BAB II. Studi Pustaka

Ilmu pengetahuan merupakan produk budaya yang bersifat kumulatif, artinya ia merupakan karya

dari banyak orang yang didokumentasikan dalam pustaka (misal buku teks, jurnal ilmiah, prosiding,

laporan teknis/penelitian, majalah ilmiah dan dokumen paten). Oleh karena itu sebelum melakukan

penelitian sebaiknya dilakukan studi terhadap pustaka yang terkait dengan tema yang akan diteliti

untuk memperoleh data/fakta tentang:

• apa-apa yang sudah dilakukan oleh ilmuwan atau peneliti sebelumnya dengan sudut

pandang atau aspek penelitian yang beragam beserta hasil-hasil yang diperolehnya, dan

• apa-apa yang perlu diteliti lebih lanjut:

(1) karena adanya pembatasan-pembatasan pada penelitian sebelumnya, atau

(2) dengan sudut pandang atau aspek penelitian yang berbeda.

Dari hasil studi pustaka tersebut akan diperoleh gambaran mengenai langkah yang tepat untuk

melaksanakan penelitian baik dari sisi sasaran/tujuan maupun metodologinya.

Perlu diperhatikan, pustaka yang diacu harus dipastikan berasal dari sumber yang terpercaya. Untuk

itu, peneliti harus bisa membedakan antara data/fakta dan opini/pendapat.

Hanya sumber yang memberikan informasi/fakta/data sajalah yang boleh diacu, sedangkan sumber

yang hanya menyampaikan opini/pendapat tidak boleh diacu. Dengan demikian informasi yang

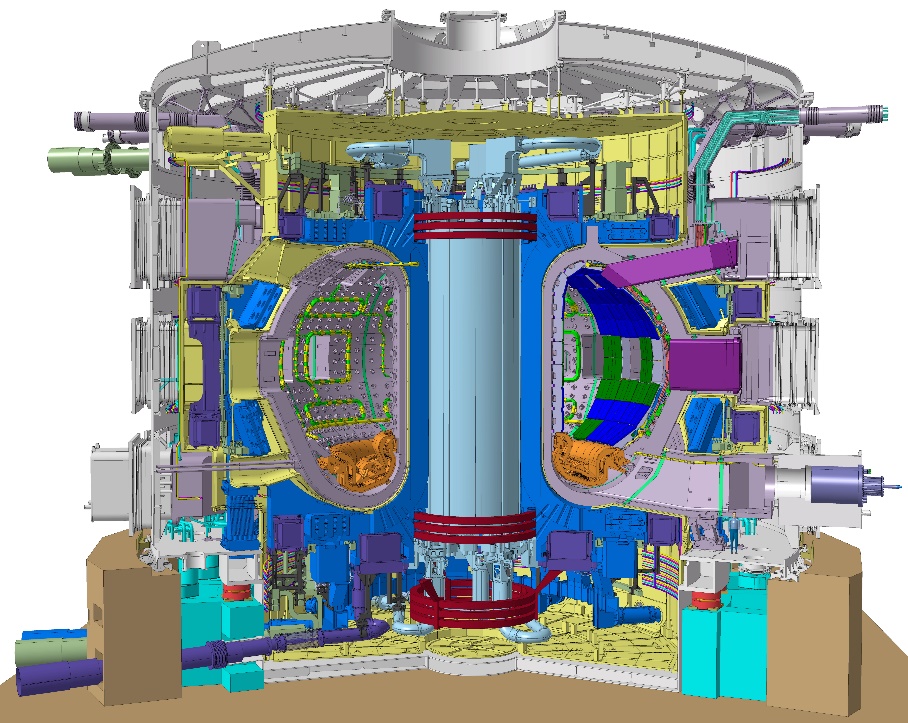
diperoleh dari sumber manapun, termasuk internet, harus dipilah-pilah dan diambil hanya yang

menyajikan data/fakta dengan benar didukung oleh penelitian, bukan sekedar opini/pendapat.

# BAB II

**TINJAUAN PUSTAKA**

## II.1. Desain ITER



Gambar 1 Potongan Tokamak ITER [1]

ITER adalah riset fusi nuklir internasional dan megaproyek yang bertujuan untuk mengembangkan dan mendemonstrasikan teknologi energi fusi. Megaproyek ini melakukan konstruksi pertamanya di Cadarache, Prancis pada tahun 2013 dan direncanakan akan selesai pada tahun 2025. ITER merupakan reaktor berbentuk tokamak yang didesain untuk menghasilkan pulsa panjang, plasma yang memanjang (*elongated*), dan menggunakan divertor poloidal tipe *single null*. Pulsa panjang berkorelasi dengan waktu bakar yang relatif cukup panjang untuk tokamak, yaitu 400 detik hingga 600 detik. Bentuk plasma yang dihasilkan oleh ITER berbentuk memanjang dengan nilai parameter *elongation* ITER adalah 1,85 [2]. Tabel 1 menunjukkan parameter desain ITER.

Tabel 1 Parameter Desain ITER [2]

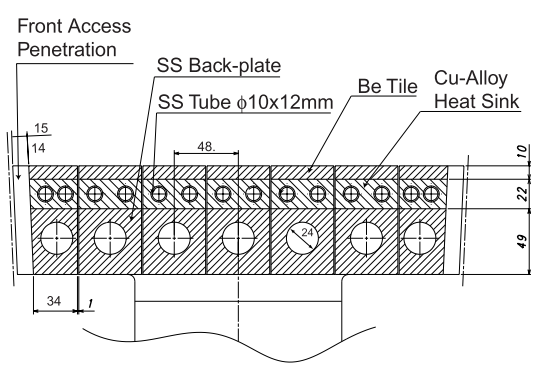
|  |  |
| --- | --- |
| Daya Fusi (P) | 500 MW |
| Arus Plasma (IP) | 15 MA |
| Medan Magnet Toroidal (BT) | 5.3 T |
| Radius Mayor (R0) | 620 cm |
| Radius Minor (a) | 200 cm |
| *Elongation* (κ) | 1.85 |
| *Triangularity* (δ) | 0.49 |
| Waktu Bakar | 400-600 s |
| Faktor Perolehan Energi Fusi (Q) | 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, 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 [2] dengan berat total bejana vakum sebesar 8.448 ton [3]. Material penyusun bejana vakum sebagian besar merupakan SS 316LN yang digunakan untuk membuat bejana utama dan struktur – struktur porta. Bagian bejana tekan lainnya berupa perisai primer, perisai masukan feromagnetik, dan penyambung saluran , secara berurutan, menggunakan material SS 30467, SS 430, dan SS 304 [3].

*Divertor* adalah komponen dalam sebuah tokamak atau sebuah 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*, alloy tembaga untuk penyerap kalor, dan SS 316 LN untuk struktur utama divertor [3].

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 Nb3Sn. Kumparan PF dan CCs menggunakan superkonduktor NbTi. Semua kumparan beroperasi dengan cara didinginkan menggunakan helium superkritis hingga suhu 4,4 K [3].

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 [3]. Komponen modul blanket secara garis besar terdiri dari *first wall*, moderator, pengganda neutron, fluida blanket, dan reflektor.



Gambar 2 Tampang lintang panel first wall ITER [3]

*First wall* merupakan bagian modul blanket yang akan menjadi perisai termal dan neutron pertama pada sistem blanket. Pada ITER, *first wall* terdiri dari material penghadap plasma, pembuang kalor, dan struktur yang masing – masing tersusun dari material berilium, CuAl25 atau CuCrZr, dan SS 316LN. 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 [4].

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 [3]. 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, 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. Salah satu penelitian blanket reaktor fusi nuklir pertama dilakukan pada *International Tokamak Reactor* (INTOR) di Illionis, Amerika Serikat pada tahun 1982 [5]. Pada penelitian tersebut diakukan penelitian 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 Li17Pb83 dan Li2O (+Be) dengan nilai TBR secara berurutan yang bisa dicapai adalah 1,3 untuk kedua material. Dalam penentuan pengganda neutron untuk reaktor fusi nuklir, digunakan fluida blanket LiAlO2 dengan pengayaan 6Li 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 [5]. Selain temuan di atas, penelitian tersebut menunjukkan bahwa ketebalan *first wall* 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 6Li tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai TBR [5]–[7].

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% [8]. Dalam penelitian tersebut digunakan material blanket dan pengganda neutron berupa Li2O dan Be. Temuan lainnya dari penelitian tersebut adalah pengganda neutron Be lebih baik dalam menggandakan energi daripada pengganda neutron Pb, pengayaan 6Li hingga 50% hanya menaikkan 5% pengganda energi, dan kanal pendingin dalam pengganda neutron memiliki efek yang kecil terhadap pengganda energi [8].

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 [9] menggunakan desain modul blanket yang tersusun dari kombinasi : litium alam, Li4SiO4 (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 [9].Penelitian serupa yang dilakukan oleh Zandi, N et al. menyimulasikan jenis blanket HCPB pada tokamak ITER menggunakan material blanket berupa Li4SiO4 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 [10].

Penelitian yang dilakukan oleh Maymunah, Indah Rosidah et al. berhasil menentukan nilai TBR untuk tokamak ITER. Pada penelitian tersebut digunakan material blanket berupa Li2TiO3 berbentuk padat dan pengganda neutron Be atau Pb. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa ketebalan blanket pembiak berbanding lurus dengan nilai TBR, pengayaan 6Li dengan nilai TBR tertinggi berada pada rentang 60% karena pada pengayaan melebihi 60% populasi 7Li yang dapat berperan sebagai moderator tambahan mulai berkurang, dan penggunaan material Pb sebagai pengganda neutron mampu meningkatkan nilai TBR sebanyak 5% [11]. Nilai TBR yang didapat dari penelitian tersebut adalah 1,22 – 1,55 [11].

Beberapa penelitian rekayasa blanket ITER untuk menentukan desain yang optimal juga telah dilakukan. Penelitian yang dilakukan oleh Stevan, Wijaya menggunakan material blanket sekaligus pendingin berupa Litium Florida, pengganda neutron Be2C, dan karbon sebagai moderator. Simulasi dilakukan menggunakan kode MCNPX dan didapat nilai TBR untuk pengayaan 6Li sebesar 15% adalah 1,042 [6]. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Ali, Muhamad menggunakan material blanket dan pengganda neutron berupa garam cair FliBe serta bola grafit sebagai moderator. Simulasi dilakukan menggunakan kode MCNPX dan didapat nilai TBR sebesar 1,107 untuk konfigurasi pengayaan 6Li 100% dan komposisi BeF2:LiF 75:25 [7].

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 LiF dengan pengayaan 6Li 60% dan untuk material blanket Li4SiO4 dengan pengayaan 6Li 90% dengan pengganda neutron timbal alam cair secara berurutan sebesar 1,21 dan 1,15 [12].

Penelitian terkait pembelajaran mesin yang dilakukan oleh Mánek, Petr et al. telah berhasil melakukan pembelajaran mesin menggunakan berbagai algoritma untuk membuat model pendekatan hasil simulasi neutronik TBR yang murah dan berkualitas tinggi. Model pembelajaran mesin tersebut dapat digunakan sebagai pengganti simulasi Monte Carlo untuk kasus spesifik. Salah satu algoritma pembelajaran mesin yang memiliki performa baik dalam penelitian tersebut adalah *Gradient Boosting Tree* (GBT)[13]. Salah satu program yang menggunakan algoritma GBT adalah *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost).

Penelitian ini akan menggunakan LiF sebagai fluida blanket pembiak, timbal alam sebagai pengganda neutron, grafit sebagai reflektor dan moderator, dan SS316 sebagai material divertor, bejana vakum, dan *first wall*. Program XGBoost akan digunakan untuk membuat model pembelajaran mesin.

[1] ITER, “THE LARGEST TOKAMAK IN THE WORLD,” *ITER*, 2013. https://www.iter.org/album/Media/7 - Technical (diakses Agu 18, 2021).

[2] D. J. Campbell, “The first fusion reactor: ITER,” *Europhys. News*, vol. 47, no. 5–6, hal. 28–31, 2016, doi: 10.1051/epn/2016504.

[3] The International Atomic Energy Agency (IAEA), *ITER EDA DOCUMENTATION SERIES No. 24*. 2002.

[4] J. Heirbaut, “How to Line a Thermonuclear Reactor,” *American Association for the Advancement of Science*, 2012. https://www.sciencemag.org/news/2012/08/how-line-thermonuclear-reactor.

[5] M. A. Abdou, “TRITIUM BREEDING IN FUSION REACTORS,” Illinois, 1982.

[6] S. WIJAYA, “OPTIMASI DESAIN GEOMETRI BLANKET REAKTOR FUSI UNTUK PEMBIAKAN TRITIUM MENGGUNAKAN METODE MONTE CARLO,” Universitas Gadjah Mada, 2015.

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

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

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] F. A. Hernández dan P. Pereslavtsev, “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.

[13] P. Mánek, G. Van Goffrier, V. Gopakumar, N. Nikolaou, J. Shimwell, dan I. Waldmann, “Fast Regression of the Tritium Breeding Ratio in Fusion Reactors,” 2021, [Daring]. Tersedia pada: http://arxiv.org/abs/2104.04026.