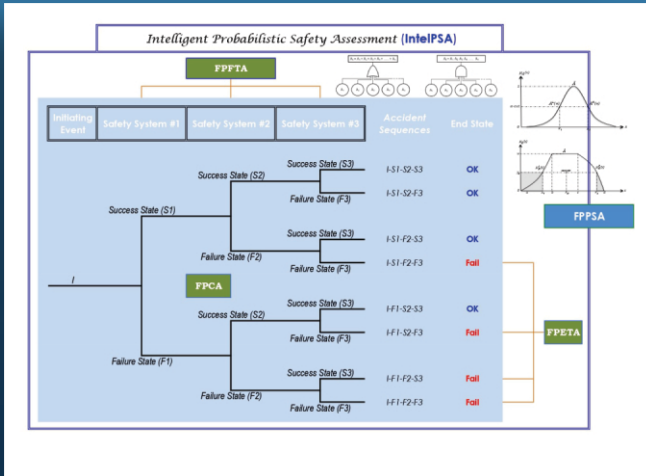


ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET BIDANG TEKNOLOGI KESELAMATAN REAKTOR

ANALISIS KESELAMATAN PLTN BERBASIS PROBABILITAS *FUZZY*



OLEH:
JULWAN HENDRY PURBA

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**ANALISIS KESELAMATAN PLTN
BERBASIS PROBABILITAS *FUZZY***

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2023 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution Non-commercial Share Alike 4.0 International license (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC-BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG TEKNOLOGI
KESELAMATAN REAKTOR**

**ANALISIS KESELAMATAN PLTN
BERBASIS PROBABILITAS *FUZZY***

OLEH:
JULWAN HENDRY PURBA

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2023 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Analisis Keselamatan PLTN Berbasis Probabilitas *Fuzzy*/Julwan Hendry Purba–Jakarta:
Penerbit BRIN, 2023.

xi + 69 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-623-8052-70-7 (cetak)
978-623-8052-69-1 (*e-book*)

- | | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1. PLTN | 4. Analisis pohon kegagalan |
| 2. Analisis keselamatan probabilistik | 5. Analisis pohon kejadian |
| 3. Probabilitas <i>fuzzy</i> | 6. Analisis kritikalitas |

621.316

Copy editor : Anton Winarko
Proofreader : Noviasuti Putri Indrasari & Rahma Hilma Taslima
Penata Isi : Rina Kamila
Desainer Sampul : S. Imam Setyawan




Cetakan : Mei 2023



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B. J. Habibie, Jln. M. H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340

E-mail: penerbit@brin.go.id

Webside: penerbit.brin.go.id

 PenerbitBRIN
 Penerbit_BRIN
 penerbit_brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BIODATA RINGKAS



Julwan Hendry Purba, lahir di Simalungun, pada tanggal 1 Juli 1970, adalah anak kedua dari dari Almarhum Bapak James Karmen Purba dan Almarhumah Ibu Frieda Purnama Napitupulu/Ibu Nemmy Damanik. Menikah dengan Yanuarita Tri Maharani, A.Md. dan dikarunia dua orang anak, yaitu Hendersan Giancarlo Purba dan Nathanael Marchello Purba.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor: 46/M Tahun 2021, tanggal 18 Oktober 2021 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai tanggal 30 Oktober 2021.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 163/I/HK/2023, tanggal 31 Maret 2023 tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri 124399 Pematang Siantar tahun 1983, Sekolah Menengah Pertama Negeri 3 Medan tahun 1986, dan Sekolah Menengah Atas Negeri 5 Medan tahun 1989. Memperoleh gelar sarjana teknik nuklir dari Universitas Gadjah Mada tahun 1995, memperoleh gelar *master of applied information technology* dari Monash University, Melbourne, Australia tahun 2003, dan gelar doktor bidang aplikasi teknik

informatika pada analisis keselamatan reaktor dari University of Technology Sydney, Sydney, Australia tahun 2013.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain Interregional Training Course on Regulatory Aspects and Safety Documentation of Research Reactors di ANL, Amerika Serikat dan AECL, Kanada (tahun 1998); International Training Course on Nuclear Safety di JAEA, Jepang (tahun 2006); National Training Course on Probabilistic Safety Assessment di Pusdiklat-BATAN (tahun 2007); dan Instructor Training Course on Reactor Engineering I, II, and III di JAEA, Jepang tahun 2014.

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Muda Gol. III/d tahun 2014, Peneliti Madya Gol. IV/a tahun 2016, Peneliti Ahli Madya Gol. IV/b tahun 2018, Peneliti Ahli Madya Gol. IV/c tahun 2019 dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama Gol. IV/d bidang Teknologi Keselamatan Reaktor tahun 2021.

Menghasilkan 58 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, bagian buku, jurnal, dan prosiding, baik pada tingkat nasional maupun internasional. Sebanyak 35 KTI ditulis dalam bahasa Inggris.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pengajar di pendidikan dan pelatihan yang diselenggarakan oleh BATAN dan Bapeten; pengajar, pembimbing dan penguji skripsi (S-1) di Universitas Pembangunan Nasional (UPN) Veteran Jakarta dan Universitas Tarumanagara Jakarta; serta pembimbing dan penguji tesis (S-2) di Chulalongkorn University, Thailand dan di Universitas Indonesia.

Aktif dalam kegiatan ilmiah, antara lain sebagai ketua editor di *Jurnal Atom Indonesia* dan *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*. Menjadi mitra bestari di *Jurnal Internasional*

Annals of Nuclear Energy, Reliability Engineering and System Safety, dan Quality and Reliability Engineering International. Menjadi editor/mitra bestari di *International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences.*

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai Asesor Akreditasi Jurnal Nasional (ARJUNA) (2018–2023), pengurus Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo) (2019–2021), anggota Himpunan Editor Berkala Ilmiah Indonesia (HEBII) (2019–2023), anggota Council of Asian Science Editors (CASE) (2020–2023), pengurus pusat Bidang Kejuruan Teknik Nuklir Persatuan Insinyur Indonesia (BKTN - PII) (2021–2024), dan pengurus pusat Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) (2022–2024).

Memperoleh tanda penghargaan Satyalancana Karya Satya X Tahun dari Presiden Republik Indonesia (tahun 2007); *Atom Indonesia Best Paper Awards* dari BATAN (tahun 2014); Penghargaan Publikasi Ilmiah Internasional dari Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (2016); Satyalancana Karya Satya XX Tahun dari Presiden Republik Indonesia (tahun 2017); *Outstanding Reviewer* dari jurnal *Annals of Nuclear Energy* (tahun 2017), *Reliability Engineering and System Safety* (tahun 2018), dan *Fuzzy Sets and Systems* (tahun 2018); serta Penghargaan Publikasi Ilmiah Internasional dari Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi (tahun 2019).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS	v
PRAKATA PENGUKUHAN	xi
I. PENDAHULUAN.....	1
II. TANTANGAN TEKNIS ANALISIS KESELAMATAN PROBABILISTIK KONVENSIONAL.....	6
III. PERKEMBANGAN KONSEP <i>FUZZY</i> DALAM ANALISIS KEANDALAN KOMPONEN.....	10
A. <i>Failure Possibility</i>	10
B. Probabilitas <i>Fuzzy</i>	11
C. Hukum Komplementasi <i>Fuzzy</i>	12
D. Hukum Multiplikasi <i>Fuzzy</i>	12
E. Alpha-Cut (α -Cut).....	12
F. <i>Area Defuzzification Technique</i>	13
G. Fungsi Logaritmik Onisawa.....	14
H. Elisitasi Pakar	14
IV. ANALISIS KESELAMATAN PROBABILISTIK BERBASIS PROBABILITAS <i>FUZZY</i>	16
A. Analisis Pohon Kegagalan Berbasis Probabilitas <i>Fuzzy</i>	16
B. Analisis Kritikalitas Berbasis Probabilitas <i>Fuzzy</i>	18
C. Analisis Pohon Kejadian Berbasis Probabilitas <i>Fuzzy</i>	20
D. Perangkat Lunak IntelPSA.....	22
V. KESIMPULAN.....	24
VI. PENUTUP.....	26
UCAPAN TERIMA KASIH	28
DAFTAR PUSTAKA.....	31
LAMPIRAN.....	43
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	48
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	59

PRAKATA PENGUKUHAN

Selamat pagi/siang.

Salam Sejahtera bagi kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia, dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara Orasi Ilmiah Pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 17 Mei 2023 menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

“ANALISIS KESELAMATAN PLTN BERBASIS
PROBABILITAS *FUZZY*”

Buku ini tidak diperjualbelikan.

I. PENDAHULUAN

Energi listrik sudah menjadi kebutuhan manusia yang tidak dapat tergantikan karena peranannya yang sangat besar dalam menyejahterakan masyarakat. Badan Pusat Statistik pada tahun 2020 telah memasukkan faktor ketersediaan infrastruktur listrik dan konsumsi listrik sebagai variabel perhitungan indeks pembangunan manusia Indonesia (Nugroho & Clarissa, 2020). Di dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021–2030 disebutkan bahwa kapasitas energi listrik terpasang di Indonesia hingga akhir tahun 2020 adalah sebesar 61,13 GW dengan rasio elektrifikasi sebesar 99,20% (PT Perusahaan Listrik Negara [Persero] [PLN], 2021). Rasio elektrifikasi adalah perbandingan antara jumlah rumah tangga yang sudah memiliki listrik dan jumlah total rumah tangga yang ada.

Energi listrik dapat diperoleh dari beberapa sumber pembangkit, salah satunya adalah dari pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Peraturan Pemerintah No. 79/2014 tentang Kebijakan Energi Nasional menyatakan bahwa pemanfaatan energi nuklir perlu mempertimbangkan keamanan pasokan energi listrik nasional dan pengurangan emisi karbon dengan tetap memprioritaskan potensi energi baru dan energi terbarukan sesuai dengan nilai keekonomiannya (PP No. 79, 2014).

Sejak pengoperasian PLTN komersial pertama di Obninsk, Rusia, pada tahun 1954, penggunaan PLTN sebagai pembangkit listrik sudah berkembang dengan pesat. Data per 31 Desember 2020 menunjukkan bahwa jumlah PLTN komersial yang beroperasi di dunia saat ini sebanyak 442 yang terdistribusi di 33 negara. PLTN komersial ini didominasi oleh tipe reaktor air ringan (*light water reactor*, LWR), seperti *pressurized water reactor* (PWR) sebanyak 302 buah dan *boiling water reactor* (BWR) sebanyak 63 buah, sedangkan yang menggunakan reaktor

tor air berat (*pressurized heavy water reactor*, PHWR) sebanyak 48 buah (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2021).

Kecelakaan yang terjadi pada tiga PLTN komersial, termasuk PLTN Fukushima Dai-ichi pada tahun 2011, menjadi salah satu alasan yang digunakan oleh masyarakat untuk menolak PLTN sebagai pembangkit listrik. Oleh karena itu, masyarakat perlu diyakinkan bahwa PLTN dapat dioperasikan dengan aman (Purba, Waskita, & Sony Tjahyani, 2019). Kecelakaan yang terjadi pada PLTN juga telah mendorong desainer PLTN untuk mengembangkan teknologinya (Purba & Sony Tjahyani, 2019). Hal ini dapat dilihat dari perkembangan teknologi PLTN mulai dari generasi I hingga generasi III. Dengan adanya perbaikan pada kinerja sistem keselamatan, generasi terbaru memiliki target frekuensi kerusakan teras (*core damage frequency*, CDF) yang lebih kecil (Goldberg & Rosner, 2011). Sebagai contoh, reaktor generasi II menetapkan target CDF kurang dari $1,0 \times 10^{-5}$. Sementara itu, reaktor generasi III dan III+ menetapkan target CDF kurang dari $1,0 \times 10^{-7}$. Saat ini, sedang dikembangkan juga PLTN generasi IV yang diklaim akan memiliki tingkat keselamatan yang jauh lebih baik (Bernard dkk., 2020; Susyadi dkk., 2018).

Sehubungan dengan perkembangan teknologi keselamatan, generasi terbaru PLTN sudah mulai menerapkan sistem keselamatan pasif yang dapat bekerja berdasarkan gravitasi, konveksi, kondensasi, dan sirkulasi alam (Sony Tjahyani & Purba, 2014; Juarsa dkk., 2014; Juarsa dkk., 2018). Meskipun secara konseptual sistem keselamatan pasif ini akan jauh lebih andal dari sistem keselamatan aktif, kemungkinan untuk gagal masih tetap ada (Purba, 2013; Olatubosun & Smidts, 2022). Oleh karena itu, kinerja sistem keselamatan pasif ini tetap perlu dievaluasi

untuk menjamin bahwa pengoperasian PLTN dapat berlangsung dengan aman.

Kinerja sistem keselamatan PLTN dapat dievaluasi baik secara deterministik maupun probabilistik (Sony Tjahyani dkk., 2019). Analisis keselamatan deterministik (*deterministic safety assessment*, DSA) bertujuan untuk mengetahui respons sistem keselamatan terhadap suatu kondisi kecelakaan. Melalui analisis ini, dapat diketahui apakah reaktor nuklir akan selamat atau tidak ketika kecelakaan tersebut terjadi. Sementara itu, analisis keselamatan probabilistik (*probabilistic safety assessment*, PSA) bertujuan untuk mengevaluasi skenario kemungkinan terjadinya kecelakaan PLTN serta secara kuantitatif memperkirakan probabilitas kejadiannya dan dampak yang diakibatkan oleh kecelakaan tersebut. Melalui analisis ini, titik lemah atau komponen kritis sistem keselamatan PLTN dapat diketahui (Sony Tjahyani & Purba, 2016, 2019). Dalam orasi ilmiah ini, akan diuraikan perkembangan analisis keselamatan probabilistik yang menjadi fokus penelitian kandidat sejauh ini.

Untuk melakukan analisis keselamatan probabilistik, data kegagalan komponen harus tersedia (Purba, 2013; Purba dkk., 2011). Oleh karena keandalan komponen dipengaruhi oleh lingkungan kerjanya, untuk mendapatkan hasil analisis yang dapat merepresentasikan kondisi PLTN yang sebenarnya, data kegagalan komponen yang digunakan sebaiknya berasal dari reaktor nuklir yang sedang dievaluasi tersebut. Namun, pada kenyataannya, tidak semua komponen memiliki data kegagalan. Kondisi ini menyebabkan penggunaan data generik menjadi tak terhindarkan (Hermansyah dkk., 2020). Hasil analisis dengan menggunakan data generik ini tentu saja tidak akan menggambarkan kondisi nyata dari sistem yang sedang dievaluasi. Oleh

karenanya, hasil analisis tersebut kurang tepat dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk meningkatkan keandalan sistem keselamatan (Nuclear Energy Agency [NEA], 2005). Penggunaan data generik juga menyebabkan ketidakpastian pada hasil analisis (Abdelgawad dkk., 2010; Song dkk., 2009).

Oleh karena itu, perlu dikembangkan sebuah metode analisis keselamatan probabilistik baru yang dapat dipakai untuk mengevaluasi kinerja sistem keselamatan PLTN ketika data kegagalan komponen tidak tersedia. Dalam orasi ini, akan diuraikan analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* (*fuzzy probability-based probabilistic safety assessment*, FPPSA) yang diusulkan untuk mengevaluasi keandalan sistem keselamatan PLTN yang tidak memiliki data kegagalan komponen (Purba dkk., 2015, 2017, 2020, 2022; Purba, Lu, Zhang, & Pedrycz, 2014). Pendekatan baru ini memanfaatkan keilmuan, pengetahuan dan pengalaman yang dimiliki oleh pakar dalam mengevaluasi keandalan komponen (Purba dkk., 2010a, 2010b, Purba, Lu, & Zhang, 2012; Kumaraningrum dkk., 2018; Purba, Lu, Ruan, & Zhang, 2012a). Pendekatan baru ini akan menjadi pelengkap untuk analisis keselamatan probabilistik konvensional yang sangat tergantung pada ketersediaan data keandalan komponen. Pada bab-bab selanjutnya, akan disampaikan penelitian yang telah dilakukan bersama dengan peneliti, baik dari BATAN, institusi lain di dalam maupun luar negeri dan kontribusi yang diberikan dari hasil penelitian tersebut. Pada bagian awal, akan diuraikan tantangan teknis analisis keselamatan probabilistik konvensional (Bab II). Selanjutnya, akan diuraikan perkembangan konsep *fuzzy* dalam analisis keandalan (Bab III). Setelah itu, akan diuraikan metode analisis keselamatan probabilistik

berbasis probabilitas *fuzzy* (*fuzzy probability-based probabilistic safety assessment*, FPPSA) sebagai alternatif untuk analisis keselamatan probabilistik PLTN konvensional (Bab IV). Metode FPPSA ini memiliki tiga fitur analisis yaitu analisis pohon kegagalan berbasis probabilitas *fuzzy* (*fuzzy probability-based fault tree analysis*, FPFTA) (Purba, 2013, 2014b, 2015; Purba & Sony Tjahyani, 2014; Purba dkk., 2015), analisis kritikalitas berbasis probabilitas *fuzzy* (*fuzzy probability-based criticality analysis*, FPCA) (Purba, 2014; Purba & Deswandri, 2018; Purba & Sony Tjahyani, 2014; Purba dkk., 2017), dan analisis pohon kejadian berbasis probabilitas *fuzzy* (*fuzzy probability-based event tree analysis*, FPETA) (Purba dkk., 2020). Metode FPPSA telah diimplementasikan ke dalam perangkat lunak *Intelligent Probabilistic Safety Assessment* (IntelPSA) (Purba dkk., 2021). Orasi ini kemudian akan diakhiri dengan kesimpulan (Bab V) dan penutup (Bab VI).

II. TANTANGAN TEKNIS ANALISIS KESELAMATAN PROBABILISTIK KONVENSIONAL

Keselamatan menjadi aspek yang sangat penting dalam pengoperasian PLTN. Ada tiga fungsi utama dari sistem keselamatan:

- 1) menjamin bahwa pengoperasian PLTN dapat berlangsung secara normal tanpa memaparkan radiasi ke penduduk dan lingkungan;
- 2) mencegah terjadinya kecelakaan ketika terjadi kondisi yang tidak normal; dan
- 3) memitigasi konsekuensi apabila kecelakaan yang dipostulasikan benar-benar terjadi (Purba, Sony Tjahyani, & Deswandri, 2019).

Badan Tenaga Atom Internasional (International Atomic Energy Agency, IAEA) mendefinisikan fungsi keselamatan ini menjadi tiga fungsi keselamatan dasar (*fundamental safety function*) PLTN, yaitu mengontrol reaktivitas (*control of reactivity*); mendinginkan material radioaktif (*cooling of radioactive material*); dan mengungkung material radioaktif (*confinement of radioactive material*) (IAEA, 2022).

Analisis keselamatan probabilistik digunakan untuk mengevaluasi keandalan sistem keselamatan reaktor nuklir. Hasil analisis keselamatan probabilistik ini dapat digunakan untuk memperbaiki desain sistem keselamatan atau merekomendasikan perubahan komponen dengan keandalan yang lebih tinggi sehingga sistem keselamatan tersebut makin andal.

Analisis keselamatan probabilistik disusun oleh dua model yang berbeda, tetapi memiliki keterkaitan satu sama lain. Kedua model tersebut adalah model pohon kegagalan dan model pohon

kejadian. Kedua model ini diekspresikan secara grafis dengan menggunakan gerbang dan logika Boolean (Song dkk., 2009). Model pohon kegagalan menggambarkan secara grafis kombinasi kejadian, baik secara serial maupun paralel yang dapat menyebabkan gagalnya sebuah sistem menjalankan fungsinya (Ericson, 2005). Oleh karena pohon kegagalan menggambarkan skenario kegagalan sistem keselamatan secara grafis, kejadian puncak dari pohon kegagalan merepresentasikan kegagalan sistem keselamatan dalam menjalankan fungsinya. Dengan menggunakan logika Boolean, kombinasi sub-sistem dan komponen dievaluasi untuk dapat menentukan kombinasi mana yang dapat menyebabkan terjadinya kegagalan sistem keselamatan. Evaluasi ini terus dilakukan hingga diperoleh kejadian yang paling dasar sebagai penyebab terjadinya kegagalan tersebut. Dalam model pohon kegagalan, probabilitas terjadinya kejadian puncak dievaluasi dengan menggunakan analisis pohon kegagalan.

Untuk meningkatkan keandalan dari sistem keselamatan, komponen yang menjadi titik lemah atau titik kritis perlu diidentifikasi. Oleh karena itu, analisis pohon kegagalan dilengkapi dengan analisis kritikalitas seperti metode *importance measure* (Purba, 2014; Purba & Deswandri, 2019). Hasil analisis kritikalitas digunakan untuk mendesain ulang sistem keselamatan dengan mengganti komponen kritis tersebut dengan komponen sejenis tetapi memiliki keandalan yang lebih tinggi sehingga keandalan sistem menjadi lebih baik.

Beberapa metode *importance measures* yang dikembangkan untuk analisis kritikalitas di dalam *fault tree analysis* (FTA) adalah *Fussell-Vesely* (FV) (Nitoi dkk., 2011), *Birnbaum's importance measure* (BI) (Rausand & Hoyland, 2004), *risk reduction worth* (RRW) (Zio & Podofillini, 2006), *risk achievement worth* (RAW) (Dutuit & Rauzy, 2015), dan *differential importance measure* (DIM) (Do Van dkk., 2010). Semua metode analisis

kritikalitas ini berbasis pada distribusi probabilitas kegagalan komponen.

Model pohon kejadian digunakan untuk memodelkan urutan kejadian mulai dari kejadian pemicu (*initiating event*) hingga terjadinya potensi konsekuensi akhir yang mengikutinya. Kejadian pemicu adalah sebuah kejadian yang dapat mengganggu reaktor dan memiliki potensi untuk menyebabkan terjadinya kerusakan teras reaktor (Purba, 2015, 2018). Rusak tidaknya teras reaktor sangat ditentukan oleh sukses tidaknya sistem keselamatan dalam menjalankan fungsinya untuk memitigasi konsekuensi yang disebabkan oleh kejadian pemicu tersebut. Analisis pohon kejadian digunakan untuk menguantifikasi frekuensi kerusakan teras (*core damage frequency*, CDF) untuk setiap kejadian pemicu yang terpostulasikan. Target CDF ini berbeda untuk setiap generasi reaktor nuklir. Dengan adanya perbaikan pada kinerja sistem keselamatan, target CDF ini akan semakin kecil.

Tantangan teknis dari analisis keselamatan probabilistik konvensional adalah keterbatasan data keandalan komponen-komponen sistem keselamatan yang akan dievaluasi (Abelgawad dkk., 2010; Purba, Lu, & Zhang, 2014) sehingga penggunaan data generik menjadi tak terhindarkan (Abelgawad dkk., 2010). Penggunaan data generik dalam analisis keselamatan probabilistik tentunya menyebabkan ketidakpastian pada hasil analisis (Abelgawad dkk., 2010; Song dkk., 2009; Purba & Sony Tjahyani, 2014a). Dua jenis ketidakpastian yang perlu dievaluasi adalah ketidakpastian *aleatory* dan *epistemic* (IAEA, 2019; Aven, 2011). Ketidakpastian *aleatory* disebabkan oleh adanya keacakan data (*data randomness*). Sementara itu, ketidakpastian *epistemic* disebabkan oleh adanya informasi yang

kurang lengkap atau kurang sempurna (*incomplete or imperfect information*).

Analisis keselamatan probabilistik konvensional mengevaluasi kedua jenis ketidakpastian ini dengan menggunakan simulasi Monte Carlo. Flage dkk. (2013) serta Rao dkk. (2007) menunjukkan bahwa simulasi Monte Carlo hanya cocok untuk mengevaluasi ketidakpastian *aleatory* karena ketidakpastian ini dapat direpresentasikan dengan menggunakan distribusi probabilitas (*probability distribution*). Sementara itu, ketidakpastian *epistemic* dapat direpresentasikan dengan menggunakan himpunan *fuzzy* (*fuzzy sets*) (Dobous & Prade, 2012; Sakalli & Baykoç, 2010; You & Tonon, 2012). Oleh karena itu, simulasi Monte Carlo tidak tepat dipakai untuk mengevaluasi ketidakpastian *epistemic* ini (Purba & Sony Tjahyani, 2014a; Flage dkk., 2013; Rao dkk., 2007). Karena keberadaan ketidakpastian ini, hasil analisis menjadi kurang tepat dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk meningkatkan keandalan sistem keselamatan (NEA, 2005).

III. PERKEMBANGAN KONSEP *FUZZY* DALAM ANALISIS KEANDALAN KOMPONEN

Tantangan teknis yang dihadapi dalam analisis keselamatan probabilistik konvensional mendorong perlunya dikembangkan metode analisis keselamatan probabilistik baru yang dapat dipakai untuk mengevaluasi keandalan sistem keselamatan PLTN ketika data kegagalan komponen tidak tersedia. Literatur juga menunjukkan bahwa ketika data kuantitatif dan distribusi probabilitas tidak tersedia, konsep himpunan *fuzzy* dan justifikasi kualitatif dapat digunakan untuk mengevaluasi keandalan sistem (Purba dkk., 2010a; Mentés & Helvacioglu, 2011).

Metode analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* yang dikembangkan ini menerapkan konsep himpunan *fuzzy* dan melibatkan pakar yang mengerti teknologi PLTN untuk mengevaluasi keandalan sistem keselamatannya secara kualitatif. Berikut diuraikan konsep himpunan *fuzzy* dan justifikasi kualitatif yang dikembangkan di dalam metode baru ini untuk menjawab tantangan teknis yang dimiliki oleh analisis keselamatan probabilistik konvensional.

A. *Failure Possibility*

Failure possibility adalah terminologi kualitatif untuk mengarakterisasi kebolehjadian gagalnya komponen dalam melaksanakan fungsinya (Purba, Lu, Ruan, & Zhang, 2012a; Purba Lu, Zhang, & Pedrycz, 2014). Distribusi *failure possibility* adalah rentang *failure possibility* untuk mengarakterisasi kebolehjadian gagalnya komponen mulai dari yang paling rendah sampai yang paling tinggi. Dengan menggunakan informasi rentang kegagalan komponen-komponen PLTN yang berkisar antara 10^{-13} sampai 10^{-2} yang telah dipublikasikan baik melalui dokumen teknis maupun jurnal ilmiah (IAEA, 1997; Papazoglou dkk., 1984;

Wierman dkk., 2001a, 2001b), dikembangkanlah tujuh level *failure possibility* dalam analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy*. Ketujuh level *failure possibility* tersebut adalah *very low*, *low*, *reasonably low*, *moderate*, *reasonably high*, *high*, dan *very high* (Purba, Lu, Zhang, & Pedrycz, 2014).

Kemungkinan gagal *very low* mengarakterisasi keandalan komponen dengan perkiraan probabilitas kegagalan kurang dari 10^{-8} . Sementara itu, *very high* mengarakterisasi keandalan komponen dengan perkiraan probabilitas kegagalan lebih besar dari 10^{-3} . Keandalan komponen dengan *failure possibility* yang *low*, *reasonably low*, *moderate*, *reasonably high*, dan *high* dipakai untuk mengarakterisasi keandalan komponen dengan perkiraan kebolehjadian kegagalan antara 10^{-8} dan 10^{-3} .

B. Probabilitas *Fuzzy*

Probabilitas *fuzzy* adalah fungsi keanggotaan bilangan *fuzzy* yang didefinisikan dengan bilangan riil dalam interval $[0, 1]$ untuk mengarakterisasi kegagalan komponen dalam melaksanakan fungsinya (Purba dkk., 2015). Makin dekat probabilitas *fuzzy* ke 0, makin kecil kemungkinan komponen tersebut untuk gagal. Sebaliknya, makin dekat probabilitas *fuzzy* ke 1, makin besar kemungkinan komponen tersebut untuk gagal (Purba, Lu, Zhang, & Pedrycz, 2014).

Probabilitas *fuzzy* diperlukan untuk merepresentasikan *failure possibility* secara kuantitatif. Probabilitas *fuzzy* dan *failure possibility* memiliki relasi satu-satu (Purba, 2013; Purba dkk., 2015). Dengan demikian, tujuh buah probabilitas *fuzzy* dibutuhkan dalam analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* (Purba, 2014b, 2015; Purba dkk., 2015, 2017).

Untuk merefleksikan ketidakpastian (*uncertainty*), ketidakakuratan (*inaccuracy*), dan ketidaktepatan justifikasi manusia (*fuzziness of human justifications*) dalam mengarakterisasi

failure possibility di dalam analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* ini, digunakan fungsi keanggotaan *triangular* (Purba, Lu, Zhang, & Pedrycz, 2014).

C. Hukum Komplementasi *Fuzzy*

Hukum komplementasi *fuzzy* dalam analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* dipakai untuk menghitung gerbang Boolean *OR* pada analisis pohon kegagalan. Probabilitas *fuzzy* kejadian puncak A_0 pada Gambar 1 (Lampiran) dihitung dengan menggunakan Persamaan (1) (Purba, 2014a).

$$\begin{aligned} \mu_{A_0}(x) &= \mu_{A_1}(x) + \mu_{A_2}(x) + \dots + \mu_{A_n}(x) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - \mu_{A_i}(x)\} \end{aligned} \quad (1)$$

dengan $\mu_{A_i}(x)$ adalah probabilitas *fuzzy* dari kejadian A_i dan x adalah bilangan riil dari 0 sampai 1 yang merepresentasikan nilai batas kaki (*support*) dari probabilitas *fuzzy*.

D. Hukum Multiplikasi *Fuzzy*

Hukum multiplikasi *fuzzy* dalam analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* dipakai untuk menghitung gerbang Boolean *AND*. Probabilitas *fuzzy* kejadian puncak A_0 pada Gambar 2 (Lampiran) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2) (Purba, 2014a).

$$\mu_{A_0}(x) = \mu_{A_1}(x) \times \mu_{A_2}(x) \times \dots \times \mu_{A_n}(x) = \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x) \quad (2)$$

dengan $\mu_{A_i}(x)$ adalah probabilitas *fuzzy* dari kejadian .

E. Alpha-Cut (α -Cut)

Alpha-cut (α -cut) adalah garis horizontal yang memotong fungsi keanggotaan bilangan *fuzzy*. Dalam analisis keselamatan

probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy*, α -cut dipakai untuk mengonversi himpunan *fuzzy* (*fuzzy set*) menjadi himpunan biasa (*regular set*). Untuk bilangan *fuzzy triangular* $\tilde{A}(a,b,c)$, α -cut secara grafis ditunjukkan pada Gambar 3 (Lampiran) dan secara matematis direpresentasikan oleh Persamaan (3) (Purba dkk., 2017).

$$\tilde{A} = [a_1^{(\alpha)}, a_2^{(\alpha)}] = [(b - a)\alpha + a, c - (c - b)\alpha] \quad (3)$$

Operasi aritmetika α -cut digunakan dalam analisis pohon kejadian untuk menguantifikasi frekuensi kerusakan teras (Purba dkk., 2020). Operasi aritmetika α -cut merupakan operasi standar untuk bilangan *fuzzy*.

F. *Area Defuzzification Technique*

Area defuzzification technique (ADT) adalah sebuah teknik *decoding* yang dipakai untuk mengubah bilangan *fuzzy* menjadi bilangan tunggal yang khusus dikembangkan untuk analisis keselamatan PLTN (Purba, 2013; Purba, Lu, Ruan, & Zhang, 2012b, 2012c). Teknik *decoding* ini menghitung luasan yang dibatasi oleh garis sentroid pada sumbu vertikal (y_0) dengan fungsi keanggotaan sebelah kiri ($\mu_A^L(x)$) dan dengan fungsi keanggotaan sebelah kanan ($\mu_A^R(x)$) seperti ditunjukkan pada daerah arsir pada Gambar 4 (Lampiran). Persamaan umum dari ADT ini ditunjukkan pada Persamaan (4) (Purba, Lu, Ruan, & Zhang, 2012b, 2012c).

$$ADT = d(\mu_A(x)) = x_1 y_0 + \int_{x_2}^d \mu_A^R(x) dx \quad (4)$$

dengan y_0 adalah sentroid dari bilangan *fuzzy* \tilde{A} pada sumbu vertikal, x_1 adalah titik perpotongan antara garis y_0 dengan fungsi keanggotaan sebelah kiri pada sumbu horizontal dan x_2 adalah titik perpotongan antara garis y_0 dengan fungsi keanggotaan

sebelah kanan pada sumbu horizontal. Dengan demikian, ADT untuk bilangan *fuzzy* triangular $\tilde{A}(a, b, c)$ dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (5) (Purba, 2013, 2014b; Purba dkk., 2015, 2018).

$$ADT = \frac{1}{18}(4a + b + c) \quad (5)$$

G. Fungsi Logaritmik Onisawa

Fungsi logaritmik Onisawa dalam analisis keandalan digunakan untuk mengevaluasi *error* pada justifikasi kualitatif yang diberikan oleh seorang pakar (Mentes & Helvacioğlu, 2011; Onisawa, 1988; Purba dkk., 2010a; Purba, Lu, Zhang, 2012). Dengan berbasis pada fungsi logaritmik Onisawa, probabilitas kegagalan komponen dalam analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* dapat dikonversi dari probabilitas *fuzzy* menggunakan Persamaan (6) (Purba, 2014b; Purba, Lu, Zhang, & Pedrycz, 2014).

$$E_m = \begin{cases} \frac{1}{10^{\left[\frac{1-e}{e}\right]^{\frac{1}{3}} \times 2.301}}, & e \neq 0 \\ 0, & e = 0 \end{cases} \quad (6)$$

dengan e adalah skor keandalan yang diperoleh dari proses *decoding* probabilitas *fuzzy* menggunakan ADT.

H. Elisitasi Pakar

Untuk mengarakterisasi keandalan komponen secara kualitatif menggunakan *failure possibility*, dilakukan proses elisitasi kepada sejumlah pakar yang kompeten dan memahami sistem keselamatan yang sedang dievaluasi. Elisitasi pakar adalah sebuah proses terstruktur yang dapat dipakai untuk memformalisasi pengumpulan informasi dari pakar dan sekaligus menguanti-

fikasi ketidakpastian yang ditimbulkannya (Hammit & Zhang, 2013; Purba, 2015).

Teknik elisitasi memiliki tiga bagian penting, yaitu pakar yang akan dielisitasi, hasil evaluasi pakar, dan analisis yang akan menggunakan hasil evaluasi pakar tersebut (Purba dkk., 2018). Pakar yang terlibat dalam proses elisitasi dapat mengintegrasikan data empiris dengan *scientific judgment* dalam mengevaluasi dan mengidentifikasi rentang kemungkinan kebolehjadian terjadinya sebuah kejadian. Cooke dkk. (2008) merekomendasikan tiga buah indikator yang dapat dipakai untuk memilih pakar, yaitu jumlah publikasi yang dimiliki, saran dari pakar lain, dan pengalaman yang dimiliki. Dengan memberikan skor pada setiap indikator dan kemudian menghitung nilai total, dapat dipilih pakar yang paling relevan dengan studi yang sedang dilakukan.

Perbedaan latar belakang, pengalaman, dan pendidikan, dapat menyebabkan pakar memberikan penilaian yang berbeda untuk objek kejadian yang sama. Untuk mendapatkan konsensus, perlu dilakukan agregasi terhadap semua penilaian yang diberikan oleh setiap pakar di dalam tim (Hermansyah dkk., 2020; Kumaraningrum dkk., 2018). Untuk melakukan agregasi di dalam analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy*, setiap pakar diberi bobot justifikasi relatif mulai dari 0 sampai 1. Bobot ini merepresentasikan kemampuan (*credential*), kredibilitas (*credibility*), dan kompetensi (*competency*) setiap pakar (Purba, 2014b; Purba, Lu, Zhang, & Pedrycz, 2014). Seorang pakar dengan bobot 1 adalah pakar yang paling kredibel, sedangkan pakar dengan bobot yang lebih kecil berarti makin kurang kredibel. Nilai bobot ini adalah nilai relatif setiap pakar terhadap keseluruhan pakar yang ada di dalam tim. Dengan demikian, kredibilitas seorang pakar hanya dibandingkan pakar lain yang ada di dalam tim pakar yang akan dielisitasi.

IV. ANALISIS KESELAMATAN PROBABILISTIK BERBASIS PROBABILITAS *FUZZY*

Analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* (FPPSA) dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan analisis keselamatan probabilistik konvensional yang sangat tergantung pada ketersediaan data keandalan komponen. FPPSA yang kami kembangkan dilengkapi dengan fitur analisis pohon kegagalan berbasis probabilitas *fuzzy* (*fuzzy probability-based fault tree analysis*, FPFTA), fitur analisis kritikalitas berbasis probabilitas *fuzzy* (*fuzzy probability-based criticality analysis*, FPCA), dan fitur analisis pohon kejadian berbasis probabilitas *fuzzy* (*fuzzy probability-based event tree analysis*, FPETA). Untuk memudahkan analisis keselamatan dalam menggunakan FPPSA, telah dikembangkan juga perangkat lunak Intelligent Probabilistic Safety Assessment (IntelPSA) seperti diilustrasikan pada Gambar 5 (Lampiran).

A. Analisis Pohon Kegagalan Berbasis Probabilitas *Fuzzy*

Analisis pohon kegagalan berbasis probabilitas *fuzzy* (FPFTA) dikembangkan untuk menguantifikasi probabilitas kegagalan sistem keselamatan PLTN di dalam FPPSA. Kerangka kerja (*framework*) dari FPFTA ditunjukkan pada Gambar 6 (Lampiran) (Purba dkk., 2015).

FPFTA diawali dengan mengumpulkan karakteristik keandalan semua kejadian dasar yang menyusun model pohon kegagalan dari tim pakar yang diminta mengevaluasi sistem keselamatan PLTN. Karakteristik kejadian dasar diekspresikan secara kualitatif dengan menggunakan tujuh buah *failure possibility* yang didefinisikan pada Bab II. Agar dapat digunakan

dalam analisis pohon kegagalan, justifikasi *failure possibility* ini kemudian dikonversi menjadi probabilitas *fuzzy*.

Setiap kejadian dasar yang ada di model pohon kegagalan memiliki tiga probabilitas *fuzzy*, yaitu probabilitas *fuzzy* estimasi terbaik (*best estimate fuzzy probability*), probabilitas *fuzzy* batas bawah (*lower bound fuzzy probability*), dan probabilitas *fuzzy* batas atas (*upper bound fuzzy probability*). Probabilitas *fuzzy* estimasi terbaik merupakan nilai keandalan yang sangat relevan mengarakterisasi kebolehjadian terjadinya kejadian dasar. Sementara itu, probabilitas *fuzzy* batas bawah dan probabilitas *fuzzy* batas atas adalah rentang probabilitas *fuzzy* yang digunakan untuk merepresentasikan ketidakpastiannya.

Probabilitas *fuzzy* kejadian puncak dihitung dengan menggunakan hukum komplementasi *fuzzy* atau hukum multiplikasi *fuzzy* sesuai dengan gerbang Boolean penyusunnya. Probabilitas *fuzzy* kejadian puncak dihitung berdasarkan *minimal cut set* pohon kegagalan. *Minimal cut set* adalah kombinasi minimal kejadian dasar yang dapat menyebabkan terjadinya kejadian puncak (Ericson, 2005). Jumlah kejadian dasar di dalam *minimal cut set* ini disebut sebagai orde dari *minimal cut set*. *Minimal cut set* dengan orde terkecil akan lebih kritis dibandingkan *minimal cut set* dengan orde yang lebih besar.

Untuk mendapatkan probabilitas kejadian puncak dalam bentuk probabilitas konvensional, probabilitas *fuzzy* kejadian puncak dikonversi menjadi skor keandalan menggunakan algoritma ADT dan dilanjutkan dengan fungsi logaritmik Onisawa. Konversi ini menghasilkan tiga probabilitas kejadian puncak, yaitu probabilitas batas bawah, probabilitas estimasi terbaik, dan probabilitas batas atas.

PFPTA telah diverifikasi dan divalidasi menggunakan studi kasus sistem keselamatan PLTN dan membandingkan hasilnya dengan hasil yang diperoleh dari metode analisis pohon kegagalan-

an konvensional (Purba, 2014b, 2015; Purba & Sony Tjahyani, 2014; Purba dkk., 2018, 2022). Hasil verifikasi dan validasi menunjukkan bahwa FPFTA dapat dipakai sebagai komplemen bagi analisis pohon kegagalan konvensional. FPFTA digunakan ketika data kegagalan kejadian dasar tidak tersedia. Sementara itu, analisis pohon kegagalan konvensional digunakan ketika kejadian dasar dari pohon kegagalan memiliki data keandalan (Purba, 2014b; Purba & Sony Tjahyani, 2014b; Purba dkk., 2015, 2017, 2022).

B. Analisis Kritikalitas Berbasis Probabilitas Fuzzy

Analisis kritikalitas berbasis probabilitas *fuzzy* (FPCA) digunakan di dalam FPPSA untuk mengevaluasi tingkat kritikalitas komponen sistem keselamatan PLTN. FPCA dikembangkan melalui pendekatan *importance measure* berbasis metode α -cut (*α -cut method-based importance measure, α -IM*). Pendekatan α -IM menggunakan aritmetika pengurangan α -cut, perkalian α -cut, dan *area defuzzification technique*. Kerangka kerja (*framework*) α -IM ditunjukkan pada Gambar 7 (Lampiran) (Purba dkk., 2017).

Pendekatan α -IM diawali dengan perhitungan probabilitas *fuzzy* kejadian puncak sistem keselamatan PLTN dengan menggunakan FPFTA. Kemudian, α -cut setiap *minimal cut set* dan α -cut kejadian puncak dikonversi dari probabilitas *fuzzy*-nya menggunakan metode α -cut yang telah dijelaskan pada Bab II. Untuk dapat mengetahui tingkat kekritisannya sebuah kejadian dasar, *minimal cut set* kemudian dikelompokkan berdasarkan kejadian dasar penyusunnya. Dengan demikian, satu *minimal cut set* dapat masuk ke dalam beberapa kelompok kejadian dasar. Dengan menggunakan aritmetika perkalian α -cut, α -cut

kejadian dasar dihitung dari semua kelompok *minimal cut set* penyusunnya.

Sementara itu, α -IM kejadian dasar diperoleh dengan menguantifikasi α -cut-nya menggunakan aritmetika pengurangan α -cut. Kemudian, α -IM kejadian dasar ini dikonversi menjadi probabilitas *fuzzy* menggunakan metode α -cut. Skor keandalan kejadian dasar dihitung dari probabilitas *fuzzy*-nya menggunakan algoritma *area defuzzification technique (ADT)*.

Tingkat kritikalitas kejadian dasar terhadap kegagalan sistem keselamatan yang sedang dievaluasi diurutkan berdasarkan skor keandalan kejadian dasar. Makin kecil skor keandalan kejadian dasar, makin besar kontribusinya terhadap kegagalan sistem. Makin tinggi skor keandalan kejadian dasar, makin kecil kontribusinya terhadap kegagalan sistem. Dengan demikian, tingkat kritikalitas kejadian dasar diurutkan mulai dari skor yang terkecil pada urutan teratas sampai pada skor terbesar pada urutan terbawah.

Pendekatan α -IM telah diverifikasi dan divalidasi menggunakan studi kasus sistem keselamatan PLTN dan membandingkan hasilnya dengan hasil yang diperoleh dari metode *importance measure* konvensional (Purba dkk., 2017). Hasil verifikasi dan validasi menunjukkan bahwa pendekatan α -IM dapat dipakai sebagai komplemen bagi metode *importance measure* konvensional. Pendekatan α -IM digunakan untuk mengevaluasi kritikalitas kejadian dasar pada FPFTA. Sementara itu, metode *importance measure* konvensional digunakan untuk mengevaluasi kritikalitas kejadian dasar pada analisis pohon kegagalan konvensional (Purba, 2014c; Purba dkk., 2017).

C. Analisis Pohon Kejadian Berbasis Probabilitas *Fuzzy*

Analisis pohon kejadian berbasis probabilitas *fuzzy* (FPETA) digunakan di dalam FPPSA untuk menguantifikasi frekuensi kerusakan teras sistem keselamatan PLTN. Kerangka kerja (*framework*) dari FPETA ditunjukkan pada Gambar 8 (Lampiran) (Purba dkk., 2020).

FPETA diawali dengan menyusun pohon kejadian yang merepresentasikan secara grafis skenario kecelakaan yang berpotensi menyebabkan kerusakan teras, mulai dari kejadian pemicu (*initiating event, IE*) sampai status akhir (*end state*) teras reaktor. Ada dua status akhir yang didefinisikan, yaitu teras rusak dan teras tak rusak. Sebuah skenario kejadian disusun oleh sebuah kejadian pemicu diikuti oleh serangkaian sistem keselamatan, baik yang sukses maupun yang gagal menjalankan fungsi mitigasinya.

Selanjutnya, pakar diminta secara kualitatif mengevaluasi kemungkinan terjadinya kejadian pemicu dengan menggunakan *failure possibility* yang telah didefinisikan pada Bab II. Dengan mempertimbangkan bobot pakar, probabilitas *fuzzy* kejadian pemicu dapat dihitung dengan melakukan agregasi pada justifikasi yang dikumpulkan dari pakar tersebut. Probabilitas *fuzzy* ini kemudian dikonversi menjadi α -cut kejadian pemicu. Sementara itu, α -cut sistem keselamatan yang diharapkan bekerja memitigasi konsekuensi dari kejadian pemicu dikuantifikasi menggunakan FPFTA.

Pohon kejadian merupakan pohon biner (sukses-gagal) maka setiap sistem mitigasi akan memiliki dua buah α -cut, yang pertama merepresentasikan kebolehjadian gagalnya sistem keselamatan tersebut menjalankan fungsi mitigasi, sedangkan

α -cut kedua merepresentasikan kebolehjadian suksesnya sistem keselamatan tersebut menjalankan fungsi mitigasi.

Ketiga α -cut (α -cut kejadian pemicu, α -cut sistem mitigasi sukses, dan α -cut sistem mitigasi gagal) digunakan untuk menghitung α -cut setiap sekuensi kejadian yang menyebabkan kerusakan teras. Dalam hal ini, α -cut sekuensi kejadian dikuantifikasi dengan menggunakan aritmetika perkalian α -cut. Selanjutnya, α -cut kerusakan teras dikuantifikasi dengan menjumlahkan α -cut semua skenario kejadian yang dapat menyebabkan kerusakan teras dengan menggunakan aritmetika penjumlahan α -cut. Untuk mendapatkan frekuensi kerusakan teras (CDF), α -cut kerusakan teras dikonversi menjadi skor keandalan menggunakan algoritma *area defuzzification technique* dan dilanjutkan dengan fungsi logaritmik Onisawa.

FPETA telah diverifikasi dan divalidasi menggunakan studi kasus sistem keselamatan PLTN dan dibandingkan hasilnya dengan hasil yang diperoleh dari analisis pohon kejadian konvensional (Purba dkk., 2020). Hasil verifikasi dan validasi menunjukkan bahwa FPETA dapat dipakai sebagai komplemen bagi analisis pohon kejadian konvensional. FPETA digunakan untuk menguantifikasi frekuensi kerusakan teras ketika kemungkinan terjadinya kejadian pemicu hanya dapat dievaluasi secara kualitatif oleh pakar dan probabilitas kejadian sistem mitigasi dikuantifikasi menggunakan FPFTA. Analisis pohon kejadian konvensional digunakan untuk menguantifikasi frekuensi kerusakan teras ketika kejadian pemicu memiliki distribusi probabilitas dan probabilitas kejadian sistem mitigasi dikuantifikasi menggunakan analisis pohon kegagalan konvensional (Purba dkk., 2020).

D. Perangkat Lunak IntelPSA

Perangkat lunak IntelPSA adalah perangkat lunak yang dikembangkan sebagai alat bantu untuk analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* (FPPSA). IntelPSA merupakan akronim dari Intelligent Probabilistic Safety Assessment (Purba dkk., 2021). Standar yang digunakan dalam pengembangan IntelPSA adalah dua buah perangkat lunak sejenis yang umum dipakai dalam analisis keselamatan probabilistik PLTN yaitu Probabilistic Safety Analysis PACKage (PSAPACK) yang dikembangkan oleh International Atomic Energy Agency (IAEA) (Lederman dkk., 1990) dan Systems Analysis Programs for Hands-On Integrated Reliability Evaluations (SAPHIRE) yang dikembangkan oleh Idaho National Laboratory (INL) (Faghihi dkk., 2008; Smith dkk., 2008).

IntelPSA dikembangkan dengan menggunakan bahasa pemrograman *open source*, yaitu Java. IntelPSA versi saat ini telah dilengkapi dengan modul antarmuka grafis (*graphical user interface*, GUI) dan fitur analisis pohon kegagalan berbasis probabilitas *fuzzy* (Purba dkk., 2021). Modul antarmuka grafis dikembangkan untuk memberi kemudahan kepada pengguna dalam menggunakan IntelPSA. Fitur analisis pohon kegagalan berbasis probabilitas *fuzzy* sudah dilengkapi dengan modul penggambaran pohon kegagalan, penentuan jumlah pakar yang akan dilibatkan untuk mengevaluasi dan bobot kepakarannya, justifikasi kualitatif dari para pakar, konversi justifikasi kualitatif ke probabilitas *fuzzy*, perhitungan probabilitas *fuzzy* kejadian dasar, kejadian antara dan kejadian puncak, serta konversi probabilitas *fuzzy* kejadian puncak menjadi probabilitas konvensional yang merepresentasikan kebolehjadian gagal sistem keselamatan PLTN yang sedang dievaluasi. Konsep probabilitas *fuzzy* dikembangkan menggunakan data keandalan PLTN air

ringan, sebaiknya IntelPSA ini pun digunakan untuk mengevaluasi PLTN air ringan.

Pengembangan lebih lanjut dari IntelPSA ini adalah penambahan fitur analisis kritikalitas berbasis probabilitas *fuzzy* dan fitur analisis pohon kejadian berbasis probabilitas *fuzzy*. Dicanakan IntelPSA akan siap diimplementasikan pada tahun 2024 setelah melalui tahap validasi dan verifikasi. Perangkat lunak IntelPSA ini akan memperkuat sistem inovasi nasional terkait dengan pemanfaatan PLTN sebagai sumber energi masa depan Indonesia. Jika ke depannya Pemerintah Indonesia berkeinginan untuk membangun PLTN, IntelPSA ini akan sangat membantu para pembuat keputusan dalam menilai keandalan sistem keselamatan PLTN tersebut, terutama yang belum memiliki data kegagalan yang diperlukan untuk analisis keselamatan probabilistik konvensional.

Meskipun metode analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* ini sudah tervalidasi dan terverifikasi melalui publikasi-publikasi di jurnal internasional berkualitas, sampai sejauh ini vendor maupun badan regulasi masih menggunakan metode analisis keselamatan probabilistik konvensional untuk mengevaluasi kinerja dan keandalan sistem keselamatan reaktor nuklir. Ini disebabkan karena analisis keselamatan probabilistik konvensional sudah matang (*mature*) baik secara saintifik maupun aplikatif. Oleh karena itu, pembuktian saintifik dan aplikatif metode analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* perlu terus dilakukan dan dikembangkan agar dapat diterima sebagai pelengkap bagi metode analisis keselamatan konvensional ketika reaktor nuklir tidak memiliki *historical failure data*.

V. KESIMPULAN

Teknologi PLTN dan teknologi sistem keselamatannya senantiasa berkembang seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Meskipun keandalan sistem keselamatan PLTN makin baik, tetaplah tidak mungkin untuk menihilkan kecelakaan dan risiko pengoperasiannya. Oleh karena itu, yang menjadi fokus peningkatan keandalan sistem keselamatan PLTN adalah memperkecil probabilitas kecelakaan dan menurunkan konsekuensi kecelakaan hingga tingkat risiko yang dapat diterima.

Untuk dapat memperkirakan besarnya peluang terjadinya kecelakaan dan tingkat risiko dari pengoperasian PLTN, perlu dilakukan analisis keselamatan probabilistik. Analisis keselamatan probabilistik konvensional memerlukan ketersediaan data kegagalan komponen. Tentunya, PLTN yang masih dalam tahap desain atau yang belum pernah beroperasi tidak akan memiliki data kegagalan yang diperlukan. Dengan demikian, analisis keselamatan probabilistik konvensional perlu mempertimbangkan pendekatan lain seperti memanfaatkan justifikasi pakar yang terlibat dalam mendesain dan mengembangkan reaktor tersebut.

Penelitian yang kami lakukan terkait dengan analisis keselamatan probabilistik PLTN dapat menjawab tantangan yang dihadapi oleh analisis keselamatan probabilistik konvensional. Metode analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* (FPPSA) ini tentu saja akan memberikan kontribusi saintifik pada pengembangan teknologi keselamatan PLTN. Kontribusi saintifik yang pertama adalah FPPSA dapat menjadi komplemen untuk analisis keselamatan probabilistik konvensional ketika PLTN yang akan dievaluasi tidak memiliki data kegagalan komponen. Kontribusi saintifik yang kedua adalah konsep berpikir

Buku ini tidak diperjualbelikan.

yang ditanamkan pada FPPSA dapat menjadi acuan bagi para peneliti dalam mengembangkan metode analisis baru apabila data sejarah kegagalan tidak dimiliki. Konsep berpikir yang dimaksud adalah penggunaan data kualitatif melalui justifikasi pakar berdasarkan keilmuan, pengetahuan, dan pengalaman yang dimiliki ketika data kuantitatif tidak tersedia.

Untuk aplikasi praktis, para pembuat kebijakan terkait dengan pembangunan dan pengoperasian PLTN pertama di Indonesia dapat mempertimbangkan untuk menggunakan perangkat lunak Intelligent Probabilistic Safety Assessment (IntelPSA) sebagai alat bantu untuk mengevaluasi keandalan sistem keselamatan PLTN yang belum memiliki *historical failure data*. Pakar yang memahami teknologi dan sistem kerja reaktor nuklir yang akan dibangun dapat melakukan justifikasi secara kualitatif.

Keberterimaan analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy* oleh vendor dan badan regulasi perlu terus diupayakan. Oleh karena itu, kemampuserapan metode ini perlu terus dibuktikan baik secara saintifik maupun aplikatif dengan melakukan *benchmarking* hasil evaluasinya terhadap hasil evaluasi analisis keselamatan probabilistik konvensional. Riset dan publikasi dengan kolaborasi yang lebih luas juga perlu dilakukan.

VI. PENUTUP

Banyak negara telah menggunakan PLTN sebagai sumber energi listrik dan berkontribusi pada peningkatan kesejahteraan masyarakatnya. Untuk mengurangi kekhawatiran dan ketakutan masyarakat, teknologi PLTN dan sistem keselamatannya terus dikembangkan seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir.

Indonesia juga telah menjadikan PLTN salah satu alternatif sumber energi listrik masa depan. Dengan perkembangan teknologi PLTN dan sistem keselamatannya, pemerintah Indonesia makin leluasa dalam memilih PLTN yang layak untuk dibangun di Indonesia.

Untuk mendukung pengambil kebijakan dalam membuat keputusan, tentunya pengetahuan dan kemampuan sumber daya manusia khususnya para pemangku kepentingan nuklir di Indonesia menjadi sangat penting untuk terus dikembangkan. Dalam kaitannya dengan analisis keselamatan probabilistik PLTN, makin bertumbuhnya pengetahuan dan kemampuan sumber daya manusia dalam melakukan analisis keselamatan PLTN akan menumbuhkan kepercayaan dan akseptabilitas masyarakat terhadap pembangunan PLTN pertama di Indonesia.

Meskipun penerapan konsep *fuzzy* sudah populer di sistem kontrol, tantangan terbesar dari penerapan metode yang baru ini untuk analisis keselamatan probabilistik PLTN adalah keberterimaannya oleh vendor dan badan regulasi. Untuk meningkatkan keberterimaannya, pembuktian ilmiah perlu terus dikembangkan dan dipublikasikan melalui media publikasi ilmiah internasional

yang berkualitas. Dengan demikian, melalui penelitian ini, peluang kolaborasi internasional masih sangat terbuka.

Melalui pembuktian ilmiah ini, metode analisis keselamatan berbasis probabilitas *fuzzy* diharapkan akan dapat menjadi komplemen bagi analisis keselamatan probabilistik konvensional. Dengan demikian, ketika sistem keselamatan yang dievaluasi memiliki *historical failure data*, metode analisis keselamatan probabilistik konvensional dapat digunakan. Akan tetapi, jika *historical failure data* tidak tersedia, pengetahuan dan pengalaman pakar dapat dimanfaatkan dengan menggunakan metode analisis keselamatan probabilistik berbasis probabilitas *fuzzy*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Majelis Pengukuhan dan hadirin yang berbahagia, pada akhir orasi ilmiah ini, perkenankanlah saya memanjatkan puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Kuasa atas setiap berkat yang telah diberikan kepada saya dan keluarga sehingga pada akhirnya saya bisa menyampaikan Orasi Pengukuhan Profesor Riset ini.

Saya ingin menyampaikan penghargaan dan terima kasih kepada Presiden Republik Indonesia, Ir. H. Joko Widodo, atas penetapan saya sebagai Peneliti Ahli Utama; kepada Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc.; Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani; Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D.; Tim Penelaah Naskah Orasi Prof. Dr. Ir. Bambang Subiyanto, M.Agr. (Ketua); Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani (Sekretaris); Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan (Anggota); Prof. Dr. Ir. Efrizon Umar, M.T. (Anggota); dan Prof. Dr. Wisnu Ari Adi (Anggota).

Terima kasih kepada Plt. Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.I.P, M.A.; dan Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia BRIN, Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si., yang telah memberikan kepercayaan dan kesempatan kepada saya untuk ditetapkan sebagai profesor riset.

Pada kesempatan ini, saya juga mengucapkan terima kasih kepada Kepala Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Dr. Rohadi Awaludin; Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Dr. Topan Setiadipura, S.Si., M.Si.; Kepala Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir 2019–2021, Dr. Ir. Mohammad Dhandhang Purwadi, M.T.; atas bantuan dan dukungannya; serta

kolega di ORTN, Prof. Dr. Ridwan, Prof. Dr. Mukh Syaifudin, Prof. Ir. Yohannes Sardjono, Prof. Dr. Djarot Sulistio Wisnubroto dan Prof. Drs. Surian Pinem, M.Si. untuk diskusi penyusunan naskah orasi Profesor.

Perjalanan panjang ini tentu tidak bisa saya lalui tanpa peran dan jasa para guru saya, khususnya pembimbing program doktoral saya di University of Technology Sydney, Australia, Prof. Dr. Jie Lu dan Prof. Dr. Guangquan Zhang, serta di Belgian Nuclear Research Centre (SCK-CEN), Belgium, Prof. Dr. (Alm.) Da Ruan; kepada rekan-rekan di Gedung 80 KST B.J. Habibie yang telah banyak memberikan saran dan masukan serta kesempatan kepada saya untuk mengembangkan diri.

Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada ayahanda, Alm. James Karmen Purba dan ibunda, Almh. Frida Purnama Napitupulu serta ibunda, Nemmy Damanik, yang telah membesarkan dan mendidik saya serta senantiasa mendoakan saya. Kepada ayahanda mertua Eko Purwadi dan ibunda mertua Sutanem Kristiyanti yang senantiasa memberikan dorongan semangat dan doa.

Kepada istriku terkasih Yanuarita Tri Maharani dan kedua anakku tersayang Hendersan Giancarlo Purba dan Nathanael Marchello Purba, terima kasih yang tak terhingga atas dukungan cinta dan kasih sayang yang sungguh amat luar biasa yang telah saya terima. Kepada abang, kakak, adik, dan ipar yang telah mendukung dan menyayangi selama ini, saya ucapkan terima kasih tak terkira.

Ucapan terima kasih kepada Panitia Pelaksana Pengukuhan Profesor Riset, atas jerih payah dan dukungannya dalam menyelenggarakan acara pada hari ini.

Kepada para hadirin tamu undangan, juga semua pihak yang turut berperan dalam mengantarkan saya sampai pada kondisi

hari ini, tetapi tidak dapat saya sebutkan satu per satu, dengan tulus saya ucapkan terima kasih.

Akhirnya, dengan segala kerendahan hati, saya mohon maaf atas segala khilaf dan kekurangan yang ada dalam penyampaian orasi ilmiah ini. Semoga Tuhan Yang Maha Kuasa senantiasa memberikan bimbingan, perlindungan, dan ampunan bagi kita semua.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelgawad, M., Fayek, A. R., & Martinez, F. (2010). Quantitative assessment of horizontal directional drilling project risk using fuzzy fault tree analysis. Dalam J. Ruwanpura, Y. Mohamed, & S. Lee (Ed.), *The construction research congress 2010: Innovation for reshaping construction practice*. [https://doi.org/10.1061/41109\(373\)128](https://doi.org/10.1061/41109(373)128)
- Aven, T. (2011). A risk concept applicable for both probabilistic and non-probabilistic perspectives. *Safety Science*, 49(8–9), 1080–1086. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.04.017>
- Bernard, M., Calle, P., Chen, F., Flower, A., Gimenez, M., Ingersoll, D., Madni, I., Muzikova, E., Ohashi, H., Plummer, D., **Purba, J.H.**, Sato, H., Shiba, S., Sinegribov, S., Song, D., Spitzer, C., Tanase, A., Villalibre, Ares P., ... Zhong, F. (2020). *Applicability of design safety requirements to small modular reactor technologies intended for near term deployment*. International Atomic Energy Agency (IAEA).
- Cooke, R. M., ElSaadany, S., & Huang, X. (2008). On the performance of social network and likelihood-based expert weighting schemes. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(5), 745–756. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.017>
- Do Van, P., Barros, A., & Bérenguer, C. (2010). From differential to difference importance measures for Markov reliability models. *European Journal of Operational Research*, 204, 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.11.025>
- Dubois, D., & Prade, H. (2012). Gradualness, uncertainty and bipolarity: Making sense of fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 192, 3–24. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2010.11.007>
- Dutuit, Y., & Rauzy, A. (2015). On the extension of importance measures to complex components. *Reliability Engineering*

and System Safety, 142, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.04.016>

Ericson, C. A. (2005). Fault tree analysis. Dalam Ericson (Ed.), *Hazard analysis technique for system safety* (183–221). John Wiley & Sons.

Faghihi, F., Ramezani, E., Yousefpour, F., & Mirvakili, S. M. (2008). Level-1 probability safety assessment of the Iranian heavy water reactor using SAPHIRE software. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(10), 1377–1409. <https://doi.org/10.1016/j.res.2007.10.002>

Flage, R., Baraldi, P., Zio, E., & Aven, T. (2013). Probability and possibility-based representations of uncertainty in fault tree analysis. *Risk Analysis*, 33(1), 121–133. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01873.x>

Goldberg, S. M., & Rosner, R. (2011). *Nuclear reactors: Generation to generation*. American Academy of Arts and Sciences.

Hammitt, J. K., & Zhang, Y. (2013). Combining experts' judgments: Comparison of algorithmic methods using synthetic data. *Risk Analysis*, 33(1), 109–120. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01833.x>

Hermansyah, H., Kumaraningrum, A. R., **Purba, J. H.**, Edison, & Yohda, M. (2020). Safety analysis technique for system with limited data: Case study of the multipurpose research reactor in Indonesia. *Energies*, 13(8), 1975. <https://doi.org/10.3390/en13081975>

International Atomic Energy Agency. (1997). *Generic component reliability data for research reactor PSA, IAEA-TEC-DOC-930*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_0930_scr.pdf

- International Atomic Energy Agency. (2019). Deterministic safety analysis for nuclear power plants *Specific Safety Guide No. SSG-2 (Rev. 1)*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/PUB1851_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2021). *Nuclear power reactors in the world* (IAEA-RDS-2/41 ed.). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS-2-41_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2022). *IAEA nuclear safety and security glossary Terminology Used in Nuclear Safety, Nuclear Security, Radiation Protection and Emergency Preparedness and Response*. <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/IAEA-NSS-GLOweb.pdf>
- Juarsa, M., **Purba, J. H.**, Kusuma, H. M., Setiadipura, T., & Widodo, S. (2014). Preliminary study on mass flow rate in passive cooling experimental simulation during transient using NC-Queen apparatus. *Atom Indonesia*, 40(3), 141–147. <https://doi.org/10.17146/aij.2014.333>
- Juarsa, M., Witoko, J. P., Giarno, G., Haryanto, D., & **Purba, J. H.** (2018). An experimental analysis on nusselt number of natural circulation flow in transient condition based on the height differences between heater and cooler. *Atom Indonesia*, 44(3), 123. <https://doi.org/10.17146/aij.2018.876>
- Kumaraningrum, A. R., Hermansyah, H., & **Purba, J. H.** (2018). *Experts' selection in the application of fuzzy fault tree analysis to evaluate an RSG – GAS primary cooling system*. Dalam Y. D. Jatmiko, R. Azrianingsih, & M. A. Pamungkas (Ed.), *The 8th Annual Basic Science International Conference (BaSIC 2018)*. AIP Publishing.
- Lederman, L., Vallerga, H., & Bojadjiev, A. (1990). IAEA activities on extending PSAPACK as a tool for use in NPP safety management. *Reliability Engineering and System*

Safety, 30(1–3), 447–454. [https://doi.org/10.1016/0951-8320\(90\)90110-9](https://doi.org/10.1016/0951-8320(90)90110-9)

Mentes, A., & Helvacioğlu, I. H. (2011). An application of fuzzy fault tree analysis for spread mooring systems. *Ocean Engineering*, 38(2–3), 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.11.003>

Nuclear Energy Agency. (2005). *CSNI technical opinion paper no. 7: Living PSA and its use in the nuclear safety decision-making process*. <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/nea4411-psa-risk-monitors.pdf>

Nitoi, M., Turcu, I., Bruynooghe, C., & Pavelescu, M. (2011). Prioritization of components important for safety and sensitive to ageing. Application for TRIGA reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 53, 336–343. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.01.002>

Nugroho, A., & Clarissa, A. (2020). *Indeks pembangunan manusia 2019* (S. Soelistyowati, A. Said, W. Winardi, & Y. Karyono, Ed.). Badan Pusat Statistik.

Olatubosun, S. A., & Smidts, C. (2022). Reliability analysis of passive systems: An overview, status and research expectations. *Progress in Nuclear Energy*, 143, 104057. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.104057>

Onisawa, T. (1988). An approach to human reliability in man-machine systems using error possibility. *Fuzzy Sets and Systems*, 27(2), 87–103. [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90140-6)

Papazoglou, I. A., Bari, R. A., Buslik, A. J., Hall, R. E., Ilberg, D., Samanta, P. K., Teichmann, T., Youngblood, R. W., El-Basioni, A., Fragola, J., & Vesely, W. (1984) Probabilistic safety analysis: Procedures guide. *NUREG/CR-2815*. Depart-

ment of Nuclear Energy, Brookhaven National Laboratory.
<https://www.nrc.gov/docs/ML0635/ML063550253.pdf>

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. (2014). <https://jdih.esdm.go.id/peraturan/PP%20No.%2079%20Thn%202014.pdf>

PT Perusahaan Listrik Negara (Persero). (2021). *Rencana usaha penyediaan tenaga listrik PT PLN (Persero) 2021-2030 PT PLN (Persero)*. <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/10/ruptl-2021-2030.pdf>

Purba, J. H. (2013). *Framework, approach and system of intelligent fault tree analysis for nuclear safety assessment* [Disertasi PhD, University of Technology Sydney], Sydney. OPUS. <http://hdl.handle.net/10453/23549>

Purba, J. H. (2014a). Fuzzy probability on reliability study of nuclear power plant probabilistic safety assessment: A review. *Progress in Nuclear Energy*, 76, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.05.010>

Purba, J. H. (2014b). A fuzzy-based reliability approach to evaluate basic events of fault tree analysis for nuclear power plant probabilistic safety assessment. *Annals of Nuclear Energy*, 70, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.02.022>

Purba, J. H. (2014c). Importance measure pada analisis pohon kegagalan fuzzy dengan menggunakan area defuzzification technique. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*. BATAN.

Purba, J. H. (2015a). A fuzzy probability algorithm for evaluating the AP1000 long term cooling system to mitigate large break LOCA. *Atom Indonesia*, 41(3), 113–121. <http://dx.doi.org/10.17146/aij.2015.417>

- Purba, J. H.** (2015b). Preliminary studies on developing PSA framework for HTGRs: Relevant events to be considered. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*. BATAN.
- Purba, J. H.** (2018). Master logic diagram: An approach to identify initiating events of HTGRs. *Journal of Physics: Conference Series*, 962, 012036. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012036>
- Purba, J. H., & Deswandri, D.** (2018). The implementation of importance measure approaches for criticality analysis in fault tree analysis: A review. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 20(1), 1–7. <https://doi.org/10.17146/jpen.2018.20.1.4257>
- Purba, J. H., Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G.** (2010a). A hybrid approach for fault tree analysis combining probabilistic method with fuzzy numbers. Dalam L. Rutkowski, R. Scherer, R. Tadeusiewicz, L. A. Zadeh, & J. M. Zurada (Ed.), *Artificial intelligence and soft computing, 1*, 194–201). Springer.
- Purba, J. H., Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G.** (2010b). Probabilistic safety assessment in nuclear power plants by fuzzy numbers. Dalam D. Ruan, T. Li, Y. Xu, G. Chen, & E. E. Kerre (Ed.), *Computational intelligence: Foundations and applications, Proceedings of the 9th International FLINS Conference*. World Scientific Publishing.
- Purba, J. H., Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G.** (2011). Failure possibilities for nuclear safety assessment by fault tree analysis. *International Journal of Nuclear Knowledge Management*, 5(2), 162–177. <https://doi.org/10.1504/IJNKM.2011.040940>
- Purba, J. H., Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G.** (2012a). A failure possibility-based reliability algorithm for nuclear safety assessment by fault tree analysis. Dalam *The 1st International*

Workshop on Safety & Security Risk Assessment and Organizational Cultures (SSRAOC2012).

- Purba, J. H.,** Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G. (2012b). An area defuzzification technique to assess nuclear event reliability data from failure possibilities. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 11(4), 1250022 (16 pp)). <https://doi.org/10.1142/S1469026812500228>
- Purba, J. H.,** Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G. (2012c, 26–29 Agustus). An area defuzzification technique and essential fuzzy rules for defuzzifying nuclear event failure possibilities into reliability data. Dalam C. Kahraman, E. E. Kerre, & F. T. Bozbura (Ed.), *Uncertainty modeling in knowledge engineering and decision making: Proceedings of the 10th International FLINS Conference*. World Scientific Publishing.
- Purba, J. H.,** Lu, J., & Zhang, G. (2012). Fuzzy failure rate for nuclear power plant probabilistic safety assessment by fault tree analysis. Dalam C. Kahraman (Ed.), *Computational Intelligence Systems in Industrial Engineering*, 6, 131–154. Atlantis Press.
- Purba, J. H.,** Lu, J., & Zhang, G. (2014). An intelligent system by fuzzy reliability algorithm in fault tree analysis for nuclear power plant probabilistic safety assessment. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 13(3), 1450017. <https://doi.org/10.1142/S1469026814500175>
- Purba, J. H.,** Lu, J., Zhang, G., & Pedrycz, W. (2014). A fuzzy reliability assessment of basic events of fault trees through qualitative data processing. *Fuzzy Sets and Systems*, 243, 50–69. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2013.06.009>
- Purba, J. H.,** & Sony Tjahyani, D. T. (2014a). Kuantifikasi ketidakpastian pada analisis pohon kegagalan dengan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

pendekatan fuzzy. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 16(1), 11–20. <https://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1856>

- Purba, J. H., & Sony Tjahyani, D. T.** (2014b). Reliability study of the AP1000 passive safety system by fuzzy approach. *Atom Indonesia*, 40(2), 49–56. doi: <https://doi.org/10.17146/aij.2014.271>
- Purba, J. H., & Sony Tjahyani, D. T.** (2019). A comparative study on safety design requirements between HTGR and LWR. *Journal of Physics: Conference Series*, 1198, 022020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022020>
- Purba, J. H., Sony Tjahyani, D. T., & Deswandri.** (2019). The implementation of fault tree analysis approaches in nuclear power plant probabilistic safety assessment. Dalam G. R. Sunaryo, S. Pinem, J. H. Purba, & T. J. Suryono (Ed.), *The 3rd International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences (ICoNETS) 2019*. AIP Publishing.
- Purba, J. H., Sony Tjahyani, D. T., Ekariansyah, A. S., & Tjahjono, H.** (2015). Fuzzy probability based fault tree analysis to propagate and quantify epistemic uncertainty. *Annals of Nuclear Energy*, 85, 1189–1199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2015.08.002>
- Purba, J. H., Sony Tjahyani, D. T., Ekariansyah, A. S., & Tjahjono, H.** (2018). Corrigendum to “Fuzzy probability based fault tree analysis to propagate and quantify epistemic uncertainty” [Ann. Nucl. Energy 85 (2015) 1189–1199]. *Annals of Nuclear Energy*, 111, 716–717. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.05.043>
- Purba, J. H., Sony Tjahyani, D. T., Susila, I. P., Widodo, S., & Ekariansyah, A. S.** (2022). Fuzzy probability and α -cut based-fault tree analysis approach to evaluate the reliabili-

ty and safety of complex engineering systems. *Quality and Reliability Engineering International*, 38(5), 2356–2371. <https://doi.org/10.1002/qre.3080>

Purba, J. H., Sony Tjahyani, D. T., Widodo, S., & Ekariansyah, A. S. (2020). Fuzzy probability based event tree analysis for calculating core damage frequency in nuclear power plant probabilistic safety assessment. *Progress in Nuclear Energy*, 125, 103376. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103376>

Purba, J. H., Sony Tjahyani, D. T., Widodo, S., & Tjahjono, H. (2017). α -Cut method based importance measure for criticality analysis in fuzzy probability – based fault tree analysis. *Annals of Nuclear Energy*, 110, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.06.023>

Purba, J. H., Tjahyani, D. T. S., Susila, I. P., & Waskita, A. A. (2021). *Pengembangan perangkat lunak analisis keselamatan probabilistik PLTN berbasis kecerdasan buatan*. Pusat Riset dan Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir.

Purba, J. H., Waskita, A. A., & Sony Tjahyani, D. T. (2019). The evaluation of the high temperature gas cooled reactor safety to fulfill the requirement of the next generation nuclear. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 21(2), 71–78. <https://doi.org/10.17146/jpen.2019.21.2.5615>

Rao, K. D., Kushwaha, H. S., Verma, A. K., & Srividya, A. (2007). Quantification of epistemic and aleatory uncertainties in level-1 probabilistic safety assessment studies. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(7), 947–956. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.07.002>

Rausand, M., & Hoyland, A. (2004). *Component importance System reliability theory: Models, statistical methods, and applications* (2nd ed.). Wiley.

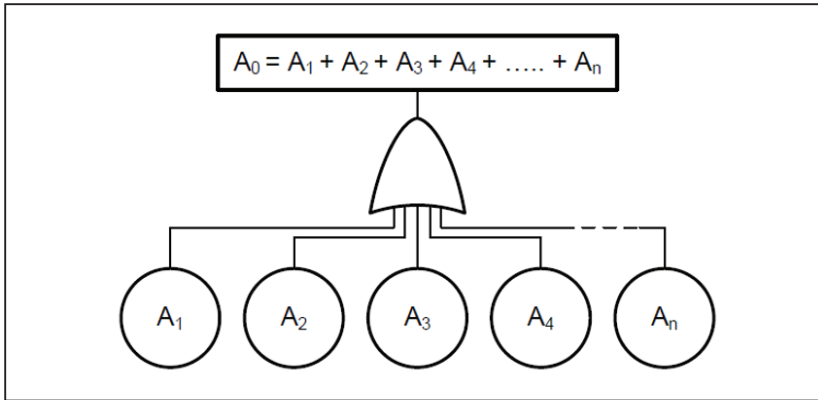
- Sakalli, U. S., & Baykoç, O. F. (2010). An application of investment decision with random fuzzy outcomes. *Expert Systems with Applications*, 37, 3405–3414. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.10.007>
- Smith, C., Knudsen, J., Kvarfordt, K., & Wood, T. (2008). Key attributes of the SAPHIRE risk and reliability analysis software for risk-informed probabilistic applications. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(8), 1151–1164. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.08.005>
- Song, H., Zhang, H. Y., & Chan, C. W. (2009). Fuzzy fault tree analysis based on T–S model with application to INS/GPS navigation system. *Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications*, 13(1), 31–40. <https://doi.org/10.1007/s00500-008-0290-3>
- Sony Tjahyani, D. T., & Purba, J. H. (2014). Analisis skenario kegagalan sistem untuk menentukan probabilitas kecelakaan parah AP1000. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega*, 16(3), 134–148. <https://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1845>
- Sony Tjahyani, D. T., & Purba, J. H. (2016). Analysis on the adequacy level of defence in depth for the modular HTGR. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*. BATAN.
- Sony Tjahyani, D. T., & Purba, J. H. (2019). Probabilistic safety analysis for assessing the failure of heat removal control of AP1000. *Journal of Physics: Conference Series*, 1198, 022070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022070>
- Sony Tjahyani, D. T., Purba, J. H., & Deswandri. (2019). The assessment of the radioactive releases from the confinement structure of AP1000 by probabilistic safety analysis. Dalam G. R. Sunaryo, S. Pinem, J. H. Purba, & T. J. Suryono (Ed.),

The 3rd International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences (ICoNETS) 2019. AIP Publishing.

- Susyadi, Sriyono, Kuntoro, I., Tjahjono, H., **Purba, J. H.**, Sony Tjahyani, D. T. , Ekariansyah, A. S., Dibyo, S., & Amelia, A. C. (2018). *Teknologi PLTN untuk Indonesia: Rekomendasi berbasis kesiapan teknologi untuk pembangunan dalam waktu dekat*. Batan Press.
- Wierman, T. E., Beck, S. T., Calley, M. B., Eide, S. A., Gentillon, C. D., & Kohn, W. E. (2001a). *Reliability study: Babcock and Wilcox reactor protection system, 1984–1998, NUREG/CR-5500, Vol. 11*. USNRC.
- Wierman, T. E., Beck, S. T., Calley, M. B., Eide, S. A., Gentillon, C. D., & Kohn, W. E. (2001b). *Reliability study: Combustion engineering reactor protection system, 1984–1998. NUREG/CR-5500, Vol. 10*. USNRC.
- You, X., & Tonon, F. (2012). Event-tree analysis with imprecise probabilities. *Risk Analysis*, 32(2), 330–344. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01721.x>
- Zio, E., & Podofillini, L. (2006). Accounting for components interactions in the differential importance measure. *Reliability Engineering and System Safety*, 91, 1163–1174. <https://doi.org/10.1016/j.res.2005.11.044>

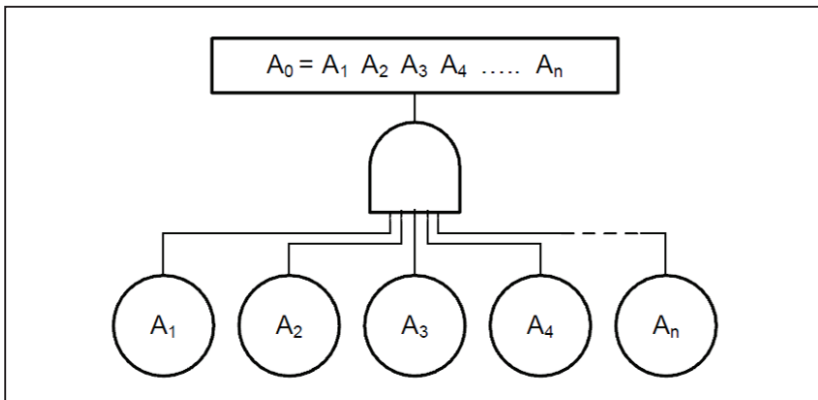
Buku ini tidak diperjualbelikan.

LAMPIRAN



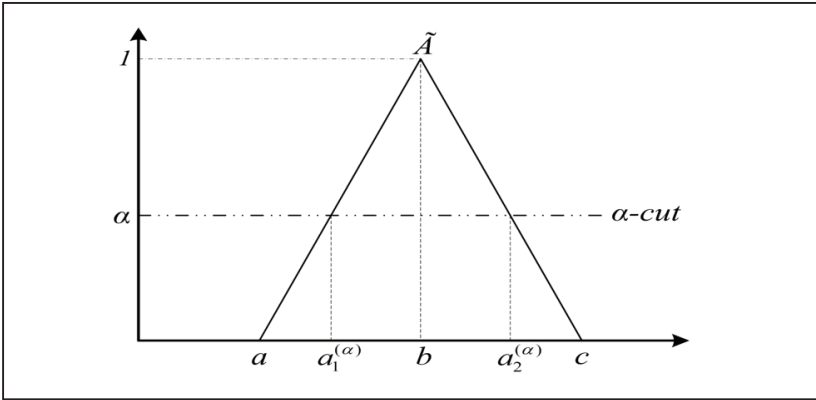
Sumber: Purba (2013)

Gambar 1. Gerbang Boolean OR dengan n masukan



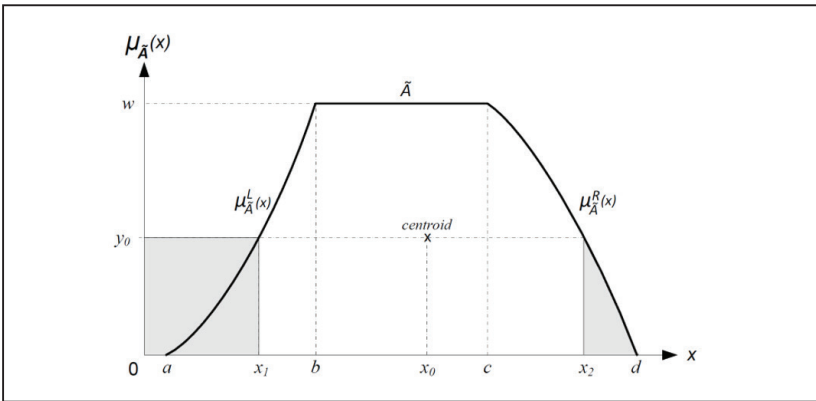
Sumber: Purba (2013)

Gambar 2. Gerbang Boolean AND dengan n masukan



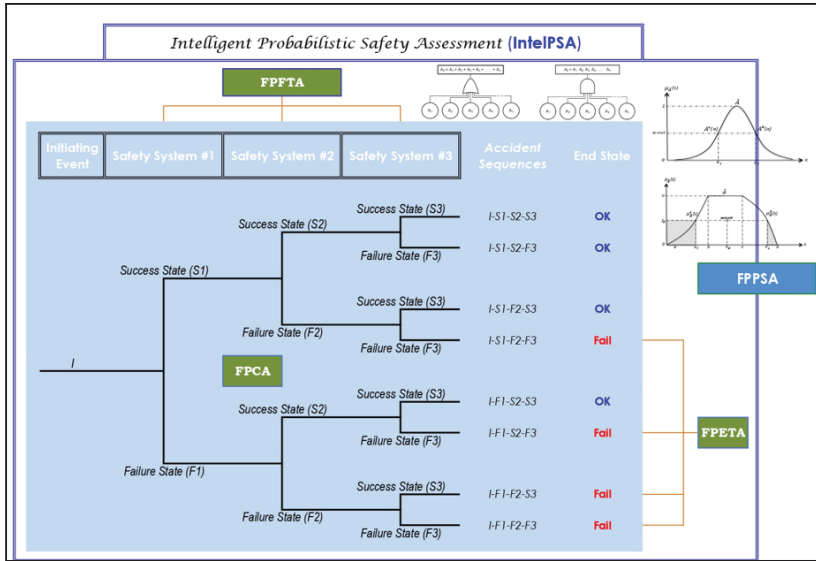
Sumber: Purba dkk. (2017)

Gambar 3. α -cut dari bilangan fuzzy $\tilde{A} = (a,b,c)$

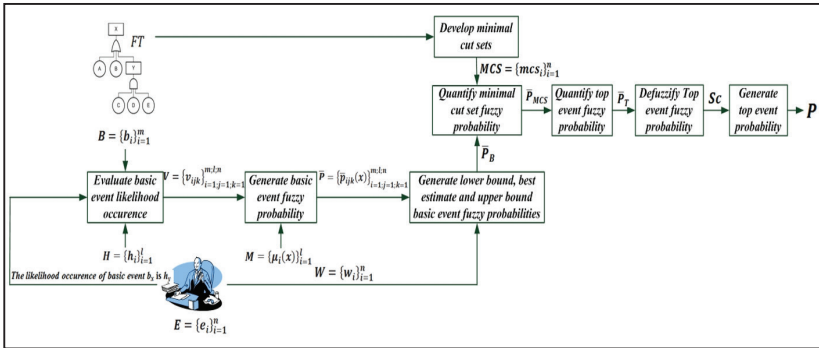


Sumber: Purba, Lu, Ruan, & Zhang (2012b, 2012c)

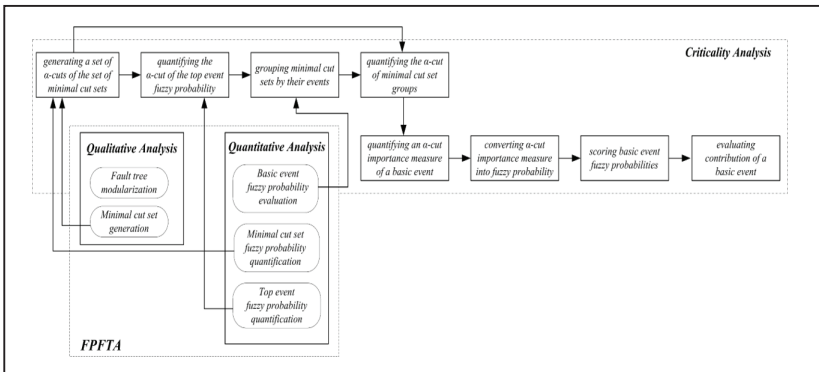
Gambar 4. Area defuzzification technique (ADT) dari bilangan fuzzy



Gambar 5. Perangkat lunak Intelligent Probabilistic Safety Assessment

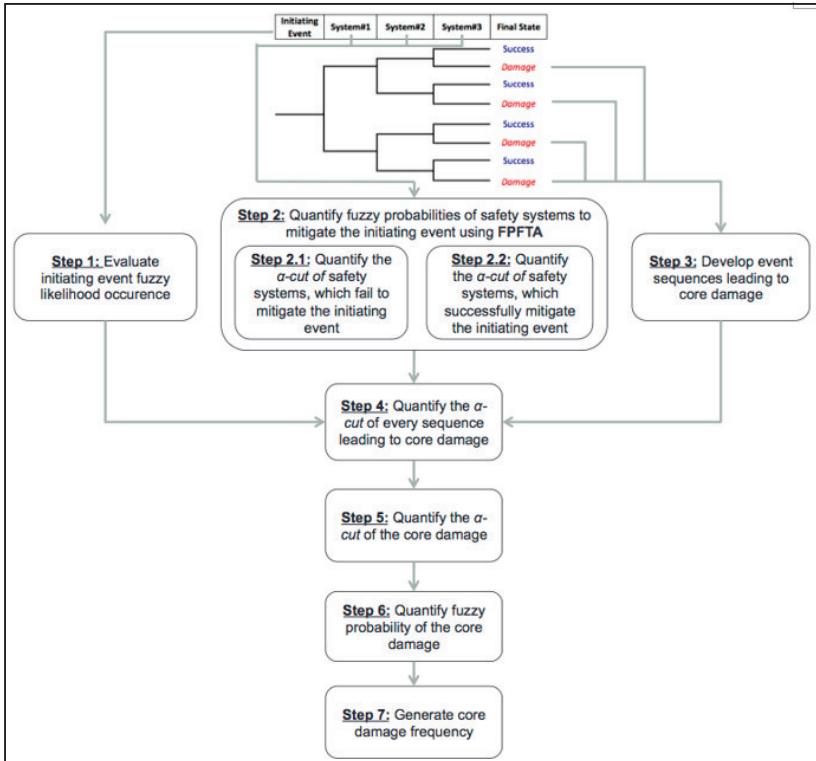


Sumber: Purba dkk. (2015)
Gambar 6. Kerangka Kerja FPFTA



Sumber: Purba dkk. (2017)
Gambar 7. Kerangka Kerja α -IM

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Purba dkk. (2020)

Gambar 8. Kerangka Kerja FPETA

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Buku Internasional

1. Bernard, M., Calle Vives, P., Chen, F., Flower, A., Gimenez, M., Ingersoll, D., Madni, I., Muzikova, E., Ohashi, H., Plummer, D., **Purba, J.**, Sato, H., Shiba, S., Sinegribov, S., Song, D., Spitzer, C., Tanase, A., Villalibre Ares, P., Wang, H., ... Zhong, F. (2020). *Applicability of design safety requirements to small modular reactor technologies intended for near term deployment*. IAEA.

Buku Nasional

2. Mukminin, A., Silitonga, A.S., Kusrini, E., Rijanto, E., Kartini, E., Suryawan, F., Wibowo, F.C., Semiadi, G., Arief, H., Siaputra, I.B., **Purba, J. H.**, Abraham, J., Arsyad, M., Suryana, N., Arahman, N., Wikansari, P., Sasiwi, P., Nuryadi, R., Sadjuga, ... Setiawan, W. (2021). *Meningkatkan kualitas publikasi ilmiah yang beretika untuk Indonesia berdaya saing*. Penerbit BRIN.
3. Susyadi, Sriyono, Kuntoro, I., Tjahjono, H., **Purba, J. H.**, Sony Tjahyani, D. T., Ekariansyah, A.S., Dibyo, S. & Amelia, A.C. (2018). *Teknologi PLTN untuk Indonesia: Rekomendasi berbasis kesiapan teknologi untuk pembangunan dalam waktu dekat*. Batan Press.

Bagian dari Buku Internasional

4. **Purba, J.H.**, Lu, J., & Zhang, G. (2012). Fuzzy failure rate for nuclear power plant probabilistic safety assessment by fault tree analysis. Dalam C. Kahraman (Ed.), *Computational intelligence systems in industrial engineering*, vol. 6 (131–154). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-91216-77-0_7
5. **Purba, J.H.**, Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G. (2010). A hybrid approach for fault tree analysis combining probabilistic method with fuzzy numbers. Dalam L. Rutkowski, R. Scherer, R. Tadeusiewicz, L. A. Zadeh, & J. M. Zurada (Ed.), *Artificial intelligence and soft computing*, vol. 1 (194–201). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13208-7_25

Jurnal Internasional

6. **Purba, J. H.**, Sony Tjahyani, D. T., Susila, I. P., Widodo, S., & Ekariansyah, A. S. (2022). Fuzzy probability and α -cut based-fault tree analysis approach to evaluate the reliability and safety of complex engineering systems. *Quality and Reliability Engineering International*, 38(5), 2356–2371. <https://doi.org/10.1002/qre.3080>
7. **Purba, J. H.**, Sony Tjahyani, D. T., Widodo, S., & Ekariansyah, A. S. (2020). Fuzzy probability based event tree analysis for calculating core damage frequency in nuclear power plant probabilistic safety assessment. *Progress in Nuclear Energy*, 125, 103376. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103376>
8. Hermansyah, H., Kumaraningrum, A. R., **Purba, J. H.**, Edison, & Yohda, M. (2020). Safety analysis technique for system with limited data: case study of the multipurpose research reactor in Indonesia. *Energies*, 13(8), 1975. <https://doi.org/10.3390/en13081975>

9. Juarsa, M., Witoko, J. P., Giarno, G., Haryanto, D. & **Purba, J. H.** (2018). An experimental analysis on Nusselt number of natural circulation flow in transient condition based on the height differences between heater and cooler. *Atom Indonesia*, 44(3), 141–147. <https://doi.org/10.17146/aij.2018.876>
10. **Purba, J. H.**, Sony Tjahyani, D. T., Ekariansyah, A. S., and Tjahjono, H. (2018). Corrigendum to “Fuzzy probability based fault tree analysis to propagate and quantify epistemic uncertainty” [Ann. Nucl. Energy 85 (2015) 1189–1199]. *Annals of Nuclear Energy*, 111, 716–717. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.05.043>
11. **Purba, J. H.**, Sony Tjahyani, D. T., Widodo, S., & Tjahjono, H. (2017). α -Cut method based importance measure for criticality analysis in fuzzy probability – Based fault tree analysis. *Annals of Nuclear Energy*, 110, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.06.023>
12. **Purba, J. H.**, Sony Tjahyani, D. T., Ekariansyah, A. S., & Tjahjono, H. (2015). Fuzzy probability based fault tree analysis to propagate and quantify epistemic uncertainty. *Annals of Nuclear Energy*, 85, 1189–1199. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.08.002>
13. **Purba, J. H.** (2015). A fuzzy probability algorithm for evaluating the AP1000 long term cooling system to mitigate large break LOCA. *Atom Indonesia*, 41(3), 113–121. <https://doi.org/10.17146/aij.2015.417>
14. **Purba, J.H.**, Lu, J. & Zhang, G. (2014). An intelligent system for nuclear power plant probabilistic safety assessment by fault tree analysis. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 13(3), 1450017. <https://doi.org/10.1142/S1469026814500175>

15. **Purba, J. H.** (2014). Fuzzy probability on reliability study of nuclear power plant probabilistic safety assessment: A review. *Progress in Nuclear Energy*, 76, 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.05.010>
16. Juarsa, M., **Purba, J. H.**, Kusuma, H. M., Setiadipura, T., & Widodo, S. (2014). Preliminary study on mass flow rate in passive cooling experimental simulation during transient using NC-Queen apparatus. *Atom Indonesia*, 40(3), 141–147. <https://doi.org/10.17146/aij.2014.333>
17. **Purba, J. H.** (2014). A fuzzy-based reliability approach to evaluate basic events of fault tree analysis for nuclear power plant probabilistic safety assessment. *Annals Nuclear Energy*, 70, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.02.022>
18. **Purba, J. H.**, & Sony Tjahyani, D. T. (2014). Reliability study of the AP1000 passive safety system by fuzzy approach. *Atom Indonesia*, 40(2), 49–56. <https://doi.org/10.17146/aij.2014.271>
19. **Purba, J. H.**, Lu, J., Zhang, G., & Pedrycz, W. (2014). A fuzzy reliability assessment of basic events of fault trees through qualitative data processing. *Fuzzy Sets and Systems*, 243, 50–69. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2013.06.009>
20. **Purba, J. H.**, Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G. (2012). An area defuzzification technique to assess nuclear event reliability data from failure possibilities. *The International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 11(4), 1250022. <https://doi.org/10.1142/S1469026812500228>
21. **Purba, J. H.**, Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G. (2011). Failure possibilities for nuclear safety assessment by fault tree analysis. *International Journal of Nuclear Knowledge*

Management, 5(2), 162–177. <https://doi.org/10.1504/IJNKM.2011.040940>

Jurnal Nasional

Bahasa Inggris

22. Tyas, R. L., Deswandri, D., Intaningrum, D., & **Purba, J. H.** (2022). Safety assessment on the decommissioning stage of Indonesian TRIGA 2000 Research Reactor. *Tri Dasa Mega*, 24(2), 75–84. <https://doi.org/10.17146/tdm.2022.24.2.6632>
23. **Purba, J. H.**, Waskita, A. A., & Sony Tjahyani, D.T. (2019). The evaluation of the high temperature gas cooled reactor safety to fulfill the requirement of the next generation nuclear. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 21(2), 71–78. <https://doi.org/10.17146/jpen.2019.21.2.5615>
24. **Purba, J. H.**, & Deswandri. (2018). The implementation of importance measure approaches for criticality analysis in fault tree analysis: A review. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 20(1), 1–7. <https://doi.org/10.17146/jpen.2018.20.1.4257>
25. **Purba, J. H.** (2016). Physical ageing of the research reactor core structural materials due to neutron irradiation exposure: A review. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 18(2), 93–100. <https://doi.org/10.17146/jpen.2016.18.2.3143>

Bahasa Indonesia

26. Sony Tjahyani, D. T., & **Purba, J. H.** (2014). Analisis skenario kegagalan sistem untuk menentukan probabilitas kecelakaan parah AP1000. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, 16(3), 134–148. <http://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1845>

27. **Purba, J. H.,** & Sony Tjahyani, D. T. (2014). Kuantifikasi ketidakpastian pada analisis pohon kegagalan dengan pendekatan *fuzzy*. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir*, 16(1), 11–20. <http://jurnal.batan.go.id/index.php/tridam/article/view/1856>
28. **Purba, J. H.** (2000). Paket program komputer CATHENA untuk analisis termohidraulika reaktor dan fasilitas uji. *Sigma Epsilon*, 16–17, 19–27.
29. **Purba, J. H.,** Antariksawan, A. R., & Widodo, S. (1999). Analisis kecelakaan pipa primer pecah dua sisi pada Reaktor Daya AP600 menggunakan PCTTRAN. *Sigma Epsilon*, 14–15, 31–46.

Prosiding Internasional

30. **Purba, J. H.,** & Sony Tjahyani, D. T. (2019). A comparative study on safety design requirements between HTGR and LWR. *Journal of Physics: Conference Series*, (Vol. 1198, 022020). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022020>
31. Sony Tjahyani, D. T., & **Purba, J. H.** (2019). Probabilistic safety analysis for assessing the failure of heat removal control of AP1000. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1198, 022070). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022070>
32. **Purba, J. H.,** Sony Tjahyani, D. T., & Deswandri. (2019). The implementation of fault tree analysis approaches in nuclear power plant probabilistic safety assessment. Dalam G. R. Sunaryo, S. Pinem, J. H. Purba, & T. J. Suryono (Ed.), *The 3rd International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences (ICoNETS) 2019* (Vol. 2193, 020010). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.5135519>

33. Sony Tjahyani, D. T., **Purba, J. H.**, & Deswandri. (2019). The assessment of the radioactive releases from the confinement structure of AP1000 by probabilistic safety analysis. Dalam G. R. Sunaryo, S. Pinem, J. H. Purba, & T. J. Suryono (Ed.), *The 3rd International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences (ICoNETS) 2019* (Vol. 2193, 020019). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.5135528>
34. **Purba, J. H.** (2018). Master logic diagram: An approach to identify initiating events of HTGRs. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 962, 011001). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/011001>
35. Kumaraningrum, A. R., Hermansyah, H., & **Purba, J. H.** (2018). Experts' selection in the application of fuzzy fault tree analysis to evaluate an RSG – GAS primary cooling system. Dalam Y. D. Jatmiko, R. Azrianingsih, M. A. Pamungkas, A. Safitri, & C. Karim (Ed.), *The 8th Annual Basic Science International Conference (BaSIC 2018)* (Vol. 2021, 020001). American Institute of Physics. <https://doi.org/10.1063/1.5062718>
36. **Purba, J. H.**, Lu, J., & Zhang, G. (2012). An area defuzzification technique and essential fuzzy rules for defuzzifying nuclear event failure possibilities into reliability data. Dalam C. Kahraman, E. E. Kerre, & F. T. Bozbura (Ed.), *The 10th International FLINS Conference*, (Vol. 7, 1208–1213). World Scientific. https://doi.org/10.1142/9789814417747_0194
37. **Purba, J. H.**, Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G. (2012). A failure possibility-based reliability algorithm for nuclear safety assessment by fault tree analysis. *The 1st International*

Workshop on Safety & Security Risk Assessment and Organizational Cultures (SSRAOC2012), SCK•CEN.

38. **Purba, J. H.**, Lu, J., Ruan, D., & Zhang, G. (2010). Probabilistic safety assessment in nuclear power plants by fuzzy numbers. Dalam D. Ruan, T. Li, Y. Xu, G. Chen, & E. E. Kerre (Ed.), *The 9th International FLINS Conference* (Vol. 4, 256–262). World Scientific. https://doi.org/10.1142/9789814324700_0037

Prosiding Nasional

Bahasa Inggris

39. **Purba, J. H.** & Sony Tjahyani, D. T. (2016). Human reliability analysis in nuclear power plants. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir* (409–415). BATAN.
40. Sony Tjahyani, D.T. & **Purba, J. H.** (2016). Analysis on the adequacy level of defence in depth for the modular HTGR. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir* (401–408). BATAN.
41. **Purba, J. H.** (2015). Preliminary studies on developing PSA framework for HTGRs: Relevant events to be considered. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir* (446–452). BATAN.

Bahasa Indonesia

42. **Purba, J. H.** (2014). *Importance measure* pada analisis pohon kegagalan fuzzy dengan menggunakan *area defuzzification technique*. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir* (821–830). BATAN.
43. Prasetyo, Y. S., **Purba, J. H.**, Prasetyo, J., Heru, G. B., & Juarsa, M., (2014). Studi eksperimental penurunan tem-

peratur di heater selama diaktifkannya cooler pada simulasi sistem pasif NC-QUEEN II. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Sains 2014* (16–21). Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara.

44. Trimardana, Y., **Purba, J. H.**, Prasetyo, J., Heru, G. B., & Juarsa, M. (2014). Analisis variasi perubahan daya heater terhadap temperatur air di bagian heater pada simulasi sistem pasif NC-QUEEN. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Sains* (63–68). Fakultas Teknik Universitas Tarumanagara.
45. **Purba, J. H.** (2008). Analisis *steam generator tube rupture* (SGTR) dengan kegagalan sistem isolasi PWR – KNSP. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir XIII*. BATAN.
46. **Purba, J. H.** (2007). Simulasi dan analisis *small break LOCA* pada PWR dengan kegagalan resirkulasi dan injeksi ECCS. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir XII*. BATAN.
47. **Purba, J. H.** (2006). Analisis *medium break LOCA* pada reaktor daya PWR dengan kegagalan resirkulasi dan injeksi ECCS. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir XI*. BATAN.
48. **Purba, J. H.**, Antariksawan, A. R., Sony Tjahyani, D. T., & Giarno. (2005). Analisis keselamatan reaktor TRIGA 2000 Bandung dengan paket program CATHENA untuk kejadian kecelakaan kehilangan pendingin. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir X*. BATAN.
49. **Purba, J. H.**, Juarsa, M., & Joko P. W., (2005). Pembuatan perangkat lunak perhitungan distribusi fluks panas satu dimensi untuk eksperimen bagian uji QUEEN di untai uji.

Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir
X. BATAN.

50. Ekariansyah, A. S., Nitiswati, S., Aliq, A., **Purba, J. H.**, Suharno, S., Prasaja, S. T., Widodo, S., Sugiyanto, S., Giarno, G., Karyanta, E. & Kamal, D. K. (2000). Tinjauan keselamatan reaktor riset ditinjau dari aspek termohidrolika untuk kondisi operasi dan perawatan. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir V* (247–260). BATAN.
51. Aliq, A., Suharno, S., Antariksawan, A. R., Tjahyono, H., **Purba, J. H.**, Ekariansyah, A. S. & Karyanta, E. (2000). Prinsip-prinsip dasar manajemen kecelakaan reaktor daya. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir V* (174–181). BATAN.
52. Prasaja, T. P., Widodo, S., Aliq, A., Suharno, S., Ekariansyah, A. S., Sugiyanto, S., **Purba, J. H.**, Giarno, G., Kamal, D. K. & Karyanta, E. (2000). Tinjauan desain seismik dan integritas kontainmen reaktor daya. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir V* (157–166). BATAN.
53. **Purba, J. H.**, Ekariansyah, A. S., Widodo, S., Prasaja, S. T., Suharno, S., Aliq, A., Sugiyanto, S., Giarno, G., Karyanta, E. & Kamal, D.K. (2000). Analisis keselamatan probabilistik (PSA) level 1 reaktor daya AP600 akibat putusnya aliran listrik kondisi gempa. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir V* (277–295). BATAN.
54. Suharno, S., Sugiyanto, S., Giarno, G., Aliq, A., Widodo, S., Aji, B., **Purba, J. H.**, & Karyanta, E. (1999) Keselamatan in-pile loop terintegrasi pada RSG-GAS dengan tinjauan terjadi kebocoran in-pile loop pada posisi teras. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir IV* (35–42). BATAN.

55. Prasaja, T. P., Sugiyanto, S., Widodo, S., **Purba, J. H.**, Suharno, S., & Ekariansyah, S. T. (1999). Pemodelan dan laju pelepasan produk fisi dari pengungkung reaktor. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir IV* (23–34). BATAN.
56. Ekariansyah, A. S., Widodo, S., Sugiyanto, S., **Purba, J. H.**, Prasaja, S. T. & Aji, B. (1999). Keselamatan probabilistik (PSA) level 1 reaktor daya AP-600 kondisi gempa (kegagalan eksternal). *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir IV* (1–13). BATAN.
57. **Purba, J. H.**, Suharno, S., Widodo, S., Aji, B., Prasaja, S. T., Ekariansyah, A. S., & Situmorang, J. (1999). Kecelakaan pipa pecah ukuran besar pada sistem primer reaktor daya AP-600. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir IV* (14–22). BATAN.
58. Rohman, B., Sugiyanto, S., Widodo, S., **Purba, J. H.**, Suharno, S., & Sudarsaymsu, S. (1998). Penyebaran dan perilaku produk fisi di dalam kontainmen reaktor. *Prosiding Presentasi Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor III* (151–156). BATAN.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama Lengkap	: Dr. Julwan Hendry Purba, S.T., M.App.I.T.
Tempat, Tanggal Lahir	: Simalungun, 1 Juli 1970
Anak ke	: 2 dari 7 bersaudara
Jenis Kelamin	: Laki-laki
Nama Ayah Kandung	: James Karmen Purba
Nama Ibu Kandung	: Frieda Purnama Napitupulu
Nama Istri	: Yanuarita Tri Maharani
Jumlah Anak	: 2 orang
Nama Anak	: Hendersan Giancarlo Purba Nathanael Marchello Purba
Nama Instansi	: Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	: Analisis Keselamatan PLTN Berdasarkan Probabilitas <i>Fuzzy</i>
Bidang Kepakaran	: Teknologi Keselamatan Reaktor
No SK Pangkat Terakhir	: 14/K Tahun 2022 tanggal 24 Agustus 2022
No SK Ahli Peneliti Utama	: 46/M Tahun 2021 tanggal 18 Oktober 2021

Buku ini tidak diperjualbelikan.

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/PT	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1	SD	SD Negeri 124399	Pematang Siantar, Indonesia	1983
2	SMP	SMP Negeri 3	Medan, Indonesia	1986
3	SMA	SMA Negeri 5	Medan, Indonesia	1989
4	S-1	Universitas Gadjah Mada	Yogyakarta, Indonesia	1995
5	S-2	Monash University	Melbourne, Australia	2003
6	S-3	University of Technology Sydney	Sydney, Australia	2013

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1	Technical Cooperation on High Temperature Gas Cooled Reactors	IAEA/Vienna/Austria	2016– 2017
2	Instructor Training Course on Reactor Engineering I, II and III	JAEA/Tokai-mura/ Jepang	2014
3	National Training Course on Probabilistic Safety Assessment	Pusdiklat–BATAN/ Jakarta/Indonesia	2007
4	International Training Course on Nuclear Safety	JAEA/Tokai-mura/ Jepang	2006

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
5	Regional Training Workshop on Nuclear Power Plant Siting	Pusdiklat-BATAN/ Jakarta/Indonesia	2000
6	Interregional Training Course on Regulatory Aspects and Safety Documentation of Research Reactors	ANL/Chicago/AS AECL/Chalkriver/ Kanada	1998

D. Jabatan Fungsional

No	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Peneliti Muda (Gol. III/d)	1 Maret 2014
2	Peneliti Madya (Gol. IV/a)	1 November 2016
3	Peneliti Ahli Madya (Gol. IV/b)	1 Januari 2018
4	Peneliti Ahli Madya (Gol. IV/c)	31 Januari 2019
5	Peneliti Ahli Utama (Gol. IV/d)	30 Oktober 2021

E. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan/Pekerjaan	Pemberi Tugas	Tahun
1	Anggota delegasi BATAN ke INET, Tsinghua University, Beijing, Tiongkok dalam rangka kerja sama penelitian HTGR	Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional	2018

F. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

Kegiatan Ilmiah di Luar Negeri

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	Expert for Consultancy Meeting on the Applicability of IAEA Design Safety Requirements, SSR-2/1 (Rev. 1), to High Temperature Gas-cooled Advanced Small to Medium-sized Reactors	Kontributor	IAEA, Vienna, Austria	2018
2.	Expert for the Second Consultancy Meeting on the IAEA Study on SSR-2/1 Design Safety Requirements for Small to Small Modular Reactors (SMRs)	Kontributor	IAEA, Vienna, Austria	2017
3.	Expert for Consultancy Meeting on the Applicability of SSR-2/1 to Small Modular Reactors	Kontributor	IAEA, Vienna, Austria	2017
4.	<i>Research Fellow</i> pada International Atomic Energy Agency (IAEA)	Peserta	IAEA, Vienna, Austria	2016–2017

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
5.	The 9th International Fuzzy Logic and Intelligent Technologies in Nuclear Science (FLINS) Conference	Pembicara	Southwest Jiaotong University, Chengdu, Tiongkok	2010

Kegiatan Ilmiah di Dalam Negeri

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1	Tim Seleksi Proposal Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju	<i>Reviewer</i> substansi	DFRI-BRIN, Jakarta, Indonesia	2022– 2023
2	Majelis Asesor Peneliti Pusat	Anggota	BRIN, Jakarta, Indonesia	2022– 2023
3	The 4th International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences	Dewan Editor	Seminar daring	2021
4	Asesor Akreditasi Jurnal Nasional (ARJUNA)	Anggota	Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi, Jakarta, Indonesia	2018– 2023
5	Majelis Asesor Peneliti Instansi	Ketua	BATAN, Jakarta, Indonesia	2019– 2021

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
6	The 3rd International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences	Dewan Editor Pembicara	Universitas Andalas, Padang, Indonesia	2019
7	Symposium of Emerging Nuclear Technology and Engineering Novelty	Dewan Editor	Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia	2018
8	International Atom Indonesia Best Paper Awards	Ketua Panitia	BATAN, Serpong, Indonesia	2018
9	The 2nd International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences	Dewan Editor Pembicara	Universitas Hasanudin, Makassar, Indonesia	2017
10	Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir ke-3	Pembicara	Politeknik Negeri Batam, Batam, Indonesia	2016
11	International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences	Dewan Editor Pembicara	Universitas Udayana, Denpasar, Indonesia	2015
12	Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2015 ke-2	Pembicara	Universitas Udayana, Denpasar, Indonesia	2015
13	Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2014 ke-1	Pembicara	Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia	2014

Buku ini tidak diperjualbelikan.

G. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
1	<i>Jurnal Atom Indonesia</i>	BATAN-BRIN	Ketua/ Anggota Editor	2015–2023
2	<i>Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega</i>	BATAN-BRIN	Ketua/ Anggota Editor	2014–2023
3	<i>Jurnal Pengawasan Tenaga Nuklir</i>	Bapeten	Anggota Editor	2021–2023
4	<i>Mathematical Problems in Engineering</i>	Hindawi	Guest Reviewer	2021–2023
5	<i>Engineering Computations</i>	MDPI	Guest Reviewer	2020–2023
6	<i>Science and Technology of Nuclear Installations</i>	Hindawi	Guest Reviewer	2020–2023
7	<i>Reliability Engineering and System Safety</i>	Elsevier	Guest Reviewer	2017–2023
8	<i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	Elsevier	Guest Reviewer	2017–2023
9	<i>Quality and Reliability Engineering International</i>	Wiley	Guest Reviewer	2017–2023
10	<i>Annals of Nuclear Energy</i>	Elsevier	Guest Reviewer	2016–2023

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
11	<i>Nuclear Science and Techniques</i>	Springer	<i>Guest Reviewer</i>	2016–2023
12	<i>International Journal of Nuclear Energy Science and Engineering</i>	Science and Engineering	<i>Guest Reviewer</i>	2016–2023
13	<i>International Journal of Fuzzy Systems</i>	Springer	<i>Guest Reviewer</i>	2016–2023
14	<i>International Journal of Electrical Power and Energy Systems</i>	Elsevier	<i>Guest Reviewer</i>	2015–2023
15	<i>Fuzzy Sets and Systems</i>	Elsevier	<i>Guest Reviewer</i>	2014–2023
16	<i>Journal of Intelligent and Fuzzy Systems</i>	IOS Press	<i>Guest Reviewer</i>	2014–2023

H. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1	Penulis Tunggal	12
2	Penulis bersama Penulis lainnya	46
	Total	58

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1	Bahasa Indonesia	23
2	Bahasa Inggris	35
	Total	58

Buku ini tidak diperjualbelikan.

I. Pembinaan Kader Ilmiah

Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Ratih Luhuring Tyas	BRIN	Membimbing penulisan karya tulis ilmiah	2023
2.	Anik Purwaningsih	BRIN	Membimbing penelitian	2022
3.	Pejabat Fungsional Peneliti di Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir	BATAN	Ketua/Anggota Komisi Pembina Tenaga Fungsional	2016–2019

Mahasiswa

No.	Nama	PT/Universitas	Peran/Tugas	Tahun
1	Anggraini Ratih Kumaraningrum (S-2)	Universitas Indonesia	Pembimbing Tesis	2018
2	Agnes Suthiode (S-1)	STMIK Dharma Putra	Pembimbing Skripsi	2017
3	Suwandi Sanjaya (S-1)	STMIK Dharma Putra	Pembimbing Skripsi	2017
4	Devina Kusnandar (S-1)	STMIK Dharma Putra	Pembimbing Skripsi	2016
5	Junawanta Candra (S-1)	STMIK Dharma Putra	Pembimbing Skripsi	2016
6	Alim Mardhi (S-2)	Chulalongkorn University Thailand	Pembimbing Tesis	2015
7	Yuda Trimardana (S-1)	Universitas Ibn Khaldun Bogor	Pembimbing Skripsi	2014

No.	Nama	PT/Universitas	Peran/Tugas	Tahun
8	Yoga Subkhan Prasetyo (S-1)	Universitas Ibn Khaldun Bogor	Pembimbing Skripsi	2014
9	Daru Mardiko Ajie (S-1)	UPN Veteran Jakarta	Pembimbing Skripsi	2006
10	Yudhi Biantoro (S-1)	UPN Veteran Jakarta	Pembimbing Skripsi	2006
11	Margaretha (S-1)	Universitas Tarumanagara	Pembimbing Skripsi	2005
12	Anita Tanujaya (S-1)	Universitas Tarumanagara	Pembimbing Skripsi	2005

J. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1	Pengurus Pusat	Perhimpunan Periset Indonesia (PPI)	2022–2024
2	Pengurus Pusat	Bidang Kejuruan Teknik Nuklir (BKTN)-Persatuan Insinyur Indonesia (PII)	2021–2024
3	Pengurus Kota Tangsel	Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo)	2019–2021
4	Anggota	Council of Asian Science Editors (CASE)	2020–2023
5	Anggota	Himpunan Editor Berkala Ilmiah Indonesia (HEBII)	2019–2023
6	Anggota	Asesor Akreditasi Jurnal Nasional (ARJUNA)	2018–2023

Buku ini tidak diperjualbelikan.

7	Anggota	Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo)	2016–2021
---	---------	--	-----------

K. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1	Penghargaan Publikasi Ilmiah Internasional	Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi	2019
2	<i>Outstanding Reviewer</i>	<i>Chief Editor</i> Jurnal Internasional <i>Fuzzy Sets and Systems</i>	2018
3	<i>Outstanding Reviewer</i>	<i>Chief Editor</i> Jurnal Internasional <i>Reliability Engineering and System Safety</i>	2018
4	<i>Outstanding Reviewer</i>	<i>Chief Editor</i> Jurnal Internasional <i>Annals of Nuclear Energy</i>	2017
5	<i>Outstanding Reviewer</i>	<i>Chief Editor</i> <i>Journal of Loss Prevention in the Process Industries</i>	2017
6	<i>Outstanding Reviewer</i>	<i>Chief Editor</i> Jurnal Internasional <i>ISA Transactions</i>	2017
7	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden Republik Indonesia	2017
8	Penghargaan Publikasi Ilmiah Internasional	Lembaga Pengelola Dana Pendidikan	2016
9	Atom Indonesia Best Paper Award	Badan Tenaga Nuklir Nasional	2014
10	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden Republik Indonesia	2007

Buku ini tidak diperjualbelikan.

ANALISIS KESELAMATAN PLTN BERBASIS PROBABILITAS *FUZZY*

Teknologi PLTN dan teknologi sistem keselamatan senantiasa berkembang seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Meskipun keandalan sistem keselamatan PLTN semakin baik, tetaplah tidak mungkin untuk menihilkan kecelakaan dan risiko pengoperasiannya. Untuk dapat memperkirakan besarnya peluang terjadinya kecelakaan dan tingkat risiko dari pengoperasian PLTN, perlu dilakukan analisis keselamatan probabilistik. Namun, analisis keselamatan probabilistik konvensional tidak dapat menggambarkan kondisi nyata dari sistem yang sedang dievaluasi. Oleh karena itu, dikembangkanlah metode analisis keselamatan PLTN berbasis probabilitas *fuzzy* untuk mengevaluasi kinerja sistem keselamatan PLTN ketika data kegagalan komponen tidak tersedia. Metode baru ini memanfaatkan keilmuan, pengetahuan, dan pengalaman yang dimiliki oleh pakar yang terlibat dalam mendesain dan mengembangkan reaktor tersebut.

Bahasan dalam orasi ilmiah ini diharapkan dapat memberikan kontribusi saintifik pada pengembangan teknologi keselamatan PLTN. Selain itu, konsep dalam metode baru ini dapat menjadi acuan bagi para peneliti dalam mengembangkan metode analisis baru dengan penggunaan data kualitatif melalui justifikasi pakar ketika data kuantitatif tidak tersedia. Untuk aplikasi praktis, para pembuat kebijakan terkait dengan pembangunan dan pengoperasian PLTN pertama di Indonesia dapat mempertimbangkan untuk menggunakan perangkat lunak IntelPSA sebagai alat bantu untuk mengevaluasi keandalan sistem keselamatan PLTN yang dipilih. Dengan demikian, pakar yang memahami teknologi dan sistem kerja dari reaktor nuklir yang akan dibangun dapat melakukan justifikasi secara kualitatif.



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung BJ Habibie, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.784



ISBN 978-623-8052-70-7



9 786238 052707

Buku ini tidak diperjualbelikan.