

KUANTIFIKASI KETIDAKPASTIAN PADA ANALISIS POHON KEGAGALAN DENGAN PENDEKATAN FUZZY

Julwan Hendry Purba, D.T. Sony Tjahyani
Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir-BATAN
Email: purba-jh@batan.go.id

Diterima editor 6 Januari 2014
Disetujui untuk publikasi 24 Februari 2014

ABSTRAK

KUANTIFIKASI KETIDAKPASTIAN PADA ANALISIS POHON KEGAGALAN DENGAN PENDEKATAN FUZZY. Analisis pohon kegagalan dipakai untuk mengevaluasi kinerja sistem keselamatan pembangkit listrik tenaga nuklir. Analisis ini memerlukan ketersediaan data kegagalan komponen. Karena keandalan komponen dipengaruhi oleh lingkungan kerjanya maka perlu digunakan data kegagalan komponen yang berasal dari sistem yang sedang dievaluasi. Namun kenyataannya, data ini sangat sulit diperoleh sehingga penggunaan data jenerik menjadi tak terhindarkan. Penggunaan data jenerik tentunya akan menyebabkan ketidakpastian pada hasil analisis. Simulasi Monte Carlo sering dipakai untuk mengkuantifikasi ketidakpastian ini. Namun sebenarnya metode ini kurang tepat untuk mengevaluasi ketidakpastian apabila jumlah data yang dimiliki sangat terbatas. Tujuan dari penelitian ini adalah pengembangan sebuah metode analisis pohon kegagalan baru yang menerapkan konsep *fuzzy* untuk kuantifikasi ketidakpastian. Dalam metode baru ini, probabilitas *fuzzy* dipakai untuk merepresentasikan probabilitas kejadian dasar, antara serta puncak dan hukum kombinasi *fuzzy* dipakai untuk mengevaluasi ketidakpastian hasil analisis. Kebolehjadian gagalnya sistem injeksi akumulator AP1000 telah dievaluasi dengan menggunakan metode baru ini dan diperoleh ketidakpastian kegagalan pada interval $8,87E-12$ – $8,87E-8$ dengan nilai titik tengah $8,87E-10$. Hasil ini membuktikan bahwa analisis pohon kegagalan dengan pendekatan *fuzzy* ini layak dipakai apabila yang menjadi fokus evaluasi adalah ketidakpastian karena keterbatasan data kegagalan yang dimiliki.

Kata kunci: Analisis pohon kegagalan, analisis ketidak pastian, probabilitas *fuzzy*, hukum kombinasi *fuzzy*

ABSTRACT

QUANTIFICATION OF UNCERTAINTY IN FAULT TREE ANALYSIS BY FUZZY APPROACH. *Fault tree analysis has been applied to evaluate nuclear power plant safety systems. To perform this analysis, component reliabilities need to be provided well in advance. Since working environment can affect component reliability, it is necessary to directly collect such data from the safety system being evaluated. However, due to lack of resources, such data may be unattainable. Hence, the use of generic data cannot be avoided. Unfortunately, generic data will add uncertainty to the analysis. Monte Carlo simulation has been performed to evaluate such uncertainty. However, this method is not appropriate when components do not have probability distributions of their lifetime to failures. The aim of this study is to propose a new fault tree analysis method which implements fuzzy concepts for quantifying such uncertainty. In the proposed method, fuzzy probabilities represent basic, intermediate as well as top event probabilities and fuzzy combination rules are used to evaluate the overall uncertainty of the fault tree. The proposed method has been performed to evaluate failure probability of the AP1000 accumulator injection system and generate a probability distribution between $8.87E-12$ and $8.87E-8$ with the point median value of $8.87E-10$. This result confirms that the proposed method is feasible to evaluate system fault tree when uncertainty raised by the lack of reliability data is the main focus of the analysis.*

Keywords: *Fault tree analysis, uncertainty analysis, fuzzy probabilities, fuzzy combination rules*

PENDAHULUAN

Sistem keselamatan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) berfungsi untuk menjamin bahwa PLTN dapat beroperasi secara normal tanpa adanya paparan radiasi yang terlepas ke penduduk dan lingkungan, mencegah kecelakaan dan memitigasi konsekuensi dari kecelakaan jika kecelakaan yang dipostulasikan terjadi. Agar opsi energi nuklir dapat terus meningkat maka kinerja sistem keselamatan ini perlu terus ditingkatkan. Sehubungan dengan itu, generasi-generasi terbaru PLTN telah mulai menerapkan konsep sistem keselamatan pasif yang dapat bekerja berdasarkan gravitasi, konveksi, kondensasi dan sirkulasi alam [1-3]. Reaktor daya AP1000 yang saat ini sedang dibangun di China [4, 5] akan menjadi reaktor daya komersial pertama yang menerapkan sistem keselamatan pasif untuk pendingin teras (*passive core cooling system*) [6]. Meskipun secara konseptual sistem keselamatan pasif ini akan lebih andal dari sistem keselamatan aktif, namun kemungkinan gagal masih tetap ada [7]. Oleh karena itu, evaluasi terhadap sistem pasif ini masih perlu dilakukan.

Analisis pohon kegagalan (*fault tree analysis*) sudah dipakai untuk mengevaluasi kinerja sistem keselamatan PLTN secara probabilistik (analisis keselamatan probabilistik, *probabilistic safety assessment*). Untuk dapat melakukan analisis keselamatan probabilistik ini, PLTN yang akan dievaluasi harus memiliki data kegagalan komponen. Data kegagalan ini menggambarkan kebolehjadian komponen tersebut gagal melaksanakan fungsinya. Karena keandalan komponen dipengaruhi oleh lingkungan kerjanya [8, 9], maka untuk mendapatkan hasil analisis yang aktual dan representatif, data kegagalan komponen yang digunakan sebaiknya berasal dari PLTN yang sedang dievaluasi [10]. Namun karena keterbatasan data kegagalan komponen yang dimiliki oleh sebuah PLTN maka penggunaan data jenerik menjadi tak terhindarkan [11]. Penggunaan data jenerik dalam analisis keselamatan probabilistik tentu saja akan menambahkan ketidakpastian ke dalam hasil analisis [11-13].

Simulasi Monte Carlo sudah dipakai untuk mengevaluasi ketidakpastian dalam analisis pohon kegagalan. Namun Flage et al. [14] dan Rao et al. [15] telah mengkonfirmasi bahwa metode ini tidak tepat dipakai untuk analisis ketidakpastian apabila jumlah data kegagalan yang dimiliki sangat terbatas. Teori himpunan *fuzzy* (*fuzzy sets*) telah diimplementasikan untuk mengevaluasi ketidakpastian pada analisis keandalan sistem [16-19]. Selain itu, probabilitas *fuzzy* (*fuzzy probabilities*) juga sudah diimplementasikan pada analisis pohon kegagalan sistem keselamatan PLTN [20-24]. Di dalam analisis pohon kegagalan, probabilitas *fuzzy* digunakan untuk merepresentasikan ketidakpastian probabilitas kejadian dasar dengan menggunakan fungsi keanggotaan bilangan *fuzzy* (*membership functions of fuzzy numbers*). Oleh karena ketidakpastian probabilitas kejadian dasar direpresentasikan dengan menggunakan bilangan *fuzzy* dan juga sudah dikonfirmasi bahwa simulasi Monte Carlo tidak tepat untuk analisis ketidakpastian ini maka perlu dikembangkan sebuah metode analisis pohon kegagalan baru yang dapat mengatasi kekurangan ini.

Tujuan dari penelitian ini adalah pengembangan sebuah metode analisis pohon kegagalan baru yang menerapkan konsep *fuzzy* untuk kuantifikasi ketidakpastian yang disebabkan oleh karena terbatasnya data kegagalan yang dimiliki. Ada dua hal penting yang diimplementasikan ke dalam metode analisis baru ini yaitu (1) penggunaan probabilitas *fuzzy* untuk menggambarkan probabilitas kejadian dasar, antara dan puncak dan (2) penggunaan hukum kombinasi *fuzzy* (*fuzzy combination rules*) untuk mengevaluasi ketidakpastian. Untuk menunjukkan kelayakan metode baru ini secara matematis maka probabilitas kegagalan sistem injeksi akumulator reaktor daya AP1000 akan dievaluasi menggunakan metode baru ini. Oleh karena sampai saat ini belum ada reaktor AP1000 yang beroperasi maka probabilitas *fuzzy* kejadian dasar sistem injeksi akumulator AP1000 dimodelkan dengan menggunakan data kegagalan komponen sejenis dari sistem PLTN lain.

TEORI HIMPUNAN DAN BILANGAN FUZZY

Teori himpunan *fuzzy* [25] telah diperkenalkan sebagai pelengkap dari teori keandalan konvensional pada tahun 1989 [26]. Semenjak itu, metode analisis keandalan sistem dengan pendekatan *fuzzy* telah berkembang dengan pesat. Pada bagian ini dijelaskan konsep dasar dari teori himpunan dan bilangan *fuzzy* untuk membantu pemahaman metode analisis pohon kegagalan dengan pendekatan *fuzzy* yang akan digunakan dalam mengevaluasi probabilitas kegagalan sistem injeksi akumulator AP1000.

Himpunan Fuzzy

Himpunan *fuzzy* adalah sebuah himpunan yang setiap anggotanya dapat memiliki derajat keanggotaan pada interval $[0,1]$ [19]. Derajat keanggotaan ini didefinisikan dengan menggunakan fungsi keanggotaan (*membership function*). Jika X adalah sebuah himpunan semesta dengan x sebagai anggotanya maka derajat keanggotaan x di dalam himpunan *fuzzy* A dari himpunan semesta X dapat ditentukan dengan menggunakan fungsi keanggotaan $\mu_A(x)$ seperti ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]; A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}; x \mapsto \mu_A(x) \in [0,1] \quad (1)$$

Bila nilai fungsi keanggotaan $\mu_A(x)$ semakin dekat ke 1 maka semakin kuatlah derajat keanggotaan x di dalam himpunan *fuzzy* A . Sebaliknya, semakin dekat nilai fungsi keanggotaan $\mu_A(x)$ ke 0 maka semakin lemahlah derajat keanggotaan x di dalam himpunan *fuzzy* A tersebut.

Bilangan Fuzzy

Bilangan *fuzzy* adalah salah satu jenis himpunan *fuzzy* yang fungsi keanggotaannya sudah dinormalisasi. Fungsi keanggotaan bilangan *fuzzy* \tilde{A} dapat dinotasikan dengan $\mu_{\tilde{A}}(x)$ dan memiliki karakteristik sebagai berikut [27]:

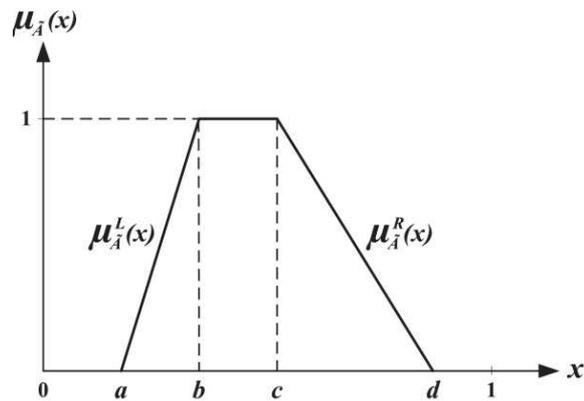
- (a) $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0$, untuk $x \in (-\infty, a]$;
- (b) $\mu_{\tilde{A}}(x)$ naik secara linier pada interval $[a, b]$;
- (c) $\mu_{\tilde{A}}(x) = 1$, untuk $x \in [b, c]$;
- (d) $\mu_{\tilde{A}}(x)$ turun secara linier pada interval $[c, d]$;
- (e) $\mu_{\tilde{A}}(x) = 0$, untuk $x \in [d, \infty)$,

dimana a, b, c , dan d adalah bilangan real yang memenuhi $a \leq b \leq c \leq d$. Sementara itu, fungsi keanggotaan bilangan *fuzzy* \tilde{A} dapat dituliskan seperti persamaan (2) berikut ini.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \mu_{\tilde{A}}^L(x), & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \mu_{\tilde{A}}^R(x), & c \leq x \leq d \\ 0, & \text{sebaliknya} \end{cases} \quad (2)$$

dimana $\mu_{\tilde{A}}^L(x): [a, b] \rightarrow [0,1]$ dan $\mu_{\tilde{A}}^R(x): [c, d] \rightarrow [0,1]$.

Markowski and Mannan [28] telah mengidentifikasi bahwa kurva bilangan *fuzzy* dapat berbeda untuk aplikasi yang berbeda. Pemilihan kurva ini sangat dipengaruhi oleh jenis permasalahan yang dimiliki. Sementara itu, Ferdous et al. [29] sudah membuktikan bahwa bilangan *fuzzy* trapezoidal seperti ditunjukkan pada Gambar 1 sangat cocok digunakan untuk merepresentasikan ketidakpastian dalam analisis keandalan. Bilangan *fuzzy* trapezoidal dapat dinotasikan secara sederhana dengan $\tilde{A} = (a, b, c, d)$. Apabila $b = c$, maka bilangan *fuzzy* trapezoidal berubah menjadi bilangan *fuzzy* triangular dan dapat dinotasikan secara sederhana dengan $\tilde{A} = (a, b, d)$. Sementara itu, fungsi keanggotaan $\mu_{\tilde{A}}^L(x)$ dan $\mu_{\tilde{A}}^R(x)$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3) dan (4).



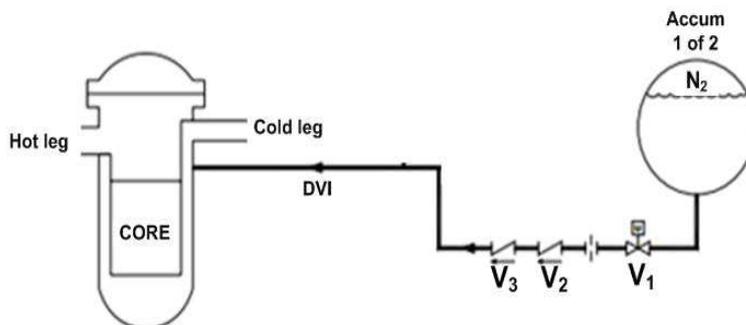
Gambar 1. Bilangan fuzzy trapezoidal.

$$\mu_{\bar{A}}^L(x) = \frac{x - a}{b - a} \quad (3)$$

$$\mu_{\bar{A}}^R(x) = \frac{d - x}{d - c} \quad (4)$$

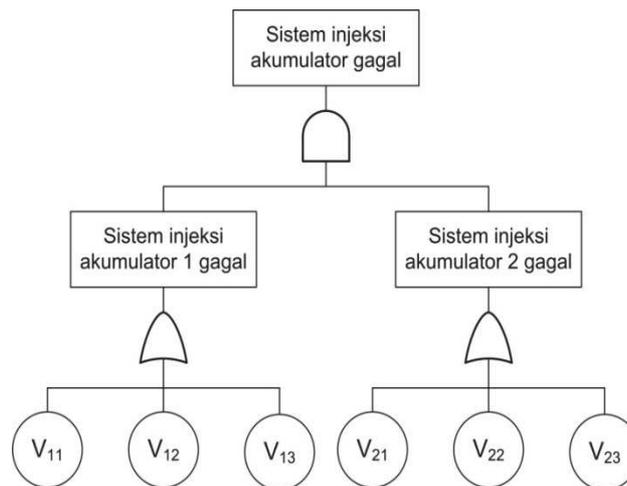
SISTEM INJEKSI AKUMULATOR AP1000

Sistem injeksi akumulator AP1000 berfungsi untuk mengalirkan pendingin kedalam teras reaktor ketika terjadi kecelakaan pipa pecah ukuran besar (*large loss of coolant accident, LOCA*). Akumulator diisi dengan air boron (*borated water*) dan diset pada tekanan 700 psig (4,83 MPa) dengan menggunakan gas nitrogen. AP1000 memiliki dua buah sistem injeksi akumulator dan masing-masing sistem terhubung dengan pipa injeksi bejana langsung (*direct vessel injection line, DVI*). Pada kondisi operasi normal, akumulator diisolasi dari sistem primer dengan menggunakan dua buah *check valve* yang terhubung secara serial. Ketika tekanan sistem primer berada di bawah tekanan akumulator maka kedua *check valve* ini akan membuka sehingga air boron yang ada di dalam tangki akumulator akan terdorong oleh tekanan gas nitrogen menuju sistem primer. Selain itu, sebuah motor *operated valve* juga ditambahkan ke dalam perpipaan sistem injeksi akumulator. Sistem injeksi akumulator AP1000 secara skematik ditunjukkan pada Gambar 2 [30].



Gambar 2. Skematik sistem injeksi akumulator AP1000.

Apabila diasumsikan bahwa jaringan perpipaan dari sistem injeksi dan tangki akumulator tidak ada yang bermasalah, maka pohon kegagalan sistem injeksi akumulator dapat dimodelkan seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Pohon kegagalan sistem injeksi akumulator AP1000.

Nilai tengah dan faktor kesalahan serta mode kegagalan semua kejadian dasar dari pohon kegagalan pada Gambar 3 yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Data kegagalan komponen ini telah dipakai oleh Guimareas et al. [22] untuk menganalisis kecelakaan kehilangan pendingin reaktor daya AP1000 oleh karena pecahnya pipa berukuran besar.

Tabel 1. Data kegagalan kejadian dasar pohon kegagalan sistem injeksi akumulator AP1000.

Kejadian dasar	Mode kegagalan	Nilai titik tengah	Faktor kesalahan
V_{11}, V_{21}	Motor operated valve gagal untuk tetap membuka	7,59E-6	10
$V_{12}, V_{13}, V_{22}, V_{23}$	Check valve gagal membuka	1,11E-5	10

ANALISIS POHON KEGAGALAN DENGAN PENDEKATAN FUZZY

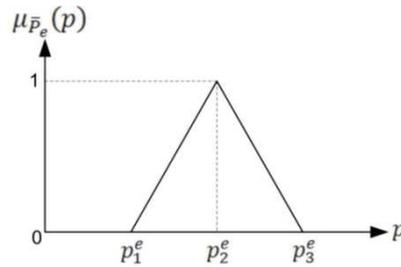
Analisis pohon kegagalan dengan pendekatan *fuzzy* menggunakan probabilitas *fuzzy* untuk menggambarkan probabilitas kejadian dasar, antara serta puncak dan hukum kombinasi *fuzzy* untuk mengevaluasi ketidakpastian. Pada bagian ini dijelaskan bagaimana cara memodelkan probabilitas *fuzzy* dan mengkuantifikasi ketidakpastian pohon kegagalan dengan hukum kombinasi *fuzzy*.

Pemodelan Probabilitas Fuzzy

Probabilitas *fuzzy* untuk menggambarkan probabilitas kejadian dasar pada makalah ini dimodelkan dengan menggunakan bilangan *fuzzy* triangular. Sementara itu, parameter-parameter bilangan *fuzzy* triangular ini ditentukan dengan menggunakan nilai titik tengah (*point median value*) dan faktor kesalahan (*error factor*) dari data kegagalan komponen sejenis yang tersedia.

Jika kebolehdijadian *fuzzy* dari kejadian dasar e dinotasikan seperti persamaan (5) dan secara grafis digambarkan pada Gambar 4,

$$\mu_{\bar{p}_e}(p) \triangleq (p_1^e, p_2^e, p_3^e) \tag{5}$$



Gambar 4. Probabilitas fuzzy kejadian dasar e.

maka nilai batas bawah (p_1^e), nilai tengah (p_2^e) dan nilai batas atas (p_3^e) dari kebolehjadian fuzzy kejadian dasar e dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (6-8) [31].

$$p_1^e = \frac{pmv}{ef} \quad (6)$$

$$p_2^e = pmv \quad (7)$$

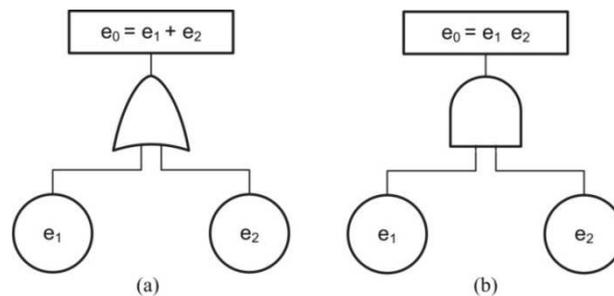
$$p_3^e = pmv \times ef \quad (8)$$

pmv adalah nilai titik tengah dan ef adalah faktor kesalahan dari kejadian dasar e.

Kuantifikasi Ketidakpastian Analisis Pohon Kegagalan

Hukum kombinasi fuzzy pada makalah ini dipakai untuk mengkuantifikasi pohon kegagalan sehingga ketidakpastian yang direpresentasikan dalam probabilitas fuzzy kejadian dasar pada persamaan (5) dapat dipropagasi sampai ke perhitungan probabilitas fuzzy kejadian puncak. Ada dua hukum kombinasi fuzzy yang diimplementasikan dalam analisis pohon kegagalan dengan pendekatan fuzzy ini yaitu hukum komplementasi fuzzy (*fuzzy complementation rule*) dan hukum multiplikasi fuzzy (*fuzzy multiplication rule*) [31].

Hukum komplementasi fuzzy dipakai untuk menghitung keluaran dari dua atau lebih kejadian dasar yang dihubungkan dengan menggunakan gerbang Boolean OR seperti ditunjukkan pada Gambar 5(a). Sementara itu, hukum multiplikasi fuzzy dipakai untuk menghitung keluaran dari dua atau lebih kejadian dasar yang dihubungkan dengan menggunakan gerbang Boolean AND seperti ditunjukkan pada Gambar 5(b).



Gambar 5. Gerbang Boolean pada pohon kegagalan.

Apabila probabilitas fuzzy dari kejadian dasar e_1 dan e_2 pada Gambar 5 dituliskan seperti pada persamaan (9) dan (10)

$$\mu_{P_{e_1}}(p) \triangleq (p_1^{e_1}, p_2^{e_1}, p_3^{e_1}) \quad (9)$$

$$\mu_{P_{e_2}}(p) \triangleq (p_1^{e_2}, p_2^{e_2}, p_3^{e_2}) \quad (10)$$

maka probabilitas fuzzy dari kejadian puncak e_0 pada Gambar 5(a) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (11). Sementara itu, probabilitas fuzzy dari kejadian puncak e_0 pada Gambar 5(b) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (12).

$$\mu_{P_{e_0}}(p) = \mu_{P_{e_1}}(p) + \mu_{P_{e_2}}(p) \quad (11)$$

$$= 1 - \{(1 - p_3^{e_1}, 1 - p_2^{e_1}, 1 - p_1^{e_1})(1 - p_3^{e_2}, 1 - p_2^{e_2}, 1 - p_1^{e_2})\}$$

$$\mu_{P_{e_0}}(p) = \mu_{P_{e_1}}(p) \times \mu_{P_{e_2}}(p) = (p_1^{e_1} \times p_1^{e_2}, p_2^{e_1} \times p_2^{e_2}, p_3^{e_1} \times p_3^{e_2}) \quad (12)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan memasukkan nilai titik tengah dan faktor kesalahan pada Tabel 1 ke dalam persamaan (6-8) maka nilai batas bawah, nilai tengah dan nilai batas atas dari probabilitas *fuzzy* untuk kejadian dasar V_{11} dapat ditentukan seperti berikut ini.

$$p_1^{V_{11}} = \frac{7,59E-6}{10} = 7,59E-7$$

$$p_2^{V_{11}} = 7,59E-6$$

$$p_1^{V_{11}} = 7,59E-6 \times 10 = 7,59E-5$$

Dari hasil perhitungan di atas maka probabilitas *fuzzy* kejadian dasar V_{11} dapat dinotasikan secara sederhana dengan menggunakan persamaan (9 -10) seperti berikut ini.

$$\mu_{\bar{P}_{V_{11}}}(p) \triangleq (7,59E-7, 7,59E-6, 7,59E-5)$$

Sehingga rentang ketidakpastian probabilitas gagalnya kejadian dasar motor operated valve untuk tetap membuka adalah berada pada interval $7,59E-7 - 7,59E-5$ dengan nilai tengah $7,59E-6$. Sementara itu, probabilitas *fuzzy* untuk kejadian dasar yang lain pada Tabel 2 juga diperoleh dengan menggunakan proses perhitungan yang sama.

Tabel 2. Probabilitas *fuzzy* kejadian dasar pada Gambar 5.

Kejadian dasar	Probabilitas <i>fuzzy</i>
V_{11}	(7,59E-7, 7,59E-6, 7,59E-5)
V_{12}	(1,11E-6, 1,11E-5, 1,11E-4)
V_{13}	(1,11E-6, 1,11E-5, 1,11E-4)
V_{21}	(7,59E-7, 7,59E-6, 7,59E-5)
V_{22}	(1,11E-6, 1,11E-5, 1,11E-4)
V_{23}	(1,11E-6, 1,11E-5, 1,11E-4)

Selanjutnya, dengan memasukkan probabilitas *fuzzy* kejadian dasar V_{11} , V_{12} dan V_{13} pada Tabel 2 ke dalam persamaan (11), maka probabilitas *fuzzy* yang menggambarkan kegagalan sistem injeksi akumulator yang pertama pada Gambar 3 dapat dihitung seperti berikut ini.

$$\mu_{\bar{P}_{Acc 1}}(p) = 1 - \{(1-7,59E-5, 1-7,59E-6, 1-7,59E-7)(1-1,11E-4, 1-1,11E-5, 1-1,11E-6)(1-1,11E-4, 1-1,11E-5, 1-1,11E-6)\}$$

$$\mu_{\bar{P}_{Acc 1}}(p) = 1 - (0,999702129, 0,999970210, 0,999997021) = (2,98E-6, 2,98E-5, 2,98E-4)$$

$$\mu_{\bar{P}_{Acc 1}}(p) \triangleq (2,98E-6, 2,98E-5, 2,98E-4)$$

Dengan demikian, rentang ketidakpastian probabilitas gagalnya sistem injeksi akumulator yang pertama adalah berada pada interval $2,98E-6 - 2,98E-4$ dengan nilai tengah $2,98E-5$. Melalui proses perhitungan yang sama tetapi menggunakan probabilitas *fuzzy* kejadian dasar V_{21} , V_{22} dan V_{23} pada Tabel 2 maka probabilitas *fuzzy* untuk kegagalan sistem injeksi akumulator yang kedua adalah seperti berikut ini.

$$\mu_{\bar{P}_{Acc 2}}(p) \triangleq (2,98E-6, 2,98E-5, 2,98E-4)$$

Sementara itu, probabilitas gagalnya sistem injeksi akumulator AP1000 dalam menginjeksi air boron ke dalam sistem primer ketika terjadi kehilangan pendingin karena pecahnya pipa berukuran besar dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (12). Apabila probabilitas *fuzzy* kegagalan sistem injeksi akumulator yang pertama dan kedua dimasukkan ke dalam persamaan (12) maka probabilitas *fuzzy* gagalnya sistem injeksi akumulator AP1000 adalah sebagai berikut:

$$\mu_{\bar{P}_{Acc}}(p) = \mu_{\bar{P}_{Acc 1}}(p) \times \mu_{\bar{P}_{Acc 2}}(p) = (2,98E-6 \times 2,98E-6, 2,98E-5 \times 2,98E-5, 2,98E-4 \times 2,98E-4)$$

$$\mu_{\bar{P}_{Acc}}(p) = (8,87E-12, 8,87E-10, 8,87E-8)$$

Probabilitas fuzzy $\mu_{F_{Acc}}(p)$ di atas menunjukkan bahwa rentang ketidakpastian probabilitas gagalnya sistem injeksi akumulator AP1000 dalam menginjeksi air boron ke dalam sistem primer ketika terjadi kehilangan pendingin karena pecahnya pipa berukuran besar adalah pada interval $8,87E-12 - 8,87E-8$ dengan nilai tengah sebesar $8,87E-10$. Dengan demikian, faktor kesalahan perhitungan kebolehhjadian gagalnya sistem ini adalah:

$$ef = \frac{8,87E-10}{8,87E-12} = \frac{8,87E-8}{8,87E-10} = 100$$

Angka faktor kesalahan ini telah mengkonfirmasi bahwa ketidakpastian yang direpresentasikan oleh probabilitas fuzzy kejadian dasar telah dapat dipropagasi sampai ke perhitungan probabilitas fuzzy terjadinya kejadian puncak. Sebagai komparasi, apabila nilai tengah kegagalan komponen pada Tabel 1 diasumsikan sebagai *best estimate value* dari probabilitas gagalnya komponen tersebut maka dengan menggunakan analisis pohon kegagalan konvensional akan diperoleh probabilitas kegagalan sistem injeksi akumulator AP1000 sebesar $8,87E-10$. Ternyata nilai *best estimate value* ini sama dengan nilai titik tengah yang dihitung dengan menggunakan metode analisis pohon kegagalan yang baru dikembangkan ini. Namun metode baru ini memberikan satu keunggulan dari metode konvensional yaitu perhitungan besarnya ketidakpastian hasil analisis sudah ikut diperoleh. Sementara itu, metode konvensional memerlukan simulasi Monte Carlo yang sangat kompleks untuk mengevaluasi ketidakpastian ini.

Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa analisis pohon kegagalan dengan pendekatan fuzzy yang dikembangkan pada penelitian ini sangat cocok dipakai untuk memodelkan ketidakpastian karena probabilitas kejadian dasar dievaluasi dengan menggunakan data kegagalan komponen yang terbatas. Selain itu, ketidakpastian yang direpresentasikan di dalam probabilitas fuzzy ini juga dapat dipropagasi sampai ke perhitungan probabilitas fuzzy terjadinya kejadian puncak. Hasil evaluasi ini juga mengkonfirmasi bahwa apabila ketidakpastian dari analisis pohon kegagalan yang menjadi fokus utama evaluasi maka metode yang dikembangkan ini sangat tepat untuk digunakan. Sehingga kompleksitas perhitungan simulasi Monte Carlo yang membutuhkan data kegagalan komponen yang banyak dapat dihindari. Namun perlu dicatat bahwa apabila data kegagalan komponen yang dimiliki cukup untuk melakukan analisis pohon kegagalan konvensional dan simulasi Monte Carlo maka sebaiknya metode konvensional ini yang digunakan karena dapat dipastikan bahwa hasilnya akan lebih menggambarkan kondisi nyata dari sistem yang sedang dievaluasi.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dikembangkan metode analisis ketidakpastian untuk analisis pohon kegagalan dengan pendekatan fuzzy. Dua hal penting yang diintegrasikan ke dalam analisis pohon kegagalan konvensional adalah (1) probabilitas fuzzy untuk menggambarkan probabilitas kejadian dasar, antara dan puncak dan (2) hukum kombinasi fuzzy untuk mengevaluasi ketidakpastian analisis pohon kegagalan. Hasil perhitungan probabilitas gagalnya sistem injeksi akumulator AP1000 dalam menginjeksi air boron ke dalam sistem primer ketika terjadi kehilangan pendingin karena pecahnya pipa berukuran besar dengan menggunakan metode baru ini adalah pada interval $8,87E-12 - 8,87E-8$ dengan nilai tengah $8,87E-10$ dan faktor kesalahan 100. Hasil ini membuktikan bahwa analisis pohon kegagalan dengan pendekatan fuzzy ini layak dipakai sebagai pelengkap analisis pohon kegagalan konvensional jika probabilitas kejadian dasar direpresentasikan dengan probabilitas fuzzy dan fokus analisis adalah ketidakpastian. Apabila data kegagalan komponen yang diperlukan memang sudah tersedia maka sebaiknya analisis pohon kegagalan konvensional dan simulasi Monte Carlo yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Abouelnaga AE, Metwally A, Aly N, Nagy M, Agamy S. Assessment the safety performance of nuclear power plants using Global Safety Index (GSI). *Nucl Eng Des.* 2010; 240(10): 2820-30.
2. Rahim FC, Rahgoshay M, Mousavian SK. A study of large break LOCA in the AP1000 reactor containment. *Prog Nucl Energy.* 2012; 54(1): 132-7.
3. Wang S, Wahab MIM, Fang L. Managing construction risks of AP1000 nuclear power plants in China. *Journal of System Science and System Engineering.* 2011; 20(1): 43-69.
4. Zhou S, Zhang X. Nuclear energy development in China: A study of opportunities and challenges. *Energy.* 2010; 35(11): 4282-8.
5. Zhou Y, Rengifo C, Chen P, Hinze J. Is China ready for its nuclear expansion? *Energy Policy.* 2011; 39(2): 771-81.
6. Lioce D, Asztalos M, Alemberti A, Barucca L, Frogheri M, Saiu G. AP1000 passive core cooling system pre-operational tests procedure definition and simulation by means of Relap5 Mod. 3.3 computer code. *Nucl Eng Des.* 2012; 250: 538-47.
7. Nayak AK, Sinha RK. Role of passive systems in advanced reactors. *Prog Nucl Energy.* 2007; 49(6): 486-98.
8. Birolini A. Basic Concepts, Quality and Reliability Assurance of Complex Equipment and Systems. *Reliability Engineering Theory and Practice.* Fifth ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2007. p. 1-24.
9. Booker JM, McNamara LA. Expert Knowledge in Reliability Characterization: A Rigorous Approach to Eliciting, Documenting, and Analyzing Expert Knowledge. In: Nikolaidis E, Ghiocel DM, Singhal S, editors. *Engineering Design Reliability Handbook: CRC Press LLC;* 2005. p. 255-86.
10. Hsu F, Musicki Z. Issues and Insights of PRA Methodology in Nuclear and Space Applications. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics.* 2005. p. 510-7.
11. Abdelgawad M, Fayek AR, Martinez F, editors. Quantitative assessment of horizontal directional drilling project risk using fuzzy fault tree analysis *Construction Research Congress 2010: Innovation for Reshaping Construction Practice: American Society of Civil Engineers.*
12. Song H, Zhang HY, Chan CW. 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.* 2009; 13(1): 31-40.
13. Chin KS, Wang YM, Poon GKK, Yang JB. Failure Mode and Effects Analysis Using a Group-Based Evidential Reasoning Approach. *Comput Oper Res.* 2009; 36(6): 1768-79.
14. Flage R, Baraldi P, Zio E, Aven T. Probability and possibility-based representations of uncertainty in fault tree analysis. *Risk Anal.* 2013; 33(1): 121-33.
15. Rao KD, Kushwaha HS, Verma AK, Srividya A. Quantification of epistemic and aleatory uncertainties in level-1 probabilistic safety assessment studies. *Reliab Eng Syst Saf.* 2007; 92(7): 947-56.
16. Dubois D, Prade H. Gradualness, uncertainty and bipolarity: Making sense of fuzzy sets. *Fuzzy Sets Syst.* 2012; 192: 3-24.
17. Haag T, Herrmann J, Hanss M. Identification procedure for epistemic uncertainties using inverse fuzzyarithmetic. *Mech Syst Signal Pr.* 2010; 24: 2021-34.
18. Sakalli US, Baykoç OF. An application of investment decision with random fuzzy outcomes. *Expert Syst Appl.* 2010; 37: 3405-14.

19. Chou WC, Cheng YP. A hybrid fuzzy MCDM approach for evaluating website quality of professional accounting firms. *Expert Syst Appl.* 2012; 39: 2783-93.
20. Purba JH, Sony Tjahyani DT. Reliability study of the AP1000 passive safety system by fuzzy approach. *Atom Indonesia (under review)*. 2013.
21. Guimaraes ACF, Lapa CMF, de Lourdes Moreira M. Fuzzy methodology applied to Probabilistic Safety Assessment for digital system in nuclear power plants. *Nucl Eng Des.* 2011; 241(9): 3967-76.
22. Guimaraes ACF, Lapa CMF, Filho FFLS, Cabral DC. Fuzzy uncertainty modeling applied to AP1000 nuclear power plant LOCA. *Ann Nucl Energy.* 2011; 38(8): 1775-86.
23. Purba JH, Lu J, Zhang G, Pedrycz W. A fuzzy reliability assessment of basic events of fault trees through qualitative data processing. *Fuzzy Sets Syst. (Available online 18 June 2013)*. 2013.
24. Purba JH. A fuzzy-based reliability approach to evaluate basic events of fault tree analysis for nuclear power plant probabilistic safety assessment. *Ann Nucl Energy (under review)*. 2013.
25. Zadeh LA. *Fuzzy Sets. Inform Control.* 1965; 8: 338-53.
26. Onisawa T. Fuzzy theory in reliability analysis. *Fuzzy Sets Syst.* 1989; 30(3): 361-3.
27. Wang YM, Yang JB, Xu DL, Chin KS. On the centroids of fuzzy numbers. *Fuzzy Sets Syst.* 2006; 157(7): 919-26.
28. Markowski AS, Mannan MS. Fuzzy Risk Matrix. *J Hazard Mater.* 2008; 159(1): 152-7.
29. Ferdous R, Khan F, Sadiq R, Amyotte P, Veitch B. Fault and Event Tree Analyses for Process Systems Risk Analysis: Uncertainty Handling Formulations. *Risk Anal.* 2011; 31(1): 86-107.
30. Yang J, Wang WW, Qiu SZ, Tian WX, Su GH, Wu YW. Simulation and analysis on 10-in. cold leg small break LOCA for AP1000. *Ann Nucl Energy.* 2012; 46: 81-9.
31. Purba JH. Fuzzy probability on reliability study of nuclear power plant probabilistic safety assessment: A review. *Prog Nucl Energy (under review)*. 2013.