
Evaluasi Pengembangan Infrastruktur Keselamatan Nuklir dan Analisis Risiko terhadap Peristiwa Radiasi Nuklir

Ilma Salma Samiyah^{1*}, Khafiyya Farda Aini², Yayu Siti Muyassaroh³ dan Ferli Septi Irwansyah⁴

*^{1,2,3,4}Program Studi Pendidikan Kimia, UIN Sunan Gunung Djati Bandung
Jl. Soekarno-Hatta No.748, Bandung, 40614, Indonesia*

**E-mail : ilmasalmasamiyah22@gmail.com*

ABSTRAK

Evaluasi pengembangan infrastruktur keselamatan nuklir sangat penting dalam memastikan keamanan operasional dan pencegahan kejadian kecelakaan nuklir yang berdampak serius. Analisis ini melibatkan korelasi antara peristiwa dan tingkat kepentingan keselamatan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode PRISMA. Dengan sumber data yang diperoleh dari science direct dan MDPI. Diperoleh hasil sebanyak 3 artikel yang telah dilakukan reduksi data. Tinjauan literatur ini menyoroti pentingnya menciptakan infrastruktur keselamatan yang dioptimalkan sebelum mengoperasikan pembangkit listrik tenaga nuklir. Tinjauan ini mempelajari tujuh isu utama dan kesiapan organisasi, laboratorium, dan tenaga kerja. Tinjauan literatur sistematis ini menginvestigasi status dari tujuh isu utama infrastruktur keselamatan nuklir dari 19 isu yang ada, serta kesiapan organisasi pendukung, laboratorium, dan tenaga kerja sesuai panduan evaluasi status dari Badan Tenaga Atom Internasional (*International Atomic Energy Agency/IAEA*) pada fase 3 dan praktik negara-negara lain.

Kata kunci: keselamatan nuklir, infrastruktur keselamatan nuklir, peristiwa radiasi nuklir, analisis risiko.

ABSTRACT

Evaluation of the development of nuclear safety infrastructure is very important in ensuring operational security and preventing nuclear accidents with serious impacts. This analysis involves the correlation between events and the importance of safety. The method used in this study is the PRISMA method. With data sources obtained from science direct and MDPI. The results obtained were 3 articles that had been done with data reduction. This literature review highlights the importance of creating an optimized safety infrastructure prior to operating a nuclear power plant. This review examines seven key issues and organizational, laboratory, and workforce readiness. This systematic literature review investigates the status of seven key nuclear safety infrastructure issues out of 19 issues, as well as the readiness of support organizations, laboratories, and workforce according to the International Atomic Energy Agency (IAEA) status evaluation guidelines on phases 3 and practice of other countries.

Keywords: nuclear safety, nuclear safety infrastructure, nuclear radiation events, risk analysis.

1. PENDAHULUAN

Penggunaan energi nuklir sebagai sumber energi telah menjadi perhatian utama di banyak negara. Namun, pengembangan infrastruktur energi nuklir harus disertai dengan penekanan yang kuat pada budaya keselamatan dan analisis risiko untuk meminimalkan risiko insiden nuklir. Keselamatan fasilitas nuklir, infrastruktur, dan transportasi bahan nuklir adalah yang paling penting, dan faktor manusia serta budaya keselamatan memainkan peran penting dalam memastikan keselamatan.

Dalam konteks ini, evaluasi pembangunan infrastruktur keselamatan nuklir dan analisis risiko yang terkait dengan peristiwa radiasi nuklir sangat penting untuk menjamin keselamatan masyarakat dan lingkungan. Badan Tenaga Nuklir Nasional (Badan Tenaga Nuklir Nasional) dan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (Badan Pengawas Tenaga Nuklir) adalah dua lembaga di Indonesia yang bertanggung jawab untuk memastikan keselamatan nuklir dan meminimalkan risiko insiden nuklir. Peraturan Presiden No.60 Tahun 2019 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Keselamatan Nuklir dan Radiasi (Peraturan Presiden No. 60 Tahun 2019 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Keselamatan Nuklir dan Radiasi) menetapkan kebijakan dan strategi nasional keselamatan nuklir dan radiasi di Indonesia. Badan Tenaga Nuklir Nasional juga terlibat dalam penyiapan dan pengembangan infrastruktur PLTN dengan dukungan Badan Tenaga Atom Internasional (*International Atomic Energy Agency/IAEA*). Terlepas dari upaya yang dilakukan oleh pemerintah Indonesia untuk memastikan keselamatan nuklir, risiko yang terkait dengan kejadian radiasi nuklir tidak dapat sepenuhnya dihilangkan. Oleh karena itu, penting untuk mengevaluasi pengembangan infrastruktur keselamatan nuklir dan menganalisis risiko yang terkait dengan peristiwa radiasi nuklir untuk meminimalkan dampak insiden tersebut terhadap masyarakat dan lingkungan. Tulisan ini bertujuan untuk mengevaluasi perkembangan infrastruktur keselamatan nuklir dan menganalisis risiko yang terkait dengan kejadian radiasi nuklir di Indonesia. Bagian berikut ini akan membahas kondisi infrastruktur keselamatan nuklir di Indonesia saat ini, risiko yang terkait dengan kejadian radiasi nuklir, dan langkah-langkah yang dapat diambil untuk meminimalkan risiko tersebut.

2. METODE PENELITIAN

Artikel ini termasuk sebuah *systematic literature review* (SLR). Prosedur penelitian ini mengadopsi desain PRISMA (*Preferred Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*) (Moher et al., 2009). *Systematic literature review* (SLR) adalah metode penelitian yang digunakan untuk mengidentifikasi, meninjau, mengevaluasi, dan menginterpretasikan semua penelitian yang tersedia tentang fenomena topikal yang menarik, dengan pertanyaan penelitian relevan yang spesifik (Lusiana & Suryani, 2018). Metode ini dilakukan secara sistematis dengan mengikuti langkah atau protokol yang telah ditentukan, seperti metode PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses*) (Page et al., 2021).

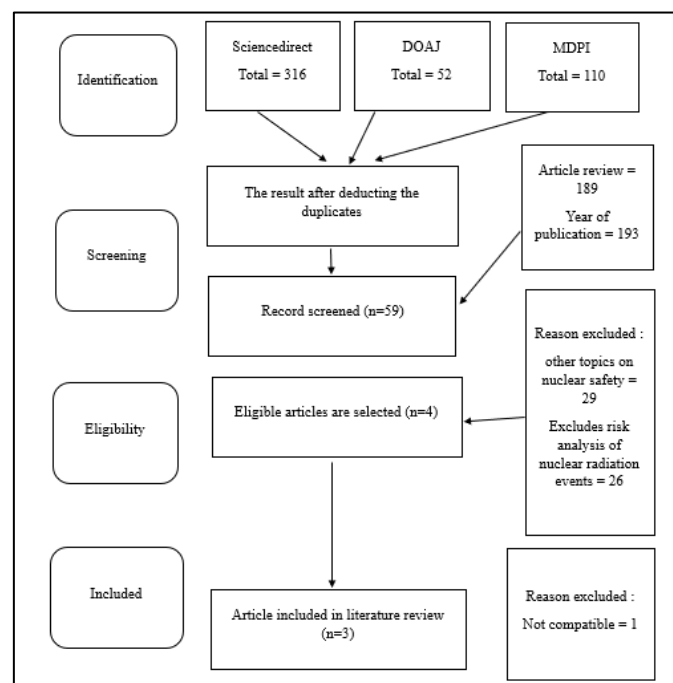
Analisisnya terdiri atas seluruh artikel Science Direct, DOAJ, dan MDPI. Sampel penelitian ini adalah 59 artikel yang diperoleh pada jurnal-jurnal tersebut. Prosedur untuk penelitian ini terdiri dari empat langkah utama yaitu identifikasi, skrining, kelayakan, dan disertakan. Pada langkah identifikasi, kata kunci "*nuclear and radiation safety*" ditulis pada kotak pencarian Science Direct, DOAJ, dan MDPI dengan batasan tahun 2021-2023. Jumlah artikel dari hasil pencarian pada tahap ini dicatat, tujuannya untuk mengetahui perbandingan jumlah artikel setelah mencapai tahap disertakan. Setiap artikel diidentifikasi judul, kata kunci dan abstrak yang berhubungan dengan tujuan artikel ini. Artikel yang diidentifikasi adalah artikel yang berbahasa Inggris dan tidak termaksud dalam Artikel jenis *book chapter* dan *book review*. Pada tahap *skrining*, teks lengkap artikel dibaca secara cepat untuk menilai kesesuaian isi artikel dengan tujuan artikel ini. Pada tahap berikutnya, kelayakan artikel ditentukan melalui keterkaitan setiap komponen artikel (identitas, judul,

tujuan, metode, hasil, kesimpulan, hal penting atau menarik artikel) dengan tujuan studi ini. Pada tahap terakhir, artikel yang dianggap layak dipelajari dan dianalisis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pencarian berdasarkan kata kunci diperoleh sebanyak 478 artikel yang diperoleh dari Sciencedirect sebanyak 316 artikel; DOAJ 52 artikel; dan MDPI 110 artikel. Setelah dilakukan pengecekan, ternyata didapatkan beberapa kriteria yang tidak memenuhi, seperti didapatkan artikel review sebanyak 189 artikel, waktu publikasi yang tidak sesuai kriteria sebanyak 193, dan terdapat juga beberapa artikel dengan judul yang sama sehingga didapatkan 59 jurnal dari hasil pengurangan tersebut. Kemudian artikel tersebut diseleksi kembali dan didapatkan 29 artikel yang tidak membahas mengenai topik keselamatan nuklir, dan 26 artikel yang tidak termasuk analisis risiko peristiwa radiasi nuklir dan terdapat 1 artikel yang tidak sesuai dengan kriteria. Sehingga hasil akhir didapatkan 3 artikel yang memenuhi syarat.

Pencarian literatur dijelaskan lebih detail pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Kerangka Peraturan Keselamatan Nasional

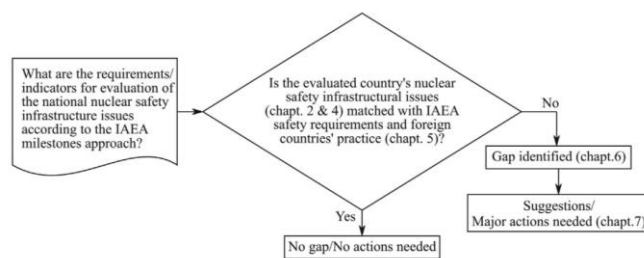
3.1. Keselamatan Nuklir dan Analisis Risiko terhadap Peristiwa Radiasi Nuklir

Keamanan nuklir merupakan elemen yang harus diperhatikan dalam penggunaan nuklir, karena bahayanya efek dari radiasi nuklir tersebut. Keamanan nuklir didefinisikan sebagai pencegahan dan deteksi, tanggapan terhadap pencurian, sabotase, akses tidak sah, transfer ilegal, atau tindakan jahat lainnya yang melibatkan bahan nuklir, zat radioaktif lainnya, atau fasilitas terkaitnya. Untuk menghindari adanya risiko tersebut, maka pembuat kebijakan dan otoritas yang kompeten perlu menekankan penciptaan infrastruktur keamanan ataupun keselamatan yang optimal sebelum infrastruktur tersebut digunakan. Dalam pengawasannya, perlu dilakukan evaluasi agar infrastruktur tersebut sesuai dengan standar operasional yang ada (Islam et al., 2021). Adapun proses evaluasi ini ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Proses Evaluasi

| Evaluation process. | | |
|------------------------------|--|---|
| Issues | Conditions | Basis for evaluation [2-4] |
| Legislative framework | - Comprehensive legislative supervision in the nation is to be set up | - Comprehensive legislative oversight established - Legislation maintained and amended as required |
| Regulatory framework | - A competent, independent regulatory body is to be set up | - All activities to implementing the relevant international legal instruments ought to be finished - All regulations, codes, and standards are made ready - Adequate regulatory staff recruitment is in place - Competence of workforce is maintained |
| Radiation protection | - All essential radiation monitoring and protection program are to be set up to rationalize the radiation exposure of the workers, the public, and environment | - Whether radiation monitoring equipment is set up and ready for both on-site and off-site - Completely materialized site environmental monitoring program - Performing off-site radiation monitoring program - Radiation dosimetry laboratory set up for workforces |
| Human resources development | - All human resources to regulate, commission, and operate the 1 st NPP are to be set up - Education and training program for the ongoing flow of competent individuals has to be on track | - Upgrading the radiation protection program to optimize radiation exposure during plant operation - Fully staffed for regulatory, operation, maintenance, and technical support matters - Continuation and personnel development plan to maintain the competence of all areas of the national nuclear program - Improved educational opportunities to develop a continuing flow of qualified workforces - Enhanced training programs for the regulator, operator, owner, and TSOs - Integrated HRD plan established |
| Environmental protection | - Conformity with environmental laws and regulations are to be assured - Monitoring and assessment program is to be fully implemented under international standard | - Identification of specific environmental requirements and their inclusion in the licensing conditions for facility operation - Complete characterization of the site and its surroundings to create a baseline condition - Development and full implementation of environmental monitoring program with international standards |
| Emergency planning | - The groundwork for emergency planning is to be concluded and tested | - All plans have been concluded into compact programs and actions - The regulatory body has assessed and endorsed the emergency plans - Communication protocols and strategies among relevant organizations and neighboring countries are established - Emergency notification frameworks are set up and altogether tried - Challenges to sheltering and evacuation have been taken out - Emergency drills and exercises have been executed with the engagement of local and national organizations and demonstrations given to the regulatory body — to test and to ensure the efficacy of the emergency arrangements |
| Radioactive waste management | - Storages or disposal facilities of low and intermediate level waste (LILW) are to be fully arranged | - Existing, upgraded or new facilities for the storage or disposal of LILW are completely operational and ready to collect waste from the 1 st NPP - The liable party and funding structure has been set up - Practice international efforts and progress toward final high level waste (HLW) disposal and modify state policy |

Setelah dilakukan proses evaluasi, selanjutnya dilakukan identifikasi masalah infrastruktur tersebut. Dengan adanya identifikasi tersebut, maka akan diketahui perlu atau tidaknya tindakan yang diperlukan untuk pengembangan infrastruktur nuklir tersebut. Proses identifikasi celah untuk masalah infrastruktur keselamatan dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Proses Identifikasi Celah untuk Masalah Infrastruktur Keselamatan

Selain keselamatan nuklir, terdapat pula aspek yang harus diperhatikan, seperti keselamatan nuklir. Keselamatan nuklir bisa diartikan sebagai tercapainya kondisi operasi yang layak, pencegahan kecelakaan atau pengurangan risiko akibat kecelakaan, ataupun diartikan sebagai perlindungan pekerja, masyarakat, dan lingkungan dari bahaya radiasi yang tidak semestinya. Perbedaan utama antara keselamatan dan keamanan nuklir terletak pada intensionalitasnya. Kecelakaan terkait keselamatan nuklir termasuk ke dalam suatu kejadian yang tidak disengaja. Sedangkan, insiden keamanan nuklir termasuk ke dalam suatu kejadian yang jelas dilakukan secara disengaja dan dilakukan dengan motif tertentu.

Dalam menganalisis risiko terhadap peristiwa radiasi nuklir, terdapat suatu metode yang dapat diadopsi untuk menganalisis dan mengevaluasi risiko terjadinya radiasi nuklir, salah satu metodenya yaitu metode

evaluasi komprehensif fuzzy yang dapat mengkuantifikasi beberapa factor yang tidak pasti dan sulit untuk dikuantifikasi, dan metode tersebut diraa lebih objektif dan lebih akurat dalam menafsirkan situasi yang sebenarnya. Sehingga nantinya akan dihasilkan data seperti tabel 2 dan tabel 3 (Wei et al., 2023).

Tabel 2. Hasil Perhitungan Risiko Unit Evaluasi

| The Evaluation Unit | Spent Fuel Pool | Extraction Process Plant | Tail-End Conversion Plant | Waste Liquid Purification Workshop | Solidification Workshop | Discharge Workshop |
|-------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------------|-------------------------|--------------------|
| The calculation results | 0.240 | 0.272 | 0.736 | 0.707 | 0.034 | 0.059 |
| Normalized results | 0.083 | 0.095 | 0.256 | 0.245 | 0.012 | 0.020 |
| The Evaluation Unit | Solid Waste Preparation Workshop | Equipment Room | Warehouse | Centralized Control Room | Office | Dormitory |
| The calculation results | 0.222 | 0.091 | 0.275 | 0.156 | 0.088 | 0 |
| Normalized results | 0.077 | 0.032 | 0.095 | 0.054 | 0.031 | 0 |

Tabel 3. Hasil Perhitungan Tingkat Bahaya di Area Pabrik

| The Factory | The Main Process Area | Three-Waste Area | Auxiliary Equipment Area | Pre-Plant Area |
|-------------------------|-----------------------|------------------|--------------------------|----------------|
| The calculation results | 0.416 | 0.117 | 0.183 | 0.081 |
| Normalized results | 0.522 | 0.146 | 0.230 | 0.102 |

Dengan adanya analisis keamanan dan keselamatan nuklir, nantinya akan diketahui kemungkinan terjadinya peristiwa radiasi nuklir. Sehingga, dapat dijadikan suatu informasi yang nantinya dapat digunakan untuk memelihara dan meningkatkan keselamatan (Šimić et al., 2022).

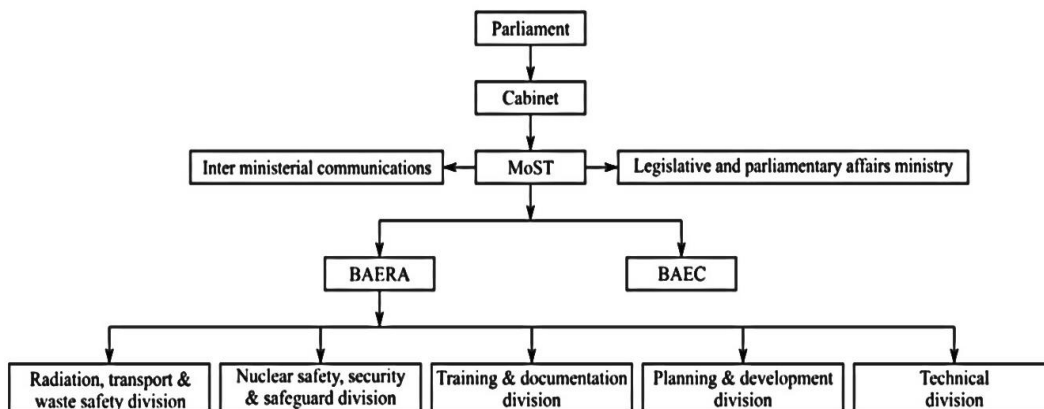
3.2. Diskusi

Dalam evaluasi pengembangan infrastruktur keselamatan nuklir dan analisis resiko terhadap peristiwa radiasi nuklir diperlukan analisis korelasi antara peristiwa dengan signifikansi keselamatan yang berbeda di pembangkit listrik tenaga nuklir. Analisis ini dilakukan untuk mengukur signifikansi korelasi antara kelompok kejadian dengan signifikansi keselamatan yang berbeda berdasarkan 6 sumber data dari beberapa negara. Ekspektasi korelasi didasarkan pada asumsi “segitiga keselamatan” dan tertanam dalam program pengalaman operasi yang luas. Perbandingan antara kumpulan data dimungkinkan pada tingkat umum tetapi terbatas karena perbedaan dalam kelompok peristiwa dan durasi waktu yang berbeda dari data yang tersedia.

Korelasi antara kelompok kejadian dengan signifikansi keamanan yang berbeda dikonfirmasi pada beberapa tingkat untuk semua kecuali dua sumber data yaitu Spanyol dan Belgia. Meskipun tidak jelas apa alasannya, dampak periode yang relatif singkat untuk data dari Spanyol dan Belgia tentu saja relevan. Juga, untuk Belgia penting bahwa data dibatasi pada satu PLTN. Hasil terpenting untuk sumber data lain dibahas secara terpisah. Data yang lain yaitu di Amerika Serikat menunjukkan korelasi yang diharapkan antara kejadian dengan signifikansi yang berbeda untuk semua kelompok pada tingkat tinggi. Namun, faktor kapasitas secara statistik berkorelasi negatif secara signifikan dengan semua kelompok acara, terutama dengan semua acara dan peristiwa. Oleh karena itu, mengumpulkan kejadian dengan signifikansi keselamatan yang lebih kecil tampaknya penting dalam pengalaman pengoperasian AS, baik untuk korelasi dengan kejadian yang lebih signifikan maupun untuk pemadaman listrik. Hasil dari sumber data Prancis menunjukkan gambaran yang sedikit lebih kompleks. Hal ini sebagian karena lebih banyak kelompok yang dianalisis dan banyak di antaranya merupakan indikator dengan penentuan signifikansi keselamatan yang agak tidak tepat sehingga

menghasilkan korelasi negatif antara peristiwa dengan signifikansi keselamatan yang berbeda di pembangkit listrik tenaga nuklir Prancis. Hasil korelasi untuk kejadian di Jerman menunjukkan korelasi statistik yang cukup signifikan jauh di atas ambang batas. Namun, secara umum adanya korelasi, dengan asumsi ketersediaan data yang memadai, mungkin merupakan ukuran kuantitatif yang baik tentang seberapa baik program pengalaman operasi disiapkan dan dilakukan. Bahkan tanpa mengidentifikasi apa yang mendorong korelasi dan apakah ada penyebabnya, tampaknya mengumpulkan kejadian penting dengan keselamatan rendah dapat membantu dalam mengidentifikasi penyebab dan mencegah kejadian penting dengan keselamatan tinggi. Demikian pula, kurangnya korelasi mungkin menjadi alasan untuk memeriksa kembali program pengalaman operasi, kriteria untuk melaporkan kejadian dan penentuan signifikansi keselamatan (Bizet, R. at al, 2017). Penyebab antara kelompok peristiwa dengan signifikansi keselamatan yang berbeda dapat digunakan untuk menginformasikan dan meningkatkan pengumpulan pengalaman operasi dan program umpan balik untuk memelihara dan meningkatkan keselamatan. Selain itu, perbandingan program pengalaman operasi antara negara yang berbeda berdasarkan hasil yang disajikan dapat membantu mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan komparatif. Sehingga, analisis korelasi antara peristiwa dengan signifikansi keselamatan yang berbeda di pembangkit listrik tenaga nuklir penting dilakukan.

Setelah dilakukan identifikasi analisis korelasi peristiwa dengan signifikansi keselamatan yang berbeda di pembangkit listrik tenaga nuklir maka perlu dilakukan pengembangan dan penguatan infrastruktur keselamatan nuklir dan radiasi untuk program tenaga nuklir. Evaluasi status keselamatan nuklir dan radiasi di Bangladesh dilakukan dalam beberapa tahapan. Struktur kerangka peraturan keselamatan nasional dilakukan seperti diagram berikut.



Gambar 3. Struktur Kerangka Peraturan Keselamatan Nasional

Bagian 30 dan 31 dari BAER Act-2012 masing-masing membahas keselamatan nuklir dan proteksi radiasi. BAERA adalah badan otonom untuk mengatur apakah pengaturan yang terkait dengan proteksi radiasi di yurisdiksinya sesuai atau tidak. Perlindungan radiasi mencakup program proteksi radiasi, batas dosis untuk kelompok sasaran yang berbeda, persyaratan surveilans radiasi dan prosedurnya, kewajiban dan tugas petugas kontrol radiasi (RCO). Sedangkan BAEC bekerja untuk implementasi program proteksi radiasi. Memiliki tenaga dan peralatan untuk pemantauan dosis radiasi bagi pekerja, masyarakat, dan lingkungan. Laboratorium dosimetri standar sekunder dikelola oleh BAEC. Ini menyediakan layanan kalibrasi untuk peralatan radiologi menggunakan fasilitas medis, industri, dan penelitian. Dalam pengembangan sumber daya manusia (SDM), BAERA memiliki rencana rekrutmen bertahap untuk memperkuat tenaga kerja hingga

360 personel pada tahun 2025. Dibentuk pula akademik internasional yang bekerja sama dengan Federasi Rusia untuk mengembangkan tenaga kerja yang diinduksi oleh pengetahuan nuklir. Untuk pencegahan dan mitigasi berbagai bencana alam dan buatan manusia termasuk keadaan darurat nuklir dan radiologis, pemerintah Bangladesh telah menetapkan Undang-Undang Penanggulangan Bencana 2012 dan membentuk Dewan Penanggulangan Bencana Nasional (NDMC) yang dipimpin oleh Dewan Penanggulangan Bencana Nasional (NDMC). Kabinet Bangladesh menyetujui kebijakan nasional tentang limbah radioaktif dan pengelolaan bahan bakar nuklir bekas pada tahun 2019 yang menyatakan bahwa pengelolaan dan pembuangan limbah radioaktif akan dilakukan oleh perusahaan pengelola limbah milik negara [38]. Pemerintah akan membentuk perusahaan bernama 'perusahaan pengelolaan limbah radioaktif' di bawah Undang-Undang Perusahaan Bangladesh untuk mengelola pembuangan limbah radioaktif. Perusahaan baru ini akan dioperasikan di bawah BAEC dan akan mengelola limbah nuklir dan radiologi negara tersebut. BAEC memiliki fasilitas penyimpanan sementara di lembaga penelitian energi atom, Savar, Dhaka untuk mengelola limbah radioaktif negara selain yang akan dihasilkan di PLTN. Negara-negara yang memulai program tenaga nuklir biasanya menghadapi beberapa tantangan utama dalam mengembangkan infrastruktur nuklir nasional seperti, menyelesaikan kebijakan dan strategi nasional, mengembangkan kerangka hukum, regulator independen, operator, memasukkan instrumen hukum internasional ke dalam undang-undang nasional, pengaturan manajemen proyek, membangun tenaga kerja terampil, dan menciptakan organisasi baru karena keterbatasan sumber daya dan anggaran. Untuk meminimalisir permasalahan tersebut, Bangladesh telah secara logis memilih regulator negara vendor untuk mendapatkan bantuan regulasi untuk mengembangkan regulasi, kode, standar, panduan, dan sumber daya manusia untuk program tenaga nuklir negara tersebut.

Analisis Risiko dan evaluasi keamanan nuklir radiasi juga sangat penting untuk dilakukan. Analisis tersebut bisa dilakukan di beberapa bidang salah satunya di bidang industri pabrik daur ulang bahan bakar bekas. Pemrosesan ulang bahan bakar bekas adalah salah satu teknologi kunci untuk mewujudkan pembangunan berkelanjutan dan daur ulang tenaga nuklir. Sekali saja kecelakaan nuklir dapat mengakibatkan pelepasan zat radioaktif, hal itu dapat berdampak serius terhadap lingkungan dan manusia, yang pada akhirnya menyebabkan kerugian ekonomi yang sangat besar dan memiliki dampak sosial yang luas. Analisis dan evaluasi kejadian radiasi keamanan nuklir di pabrik pengolahan ulang bahan bakar bekas dapat memberikan dasar ilmiah untuk pencegahan dan penguraian. Analisis risiko dapat diketahui dengan mengidentifikasi masalah atau insiden keamanan nuklir dasar untuk pabrik pengolahan ulang bahan bakar bekas yang ditunjukkan pada tabel 4.

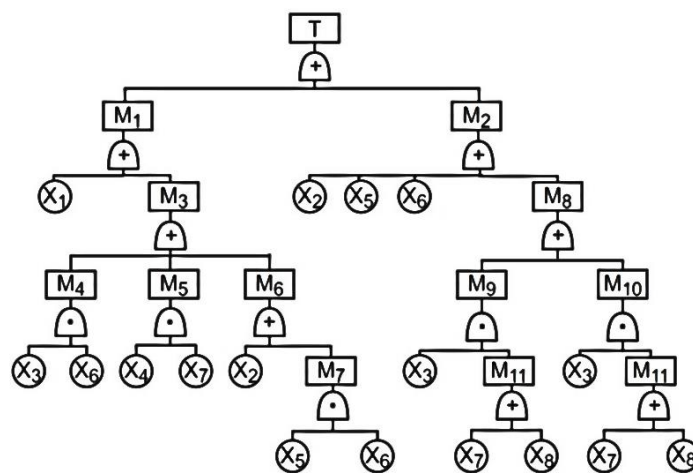
Tabel 4. Daftar Insiden Keamanan Nuklir Dasar untuk Pabrik Pengolahan Ulang Bahan Bakar Bekas

| Nomor Acara | Nama Acara | Probabilitas Kejadian | Hasil Normalisasi |
|-------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|
| X1 | Perangkat penyebaran radioaktif | 0,697 | 0,12 |
| X2 | Keamanan nuklir komputer | 0,706 | 0,13 |
| X3 | Penghancuran fasilitas nuklir | 0,690 | 0,12 |
| X4 | Keamanan nuklir transportasi | 0,707 | 0,13 |
| X5 | Ancaman batin | 0,702 | 0,12 |
| X6 | Potensi ancaman | 0,687 | 0,12 |
| X7 | Transfer ilegal | 0,721 | 0,13 |
| X8 | Pencurian | 0,709 | 0,13 |

Dengan asumsi bahwa probabilitas peristiwa radiasi keamanan nuklir dalam bahan bakar bekas pabrik pengolahan ulang adalah 1, maka simbol surat peristiwa radiasi keamanan nuklir dan peristiwa terkait ditunjukkan oleh tabel 5 dan pohon kesalahan keamanan nuklir untuk pabrik pengolahan ulang bahan bakar bekas ditunjukkan oleh gambar 4.

Tabel 5. Simbol Surat Peristiwa Radiasi Keamanan Nuklir dan Peristiwa Terkait

| Nomor | Kejadian | Nomor | Kejadian |
|-------|--|-------|---------------------------------|
| T | Insiden radiasi keamanan nuklir | M10 | Kegagalan peralatan pendukung |
| M1 | Peristiwa pelepasan radioaktif | M11 | Kehilangan |
| M2 | Kegagalan darurat | X1 | Perangkat penyebaran radioaktif |
| M3 | Kebocoran cairan limbah tingkat tinggi | X2 | Keamanan nuklir komputer |
| M4 | Kebocoran wadah | X3 | Penghancuran fasilitas nuklir |
| M5 | Kebocoran sistem transit | X4 | Keamanan nuklir transportasi |
| M6 | Memberi makan berlebihan | X5 | Ancaman batin |
| M7 | Kegagalan perangkat bantu | X6 | Potensi ancaman |
| M8 | Pemantauan kegagalan peralatan | X7 | Transfer ilegal |
| M9 | Kegagalan instrumen uji | X8 | Pencurian |



Gambar 4. Pohon kesalahan keamanan nuklir untuk pabrik pengolahan ulang bahan bakar bekas

Kombinasi analisis kualitatif dan analisis kuantitatif merupakan cara yang efektif untuk menganalisis semua jenis insiden keamanan nuklir dasar di pabrik pengolahan ulang bahan bakar bekas. Fault Tree Analysis (FTA) adalah salah satu teknik analisis yang dapat digunakan untuk menilai resiko kesalahan atau disebut juga analisis pohon kesalahan. Ada tiga analisis kepentingan dalam FTA yaitu kepentingan struktural, kepentingan probabilitas, dan kepentingan kritis. Untuk kepentingan struktural: perangkat penyebaran radioaktif = keamanan nuklir komputer = ancaman internal = ancaman potensial > penghancuran fasilitas nuklir = pemindahan ilegal > transportasi keamanan nuklir = pencurian. Untuk kepentingan probabilitas adalah sebagai berikut: keamanan nuklir komputer > perangkat penyebaran radioaktif = ancaman internal = ancaman potensial > transfer ilegal > penghancuran fasilitas nuklir > transportasi keamanan nuklir > pencurian. Untuk kepentingan kritis adalah sebagai berikut: computer keamanan nuklir > perangkat penyebaran radioaktif = ancaman internal = potensi ancaman > illegal transfer > penghancuran fasilitas nuklir > pengangkutan keamanan nuklir > pencurian. Dari faktor kuantitatif dan kualitatif yang komprehensif, dapat disimpulkan bahwa analisis kepentingan keamanan nuklir komputer adalah yang terbesar yang harus diberikan perhatian lebih dalam operasi sehari-hari dan manajemen sedangkan analisis kepentingan pencurian adalah yang minimal, tetapi tidak menutup kemungkinan bahwa itu akan terjadi.

Evaluasi keamanan nuklir dilakukan dengan menggunakan metode evaluasi komprehensif fuzzy dan kombinasi statistik matematika probabilistik. Metode tersebut digunakan untuk memperoleh bahaya dari

setiap unit evaluasi dan instalasi daerah, yang memberikan dukungan teoritis untuk operasi keselamatan nuklir dan darurat pencegahan pabrik pengolahan kembali bahan bakar bekas. Metode evaluasi komprehensif fuzzy mencakup lima langkah: himpunan faktor, bobot set, evaluasi set, evaluasi fuzzy faktor tunggal dan evaluasi komprehensif fuzzy (Li, W. *et al*, 2015).

Metode probabilitas dan statistik matematika digunakan untuk mengolah data setelah evaluasi komprehensif fuzzy. Mengambil contoh unit penampungan bahan bakar bekas, 13% ahli berpendapat bahwa risikonya sangat kecil, 13% berpendapat risikonya kecil, 13% berpendapat risikonya agak kecil, 13% berpendapat risikonya sedang, dan 11,5% menganggap risikonya agak besar. Metode ini digunakan untuk menghitung risiko dari 12 unit evaluasi, dan hasilnya ditunjukkan pada tabel t di bawah ini.

Tabel 6. Evaluasi Hasil Perhitungan Unit Hazard

| Satuan Evaluasi | Kolam Bahan Bakar Bekas | Ekstraksi Pabrik Proses | Bagian akhir Pabrik Konversi | Workshop Pemurnian Limbah Cair | Solidifikasi Bengkel | Memulangkan Bengkel |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|
| Hasil perhitungan | 0,493 | 0,554 | 0,561 | 0,551 | 0,476 | 0,490 |
| Hasil normalisasi | 0,086 | 0,097 | 0,098 | 0,096 | 0,083 | 0,086 |

| Satuan Evaluasi | Lokakarya Penyiapan Limbah Padat | Peralatan Ruang | Gudang | Terpusat Ruang kendali | Kantor | Asrama |
|-------------------|----------------------------------|-----------------|--------|------------------------|--------|--------|
| Hasil perhitungan | 0,493 | 0,502 | 0,502 | 0,421 | 0,427 | 0,243 |
| Hasil normalisasi | 0,086 | 0,088 | 0,088 | 0,074 | 0,075 | 0,043 |

Menurut data di atas, dimungkinkan untuk mendapatkan nilai probabilitas bahaya dari empat area tanaman dengan menjumlahkan dan merata-ratakannya, dan hasil spesifik ditampilkan di tabel 7 di bawah ini.

Tabel 7. Hasil Perhitungan Tingkat Bahaya di Area Pabrik

| Pabrik | Area Proses Utama | Area Tiga Limbah | Area Peralatan Bantu | Area Pra-Tanaman |
|-------------------|-------------------|------------------|----------------------|------------------|
| Hasil perhitungan | 0,536 | 0,503 | 0,502 | 0,364 |
| Hasil normalisasi | 0,281 | 0,264 | 0,264 | 0,191 |

Seperti dapat dilihat dari hasil pada tabel 3, urutan kepentingan keempat tanaman tersebut adalah: area proses utama > area tiga limbah > area peralatan bantu > area pra-pabrik. Itu Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada pabrik pengolahan ulang bahan bakar bekas, area proses utama memiliki nilai tertinggi dibandingkan area lainnya. Oleh karena itu, area tersebut harus diberikan perhatian lebih terutama dalam pembentukan dan implementasi berbagai tindakan pencegahan dan sistem. Area pra-tanaman memiliki risiko terendah, tetapi ada masih terdapat kemungkinan risiko yang perlu lebih diperhatikan. Pada saat yang sama, Untuk mengalokasikan kekuatan pelindung secara rasional di fasilitas nuklir, pentingnya pabrik dalam inspeksi keselamatan harian dan bor darurat pemrosesan ulang bahan bakar bekas risiko area proses utama adalah sekitar 1,5 kali dari area pra-pabrik, yang juga menunjukkan bahwa adalah pengaturan yang lebih tepat untuk berinvestasi 1,5 kali lipat dari perlindungan keselamatan kekuatan area pra-tanaman di area proses utama.

Langkah selanjutnya yaitu analisis perbandingan hasil dengan menggunakan metode indeks. Metode indeks digunakan untuk membandingkan delapan jenis insiden keamanan nuklir di setiap area pabrik dengan data yang diperoleh dari evaluasi fuzzy komprehensif. Hasil perbandingan didapatkan bahwa pabrik proses ekstraksi memiliki risiko tertinggi, dan area proses utama di empat pabrik memiliki risiko tertinggi yang sama dengan kesimpulan yang diperoleh melalui evaluasi komprehensif fuzzy dan statistik matematika probabilitas.

Melalui pohon kesalahan dan analisis risiko maka dapat diketahui bahwa komputer nuklir insiden keamanan adalah yang paling berbahaya dari delapan jenis dasar keamanan nuklir, sehingga perlu untuk mengambil lebih banyak tindakan pencegahan terhadap terjadinya kecelakaan dalam operasi sehari-hari.

Berdasarkan beberapa penelitian tersebut, evaluasi pengembangan infrastruktur keselamatan nuklir dan analisis resiko terhadap peristiwa radiasi nuklir dilakukan dalam beberapa tahapan. Tahap pertama yaitu analisis korelasi antara peristiwa dengan signifikansi keselamatan yang berbeda di pembangkit listrik tenaga nuklir. Analisis tersebut dilakukan untuk mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan proteksi keselamatan pada instalasi pembangkit listrik tenaga nuklir sehingga dapat dilakukan upaya pencegahan dan penanggulangan terhadap bahaya yang ditimbulkan. Tahap selanjutnya yaitu pengembangan dan penguatan infrastruktur keselamatan nuklir dan radiasi untuk program tenaga nuklir. Pengembangan infrastruktur dilakukan dengan menjalin kerja sama dibidang akademik internasional dengan Rusia sedangkan penguatannya dilakukan internal dengan mengembangkan potensi yang ada seperti pengembangan fasilitas infrastruktur di bidang medis, industry, dan penelitian serta pengelolaan dan pengolahan limbah bahan bakar nuklir bekas. Tahap terakhir yaitu analisis risiko dan evaluasi keamanan nuklir radiasi. Analisis risiko dapat diketahui dengan mengidentifikasi masalah atau insiden keamanan nuklir dasar kemudian dianalisis dengan metode Fault Tree Analysis (FTA) atau analisis pohon kesalahan yang terdiri dari tiga analisis kepentingan yaitu kepentingan struktural, kepentingan probabilitas, dan kepentingan kritis. Sedangkan evaluasi keamanan nuklir dilakukan dengan menggunakan metode evaluasi komprehensif fuzzy dan kombinasi statistik matematika probabilitas. Metode indeks digunakan untuk membandingkan perolehan data jenis insiden keamanan nuklir dengan data yang diperoleh dari evaluasi fuzzy komprehensif dan statistik matematika probabilitas.

4. KESIMPULAN

Pembangunan infrastruktur keselamatan nuklir dan analisis risiko kejadian radiasi nuklir sangat penting untuk menjamin keselamatan dan keamanan fasilitas, infrastruktur, dan transportasi bahan nuklir. Infrastruktur keselamatan nuklir nasional perlu dibangun, antara lain regulasi, koordinasi, dan kerjasama antar lembaga pemerintah, kerjasama regional dan internasional, peralatan dan fasilitas, serta sumber daya manusia untuk upaya pencegahan, deteksi, dan mitigasi. Evaluasi dan analisis risiko harus dilakukan secara berkelanjutan dan mendalam, dengan melibatkan pemahaman yang baik tentang infrastruktur keselamatan nuklir dan risiko yang terkait. Hal ini memungkinkan untuk mengidentifikasi area-area yang perlu diperbaiki dan mengimplementasikan tindakan pencegahan yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Islam, M. S., Faisal, S. I., & Khan, S. (2021). Development and strengthening of the nuclear and radiation safety infrastructure for nuclear power program of Bangladesh. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(5), 1705–1716. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.11.020>
- Li, W.; Liang, W.; Zhang, L.; Tang, Q. (2015). *Sistem penilaian kinerja kesehatan, keselamatan dan lingkungan berdasarkan bobot ahli dan evaluasi komprehensif fuzzy. J. Kerugian Sebelumnya*. Proses Ind. 2015, 35, 95–103.



-
- Lusiana, & Suryani, M. (2018). Metode SLR untuk Mengidentifikasi Isu-Isu dalam Software Engineering. *SATIN - Sains Dan Teknologi Informasi*, 3(1), 1–11. <https://doi.org/10.33372/stn.v3i1.347>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Medicine*, 6(7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- R. Bizet, P. Bonev, F. Lev Aque. (2017). *Apakah reactor nuklir lama kurang aman? Bukti dari data insiden*. Prancis : Armada.
- Šimić, Z., Peinador Veira, M., & Banov, R. (2022). Correlation between events with different safety significance in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(7), 2510–2518. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.01.034>
- Wei, C., Xu, S., Zou, S., Zhao, F., Qin, Z., Dong, H., & Hou, Z. (2023). Risk Analysis and Evaluation of Nuclear Security Radiation Events in Spent Fuel Reprocessing Plants. *Sustainability (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.3390/su15010781>