

KAJIAN KESELAMATAN PARAMETER TERMOHIDROLIK TERAS RSG-GAS PADA DAYA 15 MW DAN 30 MW MENGGUNAKAN *COOLOD-N CODE*

Jaja Sukmana, A. Aziz RH, Jonnie AK
PRSG-BATAN, Kawasan Puspiptek Ged. 30, Serpong, Tangerang 15310

ABSTRA

KAJIAN KESELAMATAN PARAMETER TERMOHIDROLIK TERAS RSG-GAS PADA DAYA 15 MW DAN 30 MW DENGAN MENGGUNAKAN *COOLOD-N CODE*. Telah dilakukan kajian ulang terhadap data desain termohidrolik teras RSG-GAS dengan menggunakan program *Coolod-N*. Kajian keselamatan bertujuan untuk membandingkan data termohidrolik yang terkait keselamatan dengan kondisi operasi normal antara teras Oksida dan silisida pada daya 15 dan 30 MW. Data keluaran termohidrolik yang diperoleh diantaranya: *fluks* massa rata-rata = 3780 kg/m²s, temperatur permukaan plat = 148 °C, temperatur maksimum *meat* bahan bakar 164 °C, pembangkitan panas = 1594 W/cm³, dan margin keselamatan 3,56 pada 30 MW serta 8,77 pada 15 MW. Perbedaan hasil perhitungan terhadap hasil program lain pada SAR RSG-GAS disebabkan adanya perubahan pada data masukan, terkait mekanik EB, teras reaktor dan kondisi pendingin serta penentuan faktor radial-aksial rapat daya. Dari kegiatan ini diharapkan dapat menambah kompetensi sumber daya staf PRSG dalam menggunakan *nuclear code* untuk menganalisis suatu desain maupun perubahan terhadap desain awal.

Kata Kunci: termohidrolik, coolod-N, margin keselamatan

ABSTRACT

SAFETY ASSESSMENT ON THERMOHYDROULIC PARAMETERS OF THE RSG-GAS AT REACTOR CORE POWER OF 15 MW AND 30 MW USING COOLOD-N COMPUTER CODE. It has been done a review of design thermohydrolic data of the RSG-GAS reactor core using Coolod-N computer code. The review is aimed to compare the safety-related thermohydrolic data safety with that of normal operating conditions oxide core and silicide core at power of 15 and 30 MW. Thermohydrolic data output data obtained are: the average mass flux = 3780 kg/m²s, the surface temperature of plate = 148 °C, the maximum temperature meat fuels of 164 °C, heat generation = 1594 W/cm³, and the margin of safety 3.56 at 30 MW and 8.77 at 15 MW. Differences on calculation result between SAR RSG-GAS and Coolod-N computer code is caused by changes in input data, related to mechanical characteristic of fuel element, the reactor core, and cooling conditions as well as methode to determine of the radial-axial factor of power density. It is expected that by exercising this measure, capability of the operator will be improved in the light of either analyzing of design modification or early design.

Key word: termohidrolika, coolod-N code, safety margin

PENDAHULUAN

Fungsi RSG-GAS antara lain untuk melayani penelitian sumber neutron dan produksi radioisotop. Dengan demikian maka diperlukan penyediaan kerapatan *fluks* neutron yang tinggi kepada pengguna, dengan kerapatan *fluks* neutron yang tinggi akan menghasilkan rapat daya yang tinggi pula di dalam teras reaktor.

Untuk memberikan fleksibilitas maksimum pada konfigurasi teras reaktor dan distribusi rapat daya, ditetapkan margin keselamatan *S* minimum terhadap instabilitas aliran, daya lebih, dan *engineering hot spot* serta faktor kanal panas arah aksial dan radial, yang dapat diterima. Untuk setiap konfigurasi teras reaktor beroperasi pada daya penuh, maka titik

pengoperasian diharapkan berada di atas kurva *S* untuk memastikan bahwa margin keselamatan minimum yang diijinkan terpenuhi.

Desain teras reaktor dan tindakan korektif dari sistem proteksi reaktor (SPR), menjamin bahwa kerapatan puncak panas lokal (*peak local power*) tidak akan menyebabkan kerusakan elemen bakar selama operasi normal atau operasi transien. Kondisi tersebut juga tidak akan menyebabkan kerusakan pada pelat elemen bakar akibat kecelakaan terparah yang dipostulasikan. Parameter margin keselamatan reaktor diperoleh dari besaran-besaran desain termohidrolik seperti temperatur, laju alir pendingin, desain mekanik teras dan elemen bakar, serta faktor puncak panas. Desain mekanik elemen bakar dan teras RSG-GAS, terlebih dahulu dimodelkan untuk

menjadi parameter perhitungan pada *code*. *Code computer* saat ini yang dapat digunakan dalam apresiasi parameter termohidrolik teras reaktor adalah *Coolod-N*.

Coolod-N dipublikasikan oleh JAERI yang disusun oleh Masanori Kaminaga (1987), (pengembangan dari *Coolod* oleh S.Watanabe, 1984), kemudian dimodifikasi dengan ditambahkan persamaan untuk menghitung parameter pelepasan gelembung (*Eta*) sesuai dengan persamaan yang digunakan oleh Interatom. Pada tahun 2004, program ini dikonversikan pada komputer PC yang bisa dijalankan pada komputer yang menggunakan *operating system Windows-2000/ NT/XP*^[3].

Tujuan pertama kajian parameter termohidrolik dengan *Coolod-N* ini adalah untuk melakukan verifikasi terhadap data termohidrolik teras RSG-GAS yang sebelumnya menggunakan bahan bakar oksida sedangkan sekarang menggunakan silisida, tujuan kedua yaitu menunjukkan margin keselamatan pada operasi nominal 30 MW dengan operasi daya 15 MW. Diharapkan dengan kajian terhadap parameter termohidrolik ini, dapat memberikan wawasan dan kemampuan terhadap perhitungan termohidrolik teras yang mendasari pengendalian keselamatan operasi reaktor.

TEORI

Desain Thermohidrolika RSG-GAS

Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) merupakan reaktor jenis *MTR* (*Material Testing Reactor*) pertama di dunia yang dioperasikan langsung dengan menggunakan elemen bakar pengkayaan Uranium rendah, *LEU* (*Low Enriched Uranium*). Pada saat rancang bangun RSG-GAS, hanya tersedia elemen bakar *LEU* jenis oksida (U_3O_8 -Al) yang dapat digunakan untuk memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Oleh karena itu RSG-GAS menggunakan bahan bakar oksida dengan densitas Uranium dalam *meat* sebesar $2,96 \text{ g/cm}^3$ dengan pengkayaan ^{235}U sebesar 19,75%^[1,2].

Parameter desain neutronik dan termohidrolik RSG-GAS dengan elemen bakar oksida disajikan pada SAR (*safety analysis report*) RSG-GAS Rev.7. Sedangkan untuk elemen bakar U_3Si_2 -Al disajikan pada LAK (laporan analisis keselamatan) RSG-GAS Rev.10. Karakteristik desain mekanik elemen bakar silisida ditunjukkan pada Tabel 1. Program komputer yang digunakan untuk menghitung parameter neutronik dan termohidrolik pada SAR Rev. 7 adalah *COBRA-IIIC* sedangkan di LAK Rev.10 digunakan *BATAN-Fuel* untuk parameter neutronik serta *Coolod-N* untuk parameter termohidrolik. Parameter termohidrolik RSG-GAS disajikan seperti Tabel 2.

Tabel 1. Karakteristik Desain Mekanik Elemen Bakar RSG-GAS

Parameter mekanik	Ukuran/karakter
tipe elemen bakar/kendali	<i>MTR</i>
Jumlah elemen bakar	40
Jumlah pelat elemen bakar	21
Jumlah elemen kendali	8
Jumlah pelat elemen kendali	15
Ketebalan zona <i>meat</i>	0,54 mm
Lebar zona <i>meat</i>	62,75 mm
Panjang zona <i>meat</i>	600 mm
Densitas ^{235}U di dalam <i>meat</i>	$2,96 \text{ g/cm}^3$
Ketebalan kelongsong	0,38 mm
Tebal elemen bakar	1,3 mm
Lebar elemen bakar	70,75 mm
Panjang elemen bakar	625 mm
Jenis elemen bakar	U_3O_8 -Al/ U_3Si_2 -Al
Pengkayaan	19,75%
Bahan kelongsong	AlMg2
Bahan penyerap	Ag-In-Cd
Kelongsong penyerap	Baja
Tebal penyerap	3,38 mm

Tabel 2. Parameter Desain Termohidrolik RSG-GAS

Parameter Desain Termohidrolik	satuan	Nilai
Aliran Pendingin		
Laju alir sistem primer, total	kg/s	860
Laju alir minimum, desain	kg/s	800
Laju alir efektif untuk pendinginan pelat elemen bakar,	kg/s	618
Luas aliran efektif untuk perpindahan panas,	m^2	0,1643
Kecepatan rata-rata pendingin sepanjang pelat elemen bakar,	m/s	3,7
Kecepatan massa rata-rata di dalam teras reaktor,	$\text{kg/m}^2\text{s}$	3761
Penurunan tekanan di dalam teras reaktor,	bar	0,50

Tabel 2. Lanjutan

Parameter Desain Termohidrolik	satuan	Nilai
<u>Suhu Pendingin</u>		
Suhu masuk nominal,	°C	40,5
Kenaikan suhu rata-rata di dalam teras reaktor,	°C	10,0
Suhu rata-rata di keluaran teras reaktor,	°C	50,5
Suhu maksimum di keluaran kanal panas,	°C	74,4
<u>Perpindahan Panas</u>		
Luas permukaan pelat elemen bakar,	m ²	72,29
Fluks panas merata,	W/m ²	41,5 x 10 ⁴
Fluks panas maksimum untuk operasi normal,	W/m ²	221,7 x 10 ⁴
<u>Suhu Pelat Elemen Bakar</u>		
Suhu maksimum permukaan pelat,	°C	145
Suhu maks di tengah EB pada daya nominal (awal siklus),	°C	175
Suhu maks di tengah EB pada daya nominal (akhir siklus),	°C	200
Suhu maksimum di tengah EB pada daya lebih (akhir siklus),	°C	207
<u>Stabilitas Aliran</u>		
Margin keselamatan min. pada daya nominal	-	3,38
Margin keselamatan min. pada daya lebih	-	2,67
Margin keselamatan min. untuk desain transien yang diantisipasi	-	1,48

Pada sistem reaktor bertekanan rendah, rapat daya dibatasi oleh persyaratan bahwa aliran pendingin harus dijamin stabil secara hidrodinamis sepanjang kanal pendingin. Pelanggaran atas kriteria ini mengakibatkan proses perpindahan panas yang buruk disertai oleh kenaikan tiba-tiba suhu pelat elemen bakar ke tingkat yang tidak dapat ditolerir sehingga pada akhirnya dapat mengakibatkan kerusakan pada kelongsong elemen bakar.

Desain distribusi rapat daya dipilih pada dasar ini untuk distribusi rapat daya arah aksial dan faktor kanal panas nuklir pada arah radial. Desain faktor kanal panas pada arah aksial $F_A = 1,77$, faktor kanal panas nuklir maksimum pada arah radial $F_R = 2,391$ (untuk teras silisida RSG-GAS)²⁾.

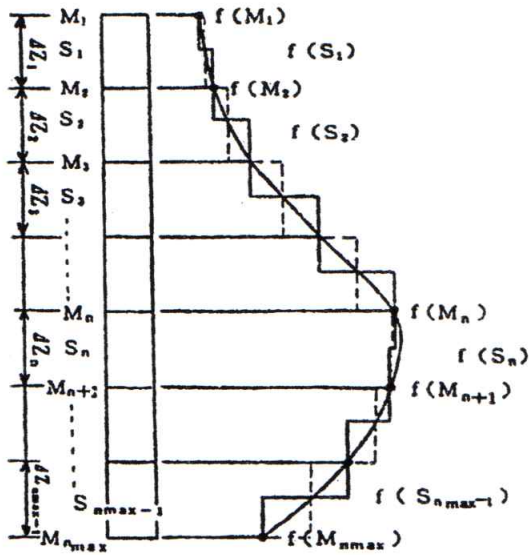
Dokumen SAR RSG-GAS Rev. 7^[1] memperlihatkan variasi suhu aksial pendingin dan suhu permukaan pelat elemen bakar oksida untuk kanal panas yang berdasarkan desain termohidrolik distribusi rapat daya dengan $F_A = 1,6$ dan $F_R = 2,6$, adalah 140 °C untuk suhu permukaan pelat elemen bakar dan 145 °C untuk suhu di tengah elemen bakar.

Desain termohidrolik dengan masukan faktor kanal panas tersebut sangat menentukan

terpenuhinya margin keselamatan yang terendah terhadap terjadinya instabilitas aliran *ekskursif*. Nilai S teras oksida pada daya nominal adalah 3,38. Sedangkan S teras silisida pada daya nominal adalah 3,01

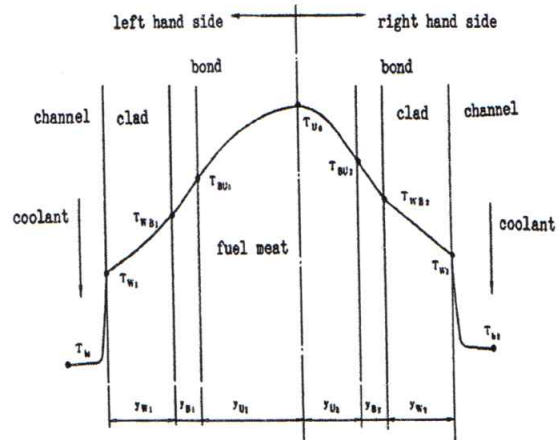
Model Perhitungan dengan *Coolod-N*

Program perhitungan komputer (*code*) *Coolod-N* adalah suatu program komputer yang dipergunakan untuk perhitungan distribusi suhu dua dimensi, yaitu arah radial (y , arah ketebalan pelat) dan arah aksial (z , arah panjang atau tinggi pelat). Perhitungan dilakukan dengan cara mengasumsikan pembangkitan panas di dalam *meat* bahan bakar konstan ke arah radial ($Q = q''/y_U = \text{konstan}$) atau hanya terjadi konduksi panas satu dimensi. Adapun distribusi suhu pelat bakar arah aksial dihitung dari suhu *bulk* pendingin lokal dan distribusi daya aksial (faktor aksial) seperti tertera pada Gambar 1. Sedangkan Gambar 2, menunjukkan model perhitungan distribusi suhu di dalam pelat bakar, yaitu dari arah luar (pendingin) ke dalam (pelat dan *meat*).



Gambar 1. Distribusi daya aksial F_A yang digunakan di dalam *Coolod-N code*

Jika kondisi pendinginan antara sisi kanan dan kiri pelat bahan bakar berbeda, maka code *Coolod-N* akan menghitung suhu maksimum *meat* bahan bakar sampai suhu maksimum *meat* bahan bakar tersebut sama antara sisi kanan dan kiri dengan mengubah lokasi titik suhu maksimum. Tetapi jika kondisi pendinginan sisi kanan dan kiri dari pelat bahan bakar sama, maka suhu maksimum bahan bakar akan terletak di tengah *meat* bahan bakar.

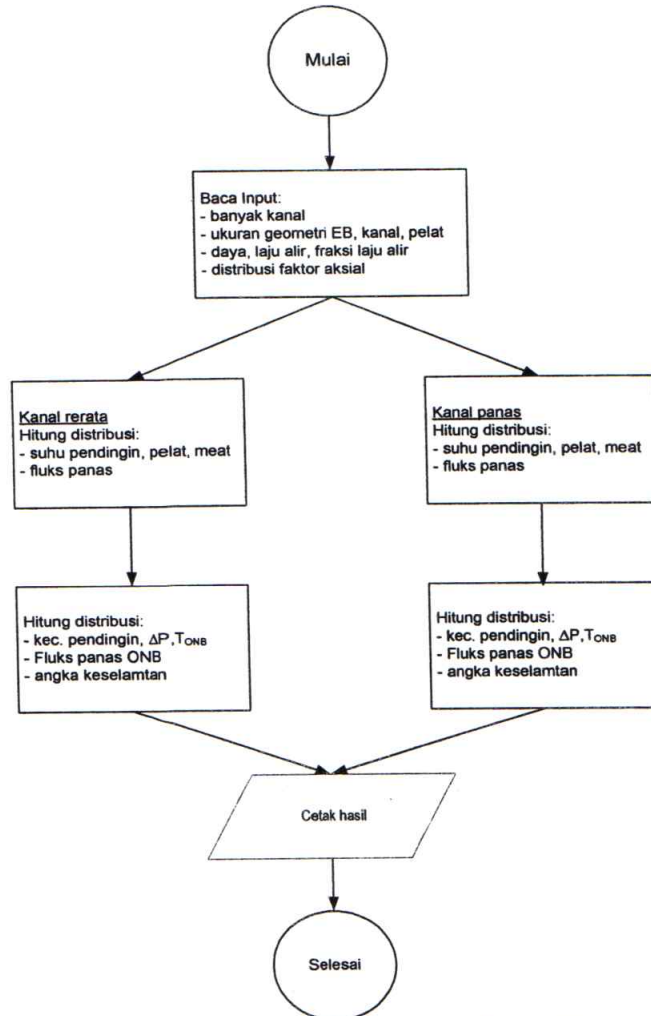


Gambar 2. Model perhitungan distribusi suhu pelat elemen bakar

Di dalam *Coolod-N code*, terdapat beberapa paket perhitungan perpindahan panas (*heat transfer package*) yang dapat dipergunakan untuk analisis termohidrolik reaktor riset. Adapun beberapa persamaan yang digunakan di dalam perhitungan untuk analisis reaktor RSG-GAS yang menggunakan pendinginan sirkulasi paksa (*forced convection*) dengan arah aliran dari atas ke bawah (*downward flow*) disajikan dalam lampiran 1.

METODOLOGI

- a) Studi literatur desain termohidrolik RSG-GAS pada SAR Rev.7, LAK Rev.10,
- b) Menyiapkan *inputan data Coolod-N*, yaitu parameter desain teras, elemen bakar, aliran pendingin, dan faktor puncak daya arah radial/aksial.
- c) Menjalankan program *Coolod-N*. Alur pemrograman ditunjukkan seperti diagram alir berikut ini.
- d) Melakukan analisis hasil code dan menghitung margin keselamatan.
- e) Membuat kesimpulan.



Gambar 3. Diagram alir pemrograman *Coolod-N code*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

- *Inputan Coolod-N*, disajikan sebagai berikut:

```

1          INPUT DATA CARD IMAGE
PERHITUNGAN TERMOHIDROLIKA U3SI2 RSG-GAS, FLOC DARI BFUEL
MEI'11
C <CARD B1>  INFORM
1
C <CARD B2>  IAMAX IMAX JMAX NMAX NPLOT KEY(1) KEY(2) KEY(3)
2      5      13      5      0      1      1      0
C <CARD C>   QRR(MW) PFLOW(89% $\times$ 800kg/s) TIN(DEG) DT(DEG) JAMX
15.0      712.0      40.5      1.5      2.0
30.0      712.0      40.5      1.5      2.0
C <CARD E1>  H1      H2      H3      A      B      C      D      ITWC
0.023  0.0  0.0  0.8  0.4  0.0  0.0  3
C <CARD E2>  FRATE(616/712) VIN VOUT PRESIN RAMF
0.865      0.0  0.0  2.036  0.0
C <CARD F1>  FUEL ELEMENT TITLE
1.      EK POSISI C-8 FR=1,22 15PELAT
C <CARD F2>  NPMX NFUEL MA UDENST POROTY IDPMX IDCMX EAREA
FRATEN(9,7/12,
    
```

```

1      5.714 2  2.965  0.0238  1      1      26.934
0.781
C <CARD F22> NUAL TUAL(1) UAL(1) TUAL(2) UAL(2)
2      50.0  1.07  500.0  1.07
C <CARD F3>  FR  FCOOL FFILM FHFLX FCLAD FBOND FMEAT
2.92 1.023  1.2276 1.2  1.2  1.0  1.2
C <CARD F4>  FZ      DDZ ZET
0.0500  5.0 0.0
0.4581  5.0 0.0
0.8850  5.0 0.0
1.2516  5.0 0.0
1.5329  5.0 0.0
1.7097  5.0 0.0
1.7700  5.0 0.0
1.7097  5.0 0.0
1.5329  5.0 0.0
1.2516  5.0 0.0
0.8850  5.0 0.0
0.4581  5.0 0.0
0.0500  5.0 0.0
C <CARD F51> FUEL PLATE TITLE
ELEMEN BAKAR=KENDALI TERPANAS
C <CARD F52> NPLATE FLOC IDPL KMX IPLOT IOU
15.0  1.22  1  1  0  1
C <CARD F53> ICHL(1) NHEAT(1) FRATEC(1) ICHL(2) NHEAT(2)
FRATEC(2)
1      2.0      1.0
C <CARD F6>  XA      XB      XC      YA      HA  HB  HC
0.027 0.027 0.065 6.275 1.25 60.0 1.25
C <CARD F7>  YCHI XCHI MSFLOW
0.255 6.71 6
C <CARD F75> ZETA  DH      ZLAM  HDE  AR
0.500  0.0      0.0    6.3128 39.9916
0.000  4.950    56.9   6.3128 39.9916
0.000  4.600    56.9   6.3128 39.9916
0.323  0.000    0.00   4.7800 17.945
0.000  14.95    64.0   4.7800 17.945
1.000  0.00    0.000  4.7800 17.945
C <CARD F1>  FUEL ELEMENT TITLE
2.      EB POSISI F-7 FR=1,11
C <CARD F52> NPLATE FLOC IDPL KMX IPLOT IOU
21     1.11  1  1  0  1
3.      EB POSISI - RERATA FR=1,00
C <CARD F52> NPLATE FLOC IDPL KMX IPLOT IOU
21     1.00  1  1  0  1
4.      EB POSISI G-4 FR=0,88
C <CARD F52> NPLATE FLOC IDPL KMX IPLOT IOU
21     0.880  1  1  0  1
5.      EB POSISI A-8 FR=0,75
C <CARD F52> NPLATE FLOC IDPL KMX IPLOT IOU
21     0.750  1  1  0  1

```

```

C <CARD G4> ((JMSH(NN,NNP,JJ, KK), NNP=1, NPMAX), KK=1, KMAX) ... (5
kali)
      1
      2
      3
      4
      5
      6

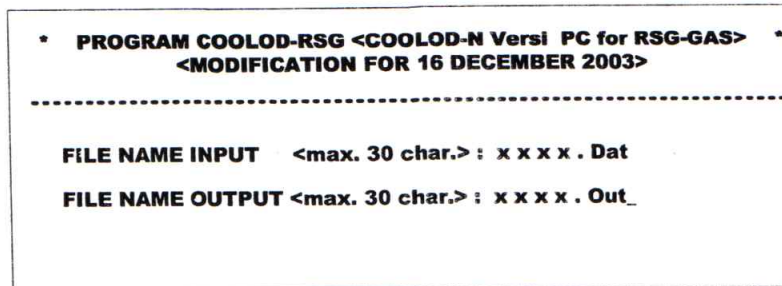
C <CARD G6> IDBG
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
      0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
    
```

Penjelasan mengenai kode dalam program disajikan dalam lampiran 2.

- Menjalankan program (*Running*):

Menjalankan program harus dalam satu *folder* antara *inputan*, *coolodN.exe*, dan *Run.bat* atau *Batch file*.

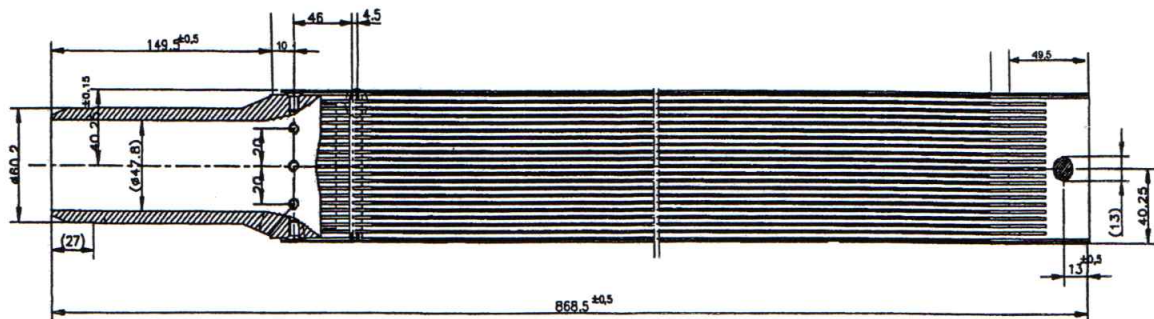
Lakukan *double-klik* “*run*”, maka muncul aplikasi sbb:



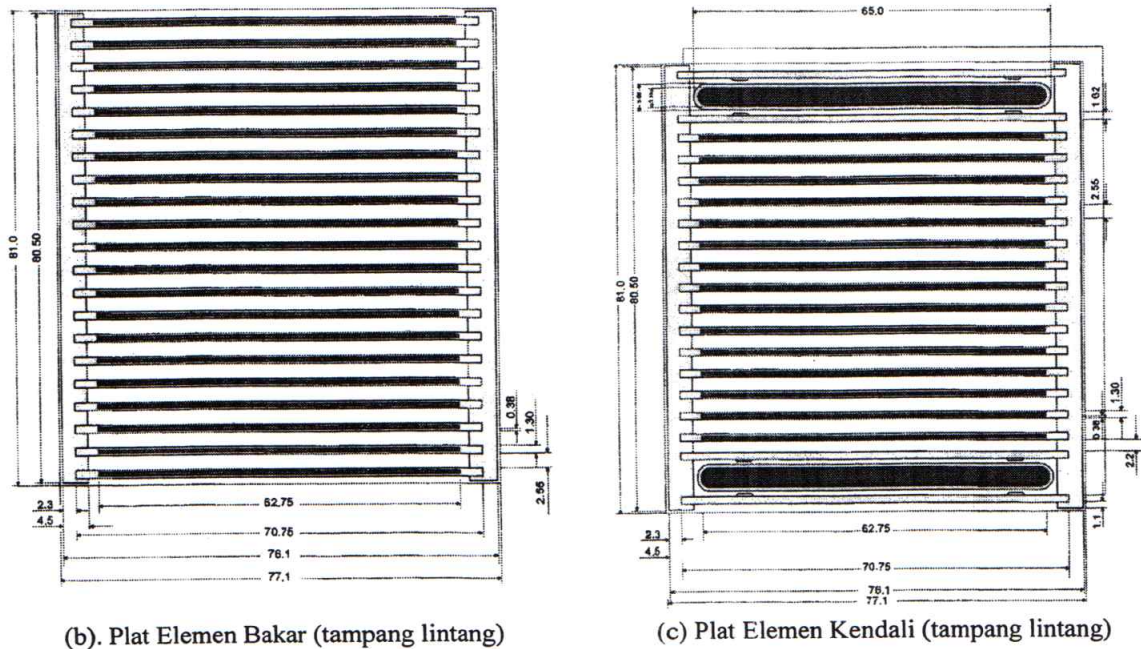
- Data-data hasil eksekusi program:
Disusun sebagai grafik dan Tabel

Data masukan *code* telah dioptimalkan yakni *I*MAX 2, *J*MAX 13, *I*MAX 5, *N*MAX 5; sehingga QRR diisi dengan daya nominal 15 MW dan 30 MW, *F*_z terbagi dalam 13, *F*_r elemen bakar terbagi dalam 5 dan jumlah perhitungan material berbeda ada 5. Faktor radial untuk EB teras silisida pada perhitungan ini, dibuat lebih tinggi yaitu 2,92 supaya dapat memverifikasi desain keselamatan secara tidak langsung. Pembagian segmen arah z (aksial) pada *J*MAX adalah 13, data ini dapat diubah lebih halus

misalnya dengan 21, dst., dan bagian CARD F4 juga harus mendapat data *F*_z yang sesuai, yaitu maksimum 1,77. Data pada *F*_z dimasukkan berdasar hitungan sinusoidal. Data desain yang harus secara cermat dihitung juga terdapat pada bagian mekanis atau dimensi dari pelat EB dan teras yaitu data pada CARD F6 dan CARD F75. Penampang (data mekanis) pelat EB RSG-GAS ditunjukkan pada Gambar 4-a,b,c.



(a). Elemen Bakar RSG-GAS (tampak samping)

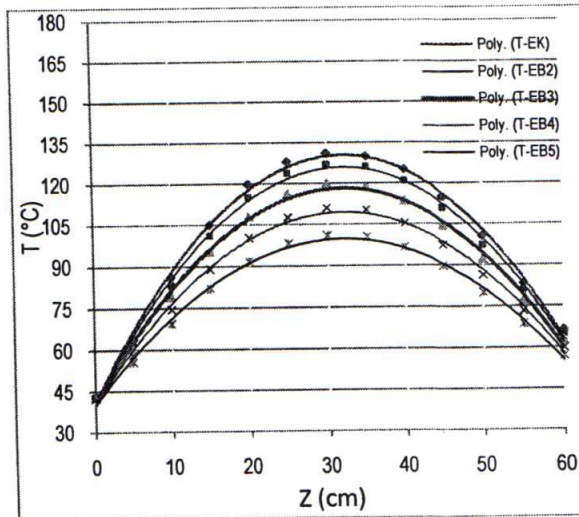


Gambar 4. Elemen Bakar RSG-GAS

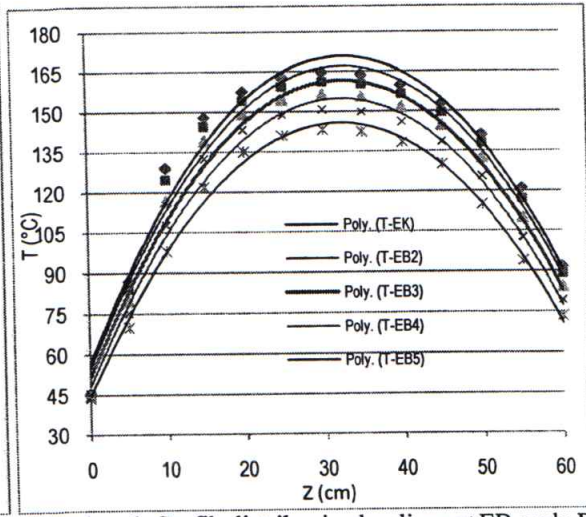
Hasil-hasil perhitungan Coolod, diantaranya disajikan dalam bentuk grafik dan tabel, yakni: Gambar 5; grafik distribusi suhu di *meat* EB pada P: 15 MW T-in pendingin 40,5 °C, Gambar 6; grafik distribusi suhu di *meat* EB pada P: 30 MW T-in pendingin 40,5 °C, Gambar 7; grafik distribusi suhu di *meat* EB pada P: 15 MW T-in pendingin 42,0 °C, Gambar 8; grafik distribusi suhu di *meat* EB pada P: 30 MW T-in pendingin 42,0 °C, Gambar 9; grafik margin keselamatan RSG-GAS dengan EB U₃Si₂-Al pada P: 15 MW dan 30 MW, dan Gambar 10; Grafik nilai DNBR kelompok EB RSG-GAS.

Analisis dari Gambar 5 s/d Gambar 8 adalah bahwa suhu terdistribusi pada daerah panjang *meat* dengan puncak panas pada range 1/2 s/d 2/3 panjang *meat*. Puncak panas local berada pada EK disebabkan karena faktor radial EK hasil perhitungan neutronik terhitung paling tinggi. Pada inputan suhu 40,5 °C untuk daya 30 MW maka suhu maks pada *meat* adalah 165 °C sedangkan untuk 15 MW adalah 131 °C. Kondisi suhu pada pendingin berpengaruh *linier* terhadap suhu di pusat *meat*.

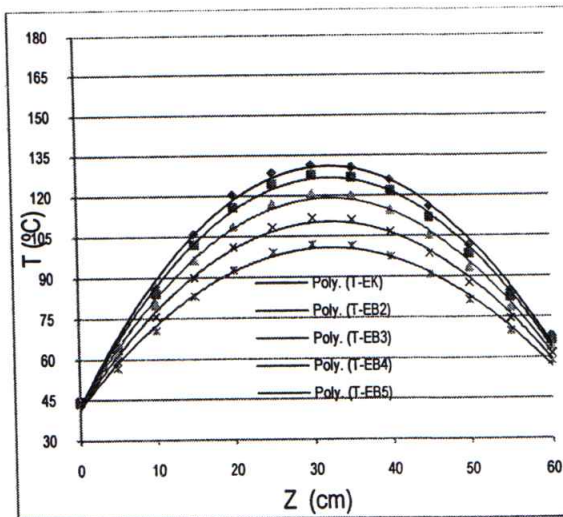
Nilai *eta* dari *running code* ditampilkan secara langsung dengan masukan pada CARD G1, yaitu IHTC diisi angka 4. Nilai *eta* pada *output Coolod* kemudian dihitung menggunakan rumus persamaan No. 6 (lampiran 1) sehingga diperoleh S seperti yang disajikan pada Gambar 9. Nilai S terendah adalah 2,56 namun rata-rata diperoleh 3,56 pada daya 30 MW dan 8,77 pada daya 15 MW. Margin keselamatan (S) teras silisida ternyata masih berada di atas angka margin keselamatan teras oksida. Sedangkan DNBR yang diperoleh dapat diambil dari tabel data keluaran *code* bagian terakhir, yaitu nilai terkecil pada kolom DNBR (disajikan pada Gambar 10). DNBR adalah parameter keselamatan termohidrolis yang umumnya digunakan pada PLTN. Di Jepang, digunakan nilai batasannya sebesar 1,65. DNBR di teras RSG-GAS untuk 30 MW berada di bawah batasan sedangkan untuk 15 MW masih berada di atas batasan tersebut. Tetapi batasan ini tidak digunakan sebagai pembandingan di reaktor riset^[3].



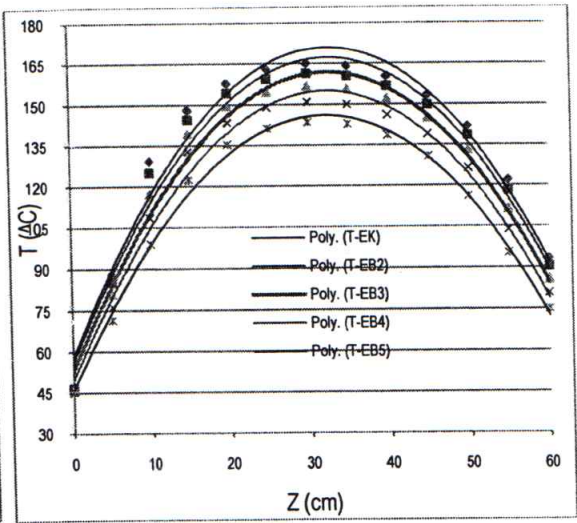
Gambar 5. Grafik distribusi suhu di *meat* EB pada P: 15 MW, T-in pendingin 40,5 °C



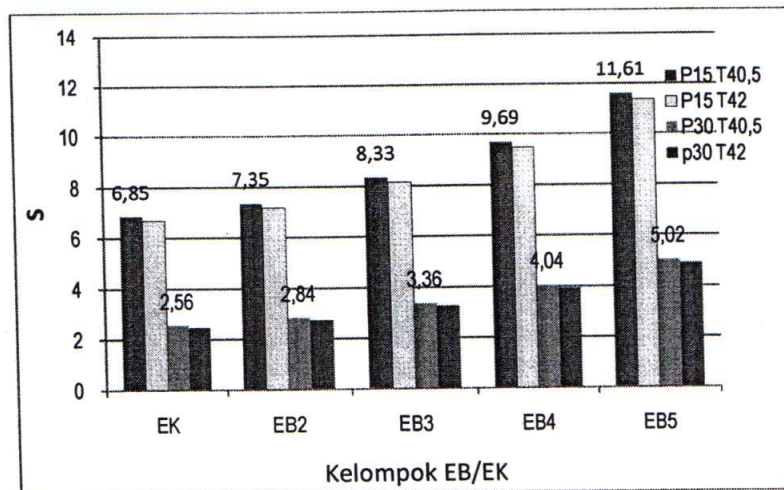
Gambar 6. Grafik distribusi suhu di *meat* EB pada P: 30, MW, T-in pendingin 40,5 °C



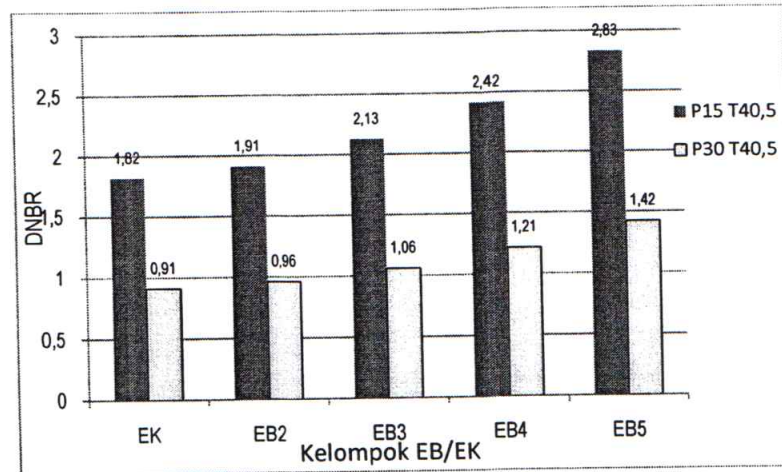
Gambar 7. Grafik distribusi suhu di *meat* EB pada P: 15 MW T-in pendingin 42 °C



Gambar 8. Grafik Distribusi suhu di *meat* EB pada P: 30, MW T-in pendingin 42 °C



Gambar 9. Grafik margin keselamatan RSG-GAS dengan EB U_3Si_2-Al pada P: 15 MW dan 30 MW



Gambar 10. Grafik nilai DNBR kelompok EB RSG-GAS

Tabel 3. Perbandingan parameter termohidrolik hasil *Coolod-N* terhadap data SAR Rev.7

Parameter termohidrolik	HASIL COOLODN		
	SAR REV. 7 P: 30 MW	P: 30 MW	P: 15 MW
Nominal inlet temperature (°C)	40,5	40,5	40,5
Average temp. at core outlet (°C)	50,5	50,58	45,54
Average temp. rise across core (K)	10,0	10,08	5,04
Eff flow rate fuel plate cooling (kg/s) / Primary Coolant Flow Rate Eff	618	712	712
Eff flow area for heat transfer (m ²) / Area Of Total Fuel Channels	0,1643	0,1591	0,1591
Average power density (W/cm ³) / Average Heat Generation	1537	1594	797
Average mass velocity in core (kg/m ² s) / Average Mass Flux	3761	3.780	3780
Average coolant v along fuel plates (m/s) / Average Channel velocity	3,7	3,85	3,83
Max plate surface temp (°C) / Temp distr cladding surface Fr-ave	145	148,39	115,68
Max central fuel temp at rated power (°C) / Temp distr fuel meat maks	175	164,78	130,87
Max power density (W/cm ³) / Average Heat trans cond, heat generation	8.210	10.032,57	5.016,29
Max heat flux for normal operation (W/m ²) / Average Heat flux in plate surface-QOFI	221,7e+4	270,88e+4	135,44e+4
Tekanan pendingin masuk kanal (kg/cm ²)	1,997	1,983	1,983
Hilang tekanan total sepanjang EB (kg/cm ²)	0,552	0,01780	0,0178
Suhu jenuh pendingin (°C)	117,24	118,60	118,6
Suhu awal pendidihan inti (°C)	129,43	131,43	129,2
Min safety margin at rate power / $S = \eta/\eta_c$	3,38	3,56	8,77

Beberapa hasil yang sama atau mendekati yang diperoleh dengan *Coolod-N* code antara EB oksida (SAR RSG-GAS Rev.7) dan silisida (yang ditampilkan pada Tabel 3), diantaranya: selisih kenaikan suhu pendingin, kerapatan fluks daya,

jumlah aliran massa, temperatur permukaan pelat EB, suhu jenuh, dan suhu awal pendidihan. Sedangkan data parameter yang masih berbeda terdapat pada kerapatan daya maks (*heat flux*) dan

temperatur maksimum pelat EB serta nilai *safety margin* reaktor.

Perbedaan hasil perhitungan *code* pada daya 30 MW dengan data SAR RSG-GAS Rev.7 disebabkan karena desain faktor aksial dan faktor radial yang telah berbeda. Selain itu, keakuratan penentuan dimensi EB, teras reaktor, dan kondisi pendinginan juga berpengaruh.

Pergantian elemen bakar oksida ke elemen bakar silisida menimbulkan adanya perubahan yang menyangkut suhu operasional elemen bakar, yaitu suhu pusat elemen bakar silisida lebih rendah (Tabel 3). Hal demikian dimungkinkan karena konduktivitas panas dari silisida lebih tinggi dari pada konduktivitas oksida. Suhu maksimum pelat elemen bakar silisida pada daya nominal 30 MW adalah sebesar 164,78°C lebih rendah dari pada suhu maksimum oksida yaitu 175°C.

Dari beberapa parameter termohidrolik yang diperbandingkan (Tabel 3) dihasilkan margin keselamatan (S) pada operasi RSG-GAS dengan silisida pada daya 30 MW adalah rerata 3,56 sedangkan pada 15 WM adalah rerata 8,77, nilai batas keselamatan ini masih berada di atas nilai minimum S desain yakni 3,38. Sedangkan dari Grafik 9, margin keselamatan pada EK (elemen kendali) mencapai 2,56. Data ini terjadi oleh karena pada EK di posisi C-8 merupakan posisi faktor puncak daya untuk EB RSG-GAS hasil perhitungan *BATAN-fuel*.

KESIMPULAN

COOLOD-N digunakan untuk perhitungan distribusi suhu arah radial dan arah aksial pada elemen bakar dalam teras reaktor. RSG-GAS dengan EB berbentuk pelat-pelat U_3Si_2-Al (atau U_3O_8-Al pada awal operasi) dan teras reaktor bentuk persegi dengan desain laju alir 860 kg/s, setelah dihitung dengan *Coolod-N* yang dikhususkan untuk RSG-GAS dengan daya nominal 30 MW maka distribusi suhu maksimum (*hotspot channel*) terdapat pada segmen ke-7 (C-8) yaitu 165°C. Nilai ini masih jauh di bawah batas keselamatan yang didesain pada SAR Rev. 7 yaitu 175 C. Demikian juga *safety margin* yang dihasilkan masih berada di atasnya yakni $S = 3,56$ pada 30 MW dan 8,77 pada daya 15 MW masih di atas nilai 3,38 batas S minimum desain. Hasil ini telah menunjukkan bahwa pengoperasian RSG-GAS dengan elemen bakar silisida lebih aman apalagi pada daya efektif 15 MW. *Coolod-N code* bisa diterapkan untuk perhitungan termohidrolik RSG-

GAS dan verifikasi keselamatan dapat dilakukan oleh personil PRSG secara mandiri sebagai alih kemampuan para pengendali keselamatan reaktor.

PUSTAKA

1. ANONIMOUS, SAR RSG-GAS Rev. 7, PRSG, 1989
2. ANONIMOUS, LAK RSG-GAS Rev.10, PRSG, 2008.
3. MUH. DARWIS ISNAENI, Program Komputer (*code*) *Coolod-N* untuk Analisis Termohidrolik Kondisi Tunak pada Reaktor Riset Berbahan Bakar tipe pelat, Coaching Keselamatan Operasi RSG-GAS, PRSG, April, 2009.
4. JAJA SUKMANA, Kajian Ulang Desain Termohidrolika Teras RSG-GAS dengan Menggunakan Program *Coolod-N*, Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir, PRSG, Oktober 2009.

DISKUSI

Nama Penanya : Hari Prijanto (PRSG)

Pertanyaan :

- a. Parameter masukan *coolod N* itu apa?
- b. Batasan nilai keselamatan RSG ?

Jawaban :

- a. Data teras EB/EK, dan inputan neutronik
- b. Batasan keselamatan daya normal 356 sehingga hasil kajian masih menunjukkan RSG GAS aman (terhitung 3,56 dan 8,77 pada P:15 MW)

Nama Penanya : Ranji Gusman

Unit Kerja : PRSG

Pertanyaan :

Parameter dari termohidrolika yang dianalisa berupa apa?

Jawaban :

- a. Parameter termohidrolik yang dianalisa adalah semua hal yang terkait distribusi panas dan nilai keselamatan diantaranya aliran pendingin teras, suhu pendingin, suhu EB dan stabilitas aliran
- b. Metode yang digunakan adalah dengan menghitung menggunakan *Coolod N* dari JEAEA yang disesuaikan dengan interatom

Lampiran 1:

- (1) Aliran konveksi paksa, satu fasa digunakan korelasi Dittus – Boelter.

$$Nu = 0,023 Re_b^{0,8} Pr_b^{0,4} \quad \text{untuk aliran turbulen (} Re \geq 2500 \text{)}$$

di mana :

$$Nu : \text{Bilangan Nusselt} = h D_c / k$$

$$Re : \text{Bilangan Reynolds} = D_c V \rho / \mu$$

$$Pr : \text{Bilangan Prandtl} = c_p \mu / k$$

De : Diameter hidraulik ekuivalen, m

V : Kecepatan pendingin, m/det

 μ : Viskositas dinamik, kg/ m det ρ : Densitas pendingin, kg/ m³

- (2)
- Fluks*
- panas pada awal pendidihan, suhu ONB (
- Onset of Nucleate Boiling*
-) digunakan korelasi Bergles-Rohsenow:

$$q'' = 911 \cdot P^{1,156} \left\{ \frac{9}{5} T_{ONB} - T_s \right\}^{0,0234 \cdot 2,16}$$

di mana :

 q'' : *Fluks* panas saat ONB

P : Tekanan pendingin pada titik 'Z'

 T_s : Suhu saturasi, Oc

- (3)
- Fluks*
- panas subcooled nucleate boiling:

$$q'' = 0,023 Re_b^{0,8} Pr_b^{0,4} \frac{k}{De} (T_w - T_l) + S \cdot 7,228 \frac{k_f^{0,79} C p_f^{0,45} \gamma_f^{0,49} (T_w - T_s)^{1,24} (P_w - P)^{0,75}}{\sigma^{0,5} \mu_f^{0,29} h_{fg}^{0,24} \gamma_g^{0,24}}$$

- (4)
- Fluks*
- panas pada saturation nucleate boiling:

$$q'' = 0,023 \{ Re_f (1 - x) \}^{0,8} Pr_b^{0,4} \frac{k}{De} (T_w - T_s) + S \cdot 7,228 \frac{k_f^{0,79} C p_f^{0,45} \gamma_f^{0,49} (T_w - T_s)^{1,24} (P_w - P)^{0,75}}{\sigma^{0,5} \mu_f^{0,29} h_{fg}^{0,24} \gamma_g^{0,24}}$$

- (5)
- Fluks*
- panas pada akhir pendidihan inti DNB

$$q''_{DNB,3} = 0,7 \left(\frac{A}{A_H} \right) \frac{\left\{ \frac{w(\gamma_l)}{\sigma} \right\}^{0,5}}{\left\{ 1 + \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_l} \right)^{0,25} \right\}^2} q_1(DNB, Z) \dagger (C^* \dagger) = \square (A/A_H H \square ((\nabla h_i) / h_{ifg})) | G^{\dagger * } |$$

- (6) Model Penentuan batas keselamatan terhadap ketidak-stabilan aliran, digunakan persamaan :

$$S = \frac{n}{n_c} \quad \text{dimana, } n = \frac{[T_s(z) - T_c(z)]}{q''} V(z)$$

 T_s : suhu saturasi, C T_c : suhu bulk pendingin, C

V : kecepatan pendingin, cm/det

 q'' : *fluks* panas, W/cm

z : jarak dari kanal masukan pendingin, cm

 n_c : parameter pelepasan gelembung kritis, yang besarnya ditetapkan 22,1 cm K/J.

Lampiran 2:

Input data information for COOLOD-N2

TITL : Title for the calculation
INFORM : Index for input data format (I)
IAMAX : Number of calculation cases (I) ($1 \leq \text{IAMAX} \leq 10$)
IMAX : Number of calculation points in fuel meat radial direction (I)
JMAX : Number of calculation points for fuel plate axial direction (I)
NMAX : Number of different fuel elements in the core (I) ($1 \leq \text{NMAX} \leq 5$)
NPLOT : Plot option of calculation results (I)
IDMAX : Number of division in cladding region <CARD C> Thermal-hydraulic parameter (Free format)
QRR : Reactor thermal power (MW) (R)
PFLOW : Primary coolant flow rate or average coolant velocity in the core (R)
TIN : If KEY(1)=1 then the Primary coolant core inlet temperature ($^{\circ}\text{C}$) (R)
DT : Increment of inlet temperature "TIN" ($^{\circ}\text{C}$) (R)
JAMX : Number of calculation cases for "DT" (I) (Normally : =1)
 $H_1, H_2, H_3, A, B, C, D, \text{ITWC}$
ITWC : Standard temperature for property (I)
FRATE : $\text{FRATE} = (\text{Effective flow rate for fuel plates cooling}) / (\text{Primary coolant flow rate})$ (-) (R)
VIN : Coolant velocity in the inlet plenum (cm/s) (R)
VOUT : Coolant velocity in the outlet plenum (cm/s) (R)
PRESSIN : Core inlet pressure ($\text{kg/cm}^2 \text{abs}$) (R)
RAMF : Index for straight pipe friction loss for turbulent flow (R)
NPMX : Number of different fuel plates in this kind of fuel element (I)
(Different cooling condition, different configuration) ($1 \leq \text{NPMX} \leq 15$)
NFUEL : Number of this kind of fuel elements in the core (R)
MA : Index for fuel meat material (I)
UDENST : Uranium density in meat (g/cm^3) (R) (For U-Al and U-Al_x dispersion type fuel)
POROTY : Porosity (-) (R) (For U-Al_x dispersion type fuel)
IDPMX : Number of different configuration fuel plates in this kind of fuel element (I)
($1 \leq \text{IDPMX} \leq 5$) (Number of CARD F6)
IDCMX : Number of different configuration flow channels in this kind of fuel element (I)
($1 \leq \text{IDCMX} \leq 5$) (Number of CARD F70, CRAD F74 or CARD F76)
EAREA : Effective flow area for this kind of fuel element (cm) (R)
FRATEN : Flow rate distribution factor for this kind of fuel element (-) (R)
 $\text{FRATEN} = (\text{Flow rate of this kind of fuel element}) / (\text{Average flow rate of fuel element})$
NUAL : Number of data sets (I)
TUAL : Temperature ($^{\circ}\text{C}$) (R)
UAL : Thermal conductivity of the fuel meat (W/cm K)
FR : Radial peaking factor (F_R (radial) $\times F_E$ (uncertainty)) (R)
FCCOL : Engineering peaking factor for bulk coolant temperature rise (R) (F_b)
FHFLX : Engineering peaking sub-factor for heat flux (R)
(This sub-factor is used in the calculation of DNBR)
FFILM : Engineering peaking factor for film temperature rise (R) (F_f)
FCLAD : Engineering peaking factor for clad temperature rise (R)
FBOND : Engineering peaking factor for bond temperature rise (R)
FMEAT : Engineering peaking factor for fuel meat temperature rise (R)
FZ : Axial peaking factor (R)
DDZ : Distance from point_i (M_i) to point_{i+1} (M_{i+1}) or a segment length (R)
ZET : Resistance coefficient at point_i (M_i). (R) (Normally : = 0.0)
NPLATE : Number of this kind of fuel plates in this kind of fuel element (R)
FLOCL : Local peaking factor (R)
IDPL : Identity number of fuel plate configuration (I) (See CARD F6)
KMX : Index for cooling condition of fuel plate (I)
ICHL : Identity number of channel configuration (I)
NHEAT : Coolant condition (R)
FRATEC : Flow rate distribution factor for this kind of channel (R)

- XA : Half thickness of fuel meat for plate-type fuel (cm) (R)
- XB : Distance between fuel meat center and clad inner surface for plate-type fuel
- XC : Distance between fuel meat center and clad outer surface for plate-type fuel (cm) (R) (Half thickness of fuel plate)
- YA : Width of fuel meat for plate-type fuel (cm) (R)
- HA : Distance between inlet of channel and top(bottom) of fuel meat (pellet) (cm) (R)
- HB : Length of fuel meat (fueled region) (cm) (R)
- HC : Distance between outlet of channel and bottom(top) of fuel meat (pellet) (cm) (R)
- YCHI : Gap(thickness) of coolant channel (cm) (R)
- XCHI : Width of coolant channel (cm) (R)
- ZETA(1) : Resistance coefficient of fuel element entrance (STRETCH(1)) (R)
- DH(1) : Distance between fuel element entrance and fuel plate entrance (cm) (R)