

## ANALISIS KONDISI TUNAK DAN KECELAKAAN REAKTIVITAS PADA MODE PENDINGINAN SIRKULASI ALAM REAKTOR RSG GAS

Azizul Khakim

Pusat Pengkajian Keselamatan Reaktor – BAPETEN

Endiah Pudji Hastuti

Pusbang Teknologi Reaktor Riset - BATAN

### ABSTRAK

**ANALISIS KONDISI TUNAK DAN KECELAKAAN REAKTIVITAS PADA MODE PENDINGINAN SIRKULASI ALAM REAKTOR RSG GAS.** Reaktor RSG GAS di samping beroperasi dengan mode pendinginan konveksi paksa untuk daya tinggi, juga beroperasi dengan mode sirkulasi alam untuk daya 300 KW atau kurang. Di sini akan dianalisis parameter-parameter keselamatan seperti suhu bahan bakar dan kelongsong maksimum serta parameter Awal Pendidihan Inti (*Onset of Nucleate Boiling = ONB*) selama kondisi tunak dan kecelakaan reaktivitas akibat pencabutan cepat batang kendali. Analisis kondisi tunak selama operasi dengan mode pendinginan sirkulasi alam dijalankan dengan program CONVEC, sedangkan analisis transien penyisipan reaktivitas positif akibat pencabutan cepat batang kendali dijalankan dengan program PARET/ANL. Rasio ONB pada kondisi tunak daya 300 KW mencapai 4,878, jauh lebih besar dari 1,0, sedangkan suhu dinding bahan bakar maksimum adalah 72,19°C, yang berarti teras reaktor dapat dioperasikan dengan aman pada daya 300 KW atau kurang dengan mode pendinginan sirkulasi alam. Namun untuk perhitungan kondisi transien akibat pencabutan cepat batang kendali, awal pendidihan inti telah terjadi ketika daya teras mencapai puncaknya 1136,0 KW, dan suhu maksimum bahan bakar mencapai 113,09°C; jauh dibawah harga desain 207,0°C.

**Kata kunci** = Kondisi Tunak, Kecelakaan Reaktivitas, Sirkulasi Alam, RSG GAS.

### ABSTRACT

**ANALYSES ON STEADY STATE AND REACTIVITY ACCIDENT DURING NATURAL CIRCULATION COOLING MODE FOR RSG GAS REACTOR.** RSG GAS reactor is operated either by forced convection for high power, and natural circulation cooling mode for reactor power of 300 kW or less. Safety parameters such as maximum fuel and clad temperature, and parameter of Onset of Nucleate Boiling (ONB) will be analyzed during steady state and reactivity accident due to inadvertent control rod withdrawal. Analyses on steady state during natural circulation cooling mode is performed by CONVEC Code, meanwhile transient analyses on positive reactivity insertion due to inadvertent control rod withdrawal is carried out by PARET/ANL Code. ONB ratio at steady state of 300 kW reaches 4.878, well above 1.0, meanwhile the maximum fuel temperature is 72.19°C, meaning the reactor core can be operated safely at 300 kW or less with natural circulation cooling mode. However, for the calculation of transient condition due to inadvertent control rod withdrawal, onset of nucleate boiling takes place when the reactor power reaches its peak value of 1136.0 kW, and the maximum fuel temperature reaches 113.09°C; well below the design value of 207.0°C.

**Key words** = Steady State, Reactivity Accident, Natural Circulation, RSG GAS.

### PENDAHULUAN

Reaktor RSG GAS di samping beroperasi dengan mode pendinginan konveksi paksa, ia juga beroperasi dengan mode sirkulasi alam untuk daya rendah. Operasi reaktor dengan mode pendinginan sirkulasi alam dilaksanakan jika daya teras kurang dari 300 KW.

Di sini akan dianalisis parameter-parameter keselamatan seperti suhu bahan bakar dan kelongsong maksimum serta parameter Awal Pendidihan Inti (*Onset of Nucleate Boiling = ONB*) selama kondisi normal dan kecelakaan reaktivitas akibat pencabutan cepat batang kendali. *Onset of Nucleate Boiling (ONB)* harus dihindari selama operasi dengan mode pendinginan sirkulasi alam, yaitu

harga rasio ONB minimum harus lebih besar dari 1,0. Rasio ONB adalah perbandingan antara fluks panas ONB terhadap fluks panas lokal maksimum.

Dalam analisis ini kecelakaan penyisipan reaktivitas diasumsikan berasal dari pencabutan cepat batang kendali. Pencabutan cepat batang kendali akan memberikan penyisipan reaktivitas positif yang cepat pada teras yang mengakibatkan daya naik tak terkendali. Kecelakaan ini diawali dengan asumsi bahwa semua batang kendali secara simultan ditarik dengan kecepatan maksimum (0,0564 cm/s) hingga Sistem Proteksi Reaktor (*Reactor Protection System /RPS*) terpicu untuk scram reaktor dengan menjatuhkan batang kendali ke dalam teras.

## MODEL PERHITUNGAN

Analisis kondisi normal selama operasi dengan mode pendinginan sirkulasi alam dijalankan dengan program PARET/ANL dan CONVEC, sedangkan analisis transien penyisipan reaktivitas positif akibat pencabutan cepat batang kendali dengan mode pendinginan sirkulasi alam dijalankan dengan program PARET/ANL (*Program for the Analysis of Reactor Transient / Argonne National Laboratory*).<sup>(1)</sup>

### Model Perhitungan PARET/ANL

Teras silisida RSG G.A Siwabessy dibagi menurut model dua kanal, yaitu kanal satu yang mempunyai *Power Peaking Factor* tertinggi sebagai kanal panas (*hot channel*) dan kanal dua sebagai

kanal rata-rata yang mewakili sejumlah besar kanal pendingin dalam teras. Dalam perhitungan ini faktor kanal panas nuklir radial (*Radial Nuclear Hot Channel Factor*) sebesar 2,6 dan aksial 1,6, faktor titik panas (*Engineering Hot Spot Factor*) 1,2, dan faktor kanal panas (*Engineering Hot Channel Factor*) 1,215. Perilaku terburuk teras saat transien dapat direpresentasikan oleh kanal panas. Dalam perhitungan, tiap kanal dibagi menjadi 20 daerah (21 titik) ke arah aksial dan 6 daerah (7 titik) ke arah radial.

Reaktor diasumsikan sedang beroperasi normal pada daya kritis 300 KW dengan pendinginan sirkulasi alam. Kecelakaan diawali dengan asumsi semua batang kendali secara simultan ditarik dengan kecepatan maksimum 0,0564 cm/s yang memberikan laju penyisipan reaktivitas positif maksimum sebesar  $\Delta\rho/\Delta t = 2,82 \times 10^{-4}$  /s hingga RPS merespon untuk scram dengan menjatuhkan batang kendali ke dalam teras setelah waktu tunda 0,5 detik.

### Model Perhitungan Program CONVEC

CONVEC adalah program yang khusus dikembangkan untuk perhitungan termohidrolik pada kondisi ajeg (*steady state*) reaktor tipe MTR yang beroperasi pada mode sirkulasi alam. Program ini menghitung aliran dan kecepatan massa dalam kanal, distribusi suhu fluida, suhu dinding bahan bakar, suhu rata-rata bahan bakar, margin untuk *Onset of Nucleate Boiling* (ONB). Program dapat bekerja baik dengan pendingin air ringan satu fasa atau udara.

Tabel 1. Input Program PARET/ANL.

No.	Input data	Besaran
1.	Daya Awal, KW	300
2.	Faktor kanal panas nuklir radial	2,6
3.	Faktor kanal panas nuklir aksial	1,6
4.	Faktor titik panas ( <i>Engineering Hot Spot Factor</i> )	1,2
5.	Faktor kanal panas ( <i>Engineering Hot Channel Factor</i> )	1,215
6.	Kecepatan maksimum batang kendali, cm/s	0,0564
7.	Laju penyisipan reaktivitas maksimum $\Delta\rho/\Delta t$ , /s	$2,82 \times 10^{-4}$
8.	Waktu tunda, s	0,5
9.	Konduktivitas meat Silisida, W/cm.K	1,07
10.	Konduktivitas kelongsong, W/cm.K	2,16
11.	Fraksi neutron kasip efektif ( $\beta_{eff}$ )	$7,18629 \times 10^{-3}$
12.	Umur Generasi neutron serempak, s	$64,513 \times 10^{-6}$

Teras reaktor RSG GAS terdiri dari 40 elemen bakar yang masing-masing berisi 21 pelat bahan bakar, dan 8 elemen kendali yang masing-masing berisi 15 pelat bahan bakar. Sehingga jumlah pelat bahan bakar keseluruhan adalah 960 buah. Dalam program ini dilakukan penyederhanaan dengan cara jumlah elemen bakar tetap 48, namun masing-masing terdiri dari 20 pelat bahan bakar.

Data-data yang lain sama dengan data input untuk program PARET/ANL.

## KRITERIA KESELAMATAN

Prinsip pembatasan temperatur bahan bakar dan kelongsong dimaksudkan untuk menjaga semua titik pada bahan bakar dan kelongsong tidak melebihi titik leleh, menghindari ekspansi berlebih dan pergerakan bahan hasil belah. Temperatur desain maksimum untuk kelongsong dan bahan bakar RSG G.A Siwabessy masing-masing adalah 145°C dan 207°C untuk transien terantisipasi.<sup>(2)</sup>

Pada mode pendinginan sirkulasi alam batasan keselamatan yang diterapkan adalah awal

pendidihan inti (*Onset of Nucleate Boiling* = ONB), dengan Korelasi Bergles-Rohsenow:

$$T_{ONB} = T_{sat} + \left[ \frac{q''_{ONB}}{15,6 P^{1,156}} \right] \left[ \frac{\rho^{0,0234}}{2,30} \right] \quad (1)$$

dimana:

$T_{ONB}, T_{sat}$  : suhu permukaan dan suhu jenuh fluida, °C.

$P$  : tekanan setempat, Pa.

$q''$  : fluks panas permukaan, w/m<sup>2</sup>.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Perhitungan Kondisi Ajeg (Steady State)

Perhitungan kondisi ajeg dilakukan terhadap beberapa daya dengan program CONVEC, sebagaimana tertera pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter teras pada operasi normal dengan mode sirkulasi alam.

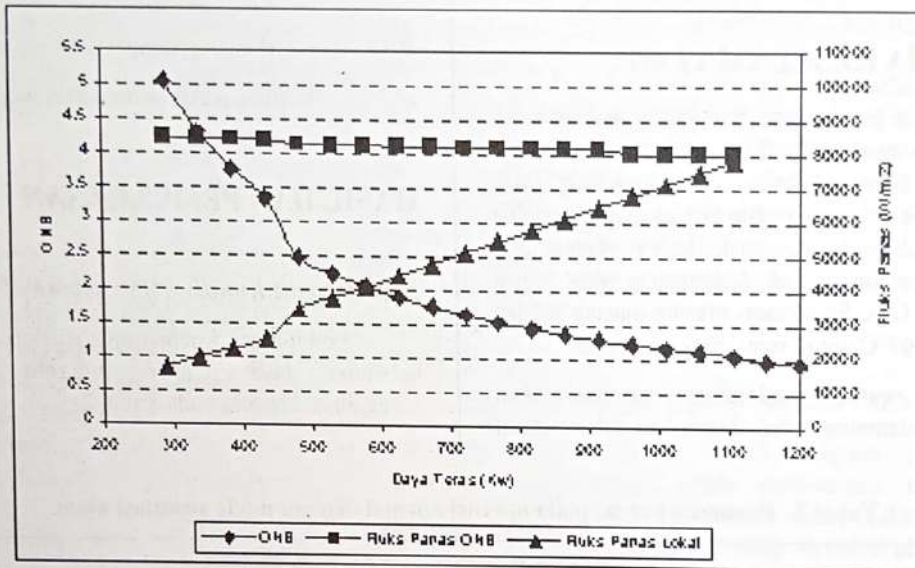
Daya (KW)	Rasio ONB	Suhu Dinding Max. (°C)	Fluks Panas Lokal Max. (W/m <sup>2</sup> )	Fluks panas ONB	Laju Alir (m <sup>3</sup> /hr)	Kecepatan alir (m/s)
288	5,061	67,666	16.856,81	84.825,93	26,607	0,03362
336	4,327	70,600	19.666,28	84.600,05	29,211	0,03672
384	3,778	73,485	22.475,74	84.418,01	31,701	0,03967
432	3,352	76,271	25.285,21	84.269,41	34,097	0,04249
480	2,473	84,742	34.114,97	82.925,77	39,635	0,04521
528	2,245	87,919	37.526,46	82.795,78	42,113	0,04784
576	2,055	91,064	40.937,96	82.680,78	44,521	0,05039
624	1,895	94,159	44.349,46	82.578,63	46,870	0,05287
672	1,757	97,211	47.760,96	82.485,66	49,162	0,05529
720	1,638	100,225	51.172,45	82.399,63	51,403	0,05766
768	1,535	103,209	54.583,95	82.318,76	53,597	0,05998
816	1,443	106,193	57.995,45	82.241,59	55,745	0,06225
864	1,362	109,144	61.406,94	82.171,52	57,861	0,06448
912	1,289	112,072	64.818,44	82.098,47	59,929	0,06668
960	1,223	114,976	68.229,94	80.590,43	61,959	0,06884
1008	1,163	117,858	71.641,43	80.485,88	63,952	0,07097
1056	1,109	120,719	75.052,93	80.381,58	65,912	0,07306
1104	1,059	123,561	78.464,43	80.277,02	67,838	0,07513
1152	0,971	126,384				
1200	0,932	129,190				

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa pendidihan inti telah terjadi ketika daya mencapai 1152 KW, ketika rasio ONB 0,971 (kurang dari 1). Pada Gambar 1 terlihat grafik antara rasio ONB, Fluks Panas ONB dan Fluks Panas lokal terhadap daya teras.

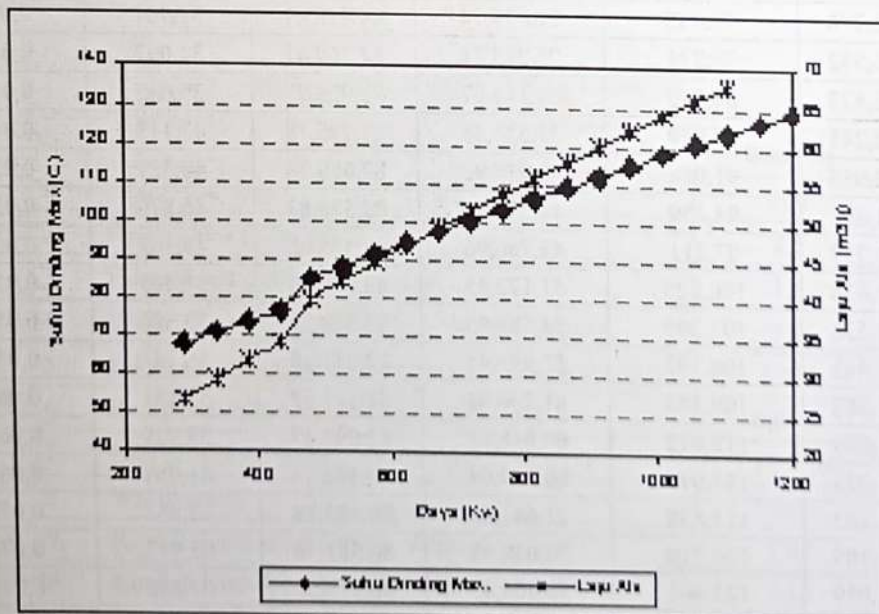
Gambar 2 memperlihatkan suhu maksimum

dinding bahan bakar dan total laju alir terhadap daya teras.

Rasio ONB pada daya 300 KW adalah 4,878, jauh lebih besar dari 1, sedangkan temperatur dinding bahan bakar maksimum 68,4 °C, yang berarti teras reaktor layak dioperasikan pada daya kurang atau sama dengan 300 KW dengan mode pendinginan sirkulasi alam.



Gambar 1. Grafik fluks panas dan rasio ONB terhadap daya teras.



Gambar 2. Grafik temperatur dinding bahan bakar dan laju alir vs daya teras.

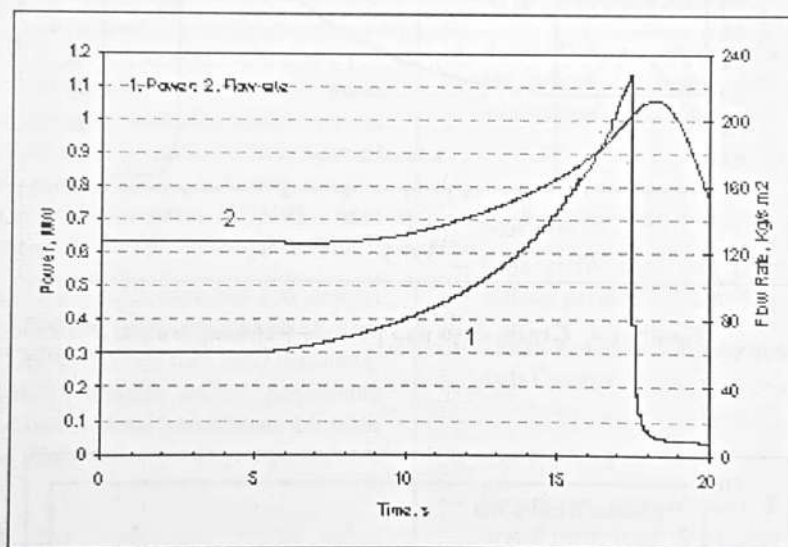
### Perhitungan Transien Penyisipan Reaktivitas

Perhitungan diawali dengan operasi normal daya 300 KW selama 5 detik, dan transien mulai terjadi pada  $t = 5$  detik. Parameter-parameter teras reaktor pada operasi kondisi normal daya 300 KW dengan mode pendinginan sirkulasi alam ditunjukkan pada Tabel 3.

Pada detik ke-5 semua batang kendali ditarik secara simultan dengan kecepatan maksimum yang menyebabkan penyisipan reaktivitas positif ke dalam teras. Daya reaktor akan naik sejalan dengan ditariknya batang kendali dan mencapai puncaknya 1136,0 KW pada 12,44 detik dari awal terjadinya transien. Profil kenaikan daya dan perubahan laju alir pendingin dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 3. Parameter teras pada operasi normal daya 300 KW.

No.	Parameter	PARET/ANL
1.	Daya, KW	300
2.	Laju alir pendingin, $\text{kg/s.m}^2$	126,7
3.	Suhu bahan bakar maksimum, $^{\circ}\text{C}$	72,19
4.	Suhu kelongsong maksimum, $^{\circ}\text{C}$	72,12
5.	Suhu pendingin maksimum, $^{\circ}\text{C}$	58,97



Gambar 3. Profil perubahan daya teras dan laju alir terhadap waktu.

Dari hasil perhitungan dengan Program CONVEC (Tabel 2), rasio ONB mencapai 1,00 yang berarti awal pendidihan inti telah terjadi ketika daya reaktor mencapai 1136,0 KW. Laju alir pendingin pada operasi normal 300 KW sebesar 126,7  $\text{kg/m}^2.\text{s}$  yang kemudian naik akibat peningkatan daya teras dan mencapai harga maksimum 212,0  $\text{kg/m}^2.\text{s}$ .

Laju kenaikan daya ini dikendalikan oleh sinyal trip periode, yaitu periode kurang dari 5 detik, yang menyebabkan reaktor scram setelah waktu

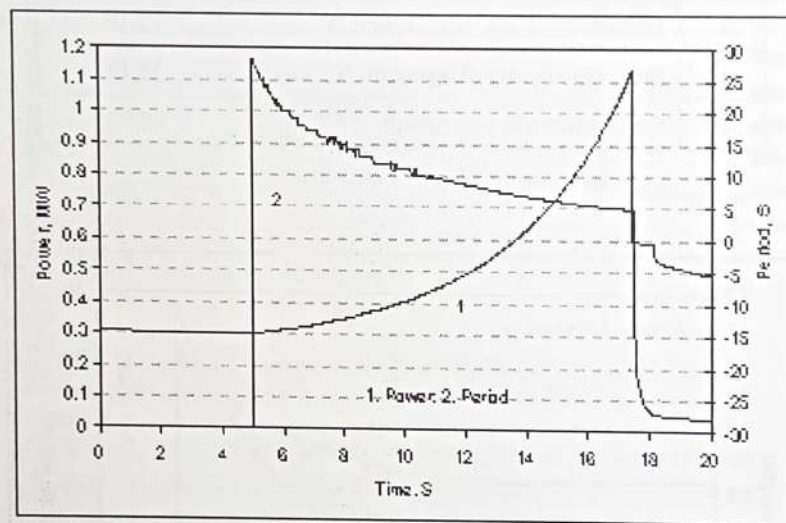
tunda 0,5 detik. Sinyal trip periode dideteksi pada detik ke 11,94 dan reaktor scram pada detik ke 12,44.

Parameter-parameter keselamatan yang penting saat terjadinya transien penyisipan reaktivitas oleh penyisipan batang kendali dapat dilihat pada Tabel 4.

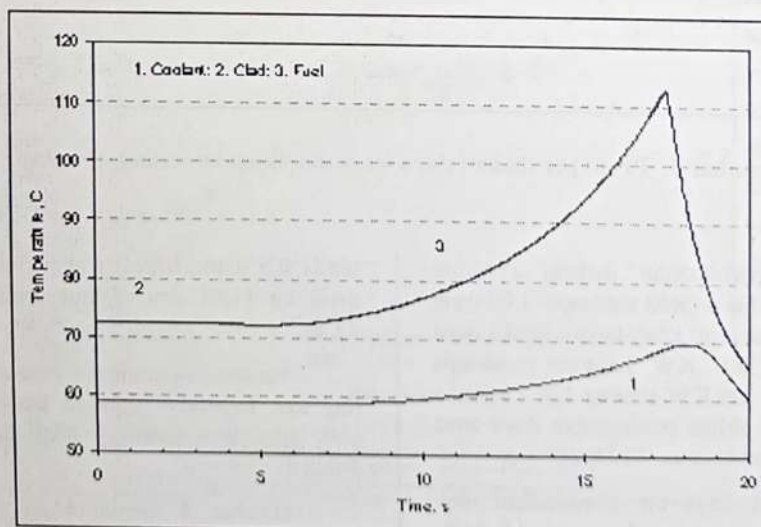
Gambar 4 menunjukkan grafik daya dan periode terhadap waktu saat transien penyisipan reaktivitas.

Tabel 4. Parameter keselamatan teras saat transien penarikan batang kendali.

No.	Parameter	PARET/ANL
1.	Daya awal, KW	300
2.	Penarikan batang kendali, buah	8
3.	Waktu tunda, s	0,5
4.	Daya puncak, KW	1136,0
5.	Laju alir pendingin maksimum, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$	212,0
6.	Waktu daya puncak, s	12,44
7.	Suhu bahan bakar maksimum, $^{\circ}\text{C}$	113,09
8.	Suhu kelongsong maksimum, $^{\circ}\text{C}$	112,85
9.	Suhu maksimum pendingin keluaran kanal panas, $^{\circ}\text{C}$	69,79



Gambar 4. Grafik daya dan periode terhadap waktu.



Gambar 5. Grafik temperatur bahan bakar, kelongsong dan pendingin terhadap waktu.

Dari Gambar 4 terlihat bahwa sesungguhnya pada 5 detik pertama daya turun oleh munculnya reaktivitas umpan balik negatif suhu bahan bakar, sehingga periode reaktor bernilai negatif besar, yaitu antara -250 hingga -350 detik. Ketika terjadi penyisipan reaktivitas positif yang menyebabkan peningkatan daya, maka periode berubah jadi positif (+28 detik), yang kemudian berangsur turun sejalan dengan peningkatan laju kenaikan daya. Sistem Proteksi Reaktor (RPS) akan memberikan sinyal trip ketika periode reaktor mencapai 5 detik, dan periode tersebut tercapai pada detik ke 11,94 yang memerintahkan reaktor untuk scram setelah waktu tunda 0,5 detik, yaitu pada 12,44 detik.

Gambar 5 menunjukkan grafik temperatur bahan bakar, kelongsong dan pendingin di kanal terpanas terhadap waktu. Dari grafik tersebut terlihat bahwa temperatur bahan bakar dan kelongsong maksimum masing-masing mencapai 113,09 °C dan 112,85 °C pada detik ke 12,45. Sedangkan temperatur pendingin di kanal terpanas mencapai 69,79 °C pada detik ke 13,00.

## KESIMPULAN

Analisis termohidrolika pada mode pendinginan konveksi alam terhadap kondisi normal dan kondisi kecelakaan penyisipan reaktivitas positif RSG GAS akibat pencabutan cepat batang kendali, telah dilakukan dengan program CONVEC dan PARET/ANL, dengan kesimpulan sebagai berikut:

1. Operasi normal RSG GAS daya 300 KW dengan mode sirkulasi alam tidak menimbulkan pendidihan inti (ONB). Namun dari hasil perhitungan untuk kondisi transien akibat pencabutan cepat batang kendali, awal pendidihan inti telah terjadi ketika daya teras mencapai puncaknya 1136,0 KW.
2. Rasio ONB dan temperatur bahan bakar maksimum pada operasi normal 300 KW masing-masing adalah 4,878 dan 72,19 °C. Sedangkan suhu maksimum bahan bakar saat transien penyisipan reaktivitas oleh penarikan batang kendali mencapai 113,09 °C; jauh dibawah harga desain 207°C.

## DAFTAR PUSTAKA

1. WOODRUFF, W.L, *A Users Guide for the Current ANL Version of the PARET Code*, Argonne, Dec 1982.
2. BATAN, *Safety Analysis Report MPR G.A Sivabessy*, revision 8.
3. DONALD, R., *Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Element*, Olander, 1976.

## TANYA JAWAB

### Dudung AR

- Temperatur maksimum pendingin?
- Berapa rasio ONB?

### Azizul Khakim

- Temperatur maksimum pendingin adalah 69,79 °C tercapai pada detik ke 13.
- Rasio ONB saat tercapainya daya puncak 1136,0 kW adalah 1,0 pada 12,44 detik, yang berarti telah terjadi pendidihan inti.

### Mulya Juarsa

- Pada grafik daya dan periode terhadap waktu, maksud periode 5,0 dan -5 apa?
- Kaitan kenaikan suhu coolant dan suhu clad/fuel pada Gambar 5.

### Azizul Khakim

- Penurunan periode dari 5 S ke -5 S artinya terjadi penurunan daya yang cepat akibat reaktor scram.
- Kenaikan suhu pendingin akibat kenaikan daya mengakibatkan naiknya laju alir sirkulasi alam. Kenaikan suhu clad/fuel diakibatkan oleh naiknya daya reaktor.