**OPTIMASI DESAIN *BLANKET* REAKTOR FUSI UNTUK PEMBIAKAN TRITIUM MENGGUNAKAN METODE MONTE CARLO TERKOPEL MACHINE LEARNING**

**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**

# HALAMAN PERSEMBAHAN

# KATA PENGANTAR

Puji syukur tak terhingga penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul “OPTIMASI DESAIN BLANKET REAKTOR FUSI UNTUK PEMBIAKAN TRITIUM MENGGUNAKAN METODE MONTE CARLO TERKOPEL MACHINE LEARNING” sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi jenjang pendidikan S-1 Teknik Nuklir Prodi Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada. Dalam pelaksanaan dan penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak, baik secara eksplisit maupun implisit. Oleh karena itu penulis memberikan ucapan terima kasih secara tulus kepada :

1. Dr. Ir. Andang Widi Harto, M.T. dan Dr. Alexander Agung, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing yang senantiasa membimbing, memberikan ilmu, masukan serta motivasi selama pengerjaan tugas akhir dan penulisan skripsi berlangsung,
2. Bapak Dr-Ing Singgih Hawibowo dan Bapak \_\_ selaku dosen penguji Tugas Akhir,
3. Ibu Ir. Anung Muharini M.T selaku dosen Pembimbing Akademik yang senantiasa memberikan masukan dan arahan terkait rencana studi setiap semesternya,
4. Bapak Dr. Ir. Alexander Agung, S.T., M.Sc. selaku Ketua Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika,
5. Seluruh dosen, staf, dan karyawan Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada yang telah membantu menyediakan fasilitas yang digunakan selama pengerjaan skripsi,
6. Kedua orang tua penulis, Bapak Sufiyadi dan Ibu Dwi Suryani serta kakak perempuan, Annisa Istiqomah yang selalu menjadi motivasi penulis untuk terus belajar dan menuntaskan studi,

DAFTAR ISI

[HALAMAN PERSEMBAHAN 2](#_Toc76468543)

[KATA PENGANTAR 3](#_Toc76468544)

[BAB I PENDAHULUAN 5](#_Toc76468545)

[I.1 Latar Belakang 5](#_Toc76468546)

[I.2 Rumusan Masalah 8](#_Toc76468547)

[I.3 Batasan Masalah 8](#_Toc76468548)

[I.4 Tujuan Penelitian 8](#_Toc76468549)

[I.5 Manfaat Penelitian 8](#_Toc76468550)

[BAB II TINJAUAN PUSTAKA 10](#_Toc76468551)

[BAB III DASAR TEORI 11](#_Toc76468552)

[III.1 Reaktor Fusi Nuklir 11](#_Toc76468553)

[III.2 *Blanket* Reaktor Fusi Nuklir 11](#_Toc76468554)

[III.3 Pembiakan Tritium 11](#_Toc76468555)

[III.4 Regresi Linear dan *Extra Gradient Boosting* 11](#_Toc76468556)

[BAB IV METODOLOGI PENELITIAN 12](#_Toc76468557)

[IV.1 Jenis Penelitian 12](#_Toc76468558)

[IV.2 Metode Penelitian 12](#_Toc76468559)

[IV.3 Alur Penelitian 13](#_Toc76468560)

[IV.4 Biaya Penelitian 13](#_Toc76468561)

[IV.5 Jadwal Penelitian 13](#_Toc76468562)

[BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN 14](#_Toc76468563)

[BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 15](#_Toc76468564)

[DAFTAR PUSTAKA 16](#_Toc76468565)

DAFTAR GAMBAR

[Gambar 1 Tampang lintang fusi untuk berbagai jenis reaksi fusi [5] 10](#_Toc76773439)

[Gambar 2 Diagram alir pelaksanaan penelitian tugas akhir 16](#_Toc76773440)

DAFTAR TABEL

**No table of figures entries found.**

DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

## DAFTAR LAMBANG

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Lambang | Keterangan | Satuan |
| 𝜎 | Tampang lintang mikroskopis | b |
| 𝜌 | Densitas | g·cm-3 |
| N | Kerapatan nuklida medium | atom·cm-3 |
| Na | Bilangan Avogadro | atom·mol-1 |
| A | Nomor massa nuklida | gram·mol-1 |
| Σ | Tampang lintang makroskopis | cm-1 |
| 𝜙 | Fluks neutron | neutron·cm-2·s-1 |
| 𝑛 | Densitas neutron | neutron·cm-3 |
| 𝑣 | Kelajuan neutron | neutron·cm·s-1 |
| R’’’ | Laju Reaksi | atom·cm-3·s-1 |
| R | Jumlah produk hasil reaksi | atom |
| V | Volume | cm3 |
| Lambang | Keterangan |  |
| D | Deuterium |  |
| T | Tritium |  |
| n | Neutron |  |
| 𝛼 | Alfa |  |
| eV | Elektron volt |  |
| Li-6 | Litium-6 |  |
| Li-7 | Litium-7 |  |
| H | Hidrogen |  |
| O | Oksigen |  |
| C | Grafit |  |
| LiF | Litium florida |  |
| Pb | Timbal |  |
| SS316 | Stainless steel 316 |  |

## DAFTAR SINGKATAN

|  |  |
| --- | --- |
| Singkatan | Kepanjangan |
| ITER | *International Thermonuclear Experimental Reactor* |
| TBR | *Tritium Breeding Ration* |
| TF | *Toroidal Field* |
| PF | *Poloidal Field* |
| CS | *Central Selenoid* |
| XGBoost | *Extra Gradient Boost* |

# BAB I PENDAHULUAN

## I.1 Latar Belakang

**Perubahan Iklim dan Peningkatan Kebutuhan Energi**

Peningkatan Populasi

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 bisa dibendung lagi sangat mungkin untuk terjadi terutama di daerah rapat 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.

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 rendah karbon hanya menyumbang 15,7% [3]. Padahal bahan bakar fosil pada suatu saat akan habis (cek referensi). Jika kita terlalu bergantung kepada bahan bakar fosil sebagai sumber energi, maka kita akan kehabisan energi dalam rentang waktu 100 tahun (cek referensi). Masalah tersebut akan bertambah besar mengingat konsumsi energi dunia tiap tahunnya selalu mengalami peningkatan. Berdasarkan data dari IEA, terjadi peningkatan konsumsi energi dari \_\_\_ hingga \_\_\_ pada tahun \_\_\_ di seluruh dunia (cek referensi). (asumsi) Hal tersebut dapat kita kaitkan dengan peningkatan populasi penduduk dunia saat ini. Semakin banyak populasi manusia, semakin banyak pula 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 [4]. 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 [4]. Mereka masih menggunakan kayu bakar ataupun bahan bakar kotor lainnya untuk memasak. Dibutuhkan peningkatan ketersediaan energi untuk memenuhi keutuhan hidup umat manusia. Akan tetapi, tidak sembarang sumber energi dapat kita gunakan karena terdapat satu masalah besar lainnya jika kita sembarangan memilih dan menggunakan energi. Masalah tersebut adalah Perubahan Iklim.

Perubahan Iklim dan Peran Sektor Energi

Perubahan Iklim dapat diartikan sebagai terjadinya fluktuasi iklim suatu daerah dalam rentang setidaknya 30 tahun (cek referensi). 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 (cek referensi). Melalui indikator – indikator tersebut kita dapat memprediksi pola iklim di masa depan. Berdasarkan laporan IPCC dalam \_\_\_ diperkirakan bila kita tidak melakukan perubahan yang signifikan guna mengatasi perubahan iklim, maka suhu permukaan bumi dapat meningkat hingga 2°C pada tahun 2100 (cek referensi). Efek domino dari peningkatan suhu permukaan bumi pada akhirnya akan menuntun manusia beserta spesies – spesies lainnya kepada kesengsaraan hingga kepunahan. Berdasarkan data dari IUCN diperkirakan telah terjadi kepunahan \_\_% spesies akibat perubahan iklim (cek referensi). Bila masalah perubahan iklim tidak ditangani dengan serius, mungkin tidak akan ada hari untuk anak cucu kita kelak.

Peningkatan suhu permukaan bumi terjadi karena foton hasil reaksi fusi di matahari yang masuk ke atmosfer ke bumi tidak dapat dipantulkan 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. Pembangkitan energi saat ini masih didominasi oleh pembangkit energi berbahan bakar fosil. Berdasarkan laporan IPCC pada \_\_\_, sektor energi merupakan penyumbang terbesar emisi CO2 dengan total emisi CO2 sebesar \_\_\_ (cek referensi). Selain itu, sumber energi bahan bakar fosil juga turut serta memproduksi gas lainnya seperti CO, NOx, SOx, serta partikel – partikel kecil seperti PM2.5 yang berbahaya bagi kesehatan manusia (cek referensi). 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 dan bersifat hijau.

Keberlanjutan Energi

Diperlukan sumber energi yang mampu memproduksi energi untuk jangka waktu lama (relatif seberapa lama?) 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, hidro, geotermal, dan fisi nuklir. Energi surya, angin, hidro, dan geotermal termasuk dalam kelompok energi berkelanjutan atau lebih dikenal sebagai *sustaninable energy*. Salah satu kelemahan dari sebagian besar energi berkelanjutan adalah tidak sanggup untuk memenuhi *baseload* kebutuhan energi. Untuk memenuhi kebutuhan *baseload*¸ diperlukan sumber energi yang proses pembangkitan energinya tidak tergantung dengan kondisi alam. Energi berkelanjutan seperti energi surya, angin, dan hidro sangat bergantung terhadap kondisi alam untuk beroperasi secara optimal. Sedangkan sumber energi geotermal hanya mampu beroperasi di tempat – tempat tertentu yang di bawahnya memiliki cadangan panas bumi yang berlimpah. Dua sumber energi yang mampu menyuplai *baseload* 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 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.

**Teknologi Reaktor Fusi Nuklir**

Penjelasan Reaksi Fusi

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.

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 unsur 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 [5].



Gambar 1 Tampang lintang fusi untuk berbagai jenis reaksi fusi [5]

Meskipun reaksi D-T merupakan reaksi fusi yang paling mudah bila dilihat dari tampang lintang dan temperaturnya terdapat suatu tantangan lainnya yang bersifat universal untuk seluruh jenis pembangkit energi yaitu ketersediaan sumber daya. Reaksi DT memerlukan

**ITER**

Salah satu mega proyek terbesar umat manusia adalah pembangunan fasilitas riset dan pengembangan reaktor fusi nuklir berjenis pengungkung magnetik *International Thermonuclear Experimental Reactor* (ITER). Negara-negara yang berkontribusi dalam pembangunan ITER adalah China, Uni Eropa, India, Jepang, Korea, Rusia, dan Amerika Serikat. Terdapat setidaknya lima tujuan dari pembangunan ITER, yaitu:

1. Memproduksi daya fusi sebesar 500 MW.
2. Mendemonstrasikan pengoperasian teknologi yang terintegrasi untuk pembangkit daya fusi nuklir.
3. Menciptakan Plasma D-T yang terus-menerus menggunakan *internal heating*.
4. Menguji pembiakan tritium.
5. Mendemonstrasikan karakteristik keselamatan perangkat fusi.

**Pembiakan Tritium**

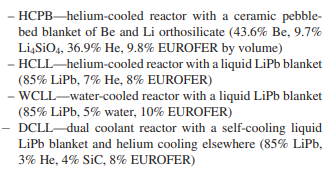
Permasalahan Sumber Daya Alam

Teknologi Pembiakan

Apa itu Blanket Pembiak

Jenis Blanket Pembiak

*Tritium Breeding Ratio*



**Pembelajaran Mesin**

Definisi Pembelajaran Mesin

Metode *Extra Gradient Boosting* (XGBoost)

## I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh pengayaan 6Li terhadap nilai TBR?
2. Bagaimana pengaruh *neutron multiplier* Pb alam terhadap nilai TBR?
3. Bagaimana kombinasi pengayaan 6Li dan *neutron multiplier* Pb alam yang paling optimal?

## I.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari Tugas Akhri ini adalah :

1. Pemodelan reaktor fusi nuklir berdasarkan reaktor ITER dengan bentuk plasma *Single-Null* yang telah disederhanakan.
2. Tritiumyang bocor diabaikan dalam penelitian ini.
3. Tritium yang dihitung adalah tritium yang berasal dari reaksi neutron dengan 6Li.

## I.4 Tujuan Penelitian

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

1. Mengetahui pengaruh pengayaan 6Li terhadap nilai TBR.
2. Mengetahui pengaruh *neutron multiplier* Pb alam terhadap nilai TBR.
3. Mengetahui kombinasi pengayaan 6Li dan *neutron multiplier* Pb 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. Selain itu, penelitian secara khusus diharapkan mampu mendapatkan kombinasi pengayaan 6Li dan *neutron multiplier* Pb alam yang paling optimal untuk memenuhi kebutuhan tritium pada reaktor fusi nuklir.

# BAB II TINJAUAN PUSTAKA

## II.1. Reaktor Fusi

Reaktor Fusi yang dikembangkan di seluruh dunia masih

## II.2. Desain ITER

# BAB III DASAR TEORI

## III.1 Reaktor Fusi Nuklir

## III.2 *Blanket* Reaktor Fusi Nuklir

## III.3 Pembiakan Tritium

## III.4 Pembelajaran Mesin

## III.5 *Extra Gradient Boosting* (XGBoost)

https://machinelearningmastery.com/xgboost-for-regression/

# BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

## IV.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan metode optimasi *blanket* reaktor fusi nuklir untuk mendapatkan desain *blanket* yang optimal. Aspek yang akan dikembangkan pada penelitian ini adalah penggabungan Metode Monte Carlo dengan algoritma *Machine Learning Convulotonal Neutal Networks*. Adapun pada penelitian lain hanya digunakan perangkat lunak MCNP untuk melakukan pemodelan dan simulasi partikel dan analisis data secara terpisah menggunakan perangkat lunak berbasis *spreadsheet* (seperti Microsoft Excel dan Google Spreadsheet).

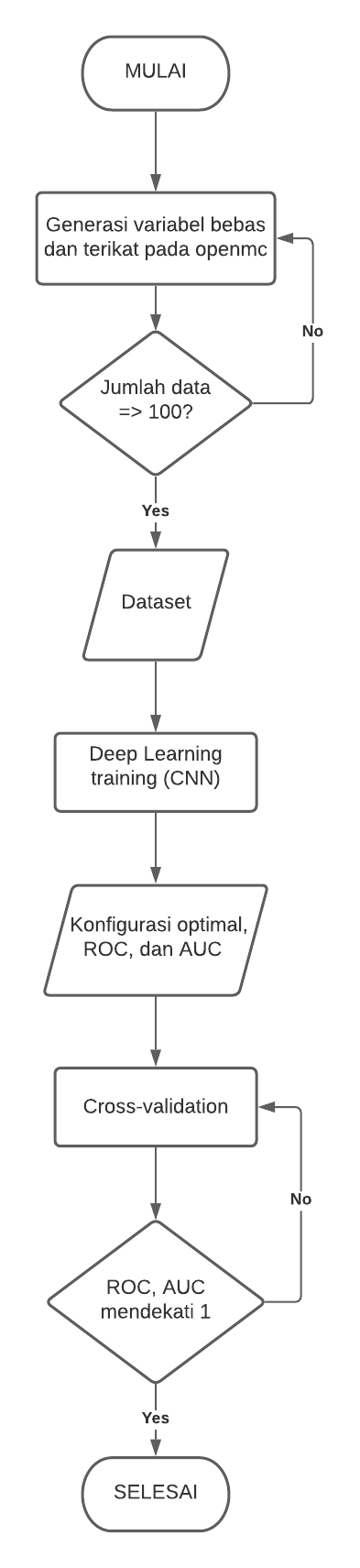
## IV.2 Metode Penelitian

1. Alat dan Bahan

Alat dan bahan untuk penelitian ini adalah :

1. Sebuah laptop pribadi dengan spesifikasi *processor*  AMD Ryzen 5 2500U, RAM 8 GB dengan sistem operasi Windows 10 Home 64 bit Build 19041.
2. Perangkat lunak untuk menyimulasikan fenomena transpor neutron serta produksi tritium *Monte Carlo N Particle Extended* (MCNPX) versi 2.6.0.
3. Perangkat lunak untuk menyusun *dataset*, menjalankan algoritma *Machine Learning Convulotonal Neutal Networks* ¸ dan menjalankan perangkat MCNPX secara otomatis *Jupyter Notebook* dengan *library* Pyhton utama yang digunakan sebagai berikut :
4. Numpy
5. Pandas
6. Matplotlib
7. Tensorflow
8. Variabel Bebas
   1. Pengayaan 6Li.
   2. Rasio Li dengan F.
   3. Rasio LiF dengan Pb alam.
   4. *Hyperparameter XGBoost*
9. Variabel Terikat
   1. Nilai TBR
   2. Model *Machine Learning* untuk perhitungan TBR

## IV.3 Alur Penelitian



Gambar 2 Diagram alir pelaksanaan penelitian tugas akhir

Dilakukan generasi data yang terdiri dari variabel bebas dan variabel terikat menggunakan simulasi monte carlo pada program openmc. Setelah setidaknya 100 data terbentuk, dilakukan pengumpulan data untuk membentuk dataset. Dataset akan dibagi dengan proporsi 70% untuk keperluan *training* model dan 30% untuk *testing* model. Dilakukan pemodelan CNN untuk mendapatkan konfigurasi blanket optimal beserta nilai ROC & AUC. Kemudian dilakukan *cross-validation* untuk mendapatkan nilai ROC & AUC mendekati 1.

## IV.4 Biaya Penelitian

## IV.5 Jadwal Penelitian

# BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

asdasdadas

# BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

asdasdasdasda

# DAFTAR PUSTAKA

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | The World Bank Group, “Population growth (annual %) | Data,” The World Bank Group, 2019. [Online]. Available: https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.GROW. [Diakses 12 Februari 2021]. |
| [2] | The World Bank, “Population, total,” The World Bank, 2019. [Online]. Available: https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL. [Diakses 12 Februari 2021]. |
| [3] | H. Ritchie, “Energy Mix,” Our World in Data, 2020. [Online]. Available: https://ourworldindata.org/energy-mix. [Diakses 12 Februari 2021]. |
| [4] | United Nations, “The Sustainable Development Goals Report 2020,” United Nations, 2020. |
| [5] | M. Kikuichi dan K. Lackner, Fusion Physics, Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012. |
| [6] | 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,” *SNA + MC,* vol. VI, no. 06016, p. 8, 2013. |
| [7] | T. Chen dan C. Guestrin, “XGBoost: A Scalable Tree Boosting System,” *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining,* 2016. |

# LAMPIRAN

## A. Kode Python

 # Impor semua paket yang diperlukan

import pandas as pd

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from jupyter\_cadquery.cadquery import (PartGroup, Part, Edges, Faces, Vertices, show)

from jupyter\_cadquery import set\_sidecar, set\_defaults, reset\_defaults

import openmc

import paramak

import paramak\_neutronics as nparamak

import neutronics\_material\_maker as nmm