**BAB I. Pendahuluan**

**a. Latar Belakang**

Berisi uraian tentang gambaran permasalahan/kebutuhan dan hal-hal yang mendasari pentingnya dilakukan penelitian ini, atau alasan mengapa penelitian ini penting untuk dilakukan.

**b. Perumusan Masalah**

Berisi uraian tentang:

1) identifikasi permasalahan/kebutuhan, dan

2) pendekatan (approach) penyelesaiannya.

Identifikasi permasalahan/kebutuhan perlu dilakukan karena apa yang tampak di permukaan sebagai permasalahan/kebutuhan belum tentu merupakan akar permasalahan/kebutuhan yang sesungguhnya.

Ia bisa jadi muncul sebagai efek dari sebab yang lebih mendasar. Padahal, penyelesaian terhadap masalah/kebutuhan yang dirumuskan secara tidak tepat tidak akan menyelesaikan masalah atau menjawab kebutuhan. Oleh karena itu, agar diperoleh penyelesaian efektif, maka masalah/kebutuhan harus dirumuskan dengan tepat. Pendekatan penyelesaian masalah menggambarkan secara singkat cara atau metode yang akan ditempuh untuk menyelesaikan akar permasalahan yang telah berhasil diidentifikasi. Cakupan permasalahan bisa sangat luas, karena ia bisa dilihat dari berbagai sudut pandang, dan boleh jadi tidak bisa dilakukan pelaksanaannya dalam kerangka Tugas Akhir. Oleh karena itu, pendekatan yang diusulkan perlu dibatasi menurut cara pandang tertentu yang dianggap memadai atau layak.

**c. Tujuan**

Berisi uraian tentang tujuan yang akan dicapai dalam penelitian.

**d. Manfaat**

Berisi uraian tentang manfaat yang dapat diperoleh bila tujuan penelitian tercapai.

# 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 juta 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. Kebutuhan pangan akan meningkat karena keterbatasan lahan untuk menanam komoditas pangan, air akan menjadi semakin langka karena musim kemarau yang berkepanjangan ataupun pencemaran air, migrasi besar-besaran karena kerapatan penduduk yang sudah tidak bisa dibendung lagi sangat mungkin terjadi terutama di daerah padat penduduk, dan berbagai masalah lainnya yang tidak pernah kita bayangkan sebelumnya. Salah satu masalah 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. Terdapat satu permasalahan besar lainnya apabila kita sembarangan memilih dan menggunakan energi. Masalah tersebut adalah Perubahan Iklim.

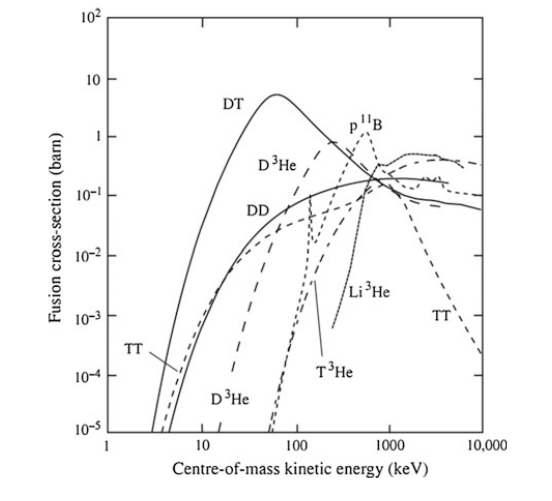
Perubahan Iklim dapat diartikan sebagai terjadinya perubahan keadaan iklim yang dapat diidentifikasi oleh perubahan rerata dan/atau variabilitas dari sifat – sifat iklim pada waktu yang cukup lama, biasanya beberapa dekade atau lebih [7]. Beberapa indikator terjadinya perubahan iklim antara lain adalah peningkatan suhu udara rerata, perubahan siklus air, perubahan tingkat keasaman air laut, dan perubahan ketinggian permukaan air laut. Melalui indikator – indikator tersebut dapat diprediksi pola iklim di masa depan. 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 [8]. Dampak negatif dari peningkatan suhu permukaan bumi pada akhirnya akan menuntun manusia beserta spesies – spesies lainnya kepada kesengsaraan hingga kepunahan. Berdasarkan data dari IUCN, perubahan iklim saat ini mempengaruhi 19% spesies yang terdaftar sebagai spesies yang terancam punah [9]. Bila masalah perubahan iklim tidak ditangani dengan serius, kemungkinan kepunahan spesies terancam punah akan semakin meningkat.

Peningkatan suhu permukaan bumi terjadi karena sinar matahari yang masuk ke atmosfer ke bumi tidak dapat dipantulkan kembali ke luar angkasa. Hal ini dapat terjadi karena terdapat gas rumah kaca seperti CO2, CO, NOx, SOx, dan uap air dalam jumlah melebih batas normal di atmosfer bumi. Salah satu penyumbang terbesar emisi gas rumah kaca adalah sektor energi, terutama energi fosil. Sektor energi merupakan penyumbang terbesar emisi CO2 di udara . Sumber energi fosil juga turut serta memproduksi gas lainnya seperti CO, NOx, SOx, serta partikel – partikel kecil seperti PM2.5 yang berbahaya bagi kesehatan manusia [10], [11]. Dengan sumber daya yang terbatas dan berbagai permasalahan yang ditimbulkan dari penggunaan sumber energi fosil, penggunaan sumber energi fosil haruslah dikurangi dan digantikan dengan sumber energi lainnya yang bersifat 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 sebagaisumber energi berkelanjutan. Salah satu kelemahan dari sebagian besar energi berkelanjutan adalah tidak sanggup untuk memenuhi beban dasarkebutuhan 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 dasarkebutuhan 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 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 (235U). 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 temperatur 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 [12]

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 alfa 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 [13].

Meskipun reaksi D-T merupakan reaksi fusi yang paling memungkinkan bila dilihat dari tampang lintang dan temperaturnya terdapat suatu tantangan lainnya yang bersifat universal untuk seluruh jenis pembangkit energi yaitu ketersediaan sumber daya. 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 [12]. 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 megaproyek 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 [14]. Hingga saat ini masih belum dipastikan desain blanket pembiak tritium yang akan digunakan pada ITER.

Selama beberapa dekade terakhir, perkembangan kemampuan komputasi terus meningkat. Salah satu bidang komputasi yang mengalami peningkatan beberapa tahun ini adalah pembelajaran mesin. Pembelajaran mesin adalah salah satu sub bidang ilmu komputer yang berfokus pada pembuatan algoritma yang berguna dan bergantung pada kumpulan contoh fenomena nyata. Fenomena nyata tersebut dapat berasal dari alam, industri, dan/atau hasil algoritma lainnya [15]. Penggunaan pembelajaran mesin juga mulai memasuki ranah ilmu nuklir. Salah satu penelitian yang dilakukan oleh Petr Mánek dalam *Fast Regression of the Tritium Breeding Ratio in Fusion Reactors* berhasil memanfaatkan berbagai model pembelajaran mesin untuk membuat model regresi yang berfungsi untuk memprediksi nilai *Tritium Breeding Rasio* (TBR) dari suatu reaktor fusi nuklir [16].

## I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh pengayaan 6Li pada fluida blanket pembiak terhadap nilai TBR?
2. Bagaimana pengaruh pengganda neutrontimbal alam terhadap nilai TBR?
3. Bagaimana kombinasi pengayaan 6Li dan pengganda neutrontimbal alam yang paling 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. Tritiumyang bocor diabaikan dalam penelitian ini.
3. Pemodelan dilakukan menggunakan program OpenMC versi 0.13.0dev.
4. Pembuatan model geometri menggunakan paket python Paramak versi 0.2.10.
5. Pembuatan material menggunakan paket python *neutronics-material-maker* versi 0.3.7.
6. Analisis data dilakukan menggunakan pustaka dan paket python XGBoost versi 1.4.2.

## I.4 Tujuan Penelitian

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

1. Mengetahui pengaruh pengayaan 6Li pada fluida blanket pembiak terhadap nilai TBR.
2. Mengetahui pengaruh pengganda neutrontimbal alam terhadap nilai TBR.
3. Mengetahui kombinasi pengayaan 6Li dan pengganda neutrontimbal alam yang paling optimal.

## I.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu membantu perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di bidang energi fusi nuklir serta mampu meningkatkan ketertarikan mahasiswa secara khusus dan masyarakat secara umum terhadap teknologi reaktor fusi nuklir dan pembelajaran mesin. Selain itu, penelitian secara khusus diharapkan mampu mendapatkan kombinasi pengayaan 6Li dan pengganda neutrontimbal alam yang paling optimal untuk memenuhi kebutuhan tritium pada reaktor fusi nuklir.

[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. Richie, “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] United Nations, “The Sustainable Development Goals Report 2020,” 2020.

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

[8] 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.

[9] International Union for Conservation of Nature, “Species and Climate Change,” *International Union for Conservation of Nature*, 2019. https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/species-and-climate-change.

[10] U.S. Environmental Protection Agency, “Overview of Greenhouse Gases,” *U.S. Environmental Protection Agency*. https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases.

[11] U.S. Environmental Protection Agency, “Particulate Matter (PM) Basics,” *U.S. Environmental Protection Agency*. https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics.

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

[13] S. Orlandi, “ITER Project: International Cooperation and Energy Investment,” in *Springer Proceedings in Physics*, 2020, vol. 243, hal. 169–191, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-42913-3.

[14] ITER ORGANIZATION, “WHAT WILL ITER DO ?,” *ITER ORGANIZATION*, 2021. https://www.iter.org/sci/Goals.

[15] A. Burkov, *The Hundred-Page Machine Learning Book*, First Edit. Andriy Burkov, 2019.

[16] 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.