

**KAJIAN DISPERSI RADIOAKTIF REAKTOR KARTINI  
UNTUK KONDISI KECELAKAAN DASAR DESAIN**

**TUGAS AKHIR**

Untuk memenuhi sebagai persyaratan mencapai derajat S-1

Program Studi Fisika



Diajukan Oleh :

Janu Aisah Rahmah Harahap

22106020041

**PROGRAM STUDI FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA**

**YOGYAKARTA**

**2026**

# HALAMAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

## PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1275/Un.02/DST/PP.00.9/06/2026

Tugas Akhir dengan judul : Kajian Dispersi Radioaktif Reaktor Kartini Untuk Kondisi Kecelakaan Dasar Desain

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : JANU AISAH RAHMAH HARAHAP  
Nomor Induk Mahasiswa : 22106020041  
Telah diujikan pada : Jumat, 05 Juni 2026  
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

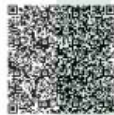
## TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si  
SIGNED

Valid ID: 6a2f9b3d-f42



Penguji I

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.  
SIGNED

Valid ID: 6a27855cde157



Penguji II

Asih Melati, S.Si., M.Sc., Ph.D.  
SIGNED

Valid ID: 6a27d3d93b6ca



Yogyakarta, 05 Juni 2026  
UIN Sunan Kalijaga  
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi  
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.  
SIGNED

Valid ID: 6a2bca46c8752

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

### SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Janu Aisah Rahmah Harahap  
NIM : 22106020041  
Program Studi : Fisika  
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Kajian Dispersi Radioaktif Reaktor Kartini Untuk Kondisi Kecelakaan Dasar Desain” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjana di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar Pustaka.

Yogyakarta, 10 Mei 2026

Penulis


Janu Aisah Rahmah Harahap  
NIM.22106020041

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

# SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI DAN TUGAS AKHIR



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

## SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi

Lamp : -

Kepada  
Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi  
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta  
di Yogyakarta

*Assalamu'alaikum wr. wb.*

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Janu Aisah Rahmah Harahap  
NIM : 22106020041  
Judul Skripsi : Kajian Dispersi Radioaktif Reaktor Kartini Untuk Kondisi Kecelakaan Dasar Desain

Sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

*Wassalamu'alaikum wr. wb.*

STATE ISLAMIC UNIVERSITY

SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

Pembimbing II

Mahrus Salam, M.Eng

NIP. 199881029 200912 1 002

Yogyakarta, 9 Mei 2026

Pembimbing I

Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si

NIP.19820126 200801 2 008

## **PERSEMBAHAN**

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan pertolongan-Nya, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Karya ini saya persembahkan kepada:

Kedua orang tua tercinta, yang senantiasa memberikan kasih sayang, doa, dukungan, pengorbanan, serta motivasi yang tiada henti dalam setiap langkah perjalanan hidup dan pendidikan saya.

Keluarga tercinta, yang selalu memberikan semangat, perhatian, dan dukungan selama proses penyusunan skripsi ini.

Bapak/Ibu dosen pembimbing, yang dengan penuh kesabaran telah memberikan bimbingan, arahan, ilmu, dan masukan yang sangat berharga hingga skripsi ini dapat terselesaikan.

Sahabat dan teman-teman, yang telah memberikan bantuan, dukungan, serta kebersamaan selama masa perkuliahan dan penyusunan skripsi.

Almamater tercinta, yang telah menjadi tempat saya menimba ilmu, mengembangkan kemampuan, dan memperoleh pengalaman berharga selama menempuh pendidikan.

Semoga karya sederhana ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan menjadi langkah awal untuk memberikan kontribusi yang lebih baik di masa mendatang.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## MOTTO

مَنْ جَدَّ وَجَدَّ

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya  
Dia mendapat (pahala) dari (Kebajikan) yang dikerjakannya dan mendapat (siksa)  
dari kejahatan yang diperbuatnya”

(Q.S. Al-Baqarah:286)

“Setiap bencana yang menimpa di bumi dan yang menimpa dirimu sendiri, semuanya  
telah tertulis dalam Kitab (Lauh Mahfuz) sebelum Kami mewujudkannya.

Sesungguhnya yang demikian itu mudah bagi Allah.”

(QS. Al-Hadid: 22)

“Senja adalah hadiah pejalan kaki menjemput magribnya”

“Sebab tuhan tlah berjanji bersama sempit ada kemudahan”

“Raim Laode – Bersenja Gurau”

STATE ISLAMIC UNIVERSITY  
SUNAN KALIJAGA  
YOGYAKARTA

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT berkat Rahmat, Hidayat, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi dengan judul “**Kajian Dsipersi Radioaktif Reaktor Kartini Untuk Kondisi Kecelakaan Dasar Desain**”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini terwujud berkat bantuan, arahan bimbingan dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis menyampaikan terimakasih yang sedalam- dalamnya kepada:

1. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si., selaku Ketua Program Studi Fisika.
2. Ibu Dr. Nita Handayani, S.Si.,M.Si. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan, arahan serta motivasi yang diberikan kepada penulis sehingga penulis mampi menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Mahrus Salam, M.Eng. selaku Dosen Pembimbing atas bimbingan, motivasi yang diberikan kepada penulis sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh Bapak Ibu Dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu serta pengalaman kepada penulis.
5. Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Yogyakarta yang telah berkolaborasi dengan Fisika UIN Sunan Kalijaga sehingga penulis bisa melaksanakan penelitian.

6. Kepada Ayahanda Muhamad Toha Harahap, S.Pd. dan ibu Siti Nurlihayati Hasibuan, S.Pd sosok yang selalu hidup dalam ingatan dan hati penulis. Kasih sayang, doa, dan semua pengorbanan mereka akan selalu menjadi dasar terkuat dalam hidup. Setiap pencapaian yang telah penulis raih adalah wujud dari dedikasi dan harapan agar mereka bangga. Terima kasih telah mengusahakan segala hal baik yang bersifat materi dsb, untuk putri pertamanya ini.
7. Teruntuk saudara perempuan penulis, Juli Ainun Habibie dan kedua saudara laki-laki penulis M.Rizky Harahap dan Aqis Bilqisti Harahap terima kasih telah menjadi sumber semangat dan motivasi dalam setiap perjuanganku.
8. Hastin, Raudothul dan Ika bukan hanya teman tetapi sahabat yang telah kebersamai penulis dalam menjalani perkuliahan dan menyusuri kota pelajar ini. Teman-teman Fisika Angkatan 2022 dan Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sampaikan satu per satu yang telah memberikan *support* kepada penulis.
9. Last but not least Janu Aisah Rahmah Harahap! Apresiasi sebesar-besarnya yang telah berjuang untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kesalahan dan ketidaksempurnaan. Penulis dengan senang hati menerima kritik, saran, dan masukan yang bersifat membangun demi perbaikan dan kemajuan penulis dimasa yang akan datang. Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis, pembaca, dan pihak yang lainnya.

Yogyakarta, Mei 2026

Penulis



# KAJIAN DISPERSI RADIOAKTIF REAKTOR KARTINI UNTUK KONDISI KECELAKAAN DASAR DESAIN

**Janu Aisah Rahmah Harahap**

**22106020041**

## INTISARI

Reaktor Kartini merupakan reaktor riset yang dimanfaatkan untuk kegiatan penelitian, pendidikan, dan pelatihan di bidang teknologi nuklir. Meskipun memiliki sistem keselamatan yang dirancang untuk mencegah dan mengendalikan kecelakaan, potensi terjadinya kecelakaan dasar desain (*Design Basis Accident / DBA*) tetap perlu dikaji untuk memastikan keselamatan masyarakat dan lingkungan di sekitar fasilitas. Salah satu aspek penting dalam analisis keselamatan adalah kajian dispersi radioaktif yang dapat terjadi apabila radionuklida terlepas ke atmosfer akibat suatu kecelakaan. Analisis dispersi radioaktif diperlukan untuk memperkirakan penyebaran kontaminan radioaktif di udara serta mengevaluasi dampak radiologis yang mungkin diterima oleh masyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan arah dan kecepatan angin dominan di sekitar reaktor Kartini, menentukan nilai *Total Effective Dose Equivalent* (TEDE) yang diterima masyarakat akibat kecelakaan dasar desain, serta mengevaluasi hasil yang diperoleh berdasarkan kriteria keselamatan yang ditetapkan dalam IAEA GSR Part 7 tahun 2015 dan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 1 Tahun 2010. Penelitian dilakukan dengan menganalisis data meteorologi untuk memperoleh karakteristik arah dan kecepatan angin, kemudian mensimulasikan dispersi radioaktif menggunakan model *Gaussian Plume* melalui perangkat lunak HotSpot. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai TEDE pada berbagai jarak dan arah dari titik pelepasan radionuklida. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arah angin dominan berada pada sektor Barat-Barat Daya (*West-Southwest/WSW*) dengan kecepatan angin rata-rata sebesar 3,48 m/s. Berdasarkan hasil simulasi dispersi radioaktif menggunakan *software* HotSpot, diperoleh nilai TEDE maksimum sebesar 0,46 mSv pada kondisi stabilitas atmosfer kelas A. Nilai tersebut masih berada di bawah ambang batas dosis tahunan yang telah ditentukan oleh Perka BAPETEN No.4 tahun 2013 sebesar 1 mSv pertahun. Menurut IAEA GSR Part 7 dan Perka BAPETEN No.1 Tahun 2010 tidak diperlukan tindakan protektif seperti evakuasi maupun *sheltering*. Dengan demikian, dampak radiologis akibat kecelakaan dasar desain pada reaktor Kartini tergolong rendah dan masih terkendali.

**Kata Kunci:** Reaktor Kartini, Kecelakaan Dasar Desain, Dispersi Radioaktif, *Gaussian Plume*, TEDE.

**STUDY OF RADIOACTIVE DISPERSION OF THE KARTINI REACTOR  
UNDER DESIGN ACCIDENT CONDITIONS**

**Janu Aisah Rahmah Harahap**

22106020041

**ABSTRACT**

*The Kartini Reactor is a research reactor used for research, education, and training activities in the field of nuclear technology. Although it has a safety system designed to prevent and control accidents, the potential occurrence of a Design Basis Accident (DBA) still needs to be studied to ensure the safety of the public and the environment around the facility. One important aspect of safety analysis is the study of radioactive dispersion that could occur if radionuclides were released into the atmosphere due to an accident. Radioactive dispersion analysis is required to estimate the spread of radioactive contaminants in the air and to evaluate the radiological impact that the public might be exposed to. This study aims to determine the dominant wind direction and speed around the Kartini reactor, to determine the Total Effective Dose Equivalent (TEDE) received by the public due to a design-basis accident, and to evaluate the results obtained based on safety criteria set out in IAEA GSR Part 7 of 2015 and BAPETEN Chairman Regulation No. 1 of 2010. The study was conducted by analyzing meteorological data to obtain wind direction and speed characteristics, and then simulating radioactive dispersion using the Gaussian Plume model through the HotSpot software. Subsequently, TEDE values were calculated at various distances and directions from the radionuclide release point. The research results show that the dominant wind direction is in the West-Southwest (WSW) sector with an average wind speed of 3.48 m/s. Based on the results of radioactive dispersion simulations using HotSpot software, a maximum TEDE value of 0.46 mSv was obtained under atmospheric stability class A conditions. This value is still below the annual dose limit set by BAPETEN Regulation No. 4 of 2013, which is 1 mSv per year. According to IAEA GSR Part 7 and BAPETEN Regulation No. 1 of 2010, protective actions such as evacuation or sheltering are not required. Thus, the radiological impact resulting from a design-basis accident at the Kartini reactor is classified as low and still under control.*

**Keywords:** *Kartini Reactor, Design Basis Accident, Radioactive Dispersion, Gaussian Plume, TEDE.*

## DAFTAR ISI

|  |             |
|--|-------------|
| <b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....                        | <b>ii</b>   |
| <b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI</b> .....         | <b>iii</b>  |
| <b>SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI DAN TUGAS AKHIR</b> ..... | <b>iv</b>   |
| <b>PERSEMBAHAN</b> .....                               | <b>v</b>    |
| <b>MOTTO</b> .....                                     | <b>vi</b>   |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....                            | <b>vii</b>  |
| <b>INTISARI</b> .....                                  | <b>x</b>    |
| <b>ABSTRACT</b> .....                                  | <b>xi</b>   |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....                                | <b>xi</b>   |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....                             | <b>xiii</b> |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....                              | <b>xiv</b>  |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....                           | <b>xv</b>   |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....                         | <b>1</b>    |
| 1.1 Latar Belakang .....                               | 1           |
| 1.2 Rumusan Masalah .....                              | 8           |
| 1.3 Tujuan Penelitian.....                             | 8           |
| 1.4 Batasan Penelitian .....                           | 9           |
| 1.5 Manfaat Penelitian.....                            | 9           |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....                   | <b>11</b>   |
| 2.1 Studi Pustaka .....                                | 11          |
| 2.2 Landasar Teori .....                               | 18          |
| 2.2.1 Radioaktivitas.....                              | 18          |
| 2.2.2 Reaktor Kartini .....                            | 30          |
| 2.2.3 Paparan Radiasi .....                            | 39          |
| 2.2.4 Dosimetri dan Proteksi Radiasi .....             | 42          |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.2.5 <i>Software</i> Pengolahan Data.....  | 46        |
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>  | <b>56</b> |
| 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....  | 56        |
| 3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....  | 56        |
| 3.3 Tahapan Penelitian .....  | 57        |
| 3.3.1 Observasi Lokasi Reaktor .....  | 58        |
| 3.3.2 Analisis <i>Source Term</i> .....   | 59        |
| 3.3.3 Pengumpulan Data Meteorologi.....   | 60        |
| 3.3.4 Membuat Profil Arah dan Kecepatan Angin Menggunakan <i>Software</i><br>WRPLOT .....                       | 61        |
| 3.3.5 Menghitung nilai TEDE dengan <i>Software</i> HotSpot V.3.1.2.....   | 63        |
| 3.3.6 Menganalisis Hasil TEDE.....  | 65        |
| 3.4 Metode Analisa Data .....   | 66        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>   | <b>71</b> |
| 4. 1 Hasil dan Pembahasan Data Pemodelan Arah dan Kecepatan Angin .....   | 71        |
| 4. 2 Hasil dan Pembahasan Perhitungan Nilai TEDE Menggunakan <i>Software</i><br>Hotspot .....                   | 75        |
| 4. 3 Analisis TEDE Berdasarkan IAEA GSR Part 7 Tahun 2015 dan Peraturan<br>Kepala BAPETEN No. 1 tahun 2010..... | 84        |
| 4. 4 Integrasi-Interkoneksi.....  | 86        |
| <b>BAB V PENUTUP.....</b>   | <b>89</b> |
| 5.1 Kesimpulan.....   | 89        |
| 5.2 Saran .....   | 89        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>  | <b>91</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>  | <b>98</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| <b>Gambar 2.1</b> (a) Konfigurasi bahan bakar reaktor Kartini dan (b) Elemen bahan bakar (Windiasari dkk, 2011) ..... | 33 |
| <b>Gambar 2.2</b> Proses Reaksi Fisi (Schunck & Regnier, 2022).....   | 37 |
| <b>Gambar 2.3</b> Klasifikasi sumber radiasi (Zhang dkk, 2021) .....  | 40 |
| <b>Gambar 2.4</b> <i>software</i> WRPLOT .....  | 48 |
| <b>Gambar 2.5</b> <i>software</i> HotSpot .....   | 54 |
| <b>Gambar 3.1</b> Diagram Alir Penelitian .....   | 57 |
| <b>Gambar 3.2</b> Tampilan <i>software</i> WRPLOT .....   | 59 |
| <b>Gambar 3.3</b> Tampilan <i>software</i> HotSpot .....  | 61 |
| <b>Gambar 4.1</b> Diagram <i>windrose</i> .....   | 67 |
| <b>Gambar 4.2</b> Grafik nilai TEDE sebagai fungsi jarak .....  | 77 |

## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabel 2.1</b> Studi Pustaka .....   | 17 |
| <b>Tabel 2.2</b> Spesifikasi Bahan Bakar Reaktor Kartini .....                         | 34 |
| <b>Tabel 3.1</b> Alat dan Bahan .....  | 56 |
| <b>Tabel 4.1</b> Klasifikasi Stabilitas Atmosfer Pasquill-Gifford (Turner, 1970) ..... | 69 |
| <b>Tabel 4.2</b> <i>Source Term</i> Radionuklida .....                                 | 71 |
| <b>Tabel 4.3</b> <i>Total Dose Effective Equivalent</i> (TEDE) .....                   | 78 |

## DAFTAR LAMPIRAN

|  |     |
|--|-----|
| <b>Lampiran 1.</b> Data Meteorologi .....        | 98  |
| <b>Lampiran 2.</b> <i>Software</i> HotSpot ..... | 99  |
| <b>Lampiran 3.</b> Dokumentasi Penelitian .....  | 100 |



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Energi nuklir kini semakin dipertimbangkan sebagai alternatif dalam upaya memperkaya sumber energi nasional untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat. Di berbagai negara reaktor nuklir tidak hanya dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik, tetapi juga untuk keperluan riset, pendidikan, dan produksi radioisotop. Di Indonesia, pengelolaan dan pengoperasian reaktor nuklir dilakukan oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), sementara pengawasan dan regulasi keselamatan nuklir dilaksanakan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir. Indonesia memiliki peluang besar untuk mengembangkan energi nuklir berkat sumber daya alam yang melimpah dan kemajuan dalam infrastruktur penelitian. Cadangan thorium di Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 130.000 ton, angka ini menunjukkan bahwa potensi bahan bakar nuklir alternatif di Indonesia cukup besar untuk menjadi basis pengembangan energi nuklir di masa sekarang dan masa yang akan datang. Thorium dapat dimanfaatkan dalam reaktor generasi berikutnya untuk memproduksi energi yang lebih aman dan efisien dibandingkan dengan uranium konvensional, sebab menghasilkan limbah radioaktif yang lebih sedikit dan bersifat stabil. Selain itu, Indonesia juga memiliki sekitar 7.000 ton cadangan uranium, walaupun pemanfaatannya secara komersial masih belum dilakukan (Kim dkk, 2021).

Berdasarkan pemetaan fasilitas reaktor riset, Indonesia pada awalnya

mengoperasikan tiga reaktor riset yang dioperasikan oleh BATAN yaitu RSG-GAS di Serpong, TRIGA 2000 di Bandung, dan reaktor Kartini di Yogyakarta (Hastuti dkk, 2021). Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) di Serpong berkapasitas 30 MW yang berperan dalam penelitian, pelatihan, serta produksi radioisotop untuk kebutuhan medis dan industri. Sementara itu, reaktor Kartini di Yogyakarta adalah reaktor TRIGA dengan kapasitas 100 kW berperan penting dalam bidang pendidikan, pelatihan, dan riset neutron skala kecil. Reaktor-reaktor riset ini menjadi pusat utama dalam aktivitas penelitian nuklir nasional dan memegang peranan penting dalam pengembangan teknologi dan ilmu di bidang nuklir di Indonesia (Huda & Nababan, 2006).

Secara umum reaktor nuklir diklasifikasikan menjadi dua jenis utama yaitu, reaktor daya dan reaktor (non-daya). Reaktor daya digunakan untuk menghasilkan energi listrik melalui konversi energi panas hasil reaksi fisi, sedangkan reaktor riset dimanfaatkan untuk tujuan penelitian, pendidikan, produksi radioisotop, dan pengujian material tanpa menghasilkan listrik secara komersial (Aliva dkk, 2023). Berdasarkan pemanfaatannya reaktor nuklir beroperasi melalui proses fisi yang menghasilkan radiasi, suhu, dan tekanan tinggi, maka aspek keselamatan dan perlindungan radiasi menjadi bagian yang sangat penting dalam menjamin keamanan para pekerja, masyarakat, serta lingkungan sekitar. Jaminan keselamatan reaktor meliputi sejumlah elemen utama, seperti desain sistem yang aman melalui penerapan pendinginan, pengontrol reaksi, mekanisme penghentian darurat (*shutdown system*), struktur pelindung (*containment*), dan sistem keselamatan pasca insiden. Di sisi lain,

perlindungan dari radiasi dilakukan dengan mengatur tingkat paparan melalui pemantauan dosis, penggunaan pelindung diri, penetapan batas dosis yang diperbolehkan, serta penerapan prosedur operasional yang disiplin dan ketat (Lin dkk, 2024).

Di Indonesia, ketentuan mengenai keselamatan nuklir diatur oleh Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang ketenaganukliran beserta peraturan pelaksanaannya yang ditetapkan dan diawasi oleh BAPETEN. Keselamatan ini tidak hanya mencakup aspek operasional reaktor, tetapi juga mencakup keamanan proses produksi dan lingkungan, seperti pengelolaan limbah radioaktif, pengendalian pembuangan panas ke lingkungan, serta upaya mitigasi risiko dari potensi bencana alam seperti gempa bumi. Studi mengenai evaluasi bahaya seismik pada tiga reaktor penelitian di Indonesia menegaskan pentingnya perencanaan desain yang tahan gempa untuk memastikan keamanan fasilitas nuklir di kawasan yang rawan seismik (Huda dan Nababan, 2006).

Selain pengoperasian yang berjalan secara normal, penting untuk memperhatikan berbagai potensi bahaya yang dapat muncul dalam pengelolaan reaktor nuklir, baik berupa kecelakaan ringan maupun kecelakaan berat (*severe accident*). Kecelakaan reaktor bisa berdampak pada paparan radiasi melalui dispersi radioaktif terhadap masyarakat dan lingkungan. Dispersi zat radioaktif ini yang kemudian dapat menyebar melalui berbagai jalur lepasan lingkungan seperti udara, badan air, tanah, dan kontaminasi produk pangan. Selain itu, bahaya pada reaktor juga berpotensi menimbulkan efek jangka panjang terhadap lingkungan, misalnya kontaminasi tanah

dan air akibat akumulasi bahan radioaktif. Risiko terjadinya kecelakaan ini dapat dipicu oleh sejumlah faktor, seperti kegagalan sistem pendinginan, kerusakan bahan bakar, kebocoran zat radioaktif, maupun gangguan eksternal seperti bencana alam seperti gempa bumi dan tsunami dan intervensi manusia (Bidin, 2008).

Dalam perspektif islam, ilmu pengetahuan dan teknologi dipandang sebagai alat untuk memahami ciptaan Allah dan memelihara keharmonisan di alam semesta. Namun, jika perkembangan teknologi tidak dibarengi dengan landasan moral dan rasa tanggung jawab, dapat membawa dampak negatif dan ancaman bagi kehidupan. Allah SWT telah mengingatkan hal ini dalam firman-Nya pada Surah Ar-Rum ayat 41 sebagai berikut :

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ٤١

Sebagaimana arti dari ayat ini yaitu:

*“Telah tampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan perbuatan tangan manusia. (Melalui hal itu) Allah membuat mereka merasakan Sebagian dari (akibat) perbuatan mereka agar mereka kembali (ke jalan yang benar)”. QS. Ar-Rūm [30]: 41*

Ibnu Katsir menjelaskan bahwa kerusakan di darat dan di laut mencakup berkurangnya keberkahan kehidupan, munculnya bencana, kesulitan ekonomi, serta berbagai bentuk musibah yang menimpa manusia. Semua itu terjadi karena perbuatan manusia, seperti kemaksiatan, kezaliman, dan penyimpangan dari perintah Allah (Ibnu Katsir Tafsir Al-Qur’an Al-‘Azhim) . Ayat ini menunjukkan bahwa kelestarian hukum alam dan inovasi teknologi dapat mengakibatkan kerusakan ekologis, misalnya kontaminasi radiasi atau dispersi bahan radioaktif. Oleh karena itu, setiap upaya ilmiah terutama dalam hal keselamatan nuklir harus bertujuan untuk menjaga keseimbangan lingkungan sebagai

bagian dari tugas manusia sebagai khalifah Allah di bumi (Wani dan Azhar, 2024).

Dalam konteks penelitian tentang dispersi radioaktif dalam kondisi kecelakaan berbasis desain di reaktor Kartini, prinsip Al-Qur'an ini menggarisbawahi dimensi etika penyelidikan ilmiah. Mempelajari dispersi radioaktif di atmosfer tidak hanya sebagai upaya teknis untuk memastikan keselamatan, tetapi juga komitmen moral dan spiritual untuk melindungi ciptaan dari bahaya. Sains, dalam pengertian ini menjadi sarana untuk memahami sunnatullah hukum ilahi yang mengatur alam semesta sehingga energi nuklir dapat dimanfaatkan secara bijaksana untuk pembangunan berkelanjutan dan kesejahteraan masyarakat. Dengan demikian, integrasi nilai-nilai Islam dengan sains nuklir mencerminkan perspektif holistik, dimana pengetahuan berfungsi sebagai instrumen penemuan sekaligus sebagai media pertanggungjawaban kepada Sang Pencipta dan ciptaan-Nya (Hair dan Ashid, 2011).

Seiring dengan pemanfaatan teknologi nuklir terdapat potensi risiko yang harus dikelola secara sistematis dan bertanggung jawab. Sebagai langkah antisipatif terhadap kemungkinan tersebut, dilakukan simulasi hipotesis kecelakaan untuk memperkirakan pola dispersi zat radioaktif serta dampak radiasinya terhadap manusia dan lingkungan. Salah satu *software* yang digunakan untuk mensimulasikan dispersi radioaktif adalah *HotSpot Health Physics Codes* karena mampu memodelkan dispersi radioaktif di atmosfer dan menghitung dosis yang diterima masyarakat di sekitar lokasi reaktor (Lulik, 2018). Dalam penelitian ini, *HotSpot (Health Physics Code)* digunakan untuk menghitung TEDE (*Total Effective Dose Equivalent*) dalam kondisi darurat dengan skenario kecelakaan pada reaktor penelitian TRIGA Kartini Yogyakarta. Dalam

penelitian ini model yang digunakan adalah *Gaussian* karena memiliki formulasi yang konservatif yaitu penggunaan asumsi kehati-hatian dalam operasi reaktor, cocok untuk estimasi jarak dekat dan menengah, serta sesuai untuk analisis pelepasan radioaktif pada kondisi kecelakaan dasar desain (Dahia dkk, 2022).

Perubahan *layout* kawasan nuklir Yogyakarta, dimana terjadi perubahan daerah terbatas tentunya diperlukan kajian terkait dampak radiologi yang ditimbulkan jika terjadi kondisi kecelakaan. Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan ulang dispersi radioaktif di sekitar reaktor khususnya pada saat terjadi kondisi kecelakaan untuk memastikan keselamatan masyarakat maupun lingkungan di sekitar reaktor (Paulillo dkk, 2023). Penelitian mengenai kajian dispersi radioaktif untuk kondisi kecelakaan dasar desain telah dilakukan oleh Mohamed dkk (2025), penelitian ini menggunakan perangkat lunak HotSpot 3.1.2 dengan model *Gaussian Plume* untuk mensimulasikan dua skenario pada kecelakaan reaktor di Mesir. Selanjutnya penelitian yang telah dilakukan oleh Sembiring dan Kim (2025) yaitu dengan membandingkan tiga model dispersi atmosphere yaitu menggunakan *software* HotSpot, Rascal, dan Pc-Cosyma. *Software* RASCAL dikembangkan oleh U.S.NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) untuk mengintegrasikan model dispersi atmosfer dengan data meteorologi yang lebih realistis sehingga mampu menghasilkan estimasi dosis yang lebih moderat dan representatif dibandingkan HotSpot. Sementara itu, *software* PC-COSYMA dikembangkan oleh Uni Eropa yang dikembangkan untuk analisis konsekuensi kecelakaan nuklir secara komprehensif dengan menerapkan pendekatan deterministik dan probabilistik. Sehingga *software* ini mampu mempertimbangkan ketidakpastian

parameter serta menghasilkan estimasi dosis yang lebih rinci.

*Software* HotSpot digunakan untuk memperkirakan dampak radiologi secara cepat dengan menggunakan pendekatan deterministik dan model dispersi sederhana, sehingga menghasilkan estimasi dosis yang bersifat konservatif atau mempertimbangkan aspek keamanan dan kehati-hatian serta cocok untuk analisis awal tanggap darurat. Relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan yaitu pada penggunaan *software* HotSpot menggunakan model gaussian sederhana untuk memberikan estimasi dosis yang paling tinggi di antara ketiganya, dan *software* ini juga bersifat gratis atau tidak berbayar sehingga bisa digunakan oleh peneliti dalam menjalankan penelitiannya. Sanche dkk (2024) juga melakukan penelitian mengenai penggunaan metode pemodelan dispersi radioaktif di udara menggunakan MCNP dan HotSpot untuk menghitung dosis eksternal yang berasal dari *plume* radioaktif. Berikutnya Kundu dkk (2022) juga melakukan penelitian untuk mensimulasikan dispersi radionuklida akibat ledakan nuklir dengan menggunakan *software* HotSpot. Selain itu penelitian oleh Salam dan Sutresna (2021) berfokus pada penentuan batas dispersi zat radioaktif dari reaktor Kartini Yogyakarta berdasarkan perhitungan dosis efektif total (TEDE) untuk kondisi operasi normal. Kajian tersebut menggunakan *software* Origen 2.0 untuk menghitung *source term* radionuklida hasil fisi, dan HotSpot 3.1.2 untuk memodelkan dispersi radionuklida di atmosfer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai maksimum TEDE sebesar 0,147 mSv masih berada di bawah batas dosis yang telah ditetapkan oleh BAPETEN (Salam & Sutresna, 2021).

Berdasarkan pemaparan dari latar belakang di atas, dimana adanya perubahan

layout kawasan makan perlu dilakukan penelitian lanjutan berupa perhitungan dispersi radioaktif untuk hipotesis kecelakaan dasar desain. Sebagaimana tertuang dalam Laporan Analisis Keselamatan (LAK) reaktor untuk menganalisis dispersi radioaktif, dosis radiasi, dan potensi dampak terhadap lingkungan. Sehingga dapat memberikan gambaran risiko radiologis dan peningkatan sistem keselamatan reaktor Kartini secara komprehensif (BAPETEN, 2010).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka dapat dirumuskan permasalahan yang akan diteliti pada penelitian ini. Rumusan masalah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan arah dan kecepatan angin di sekitar reaktor Kartini dengan menggunakan *software* WRPLOT?
2. Berapa besar *Total Effective Dose Equivalent* (TEDE) yang diterima masyarakat akibat dispersi radioaktif di udara dari skenario kecelakaan dasar desain?
3. Bagaimana hasil perbandingan nilai TEDE yang diperoleh dengan batas dosis rujukan (*reference level*) dalam IAEA GSR Part 7 tahun 2015 dan ketentuan Peraturan Kepala BAPETEN No. 1 Tahun 2010?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan pada permasalahan yang telah dirumuskan, tujuan penelitian ini disusun untuk mencari solusi atas persoalan tersebut. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat pemodelan arah dan kecepatan angin berdasarkan data meteorologi

menggunakan *software* WRPLOT V.8.0.2

2. Menghitung *Total Effective Dose Equivalent* (TEDE) akibat dispersi radioaktif di udara dari skenario kecelakaan dasar desain menggunakan *software* HotSpot 3.1.2.
3. Menganalisis hasil nilai TEDE berdasarkan IAEA GSR Part 7 tahun 2015 dan ketentuan Peraturan Kepala BAPETEN No. 1 Tahun 2010.

#### **1.4 Batasan Penelitian**

Agar pelaksanaan penelitian tetap terarah pada pokok permasalahan yang telah ditetapkan, diperlukan adanya batasan penelitian. Batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penentuan *source term* menggunakan data dari hasil output *Software* Origen.
2. Data meteorologi diambil dari pembacaan stasiun meteorologi lokal selama kurun waktu 3 tahun sejak 2023-2025.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dalam penelitian ini, meliputi:

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang fisika nuklir dan proteksi radiasi, khususnya terkait dengan kajian dispersi radioaktif reaktor kartini untuk kondisi kecelakaan dasar desain.
2. Membantu menilai potensi penyebaran radioaktif di udara serta mendukung kegiatan pemantauan kualitas di sekitar reaktor riset.
3. Meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya keselamatan nuklir dan informasi yang objektif mengenai tingkat keamanan reaktor Kartini.
4. Mengembangkan pemahaman konseptual dan praktis tentang keterkaitan

antara data meteorologi, karakteristik sumber radiasi (*source term*), dan penyebaran radionuklida di atmosfer.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan, dapat diambil Kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemodelan arah dan kecepatan angin menggunakan data meteorologi telah berhasil dibuat dengan menggunakan *software* WRPLOT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arah angin dominan di sekitar reaktor Kartini berada di sektor barat-barat daya (WSW) dengan kecepatan rata-rata 3,48 m/s.
2. Nilai TEDE pada kajian dispersi radioaktif reaktor Kartini untuk kondisi kecelakaan dasar desain telah dihitung menggunakan *software* HotSpot 3.1.2. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai TEDE maksimum yang diperoleh sebesar  $4,6 \times 10^{-4}$  Sv (0,46 mSv) pada jarak 0,14 km dari sumber.
3. Berdasarkan hasil analisis terhadap nilai TEDE mengacu pada standar IAEA GSR Part 7 tahun 2015, dan Perka BAPETEN No. 1 tahun 2010, menunjukkan bahwa seluruh nilai TEDE yang dihasilkan masih berada di bawah batas dosis yang ditetapkan dalam Peraturan Kepala BAPETEN No. 4 Tahun 2013 sebesar 1 mSv pertahun. Dengan demikian, kondisi kecelakaan dasar desain pada reaktor Kartini tidak memerlukan tindakan proteksi seperti *sheltering* dan evakuasi untuk masyarakat di sekitar reaktor Kartini.

#### 5.2 Saran

Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan skenario kecelakaan yang lebih kompleks atau di luar kecelakaan dasar desain (*beyond design basis accident*). Selain itu, penelitian dapat mengintegrasikan hasil pemodelan dispersi radioaktif ke dalam visualisasi berbasis spasial seperti *Google Earth*, sehingga setiap titik sebaran dapat ditampilkan secara lebih detail dan mudah dianalisis.



## DAFTAR PUSTAKA

- Aini, A., Sriasih, M., & Kisworo, D. 2017. *Studi Pendahuluan Cemaran Air Limbah Rumah Potong Hewan di Kota Mataram*. Jurnal Ilmu Lingkungan, **15(1)**, 42. <https://doi.org/10.14710/jil.15.1.42-48>
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2010. *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1 Tahun 2010 tentang kesiapsiagaan dan penanggulangan kedaruratan nuklir*. JDIH BAPETEN.
- BAPETEN. 2013. *Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan. Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Republik Indonesia Nomor 7 Tahun 2013*.
- Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2023. *Perpustakaan BAPETEN 2012–2023*. Badan Pengawas Tenaga Nuklir. [Portal KIP BAPETEN](#)
- Barwani, A. S. Al. 2019. *Omani Experience in Flash Floods, Disaster Risk Reduction and Water Harvesting*. International Journal of Disaster Risk Reduction, **7(1)**, 1–6. <https://doi.org/10.26480/mjg.01.2017.32.33>
- BATAN. 2012. *Studi Pendahuluan Aplikasi Program Komputer " Hotspot " Untuk Analisis Dampak Radiologis*. September, 319–330.
- Bidin, Z. A. A., Jiptono, T. R. I. W. U. T., & Ahlan, I. S. D. 2008. *Reaktor Kartini*. 25–26.
- Brenot, J., Laurier, D., Rannou, A., & Thierry, D. 2009. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. In ICRP Publication 103.
- Category, D., Guides, S., & Berkovskyy, V. 2010. *Document Preparation Profile (DPP)*. *i*, 1–8.
- Choudhary, S. 2018. *Deterministic and Stochastic Effects of Radiation*. Cancer Therapy & Oncology International Journal, **12(2)**, 1–2. <https://doi.org/10.19080/ctoj.2018.12.555834>
- Dahia, A., Merrcoche, D., Dadda, A., & Cheridi, A. L. 2022. *Comparative Radiation Dose Study of a Hypothetical Accident in a Research Reactor*. Kemija u Industriji,

71(7–8), 429–438. <https://doi.org/10.15255/kui.2021.077>

- Dan, T., Selatan, T., Pengairan, S., & Radioisotop, M. K. 1995. *Kajian Pengukuran Masa Transit Aliran Air (Terusan Tengah Dan Terusan Selatan) Sistem Pengairan Mada Menggunakan Kaedah Radioisotop I-131. V*, 17–24.
- International Atomic Energy Agency. 2015. *Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency (IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7)*. International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. 2023. *Commissioning of research reactors (IAEA Safety Standards Series No. SSG-80)*. International Atomic Energy Agency.
- Emmanuel K. Atibu, João M. Oliveira, Margarida Malta, Marta Santos, Crispin K. Mulaji, Pius T. Mpiana, F. P. C. 1997. *Assessment of Natural Radioactivity in Rivers Sediment and Soil from the Copper Belt Artisanal Mining Region, Democratic Republic of the Congo*. <https://www.Scirp.Org/Journal/Home?Journalid=2432>.
- Fitriyawita, M. 2023. *Supadio Pontianak Dengan Menggunakan Wrplot The Utilization Of Awos To Identify Winds At Supadio Airport ' S Runways Using Wrplot*. 4(2), 10–20.
- Gabriela, A., & Garis, A. G. 2010. *Lógica Temporal en Verificación de Modelos de Software . Origen y Evolución hasta tiempos actuales*.
- Gill, P. G. 2014. *Objective verification of World area forecast centre clear air turbulence forecasts. Meteorological Applications*, 21(1), 3–11. <https://doi.org/10.1002/met.1288>
- Hair, N. A. K., & Ashid, A. L. M. D. R. 2011. *Nuclear Energy : An Ethical Use Of Resources*. 12(5), 131–137.
- Hartzell, S., Furutani, K. M., Parisi, A., Sato, T., Kase, Y., Deglow, C., Friedrich, T., & Beltran, C. J. 2025. *Impact of Microdosimetric Modeling on Computation of Relative Biological Effectiveness for Carbon Ion Radiotherapy*. 1–24.
- Hastuti, E. P., Kuntoro, I., Suwoto, S., Syarip, S., Basuki, P., Surbakti, T., Sunaryo, G. R., & Sudarmono, S. 2021. *Map of Radioisotope Production and Batan Research*

- Reactor Utilization. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, **23(3)**, 105. <https://doi.org/10.17146/tdm.2021.23.3.6288>
- Homann, S. G., & Aluzzi, F. 2014. *HotSpot health physics codes version 3.0 user's guide* (LLNL-SM-636474). National Atmospheric Release Advisory Center, Lawrence Livermore National Laboratory. <https://narac.llnl.gov/sites/narac/files/2024-02/HotSpot-UserGuide-3-0.pdf>
- Huda, K., & Nababan, N. 2006. *Legal and Regulatory Framework for Decommissioning of Research Reactor in Indonesia*. The IAEA 1st Technical Meeting on the Research Reactor Decommissioning Demonstration Project, June, 1–4.
- ICRP. 2007. *ICRP Publication 103 The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. Radiation Physics and Chemistry, *188(24)*, 1–337.
- Iman Kuntoro. 2023. *Keselamatan Reaktor Nuklir: Reaktor Serba Guna G.A Siwabesy (RSG-GAS)*. <https://doi.org/10.55981/brin.568>
- Imran, D., Iswadi, I., Zelviani, S., & Supriyatni, E. 2019. *Pengukuran Radioaktivitas Gamma Pada Sampel Tanah Di Daerah Kabupaten Mamuju*. JFT : Jurnal Fisika Dan Terapannya, **6(1)**, 63. <https://doi.org/10.24252/jft.v6i1.12717>
- Irsal, M. 2022. *Pemahaman Terhadap Radiasi Dan Proteksi Radiasi Pada Warga Bumi Mas Ciseeng Blok B5/05 Kelurahan Kuripan Kecamatan Ciseeng Kab Bogor*. Jurnal Teras Kesehatan, **4(2)**, 73–80. <https://doi.org/10.38215/jtkes.v4i2.73>
- Johnson, M. A. 2011. *WRPLOT View Wind and Rain Rose Plots for Meteorological Data*.
- Journal, Y. P., Athiqoh, F., Budi, W. S., Anam, C., Fisika, J., & Diponegoro, U. 2014. *Distribusi Fluks Neutron Sebagai Fungsi Burn-Up Bahan*. **3(2)**.
- Jurij Vučina, Dragoljub Lukić, Nadežda Nikolić, Đokica Petrović, M. O. 2008. *Radionuklidi I Radiofarmaceutici U Dijagnostici I Terapiji*. 1–4.
- Jurusan, M., Fisika, P., & Yogyakarta, U. N. 2011. *Penentuan karakteristik distribusi rapat daya teras reaktor kartini 1*. 195–205.

- Kim, Y., Kim, J., Park, J., Choi, S. Y., Kim, S., Jung, W., Kim, H. E., & Shin, S. K. 2021. *An algorithm for evaluating time-related human reliability using instrumentation cues and procedure cues*. Nuclear Engineering and Technology, **53(2)**, 368–375. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.08.015>
- Kundu, D., Srinivas, C. V., Chandrasekaran, S., & Venkatraman, B. 2022. *Radiological consequence assessment for hypothetical nuclear explosion scenario using HotSpot*. Progress in Nuclear Energy, 147(March), 104192. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104192>
- Lin, R., Boonhat, H., Klebe, Y. L. S., & Takahashi, K. 2024. *Health Effects of Occupational and Environmental Exposures to Nuclear Power Plants : A Meta-Analysis and Meta-Regression*. 329–339.
- Luhar, I., Luhar, S., Abdullah, M. M. A. B., Sandu, A. V., Vizureanu, P., Razak, R. A., Burduhos-Nergis, D. D., & Imjai, T. 2023. *Solidification/Stabilization Technology for Radioactive Wastes Using Cement: An Appraisal*. Materials, **16(3)**. <https://doi.org/10.3390/ma16030954>
- Lulik, B. E. R., DeMontigny, D., & Hussein, E. M. A. 2018. *Using hotspot for estimating radiation dose following a postulated small modular reactor accident*. The Nuclear Future: Challenges and Innovation - 38th Annual CNS Conference and 42nd CNS/CNA Student Conference, June.
- Macfarlane, J. W., Payton, O. D., Keatley, A. C., Scott, G. P. T., Pullin, H., Crane, R. A., Smilion, M., Popescu, I., Curlea, V., & Scott, T. B. 2014. *Lightweight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies*. Journal of Environmental Radioactivity, **136**, 127–130. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.05.008>
- Maulana Aliva, M. R., Sudiar, N. Y., & Hamdi, H. 2023. *Systematic Literature Review (Slr): Nuclear Power Plants*. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, **25(2)**, 69. <https://doi.org/10.55981/tmd.2023.6871>
- Mellawati, J. 2009. *Distribution Of Uranium In Water Of Gresik Coastal Waters Sebaran Uranium di Perairan Pesisir Gresik*. **9(2)**, 211–216.
- Micallef, A., & Micallef, C. 2024. *The Gaussian Plume Model Equation for Atmospheric Dispersion Corrected for Multiple Reflections at Parallel*

*Boundaries : A Mathematical Rewriting of the Model and Some Numerical Testing.*

NEA. W. 2002. *Advanced Nuclear Reactor Safety Issues and Research Needs*. OECD Publishing.

Olivera, C. D., Manuel, L., Computacional, I., Inform, C., Antonio, S., Habana, L., Libre, S., Inform, C., Antonio, S., & Habana, L. 2021. *Introducción*. **15(1)**, 37–51.

Paulillo, A., McKone, T. E., & Fantke, P. 2023. *Characterizing human health damage from ionizing radiation in life cycle assessment*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, **28(12)**, 1723–1734. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02226-1>

P Syarip, S., Susyanta, W., & Kusuma, H. M. 2011. *Gaseous releases evaluation and safety performance improvement of kartini research reactor ventilation system*. **14(2)**, 56–64.

Protection, R., Basic, I., & Standards, S. 2014. *Radiation Protection and Safety of Radiation Sources : International Basic Safety Standards General Safety Requirements Part 3*.

Salam, M., & Gede Sutresna, W. 2021. *Radiation dose estimation to determine the discharged limit from Kartini research reactor*. *AIP Conference Proceedings*, **2381**(November). <https://doi.org/10.1063/5.0066327>

Sardjono, Y., & Tjiptono, T. W. 1999. *1 3 4 current status, research progress and future plan of kartini research reactor*. 281–292.

Schunck, N., & Regnier, D. 2022. *Theory of nuclear fission*. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, **125**. <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2022.103963>

Science, E.U.S. Department of Health, Education, and Welfare. 1970. *Department Of Health , Education , And Welfare*.

Sistema, D. E. L., Eris, I., Central, D. E. L. A., Cofrentes, N. D. E., Garc, R., Ramos, M., Zuriaga, V., Nuclear, C., Integrado, S., Computador, E., Eris, E. S., & Island, T. M. 1995. *Los orígenes*.

- Sinnaeve, J. E. Ed. 2013. *Radiological aspects of nuclear and radiological emergency preparedness and response*. Elsevier.
- Substances, IAEA. 2001. *Generic Models for Use in Assessing the*. 19.
- Susdarwono, E. T. 2021. *Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi dalam Mekanisme Bom Atom dan Senjata Termonuklir*. VEKTOR: Jurnal Pendidikan IPA, **2(1)**, 16–30. <https://doi.org/10.35719/vektor.v2i1.19>
- Syarbaini, S., Wahyudi, W., Suhariyono, G., Gunawan, D., & Suharguniyawan, E. 2021. *Measurements of Natural Radionuclides and <sup>137</sup>Cs in Airborne Particulate Samples Collected from Bali and Lombok Islands (Indonesia)*. Atom Indonesia, **47(1)**, 11–16. <https://doi.org/10.17146/AIJ.2021.1087>
- Tello, P., Makassar, I. N., Using, C., & Dispersion, G. 2019. *ISSN Cetak: 1858-330X dan ISSN Online: 2548-6373 Website: April*, 36–44.
- Texas, A. 2024. *Radiological Safety Program Manual Part One : Procedure Manual for the Use of Radioactive Materials*. May, 1–61.
- Thé, J. L., Ph, D., & Eng, P. 1999. *Health Physics Codes User's Guide*. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California.
- Thiessen, K. M., Boznar, M. Z., Charnock, T. W., Chouhan, S. L., Federspiel, L., Grašič, B., Grsic, Z., Helebrant, J., Hettrich, S., HÁlka, J., Hwang, W. T., Kamboj, S., Korolevych, V., Kuča, P., Lee, J., Mancini, F., Mlakar, P., Patryl, L., Pattantyús-Ábrahám, M., ... Yu, C. 2022. Urban working groups in the IAEA's model testing programmes. *Journal of Radiological Protection*, **42(2)**, 1–10. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac5173>
- Tic-, D. O. E., Hanna, S. R., Briggs, G. A., & Hosker, R. P. 1982. *Handbook on Atmospheric Diffusion* (Vol. 11223).
- To, I., Nuclear, S., For, S., Human, A., & Indonesia, R. 2020. *Annual Nuclear Safety Seminar Proceeding 2020 Annual Nuclear Safety Seminar*. October.
- Tremblay, J., Regnerus, M. D., Educação, S. D. A. S. N. D. E., Júnior, F. T., Sanfelice,

- J. L., Tavares Júnior, F., Dourado, L. F., Brito, M. M. A. de, Maiti, Bidinger, Sposito, M. P., Dubet, F. F., Ribeiro, C. A. C., Silva, N. do V., Barbosa, M. L. de O., Cunha, N. M., Dayrell, J., Rogošić, S., Baranović, B., ... Alves, S. 2016. *Analisis struktur kovarians terhadap indikator kesehatan pada lansia yang tinggal di rumah dengan berfokus pada persepsi kesehatan subjektif*, 1689–1699.
- Wani, N. H., & Azhar, A. 2024. *Islamic Environmental Ethics : Preserving The Sacred Balance*. **6(3)**, 1–8.
- Wood, A. John Wiley & Sons. 2006. *Nonionizing Radiation*. Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering. <https://doi.org/10.1002/9780471740360.ebs0847>
- Zhang, X., Chen, X., Wang, L., He, C., Shi, Z., & Fu, Q. 2021. *Review of the Efficacy and Mechanisms of Traditional Chinese Medicines as a Therapeutic Option for Ionizing Radiation Induced Damage*. *12*(February), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.617559>

