

## **PERHITUNGAN ESTIMASI TERBAIK DALAM ANALISIS KESELAMATAN REAKTOR DAYA**

**BUDI ROHMAN, YUDI PRAMONO**

*Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir  
Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN)  
Jl. Gajah Mada No. 8 Jakarta 10120*

### ***Abstrak***

*Dalam analisis keselamatan reaktor daya, terdapat kecenderungan yang makin meningkat untuk menerapkan pendekatan estimasi terbaik. Metode ini dikembangkan untuk menutupi kekurangan-kekurangan yang ada pada pendekatan konservatif yang sudah digunakan sejak awal pengembangan reaktor daya. Penerapan analisis metode estimasi terbaik harus disertai dengan analisis sensitivitas dan ketidakpastian. Analisis sensitivitas dimaksudkan untuk menentukan pengaruh fenomena fisis dan/atau variabel input program komputer pada hasil analisis secara keseluruhan. Selain itu, juga harus dilakukan analisis ketidakpastian yang dimaksudkan untuk memperkirakan ketidakpastian dan batas kesalahan pada parameter yang penting bagi keselamatan. Analisis keselamatan estimasi terbaik dapat memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap kondisi reaktor serta margin keselamatannya, serta memungkinkan dihilangkannya konservatisme yang tidak perlu sehingga memungkinkan Badan Pengawas dan Pengusaha Instalasi menetapkan kriteria penerimaan dengan rentang yang lebih luas serta lebih konsisten.*

*Kata kunci: reaktor daya, analisis keselamatan, pendekatan estimasi terbaik, pendekatan konservatif, kriteria penerimaan, margin keselamatan, analisis sensitivitas, analisis ketidakpastian*

### ***Abstract***

*In the safety analysis of nuclear power reactors, there is increasing tendency lately in the application of best estimate approach. This method is developed to overcome some weaknesses found in the conservative approach applied since early the development of nuclear power plants. The application of best estimate method requires to incorporate sensitivity and uncertainty analyses. Sensitivity analysis is intended to determine the effects of physical phenomena and/or code input variables to the overall results of safety analysis. In addition, best estimate approach requires to incorporate uncertainty analysis intended to estimate the uncertainties and error limits to the parameters important to safety. Best estimate method provides a more realistic depiction of the plants' condition as well as the safety margins, and avoids unnecessary conservativeness in safety analysis to enable Regulatory Body and Operating Organization to establish a wider range and more consistent acceptance criteria.*

*Keywords: nuclear power plant, safety analysis, best estimate method, conservative method, acceptance criteria, safety margin, sensitivity analysis, uncertainty analysis*

### **PENDAHULUAN**

Guna memenuhi kebutuhan energi listrik yang terus meningkat dari waktu ke waktu, saat ini Indonesia merencanakan untuk membangun reaktor daya. Dalam pengoperasian reaktor, aspek terpenting yang harus dipenuhi adalah terjaminnya keselamatan dan kesehatan bagi

pekerja instalasi dan anggota masyarakat serta lingkungan hidup. Agar terdapat keyakinan bahwa reaktor dioperasikan dengan selamat, perlu dilakukan pengawasan secara memadai. BAPETEN merupakan lembaga yang berkewajiban untuk melaksanakan pengawasan pemanfaatan tenaga nuklir, yang dilakukan melalui peraturan, perizinan, dan inspeksi

sebagaimana diamanatkan di dalam Pasal 14 Undang-Undang No. 10/1997 tentang Ketenaganukliran<sup>[1]</sup>.

Salah satu implementasi pengawasan reaktor daya adalah dalam aspek perizinan. Peraturan Pemerintah RI No. 43/2006 mengatur bahwa agar memperoleh izin konstruksi, pemohon wajib mengajukan permohonan kepada BAPETEN<sup>[2]</sup>. Dalam pengajuan tersebut dipersyaratkan untuk melampirkan berbagai dokumen, di antaranya adalah laporan analisis keselamatan (LAK) pendahuluan. Terhadap LAK tersebut BAPETEN akan melakukan review atau penilaian. Berdasarkan penilaian tersebut, dalam hal dokumen tersebut memenuhi persyaratan teknis, Kepala BAPETEN menerbitkan izin yang konstruksi.

Prosedur yang serupa juga berlaku untuk memperoleh izin operasi dan izin operasi gabungan serta perpanjangannya. Guna memperoleh izin operasi pemohon wajib mengajukan permohonan kepada BAPETEN dengan melampirkan berbagai dokumen, salah satunya adalah LAK akhir yang akan dinilai oleh BAPETEN sebagai dasar penerbitan izin operasi.

### ANALISIS KESELAMATAN

Kajian atau analisis keselamatan merupakan proses yang sistematis yang dilakukan selama proses desain untuk menjamin agar semua persyaratan keselamatan dipenuhi oleh desain instalasi yang akan dibangun<sup>[3]</sup>. Desain dan analisis keselamatan ini merupakan proses yang bersifat iteratif sampai desain instalasi memenuhi semua persyaratan keselamatan. Sampai saat ini terdapat dua metode pendekatan utama dalam melakukan analisis keselamatan pada reaktor daya, yakni metode konservatif dan metode estimasi terbaik.

Metode dalam analisis keselamatan yang diterapkan pada awal dikembangkannya reaktor daya adalah dengan metode atau pendekatan konservatif. Dalam penerapan metode konservatif, diambil tingkat konservatisme yang diperlukan, termasuk dalam model fisik serta korelasi yang digunakan. Dalam

pendekatan ini, hal-hal berikut dipertimbangkan<sup>[4]</sup>:

1. Kondisi awal yang meliputi daya reaktor, distribusi daya, tekanan, temperatur, laju alir, dan *burnup* bahan bakar. Kondisi awal ini dipilih sedemikian rupa sehingga memberikan hasil konservatif untuk parameter-parameter yang terkait dengan kriteria penerimaan.
2. Ketersediaan dan berfungsinya sistem dan komponen. Ketersediaan sistem dan komponen untuk transien operasional dan Kecelakaan Dasar Design (*Design Basis Accident/DBA*) lazimnya didasarkan pada kriteria kegagalan tunggal, yang mensyaratkan bahwa sistem keselamatan harus mampu melakukan fungsinya bahkan ketika kegagalan tunggal terjadi di sistem tersebut. Analisis juga memasukkan kegagalan konsekuensial, yakni kegagalan yang timbul sebagai akibat dari kejadian itu sendiri, serta kehilangan daya luar tapak.
3. Tindakan operator, biasanya diasumsikan tidak diambil tepat pada saat yang ditentukan, meskipun kemudian tindakan tersebut diambil dan berhasil.
4. Program komputer dan model. Model dan korelasi menggunakan pendekatan konservatif yang memberikan estimasi respon instalasi yang pesimistis.

Dalam perkembangannya, di samping pendekatan konservatif sebagaimana dijelaskan di atas, saat ini terdapat kecenderungan yang meningkat untuk menerapkan pendekatan estimasi terbaik dalam analisis keselamatan. Analisis estimasi terbaik ini memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap kondisi reaktor. Terdapat beberapa negara yang memperbolehkan pemohon izin untuk menerapkan analisis keselamatan dengan pendekatan estimasi terbaik, di antaranya USA, Belanda, Brazil, Korea, dan Lithuania. Beberapa negara lain juga mulai menerapkan secara signifikan, misalnya Kanada, Cheko, Perancis, Slovakia, Jerman, dan Jepang<sup>[5]</sup>.

Perbedaan umum antara penerapan analisis keselamatan dengan pendekatan estimasi terbaik dan konservatif dapat dilihat di Tabel 1.

Tabel 1. Pendekatan Dalam Analisis Keselamatan<sup>[6]</sup>

Estimasi Terbaik	Konservatif
<p>Program komputer: Bebas dari pesimisme terhadap kriteria penerimaan yang dipilih. Memiliki model yang cukup rinci untuk menghitung proses yang relevan.</p> <p>Analisis: Bebas dari pesimisme terhadap kriteria penerimaan yang dipilih. Menggunakan program komputer estimasi terbaik. Memasukkan Analisis Ketidakpastian.</p>	<p>Program komputer: Memasukkan pesimisme terhadap kriteria penerimaan yang dipilih. Memiliki model yang disederhanakan untuk menghitung proses yang relevan.</p> <p>Analisis: Memasukkan pesimisme terhadap kriteria penerimaan yang dipilih. Menggunakan program komputer konservatif dengan menerapkan kondisi awal dan kondisi batas yang konservatif. Tidak memasukkan ketidakpastian.</p>

### ANALISIS KESELAMATAN ESTIMASI TERBAIK

Dalam implementasi analisis keselamatan pada reaktor daya, dalam dua dekade terakhir ini terdapat kecenderungan yang meningkat untuk menerapkan perhitungan dengan pendekatan estimasi terbaik. Secara legal penerapan dengan metode ini dimulai dengan dikeluarkannya Regulatory Guide 1.157 oleh USNRC yang memperbolehkan pengguna untuk menerapkan perhitungan dengan pendekatan estimasi terbaik untuk perhitungan kinerja *Emergency Core Cooling System (ECCS)*<sup>[7]</sup>.

Analisis estimasi terbaik memberikan gambaran yang lebih realistis akan margin atau batas keselamatan operasi reaktor daya. Dalam analisis ini digunakan program komputer estimasi terbaik, yang lazimnya tidak

memasukkan model yang secara sengaja dirancang konservatif.

Ada berbagai program komputer yang digunakan dalam analisis keselamatan estimasi terbaik, baik yang dikembangkan untuk reaktor jenis tertentu maupun dikembangkan oleh pemasok reaktor. Program komputer untuk analisis termohidrolik bagi reaktor jenis air ringan (BWR dan PWR) misalnya adalah COBRA (perhitungan sub-kanal) dan RELAP (perhitungan seluruh sistem), sedang untuk reaktor air berat adalah CATHENA (untuk sistem reaktor CANDU). Pemasok juga mengembangkan program komputer *proprietary* mereka sendiri, sebagai contoh Westinghouse mengembangkan program komputer untuk analisis keselamatan reaktor PWR rancangannya. Tabel 2 menyajikan program komputer untuk perhitungan termohidrolik yang banyak digunakan dalam perhitungan estimasi terbaik saat ini.

Tabel 2. Program Komputer Termohidrolik yang Banyak Digunakan Dalam Analisis Estimasi Terbaik<sup>[6]</sup>

Jenis Reaktor/Spesifik	Program Komputer
BWR-PWR	ATHLET, CATHARE, RELAP5, TRAC, SCDAP, COBRA, FRAP
CANDU	CATHENA, TUF, RELAP5
Vendor specific	FRAMATOME ANP (d/h SIEMENS/KWU), WESTINGHOUSE, GIDROPRESS

Pendekatan estimasi terbaik memerlukan data eksperimen yang lengkap untuk memperbesar tingkat keyakinan dan juga untuk

menghitung ketidakpastiannya. Untuk kecelakaan dasar desain (DBA) basis data yang demikian sudah cukup lengkap, terutama untuk

reaktor berpendingin air ringan. Untuk kecelakaan di luar kecelakaan dasar desain (*Beyond Design Basis Accident*/BDDBA) basis datanya lebih terbatas meski masih cukup lengkap, khususnya untuk fase awal kecelakaan dalam pemanasan serta pelelehan awal teras serta fase akhir kecelakaan di mana respon dari sungkup adalah penting.

Pendekatan estimasi terbaik untuk menentukan penyimpangan program komputer dan ketidakpastian juga dapat menggunakan perbandingan antara hasil perhitungan dengan program komputer estimasi terbaik dengan data dari instalasi yang beroperasi.

### **ANALISIS SENSITIVITAS DAN KETIDAKPASTIAN**

Penerapan analisis metode estimasi terbaik harus disertai dengan analisis sensitivitas dan ketidakpastian. Yang dimaksud dengan analisis sensitivitas adalah pengujian secara kuantitatif pada perilaku sistem terhadap perubahan, biasanya perubahan dalam nilai-nilai parameter kunci. Analisis sensitivitas ini mencakup pemvariasian variabel input program komputer atau parameter pemodelan untuk menentukan pengaruh fenomena fisis dan/atau variabel input program komputer terhadap hasil analisis secara keseluruhan.

Analisis ketidakpastian adalah analisis untuk memperkirakan ketidakpastian dan batas kesalahan pada besaran yang terkait dengan penyelesaian permasalahan dan hasil dari penyelesaian permasalahan.

### **Komponen Dalam Ketidakpastian**

Ketidakpastian dalam analisis keselamatan meliputi berbagai unsur, antara lain mencakup<sup>[4]</sup>:

1. Ketidakpastian Model. Ketidakpastian dalam model meliputi ketidakpastian dalam perbandingan dengan hasil program komputer baik untuk efek pemisahan maupun pengujian integral, juga ketidakpastian pada pengukuran dalam eksperimennya. Analisis ketidakpastian ditekankan pada parameter-parameter yang

secara langsung dibandingkan dengan kriteria penerimaannya, misalnya temperatur kelongsong maksimum, dosis terhadap masyarakat, dan tekanan maksimum penyungkup.

2. Ketidakpastian Representasi. Adalah akumulasi dari ketidakpastian yang disebabkan oleh adanya penyederhanaan dalam pemodelan instalasi yang sebenarnya. Penyederhanaan ini dapat meliputi penyederhanaan geometri, rentang parameter, dan kondisi setempat. Sebagai contoh, dalam analisis LOCA untuk suatu reaktor biasanya diwakili oleh beberapa kanal saja, bukan teras secara keseluruhan. Analisis sensitivitas untuk kecelakaan LOCA dapat dilakukan dengan memvariasi jumlah kanal yang mewakili teras reaktor, kemudian perubahan pada parameter keselamatan yang penting dicatat.

3. Ketidakpastian Instalasi. Analisis ketidakpastian ini menggunakan variasi parameter instalasi, keadaan instalasi, dan nilai pengesetan sebagai input. Berhubung terdapat ribuan parameter instalasi, maka perlu diidentifikasi parameter sensitif, yakni parameter-parameter yang memberi pengaruh besar terhadap output analisis kecelakaan yang akan dibandingkan dengan kriteria penerimaannya.

### **Kombinasi Ketidakpastian**

Setelah komponen-komponen ketidakpastian individual diidentifikasi, ketidakpastian tersebut perlu digabungkan untuk memperoleh ketidakpastian secara keseluruhan untuk tiap parameter yang dibandingkan dengan kriteria penerimaan.

### **Kontributor terhadap Ketidakpastian**

Dalam rangka validasi program komputer secara kuantitatif, ketidakpastian dari hasil perhitungannya harus dievaluasi. Kontributor utama terhadap ketidakpastian hasil perhitungan tersebut dapat dilihat di Tabel 3.

Tabel 3. Kontributor Pada Ketidakpastian Hasil Perhitungan<sup>[6]</sup>

Kontributor	Cara Kuantifikasi
Terkait dengan program komputer:	
- Alat komputasi dan metode numerik	- Dikuantifikasi secara umum
- Model fisik untuk fenomena terpisah	- Dikuantifikasi melalui hasil SET ( <i>Separate Effects Test</i> )
- Geometri instalasi, yang diwakili dengan serangkaian volume dan struktur yang saling terhubung	- Dikuantifikasi sebagian melalui hasil ITF ( <i>Integral Test Facility</i> )
Terkait dengan data instalasi:	
- Ketidakesesuaian antar dokumen, penyajian parameter instalasi, dan instalasi yang sesungguhnya	- Dikuantifikasi melalui hasil pengecekan on-site dan data desain
- Toleransi parameter instalasi	
Terkait dengan pemakai:	
- Pemodelan instalasi yang tidak memadai dalam <i>input deck</i>	- Dikuantifikasi melalui hasil dari studi sensitivitas dan rekaman transien instalasi atau eksperimen
- Asumsi yang tidak memadai pada <i>Boundary and Initial Conditions</i> (BIC)	- Dikuantifikasi melalui hasil dari studi sensitivitas dan rekaman transien instalasi atau eksperimen
- Jaminan Mutu pada pengekseskuan dan pendokumentasian program komputer.	- Sulit dikuantifikasi

### Metode Dalam Analisis Ketidakpastian

Dalam analisis ketidakpastian, terdapat berbagai macam metode yang diterapkan di berbagai negara/institusi. Metode-metode ini pada dasarnya sama, hanya berbeda dalam

bobot yang di berikan pada unsur eksperimen, analitis, dan justifikasinya. Metode yang dipakai di berbagai institusi dapat dilihat di Tabel 4.

Tabel 4. Metode Dalam Analisis Ketidakpastian<sup>[4]</sup>

Institusi	Program Komputer	Metode
AEA Technology, UK	RELAP5/MOD3.2	Metode AEAT
University of Pisa, Italy	RELAP5/MOD2, cycle 36.04, IBM version, CATHARE 2, version 1.3U, rev. 5	UMAE ( <i>Uncertainty Method based on Accuracy Extrapolation</i> )
Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS), Germany	ATHLET, Mod 1.1, cycle A	Metode GRS
Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (IPSN), France	CATHARE 2, version 1.3U, rev. 5	Metode IPSN
Empresa Nacional del Uranio, SA (ENUSA), Spain	RELAP5/MOD 3.2	Metode ENUSA

## MARGIN KESELAMATAN

Margin keselamatan reaktor adalah perbedaan atau perbandingan dalam besaran fisis antara nilai batas keselamatan yang ditetapkan untuk parameter tertentu dengan nilai parameter yang sesungguhnya di reaktor. Nilai batas ini apabila dilampaui dapat menimbulkan kegagalan pada sistem atau komponen reaktor. Keberadaan margin keselamatan adalah untuk menjamin agar reaktor daya dapat beroperasi dengan selamat dalam semua mode operasi sepanjang masa operasinya<sup>[6]</sup>.

Margin keselamatan yang paling penting adalah yang berkaitan dengan penghalang fisik yang berfungsi untuk menahan pelepasan zat-zat radioaktif, misalnya matriks bahan bakar dan kelongsong bahan bakar. Parameter batas yang diterapkan biasanya adalah DNBR (*Departure from Nucleate Boiling Ratio*), temperatur dan entalpi bahan bakar; temperatur, regangan, dan oksidasi kelongsong; tekanan, tegangan, dan kondisi bahan dinding penahan tekanan pada sistem pendingin reaktor; tekanan dan temperatur sungkup, serta dosis yang diterima oleh masyarakat sekitar.

Dalam banyak hal, baik nilai batas maupun nilai yang sesungguhnya tidak diketahui dengan tepat, sehingga dalam hal yang demikian margin keselamatan tidak dapat dikuantifikasi dengan tepat pula. Dalam prakteknya, margin keselamatan biasanya difahami sebagai perbedaan dalam nilai fisis antara kriteria penerimaan sebagaimana yang ditentukan dalam regulasi dengan nilai parameter reaktor yang berasal dari hasil perhitungan.

### Kriteria Penerimaan

Terminologi kriteria penerimaan untuk keselamatan lazimnya dikaitkan dengan parameter batas yang ditetapkan untuk kecelakaan dasar desain (DBA). Nilai batas atau kriteria ini ditetapkan oleh Badan Pengawas, dan tidak boleh dilampaui dalam DBA. Batas atau kriteria yang ditetapkan oleh Badan Pengawas ini bisa sama atau bersifat lebih restriktif dibandingkan dengan desain instalasi<sup>[6]</sup>.

Kriteria penerimaan biasanya ditetapkan dan berlaku untuk kejadian atau kelompok kejadian tertentu. Sebagai contoh, untuk

LOCA, kriteria penerimaan yang ditetapkan oleh Badan Pengawas dapat meliputi hal-hal berikut<sup>[6, 8]</sup>:

1. Temperatur kelongsong maksimum. Temperatur kelongsong bahan bakar maksimum terhitung tidak boleh melampaui 2200 °F (1200 °C)
2. Oksidasi kelongsong maksimum. Oksidasi kelongsong total terhitung di semua bagian tidak boleh melampaui 17 % dari ketebalan kelongsong sebelum oksidasi.
3. Pembangkitan hidrogen maksimum. Jumlah total hidrogen terhitung yang dibangkitkan dari reaksi kimia antara kelongsong dengan air atau uap air tidak boleh melampaui 1 % dari jumlah hipotetis yang mungkin dibangkitkan apabila seluruh logam silinder kelongsong di sekitar permukaan bahan bakar bereaksi.
4. Geometri terdinginkan. Perubahan pada geometri teras yang diperhitungkan harus sedemikian rupa sehingga teras tetap dapat didinginkan.
5. Pendinginan jangka panjang. Setelah ECCS beroperasi, temperatur teras terhitung harus dipertahankan pada nilai yang cukup rendah dan panas peluruhan harus dibuang selama jangka waktu yang diperlukan oleh radioaktivitas umur panjang yang berada di dalam teras reaktor.

### Metode Dalam Penentuan Margin Keselamatan

Di masa-masa awal pengembangan reaktor daya, analisis keselamatan guna menentukan margin keselamatan dilakukan dengan perhitungan konservatif. Akan tetapi, dalam tahun-tahun terakhir ini terdapat kecenderungan yang meningkat untuk menggantikan perhitungan konservatif dengan perhitungan estimasi terbaik atau realistik dalam analisis keselamatan reaktor.

Analisis keselamatan dengan pendekatan konservatif dimaksudkan untuk menjamin agar respon instalasi yang sesungguhnya terkait dengan suatu kriteria tertentu dapat tercakup di dalam nilai konservatif dari respon tersebut. Sebagai contoh, terkait temperatur maksimum kelongsong (*Peak Cladding Temperature/PCT*), pendekatan konservatif memastikan agar<sup>[4]</sup>:

$$PCT_{\text{konservatif}} > PCT_{\text{sesungguhnya}}$$

Di pihak lain, pendekatan estimasi terbaik ditujukan untuk memastikan agar perilaku instalasi yang diperhitungkan dengan menyertakan nilai ketidakpastiannya telah

$$(PCT_{\text{estimasi terbaik}} - PCT_{\text{ketidakpastian}}) \leq PCT_{\text{sesungguhnya}} \leq (PCT_{\text{estimasi terbaik}} + PCT_{\text{ketidakpastian}})$$

Pendekatan konservatif dapat menggunakan data konservatif atau *bounding data*. Apabila menggunakan data konservatif, diperlukan banyak perhitungan terkait dengan variasi keadaan atau berbagai siklus. Dengan menggunakan *bounding data*, yakni data yang mencakup keseluruhan data konservatif yang mungkin untuk berbagai keadaan instalasi, dapat mengurangi jumlah perhitungan yang diperlukan.

Pendekatan konservatif tidak memberikan indikasi mengenai perbedaan nilai yang sesungguhnya antara respon instalasi yang sebenarnya dengan hasil perhitungan. Sebaliknya, perhitungan ketidakpastian yang dilakukan pada pendekatan estimasi terbaik merupakan ukuran perbedaan itu sendiri. Dengan demikian, pendekatan estimasi terbaik memungkinkan dihilangkannya konservatisme yang tidak perlu dalam analisis sehingga memungkinkan Badan Pengawas dan Pengusaha Instalasi menetapkan kriteria penerimaan dengan rentang yang lebih luas serta lebih konsisten. Pendekatan konservatif tidak memberikan indikasi mengenai perilaku instalasi yang sebenarnya, termasuk fungsinya terhadap waktu, untuk keperluan penyiapan EOP (*Emergency Operating Procedure*) atau untuk digunakan dalam manajemen kecelakaan serta penyiapan petunjuk operasi untuk kondisi abnormal.

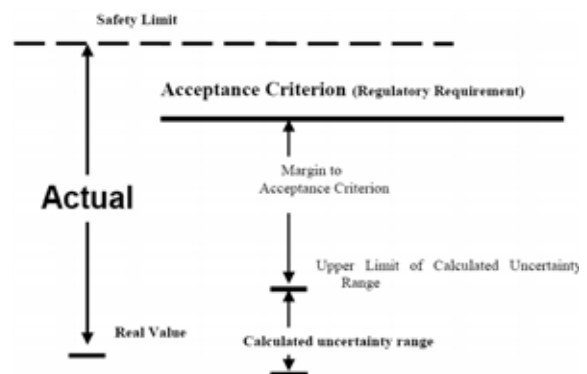
### PENERAPAN PERHITUNGAN ESTIMASI TERBAIK

Perhitungan dengan pendekatan estimasi terbaik diterapkan untuk memperoleh gambaran yang lebih realistis mengenai kondisi keselamatan reaktor. Kondisi keselamatan reaktor ini tercermin dari nilai margin keselamatannya, baik pada operasi normal maupun kondisi kecelakaan.

Penerapan perhitungan estimasi terbaik untuk menentukan margin keselamatan reaktor diilustrasikan pada Gambar 1. Nilai sebenarnya dari suatu parameter yang terkait dengan

mencakup nilai yang sesungguhnya. Terkait dengan temperatur maksimum kelongsong dapat dirumuskan sebagai berikut:

kondisi reaktor, misalnya suatu kecelakaan tertentu, pada umumnya tidak diketahui dengan pasti, sehingga nilai margin keselamatan yang sebenarnya juga tidak diketahui. Dengan menerapkan metode estimasi terbaik, yang memasukkan perhitungan ketidakpastian, diperoleh rentang ketidakpastian pada suatu *confidence level* tertentu (USNRC menerima nilai *confidence level* 95 %<sup>[7]</sup>). Selisih antara kriteria penerimaan dengan nilai batas atas dari rentang ketidakpastian merupakan margin keselamatan estimasi terbaik untuk kondisi yang dimaksud.



Gambar 1. Ilustrasi Penentuan Margin Keselamatan Dengan Pendekatan Estimasi Terbaik

### KESIMPULAN

1. Dalam melakukan analisis keselamatan, saat ini terdapat kecenderungan yang meningkat untuk menerapkan pendekatan estimasi terbaik. Analisis estimasi terbaik memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai kondisi reaktor.
2. Nilai ketidakpastian yang dihitung dalam analisis keselamatan estimasi terbaik dapat memberi gambaran mengenai perbedaan antara respon instalasi yang sebenarnya dengan hasil perhitungan. Ini karena nilai yang sesungguhnya telah masuk di dalam rentang ketidakpastian tersebut.
3. Analisis keselamatan dengan pendekatan estimasi terbaik memungkinkan dihilangkannya konservatisme yang tidak

perlu sehingga memungkinkan Badan Pengawas dan Pengusaha Instalasi menetapkan kriteria penerimaan dengan rentang yang lebih luas serta lebih konsisten.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. "Undang-Undang No. 10/1997 tentang Ketenaganukliran".
2. "Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 43/2006 tentang Perizinan Reaktor Nuklir".
3. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2001, "Safety Assessment and Verification for Nuclear Power Plants, Safety Guide (Safety Standard Series No. NS-G-1.2)", Vienna.
4. International Atomic Energy Agency, 2002, "Accident Analysis for Nuclear Power Plants (Safety Report series No. 23)", Vienna.
5. 2007, "Glaeser, Horst, Evaluation of Licensing Margins of Reactors using Best Estimate Methods including Uncertainty analysis". (presented at IAEA Workshop on Deterministic Safety Analyses). JNES, Tokyo, Japan, September.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2003, "Safety Margins of Operating Reactors: Analysis of Uncertainties and Implications for Decision Making (IAEA-TECDOC-1332)", International Atomic Energy Agency, Vienna.
7. 1989, "Best Estimate Calculations of Emergency Core Cooling System Performance (Regulatory Guide 1.157)", U.S. Nuclear Regulatory Commission, May.
8. "Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems for Light-Water Nuclear Power Reactors (10 CFR Part 50.46)".

#### TANYA JAWAB

##### Pertanyaan

1. Berapa batas margin keselamatan yang terbaik untuk diterapkan pada PLTN? (Akhmad Khusyairi- BAPETEN)
2. Bagaimana cara penerapan analisis sensitivitas dalam pendekatan analisis keselamatan estimasi terbaik? (A.Mukhta-BAPETEN)
3. Seberapa besar tingkat kepastian perhitungan dengan menggunakan komputer

code yang berbeda pada satu kasus yang sama? (A.Mukhta-BAPETEN)

4. Kriteria apa saja yang diperlukan dalam menentukan sensitivitas keselamatan reaktor? (Zaenal Abidin-STTN)
5. Bagaimana peranan pekerja dalam kriteria keselamatan reaktor. Bagaimana cara mengukur kepekaan teknis pekerja? (Zaenal Abidin-STTN)

##### Jawaban

1. Margin keselamatan yang harus diterapkan di PLTN adalah yang nilainya sedemikian rupa sehingga nilai-nilai parameter berikut tidak terlampaui:
  - a. Temperatur kelongsong maksimum.
  - b. Oksidasi kelongsong maksimum
  - c. Pembangkitan hidrogen maksimum
  - d. Tekanan maksimum sistem pendingin
  - e. Tekanan maksimum rangkap
2. Analisis Sensitivitas diterapkan dengan memvariasi variabel input yang memberikan perubahan besar pada output perhitungan sebagai contoh : untuk kecelakaan RIA (Reactivity Insertion Accident) adalah nilai insersi reaktivitas, nilai reactivity feedback, dll
3. Nilai tingkat kepastian/keyakinan (Confidence Level) untuk perhitungan menggunakan computer code untuk pendekatan estimasi terbaik umumnya adalah 95%
4. Kriteria secara umum (kualitatif) pemvariasian terhadap variabel input program komputer dan parameter pemodelan. Sedemikian sehingga pengaruhnya terhadap hasil kondisi secara keseluruhan adalah besar ( signifikan)
5. Pekerja (analisis keselamatan) haruslah yang sudah berpengalaman untuk melakukan analisis keselamatan terkait sehingga memiliki "engineering sense" terhadap hasil perhitungan pengukuran secara kuantitatif belum ada, dasarnya adalah dari track-record analisis yang bersangkutan di dalam suatu institusi