

**KAJIAN BATAS LEPASAN RADIOAKTIVITAS UDARA
REAKTOR KARTINI BERDASARKAN ESTIMASI
DOSIS PADA KONDISI OPERASI NORMAL**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



Diajukan Oleh:

Hastin Setia Prabandari

22106020025

PROGRAM STUDI FISIKA

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2026



PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1277/Un.02/DST/PP.00.9/06/2026

Tugas Akhir dengan judul : Kajian Batas Lepas Radioaktivitas Udara Reaktor Kartini Berdasarkan Estimasi Dosis Pada Kondisi Operasi Normal

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : HASTIN SETIA PRABANDARI
Nomor Induk Mahasiswa : 22106020025
Telah diujikan pada : Selasa, 02 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

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

Valid ID: 6:274-1e6-264



Penguji I

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

Valid ID: 6:2761e2d19e2



Penguji II

Dr. Widayanti, S.Si., M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6:2792d1d119e



Yogyakarta, 02 Juni 2026
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6:24c7e6d107dd

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hastin Setia Prabandari

NIM : 22106020025

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan dengan sesungguhnya, bahwa skripsi saya yang berjudul “Kajian Batas Lepas Radioaktivitas Udara Reaktor Kartini Pada Kondisi Operasi Normal” adalah hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diujikan untuk memperoleh gelar sarjana 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, 25 Mei 2026

Penulis



Hastin Setia Prabandari

NIM. 22106020025

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA



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 : Hastin Setia Prabandari
NIM : 22106020025
Judul Skripsi : Kajian Batas Lepasana Radioaktivitas Udara Reaktor Kartini Berdasarkan Estimasi Dosis Pada Kondisi Operasi Normal

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

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 25 Mei 2026

Pembimbing II

Mahrus Salam, M.Eng.

NIP. 19881029 200912 1 002

Pembimbing I

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., PhD

NIP. 19820126 200801 2 008

HALAMAN MOTTO

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

(QS. Al-Insyirah: 6)

"Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya, dia mendapat (pahala) dari (kebijakan) yang dikerjakannya dan mendapat (siksa) dari kejahatan yang diperbuatnya"

(QS. Al-Baqarah: 286)

“Pada akhirnya, hidup mengajarkan bahwa diri sendiri adalah rumah sekaligus tempat pulang paling kuat. Tidak semua orang memahami luka dan perjuangan kita, sehingga ada saatnya kita harus menguatkan diri sendiri untuk melewati kerasnya hidup”

-Boy Candra

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas akhir ini penulis persembahkan untuk kedua orang tua, kakak serta keluarga besar yang senantiasa kebersamai dan mendukung penulis hingga saat ini. Terima kasih dan semoga bermanfaat.



KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir berjudul “Kajian Batas Lepas Radioaktivitas Udara Reaktor Kartini Berdasarkan Estimasi Dosis Pada Kondisi Operasi Normal” dengan baik dan efisien.

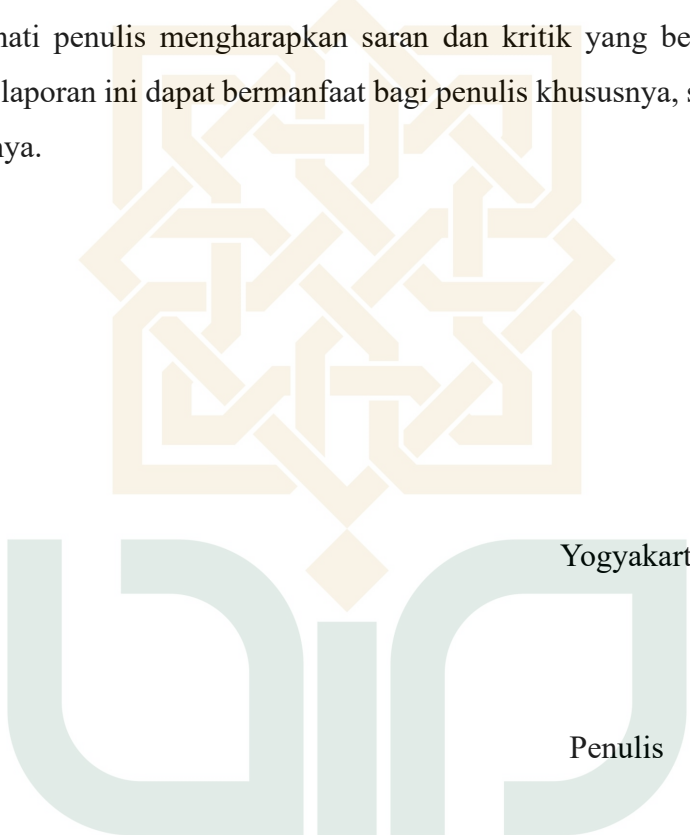
Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh penulis untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains (S.Si) dan bidang Ilmu Fisika di Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta. terselesaikannya tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan serta arahan dari berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas nikmat, hidayah dan inayah-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan proposal tugas akhir dengan baik.
2. Kedua orang tua tercinta Bapak Yatimun dan Ibu Yuni Hartatik yang telah merawat dan membesarkan serta mencurahkan kasih sayang tanpa batas. Atas doa yang tak pernah putus, perjuangan yang sering kali tak terlihat, serta pengorbanan yang selalu diusahakan demi masa depan penulis.
3. Kedua kakak tercinta, Mas Wawan dan Mas Bryan yang telah menjadi bagian penting dalam perjalanan hidup penulis. Kehadiran kalian bukan hanya sebagai kakak, tetapi juga sebagai tempat bercerita, penguat disaat lelah, dan sosok yang selalu mengajarkan arti ketulusan serta perjuangan dalam menjalani hidup.
4. Bapak Prof. Noorhaidi Hasan, S.Ag., MA., M.Phil., Ph.D., selaku Rektor Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.
5. Ibu Dr. Dra. Hj. Khurun Wardati, M.Si. Selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

6. Dr. Widayanti, M.Si. Selaku Ketua Progam Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta yang tentunya telah memberikan izin pelaksanaan penelitian tugas akhir.
7. Pihak Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah menyediakan tempat pelaksanaan penelitian bagi penulis untuk belajar dan melakukan penelitian.
8. Ibu Anis Yuniati, Ph.D. Selaku dosen pembimbing 1 skripsi yang telah memberikan banyak saran mengenai penelitian tugas akhir yang senantiasa memberikan pengarahannya dengan sabar dan bimbingan penuh dalam pelaksanaan penelitian sampai laporan tugas akhir selesai.
9. Bapak Mahrus Salam, M.Eng. Selaku dosen pembimbing 2 skripsi yang telah memberikan banyak saran mengenai penelitian tugas akhir yang senantiasa memberikan pengarahannya dengan sabar dan bimbingan penuh dalam pelaksanaan penelitian sampai laporan tugas akhir selesai.
10. Rekan Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK) Badan Riset dan Inovasi Nasional, rekan fisika Angkatan 2022, dan rekan *Study Club* Biofisika dan Fisika Medis yang selalu menemani dan memberikan motivasi serta membantu dalam penelitian ini.
11. Janu Aisah Rahmah Harahap, Selaku *partner* tugas akhir yang telah berjalan bersama melewati lelah, revisi, dan berbagai tekanan selama proses penyusunan tugas akhir ini.
12. Lula Akmala Zakiyatus Shofia, Saima Hasibuan dan Aura Itansis Merita, Selaku sahabat dan teman-teman terbaik, yang selalu hadir mendengarkan keluh kesah, memberi semangat di saat lelah, serta menjadi tempat pulang paling nyaman di tengah kerasnya perjalanan akademik ini.
13. Diri sendiri sebagai penulis, terima kasih karena mampu bertahan sejauh ini, melewati hari-hari yang tidak selalu mudah, tetap berjalan meski sejauh ini, tetap berjalan meski sering merasa lelah, dan tidak menyerah meskipun berkali-kali ingin berhenti. Semua proses ini adalah bukti bahwa diri sendiri

mampu menjadi rumah sekaligus penguat paling hebat dalam menghadapi kehidupan.

Demikian penulis menyadari keterbatasan pengetahuan yang penulis miliki, sehingga laporan tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan, maka dengan senang hati penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya, serta pembaca pada umumnya.



Yogyakarta, 6 Juni 2026

Penulis

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KAJIAN BATAS LEPASAN RADIOAKTIVITAS UDARA REAKTOR KARTINI BERDASARKAN ESTIMASI DOSIS PADA KONDISI OPERASI NORMAL

Hastin Setia Prabandari

22106020025

INTI SARI

Reaktor Kartini merupakan salah satu reaktor riset di Indonesia yang berpotensi menghasilkan lepasan radionuklida ke lingkungan melalui udara pada kondisi operasi normal. Lepasannya radioaktivitas udara tersebut dapat menyebabkan paparan radiasi terhadap masyarakat di sekitar fasilitas reaktor, sehingga perlu dilakukan kajian keselamatan radiasi berdasarkan estimasi dosis yang diterima. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai *source term*, memodelkan profil arah dan kecepatan angin, serta menghitung nilai *Total Effective Dose Equivalent* (TEDE) akibat pelepasan radionuklida melalui atmosfer pada kondisi operasi normal. Penelitian dilakukan berdasarkan data dari Laporan Analisis Keselamatan (LAK) Reaktor Kartini tahun 2019 dan data meteorologi periode 2023–2025. Analisis profil arah dan kecepatan angin dilakukan menggunakan *software* WRPlot View untuk memperoleh pola arah dan kecepatan angin dominan dalam bentuk diagram *windrose*, sedangkan perhitungan dosis dilakukan menggunakan *software* HotSpot 3.0.2 berdasarkan model *Gaussian Plume*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan angin rata-rata yang sebesar 3,48 m/s dengan arah angin dominan berasal dari arah Barat-Barat Daya (*West-Southwest/WSW*) pada rentang $236,25^\circ$ hingga $258,75^\circ$. Nilai TEDE tertinggi yang diperoleh sebesar 0,293 mSv pada kondisi stabilitas atmosfer tipe C (sedikit tidak stabil). Nilai tersebut masih berada di bawah pembatas dosis (*dose constraint*) untuk masyarakat di sekitar fasilitas nuklir sebesar 0,3 mSv. Hal ini menunjukkan bahwa nilai batas pelepasan radioaktivitas udara yang dioptimalkan masih memenuhi kriteria keselamatan berdasarkan pembatas dosis yang ditetapkan oleh badan regulasi, yaitu BAPETEN. Oleh karena itu, nilai batas pelepasan radioaktivitas udara tersebut direkomendasikan untuk digunakan sebagai batas pembuangan radioaktivitas udara reaktor Kartini pada kondisi operasi normal.

Kata kunci: Reaktor Kartini, radioaktivitas udara, TEDE, HotSpot 3.0.2, keselamatan radiasi.

**STUDY OF AIRBORNE RADIOACTIVITY RELEASE LIMITS FROM THE
KARTINI REACTOR BASED ON DOSE ESTIMATES UNDER NORMAL
OPERATING CONDITIONS**

Hastin Setia Prabandari

22106020025

ABSTRACT

The Kartini Reactor is one of Indonesia's research reactors that has the potential to release radionuclides into the environment via the air under normal operating conditions. These airborne radioactive releases can result in radiation exposure for the community surrounding the reactor facility; therefore, a radiation safety assessment based on estimated received doses is necessary. This study aims to determine the source term value, model wind direction and speed profiles, and calculate the Total Effective Dose Equivalent (TEDE) resulting from radionuclide releases through the atmosphere under normal operating conditions. The research was conducted based on data from the 2019 Kartini Reactor Safety Analysis Report (LAK) and meteorological data for the 2023–2025 period. Analysis of wind direction and speed profiles was performed using WRPlot View software to obtain the dominant wind direction and speed patterns in the form of a wind rose diagram, while dose calculations were performed using HotSpot 3.0.2 software based on the Gaussian Plume model. The results of the study indicate that the average wind speed is 3.48 m/s, with the dominant wind direction originating from the West-Southwest (WSW) at an azimuth ranging from 236.25° to 258.75°. The highest TEDE value obtained was 0,293 mSv under Type C atmospheric stability conditions (slightly unstable). This value remains below the dose constraint for the public living near nuclear facilities, which is 0,3 mSv. This indicates that the optimized air radioactivity release limit still meets safety criteria based on the dose constraint established by the regulatory body, BAPETEN. Therefore, this air radioactivity release limit is recommended for use as the air radioactivity discharge limit for the Kartini Reactor under normal operating conditions.

Keywords: *Kartini Reactor, air radioactivity, TEDE, HotSpot 3.0.2, radiation safety.*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN	iii
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
INTI SARI.....	x
<i>ABSTRACT</i>	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I_PENDAHULUAN.....	1
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
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1 Studi Pustaka.....	11
2.2 Landasan Teori.....	17
2.2.1 Radioaktivitas.....	17
2.2.2 Paparan Radiasi	23
2.2.3 Reaktor Kartini	28
2.2.4 Reaksi Fisi	33
2.2.5 Metode Dispersi Radioaktif	38

2.2.6	<i>Pathway</i>	41
2.2.7	Keselamatan Radiasi	44
2.2.8	WRPlot.....	47
2.2.9	HotSpot.....	50
2.2.10	<i>Total Effective Dose Equivalent (TEDE)</i>	52
2.2.11	Klasifikasi Stabilitas Atmosfer.....	57
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		61
3.2	Alat dan Bahan Penelitian.....	61
3.2.1	Alat Penelitian.....	61
3.2.2	Bahan Penelitian.....	62
3.3	Tahapan Penelitian	62
3.3.1	Observasi Lokasi Reaktor	63
3.3.2	Studi Data LAK (<i>Analisis Source Term</i>).....	65
3.3.3	Pengumpulan Data Meteorologi.....	67
3.3.4	Pembuatan Profil Arah dan Kecepatan Angin Menggunakan WRPlot	69
3.3.5	Perhitungan TEDE Menggunakan <i>Hotspot 3.0.2</i>	71
3.3.6	Evaluasi Hasil Perhitungan TEDE	79
3.4	Metode Analisa Data.....	80
3.4.1	<i>Source Term</i> dari Data LAK.....	80
3.4.2	Pemodelan Arah dan Kecepatan Angin Menggunakan <i>Software WRPlot</i>	80
3.4.3	TEDE (<i>Total Effective Dose Equivalent</i>) Menggunakan <i>Software Hotspot 3.0.2</i>	81
3.4.4	Evaluasi nilai TEDE sesuai perka BAPETEN No 4 tahun 2013	82
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		84
4.1	Nilai <i>Source Term</i> Pada Kondisi Operasi Normal Reaktor Kartini	84
4.2	Profil Arah dan Kecepatan Angin dalam Bentuk Diagram <i>Windrose</i>	87
4.3	Nilai TEDE (<i>Total Effective Dose Equivalent</i>) untuk Beberapa Jenis Stabilitas Atmosfer	91

4.3.1	Nilai TEDE pada Jenis Stabilitas Atmosfer C.....	95
4.3.2	Nilai TEDE pada Jenis Stabilitas Atmosfer D	98
4.3.3	Nilai TEDE pada Jenis Stabilitas Atmosfer E	100
4.3.4	Nilai TEDE pada Jenis Stabilitas Atmosfer F	103
4.4	Evaluasi Nilai TEDE Sesuai Perka BAPETEN No 4 Tahun 2013.....	106
BAB V PENUTUP.....		110
5.1	Kesimpulan	110
5.2	Saran	112
DAFTAR PUSTAKA.....		113
LAMPIRAN.....		121



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tinjauan Pustaka	16
Tabel 2.2 Dimensi Kisi Reaktor Triga Mark II	30
Tabel 2.3 Dimensi Elemen Bahan Bakar Tipe 104	31
Tabel 2.4 Dimensi Elemen Bahan Bakar Tipe 204	31
Tabel 2.5 Spesifikasi Teknis Sistem Ventilasi	44
Tabel 2.6 Nilai DCF Inhalasi	55
Tabel 2.7 Nilai DCF _{cloud}	56
Tabel 3.1 Alat Penelitian	61
Tabel 3.2 Parameter Input Data Software Hotspot.....	72
Tabel 4.1 Nilai Batas Lepas Tahunan Reaktor Kartini	85
Tabel 4.2 Nilai <i>Total Effective Dose Equivalent</i> (TEDE) Pada Beberapa Jarak	95

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme Peluruhan Radioaktif.....	19
Gambar 2.2 Klasifikasi Radiasi.....	24
Gambar 2.3 Konfigurasi Teras Reaktor Kartini	29
Gambar 2.4 Elemen Bahan Bakar.....	33
Gambar 2.5 Reaksi Fisi Berantai	34
Gambar 2.6 Sistem Ventilasi Reaktor Kartini	41
Gambar 2.7 Wplot View <i>Software</i>	49
Gambar 2.8 Tampilan Awal <i>Software</i> Hotspot.....	51
Gambar 4.1 Profil Arah Dan Kecepatan Angin Untuk Tahun 2023-2025	87
Gambar 4.2 Distribusi nilai Tede (Sv) Sebagai Fungsi Jarak Hilir (Km) untuk Beberapa Jenis Stabilitas Atmosfer	93
Gambar 4.3 Daerah 0.31 Km Dari Reaktor Kartini	94

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Observasi Reaktor Kartini	121
Lampiran 2 Cuplikan Data Meteorologi	122
Lampiran 3 Proses Simulasi <i>Software</i> WRPlot.....	125
Lampiran 4 Proses Simulasi <i>Software</i> HotSpot 3.0.2	126



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manusia yang tinggal di bumi akan selalu menerima paparan radiasi dari berbagai sumber. Berdasarkan laporan terbaru *United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)*, rata-rata dosis radiasi alami secara global mencapai sekitar 3,0 mSv per tahun (UNSCEAR, 2024). Radiasi merupakan pancaran energi dalam bentuk partikel atau gelombang elektromagnetik. Berdasarkan kemampuannya, radiasi dibedakan menjadi dua, yaitu radiasi pengion dan non-pengion. Radiasi pengion adalah radiasi yang memiliki energi cukup untuk melepaskan elektron dari atom sehingga menyebabkan ionisasi, contohnya partikel α , β , sinar-X, sinar gamma, dan neutron. Sebaliknya, radiasi non-pengion adalah radiasi yang tidak memiliki energi cukup untuk mengionisasi atom, seperti gelombang radio, mikro, dan inframerah (Nugraheni dkk, 2022). Radiasi pengion banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang seperti medis (radiodiagnostik dan radioterapi), penelitian, industri, dan energi nuklir. Pemanfaatan ini memberikan manfaat besar, seperti diagnosis penyakit, terapi kanker, dan pembangkitan energi, namun juga memiliki berbagai risiko seperti kerusakan sel dan jaringan, mutasi genetik, gangguan fungsi organ, hingga peningkatan

risiko kanker dan efek jangka panjang lainnya terhadap manusia dan lingkungan (UNSCEAR, 2024; Kurniasari dkk, 2024).

Perlindungan terhadap radiasi adalah elemen krusial yang perlu dipahami dalam setiap pekerjaan yang melibatkan pemanfaatan bahan radiasi atau radioaktif, baik yang berupa sumber radioaktif yang tertutup maupun yang terbuka (Malaka, 2019). Kriteria batas keselamatan radiasi maksimum yang boleh diterima oleh pekerja radiasi dan masyarakat tertuang dalam peraturan Kepala BAPETEN No. 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Secara fungsional, regulasi ini menetapkan batasan nilai penerimaan dosis radiasi bagi pekerja radiasi, ditetapkan sebesar 20 mSv pertahun rata-rata dalam 5 tahun, sedangkan untuk masyarakat umum sebesar 1 mSv, serta dalam praktik pengoperasian fasilitas nuklir diterapkan nilai pembatas dosis (*dose constraint*) yang lebih rendah, yaitu 0,3 mSv per tahun, guna menjamin optimisasi proteksi radiasi sesuai dengan prinsip ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*). Setiap pemanfaatan radiasi pengion harus dikelola sesuai dengan ketentuan yang berlaku, untuk memastikan keselamatan bagi pekerja, masyarakat maupun lingkungan (Rahman dkk., 2020).

Penjelasan terkait radiasi didasarkan pada firman Allah Swt dalam surah An-Nur (24:35), yang berbunyi sebagai berikut:

اللَّهُ نُورُ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضِ مِثْلُ نُورِهِ كَمِثْكَوَةٍ فِيهَا مِصْبَاحٌ الْمِصْبَاحُ فِي زُجَاجَةٍ الزُّجَاجَةُ كَأَنَّهَا
 كَوْكَبٌ دُرِّيٌّ يُوقَدُ مِنْ شَجَرَةٍ مُبْرَكَةٍ زَيْتُونَةٍ لَا شَرْقِيَّةٍ وَلَا غَرْبِيَّةٍ يَكَادُ زَيْتُهَا يُضِيءُ وَلَوْ لَمْ
 تَمْسَسْهُ نَارٌ نُورٌ عَلَى نُورٍ يَهْدِي اللَّهُ لِنُورِهِ مَنْ يَشَاءُ وَيَضْرِبُ اللَّهُ الْأَمْثَالَ لِلنَّاسِ وَاللَّهُ بِكُلِّ شَيْءٍ
 عَلِيمٌ

Artinya:

“Allah (pemberi) cahaya (kepada) langit dan bumi. Perumpamaan cahaya Allah, adalah seperti sebuah lubang yang tak tembus, yang di dalamnya ada pelita besar. Pelita itu di dalam kaca (dan) itu seakan-akan bintang (yang bercahaya) seperti mutiara, yang dinyalakan dengan minyak dari pohon yang berkahnya, (yaitu) pohon zaitun yang tumbuh tidak di sebelah timur (sesuatu) dan tidak pula di sebelah barat (nya), yang minyaknya (saja) hampir-hampir menerangi, walaupun tidak disentuh api. Cahaya di atas cahaya (berlapis-lapis). Allah memberi petunjuk menuju cahaya-Nya kepada orang yang Dia kehendaki. Allah Maha mengetahui segala sesuatu” (Kementrian Agama, 2013:354).

Quraish Shihab dalam *Tafsir Al-Mishbah* menjelaskan bahwa cahaya dapat dimaknai sebagai simbol energi dan keteraturan yang memungkinkan kehidupan berlangsung serta menuntut manusia untuk mengelolanya secara bijaksana dan bertanggung jawab (Shihab, 2002).

Salah satu bentuk pemanfaatan radiasi adalah pengoperasian reaktor nuklir baik untuk tujuan energi terbarukan maupun untuk kegiatan pendidikan dan penelitian. Dalam pengoperasian reaktor nuklir, terdapat kemungkinan terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan melalui beberapa jalur lepasan, salah satunya adalah melalui jalur lepasan di udara. Untuk memastikan bahwa nilai lepasan zat radioaktif tersebut masih memenuhi kriteria keselamatan yang

ditetapkan dalam peraturan perundangan, maka perlu dilakukan Kajian Batas Lepas Radioaktivitas Udara Pada Kondisi Operasi Normal untuk memastikan keselamatan masyarakat dan lingkungan di sekitar reaktor terhadap potensi bahaya radiasi yang kemungkinan timbul.

Indonesia memiliki tiga reaktor penelitian yang beroperasi, yaitu reaktor Triga 2000 yang terletak di Bandung, reaktor Kartini yang ada di Yogyakarta, serta reaktor Serba Guna G. A. Siwabessy yang berlokasi di Serpong (IAEA Research Reactor Database (RRDB), 2023). Ketiga reaktor tersebut diawasi oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). Reaktor Kartini merupakan salah satu dari 3 reaktor penelitian yang ada di Indonesia terletak di Yogyakarta. Reaktor dengan tipe TRIGA Mark II berfungsi untuk pendidikan, pelatihan dan penelitian di bidang ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir. Reaktor ini dikelola oleh Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) melalui Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK) dimana reaktor ini telah beroperasi sejak tahun 1979 (Salam & Sutresna, 2021).

Reaktor nuklir merupakan suatu fasilitas yang didesain secara khusus sehingga di dalamnya dapat terjadi reaksi pembelahan inti secara berantai (Krane, 1992). Proses pembelahan inti atom di dalam reaktor secara terkendali, dimana inti atom yang berat seperti uranium-235 atau plutonium-239 dipisahkan menjadi dua bagian yang lebih ringan dan menghasilkan

sejumlah besar energi panas serta neutron baru (IAEA, 2022). Neutron ini dapat melanjutkan reaksi pembelahan dengan inti bahan fisi, sehingga reaksi inti berantai dapat terjadi. Proses fisi tersebut juga menghasilkan berbagai radionuklida hasil fisi dan radionuklida hasil aktivasi neutron yang bersifat radioaktif dan berpotensi menjadi sumber radiasi pengion apabila tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, pengoperasian reaktor nuklir memerlukan sistem pengendalian dan keselamatan radiasi yang ketat untuk mencegah paparan radiasi terhadap pekerja, masyarakat, dan lingkungan.

Salah satu upaya untuk mengendalikan keselamatan reaktor nuklir adalah menjamin bahwa lepasan radiasi yang diterima oleh masyarakat di sekitar masih dalam batas yang diizinkan oleh regulasi yang berlaku. Untuk menjamin pemenuhan regulasi tersebut maka perlu dilakukan perhitungan nilai penerimaan dosis radiasi oleh masyarakat di sekitar reaktor pada kondisi operasi normal. Penelitian ini dilakukan dengan menghitung nilai batas lepasan radioaktif di sekitar reaktor, untuk menjamin bahwa nilai lepasan tersebut masih berada dibawah nilai batas yang diizinkan sesuai dengan peraturan yang berlaku, dimana penelitian ini dilakukan untuk menghitung nilai batas lepasan dari reaktor Kartini yang berlokasi di Yogyakarta, khususnya melalui jalur lepasan udara.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji estimasi dosis radiasi akibat pelepasan radioaktif dengan berbagai pendekatan pemodelan. Juliana

dkk (2024) menganalisis dosis eksternal akibat paparan awan radioaktif menggunakan simulasi Monte Carlo dengan MCNP6 dan HotSpot, yang menunjukkan bahwa HotSpot menghasilkan estimasi dosis yang lebih konservatif dibandingkan MCNP6 (Juliana dkk., 2024). Rajibul Hoq dkk (2024) mengevaluasi dosis radiasi akibat pelepasan atmosfer radionuklida menggunakan model *Gaussian Plume* berbasis data meteorologi aktual dan membuktikan efektivitas model tersebut dalam menilai dampak radiologis pada populasi sekitar. Khaer dkk (2023) menganalisis dosis radiasi dan penentuan zona darurat pada reaktor riset TRIGA Mark-II menggunakan ORIGEN, RASCAL, dan HotSpot, dengan hasil dosis yang masih berada di bawah batas keselamatan internasional (Khaer dkk., 2023). Kundu dkk (2022) mengevaluasi dampak radiologis pada skenario ledakan hipotetik menggunakan HotSpot dan menemukan bahwa tinggi ledakan serta ukuran partikel memengaruhi distribusi radionuklida (Kundu dkk., 2022). Sementara itu, Salam dan Sutresna (2021) mengkaji batas pelepasan radionuklida cair reaktor Kartini berdasarkan perhitungan dosis efektif dan menyimpulkan bahwa dosis yang dihasilkan berada jauh di bawah batas yang diperkenankan. Secara keseluruhan, penelitian-penelitian tersebut menegaskan pentingnya pemodelan dosis radiasi dan penyebaran radioaktif sebagai dasar penentuan batas keselamatan operasional reaktor nuklir (Salam & Sutresna, 2021).

Hasil perhitungan batas lepasan radionuklida pada penelitian Salam dan Sutresna (2021) dilakukan dengan mengasumsikan 2 *pathway* antara lain lepasan melalui jalur udara dan badan air. Selain itu pada penelitian tersebut daerah terbatas berada pada jarak lebih dari 100 meter dari pusat reaktor. Pada penelitian ini dilakukan perhitungan nilai batas lepasan untuk kondisi normal dengan pendekatan 1 *pathway*, selain itu juga perhitungan batas lepasan pada penelitian ini didasarkan pada perubahan area terbatas di sekitar reaktor Kartini di Yogyakarta.

Metode penelitian yang digunakan meliputi penentuan *source term*, evaluasi kondisi meteorologi, dan pemodelan dispersi radionuklida di atmosfer. *Source term* yang digunakan sebagai data masukan diperoleh dari Laporan Analisis Keselamatan (LAK) reaktor Kartini yang memuat informasi mengenai jenis radionuklida serta aktivitas lepasan yang berpotensi terdispersi ke lingkungan (IAEA, 2014). Evaluasi kondisi meteorologi dilakukan menggunakan data arah dan kecepatan angin yang diolah menggunakan *software* WRPLOT untuk menghasilkan diagram *windrose* sebagai representasi pola angin dominan di sekitar reaktor (Lakes Environmental, 2018). *Software* HotSpot digunakan untuk memodelkan dispersi radionuklida dan menghitung nilai *Total Effective Dose Equivalent* (TEDE), yaitu dosis radiasi total yang diterima individu akibat paparan radionuklida (USNRC, 2007; Homann, 2020). Dengan demikian, pemodelan

tersebut memberikan estimasi dosis yang lebih representatif, sesuai kondisi terkini di sekitar reaktor, sekaligus sebagai data dukung untuk evaluasi batas pelepasan radioaktif di sekitar reaktor sebagai upaya pemenuhan peraturan kepala BAPETEN.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana cara menentukan *source term* reaktor Kartini?
2. Bagaimanakah pemodelan profil arah dan kecepatan angin di sekitar reaktor Kartini?
3. Berapakah nilai TEDE (*Total Effective Dose Equivalent*) akibat pelepasan radionuklida di sekitar reaktor Kartini?
4. Apakah nilai TEDE masih memenuhi kriteria nilai pembatas dosis untuk masyarakat, sebagaimana ditetapkan dalam Perka BAPETEN No. 4 Tahun 2013?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan diadakannya penelitian ini, meliputi:

1. Menentukan nilai *source term* dari studi data pada Laporan Analisis Keselamatan (LAK) reaktor Kartini
2. Membuat pemodelan profil arah dan kecepatan angin di sekitar reaktor Kartini menggunakan *software* WRPlot

3. Menganalisis nilai TEDE (*Total Effective Dose Equivalent*) akibat pelepasan radionuklida melalui jalur lepasan udara di sekitar reaktor Kartini menggunakan *software* HotSpot 3.0.2
4. Mengevaluasi hasil nilai TEDE berdasarkan ketentuan nilai pembatas dosis untuk masyarakat sesuai dengan Perka BAPETEN No 4 Tahun 2013

1.4 Batasan Penelitian

Adapun batasan penelitian ini, meliputi:

1. *Source term* diambil dari data LAK tahun 2019 dan program proteksi radiasi reaktor Kartini.
2. Data meteorologi diambil pada kurun waktu 3 tahun yaitu tahun 2023-2025, berdasarkan hasil pembacaan stasiun meteorologi lokal di sekitar reaktor.
3. Jalur pelepasan radionuklida yang dianalisis hanya melalui 1 *pathway* yaitu *pathway* udara (atmosfer), khususnya lepasan melalui cerobong (*stack*) reaktor.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat diantaranya:

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang fisika nuklir dan proteksi radiasi, khususnya terkait dengan analisis dispersi atmosfer radionuklida dan estimasi TEDE di lingkungan sekitar reaktor penelitian.

2. Menambah literatur dan referensi penelitian bagi mahasiswa maupun peneliti yang akan melakukan kajian serupa menggunakan *software* WRPlot dan Hotspot 3.0.2, terutama dalam konteks evaluasi keselamatan radiasi pada reaktor berdaya rendah.
3. 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 dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Cara menentukan *source term* reaktor Kartini yaitu dengan cara studi data LAK tahun 2019. *Source term* yang diperoleh menunjukkan bahwa radionuklida yang dominan terlepas ke atmosfer berasal dari kelompok gas mulia, seperti Krypton (Kr) dan Xenon (Xe), radionuklida Iodin dan partikulat, seperti Tellurium (Te), Cesium (Cs), Rubidium (Rb), dan Ruthenium (RU), dengan nilai batas lepasan yang lebih rendah tetapi memiliki potensi dampak radiasi terhadap lingkungan.
2. Pemodelan arah dan kecepatan angin berhasil dibuat menggunakan *software* WRPlot berdasarkan data meteorologi yang diperoleh dari lokasi penelitian. Hasil pemodelan dalam bentuk diagram *windrose* menunjukkan adanya arah dominan pergerakan angin berasal dari Barat-Barat Daya (WSW) dan kecepatan angin sebesar 3,48 m/s.
3. Nilai TEDE pada berbagai jarak dari sumber pelepasan berhasil dihitung menggunakan *software* Hotspot 3.0.2. Hasil perhitungan menunjukkan

bahwa nilai TEDE bervariasi terhadap jarak dan kondisi stabilitas atmosfer. Nilai TEDE maksimum diperoleh pada jarak 0,31 km dengan stabilitas atmosfer C dari sumber pelepasan dengan nilai sebesar $2,90 \times 10^{-4}$ Sv per tahun, sedangkan pada jarak yang lebih jauh nilai TEDE cenderung menurun akibat proses dispersi dan pengenceran radionuklida di atmosfer.

4. Hasil evaluasi nilai TEDE yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan pembatas dosis (*dose constraint*) yang ditetapkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir melalui Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa seluruh nilai TEDE yang diperoleh pada berbagai jarak dan kondisi stabilitas atmosfer masih berada jauh di bawah batas *dose constraint* sebesar 0,3 mSv per tahun untuk anggota masyarakat. Oleh karena itu, pelepasan radionuklida ke atmosfer pada kondisi operasi normal masih berada dalam batas aman dan tidak menimbulkan dampak radiologis yang signifikan bagi masyarakat di sekitar fasilitas.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi eksperimen untuk meningkatkan kesesuaian antara hasil simulasi dan hasil pengukuran, sehingga akurasi analisis yang diperoleh menjadi lebih baik.



DAFTAR PUSTAKA

- Agung S., dan Mohammad M. 2010. *Analisis Distribusi Suhu Aksial Teras dan Penentuan Keff Pltn Pebble Bed Modular Reactor (Pbmr) Menggunakan Metode Mcnp 5*. Semarang: Berkala Fisika.
- Abidin Z., Tjiptono T.W., Dahlan I. 2008. *Hubungan Perilaku Keselamatan dan Kesehatan Kerja Dengan Dosis Radiasi Pada Pekerja Reaktor Kartini*. Yogyakarta: Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir.
- Anggraeni L. 2020. *Faktor- Faktor Yang Berhubungan Pada Petugas Radiologi di Instalasi*. Bandar Lampung: Jurnal Teras Kesehatan.
- Aminatun, A., Umamah, C., Fadilah, N., Rohmatika, N., dan Amin, M.M. 2024. *Studi Pustaka: Identifikasi Dampak Radioaktivitas Pada Lingkungan Dan Kesehatan Manusia*. Optika: Jurnal Pendidikan Fisika, **8 (2)**, 347-359. <https://doi.org/10.37478/optika.v8i2.4525>.
- Asynuzar, N. 2014. *Pengembangan aplikasi pengolahan data cuaca pada Stasiun Meteorologi Maritim Pontianak*: JUSTIN (Jurnal Sistem Dan Teknologi Informasi), 2(3), 178–183.
- Athiqoh, F., Setia Budi, W., Anam, C., Tri, D., dan Tjiptono, W. 2014. *Distribusi Fluks Neutron Sebagai Fungsi Burn-Up Bahan Bakar Pada Reaktor Kartini*: Youngster Physics Journal, **3(2)**, 107–112.
- Aldrian, E., & Susanto, R. D. 2003. *Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature*: International Journal of Climatology, **23(12)**, 1435–1452. <https://doi.org/10.1002/joc.950>.
- Arya, S. P. 1999. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Oxford: Oxford University Press.
- BAPETEN, 2011. *Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik Dan Intervensional*. Jakarta: jdih.bapeten.go.id.
- BAPETEN, 2012. *Tingkat Klierens*. Jakarta: jdih.bapeten.go.id. 2–3.
- BAPETEN, 2013. *Proteksi Dan Keselamatan Radiasi Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir*. Jakarta: jdih.bapeten.go.id. 2–3.
- Badan Tenaga Nuklir Nasional, 1996. Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Kartini, Dok. 08/BR-LAK/96/Rev.3

- Budi, Danial, G. S. L. 2022. *Analisis Energi Turbin Angin Savonius 3 Sudu pada Jermal Ikan Dusun Besar Kecamatan Pulau Maya*. Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin: (JTRAIN), **3(e-ISSN:2798-0421)**, 98–103.
- Cahyati, Y., & Yusuf, E. I. 2022. *Analisis Pengetahuan Perawat Rumah Sakit Terhadap Pentingnya Proteksi Radiasi Pada Saat Pemeriksaan Radiologi*. Malang: Jurnal Umpalankaraya.
- Crawford, J., Domel, R.U., Harris., F.F, dan Twining, J.R. 2000. *RadCon: A Radiological Consequences Model Technical Guide*. Australia: Organisasi Sains dan Teknologi Nuklir Australia.
- Daenuri Anwar, E. 2011. *Sistem Proteksi Radiasi: Analisis Terhadap Bidang Radiologi Rumah Sakit*: Jurnal Phenomenon, **1(1)**, 47–63.
- Dedi Sinaga, A., dan Muzaky Luthfi, O. 2019. *Pengolahan Data Grib Untuk Penentuan Karakteristik Gelombang Di Perairan Karimun Jawa Dengan Menggunakan Windwaves-05*: Journal of Innovation and Applied Technology, **5(1)**, 888–897. <https://doi.org/10.21776/ub.jiat.2019.005.01.11>.
- Destania, H. R. 2020. *Analisis Intensitas Hujan Menggunakan Idf Curve dan Wr Plot Pada Stasiun di DAS Buah*: Pilar Jurnal Teknik Sipil, **15(01)**, 19–23.
- Dibyso, S. 2007. *Studi Karakteristik Pressurizer Pada Pwr*: Prosiding PPI - PDIPTN, 179–185.
- EPA. 2000. *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*. United States Environmental Protection Agency.
- Fadholi, A. 2013. *Analisis Komponen Angin Landas Pacu (Runway) Bandara Depati Amir*. Pangkalpinang: Statistika, **13(2)**, 45–53.
- General Atomics, 1988. *TRIGA Mark II Reactor Description and Safety Analysis Report*. San Diego, California: General Atomics.
- Harianto R., Istanto W., Laksmono W., dan Nugroho A. 2010. *Aspek-Aspek Perpipaian Yang Penting Dalam Evaluasi Laporan Analisis Keselamatan Pendahuluan Pltn*. Yogyakarta: Seminar Nasional VI.
- Hariyono G., 2006. *Perkembangan Tenaga Nuklir di Dunia*. Jakarta: Buletin Alara **Volume 7 Nomor 3, April 2006**, 102 – 112.
- Hartanto B., Astriawati N., Supartini., dan Yekti D. 2022. *Pencarian dan Pemanfaatan Informasi Data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG)*. Yogyakarta: INSOLOGI Jurnal Sains dan Teknologi. **1(5)**, 553–564. <https://doi.org/10.55123/insologi.v1i5.906>.

- Hanna, S. R., Briggs, G. A., & Hosker, R. P. 1982. *Handbook on Atmospheric Diffusion*. U.S. Department of Energy.
- Herlambang, Y. D., Margana., Safarudin Y., Yosintaska., Yusrindra N., Wibowo R., dan Cahya Y. 2020. *Model Alat Ukur Kecepatan Angin, Arah Angin Dan Intensitas Radiasi Matahari*. Semarang: EKSERGI Jurnal Teknik Energi.
- Hiswara, E., dan Darmawati, S. 2024. *Pengantar Sistem Proteksi Radiasi Pengantar Sistem Proteksi Radiasi*. Jakarta: BRIN.
- Homann, S. 2014. *HotSpot (Health Physics Codes for the PC)*. 198.
- HotSpot, 2019. *Health Physics Codes Version 2.07.1 User's Guide*: National Atmospheric Release Advisory Center Lawrence Livermore National Laboratory Livermore, CA 94550.
- Holton, J. R. & Hakim, G. J. 2012. *An Introduction to Dynamic Meteorology* (5th ed.): Academic Press.
- IAEA, 1995. *Nuclear Safeguards and the International Atomic Energy Agency April 1995*.
Austria: International Nuclear Information System (INIS).
- IAEA, 2001. *Safety Report Series No 19*. Austria: International Nuclear Information System (INIS).
- IAEA Annual Report, 2014. *IAEA Annual Report 2014*. Austria: International Nuclear Information System (INIS).
- IAEA. 2016. *Environmental Dispersion of Radioactive Material in Air*. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- IAEA. 2022. *Iaea Annual Report 2020*. Austria: Badan Energi Atom Internasional (IAEA).
- IAEA. 2022. *Safety Assessment for Research Reactors and Preparation of the Safety Analysis. Report. 20, 21*. Austria: jdih.bapeten.go.id. (2006). 1–48.
- International Atomic Energy Agency. 2018. *Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities* (IAEA Safety Standards Series No. GSG-10).
- International Atomic Energy Agency. 2018. *IAEA Safety Standards: Exposure Pathways and Definitions*.
- International Commission on Radiological Protection. 2007. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological*

- Protection*: ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*, **37**(2–4).
- International Commission on Radiological Protection. 2012. *Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60*: ICRP Publication 119.
- Jesse L., Cristiane L., dan Michael A.J. 2016. *User Guide Wind and Rain Rose Plots for Meteorological Data WRPLOT View TM*: Lakes Environmental Software.
- Jilani A. B. 2009. *Atmospheric dispersion and consequence modeling of radiological emergencies*. Pakistan Institute of Engineering & Applied Sciences, Nilore, Islamabad, Pakistan.
- Kuntoro. 2023. *Keselamatan reaktor nuklir*. Jakarta: BRIN.
- Kusuma, M. H., Widyatmaka, S., & Teknologi, P. 2009. *Analisis Keselamatan Pelepasan Produk Fisi Dari Reaktor Kartini Ke Lingkungan*. 228–233.
- Kusuma M. Hadi, 2005. *Evaluasi Keselamatan Sistem Ventilasi reaktor Kartini*, Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir X, P2TKN-BATAN, 15-17 Februari.
- Lakes Environmental. (2018). *WRPLOT View: Wind rose plots for meteorological data*. Ontario: Lakes Environmental Software. Diakses dari [Lakes Environmental](#).
- Maemunah, I. R., Yuningsih N., dan Irwanto D. 2019. *Studi komparasi reaksi fisi dan fusi pada pembangkit listrik tenaga nuklir masa depan*. Mataram: Prosiding Seminar Nasional Fisika.
- Malaka, M. 2019. *Dampak Radiasi Radioaktif Terhadap Kesehatan*. *Foramadiahi*. Maluku Utara: Jurnal Kajian Pendidikan Dan Keislaman, **11**(2), 199. <https://doi.org/10.46339/foramadiahi.v11i2.204>.
- Mahura A, Baklanov A, Rensen S. J.H, 2002. *Long-term atmospheric transport and deposition patterns from nuclear risk sites in euro-arctic region*. Danish Meteorological Institute. Sci. Report, N; 2-15.
- Mohammad Bagher, A., Vahid M., dan Mohsen M. 2014. *Introduction to Radioactive Materials*. Iran: International Journal of Renewable and Sustainable Energy, **3**(3), 59. <https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20140303.13>.
- Muhammad, S. 2013. *Seminar Keselamatan Nuklir 2013 ISSN*. Jakarta: BAPETEN.1412 - 3258.

- Mudjilan dan Tri Nugroho Hadi S. 2018. *Analisis kebutuhan bahan bakar reaktor kartini*. Yogyakarta: Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir.
- Monita, R. 2021. *Pekerja Radiasi Di Instalasi Radiologi Rumah Sakit Pekanbaru Medical Center (Pmc) Tahun 2020*. Pekanbaru: Media Kesmas (Public Health Media)01, **26–39**.
- Mubarika, S., dkk. 2006. *Analisis dan Penentuan Distribusi Fluks Neutron Thermal Arah Aksial dan Radial Teras Reaktor Kartini dengan Detektor Swadaya*. Yogyakarta: Jurnal Sains dan Matematika (JSM), **14(3)**, 155–159.
- Mujiasih, S. 2011. *Pemanfaatan Data Mining Untuk Prakiraan Cuaca*. Jakarta: Jurnal Meteorologi Dan Geofisika, **12 (2)**.
<https://doi.org/10.31172/jmg.v12i2.100>.
- Nugraheni, F., Anisah F., dan Susetyo G.A. 2022. *Analisis Efek Radiasi Sinar-X pada Tubuh Manusia*. Surakarta: Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika Dan Aplikasinya), **1(1)**, 19–25.
- Nurhidayah. 2023. *Analisis Neutronik Teras Candle Gas-Cooled Fast Reactor (Gfr) Dengan Bahan Bakar Uranium Metalik (U-10%Wt_{zr}) Berbasis Openmc: Universitas Sriwijaya, Jl Raya Palembang-Prabumulih Km.32, Ogan Ilir,30862, Indonesia*. **8(1)**, 43–50.
- Pande, U. 2018. *Effect Of Consequences Mitigation For Reactor Power On. June 2013*. Yogyakarta: Prosiding Seminar Nasional "40 Tahun Pandu Berbakti.
- Pande Made Udiyani & Widodo Surip. 2012. *Penentuan Koefisien Dispersi Atmosferik Untuk Analisis Kecelakaan Reaktor Pwr Di Indonesia*. Jakarta: Jurnal Teknik Reaktor Nuklir.
- Pandi, L. Y., Pramono Y., dan Aji B. 2019. *Buku Saku Reaktor Nuklir*. Jakarta: Pemanfaatan dan Pengawasan (Y. R. Akhmad (Ed.); 1st ed., Issue Mei). Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).
- Pardi, P., dan Purwadi, P. 2020. *Evaluasi Keselamatan Operasi Reaktor Rsg-Gas Setelah 33 Tahun*. Banten: SIGMA EPSILON - Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir, **24(2)**, 92.
<https://doi.org/10.17146/sigma.2020.24.2.5995>.
- Prabudi, C. R., Aritonang S., dan Setiadipura T. 2023. *Desain Optimal Teras Small*

Modular Molten Salt Reactor (Sm-Msr) Sebagai Sistem Propulsi Kapal Perang. Banten: Jurnal Teknik Mesin, **10(1)**, 30–39. <https://doi.org/10.34128/je.v10i1.238>.

- Pasquill, F. 1961. *The Estimation of the Dispersion of Windborne Material*: Meteorological Magazine, 90(1067), 33-49.
- Rahman, F. U. A., Astuti E.R., Epsilawati L., dan Azhari A. 2020. *Paradigma baru konsep proteksi radiasi dalam pemeriksaan radiologi kedokteran gigi*. Bandung: Jurnal Radiologi Dentomaksilofasial Indonesia (JRDI), **4(2)**, 27. <https://doi.org/10.32793/jrdi.v4i2.555>.
- Raza S, Avila, RA. 2002. *Comparison of direct gamma dose rates from a stationary Gaussian plume using different models*. Nuclear Technology. **138**; 21 – 26.
- Rohman, B. 2009. *Koefisien Reaktivitas Temperatur Bahan Bakar Reaktor Kartini*. Yogyakarta: Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia. **Vol. X, No. 2, Agustus 2009**: 59-70.
- Rosmayani, L. 2022. *Karakterisasi Radioactive Fission Waste (Rfw) Dari Produksi Radioisotop Lutesium-177 Menggunakan Program ORIGEN 2*. Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, **28(2)**, 89. <https://doi.org/10.17146/urania.2022.28.2.6672>.
- Salam dan 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>.
- Salam dan Supriyatni. 2016. *Reaktor Kartini Sebagai Dasar Penentuan Kondisi Batas. 1–5*. Yogyakarta: Seminar Nasional Prosiding.
- Suhartono, S., dan Subiharto, S. 2018. *Penentuan Daerah Safety Perimeter Dengan Software Hotspot Versi 3.0.3 Pada Kecelakaan Reaktor Rsg-Gas Pada Daya 5 Mw, 10 Mw Dan 15 Mw*. Reaktor: Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir, **15(1)**, 23. <https://doi.org/10.17146/bprn.2018.15.1.4793>.
- 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>.
- Syarifah, R. D., Afriani M.D., Prasetya F., dan Maulina W. 2023. *Efek Penambahan Protaktinium-231 (Pa-231) pada Nilai Faktor Multiplikasi Efektif Reaktor PWR Berbahan Bakar ThN-U233N*. Jember: Jurnal Ilmu Fisika Dan

- Pembelajarannya (JIFP), **7(2)**, 23–32.
<https://doi.org/10.19109/jifp.v7i2.19159>.
- Seinfeld, J. H. & Pandis, S. N. 2016. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Stull, R. B. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*: Kluwer Academic Publishers.
- Tadeus, D. Y., Setiyono B., dan Setiawan I. 2010. *Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal*. Semarang: Jurnal Transmisi Universitas Diponegoro, **12(1)**, 8–13.
- Tjiptono T. dan Nugroho T. 2015. *Kajian Keselamatan Reaktor Kartini Dengan Teras Berbahan Bakar Plat U 3 Si 2 -Al*. Yogyakarta: Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology **1**, 77–86.
- Trikasjono T., Supriyatni E., dan Budiyono H. 2016. *Studi Penerimaan Dosis Eksterna Pada Pekerja Radiasi Di Kawasan*. Yogyakarta: Seminar Nasional Iv Sdm Teknologi Nuklir Yogyakarta, **25-26 Agustus 2008** ISSN 1978-0176.
- Tjahjono, H. 1996. *Reaktor Nuklir Dan Aspek Radiologisnya*. Yogyakarta: BRIN.
- Tjiptono, T. W., dan Nugroho, T. 2015. *Safety Assessment Of Kartini Reaktor That Core Is Loaded By U 3 Si 2 -Al Fuel Plat Element*: Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology, **18(2)**, 77–86.
- Turner, D. B. 1994. *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling* (2nd ed.): CRC Press.
- UNSCEAR. 2008. *Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly*. New York: United Nations.
- United States Environmental Protection Agency. 1999. *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications (EPA-454/R-99-005)*. U.S. EPA.
- Waluyo A. dan Alamsyah R. 2018. *Kajian Format Dan Isi Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Daya*. Yogyakarta: Prosiding Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir 2018.
- Zohuri, B. 2023. *Thermal-hydraulic analysis of nuclear reactors: Introduction to Energy Essentials* January 202. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-03623-6>.

Zolkefli, M. A., dan Hashim, H. 2021. *Wind Rose Analysis for UTHM and Possible Pollution Sources Zone*. Malaysia: Progress in Engineering Application and Technology, 2(1), 432– 443.

