% dengan nilai TBR sebesar $1,005552 \pm 0,004294$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur tak terhingga penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian berjudul “Optimasi Desain Blanket Reaktor Fusi ITER untuk Pembiakan Tritium Menggunakan OpenMC”. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Dr. Ir. Andang Widi Harto, M.T. dan Dr. Ir. Alexander Agung, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing yang senantiasa membimbing, memberikan ilmu, masukan serta motivasi selama pelaksanaan penelitian berlangsung.

REFERENSI

- [1] The World Bank Group, “Population growth (annual %) | Data,” *The World Bank Group*, 2019. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW> (diakses Feb 12, 2021).
- [2] The World Bank, “Population, total,” *The World Bank*, 2019. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL> (diakses Feb 12, 2021).
- [3] H. Ritchie, “Energy Mix,” *Our World in Data*, 2020. <https://ourworldindata.org/energy-mix> (diakses Feb 12, 2021).
- [4] H. Ritchie, “How long before we run out of fossil fuels?,” *Our World in Data*, 2017. <https://ourworldindata.org/how-long-before-we-run-out-of-fossil-fuels> (diakses Jul 22, 2021).
- [5] H. Ritchie dan M. Roser, “Energy Production and Consumption,” *Our World in Data*, 2020. <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption> (diakses Jul 22, 2021).
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Global warming of 1.5°C,” 2018.
- [7] M. MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis dan R. Y. and B. Z. (eds. . Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, “Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis,” 2021. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#SPM>.
- [8] T. Tanabe, *Tritium: Fuel of fusion reactors*. 2016.
- [9] S. Orlandi, “ITER Project: International Cooperation and Energy Investment,” in *International Cooperation for Enhancing Nuclear Safety, Security, Safeguards and Non-proliferation*, 2020, hal. 169–191, doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-42913-3>.
- [10] ITER ORGANIZATION, “WHAT WILL ITER DO?,” *ITER ORGANIZATION*, 2021. <https://www.iter.org/sci/Goals>.
- [11] J. Shimwell *et al.*, “The Paramak: Automated parametric geometry construction for fusion reactor designs,” *F1000Research*, vol. 10, 2021, doi: 10.12688/f1000research.28224.1.
- [12] The International Atomic Energy Agency (IAEA), *ITER EDA DOCUMENTATION SERIES No. 24*, First Edit. Vienna: The International Atomic Energy Agency (IAEA), 2002.
- [13] 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,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 82, hal. 90–97, 2015, doi: 10.1016/j.anucene.2014.07.048.
- [14] Japan Atomic Energy Agency, “JENDL-4.0,” *Nuclear Data Center*, 2019. <https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html>.