

## **PEMODELAN KEANDALAN SISTEM PENDINGIN PRIMER UNTUK ESTIMASI PROBABILITAS KEJADIAN KEHILANGAN ALIRAN PENDINGIN UNTUK REAKTOR RISET RSG-GAS**

**Deswandri dan Johnny Situmorang**

Bidang Pengembangan Teknologi Keselamatan Nuklir  
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Gedung No. 80, Setu, Tangerang Selatan 15310  
e-mail: [wandri@batan.go.id](mailto:wandri@batan.go.id)

### **ABSTRAK**

**PEMODELAN KEANDALAN SISTEM PENDINGIN PRIMER UNTUK ESTIMASI PROBABILITAS KEJADIAN KEHILANGAN ALIRAN PENDINGIN UNTUK REAKTOR RISET RSG-GAS.** Metoda Probabilistic Safety Assessment (PSA) merupakan metoda standar yang sangat sering dipakai dalam mengevaluasi keselamatan instalasi nuklir seperti reaktor daya dan reaktor riset. Langkah pertama dalam metoda PSA adalah menentukan kejadian pemicu yang dapat memicu sederetan kemungkinan kecelakaan yang mempunyai dampak mulai dari yang paling tidak signifikan sampai kepada yang paling signifikan. Salah satu contoh kejadian pemicu yang krusial dan berpeluang terjadi dalam pengoperasian reaktor riset adalah Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin. Kejadian ini perlu diantisipasi secara baik agar tidak mengarah kepada kecelakaan yang berdampak terhadap keselamatan. Salah satu cara untuk mengantisipasi kejadian ini adalah dengan mengetahui probabilitas dan penyebab utama kejadian. Karena kejadian ini pada dasarnya adalah kegagalan Sistem Pendingin Primer pada saat reaktor sedang beroperasi, untuk mengetahui probabilitas dan penyebab utama kejadian, maka perlu dilakukan pemodelan keandalan untuk sistem tersebut. Dalam makalah ini dilakukan pemodelan keandalan Sistem Pendingin Primer pada reaktor riset RSG-GAS dengan menggunakan Metoda Analisis Pohon Kegagalan. Metoda ini merupakan metoda yang paling luas dipakai untuk menghitung probabilitas dan menginvestigasi komponen kritis penyebab kegagalan sistem. Dari hasil analisis diperoleh nilai probabilitas kejadian sebesar  $5,57E-4$ . Kejadian dasar Sumber Daya Listrik Trip dan Penyumbatan Pada Saluran Penukar Panas merupakan penyebab potensial kejadian.

**Kata kunci:** PSA, Kejadian Pemicu, Model Keandalan, Metoda Analisis Pohon Kegagalan, RSG-GAS

### **ABSTRACT**

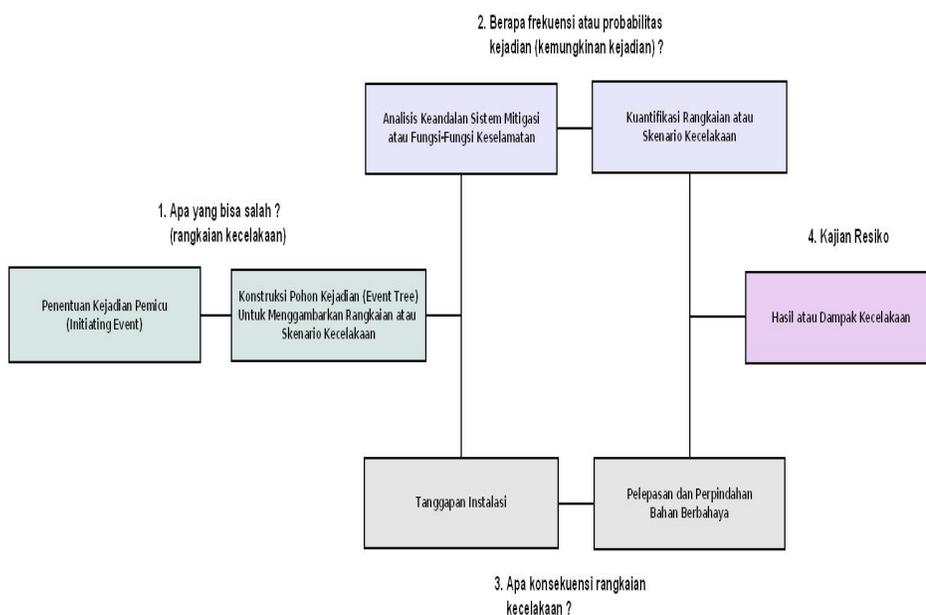
**RELIABILITY MODELING OF PRIMARY COOLING SYSTEM FOR ESTIMATING PROBABILITY OF LOSS OF COOLING FLOW IN RESEARCH REACTOR RSG-GAS.**

*Probabilistic Safety Assessment (PSA) is a standard method which is often used in evaluating the safety of nuclear installations such as power reactors and research reactors. The first step in the PSA is to determine the initiating event that can initiate a series of possible accidents that have effects ranging from the most insignificant to the most significant. One example of an initiating event that is crucial and likely to occur in the operation of research reactors is the loss of coolant flow. This event should be anticipated as well in order not to lead to accidents that have an impact on safety. One way to anticipate this event is to know the probability and the main cause of the incident. Because this event is basically a failure of the Primary Cooling System at the time of the reactor is operating, to determine the probability and the main cause of the incident, it is necessary to perform the system reliability modeling. In this paper, the reliability modeling of the Primary Cooling System in the research reactor RSG-GAS were done by using Fault Tree Analysis Method. This method is the most widespread method used to calculate the probability and investigate the critical components that cause the system failure. From the analysis results, it was get the occurrence probability of the event of  $5.57E-4$ . Basic events of Electric Power Trip and Blockage in the Heat Exchanger channel are the potential cause of the incident.*

**Keywords:** PSA, Initiating Event, Reliability Modeling, Fault Tree Analysis Method, RSG-GAS

## PENDAHULUAN

Metoda Probabilistic Safety Assessment (PSA) merupakan metoda standar untuk mengevaluasi keselamatan instalasi nuklir, khususnya reaktor daya dan reaktor riset. Metoda PSA dapat diklasifikasikan dalam tiga level, yaitu PSA Level 1, PSA Level 2 dan PSA Level 3. PSA level 1 menganalisis skenario kecelakaan beserta probabilitas dan konsekuensinya. PSA level 2 menghitung *source term* (pelepasan radioaktif di dalam dan di luar pengungkung) untuk kecelakaan yang menyebabkan kerusakan bahan bakar (*fuel damage*) atau hal lain yang menyebabkan pelepasan radioaktif, sebagaimana yang teridentifikasi dalam PSA level 1. PSA Level 3 menghitung dispersi radioaktif beserta serapan dosis berikutnya dan kerusakan lingkungan akibat pelepasan radioaktif tersebut<sup>(1)</sup>.



**Gambar 1. Elemen Dasar Dalam Metodologi PSA<sup>(2)</sup>**

Gambar 1 menunjukkan tahapan-tahapan yang harus dikerjakan dalam metoda PSA. Seperti yang terlihat dalam gambar, tahapan pertama yang harus dilakukan adalah penentuan kejadian pemicu. Kejadian pemicu adalah suatu kejadian yang belum tentu terjadi, tetapi diasumsikan dapat terjadi di sepanjang umur instalasi. Kejadian ini dapat memicu sederetan kemungkinan kecelakaan yang mempunyai dampak mulai dari yang paling tidak signifikan sampai kepada yang paling signifikan (*fuel damage*). Kejadian pemicu dapat berupa kejadian tunggal dalam reaktor, kejadian akibat kegagalan suatu komponen atau sistem maupun kejadian lain seperti bencana alam. Daftar kejadian pemicu yang dipostulasikan (*Postulated Initiating Event*; PIE) untuk reaktor riset diberikan dalam IAEA Safety Series No. NS-R-4<sup>(3)</sup>.

Salah satu PIE yang terdaftar dalam dokumen IAEA di atas adalah Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin Primer. PIE ini merupakan salah satu PIE yang sangat krusial dan berpeluang terjadi disepanjang operasi reaktor. Apabila PIE ini tidak ditangani atau dimitigasi dengan baik, rangkaian kecelakaan yang dipicu PIE ini dapat mengarah kepada kecelakaan parah yang menyebabkan kerusakan teras.

Salah satu langkah untuk mengantisipasi PIE Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin adalah dengan mengetahui peluang (probabilitas) dan penyebab utama terjadinya kejadian. Makalah ini bertujuan untuk mengestimasi probabilitas dan menginvestigasi penyebab utama terjadinya PIE tersebut.

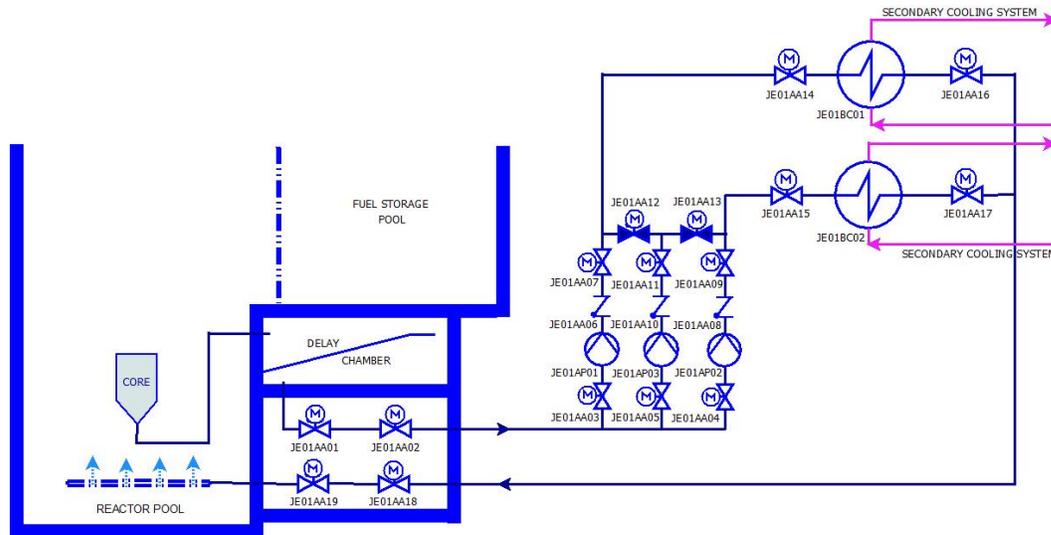
Secara umum, Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin disebabkan oleh kegagalan Sistem Pendingin Primer saat reaktor sedang beroperasi. Dengan demikian, probabilitas terjadinya PIE Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin dapat diestimasi dengan menghitung probabilitas kegagalan Sistem Pendingin Primer pada saat reaktor sedang beroperasi.

Pemodelan keandalan sistem merupakan satu cara untuk menghitung probabilitas kegagalan sistem. Ada berbagai metoda yang dapat dipakai untuk membuat model, Metoda Analisis Pohon Kegagalan (*Fault Tree Analysis*; FTA) merupakan metoda yang paling luas dipakai untuk tujuan tersebut. Metoda FTA merupakan metoda bersifat deduktif dan menggunakan grafik (diagram) untuk menggambarkan model kegagalan sistem. Analisis dimulai dengan pengasumsian kejadian bersifat umum (seperti kegagalan suatu sistem) dan berakhir sampai pada kejadian-kejadian dasar yang menjadi penyebab terjadinya kejadian bersifat umum tersebut. Dalam makalah ini, metoda FTA digunakan sebagai alat untuk membuat model keandalan Sistem Pendingin Primer. Dalam hal ini, objek yang dipilih adalah Sistem Pendingin Primer RSG-GAS. Dari model yang dibuat dapat dihitung nilai probabilitas dan komponen-komponen kritis yang menjadi penyebab utama kegagalan sistem, yang sekaligus juga menjadi penyebab utama terjadinya Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin.

#### **DESKRIPSI SISTEM PENDINGIN PRIMER RSG-GAS<sup>(4)</sup>**

Dengan berlangsungnya reaksi fisi, teras reaktor akan menghasilkan sejumlah panas secara terus-menerus. Agar supaya temperatur dalam teras tetap konstan sesuai dengan temperatur desain, panas ini harus dipindahkan ke lingkungan. Sistem Pendingin Primer berfungsi untuk mengambil panas secara langsung dari dalam teras reaktor dengan cara mengalirkan air bebas mineral ke kisi-kisi bahan bakar dan memindahkannya ke Sistem Pendingin Sekunder melalui komponen Penukar Panas (*Heat Exchanger*).

Komponen-komponen penyusun Sistem Pendingin Primer terdiri dari Pipa *stainless steel*, tiga buah Pompa Sentrifugal, Katup-Katup Dioperasikan Motor dan dua buah Penukar Panas. Pompa berfungsi untuk mendorong aliran air pendingin ke Penukar Panas dalam *loop* tertutup, di mana secara normal dua pompa beroperasi dan satu dalam keadaan siaga. Air pendingin primer mengalir dari bagian atas menuju ke arah bawah, melalui teras dan tangki *Delay Chamber* (untuk menurunkan konsentrasi bahan radioaktif N16).



Gambar 2. Diagram Sistem Pendingin Primer RSG-GAS<sup>(4)</sup>

Katup-katup dalam Sistem Pendingin Primer mempunyai fungsi yang berbeda-beda. Beberapa katup berfungsi sebagai pengatur aliran air pendingin saat sistem bekerja secara normal. Beberapa katup berfungsi untuk mengisolasi air pendingin dalam kolam reaktor ketika sistem sedang tidak bekerja (reaktor padam). Selain itu, beberapa katup berfungsi untuk mengisolasi pompa cadangan, agar aliran air pendingin tidak memasuki pompa cadangan saat sistem bekerja. Beberapa katup juga berfungsi untuk mengisolasi satu kanal pompa pada saat pompa tersebut dalam perawatan.

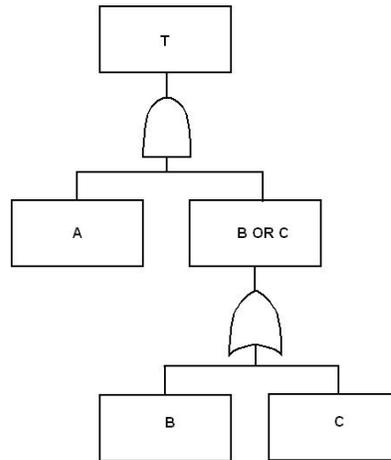
Komponen Penukar Panas berfungsi untuk memindahkan panas dari sistem primer ke sistem sekunder. Ada dua komponen Penukar Panas yang digunakan, masing-masing berkapasitas 50% dan terpasang dalam jalur pemipaan setelah pompa. Komponen Penukar Panas bertipe *multy-pass shell and tube* yang dipasang secara vertikal pada sisi masuk dan keluar air pendingin primer dan sekunder. Air pendingin primer mengalir pada bagian *shell* dan air pendingin sekunder mengalir pada bagian tengah *tube*.

## METODOLOGI

Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin Primer merupakan kejadian yang disebabkan oleh kegagalan Sistem Pendingin Primer ketika reaktor sedang beroperasi. Untuk mengestimasi probabilitas kejadian ini, perlu dilakukan analisis keandalan pada sistem yang menyebabkan kejadian tersebut. Analisis Pohon Kegagalan (*Fault Tree Analysis*; FTA) merupakan metoda yang paling sering digunakan untuk mengevaluasi keandalan dan ketersediaan suatu sistem.

Metoda FTA adalah metoda berbentuk grafik sederhana yang menggambarkan bagaimana sistem bisa mengalami kegagalan. Metoda ini bersifat deduktif dimana analisis dimulai dengan mendefinisikan suatu kejadian bersifat umum (misalnya kegagalan suatu sistem), dilanjutkan ke kejadian perantara yang menyebabkan kejadian umum tersebut. Analisis berlanjut ke kejadian berikutnya yang menjadi penyebab kejadian perantara. Analisis berakhir sampai pada tingkat

kejadian paling mendasar yang tidak dapat dirinci lagi, seperti kejadian kegagalan komponen atau kegagalan manusia.



**Gambar 3. Struktur Grafik Dalam Metoda FTA**

Interaksi antara satu kejadian dengan beberapa kejadian yang menjadi penyebab dalam metoda FTA, terhubung dalam gerbang logik standar, seperti gerbang *OR*, *AND* dan lain-lain. Gerbang *OR* menyatakan satu kejadian dapat terjadi apabila salah satu dari beberapa kejadian penyebab terjadi. Sebaliknya, gerbang *AND* menyatakan bahwa satu kejadian dapat terjadi hanya jika seluruh kejadian penyebab terjadi. Kejadian paling puncak (kejadian paling umum) dalam FTA disebut *top event*, kejadian perantara disebut *intermediate event* dan kejadian yang paling mendasar disebut *basic event*. Gambar 3 memperlihatkan contoh struktur grafik dalam metoda FTA.

Analisis dalam Metoda FTA pada dasarnya dapat dibedakan dalam dua kategori, yaitu analisis kualitatif dan analisis kuantitatif. Analisis kualitatif dilakukan dengan cara mengkonversi gerbang-gerbang logik dalam model pohon kegagalan sistem ke dalam bentuk *cut-set* dengan menggunakan hukum aljabar *Boolean*. *Cut-set* adalah kombinasi sejumlah kejadian dasar yang menyebabkan terjadinya kejadian puncak. *Minimal cut-set* adalah kombinasi terkecil dari kejadian dasar yang menyebabkan terjadinya kejadian puncak. *Minimal cut-set* dapat terdiri dari satu atau lebih kejadian dasar. *Minimal cut-set* yang terdiri dari satu kejadian dasar menunjukkan bahwa kejadian dasar tersebut merupakan kejadian dasar paling kritis dalam sistem, karena kejadian puncak sangat ditentukan oleh kejadian dasar tersebut. Analisis kuantitatif dilakukan untuk menghitung probabilitas kejadian puncak berdasar probabilitas seluruh kejadian dasar.

Untuk model sistem yang sederhana, perhitungan *cut-set* dan probabilitas kejadian puncak dalam FTA dapat dilakukan dengan tangan berdasarkan hukum aljabar *Boolean*. Akan tetapi untuk sistem kompleks yang melibatkan banyak kejadian dasar, perhitungan *cut-set* dengan tangan menjadi sangat sulit dan mustahil dilakukan. Di pasaran tersedia beberapa perangkat lunak komersial yang digunakan untuk melakukan perhitungan *cut-set*, seperti *FaultTree+*, *CAFTA*, *Item ToolKit* dan lain-lain. Dalam makalah ini, *Item ToolKit* digunakan sebagai alat perhitungan.

Persamaan matematis untuk menghitung ketidakterersediaan (*unavailability*) *cut-set*, ketidakterersediaan dan ketidakandalan (*unreliability*) kejadian puncak (sistem) diberikan berturut-turut oleh Persamaan 1, 2 dan 3 <sup>(5)</sup>.

$$Q_{CutSet} = \prod_{i=1}^n Q_i \dots\dots\dots (1)$$

$$Q_{Sys} = \sum_{j=1}^m Q_{CutSet_j} \dots\dots\dots (2)$$

$$F(t) = 1 - e^{-(1-Q(t))} \dots\dots\dots (3)$$

dimana:

- n = jumlah kejadian dalam *cut-set* ;       $Q_i$  = ketidaksediaan kejadian ke i dalam *cut-set*;
- $Q_{CutSet}$  = ketidaksediaan *cut-set* ;      m = jumlah *cut-set*;
- $Q_{CutSet_j}$  = ketidaksediaan *cut-set* ke j       $Q_{Sys}$  = ketidaksediaan system;
- $F(t)$  = ketidakandalan sistem pada waktu t.       $Q(t)$  = ketidaksediaan sistem pada waktu t.

Selain dari *minimal cut-set*, evaluasi kriticalitas kejadian dasar terhadap sistem dapat dilakukan dengan menggunakan parameter *Importance*. Ada dua parameter *Importance* yang diperhitungkan dalam makalah ini, yaitu: *F-Vesely Importance* dan *BirnBaun Importance*.

*F-Vesely Importance* menunjukkan kontribusi kejadian dasar terhadap probabilitas kejadian puncak. Perubahan nilai probabilitas dari kejadian yang mempunyai nilai *importance* tinggi akan berdampak secara signifikan terhadap nilai probabilitas kejadian puncak. Secara matematis, *F-Vesely Importance* dapat ditulis sebagai<sup>(6)</sup>:

$$IMP_{FV} = \frac{\text{Jumlah Pr obabilitas Cut - Set Yang Berisikan Event Terkait}}{\text{Jumlah Pr obabilitas Seluruh Cut - Set}} \dots\dots(4)$$

*BirnBaun Importance* menunjukkan sensitivitas nilai probabilitas kejadian puncak menyangkut pada perubahan nilai probabilitas suatu kejadian dasar. Secara matematis dapat ditulis<sup>(6)</sup>:

$$IMP_{BB} = \frac{\text{Jumlah Pr obabilitas Cut - Set Yang Berisikan Event Terkait}}{\text{Pr obabilitas Event Terkait}} \dots\dots(5)$$

**PENGEMBANGAN MODEL KEANDALAN SISTEM PENDINGIN PRIMER RSG-GAS**

▪ **Asumsi Dasar dan Kondisi Awal Sebelum PIE**

Kejadian Kehilangan Pendingin terjadi saat reaktor sedang beroperasi secara normal. Dalam kondisi ini, semua katup isolasi primer (JE01AA01, JE01AA02, JE01AA018 dan JE01AA19) dalam keadaan membuka. Dua pompa primer (JE01AP01 dan JE01AP02) dalam keadaan beroperasi dan pompa JE01AP03 dalam keadaan tidak beroperasi (berfungsi sebagai pompa cadangan). Katup-katup di jalur pompa JE01AP01 dan JE01AP02 (JE01AA03, JE01AA04, JE01AA06, JE01AA07, JE01AA08 dan JE01AA09) dalam keadaan membuka. Katup-katup di jalur pompa cadangan

JE01AP03 (JE01AA05, JE01AA11, JE01AA12 dan JE01AA13) dalam kondisi tertutup. Katup-katup pada jalur penukar panas JE01BC01 dan JE01BC02 (JE01AA14, JE01AA15, JE01AA16 dan JE01AA17) dalam kondisi terbuka.

▪ ***Pengembangan Model Keandalan Sistem Dengan Metoda Pohon Kegagalan (FTA)***

Dalam makalah ini, kejadian puncak dari model yang dikembangkan adalah "Kehilangan Aliran Karena Kegagalan Sistem Pendingin Primer". Kejadian ini disebabkan oleh kejadian perantara "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Katup Isolasi", "Kehilangan Aliran Pendingin Dari Jalur Penukar Panas" dan "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Pompa Primer". Diagram FTA untuk kejadian puncak ditunjukkan dalam Gambar 4 pada Lampiran, dimana kejadian puncak terkait dengan gerbang logik *OR* dengan penyebabnya, yang berarti bahwa kejadian puncak akan terjadi jika satu atau lebih kejadian perantara di atas terjadi.

Kejadian perantara "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Katup Isolasi" disebabkan oleh penutupan salah satu dari 4 katup isolasi primer. Katup-katup ini pada awal terbuka, kegagalan dapat terjadi ketika satu atau lebih katup menutup secara salah. Kegagalan ini pada dasarnya dapat diatasi apabila operator dapat membuka kembali katup yang salah tersebut dengan segera. Diagram FTA untuk kejadian ini diperlihatkan dalam Gambar 5 pada Lampiran.

Kejadian perantara "Kehilangan Aliran Pendingin Dari Jalur Penukar Panas" terjadi karena satu atau lebih katup-katup pada jalur penukar panas menutup secara salah atau salah satu penukar panas mengalami penyumbatan. Diagram FTA untuk kejadian ini diperlihatkan pada Gambar 6 pada Lampiran.

Gambar 7, 8, 9 dan 10 pada Lampiran memperlihatkan diagram FTA untuk kejadian perantara "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Pompa Primer". Dari gambar terlihat bahwa kejadian ini disebabkan oleh kegagalan dua pompa primer saat sedang beroperasi dan pompa cadangan tidak bisa dioperasikan saat kedua tersebut mengalami kegagalan. Kegagalan atau tidak bisa dioperasikannya pompa primer tersebut dapat disebabkan oleh kegagalan/kerusakan pada masing-masing pompa atau karena katup-katup pada jalur pompa yang sedang beroperasi menutup secara salah dan katup-katup pada jalur pompa cadangan tidak bisa dibuka. Sebab lain adalah karena kehilangan suplai daya listrik pada pompa. Satu asumsi ditambahkan di sini bahwa sistem masih dapat beroperasi hanya dengan satu pompa primer beroperasi. Hal ini adalah karena RSG-GAS pada umumnya beroperasi dengan daya 50% daya maksimum.

## **HASIL KUANTIFIKASI DAN PEMBAHASAN**

Untuk menghitung model keandalan Sistem Pendingin Primer, dibutuhkan data-data keandalan untuk masing-masing kejadian dasar. Dalam makalah ini, data keandalan masing-masing kejadian dasar diambil dari sumber data generik seperti terlihat pada Tabel 1.

**Tabel 1. Daftar dan Data Keandalan Komponen Sistem Pendingin Primer**

No	Jenis Komponen	Modus Kegagalan	Laju Kegagalan (dari sumber data generik)
1.	<i>Motor Operated Valve</i>	- Katup gagal dibuka - Katup gagal untuk tetap membuka	$1,07E-3/demand^{(6)}$ $4,45E-8/hour^{(6)}$
2.	<i>Check Valve</i>	Katup gagal membuka	$1,3E-5/demand^{(6)}$
3.	<i>Motor Operated Pump</i>	- Gagal Start - Gagal operasi (setelah start berhasil)	$1,47E-3/demand^{(6)}$ $4,54E-6/hour^{(6)}$
4.	Penukar Panas	Tersumbat	$6,45E-07/hour^{(6)}$
5.	<i>Human Error</i>	- Mengoperasikan Pompa - Membuka/menutup katup	$2,6E-2^{(7)}$ $2,8E-3^{(7)}$
6.	Kehilangan Sumber Daya Listrik	PLN Trip	$5,560E-4/hour$ (1 kali dalam 2,5 bulan; judgment dari data perawatan)

Dengan menggunakan perangkat lunak ITEM TOOLKIT, model keandalan Sistem Pendingin Primer dapat dikuantifikasi dan hasilnya diberikan pada Tabel 2, 3 dan 4 berikut.

**Tabel 2. Hasil Kuantifikasi Kejadian Puncak dan Kejadian Perantara**

Parameter	<i>Top Event</i>	<i>Intermediate Event 1</i>	<i>Intermediate Event 2</i>	<i>Intermediate Event 3</i>
Unavailability	5,57E-04	4,98E-10	1,29E-06	5,56E-04
Unreliability	5,57E-04	4,98E-10	1,29E-06	5,56E-04
Availability	0,999442	1	0,999999	0,999444
Reliability	0,999442	1	0,999999	0,999444
No of Cut Sets	101	4	6	91

**Catatan:**

- Top Event* : "Kehilangan Aliran Karena Kegagalan Sistem Pendingin Primer"  
*Intermediate Event 1* : "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Katup Isolasi"  
*Intermediate Event 2* : "Kehilangan Aliran Pendingin Dari Jalur Penukar Panas"  
*Intermediate Event 3* : "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Pompa Primer"

Tabel 2 memberikan hasil perhitungan keandalan untuk kejadian puncak "Kehilangan Aliran Karena Kegagalan Sistem Pendingin Primer" beserta tiga kejadian perantara yang menjadi penyebab kegagalannya. Dari hasil di atas dapat diperkirakan bahwa probabilitas Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin Normal akibat kegagalan Sistem Pendingin Primer sebesar  $5.57E-4$ . Nilai ini berasal dari probabilitas kejadian perantara 3 dan juga kejadian perantara 2. Sedangkan kejadian perantara 1 sangat tidak signifikan dalam mempengaruhi probabilitas kejadian puncak, karena probabilitas kejadiannya sangat kecil ( $4.98E-10$ ).

Jika diinvestigasi lebih jauh sampai ke kejadian dasar, ada tiga kejadian dasar yang paling dominan menyebabkan terjadinya kejadian puncak, yaitu Sumber Listrik dari PLN Trip (PLN\_TRIP) dari kejadian perantara 3 dan Saluran Penukar Panas Tersumbat (BC01\_PLUG dan BC02\_PLUG) dari kejadian perantara 2. PLN\_TRIP, BC01\_PLUG dan BC02\_PLUG merupakan kejadian dasar

yang paling kritis untuk Kegagalan Sistem Pendingin Primer (yang mengakibatkan Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin Normal), karena ketiga kejadian dasar ini merupakan *minimal cut set* yang terdiri dari komponen tunggal dalam model FTA Sistem, yang berarti kejadian puncak langsung terjadi ketika salah satu dari ketiga kejadian dasar ini terjadi.

**Tabel 3. Fault Tree Cut Set Untuk Kejadian Puncak**

No.	Kombinasi Kejadian Dasar	Unavailability (Q)
1.	PLN_TRIP	5,56E-04
2.	BC01_PLUG	6,45E-07
3.	BC02_PLUG	6,45E-07
4.	AA14_MV_SC ::OP_SC_FTO	1,25E-10
5.	AA15_MV_SC ::OP_SC_FTO	1,25E-10
6.	AA18_MV_SC ::OP_SC_FTO	1,25E-10
7.	AA01_MV_SC ::OP_SC_FTO	1,25E-10
8.	AA02_MV_SC ::OP_SC_FTO	1,25E-10
9.	AA19_MV_SC ::OP_SC_FTO	1,25E-10
10.	AA17_MV_SC ::OP_SC_FTO	1,25E-10
11.	AA16_MV_SC ::OP_SC_FTO	1,25E-10
12.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::OP_MP_MS	1,73E-10
13.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::AA12_MV_FTO	1,87E-11
14.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::AP03_MP_FTS	9,80E-12
15.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::AA05_MV_FTO	7,13E-12
16.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::AA11_MV_FTO	7,13E-12
17.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::AA10_CV_FTO	8,67E-14
18.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::AP03_MP_FTR	3,03E-14
19.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::AA05_MV_SC	2,97E-16
20.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::AA11_MV_SC	2,97E-16
21.	AP01_MP_FTR ::AP02_MP_FTR ::AA12_MV_SC	2,97E-16
22.	AA07_MV_SC ::OP_SC_FTO ::AP02_MP_FTR ::OP_MP_MS	4,76E-15
23.	AA03_MV_SC ::OP_SC_FTO ::AP02_MP_FTR ::OP_MP_MS	4,76E-15
24.	AA03_MV_SC ::OP_SC_FTO ::AP02_MP_FTR ::AA12_MV_FTO	5,12E-16
25.	AA07_MV_SC ::OP_SC_FTO ::AP02_MP_FTR ::AA12_MV_FTO	5,12E-16
.....	.....	.....

Selain dari *minimal cut-set* (kombinasi terkecil kejadian dasar dalam *cut-set*), investigasi komponen (kejadian dasar) kritis dalam pemodelan keandalan Sistem Pendingin Primer dapat dilakukan berdasarkan parameter *Importance*. Tabel 4 memperlihatkan nilai *importance* untuk masing-masing kejadian dasar dalam diagram pohon kegagalan sistem. Dari parameter *F-Vesely Importance* pada Tabel 4, dapat terlihat bahwa Sumber Listrik dari PLN Trip (PLN\_TRIP) mempunyai kontribusi sebesar 99,76% terhadap terjadinya Kegagalan Sistem Pendingin Primer. Penyumbatan Saluran Penukar Panas (BC01\_PLUG dan BC02\_PLUG) masing-masing berkontribusi sebesar 0,16% terhadap terjadinya Kegagalan Sistem Pendingin Primer. Sedangkan komponen-komponen lain memberikan kontribusi yang sangat kecil.

Parameter *BirnBaun Importance* diperlukan untuk mengevaluasi sensitivitas perubahan nilai probabilitas kejadian puncak karena perubahan nilai probabilitas kejadian dasar. Dari Tabel 4 dapat

terlihat bahwa Sumber Listrik dari PLN Trip (PLN\_TRIP) dan Saluran Penukar Panas Tersumbat (BC01\_PLUG dan BC02\_PLUG) merupakan komponen-komponen yang sangat sensitif terhadap probabilitas terjadinya kegagalan sistem. Ketika probabilitas terjadinya ketiga kejadian dasar tersebut berubah, probabilitas terjadinya kejadian puncak langsung berubah dengan nilai yang signifikan.

**Tabel 4. Fault Tree Importance Untuk Kejadian Puncak**

No.	Events	F-Vesely	BirnBaun
1.	PLN_TRIP	0,997682	1
2.	BC02_PLUG	0,001158	1
3.	BC01_PLUG	0,001158	1
4.	OP_SC_FTO	1,79E-06	3,56E-07
5.	AP02_MP_FTR	3,88E-07	1,47E-07
6.	AP01_MP_FTR	3,88E-07	4,76E-05
7.	OP_MP_MS	3,11E-07	6,67E-09
8.	AA16_MV_SC	2,24E-07	0,0028
9.	AA17_MV_SC	2,24E-07	0,0028
10.	AA19_MV_SC	2,24E-07	0,0028
11.	AA02_MV_SC	2,24E-07	0,0028
12.	AA01_MV_SC	2,24E-07	0,0028
13.	AA18_MV_SC	2,24E-07	0,0028
14.	AA15_MV_SC	2,24E-07	0,0028
15.	AA14_MV_SC	2,24E-07	0,0028
16.	AA12_MV_FTO	3,35E-08	6,67E-09
17.	AP03_MP_FTS	1,76E-08	6,67E-09
18.	AA11_MV_FTO	1,28E-08	6,67E-09
19.	AA05_MV_FTO	1,28E-08	6,67E-09
20.	AA10_CV_FTO	1,56E-10	6,67E-09
21.	AP03_MP_FTR	5,43E-11	6,67E-09
22.	AA03_MV_SC	1,07E-11	1,33E-07
23.	AA07_MV_SC	1,07E-11	1,33E-07
24.	AA12_MV_SC	5,33E-13	6,67E-09
25.	AA11_MV_SC	5,33E-13	6,67E-09
26.	AA05_MV_SC	5,33E-13	6,67E-09
27.	AA04_MV_SC	3,36E-14	4,20E-10
28.	AA09_MV_SC	3,36E-14	4,20E-10

## KESIMPULAN

Secara umum dapat disimpulkan peluang terjadinya PIE Kehilangan Aliran Pendingin Pendingin sebesar  $5.57E-4$ . Sumber Listrik dari PLN Trip (PLN\_TRIP) dan Saluran Penukar Panas Tersumbat (BC01\_PLUG dan BC02\_PLUG) merupakan kejadian dasar yang menentukan probabilitas terjadinya PIE Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Sistem Pendingin Primer. Ketiga kejadian dasar ini membentuk *minimal cut-set* dengan kombinasi tunggal dalam model pohon kegagalan dan sensitif dalam menentukan perubahan nilai probabilitas kegagalan sistem.

Meskipun katup-katup banyak terdapat dalam Sistem Pendingin Primer, kontribusi katup-katup ini terhadap terjadinya Kegagalan Sistem Pendingin Primer yang menyebabkan Kejadian Kehilangan Aliran tidak signifikan. Hal ini adalah karena Kejadian Kehilangan Aliran terjadi saat Sistem Pendingin Primer (reaktor) sedang beroperasi secara normal. Ketika sistem beroperasi, sebagian besar katup dalam keadaan membuka. Kegagalan sistem terjadi ketika katup yang sedang membuka, tiba-tiba menutup secara salah. Kegagalan seperti ini di lapangan sangat jarang terjadi (data laju kegagalannya sangat rendah) dan di Reaktor RSG-GAS belum pernah terjadi.

Meskipun data keandalan komponen yang digunakan dalam perhitungan bersumber dari data generik, hasil analisis dapat secara logis menyimpulkan bahwa kejadian dasar PLN Trip dan Penyumbatan Saluran Penukar Panas menjadi penyebab potensial dari Kegagalan Sistem Pendingin Primer yang menyebabkan Kejadian Pemicu Kehilangan Aliran Pendingin.

Penyumbatan pada saluran penukar panas dapat dihindari dengan melakukan perawatan yang tepat dan rutin pada komponen penukar panas, sedangkan Sumber Listrik dari PLN Trip sangat bergantung dari Perusahaan PLN sebagai pemasok listrik. Untuk mengurangi ketidakpastian karena kebergantungan ini, Reaktor RSG-GAS harus tetap menjaga tingkat keandalan Sistem Shutdown dengan perawatan dan pengujian yang baik dan ketat. Hal ini adalah karena apabila reaktor dapat *scram (shutdown)* secara cepat ketika Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin terjadi, maka kejadian tersebut tidak mempunyai dampak terhadap keselamatan reaktor.

## UCAPAN TERIMA KASIH

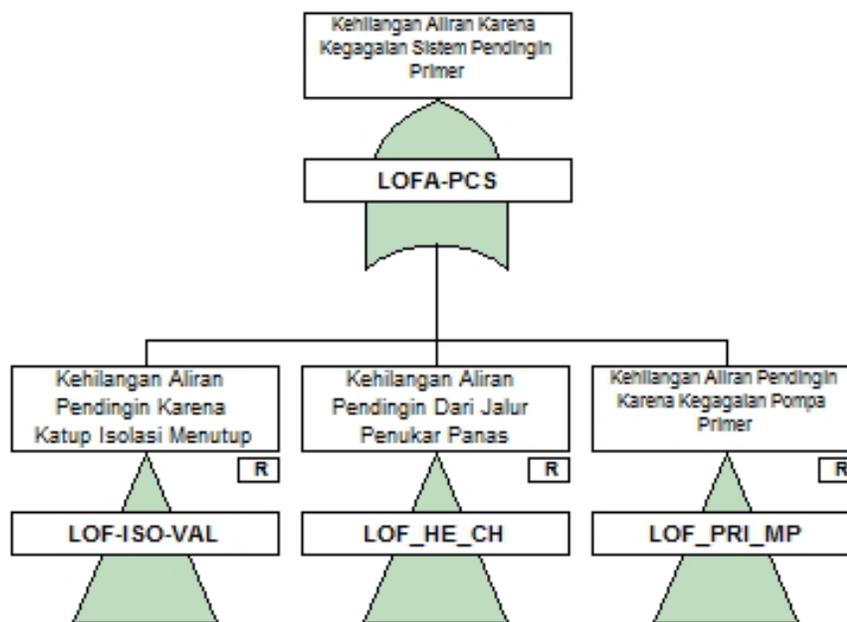
Makalah ini merupakan bagian dari kegiatan PIPKPP tahun 2012 yang didanai oleh Kementerian Riset dan Teknologi RI. Penulis mengucapkan terima kasih pada Kementerian Riset dan Teknologi RI atas pendanaan program kegiatan ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bidang Sistem Reaktor dan Bidang Operasi Reaktor, PRSG-BATAN; khususnya kepada Bapak Yusi Eko Yulianto, Santosa Pujiarta dan Makmuri; yang telah banyak memberikan informasi tentang sistem yang dianalisis dalam makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

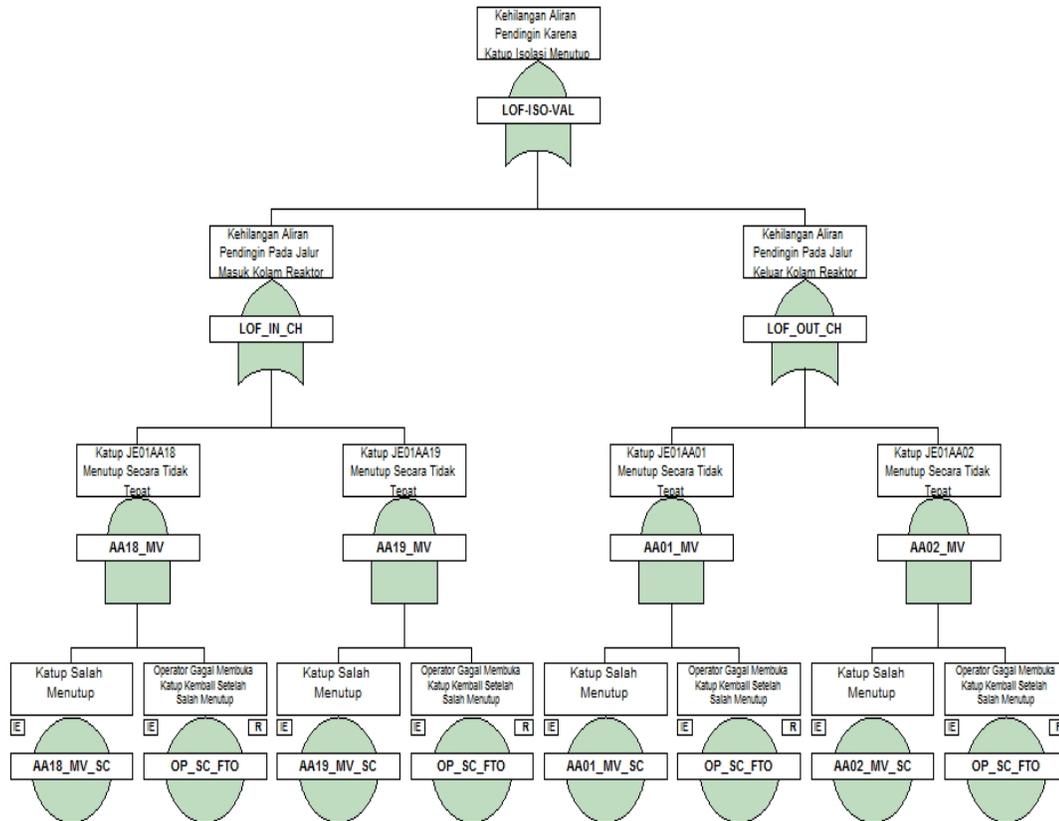
- [1]. GARLAND, W.J.. Safety Analysis Approach for the McMaster Nuclear Reactor. Technical Report 1999-06. McMaster University. Ontario, Kanada.
- [2]. HABIB, A.S.. ET.AL.. Improving Reactor Safety Systems Using Component Redundancy

- Allocation Technique. NUKLEONIKA 2005; 50(3): pg. 105-112. Institute of Nuclear Chemistry and Technology, Warszawa, Polandia. ISSN 0029-5922.
- [3]. IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. NS-R-4. Safety of Research Reactors: Safety Requirements. IAEA, VIENNA. 2005. ISSN 1020-525X.
- [4]. Pusat Reaktor Serba Guna - Batan Tenaga Nuklir Nasional. Laporan Analisis Keselamatan RSG-GAS Rev. 10. Desember 2008.
- [5]. ITEM TOOLKIT. User Manual Fault Tree Module. Item Software, Inc., Anaheim, USA. October 2005.
- [6]. EIDE, S.A., ET.AL., Industry-Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants. NUREG/CR-6928. U.S. NRC, Washington D.C., 2007.
- [7]. FULLWOOD, R.R., Probabilistic Safety Assessment in the Chemical and Nuclear Industries. Butterworth-Heinemann, 2000

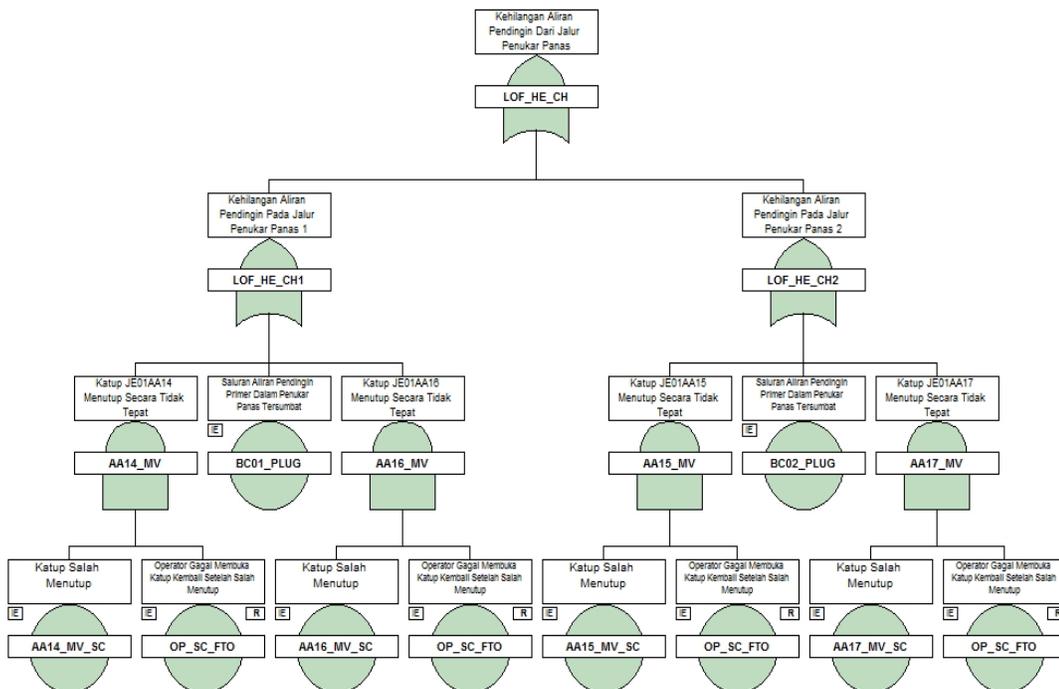
**LAMPIRAN-LAMPIRAN:**



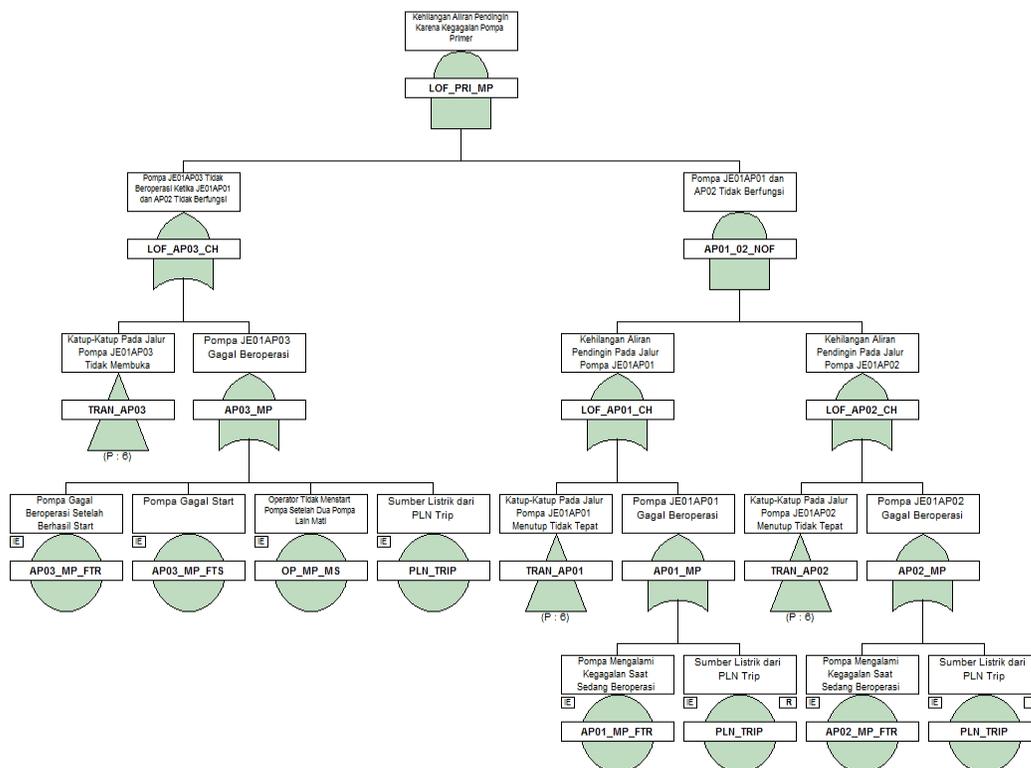
**Gambar 4. Diagram FTA Untuk kejadian puncak.**



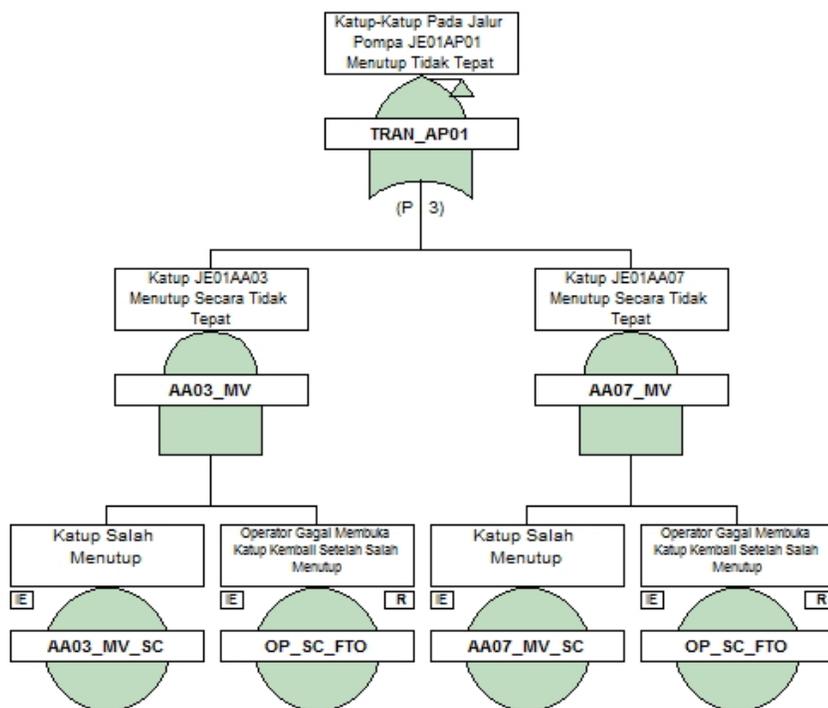
Gambar 5. Diagram FTA untuk Kehilangan Aliran Pendingin Karena Katup Isolasi Menutup



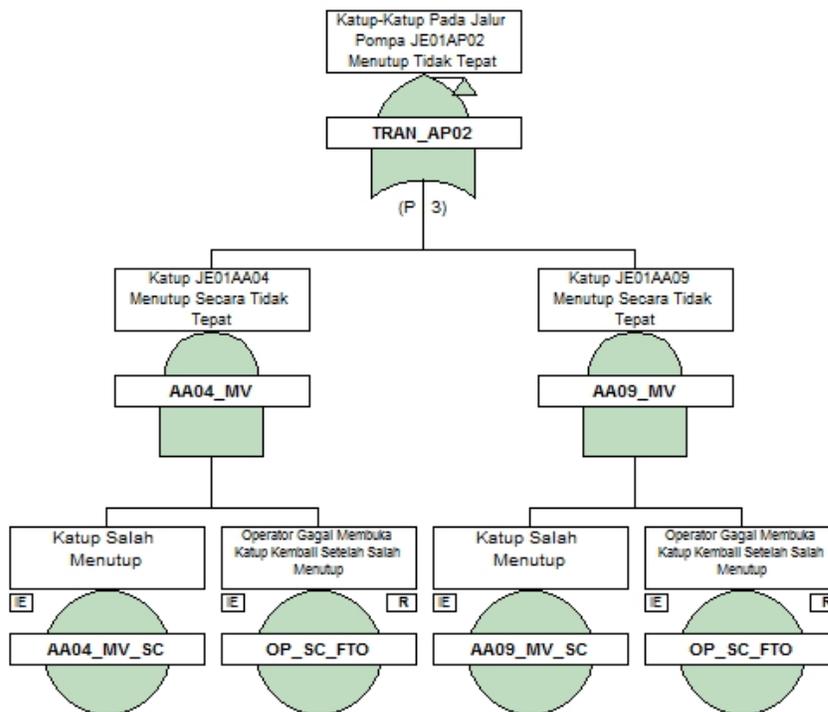
Gambar 6. Diagram FTA untuk Kehilangan Aliran Pendingin Dari Jalur Penukar Panas



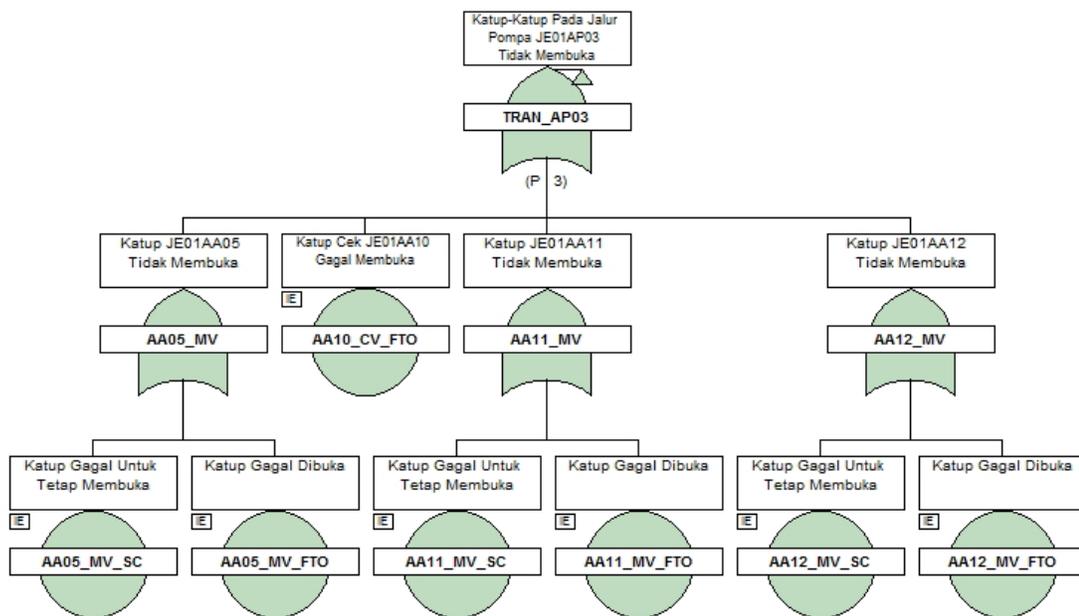
Gambar 7. Diagram FTA untuk Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Pompa Primer



Gambar 8. Diagram FTA untuk Penutupan Katup-Katup Pada Jalur Pompa JE01AP01



Gambar 9. Diagram FTA untuk Penutupan Katup-Katup Pada Jalur Pompa JE01AP02



Gambar 10. Diagram FTA untuk Kegagalan Pembukaan Katup-Katup Pada Jalur Pompa Cadangan JE01AP03

**DISKUSI/TANYA JAWAB:**

**1. PERTANYAAN: (Ai Diyanti, Mahasiswa UPI)**

- Pada kesimpulan disebutkan bahwa penyumbat pada saluran penukar panas dapat diatasi dengan melakukan perawatan secara rutin. bagaimana proses perawatan yang dimaksud?. Seberapa sering perawatan tersebut dilakukan?

***JAWABAN: (Johnny Situmorang, PTRKN-BATAN)***

- *Perawatan dilakukan periodik secara khusus pada sisi sekunder. perlakuan mekanik bahan bakar juga dikenakan secara operasional sistem primer juga dilengkapi dengan filter untuk menjaga kualitas air termasuk diantaranya agar pembentukan kerak (sisi primer) tidak terjadi.*