

EVALUASI KEANDALAN SISTEM VENTING KOLAM DAN SISTEM TEKANAN RENDAH RSG GAS DENGAN METODA POHON KEGAGALAN

Deswandri, Johnny Situmorang
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN

ABSTRAK

EVALUASI KEANDALAN SISTEM VENTING KOLAM DAN SISTEM TEKANAN RENDAH RSG GAS DENGAN METODA POHON KEGAGALAN. Sistem venting kolam dan sistem tekanan rendah merupakan sub-sistem dari sistem ventilasi daerah radiasi menengah reaktor RSG GAS. Sistem venting kolam berfungsi untuk mencegah penyebaran kontaminasi yang mungkin terjadi dalam udara kolam reaktor ke dalam balai operasi dan mengembalikan hasil kondensasi uap air ke dalam kolam reaktor. Sistem tekanan rendah berfungsi untuk mempertahankan gradien tekanan di daerah radiasi menengah dan antara daerah radiasi menengah dengan atmosfer ketika terjadi penutupan damper isolasi area dan damper isolasi pengungkung. Makalah ini membahas tentang evaluasi keandalan berfungsinya sistem venting kolam dan sistem tekanan rendah dengan menggunakan metoda pohon kegagalan. Evaluasi dimulai dengan melakukan pemahaman tentang cara kerja sistem, pembuatan model keandalan sistem, penelusuran data keandalan komponen terkait dalam sistem, kuantifikasi model berdasarkan data keandalan komponen serta menentukan komponen-komponen yang berpotensi dominan dalam menyebabkan kegagalan operasi sistem. Dengan menggunakan data generik, hasil kuantifikasi memberikan nilai probabilitas untuk ketidaktersediaan sistem venting kolam beroperasi ketika dibutuhkan sebesar $6.00E-03$ dan sistem tekanan rendah sebesar $1.84E-05$. Sedangkan ketidakandalan sistem venting kolam dalam melaksanakan fungsinya mempunyai nilai probabilitas $1.93E-06$ dan sistem tekanan rendah sebesar $1.30E-07$. Pada dasarnya laju kegagalan dari komponen-komponen berikut bernilai sangat rendah, namun berdasarkan analisis *minimal cut-set* dan nilai *importance* dapat disimpulkan bahwa komponen-komponen yang berpotensi dominan dalam menyebabkan kegagalan sistem venting kolam adalah damper isolasi KLA60AA01 dan KLA60AA05, dan untuk sistem tekanan rendah adalah dari modul filter KLA41 dan KLA42.

Kata Kunci: Evaluasi Keandalan, Metoda Analisis Pohon Kegagalan, Sistem Ventilasi, RSG-GAS.

ABSTRACT

RELIABILITY EVALUATION of POOL VENTING SYSTEM and LOW PRESSURE SYSTEM of RSG GAS USING FAULT TREE ANALYSIS METHOD. Pool venting system and low pressure system are sub-system of the ventilation system of the intermediate radiation zone in the RSG GAS research reactor. Pool venting system works to prevent the spread of contamination that may occur in the air of the reactor pool into the reactor hall and returns the result of condensation of water vapor into the reactor pool. Low pressure system serves to maintain the pressure gradient in the areas of the intermediate radiation zone and between the intermediate radiation zone and the atmosphere in the events of closure of the area isolation dampers and confinement isolation dampers. This paper discusses about the reliability evaluation of pool venting system and low pressure system using the fault tree analysis method (FTA). Evaluation begins with an understanding of how the system works, reliability modeling of the systems, reliability data retrieval for the related components in the system, quantifying the model based on the component reliability data and determine the components that are dominant in causing the failure of the system operation. Using generic data, the quantification results give the unavailability of pool venting system to operate on demand is $6.00E-03$ and low pressure systems of $1.84E-05$. On the other hand, unreliability in carrying out its functions for pool venting system is $1.93E-06$ and low pressure systems is $1.30E-07$. Actually the failure rate of the following components are very low, however, based on the analysis of the minimum cut-set and the importance value, it can be concluded that the dominant components in causing the system failure for pool venting system are isolation damper KLA60AA01 and KLA60AA05, while for the low-pressure system are filter modules KLA41 and KLA42.

Key Words: Reliability Evaluation, Fault Tree Analysis Method, Ventilation System, Research Reactor RSG-GAS.

Pendahuluan

Sistem ventilasi pada daerah radiasi menengah Reaktor RSG GAS terdiri dari berbagai sub-sistem. Sebagai contoh dari sub-sistem ini adalah sistem venting kolam dan sistem tekanan rendah. Sistem venting kolam dan sistem tekanan rendah merupakan sistem yang terkait dengan keselamatan. Sistem venting kolam berfungsi untuk mencegah penyebaran kontaminasi yang mungkin terjadi dalam udara kolam reaktor ke dalam balai operasi dan mengembalikan hasil kondensasi uap air ke dalam kolam reaktor. Sistem tekanan rendah berfungsi untuk mempertahankan gradien tekanan di daerah radiasi menengah dan antara daerah radiasi menengah dengan atmosfer ketika terjadi penutupan damper isolasi area dan damper isolasi pengungkung, dan sistem tekanan rendah.

Sebagai sistem yang terkait dengan keselamatan, keandalan beroperasi dan ketersediaan saat diperlukannya sistem venting kolam dan sistem tekanan rendah sangat penting untuk dievaluasi. Makalah ini bertujuan untuk mengevaluasi keandalan kedua sistem tersebut dengan menggunakan metoda pohon kegagalan. Evaluasi dimulai dengan melakukan pemahaman tentang cara kerja sistem, pembuatan model keandalan sistem, penelusuran data keandalan terkait komponen-komponen dalam sistem, kuantifikasi model berdasarkan data keandalan komponen serta menentukan komponen-komponen yang berpotensi dominan dalam menyebabkan kegagalan operasi sistem.

Hasil evaluasi dari makalah ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan pertimbangan bagi pengoperasian instalasi sehari-hari, baik dari segi pengoperasian sistem maupun dari segi perawatan komponen. Hasil ini juga dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam membuat keputusan dalam manajemen kecelakaan.

Deskripsi Sistem⁽¹⁾

Sistem venting kolam beroperasi dengan cara menyedot udara di atas kolam reaktor. Ada dua modus operasi dari sistem ini, modus normal dan modus abnormal. Pada modus normal, udara kolam disedot oleh blower (satu blower, tanpa redundansi) melalui sederetan pengkondensasi uap. Air hasil kondensasi dikembalikan ke kolam dan udara kering dikirimkan ke sistem udara buang.

Pada modus abnormal, misalnya ketika udara kolam reaktor terdeteksi mengandung bahan radioaktif, saluran sistem ini diisolasi dari sistem udara buang dan modus operasi diubah menjadi modus resirkulasi udara kolam. Dalam modus ini, udara kolam disedot oleh blower (tiga kanal blower; satu beroperasi dan dua blower siaga) melalui kanal filter yang berisi beberapa deret filter. Kanal filter ini terdiri dari dua kanal, satu beroperasi dan satu lagi siaga. Setelah melalui deretan filter, udara dikembalikan ke ruangan di atas kolam. Operasi resirkulasi ini beroperasi dalam waktu tertentu sampai tingkat radiasi udara berada pada ambang yang diizinkan.

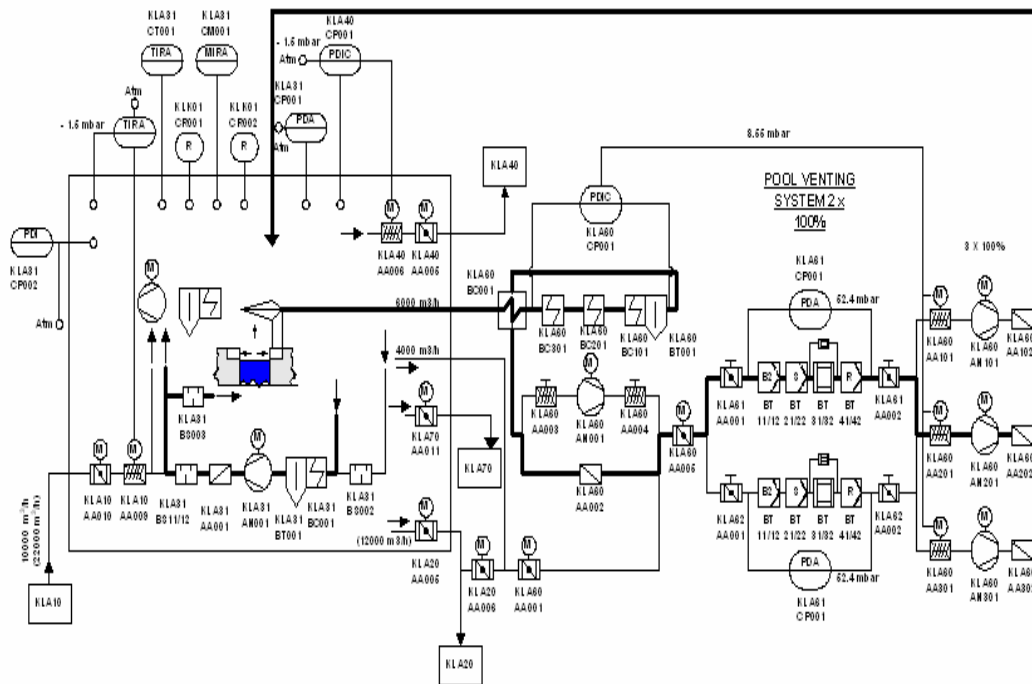
Sistem tekanan rendah berfungsi untuk menjaga gradien tekanan masing-masing ruangan di daerah radiasi menengah sesuai persyaratan keselamatan yang telah ditentukan. Persyaratannya adalah ruangan yang berpotensi mempunyai level radiasi lebih tinggi harus mempunyai tekanan ruangan yang lebih rendah dari ruangan dengan potensi radiasi lebih rendah. Dengan demikian, tekanan pada balai operasi, balai eksperimen, ruang bantu dan sel primer harus lebih rendah dari ruangan lainnya.

Jika tekanan udara meningkat di salah satu ruangan di atas, sistem tekanan rendah akan menyedot udara di ruangan tersebut sampai tekanan berada pada tingkat yang diinginkan. Udara yang disedot dibuang ke lingkungan melalui cerobong. Sebelum dibuang ke lingkungan, udara disaring terlebih dahulu melalui kanal filter yang terdiri dari deretan 4 filter.

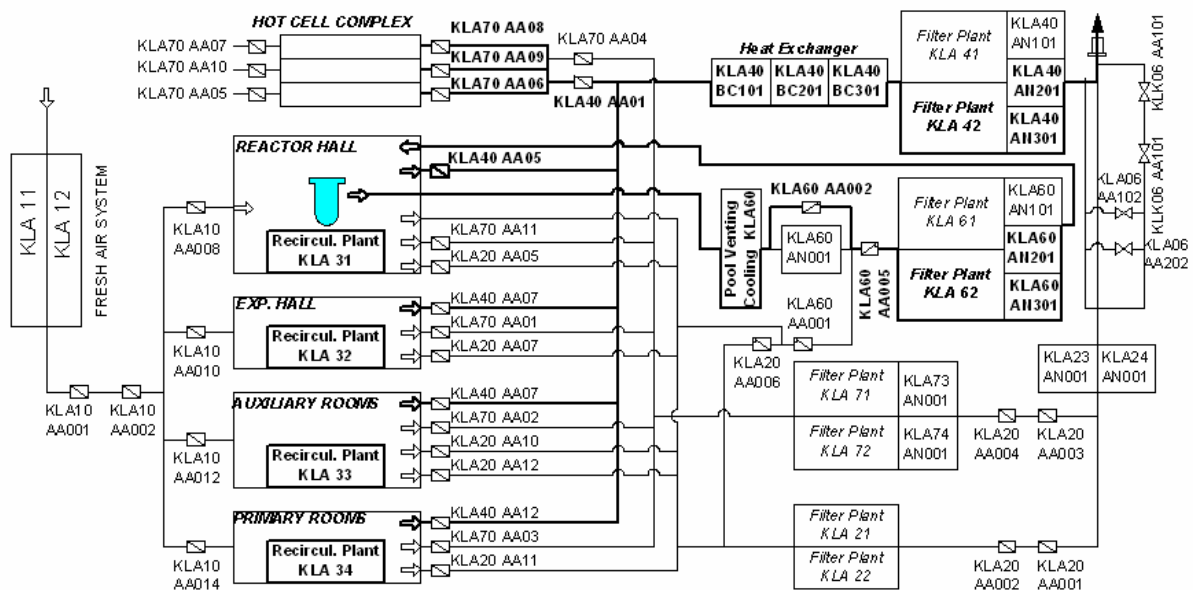
Kanal filter mempunyai dua redundansi, satu

beroperasi dan satu lagi siaga. Blower penyedot terdiri dari tiga blower, satu beroperasi dan dua lagi siaga. Selama operasi normal, sistem tekanan rendah berada dalam kondisi siaga. Ketika terjadi penutupan damper isolasi area atau penutupan damper isolasi pengungku atau karena inisiasi dari

ruang kendali utama (RKU), seluruh komponen dalam sistem akan beroperasi. Karena satu kanal yang diperlukan beroperasi, komponen-komponen lain dalam kanal dapat dimatikan secara manual.



Gambar 1. Sistem Venting Udara Kolam



Gambar 2. Diagram Alir Sistem Tekanan Rendah Pada Kondisi Isolation Building

Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam makalah ini adalah dengan menggunakan metoda pohon kegagalan (FTA). Metoda FTA adalah metoda yang bersifat induktif dimana analisis dimulai dengan mendefinisikan suatu kejadian bersifat umum yang paling tidak diinginkan (misalnya kegagalan suatu sistem), dilanjutkan kekejadian perantara yang menyebabkan kejadian umum tersebut.

Analisis berlanjut kekejadian berikutnya yang menjadi penyebab kejadian perantara. Analisis berakhir sampai pada tingkat kejadian paling mendasar, seperti kejadian kegagalan komponen atau kegagalan manusia. Interaksi antara satu kejadian dengan beberapa kejadian yang menjadi penyebab dalam metoda FTA, terhubung dalam gerbang logika OR, AND, dan lain-lain. Gerbang OR menyatakan bahwa satu kejadian dapat terjadi apabila satu atau lebih kejadian penyebab terjadi. Sebaliknya, gerbang AND menyatakan bahwa satu kejadian dapat terjadihanya 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*. Analisis dalam metoda FTA melibatkan hukum-hukum aljabar Boolean. Keluaran dari analisis berupa *cut set* dan *minimal cut set*. *Cut set* adalah kombinasi kejadian-kejadian dasar (*basic event*) yang dapat menyebabkan kejadian puncak (*top event*). *Minimal cut set* adalah kombinasi terkecil *basic event* yang menyebabkan terjadinya *top event*.

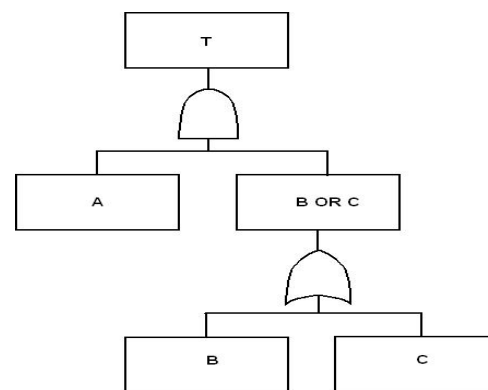
Metoda FTA dapat mengevaluasi kegagalan suatu sistem atau fungsi baik secara kualitatif maupun secara kuantitatif. Model kegagalan sistem yang dikonstruksi berdasarkan metoda ini dapat digunakan untuk menentukan kombinasi kegagalan komponen-komponen yang berpotensi menyebabkan kegagalan sistem, mengetahui probabilitas

kegagalan sistem serta sebagai alat untuk menginvestigasi titik lemah (titik kritis) pada sistem atau fungsi.

Untuk model sistem yang sederhana, perhitungan *cut set* dalam FTA dapat dilakukan dengan tangan berdasarkan hukum-hukum aljabar Boolean. Akan tetapi untuk sistem kompleks yang melibatkan banyak komponen dan tindakan operator, perhitungan *cut set* dengan tangan menjadi sangat sulit dan mustahil dilakukan.

Untuk itu, di pasaran tersedia beberapa paket program komputer komersil untuk melakukan perhitungan tersebut, di antaranya adalah Risk Spectrum, FaultTree+, Item ToolKit, dan lain-lain.

Dalam makalah ini, Item Tool Kit digunakan sebagai alat perhitungan. Persamaan matematis untuk menghitung ketidaksediaan (*unavailability*) *cut set*, ketidaksediaan dan ketidakandalan (*unreliability*) sistem (*top event*) diberikan berturut-turut oleh Persamaan 1, 2 dan 3⁽²⁾.



Gambar3. Struktur Fault Tree Untuk $T=A * (B+C)$

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

$$Q_{\text{Sys}} = \sum_{j=1}^m Q_{\text{CutSet}_j} \quad (2)$$

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

Dimana:

n = jumlah *event* dalam *cut set*

Q_i = ketidaksediaan *event* ke i dalam *cut set*

Q_{CutSet}	= ketidaksiadaan <i>cut set</i>
m	= jumlah <i>cut set</i>
$Q_{CutSet j}$	= ketidaksiadaan <i>cut set</i> ke j
Q_{Sys}	= ketidaksiadaan sistem
$F(t)$	= ketidaksiadaan sistem pada waktu t .
$Q(t)$	= ketidaksiadaan sistem pada waktu t .

Penentuan kritikalitas *basic event* terhadap kegagalan sistem dapat dievaluasi dari jumlah kombinasi *event* dalam *minimal cut-set*. Penentuan kritikalitas ini juga dapat dilakukan berdasarkan nilai dari parameter *Importance*.

Ada dua parameter *Importance* yang diperhitungkan dalam makalah ini, yaitu: *F-Vesely Importance* dan *BirnBaun Importance*.

F-Vesely Importance menunjukkan kontribusi *basic event* terhadap probabilitas *top event*.

Perubahan nilai probabilitas dari *basic event* yang mempunyai nilai *importance* tinggi akan berdampak secara signifikan terhadap nilai probabilitas *top event*. Secara matematis, *F-Vesely Importance* dapat ditulis sebagai⁽²⁾:

$$IMP_{FV} = \frac{\text{Jumlah Probabilitas Cutset Yang Melibatkan Event Terkait}}{\text{Jumlah Probabilitas Seluruh Cutset}}$$

Birn Baun Importance menunjukkan sensitivitas probabilitas kejadian *top event* menyangkut pada perubahan nilai probabilitas kejadian suatu *basic event*. Secara matematis dapat ditulis⁽²⁾:

$$IMP_{BB} = \frac{\text{Jumlah Probabilitas Cutset Yang Melibatkan Event Terkait}}{\text{Probabilitas Event Terkait}}$$

Pengembangan Model Keandalan Sistem Venting Kolam dan Sistem Tekanan Rendah RSG-GAS

Fungsi yang dipertimbangkan dalam makalah ini adalah fungsi dari sistem venting kolam saat keadaan abnormal, yaitu fungsi resirkulasi udara kolam reaktor melalui filter ketika terdeteksi mengandung bahan radioaktif. Kriteria sukses dari sistem ini adalah sistem dapat membersihkan udara terkontaminasi dengan cara meresirkulasikan udara yang berasal dari atas kolam reaktor melalui sederetan filter. Keberhasilan sistem ini bergantung pada keberhasilan fungsi blower (satu beroperasi

dan dua siaga) beserta kanal filter (dua kanal redundansi yang tersusun dari *HEPA filter* dan *Charcoal Filter*).

Fungsi sistem tekanan rendah adalah menjaga gradien tekanan ruangan di daerah radiasi menengah sesuai dengan desain persyaratan keselamatan. Kriteria sukses dari sistem ini adalah sistem mampu menyedot udara dalam satu ruangan (yang tekanannya meningkat) dan menyaring udara tersebut (sehingga bebas dari kontaminasi) serta membuangnya melalui cerobong. Keberhasilan sistem ini bergantung pada keberhasilan fungsi blower (dua beroperasi dan satu siaga) beserta kanal filter (dua kanal redundansi yang tersusun dari *HEPA filter* dan *Charcoal Filter*).

Dalam makalah ini, dikembangkan dua model keandalan sistem berdasarkan metoda FTA; yaitu model keandalan sistem venting kolam dengan *top event* "Sistem Resirkulasi Udara Kolam Gagal Saat Separated Area" dan model keandalan sistem tekanan rendah dengan *top event* "Sistem Tekanan Rendah Gagal Berfungsi Saat Kondisi Isolasi Gedung". Gambar 4a s/d 4d memperlihatkan model pohon kegagalan sistem venting kolam dan gambar 5a s/d 5c model pohon kegagalan sistem tekanan rendah.

Seperti yang terlihat pada Gambar 4, kegagalan sistem venting kolam disebabkan oleh kegagalan aliran udara pada jalur blower, kegagalan aliran udara pada jalur filter, *damper* isolasi KLA60AA01 gagal menutup, *damper* isolasi KLA60AA05 gagal membuka atau *damper* satu arah KLA60AA02 gagal membuka. Kegagalan aliran udara pada jalur blower dapat disebabkan oleh kegagalan *damper* untuk membuka atau kegagalan blower beroperasi, baik karena disebabkan oleh kerusakan blower atau karena kehilangan catu daya. Jalur blower pada sistem ini tersusun dalam tiga jalur redundansi, dimana kegagalan sistem terjadi apabila ketiga jalur tersebut mengalami kegagalan.

Kegagalan aliran pada jalur filter sistem venting kolam dapat disebabkan oleh kegagalan

membukanya *damper-damper* pada jalur tersebut atau terjadinya penyumbatan pada filter. Jalur filter pada sistem ini tersusun dalam dua jalur redundansi, dimana sistem mengalami kegagalan apabila kedua jalur tersebut gagal secara bersamaan.

Gambar 5 memperlihatkan model pohon kegagalan untuk sistem tekanan rendah RSG GAS. Seperti yang terlihat pada gambar, sistem tekanan rendah mengalami kegagalan karena kegagalan aliran udara pada jalur filter atau pada jalur blower. Kegagalan aliran pada jalur filter sistem tekanan rendah dapat disebabkan oleh kegagalan membukanya *damper-damper* pada jalur tersebut atau terjadinya penyumbatan pada filter. Jalur filter pada sistem ini tersusun dalam dua jalur redundansi, dimana sistem mengalami kegagalan apabila kedua jalur tersebut gagal secara bersamaan.

Kegagalan aliran udara pada jalur blower dapat disebabkan oleh kegagalan *damper* untuk membuka atau kegagalan blower beroperasi, baik karena disebabkan oleh kerusakan blower atau karena kehilangan catu daya. Jalur blower pada sistem tekanan rendah tersusun dalam tiga jalur redundansi, dimana kegagalan sistem terjadi apabila ketiga jalur tersebut mengalami kegagalan.

Hasil Kuantifikasi Model Keandalan dan Pembahasan

Untuk menghitung model keandalan sistem venting kolam dan sistem tekanan rendah, dibutuhkan data-data keandalan untuk masing-masing *basic event* model tersebut. Dalam kegiatan ini, data keandalan masing-masing *basic event* diambil dari sumber data generik seperti terlihat pada Tabel 1-2 berikut.

Tabel 1. Daftar dan Data Keandalan Komponen Sistem Venting Kolam

No	Jenis Komponen	Modus Kegagalan	Laju Kegagalan dan Waktu Rata-Rata Perbaikan (data generik)
1.	<i>Motor Operated Damper</i>	<input type="checkbox"/> <i>Damper</i> gagal dibuka <input type="checkbox"/> <i>Damper</i> gagal untuk tetap membuka	3E-3/demand 3E-7/h ; MTTR=0.6 h ⁽⁵⁾
2.	<i>One Way Damper</i>	<i>Damper</i> gagal membuka	1,2E-6/h ; MTTR=0.6 h ⁽³⁾
3.	<i>Motor Operated Blower Fan</i>	<input type="checkbox"/> Gagal Start <input type="checkbox"/> Gagal operasi (setelah start berhasil)	5E-3/demand ⁽²⁾ 3E-5/h ; MTTR=40 h ⁽⁵⁾
4.	<i>Manual Damper</i>	Gagal untuk membuka	3.6E-08/h ; MTTR=0.6 h ⁽³⁾
5.	Filter	Tersumbat	1E-05/hour ; MTTR=2 h ⁽⁵⁾
6.	<i>Regulating Damper</i>	Gagal untuk tetap buka	1,8E-6/h ; MTTR=0.6 h ⁽³⁾
7.	<i>Diesel Generator</i>	Gagal Beroperasi Gagal Start secara otomatis	1E-4/h ; MTTR=11,5 h ⁽³⁾ 7,7E-3/demand ⁽³⁾
8.	<i>Human Error</i>	Menghidupkan <i>Diesel Generator</i> ketika gagal start	1,8E-3/demand ⁽⁴⁾

Tabel 2. Daftar dan Data Keandalan Komponen Sistem Tekanan Rendah

No	Jenis Komponen	Modus Kegagalan	Laju Kegagalan dan Waktu Rata-Rata Perbaikan (data generik)
1.	<i>One Way Damper</i>	<i>Damper</i> gagal membuka	1,2E-6/h ; MTTR=0.6 h ⁽³⁾
2.	<i>Motor Operated Blower Fan</i>	<input type="checkbox"/> Gagal Start <input type="checkbox"/> Gagal operasi (setelah start berhasil)	5E-3/demand ⁽²⁾ 3E-5/h ; MTTR=40 h ⁽⁵⁾
3.	Manual Damper	Gagal untuk membuka	3.6E-08/h ; MTTR=0.6 h ⁽³⁾
4.	Filter	Tersumbat	1E-05/hour ; MTTR=2 h ⁽⁵⁾
5.	<i>Regulating Damper</i>	Gagal untuk tetap buka	1,8E-6/h ; MTTR=0.6 h ⁽³⁾
6.	<i>Diesel Generator</i>	Gagal Beroperasi Gagal Start secara otomatis	1E-4/h ; MTTR=11,5 h ⁽³⁾ 7,7E-3/demand ⁽³⁾
7.	<i>Human Error</i>	Menghidupkan <i>Diesel Generator</i> ketika gagal start	1,8E-3/demand ⁽⁴⁾

Kuantifikasi model keandalan sistem venting kolam dan sistem tekanan rendah dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ITEM TOOLKIT, dan hasilnya diberikan dalam Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil Kuantifikasi *Top Event* pada Sistem Venting Kolam dan Sistem Tekanan Rendah

Parameter	<i>Top Event</i> Sistem Venting Kolam	<i>Top Event</i> Sistem Tekanan Rendah
<i>Unavailability</i>	6.00E-03	1.84E-5
<i>Unreliability</i>	1.93E-06	1.30E-7
<i>Availability</i>	0.994	0.99998
<i>Reliability</i>	0.999998	0.9999999
<i>No of Cut Sets</i>	86	81

Dari Tabel 3 dapat terlihat bahwa ketidaksediaan sistem venting kolam untuk beroperasi ketika dibutuhkan mempunyai nilai probabilitas 6.00E-03 dan sistem tekanan rendah sebesar 1.84E-05. Sedangkan ketidakandalan sistem venting kolam dalam melaksanakan fungsinya mempunyai nilai probabilitas 1.93E-06 dan sistem tekanan rendah sebesar 1.30E-07. Perbedaan nilai ketidaksediaan dan ketidakandalan untuk kedua sistem tersebut, dimana ketidaksediaan mempunyai nilai probabilitas kejadian lebih besar dari nilai ketidakandalan, menunjukkan bahwa sistem tersebut lebih berpeluang gagal saat dibutuhkan beroperasi (gagal untuk memulai operasi). Akan tetapi, jika sistem tersebut sukses memulai operasi, maka peluang untuk gagal melanjutkan operasi menjadi kecil.

Jika diinvestigasi lebih jauh sampai ke *basic event*, kejadian yang dominan dalam menyebabkan kegagalan sistem venting kolam adalah KLA60AA01 gagal menutup dan KLA60AA05 gagal membuka. Kejadian KLA60AA01 gagal untuk tetap menutup, KLA60AA05 gagal untuk tetap membuka serta KLA60AA02 (*damper* satu arah)

gagal membuka juga merupakan kejadian yang dominan dalam menyebabkan kegagalan sistem, akan tetapi karena probabilitas kejadian ketiga *basic event* tersebut sangat kecil, maka pengaruhnya tidak besar dalam menyebabkan kegagalan sistem.

Untuk sistem tekanan rendah, kejadian yang dominan menyebabkan kegagalan sistem adalah kombinasi kejadian modul filter KLA 41 dan 42 tersumbat (secara bersama-sama). Kombinasi kejadian *manual damper* KLA41 atau KLA42 gagal untuk membuka dengan kejadian modul filter tersumbat, atau kombinasi *manual damper* KLA41 dan 42 gagal membuka secara bersamaan juga dominan dalam menyebabkan kegagalan sistem, tetapi karena peluang kegagalan *manual damper* KLA41 dan 42 sangat kecil, maka pengaruhnya dapat diabaikan dalam menyebabkan kegagalan sistem.

Tabel 4 dan 5 memberikan daftar *cutset* model signifikansi *basic event* tersebut terhadap kejadian pohon kegagalan untuk sistem venting kolam dan kegagalan sistem. sistem tekanan rendah. Dari jumlah kombinasi *basic event* dalam setiap *cut set*, dapat ditunjukkan

Tabel 4. Fault Tree Cut Set Untuk Top Event Sistem Venting Kolam

No.	Kombinasi Basic Event	Unavailability (Q)
1.	AA01 MOD FTC	0.003
2.	AA05 MOD FTO	0.003
3.	KLA62 FILT PLUG ::KLA61 FILT PLUG	1.34E-05
4.	AN301 BF FTR ::AN101 BF FTR ::AN201 BF FTR	1.75E-06
5.	AN301 BF FTR ::AN101 BF FTR ::AN201 BF FTS	7.25E-07
6.	AN301 BF FTR ::AN101 BF FTS ::AN201 BF FTR	7.25E-07
7.	AN301 BF FTS ::AN101 BF FTR ::AN201 BF FTR	7.25E-07
8.	AA02 BD FTO	5.83E-07
9.	AN301 BF FTS ::AN101 BF FTS ::AN201 BF FTR	3.01E-07
10.	AN301 BF FTR ::AN101 BF FTS ::AN201 BF FTS	3.01E-07
11.	AN301 BF FTS ::AN101 BF FTR ::AN201 BF FTS	3.01E-07
12.	AA01 MOD FRC	1.46E-07
13.	AA05 MOD FRO	1.46E-07
14.	AN301 BF FTS ::AN101 BF FTS ::AN201 BF FTS	1.25E-07
15.	EXT ELEC TR ::BR30 FTR ::BRV10 FTR ::BRV20 FTR	4.58E-10
16.	AA301 RD SC ::AN101 BF FTR ::AN201 BF FTR	1.27E-10
17.	AN301 BF FTR ::AA101 RD SC ::AN201 BF FTR	1.27E-10
18.	AN301 BF FTR ::AN101 BF FTR ::AA201 RD SC	1.27E-10
19.	AN301 BF FTR ::AN101 BF FTR ::AA202 BD FTO	8.46E-11
20.	AN301 BF FTR ::AA102 BD FTO ::AN201 BF FTR	8.46E-11
21.	AA302 BD FTO ::AN101 BF FTR ::AN201 BF FTR	8.46E-11
22.	KLA62AA01 MD FTO ::KLA61 FILT PLUG	6.41E-11
23.	KLA62AA02 MD FTO ::KLA61 FILT PLUG	6.41E-11
24.	KLA62 FILT PLUG ::KLA61AA01 MD FTO	6.41E-11
25.	KLA62 FILT PLUG ::KLA61AA02 MD FTO	6.41E-11
.....

Tabel 5. *Fault Tree Cut Set Untuk Top Event Sistem Tekanan Rendah*

No.	Kombinasi <i>Basic Event</i>	Unavailability (Q)
1.	KLA42 FILT PLUG ::KLA41 FILT PLUG	1.34E-05
2.	KLA40AN301_BF_FTR ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AN201_BF_FTR	1.75E-06
3.	KLA40AN301_BF_FTR ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AN201_BF_FTS	7.25E-07
4.	KLA40AN301_BF_FTR ::KLA40AN101_BF_FTS ::KLA40AN201_BF_FTR	7.25E-07
5.	KLA40AN301_BF_FTS ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AN201_BF_FTR	7.25E-07
6.	KLA40AN301_BF_FTS ::KLA40AN101_BF_FTS ::KLA40AN201_BF_FTR	3.01E-07
7.	KLA40AN301_BF_FTS ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AN201_BF_FTS	3.01E-07
8.	KLA40AN301_BF_FTR ::KLA40AN101_BF_FTS ::KLA40AN201_BF_FTS	3.01E-07
9.	KLA40AN301_BF_FTS ::KLA40AN101_BF_FTS ::KLA40AN201_BF_FTS	1.25E-07
10.	EXT_ELEC_TR ::BR30_FTR ::BRV10_FTR ::BRV20_FTR	4.58E-10
11.	KLA40AN301_BF_FTR ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AA201_RD_SC	1.27E-10
12.	KLA40AN301_BF_FTR ::KLA40AA101_RD_SC ::KLA40AN201_BF_FTR	1.27E-10
13.	KLA40AA302_BD_FTO ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AN201_BF_FTR	1.27E-10
14.	KLA40AA301_RD_SC ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AN201_BF_FTR	1.27E-10
15.	KLA40AN301_BF_FTR ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AA202_BD_FTO	8.46E-11
16.	KLA40AN301_BF_FTR ::KLA40AA102_BD_FTO ::KLA40AN201_BF_FTR	8.46E-11
17.	KLA42 FILT PLUG ::KLA41AA02_MD_FTO	6.41E-11
18.	KLA42AA01_MD_FTO ::KLA41 FILT PLUG	6.41E-11
19.	KLA42AA02_MD_FTO ::KLA41 FILT PLUG	6.41E-11
20.	KLA42 FILT PLUG ::KLA41AA01_MD_FTO	6.41E-11
21.	KLA40AA302_BD_FTO ::KLA40AN101_BF_FTS ::KLA40AN201_BF_FTR	5.27E-11
22.	KLA40AN301_BF_FTS ::KLA40AA101_RD_SC ::KLA40AN201_BF_FTR	5.27E-11
23.	KLA40AA301_RD_SC ::KLA40AN101_BF_FTS ::KLA40AN201_BF_FTR	5.27E-11
24.	KLA40AA302_BD_FTO ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AN201_BF_FTS	6.41E-11
25.	KLA40AA301_RD_SC ::KLA40AN101_BF_FTR ::KLA40AN201_BF_FTS	6.41E-11
.....

Selain dari minimal *cut set* (kombinasi terkecil *basic event* dalam *cut set*), investigasi komponen (*basic event*) kritis dalam pemodelan keandalan dapat dilakukan berdasarkan parameter *importance*. Tabel 6 dan 7 memperlihatkan nilai *importance* untuk masing-masing *basic event* dalam diagram pohon kegagalan sistem venting kolom dan sistem tekanan rendah.

Dari parameter *F-Vesely Importance* pada Tabel 6, dapat terlihat bahwa KLA60AA01 gagal menutup (AA01_MOD_FTC) dan KLA60AA05 gagal membuka (AA05_MOD_FTO) masing-masing mempunyai nilai *importance* sebesar 0,4984 terhadap kejadian Kegagalan Sistem Venting Kolam, dibandingkan dengan kejadian lain yang sangat kecil. Pada Tabel 7, modul filter KLA41 dan 42 tersumbat mempunyai nilai *importance* 0.73 terhadap kegagalan sistem tekanan rendah,

dibandingkan dengan kejadian lain yang cukup rendah.

Parameter *BirnBaun Importance* diperlukan untuk mengevaluasi sensitivitas perubahan nilai probabilitas kejadian *top event* karena perubahan nilai probabilitas kejadian *basic event*. Dari tabel 6 dapat terlihat bahwa KLA60AA01 gagal menutup (AA01_MOD_FTC), KLA60AA05 gagal membuka (AA05_MOD_FTO), KLA60AA01 gagal untuk tetap menutup (AA01_MOD_FRC), KLA60AA05 gagal untuk tetap membuka (AA05_MOD_FRO) dan KLA60AA02 gagal membuka (AA02_BD_FTO) mempunyai nilai sensitivitas yang sangat besar terhadap probabilitas kegagalan sistem venting kolom. Dalam hal ini, perubahan probabilitas kejadian satu atau lebih *basic event* di atas akan secara langsung merubah nilai probabilitas kegagalan sistem secara signifikan. Tabel 7

memperlihatkan modul filter KLA41 dan 42 tersumbat mempunyai sensitifitas yang lebih besar dibandingkan dengan *basic event* yang lain terhadap perubahan probabilitas kegagalan sistem tekanan rendah, akan tetapi sensitifitasnya tidak terlalu besar dalam merubah nilai probabilitas.

Tabel 6. Fault Tree Importance Untuk Top Event Sistem Venting Kolam

No.	Events	F-Vesely	BirnBaun
1.	AA05_MOD_FTO	0.498403	1
2.	AA01_MOD_FTC	0.498403	1
3.	KLA62_FILT_PLUG	0.002227	0.003661
4.	KLA61_FILT_PLUG	0.002227	0.003661
5.	AN201_BF_FTR	0.000581	0.000291
6.	AN101_BF_FTR	0.000581	0.000291
7.	AN301_BF_FTR	0.000581	0.000291
8.	AN101_BF_FTS	0.000241	0.000291
9.	AN201_BF_FTS	0.000241	0.000291
10.	AN301_BF_FTS	0.000241	0.000291
11.	AA02_BD_FTO	9.69E-05	1
12.	AA05_MOD_FRO	2.42E-05	1
13.	AA01_MOD_FRC	2.42E-05	1
14.	EXT_ELEC_TR	7.62E-08	4.95E-05
15.	BRV20_FTR	7.61E-08	1.25E-08
16.	BRV10_FTR	7.61E-08	1.25E-08
17.	BR30_FTR	7.61E-08	1.25E-08
18.	AA101_RD_SC	4.22E-08	0.000291
19.	AA201_RD_SC	4.22E-08	0.000291
20.	AA301_RD_SC	4.22E-08	0.000291
21.	AA102_BD_FTO	2.82E-08	0.000291
22.	AA202_BD_FTO	2.82E-08	0.000291
23.	AA302_BD_FTO	2.82E-08	0.000291
24.	KLA61AA01_MD_FTO	1.06E-08	0.003661
25.	KLA61AA02_MD_FTO	1.06E-08	0.003661
26.	KLA62AA01_MD_FTO	1.06E-08	0.003661
27.	KLA62AA02_MD_FTO	1.06E-08	0.003661
28.	OP_MAN_FTS	1.06E-10	3.53E-10
29.	BRV20_FTS	4.21E-11	3.29E-11
30.	BRV30_FTS	4.21E-11	3.29E-11
31.	BRV10_FTS	4.21E-11	3.29E-11

Tabel 7. *Fault Tree Importance* Untuk *Top Event* Sistem Tekanan Rendah

No.	Events	F-Vesely	BirnBaun
1.	KLA41_FILT_PLUG	0.730191	0.003661
2.	KLA42_FILT_PLUG	0.730191	0.003661
3.	KLA40AN201_BF_FTR	0.190615	0.000291
4.	KLA40AN101_BF_FTR	0.190615	0.000291
5.	KLA40AN301_BF_FTR	0.190612	0.000291
6.	KLA40AN101_BF_FTS	0.079138	0.000291
7.	KLA40AN201_BF_FTS	0.079138	0.000291
8.	KLA40AN301_BF_FTS	0.079137	0.000291
9.	EXT_ELEC_TR	2.50E-05	4.95E-05
10.	BRV20_FTR	2.50E-05	1.25E-08
11.	BRV10_FTR	2.50E-05	1.25E-08
12.	BR30_FTR	2.50E-05	1.25E-08
13.	KLA40AA101_RD_SC	1.38E-05	0.000291
14.	KLA40AA201_RD_SC	1.38E-05	0.000291
15.	KLA40AA302_BD_FTO	1.38E-05	0.000291
16.	KLA40AA301_RD_SC	1.38E-05	0.000291
17.	KLA40AA102_BD_FTO	9.23E-06	0.000291
18.	KLA40AA202_BD_FTO	9.23E-06	0.000291
19.	KLA41AA01_MD_FTO	3.49E-06	0.003661
20.	KLA41AA02_MD_FTO	3.49E-06	0.003661
21.	KLA42AA01_MD_FTO	3.49E-06	0.003661
22.	KLA42AA02_MD_FTO	3.49E-06	0.003661
23.	OP_MAN_FTS	3.46E-08	3.53E-10
24.	BRV20_FTS	1.38E-08	3.29E-11
25.	BRV30_FTS	1.38E-08	3.29E-11
26.	BRV10_FTS	1.38E-08	3.29E-11

KESIMPULAN

Dengan menggunakan data keandalan komponen generik, nilai probabilitas ketidaksediaan (*unavailability*) sistem venting kolam untuk beroperasi saat dibutuhkan sebesar $6.00E-03$ dan sistem tekanan rendah sebesar $1.84E-05$. Sedangkan nilai probabilitas ketidakandalan (*unreliability*) sistem venting kolam ketika beroperasi sebesar $1.93E-06$ dan sistem tekanan rendah sebesar $1.30E-07$. Perbedaan nilai probabilitas ketidaksediaan dan ketidakandalan untuk masing-masing sistem menunjukkan bahwa kedua sistem lebih berpeluang gagal saat start dibandingkan dengan saat beroperasi, dimana dalam keadaan normal kedua sistem tersebut berada dalam kondisi *standby*.

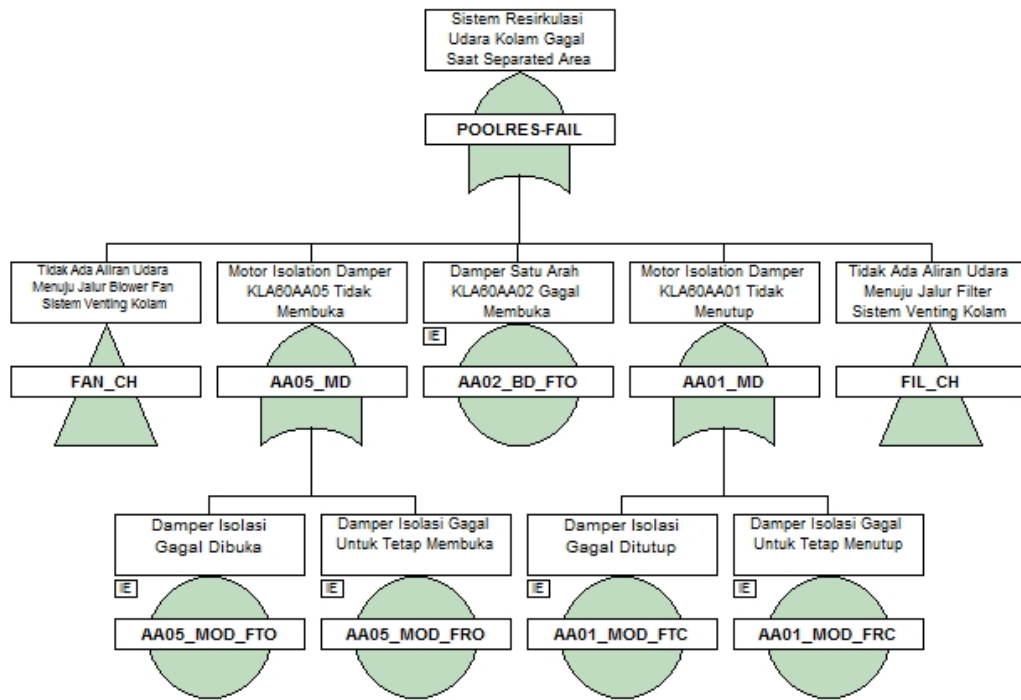
Dari hasil analisis *minimal cut-set* dan nilai *importance* masing-masing model pohon kegagalan kedua sistem tersebut di atas, dapat disimpulkan bahwa komponen yang dominan menyebabkan kegagalan sistem venting kolam adalah *damper* isolasi KLA60AA01 dan KLA60AA05.

Dalam hal ini, KLA60AA01 yang secara normal dalam kondisi terbuka, dibutuhkan menutup ketika sistem diperlukan beroperasi, sedangkan KLA60AA05 yang secara normal dalam keadaan tertutup, dibutuhkan membuka saat sistem diperlukan beroperasi. Untuk sistem tekanan rendah, komponen yang dominan berasal dari modul filter KLA41 dan KLA42, dimana ketika kedua modul ini tersumbat secara bersamaan maka sistem akan mengalami kegagalan.

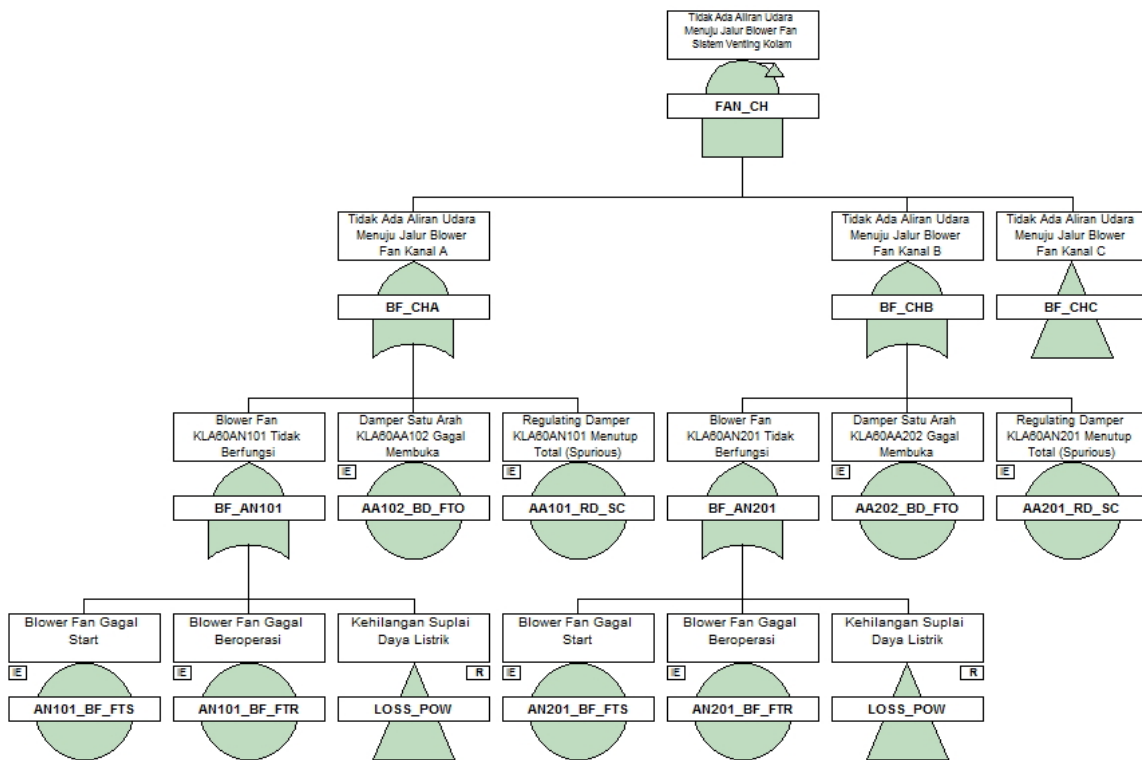
DAFTAR PUSTAKA

1. PusatReaktorSerbaGuna - BatanTenagaNuklirNasional, LaporanAnalisisKeselamatan RSG-GAS Rev. 10, Desember 2008.
2. ITEM TOOLKIT, User Manual Fault Tree Module, Item Software, Inc., Anaheim,USA, October 2005.
3. IAEA-TECDOC-478, Component Reliability Data for Use in Probabilistic Safety Assessment, IAEA, Vienna, 1988.
4. Fullwood, R.R., Probabilistic Safety Assessment in the Chemical and Nuclear Industries, Butterworth-Heinemann, 2000.
5. Cadwallader, L.C., Ventilation Systems Operating Experience Review for Fusion Applications, INEEL/EXT-99-001318, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho, 1999.

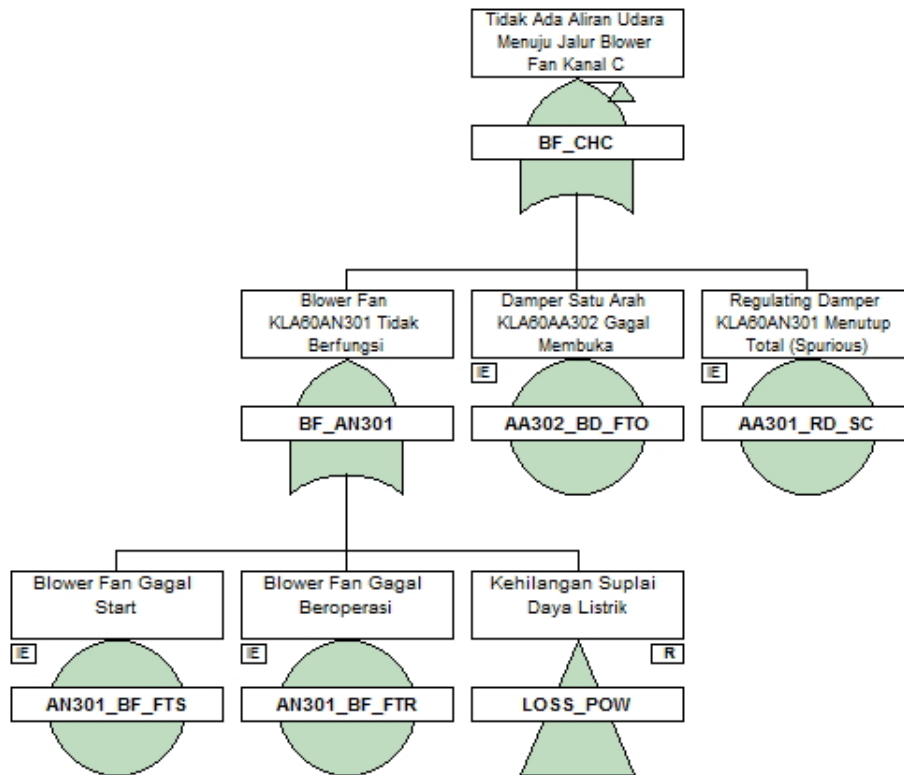
LAMPIRAN



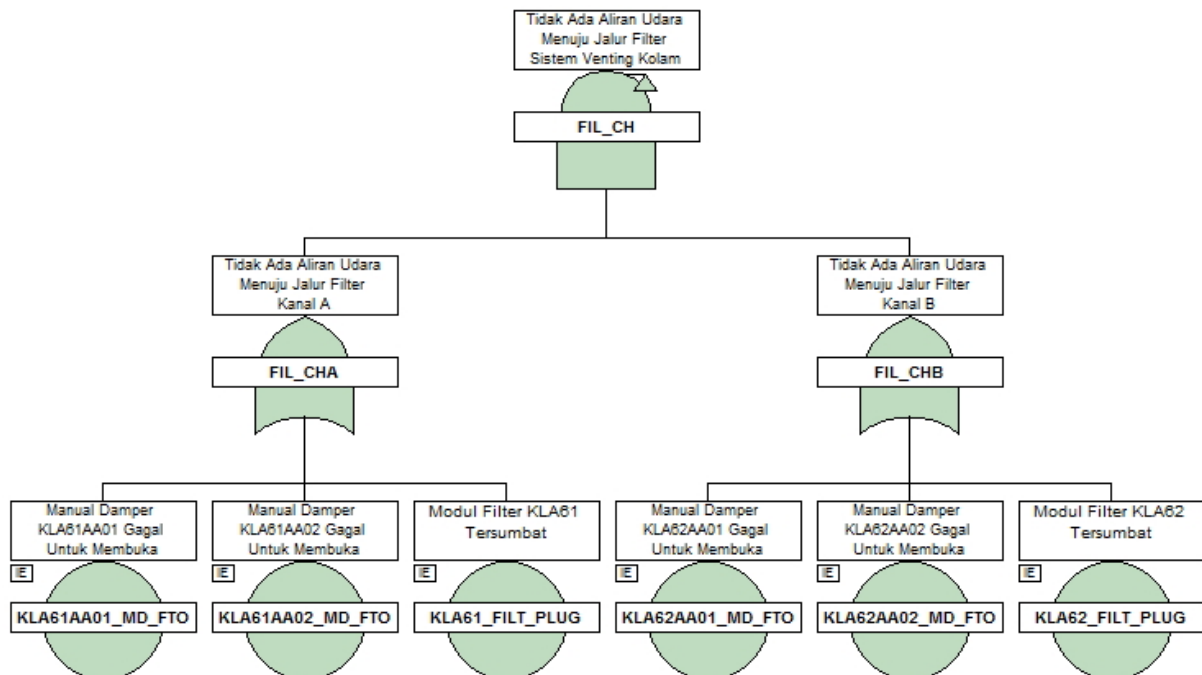
Gambar 4a. Model Pohon Kegagalan Sistem Venting Kolam



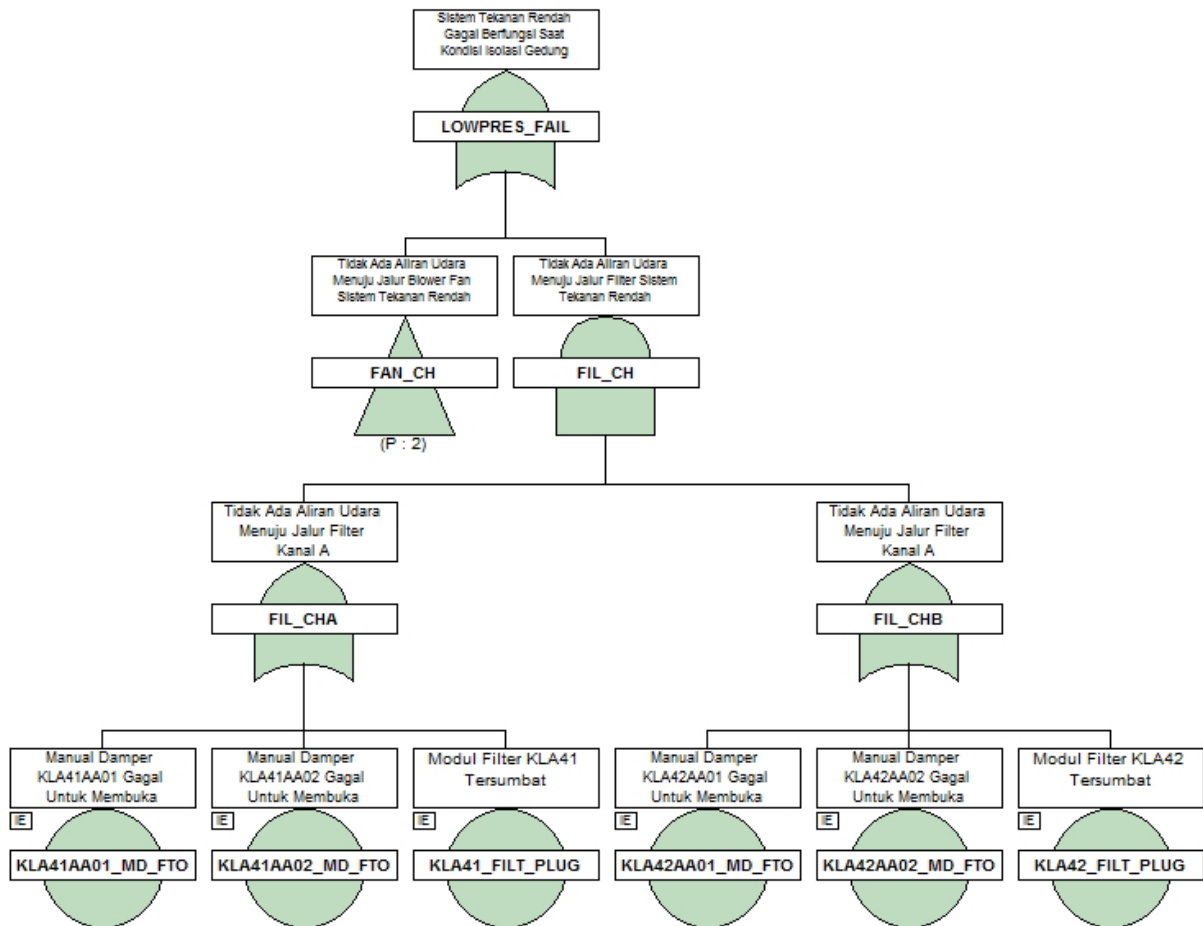
Gambar 4b. Model Pohon Kegagalan Sistem Venting Kolam (lanjutan)



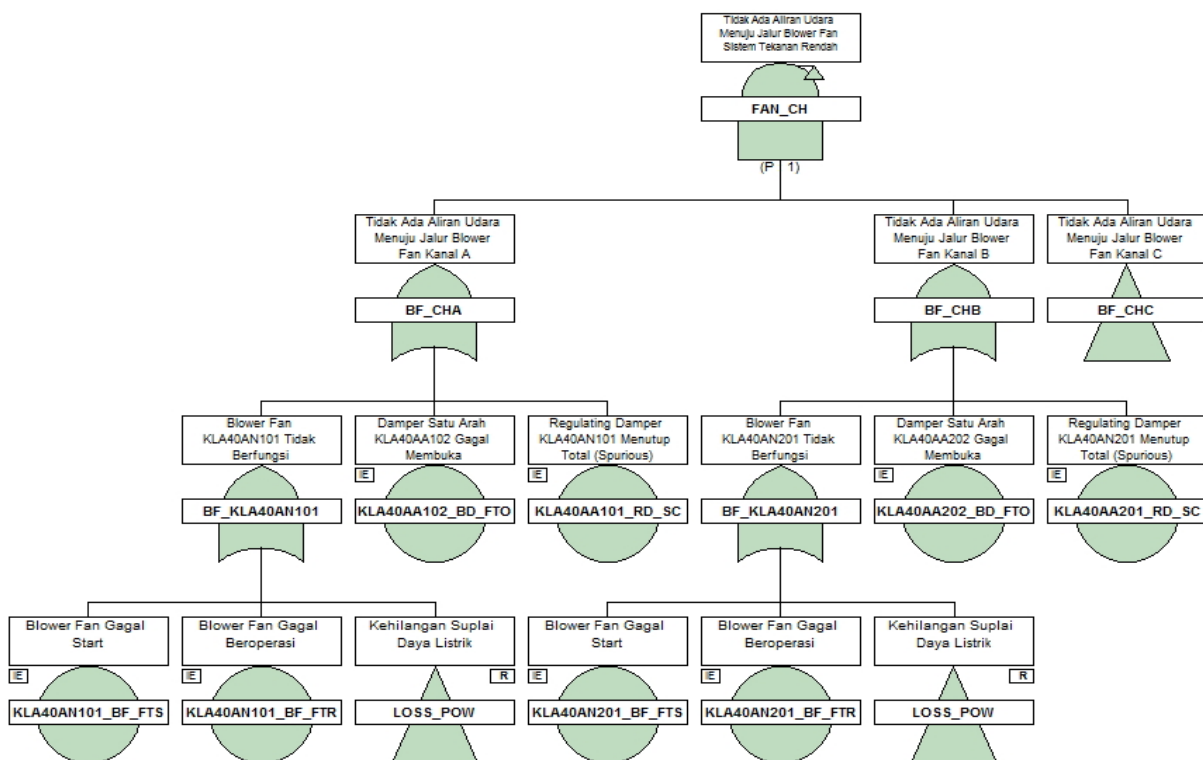
Gambar 4c. Model Pohon Kegagalan Sistem Venting Kolam (Lanjutan)



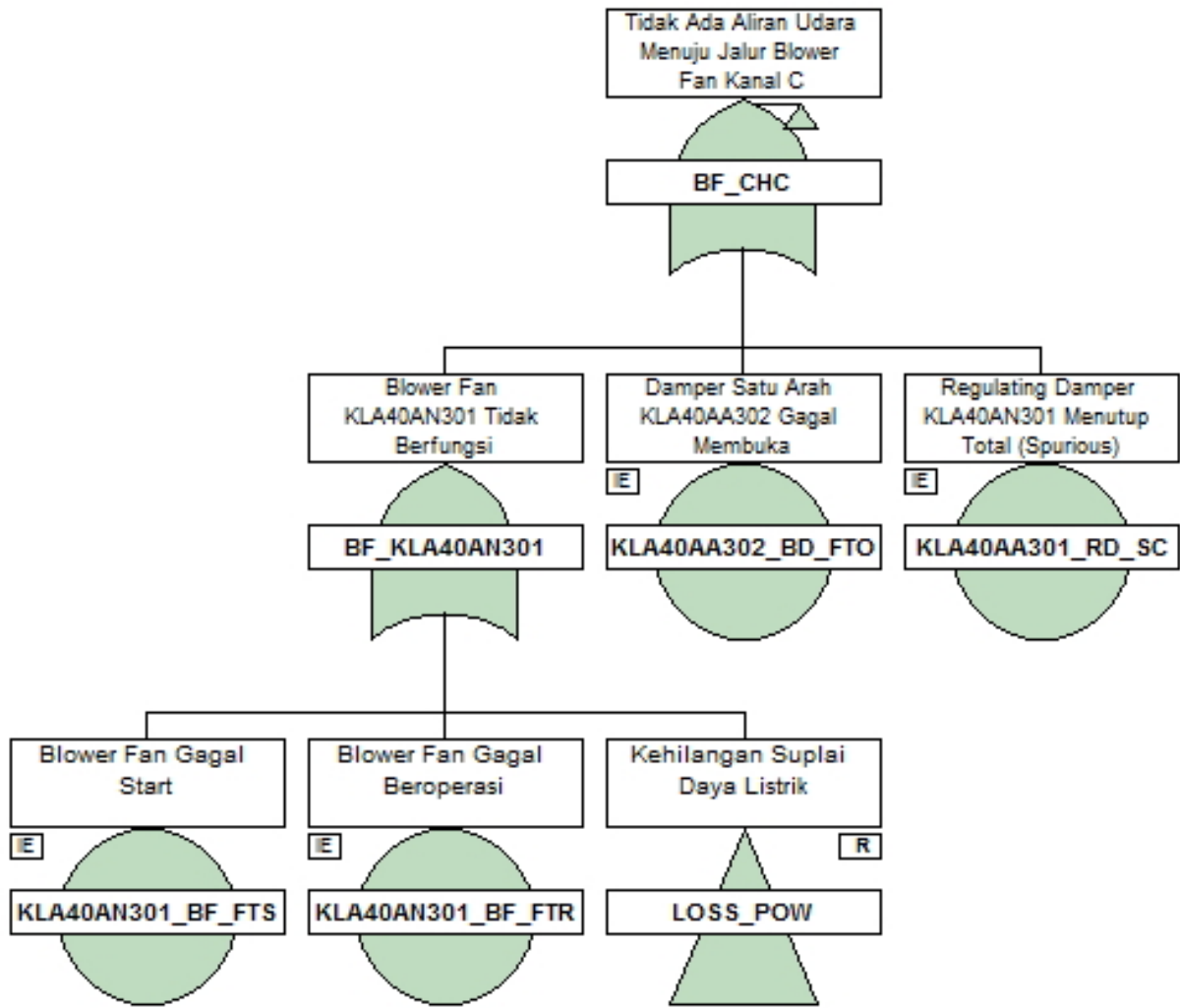
Gambar 4d. Model Pohon Kegagalan Sistem Venting Kolam (Lanjutan)



Gambar 5a. Model Pohon Kegagalan Sistem Tekanan Rendah



Gambar 5b. Model Pohon Kegagalan Sistem Tekanan Rendah (Lanjutan)



Gambar 5c. Model Pohon Kegagalan Sistem Tekanan Rendah (Lanjutan)