

## EVALUASI KEANDALAN MENGGUNAKAN PETRI NET PADA KEJADIAN KEHILANGAN ALIRAN PENDINGIN REAKTOR RISET RSG-GAS

Ahmad Abtokhi dan Johnny Situmorang  
Bidang Pengembangan Teknologi Keselamatan Nuklir  
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Gedung No. 80, Setu, Tangerang Selatan 15310

### ABSTRAK

**EVALUASI KEANDALAN MENGGUNAKAN PETRI NET PADA KEJADIAN KEHILANGAN ALIRAN PENDINGIN PRIMER REAKTOR RISET RSG-GAS.** Metode Petri Net merupakan metode probabilistik yang dapat dipakai dalam mengevaluasi keselamatan instalasi nuklir seperti reaktor daya dan reaktor riset. Pendekatan yang dilakukan adalah penyusunan Petri Net berdasarkan analisis pohon kegagalan. Evaluasi dilakukan untuk kejadian hilangnya aliran pendingin primer LOFA (*Loss of Flow Accident*) pada reaktor riset RSG-GAS saat operasi berlangsung. Data keandalan yang digunakan adalah data generik yang dikoreksi dengan data pengalaman operasi RSG-GAS teras 35 sampai dengan teras 77. Koreksi data dilakukan dengan pendekatan laju pertumbuhan keandalan Duane. Kejadian dipertimbangkan karena disebabkan salah satu atau lebih dari kejadian "Kehilangan Aliran Karena Katup Isolasi", "Kehilangan Aliran Dari Jalur Penukar Panas", dan "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Pompa Primer". Sebagai hasil evaluasi diperoleh nilai probabilitas kejadian adalah sebesar  $1,99E-6$  dengan kontribusi pengaruh ketiga kejadian perantara relatif tidak berbeda.

Kata Kunci: Petri Net, Analisis Pohon Kegagalan, LOFA, RSG-GAS

### ABSTRACT

**RELIABILITY EVALUATION USING PETRI NET FOR LOSS OF FLOW ACCIDENT IN RESEARCH REACTOR RSG-GAS.** Petri Net methods is a probabilistic method which can be used to evaluate nuclear installation safety like research reactors and power reactors. The adopted approaches to construct Petri Net is based on fault tree analysis and in this paper is meant to describe the loss of flow accidents (LOFA) on operation modes of RSG GAS. The used reliability data is based on generic data which are corrected by operation experience data for core cycle of 35 up to 77 and corrected by Duane's reliability growth rate modelling. The event is considered due to one or more events of loss of flow that caused by isolation valve, loss of flow is caused by heat exchanger line, and/or loss of flow is caused by primary pump failure. As a result of evaluation is the occurrence probability is  $1,991E-6$  and each of three subevent has the relative same contribution.

Key Words: Petri Net, Fault Tree Analysis, LOFA, RSG-GAS

### PENDAHULUAN

Kuantifikasi pohon kegagalan didasarkan pada *minimal cut set* yang diperoleh dari solusi aljabar Boolean terhadap kejadian dasar (*basic events*) yang disertai dengan operasi *cut off* terhadap *minimal cut set* yang dianggap tidak berpengaruh signifikan maupun berdasarkan penyetulan nilai probabilitas yang dianggap cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Sebagai konsekuensinya besaran keandalan yang diperoleh sangat tergantung dengan kompleksitas pohon kegagalan yang terbangun yang jika tidak ditangani dengan hati-hati dapat mengurangi akurasi perhitungan.

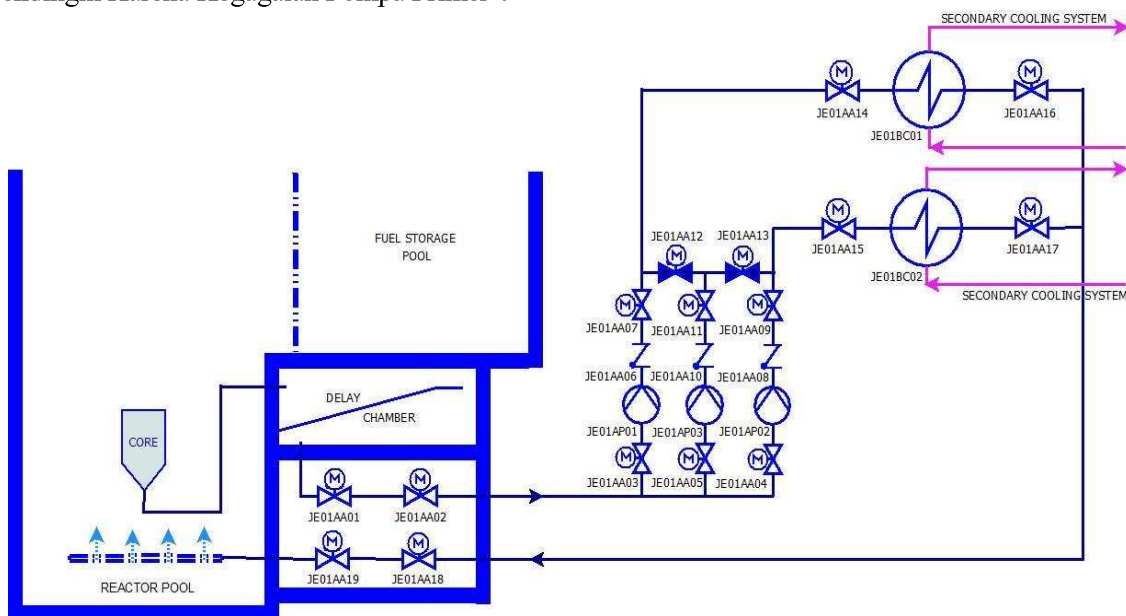
Pada tulisan ini digunakan pendekatan Petri Net yang merupakan metode perhitungan untuk mengestimasi probabilitas suatu kejadian puncak dengan mempertimbangkan keadaan kejadian mulai dari kejadian dasar atau pemicu hingga ke kejadian puncak. Analisis keandalan dengan metode Petri Net yang digunakan mengacu pada analisis dengan teknik pengembangan pohon kegagalan (*Fault Tree Analysis*; FTA) yang sering digunakan untuk mengevaluasi keandalan dan ketersediaan suatu sistem. Dalam tulisan ini pohon kegagalan yang digunakan adalah yang telah dikembangkan untuk

evaluasi keandalan untuk kejadian kehilangan aliran pendingin primer reaktor riset RSG-GAS. Dari pohon kegagalan yang dikembangkan tersebut Petri Net disusun bersesuaian untuk mendefinisikan interaksi logis dari kegagalan sistem.

Berdasarkan konfigurasi petri net tersebut, model keandalan dapat diperoleh besaran nilai probabilitas terjadinya kejadian yang dihitung berdasarkan perhitungan kegagalan sistem yang disebabkan oleh kegagalan komponen dalam sistem dengan data generik yang dikoreksi dengan pendekatan laju pertumbuhan keandalan Duane. Sebagai hasil perhitungan akan diperoleh nilai probabilitas keandalan dan ketersediaan serta tolok ukur pentingnya terhadap kemungkinan terjadinya kegagalan sistem yang sekaligus juga menjadi penyebab utama terjadinya Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin. Dengan hasil ini maka kemudian akan dapat menjadi perbandingan metodologis perhitungan besar probabilitas terjadinya kejadian tersebut.

## METODOLOGI

Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin Primer atau biasanya disebut LOFA (*Loss of Flow Accident*) merupakan kejadian yang disebabkan oleh kegagalan Sistem Pendingin Primer ketika reaktor sedang beroperasi. Sesuai dengan konstruksi Sistem Pendingin Primer, Gambar 1, kejadian dapat terjadi karena salah satu atau lebih sebab dari kejadian: "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Katup Isolasi", "Kehilangan Aliran Pendingin Dari Jalur Penukar Panas", atau "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Pompa Primer".



Gambar 1. Diagram Alir Sistem Pendingin Primer RSG-GAS[1]

Untuk kejadian "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Katup Isolasi" dapat 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 (*instantaneously closed*). Kegagalan ini pada dasarnya dapat diatasi apabila operator dapat membuka kembali katup yang salah tersebut dengan segera. Untuk kejadian "Kehilangan Aliran Pendingin Dari Jalur Penukar Panas" dapat terjadi karena satu atau lebih katup-katup pada jalur penukar panas menutup secara salah atau salah satu penukar panas mengalami penyumbatan. Untuk kejadian "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Pompa Primer" dapat disebabkan oleh kegagalan dua pompa primer saat sedang beroperasi dan pompa cadangan tidak bisa dioperasikan saat kedua pompa 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. Kejadian Kehilangan Pendingin diasumsikan 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. Sebab kejadian lain yang perlu dipertimbangkan adalah karena kehilangan suplai daya listrik pada pompa.

Data keandalan untuk masing-masing kejadian dasar yaitu kejadian pada tingkat komponen berdasarkan modus kegagalan diacu dari sumber data generik seperti terlihat pada Tabel 1. Selanjutnya data keandalan ini dikoreksi dengan tidak mempertimbangkan efek penuaan yang dianggap tidak mungkin independen dari kontribusi terhadap kegagalan yang terjadi terhadap waktu. Untuk koreksi digunakan data pengalaman operasi yaitu mulai teras 35 sampai dengan teras 77. Pendekatan untuk koreksi yang digunakan metode pertumbuhan keandalan oleh Duane[2] yang mengamati suatu korelasi empiris antara laju kegagalan kumulatif dengan waktu operasi kumulatif yaitu: bahwa sesuai dengan yang berbasis pertimbangan waktu rata-rata antara kegagalan laju kegagalan linier dengan persamaan:

$$M_c = KT^\alpha \quad (1)$$

- $M_c$  = waktu rata-rata antara kegagalan (*MTBF = Mean Time Between Failure*) yang sama dengan satu per laju kegagalan.  
 $\alpha$  = konstanta laju pertumbuhan  
 $K$  = konstanta

Tabel 1. Daftar dan Data Keandalan Komponen Sistem Pendingin Primer

No	Jenis Komponen	Modus Kegagalan	Laju Kegagalan (dari sumber data generik)
1.	Motor Operated Valve	2 Katup gagal dibuka 3 Katup gagal untuk tetap membuka	1.07E-3/demand <sup>(3)</sup> 4.45E-8/hour <sup>(3)</sup>
2.	Check Valve	Katup gagal membuka	1.3E-5/demand <sup>(3)</sup>
3.	Motor Operated Pump	4 Gagal Start 5 Gagal operasi (setelah start berhasil)	1.47E-3/demand <sup>(3)</sup> 4.54E-6/hour <sup>(3)</sup>
4.	Penukar Panas	Tersumbat	6.45E-07/hour <sup>(3)</sup>
5.	Human Error	- Mengoperasikan Pompa - Membuka/menutup katup	2.6E-2 <sup>(4)</sup> 2.8E-3 <sup>(4)</sup>
6.	Kehilangan Sumber Daya Listrik	PLN Trip	5.560E-4/hour (1 kali dalam 2.5 bulan; judgment dari data perawatan)

Konfigurasi Petri Net keandalan dilakukan berbasis pohon kegagalan yang telah ditetapkan sebelumnya dengan pendekatan bahwa Petri Net adalah grafik biparti berarah dan didefinisikan sebagai fungsi enam variabel: [5]

$$N = [T, P, A, M_0, I(t), O(t)] \quad (2)$$

dengan

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  adalah himpunan transisi, setiap transisi mewakili suatu kejadian atau tindakan;

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_l\}$  adalah himpunan tempat yang mewakili kondisi atau konsekuensi kejadian;

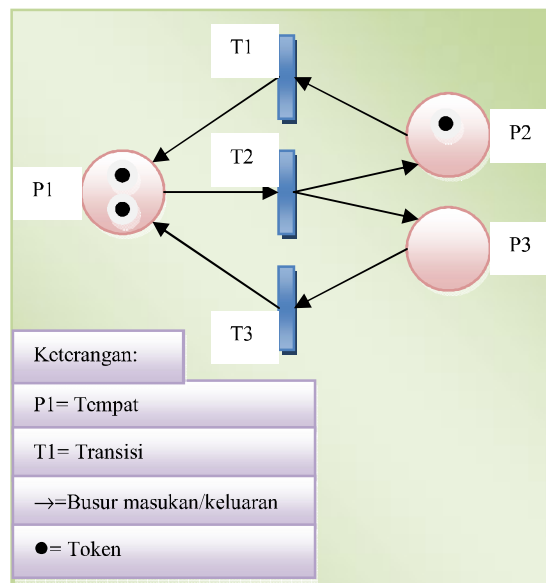
$A = A \subseteq \{T \times P\} \cup \{P \times T\}$  himpunan busur berarah yang menghubungkan transisi ke tempat dan tempat ke transisi.

$M_0$  = penandaan awal sistem yang mewakili status awal sistem. Suatu penandaan  $M$  dapat disajikan sebagai vektor  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_l\}$

$I(t) = \{p | (p, t) \in A\}$  himpunan tempat masukan transisi  $t$ .

$O(t) = \{p | (p, t) \in A\}$  himpunan tempat keluaran transisi  $t$ .

Busur berarah menghubungkan transisi ke tempat dan sebaliknya. Suatu busur berarah dari tempat ke transisi disebut busur masukan dan dari transisi ke tempat disebut busur keluaran. Suatu tindakan dinyatakan sebagai penghangusan transisi, perilaku Petri Net ditentukan oleh aturan penghangusan: token dalam tempat dengan busur ke arah transisi mengindikasikan bahwa kondisi memenuhi dan transisi siap untuk hangus akan terjadi kejadian; pada penghapusan, transisi  $t$  mengkonsumsi satu token sepanjang setiap busur masukan; dan pada penghapusan, transisi  $t$  menghasilkan satu token sepanjang setiap busur keluaran, lihat contoh penyajian grafis Petri Net pada Gambar 2.



Gambar 2. Petri Net dengan 3 tempat ( $n=3$ ) dan 3 transisi ( $l=3$ )

Dengan mempertimbangkan logika Boolean yang biasa digunakan untuk menghitung penyebab kegagalan, penyusunan Petri Net dilakukan dengan mengkonversi logik dari pohon kegagalan berdasarkan korelasi seperti disebutkan pada Tabel 2[4]. Penentuan kegagalan sistem diidentifikasi berdasarkan pendekatan pohon kegagalan untuk kejadian awal yang dipertimbangkan. Dengan menggunakan korelasi antara pohon kegagalan dengan Petri Net seperti dijelaskan pada Tabel 2, maka konfigurasi Petri Net berbasis logika pohon keandalan dapat ditentukan. Untuk suatu waktu tertentu perhitungan transisi dari satu tempat (kejadian) ke kejadian lainnya ditentukan oleh fungsi tahapan satuan  $u(t)$  berdasarkan[5].

$$m_i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} u(t - kT - D) \tag{3}$$

dengan:

- $m_i(t)$  = penandaan dari tempat  $P_i$
- $T$  = waktu antara kegagalan kejadian (dasar)
- $d$  = waktu tunda transisi  $i$  (total waktu tunda  $D$ )
- $k$  = status system

Perubahan penandaan dari suatu tempat ditentukan berdasarkan transisi yang mungkin yaitu: transisi dengan masukan tunggal, transisi dengan masukan multipel berupa: transisi struktur OR dan transisi struktur AND, transisi dengan masukan tunggal dan lingkaran (loop), dan transisi dengan busur halang (*inhibitor*). Perhitungan untuk setiap model transisi dilakukan masing-masing berdasarkan penyesuaian terhadap persamaan (3) yaitu:

a. Transisi dengan masukan tunggal

$$m_{top}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} u(t - kT - d), \text{ dalam hal ini : } m_{top}(t) = m_2(t) \tag{4}$$

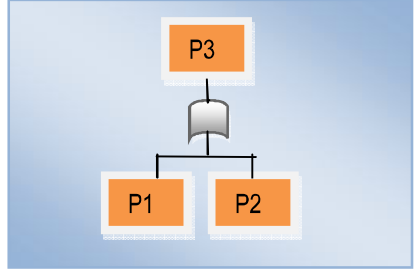
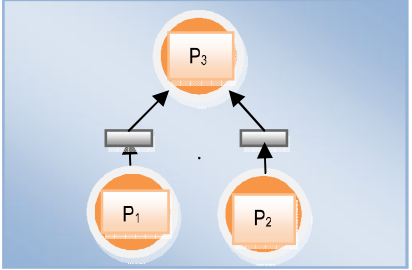
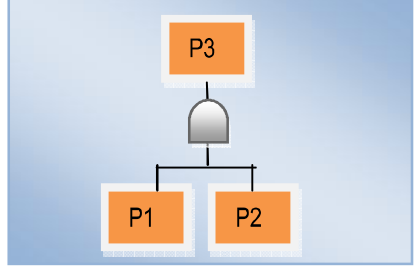
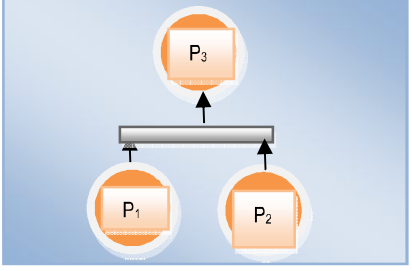
b. Transisi dengan masukan multipel struktur OR

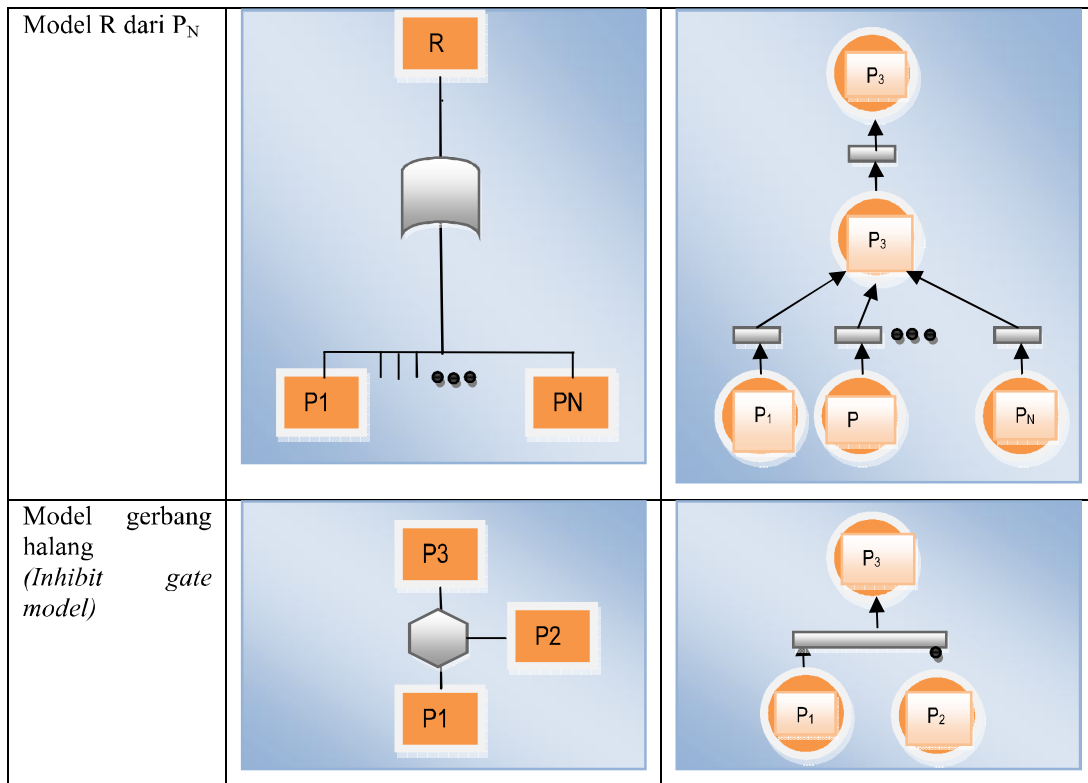
$$m_{top}(t) = \sum_{s=1}^n \sum_{k=1}^{\infty} u(t - kT_s - d_s) \tag{5}$$

c. Transisi dengan masukan multipel struktur AND

$$m_{top}(t) = \min \left[ \sum_{k=1}^{\infty} u(t - kT_1 - d), \sum_{k=1}^{\infty} u(t - kT_2 - d), \dots, \sum_{k=1}^{\infty} u(t - kT_n - d) \right] \tag{6}$$

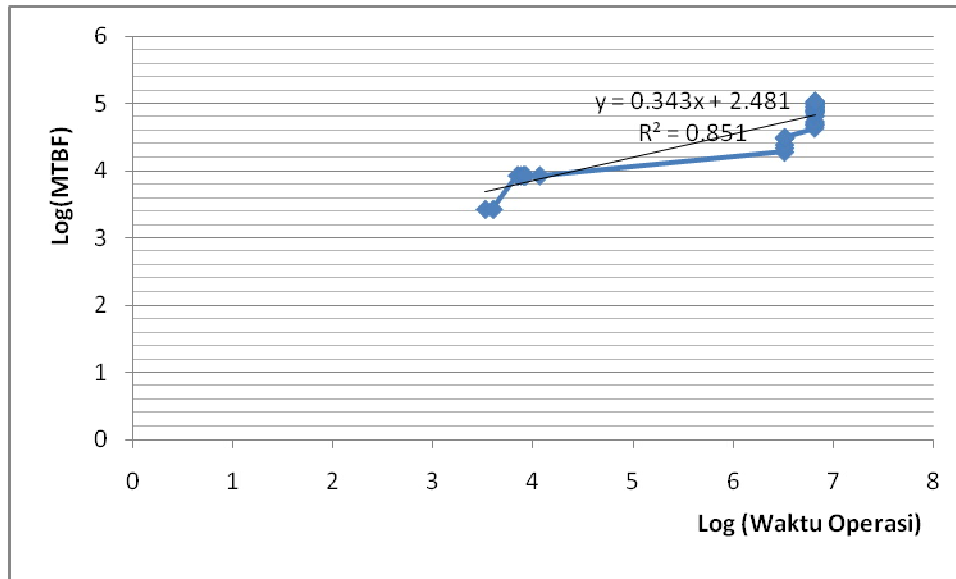
Tabel 2. Korelasi antara Pohon Kegagalan dan Petri Net(5)

	Pohon Kegagalan	Petri Net
Model OR		
Model AND		



## HASIL KUANTIFIKASI DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan untuk koreksi data yang diplot dalam skala logaritmik dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil keseluruhan disusun dalam Tabel 3. Data laju kegagalan terkoreksi yang diperoleh sebagian lebih kecil dari data generik yaitu katup gagal dibuka, pompa motor gagal start, dan human error untuk mengoperasikan pompa dan membuka/menutup katup. Sedang data laju kegagalan terkoreksi yang lebih besar dari yang generik adalah katup gagal untuk tetap membuka, katup gagal membuka, motor pompa gagal operasi setelah start berhasil, dan penukar panas tersumbat. Pertimbangan alasan perbedaan masih perlu justifikasi lebih lanjut terhadap data pengalaman operasi selain faktor lingkungan dan modus operasi sistem yang berpengaruh, manajemen pemeliharaan dan pengujian juga sangat berpengaruh terhadap keandalan komponen. Secara khusus data kehilangan sumber daya listrik yaitu PLN trip, cukup jauh lebih besar dari data generik. PLN trip sepenuhnya sangat tergantung pada pihak PLN.

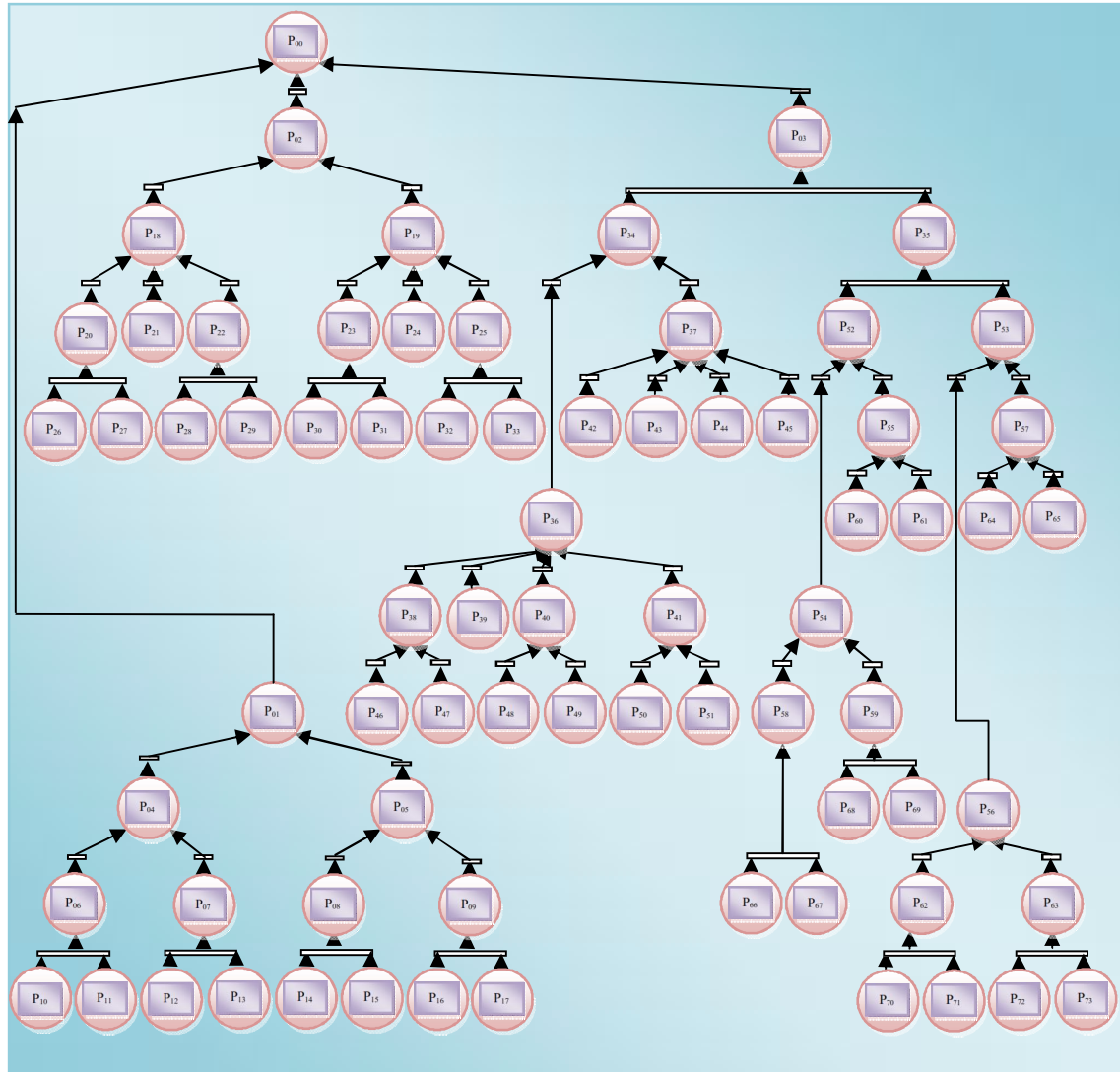


Gambar 3. Korelasi empiris laju kegagalan dan waktu operasi

Tabel 3. Data Keandalan Komponen Sistem Pendingin Primer

No	Jenis Komponen	Modus Kegagalan	Laju Kegagalan	
			Generik	Terkoreksi
1.	Motor Operated Valve	6 Katup gagal dibuka	1.07E-3/demand	3.71E-4/demand
		7 Katup gagal untuk tetap membuka	4.45E-8/hour	4.00E-5/hour
2.	Check Valve	Katup gagal membuka	1.3E-5/demand	1.3E-5/demand
3.	Motor Operated Pump	8 Gagal Start	1.47E-3/demand	1.47E-3/demand
		9 Gagal operasi (setelah start berhasil)	4.54E-6/hour	4.54E-6/hour
4.	Penukar Panas	Tersumbat	6.45E-07/hour	6.45E-07/hour
5.	Human Error	- Mengoperasikan Pompa	2.6E-2	2.6E-2
		- Membuka/menutup katup	2.8E-3	2.8E-3
6.	Kehilangan Sumber Daya Listrik	PLN Trip	5.560E-4/hour	0.001/hour

Konfigurasi Petri Net berbasis konversi pohon kegagalan yang telah dikembangkan sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 4. Hasil perhitungan laju kegagalan untuk kejadian puncak "Kehilangan Aliran Karena Kegagalan Sistem Pendingin Primer" (LOFA) adalah sebesar 1,99E-06. Sedangkan besar laju kegagalan untuk masing-masing kejadian perantara, yaitu berturut-turut: "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Katup Isolasi" sebesar 7,18E-07, "Kehilangan Aliran Pendingin Dari Jalur Penukar Panas" sebesar 7,36E-07, dan "Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Pompa Primer" sebesar 5,33E-07. Dengan laju kegagalan demikian dapat dinyatakan bahwa ketiga kejadian perantara berkontribusi hampir sama terhadap terjadinya kegagalan hilangnya aliran pendingin primer yang dievaluasi. Selain itu juga dapat dinyatakan bahwa kontribusi setiap kejadian dasar (*basic event*) untuk menjadikan kejadian perantara terjadi, dan khususnya kepada kejadian puncak terjadi tidak cukup signifikan besar pengaruhnya.



Gambar 4. Petri Net kejadian kehilangan air pendingin primer RSG-GAS

Sebagai hasil kuantifikasi dapat dinyatakan bahwa perhitungan nilai laju kegagalan dengan perhitungan menggunakan metode Petri Net ditunjukkan pada Tabel 4. Perhitungan dengan metode Petri Net dilakukan dengan menggunakan waktu rata-rata antara kegagalan dari nilai rata-rata pengalaman operasi dan asumsi waktu tunda antara kegagalan untuk setiap kejadian tidak dipertimbangkan sepenuhnya. Selain itu, pemodelan dengan pertimbangan mekanisme kegagalan sedemikian sehingga pertimbangan untuk Model R dari  $P_N$  dan Model gerbang halang (*Inhibit gate model*) menjadi terabaikan.

Tabel 4. Hasil kuantifikasi metode Petri Net

No	Kejadian Perantara/Puncak	Laju Kegagalan Petri Net
1	Kehilangan Aliran Pendingin Karena Katup Isolasi	7,18E-07
2	Kehilangan Aliran Pendingin Dari Jalur Penukar Panas	7,36E-07
3	Kehilangan Aliran Pendingin Karena Kegagalan Pompa Primer	5,33E-07
4	Kejadian Kehilangan Aliran Pendingin Primer atau LOFA (Loss of Flow Accident)	1,99E-06



## KESIMPULAN

Dengan menggunakan metode Petri Net berbasis analisis pohon kegagalan besarnya laju kegagalan pada kejadian Kehilangan Aliran Pendingin Primer RSG GAS pada saat operasi berlangsung adalah sebesar  $1,99E-06$ . Kontribusi setiap kejadian dasar kepada terjadi kejadian perantara dan kemudian terjadinya kejadian puncak tidak cukup signifikan ada perbedaan pengaruh terhadap kejadian puncak adalah relatif sama.

Metode Petri Net untuk evaluasi keandalan sistem, yang pada umumnya dengan data keandalan yang tidak cukup banyak tersedia dapat digunakan. Dibandingkan dengan analisis pohon kegagalan penggunaan metode Petri Net tidak perlu mempertimbangkan minimal *cut set* dengan perlakuan melekat *cut off* baik untuk yang dianggap tidak cukup berpengaruh maupun untuk besar probabilitas yang dianggap orde cukup kecil sehingga dapat diabaikan. Namun demikian pertimbangan terhadap modus dan mekanisme kegagalan perlu dilakukan untuk mendapatkan sensitifitas hasil.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Deswandri dan Johnny Situmorang, Pemodelan keandalan sistem pendingin primer untuk estimasi probabilitas kejadian kehilangan pendingin untuk RSG GAS, Prosiding Seminar Nasional, TKPFN ke-18, 2012.
2. Larry H. Crow, "Reliability Growth Planning, Analysis and Management," 2011 Reliability and Maintainability Symposium, January, 2011
3. Eide, S.A., et.all., 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.
4. Fullwood, R.R., Probabilistic Safety Assessment in the Chemical and Nuclear Industries, Butterworth-Heinemann, 2000
5. Adamyant A dan He D, System failure and safety assessment using integrated petri net and fault tree analysis approaches, The University of Illinois at Chicago, Chicago, 2008

## DISKUSI / TANYA JAWAB :

PERTANYAAN : (Syaiful Bakhri, PTRKN-BATAN)

- Apa kelebihan dan kekurangannya metode Petrinet dibandingkan Fault Tree atau Fierce dilihat dari hasil analisisnya ? ada penjelasan validasinya ?
- Mohon informasi nilai probabilitas kejadian yang mirip dibeberapa komponen yang berbeda.

JAWABAN : ( Ahmad Abtokhi, PTRKN-BATAN)

- Pada cara perhitungan Petrinet tidak diharapkan ada teknik *cut off* sebagaimana biasanya yang dihadapi oleh Fault Tree Technique. Validasinya sebenarnya dapat dilakukan secara langsung jika dilakukan dengan Petrinet dibandingkan hasil Fault Tree
- Probabilitas kejadian menunjukkan peluang kejadian suatu kegagalan dan umumnya berorde minimal dan bila ditunjukkan adalah dari data general ( pengalaman operasi komponen)