



UNIVERSITAS
GADJAH MADA

OPTIMASI DESAIN BLANKET REAKTOR FUSI ITER UNTUK PEMBIAKAN TRITIUM MENGGUNAKAN OPENMC

Dipresentasikan pada
Hari Senin, 18 Oktober 2021

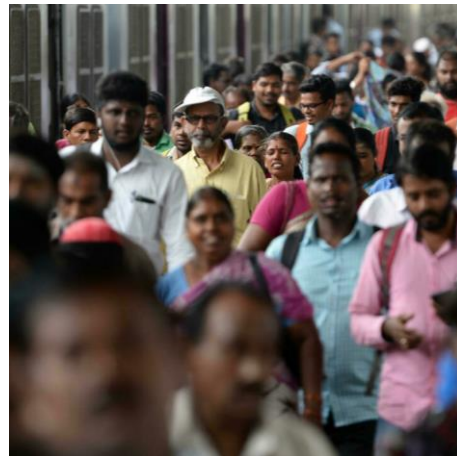
Husni Naufal Zuhdi
17/413821/TK/46261

Pembimbing Utama : Dr. Ir. Andang Widi Harto, M.T.
Pembimbing Pendamping : Dr. Ir. Alexander Agung, S.T., M.Sc.



UNIVERSITAS GADJAH MADA

Pendahuluan – 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].

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%** [2]

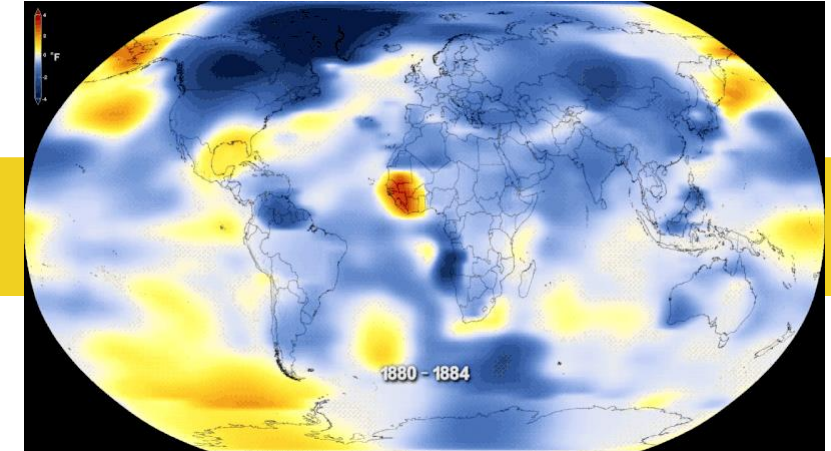
[1] The World Bank. *Population growth*. Diakses dari <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW>, 12 Februari 2021.

[2] H. Ritchie. *Energy Mix*. Diakses dari <https://ourworldindata.org/energy-mix> 12 Februari 2021.

Pendahuluan - Latar Belakang



CO₂
CO
No_x
So_x
uap air

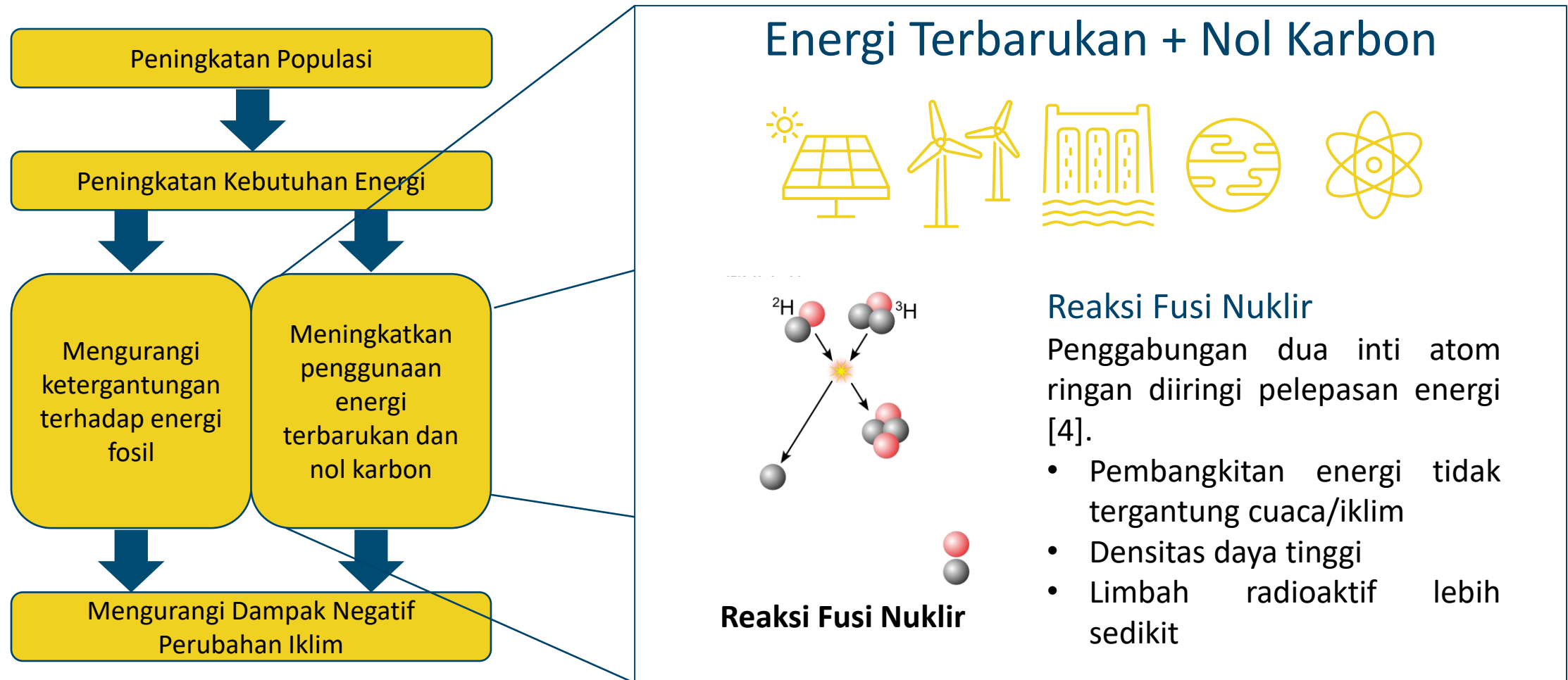


Perubahan Iklim

Perubahan Iklim dapat diartikan sebagai perubahan rerata dari sifat – sifat iklim (seperti suhu permukaan bumi) pada waktu yang cukup lama, biasanya beberapa dekade atau lebih [3].

Salah satu penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca adalah sektor energi, terutama energi fosil. Besarnya dampak negatif dari penggunaan sumber energi fosil, penggunaan sumber energi fosil haruslah dikurangi dan digantikan dengan sumber energi lainnya yang bersifat berkelanjutan.

[3] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Global warming of 1.5°C,” 2018.



[4] T. Tanabe, Tritium: Fuel of fusion reactors. 2016



[4] T. Tanabe, Tritium: Fuel of fusion reactors. 2016

[5] ITER, "WHAT WILL ITER DO ?," ITER, 2021. <https://www.iter.org/sci/Goals>.



Rumusan Masalah

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?



Batasan Masalah

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 0.13.0-dev.



Tujuan

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 paling optimal.



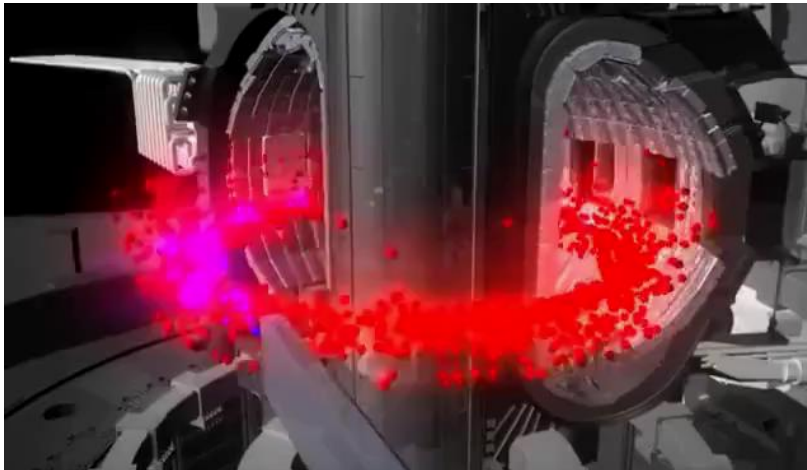
Manfaat

1. Mengembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang energi fusi nuklir serta mampu meningkatkan ketertarikan mahasiswa dan masyarakat secara umum terhadap teknologi reaktor fusi nuklir.
2. Mendapatkan desain *blanket* reaktor ITER yang optimal.



UNIVERSITAS GADJAH MADA

Tinjauan Pustaka – Desain ITER



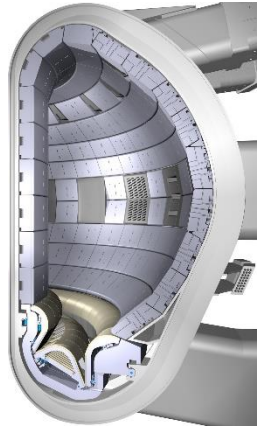
ITER adalah riset fusi nuklir internasional dan megaprojek yang terletak di Cadarache. ITER merupakan reaktor berbentuk tokamak yang didesain untuk menghasilkan pulsa panjang, plasma yang memanjang (*elongated*), dan menggunakan *divertor* tipe *single null* [6].

Parameter Desain ITER [6]

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

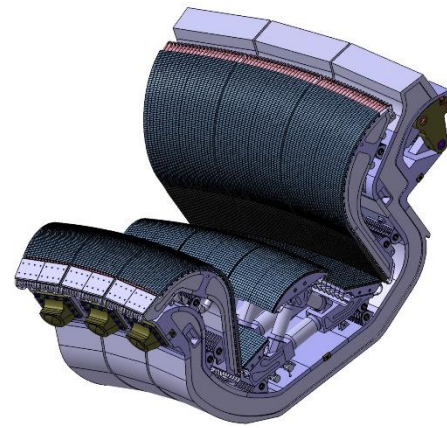
[6] D. J. Campbell, "The first fusion reactor: ITER," Europhys. News, vol. 47, no. 5–6, hal. 28–31, 2016, doi: 10.1051/e pn/2016504.

Tinjauan Pustaka – Desain ITER



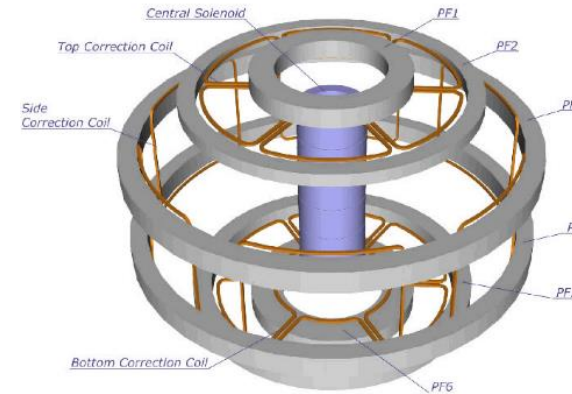
Bejana Vakum

Bejana vakum ITER memiliki peran penting dalam **mengungkung plasma, melindungi sistem magnet, dan menopang sistem lainnya** [7].



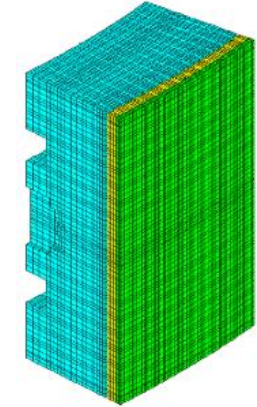
Divertor

Divertor adalah komponen dalam yang berfungsi untuk **membuang material limbah debu pembakaran plasma selama waktu operasi**. Komponen *divertor* mampu menahan fluks neutron serta kalor yang tinggi [7].



Sistem Magnet

Sistem Magnet ITER berfungsi untuk **mengungkung dan mengendalikan plasma**. Sistem Magnet ITER tersusun dari 18 kumparan medan toroid (TF), sebuah kumparan solenoid (CS), enam kumparan medan poloidal (PF), dan 18 kumparan koreksi (CCs) [7].



Sistem Blanket

Sistem *blanket* berfungsi untuk menyediakan **perlindungan termal dan radiasi primer untuk bejana vakum dan komponen eksternal ITER** [7].

Salah satu tujuan ITER adalah membuktikan bahwa produksi tritium menggunakan *blanket* pembiak dapat dilakukan [7].

[7] The International Atomic Energy Agency (IAEA), ITER EDA DOCUMENTATION SERIES No. 24, First Edit. Vienna: The International Atomic Energy Agency (IAEA), 2002.

No	Penulis	Ringkasan Penelitian
1	Maki, Koichi	Penambahan satu zona pembiak dengan ketebalan 1 cm sebelum zona pengganda neutron dalam modul <i>blanket</i> pembiak meningkatkan nilai TBR 20-40% dan nilai pengganda energi sebesar 5% [9].
2	Ali, Muhamad	Penelitian optimasi <i>blanket</i> ITER menggunakan material <i>blanket</i> dan pengganda neutron berupa garam cair FLiBe serta bola grafit sebagai moderator. Didapat nilai TBR sebesar 1,107 untuk konfigurasi pengayaan ^6Li 100% dan komposisi $\text{BeF}_2\text{:LiF}$ 75:25 [14].
3	Hernández, F. A. dan Pereslavitsev, P.	Menunjukkan performa dari tiap kandidat material <i>blanket</i> dan pengganda neutron untuk tokamak EU DEMO dengan jenis modul <i>blanket</i> HCPB. Nilai TBR untuk material <i>blanket</i> LiF dengan pengayaan ^6Li 60% adalah 1,21 dan untuk material <i>blanket</i> Li_4SiO_4 dengan pengayaan ^6Li 90% dan pengganda neutron timbal alam cair adalah 1,15 [15].

[9] K. Maki, "Energy multiplication in high tritium breeding ratio blanket with front breeder zone for fusion reactors," 1988. doi: 10.1080/18811248.1988.9733557.

[14] M. Ali, "OPTIMASI FRAKSI BERILIUM PADA DESAIN BLANKET REAKTOR FUSI UNTUK MENCAPAI PEMBIAKAN TRITIUM MENGGUNAKAN METODE MONTE CARLO," Universitas Gadjah Mada, 2017

[15] 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 Eng. Des., vol. 137, no. December, hal. 243–256, 2018, doi: 10.1016/j.fusengdes.2018.09.014.



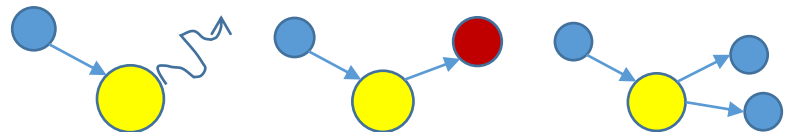
UNIVERSITAS GADJAH MADA

Dasar Teori

Interaksi Neutron dengan Materi

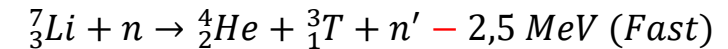
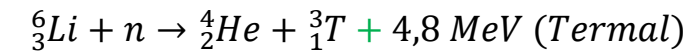


Hamburan Elastik Hamburan Inelastik



Tangkapan Radiatif Produksi Partikel Bermuatan Penggandaan Neutron

Litium



Timbal Alam

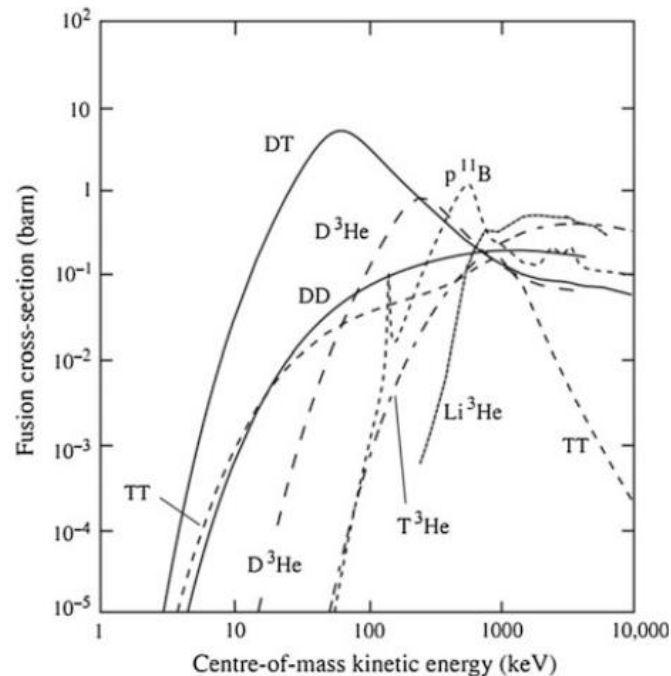
Energi Ambang dan Tampang Lintang (n,2n) untuk isotop timbal alam [16]

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

Neutron hasil reaksi memiliki **energi rerata 3,5 MeV**

LOCALLY ROOTED, GLOBALLY RESPECTED

Reaksi Fusi Nuklir



Tampang Lintang dari berbagai reaksi fusi nuklir [4]

Reaksi fusi nuklir adalah reaksi **penggabungan** dua nuklida ringan menjadi satu nuklida dengan massa yang lebih besar diikuti dengan pelepasan energi dan beberapa partikel elementer seperti neutron dan neutrino.

Deuterium (D) dan Tritium (T) adalah isotop alami hidrogen dengan massa atom masing – masing adalah 2 dan 3. Reaksi fusi nuklir D-T menghasilkan partikel α dan neutron dengan energi masing – masing partikel sebesar 3,5 MeV dan 14,1 MeV.

[4] T. Tanabe, Tritium: Fuel of fusion reactors. 2016

Tritium Breeding Ratio (TBR)

$$R_T(^6\text{Li}) = \int \Sigma_{^6\text{Li}} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) dE d\Omega d\vec{r} \quad (3.1)$$

$$R_T(^7\text{Li}) = \int \Sigma_{^7\text{Li}} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) dE d\Omega d\vec{r} \quad (3.2)$$

$$R_{DT} = \int n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{DT} d\vec{r} \quad (3.3)$$

$$TBR = \frac{R_T(^6\text{Li}) + R_T(^7\text{Li})}{R_{DT}} = \frac{\sum_i \int \Sigma_{i\text{Li}} \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}) dE d\Omega d\vec{r}}{\int n_D n_T \langle \sigma v \rangle_{DT} d\vec{r}} \quad (3.4)$$

Tritium Breeding Ratio (TBR) merupakan parameter yang merepresentasikan perbandingan antara **laju produksi tritium** yang dihasilkan pada sistem *blanket* dengan **laju pembakaran tritium** dalam plasma [4].

OpenMC



OpenMC adalah sebuah kode simulasi transpor Monte Carlo untuk neutron dan foton yang dikembangkan oleh komunitas dan **bersifat sumber terbuka** sehingga setiap orang dapat berkontribusi untuk memperbarui dan mengembangkan program ini. OpenMC mampu melaksanakan simulasi *fixed source*, nilai eigen k , dan perkalian subkritis [17].

Modul Python

Paramak merupakan modul python sumber terbuka untuk **membuat model 3D CAD** reaktor fusi nuklir. Geometri dari Paramak dapat digunakan untuk simulasi neutronik menggunakan OpenMC karena dokumen CAD dapat secara otomatis dikonversi menjadi model neutronik DAGMC [18].

Paramak Neutronics merupakan modul python untuk **melakukan simulasi neutronik** menggunakan OpenMC dan DAGMC [19].

Neutronics Material Maker adalah modul python untuk **membuat berbagai material** di berbagai kode simulasi Monte Carlo [20].

[17] 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.

[18] J. Shimwell et al., "The Paramak: Automated parametric geometry construction for fusion reactor designs.," F1000Research, vol. 10, 2021, doi: 10.12688/f1000research.28224.1.

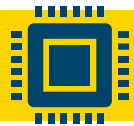
[19] Paramak-neutronics contributors, "openmc-dagmc-wrapper - Paramak-neutronics 1.0 documentation," Paramak-neutronics, 2021. <https://paramak-neutronics.readthedocs.io/en/latest/> (diakses Sep 05, 2021).

[20] neutronics-material-maker contributors, "Neutronics Material Maker - NeutronicsMaterialMaker 1.0 documentation," Neutronics Material Maker, 2021. <https://neutronics-material-maker.readthedocs.io/en/latest/> (diakses



UNIVERSITAS GADJAH MADA

Pelaksanaan Penelitian – Alat dan Bahan



Perangkat Keras



Laptop *Acer Aspire 3*, AMD Ryzen 5 2500U @2.00GHz, 8 GB (RAM), Windows 10 Pro 64 Bit, AMD Radeon Vega 8 Mobile Graphics



Sebuah layanan mesin virtual dari *Google Cloud Platform* (GCP) 8 vCPU, 12 GB (RAM), 75 GB PD, Ubuntu 20.04 LTS
dan dua buah layanan mesin virtual dari *Amazon Web Services* (AWS) 16 vCPU, 15 GB (RAM), 75 GB PD, Ubuntu 20.04 LTS



Perangkat Lunak



OpenMC
versi 0.13.0-dev



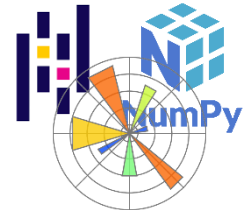
Paramak,
Paramak
Neutronic, dan
Neutronic
Material Maker



Jupyter Lab



Microsoft Word
365



dan berbagai modul
python lainnya

Data tampang lintang nuklir ENDF/B-VIII.0 dalam format HDF5

LOCALLY ROOTED, GLOBALLY RESPECTED

1

Studi Pustaka

2

Instalasi OpenMC dan program penunjang

3

Pembuatan Berkas Input

4

Simulasi Kritikalitas

5

Simulasi TBR

6

Analisis Data

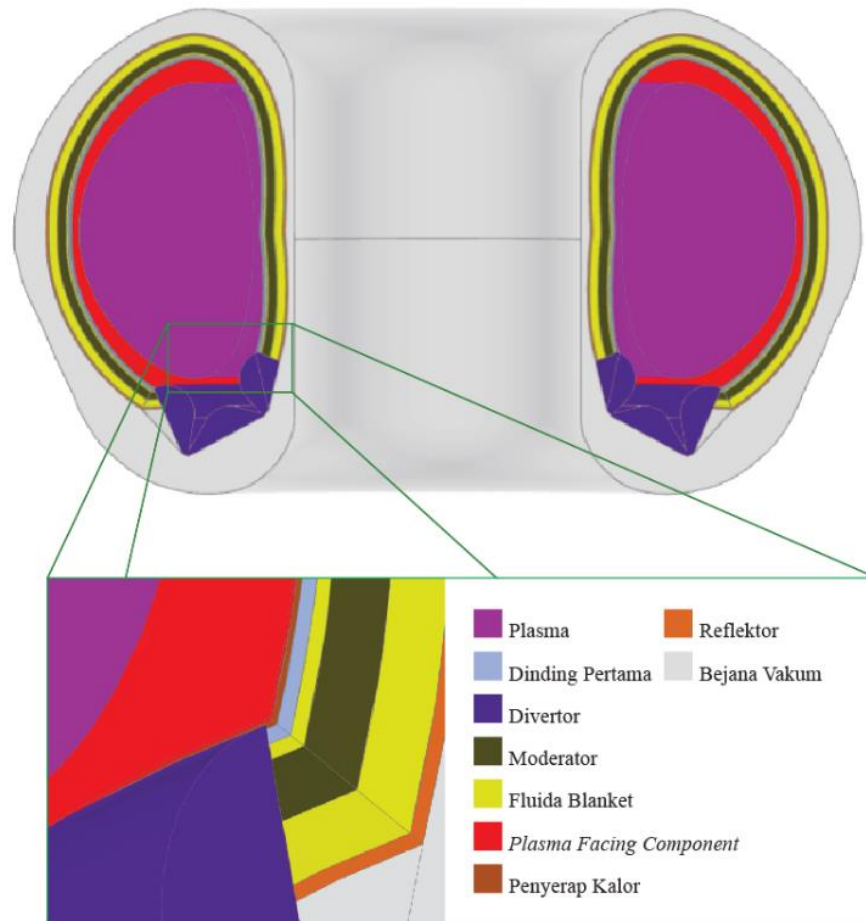
Pembuatan Berkas Input

Berkas input terdiri dari:

<i>geometry.xml</i>	Geometri reaktor ITER
<i>materials.xml</i>	Material yang akan digunakan
<i>settings.xml</i>	Sumber dan pengaturan simulasi
<i>tallies.xml</i>	Perhitungan tally
<i>dagmc.h5m</i>	Geometri 3D CAD reaktor ITER

Pembuatan masing – masing berkas input dapat dilakukan menggunakan OpenMC maupun modul python pihak ketiga (kecuali *dagmc.h5m*).

Nama Modul	Berkas Input
Paramak	<i>geometry.xml</i> dan <i>dagmc.h5m</i>
Paramak Neutronic	<i>settings.xml</i> dan <i>tallies.xml</i>
Neutronic Material Maker	<i>materials.xml</i>



Data Geometri dan Material

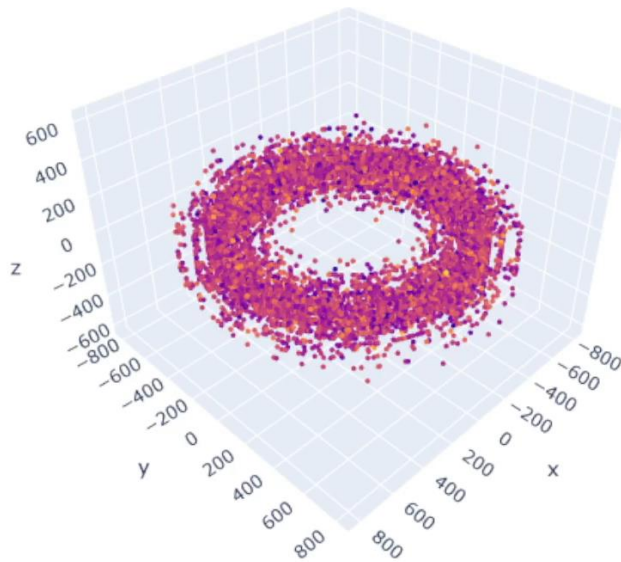
Parameter	Nilai		
<i>Plasma Facing Component</i>			
Ketebalan	1 cm		
Material	Be	1,848 g/cc	
<i>Penyerap Kalor</i>			
Ketebalan	2 cm		
Material	CuCrZr	8,9 g/cc	
<i>Back Plate Dinding Pertama</i>			
Ketebalan	4 cm		
Material	SS 316 L	8 g/cc	
<i>Fluida Blanket Depan</i>			
Ketebalan	5 cm		
Material	LiF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

Data Geometri dan Material

Parameter	Nilai		
Moderator dan Pengganda Neutron			
Ketebalan	[0 cm, 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	[0%, 10% , 30%, 50%, 70%, 90%]		
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	

Parameter	Nilai	
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	

Simulasi Kritikalitas



Distribusi neutron dalam Plasma

Bertujuan untuk memastikan bahwa reaktor ITER dalam kondisi
subkritis

Dilakukan simulasi sebanyak **3 batch**

Dengan tiap **batch** mensimulasikan **50000 partikel**

Sumber titik seragam dengan energi rerata **14,1 MeV**



Simulasi TBR

$$\text{tally } (n, Xt) = \frac{\text{Jumlah Produksi Tritium}}{\text{Jumlah Partikel Sumber}} = TBR$$

20
batch

5000
partikel

Pengayaan ^6Li	[10% , 30%, 50%, 70%, 90%]
Rasio Volume Moderator	[0%, 10% , 30%, 50%, 70%, 90%]
Rasio Volume Pengganda Neutron	[0%, 10% , 30%, 50%, 70%, 90%]

Analisis Data

1

Pengumpulan data hasil simulasi

2

Visualisasi dan penentuan pengaruh variabel bebas

3

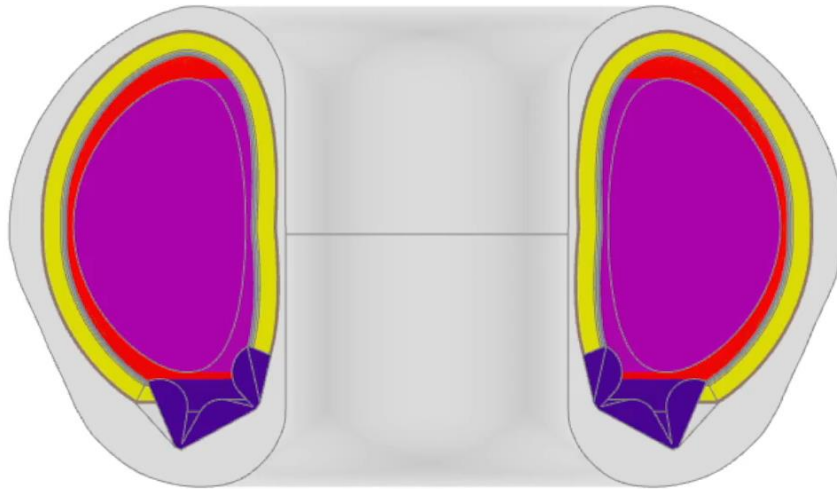
Penentuan desain *blanket* optimal

Pengayaan ^6Li **terendah**
 $TBR > 1$



UNIVERSITAS GADJAH MADA

Hasil dan Pembahasan – Kritikalitas Reaktor



Tampang lintang reaktor ITER untuk simulasi kritikalitas

Nilai kritikalitas :

0,0000181 \pm 0,00000007

10%

Pengayaan ^6Li

0%

Rasio Volume
Moderator

0%

Rasio Volume
Pengganda
Neutron

Reaktor ITER dalam kondisi **subkritis**

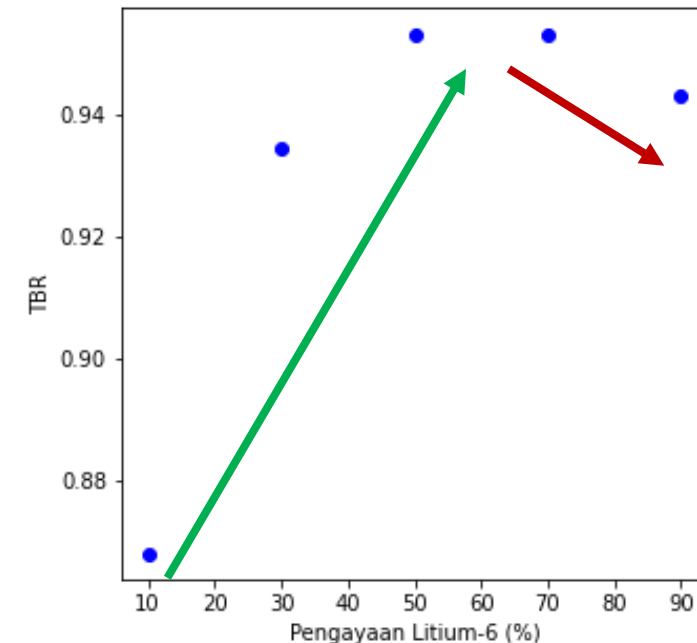
Desain *Blanket* ITER Pertama

Hasil simulasi desain *blanket* ITER pertama

Pengayaan ^6Li (%)	TBR
10	$0,868011 \pm 0,003139$
30	$0,934646 \pm 0,003598$
50	$0,953263 \pm 0,003482$
70	$0,952990 \pm 0,003802$
90	$0,943055 \pm 0,004092$

Terjadi moderasi dari ^7Li sehingga reaksi produksi tritium dari ^6Li mengalami peningkatan

Efek moderasi ^7Li berkurang sehingga fluks neutron cepat mengalami peningkatan

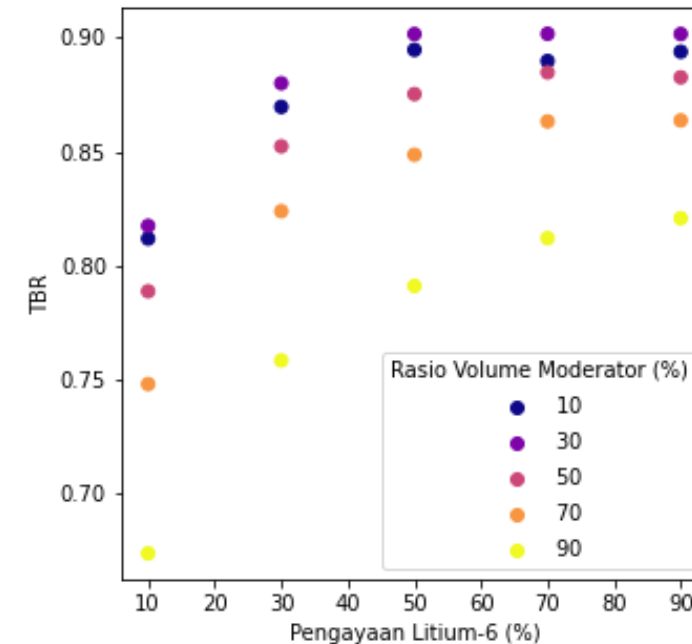


Plot hasil simulasi desain *blanket* ITER pertama

Desain *Blanket* ITER Kedua

5 hasil simulasi desain *blanket* ITER kedua dengan nilai TBR tertinggi

Pengayaan ^6Li (%)	Rasio Volume Moderator (%)	TBR
70	30	$0,901775 \pm 0,003576$
90	30	$0,901694 \pm 0,003750$
50	30	$0,901653 \pm 0,003594$
50	10	$0,894743 \pm 0,003382$
90	10	$0,893910 \pm 0,004338$

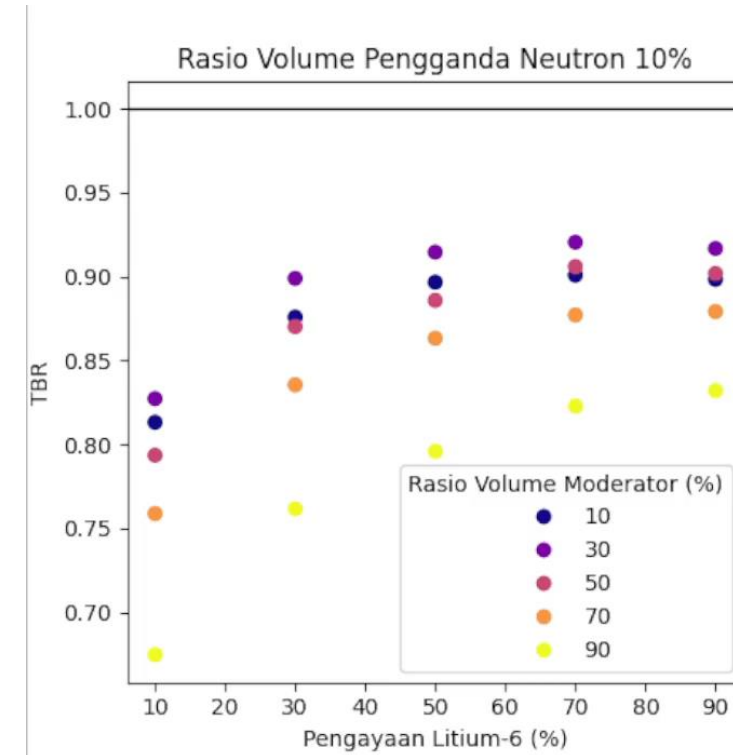


Plot hasil simulasi desain *blanket* ITER kedua

Desain *Blanket* ITER Ketiga

Terjadi **peningkatan nilai TBR** seiring dengan peningkatan **rasio volume pengganda neutron**. Neutron dari plasma D-T dengan energi 14,1 MeV memiliki energi yang cukup (8 MeV) untuk melakukan reaksi pengganda neutron dengan timbal alam.

Pengayaan ^6Li mampu **meningkatkan nilai TBR** karena neutron cepat dari plasma D-T dan reaksi pengganda neutron telah termoderasi menjadi neutron termal.

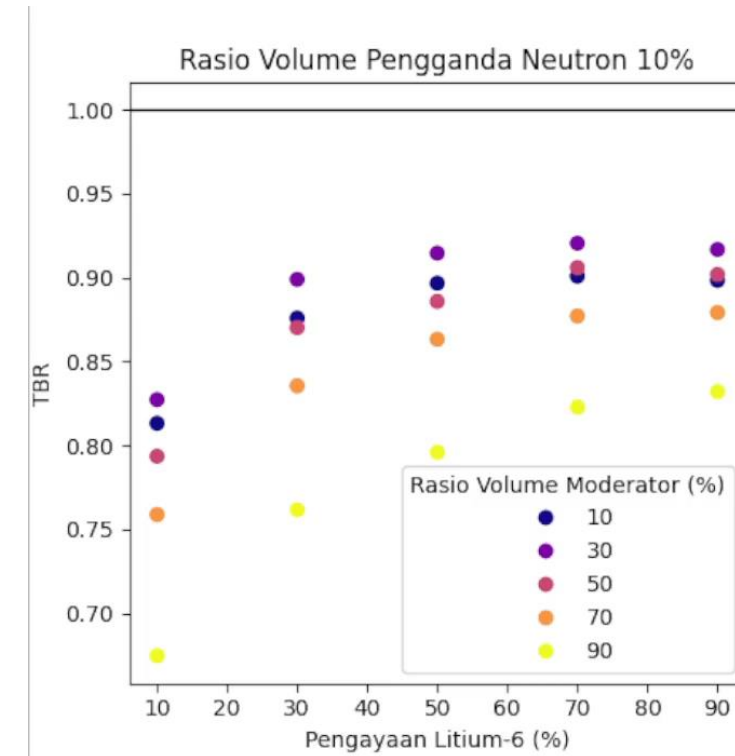


Plot hasil simulasi desain *blanket* ITER ketiga

Desain *Blanket* ITER Ketiga

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**. Bila nilai rasio volume moderator **terlalu tinggi**, efek **moderasi neutron menjadi lebih dominan** daripada efek penggandaan neutron.

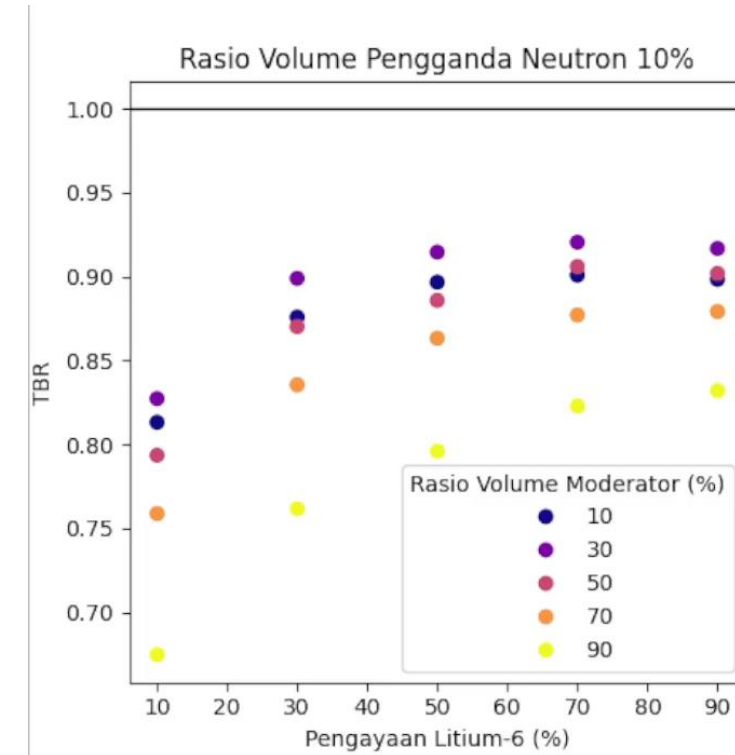


Plot hasil simulasi desain *blanket* ITER ketiga

Desain *Blanket* ITER Ketiga

5 hasil simulasi desain *blanket* ITER ketiga dengan nilai TBR tertinggi

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	$1,005552 \pm 0,004294$



Plot hasil simulasi desain *blanket* ITER ketiga

Kesimpulan

- Pengaruh pengayaan ^6Li berbanding lurus dengan nilai TBR *blanket* ITER.
- Pengaruh rasio volume pengganda neutron timbal alam berbanding lurus dengan nilai TBR *blanket* ITER.
- Pengaruh rasio volume moderator grafit terhadap nilai TBR *blanket* ITER adalah hingga nilai tertentu mampu meningkatkan nilai TBR akan tetapi mengalami penurunan nilai TBR setelahnya.
- 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 optimal untuk pembiakan tritium adalah pada konfigurasi pengayaan ^6Li , rasio volume moderator, dan rasio volume pengganda neutron masing – masing sebesar 70%, 50%, dan 90% dengan nilai TBR sebesar $1,005552 \pm 0,004294$.

Saran

- Perhitungan termal pada desain *blanket* ITER optimal untuk mengetahui kemampuan transfer kalor dari desain *blanket* tersebut.
- Perlu dilakukan analisis neutronik dengan memperhitungkan faktor kebocoran, pembakaran, dan penyimpanan tritium.
- 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.
- Dapat dilakukan optimasi desain *blanket* reaktor ITER menggunakan metode metaheuristik.



Terima Kasih

**Daftar
Hadir**



<https://bit.ly/DHPHusniZuhdi>

<https://bit.ly/GHHusniZuhdi>

LOCALLY ROOTED, GLOBALLY RESPECTED



UNIVERSITAS GADJAH MADA

Referensi

- [1] The World Bank. Population growth. Diakses dari <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW>, 12 Februari 2021.
- [2] H. Ritchie. Energy Mix. Diakses dari <https://ourworldindata.org/energy-mix> 12 Februari 2021.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change, “Global warming of 1.5°C,” 2018.
- [4] T. Tanabe, Tritium: Fuel of fusion reactors. 2016
- [5] ITER, “WHAT WILL ITER DO ?,” ITER, 2021. <https://www.iter.org/sci/Goals>.
- [6] D. J. Campbell, “The first fusion reactor: ITER,” Europhys. News, vol. 47, no. 5–6, hal. 28–31, 2016, doi: 10.1051/epn/2016504.
- [7] The International Atomic Energy Agency (IAEA), ITER EDA DOCUMENTATION SERIES No. 24, First Edit. Vienna: The International Atomic Energy Agency (IAEA), 2002.
- [8] M. A. Abdou, “TRITIUM BREEDING IN FUSION REACTORS,” Illinois, 1982.
- [9] K. Maki, “Energy multiplication in high tritium breeding ratio blanket with front breeder zone for fusion reactors,” 1988. doi: 10.1080/18811248.1988.9733557.
- [10] N. Zandi, H. Sadeghi, M. Habibi, I. Jalali, dan M. Zare, “Blanket Simulation and Tritium Breeding Ratio Calculation for ITER Reactor,” J. Fusion Energy, vol. 34, no. 6, hal. 1365–1368, 2015, doi: 10.1007/s10894-015-9970-z.

- [11] B. Soltani dan M. Habibi, "Tritium Breeding Ratio Calculation for ITER Tokamak Using Developed Helium Cooled Pebble Bed Blanket (HCPB)," J. Fusion Energy, vol. 34, no. 3, hal. 604–607, 2015, doi: 10.1007/s10894-015-9847-1.
- [12] 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, doi: 10.1063/1.4930725.
- [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 MENCAPI PEMBIAKAN TRITIUM MENGGUNAKAN METODE MONTE CARLO," Universitas Gadjah Mada, 2017
- [15] 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 Eng. Des., vol. 137, no. December, hal. 243–256, 2018, doi: 10.1016/j.fusengdes.2018.09.014.
- [16] Japan Atomic Energy Agency, "JENDL-4.0," Nuclear Data Center, 2019. <https://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/j40.html>.
- [17] 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.
- [18] J. Shimwell et al., "The Paramak: Automated parametric geometry construction for fusion reactor designs," F1000Research, vol. 10, 2021, doi: 10.12688/f1000research.28224.1.
- [19] Paramak-neutronics contributors, "openmc-dagmc-wrapper - Paramak-neutronics 1.0 documentation," Paramak-neutronics, 2021. <https://paramak-neutronics.readthedocs.io/en/latest/> (diakses Sep 05, 2021).
- [20] neutronics-material-maker contributors, "Neutronics Material Maker - NeutronicsMaterialMaker 1.0 documentation," Neutronics Material Maker, 2021. <https://neutronics-material-maker.readthedocs.io/en/latest/> (diakses Sep 05, 2021).