

ANALISIS TERMOHIDROLIKA ELEMEN BAKAR UJI U-7Mo/Al DAN U-6Zr/Al DI RSG-GAS MENGGUNAKAN COOLOD-N₂, NATCON DAN CFD-3D

Endiah Puji Hastuti, Muhammad Subekti

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN)-BATAN

Kawasan Puspipstek, Serpong, Tangerang Selatan, 15310

e-mail: endiah@batan.go.id; subekti@batan.go.id

(Naskah diterima: 12 Desember 2012, disetujui: 21 Januari 2013)

ABSTRAK

ANALISIS TERMOHIDROLIKA ELEMEN BAKAR UJI U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al di RSG-GAS MENGGUNAKAN COOLOD-N₂, NATCON dan CFD-3D. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir PTBN-BATAN melalui litbang bahan bakar densitas tinggi menggunakan uranium pengayaan rendah (<20% U²³⁵), merencanakan uji iradiasi elemen bakar uji (EBU) U-7Mo dan U-6Zr/Al di RSG-GAS. Posisi iradiasi G-7 dipilih dengan pertimbangan akan memberikan dampak perubahan reaktivitas minimum. Analisis keselamatan termohidrolika pada kondisi tunak (*steady state*) dan konveksi alam dilakukan pada daya 30 MW dan daya operasional 15 MW. Program komputasi satu dimensi COOLOD-N₂ dan NATCON masing masing digunakan untuk menghitung parameter termohidrolika pada kondisi konveksi paksa dan konveksi alam, sedangkan program komputasi dinamika fluida tiga dimensi (CFD-3D) FLUENT untuk memberikan visualisasi parameter termohidrolika. Hasil verifikasi perhitungan FLUENT dengan COOLOD-N₂ diperoleh deviasi antara 2,78% hingga 13,92%. Batas keselamatan EBU U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al yang diiradiasi pada daya 15 MW maupun 30 MW memenuhi batas keselamatan sesuai dengan yang dipersyaratkan di dalam Laporan Analisis Keselamatan RSG-GAS.

Kata kunci: elemen bakar uji, pelat elemen bakar U-7Mo/Al, pelat elemen bakar U-6Zr/Al, COOLOD-N₂, NATCON, CFD-3D FLUENT.

ABSTRACT

THERMALHYDRAULIC ANALYSIS of U-7Mo/Al and U-6Zr/Al EXPERIMENTAL FUEL ELEMENT in RSG-GAS BY USING COOLOD-N₂, NATCON and CFD-3D. The Center for Nuclear Fuel Technology BATAN through research and development of low-enriched uranium fuel (<20% U²³⁵) has a plan for irradiating experimental fuel element plates of U-7Mo and U-6Zr/Al in RSG-GAS. G-7 irradiation position is therefore selected with a consideration to give minimum reactivity changes. Thermal hydraulics safety analysis at steady state and free convection is performed on the power of 30 MW and 15 MW. One-dimensional computational programs, COOLOD-N₂ and NATCON, are used to calculate thermal hydraulics parameters in conditions of forced and free convection, while three-dimensional computational fluid dynamic FLUENT is used to provide visualization of thermal hydraulics parameters. The comparison of

COOLOD-N2 and FLUENT calculation results shows a deviation between 2.78% to 13.92%. Safety margin of U-7Mo and U-6Zr/Al irradiated at 15 MW and 30 MW meet the safety margin required in the RSG-GAS Safety Analysis Report.

Keywords: *experimental fuel element, U-7Mo/Al fuel element plate, U-6Zr/Al fuel element plate, COOLOD-N2, NATCON, CFD-3D FLUENT.*

PENDAHULUAN

Penggunaan bahan bakar berpengayaan rendah sesuai dengan program RERTR (*Reduced Enrichment for Research and Testing Reactor*), yang dicanangkan untuk mengganti penggunaan bahan bakar uranium pengayaan tinggi (> 93% U^{235}) dengan uranium pengayaan rendah (< 20% U^{235})^[1], mendorong litbang bahan bakar tingkat muat uranium tinggi di berbagai negara untuk utilisasi reaktor. Keuntungan penggunaan bahan bakar dengan tingkat muat uranium tinggi adalah meningkatnya *performance* (kinerja) reaktor. Diantara berbagai jenis paduan (*alloy*) yang memenuhi penambahan tingkat muat adalah penambahan unsur molybdenum dan unsur zircaloy. Terdapat beberapa metode pembuatan serbuk bahan bakar uranium molybdenum (UMo), diantaranya metode atomisasi yang teknologinya telah dikuasai oleh Korea Selatan, dan metode *hydride-milling-dehydride*^[2]. Perkembangan fabrikasi bahan bakar paduan UMo di beberapa negara telah mencapai tingkat muat antara 6 hingga 13 prosen berat molybdenum^[3].

Peningkatan tingkat muat uranium di dalam bahan bakar reaktor riset berpengayaan rendah juga dilakukan dengan membuat paduan uranium zirkonium, paduan bahan ini selain memiliki keuntungan fitur keselamatan yang unik yaitu koefisien *prompt* reaktivitas temperatur negatif, juga berpotensi menambah tingkat muat uranium di dalam bahan bakar reaktor. Litbang bahan bakar U-Zr di dalam teknologi reaktor TRIGA telah mencapai 45 prosen berat uranium (wt-%U) atau setara dengan

3,7 gU/cm³, menggunakan uranium pengayaan rendah^[4].

Seiring dengan kemajuan litbang bahan bakar tingkat muat tinggi dunia, PTBN-BATAN telah menyelesaikan pembuatan pelat elemen bakar uji (EBU) U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al berukuran mini menggunakan uranium deplesi. Kedua EBU tersebut direncanakan untuk diiradiasi secara bersamaan di dalam satu bundel elemen bakar. Rencana uji panas EBU di dalam teras reaktor RSG GAS memerlukan analisis keselamatan yang tepat, mengingat penambahan tingkat muat berpengaruh pada sifat termal bahan bakar, selain akan menambah reaktivitas teras reaktor.

Paper ini bertujuan untuk menganalisis keselamatan teras maupun elemen bakar yang diiradiasi dengan memperhatikan letak kupon EBU mini ini sepanjang arah aksial pelat elemen bakar, letak di dalam bundel elemen bakar dan posisi iradiasi di teras, yang dilakukan sinergi dengan analisis neutronik. Mengingat bahwa *scope* (ruang lingkup) penelitian ini begitu luas maka paper ini dibatasi pada analisis termohidrolika dua EBU U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al pada kondisi operasi normal *steady-state* (tunak) dan konveksi alam. Analisis dilakukan dengan menggunakan program perhitungan satu dimensi COOLOD-N2 untuk operasi normal kondisi tunak, NATCON untuk konveksi alam dan program komputasi dinamika fluida tiga dimensi (CFD-3D) FLUENT untuk pembandingan sekaligus memberikan visualisasi karakteristik termohidrolika di dalam pelat uji.

TATA KERJA

Elemen bakar uji U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al

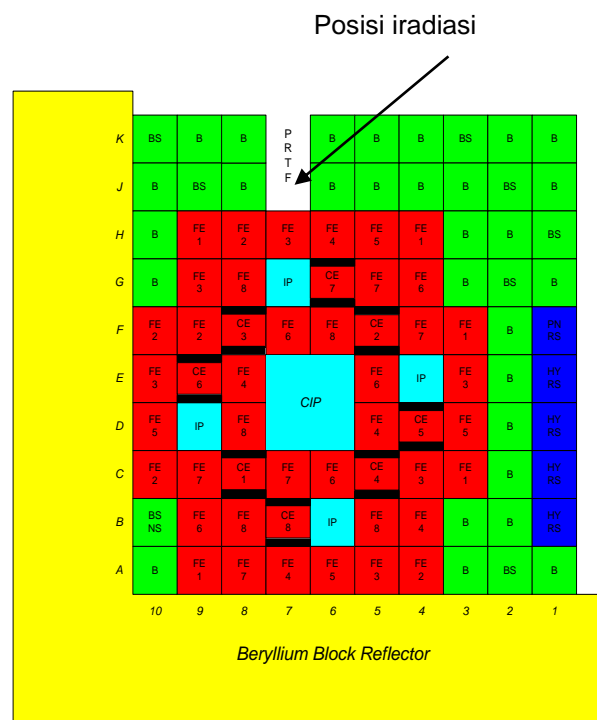
Elemen bakar uji U-7Mo/Al dengan tingkat muat 7 gU/cm³ dan U-6Zr/Al dengan tingkat muat 5,2gU/cm³ dipilih sesuai dengan UCD (*user criteria document*) reaktor riset inovatif yang sedang dalam tahap litbang desain konseptual, untuk mengantisipasi perkembangan bahan bakar reaktor riset kedepan^[5]. PTBN telah membuat serbuk U-6Mo dan U-6Zr dengan metode *hydriding-dehydriding-milling*, yang selanjutnya didispersikan ke dalam serbuk matrik aluminium dan dibentuk menjadi inti elemen bakar (IEB) U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al dengan cara kompaksi. Selanjutnya IEB U-7Mo/Al atau U-6Zr/Al bersama *frame* dan *cover* AlMg₂ dibentuk menjadi pelat elemen bakar (PEB) dengan teknik pengerolan panas dan dingin^[6]. PEB U-7Mo/Al (3 buah) dan U-6Zr/Al (3 buah) dirakit ke dalam elemen bakar uji (EBU) dengan cara menyisipkan masing-masing PEB pada alur 2, 5 dan 8 serta 14, 17 dan 20, sedang 15 alur lainnya berisi pelat AlMg₂ *dummy* yang dirakit dengan rol gencet. EBU U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al direncanakan dikenai uji iradiasi di RSG-GAS, dimensi pelat EBU ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Dimensi PEB U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al

Dimensi PEB		Dimensi Meat	
Panjang, mm	625 ± 0,2	Panjang, mm	± 150
Lebar, mm	70,75 ± 0,15	Lebar, mm	± 15
Tebal, mm	1,3 ± 0,07	Tebal, mm	± 0,631
Tebal Kelongsong, AlMg ₂ /AlMgSi ₁ , mm	> 0,25		

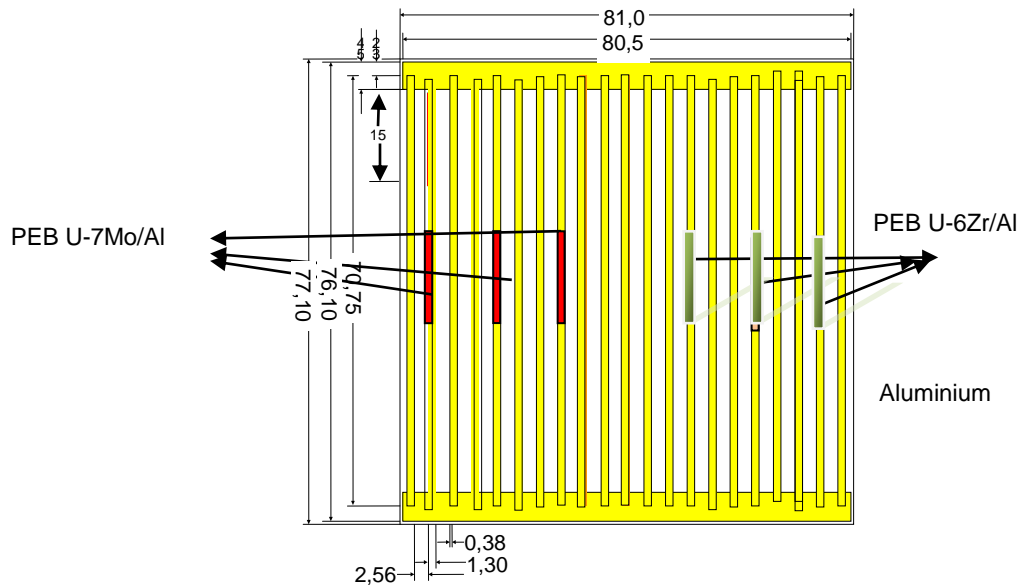
Posisi kupon elemen bakar uji U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al

EBU berisi uranium akan memberikan reaktivitas positif sehingga pemilihan posisi iradiasi di teras RSG-GAS dilakukan melalui perhitungan neutronik, dimana posisi terpilih adalah yang memberikan penambahan reaktivitas teras terkecil. Penempatan kupon pelat EBU di dalam *stringer* diatur sedemikian rupa sehingga memenuhi keselamatan dari aspek neutronik dan termohidrolik. Hasil perhitungan neutronik menunjukkan bahwa posisi iradiasi terpilih adalah G-7 seperti ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan posisi PEB U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al di dalam *stringer* ditunjukkan pada Gambar 2^[8].



Catatan : EB = Elemen Bakar, EK = Elemen Kendali, BE = Elemen Be Reflektor, BS = Elemen Be Reflektor dengan *plug*, IP = Posisi Iradiasi, CIP = Posisi Iradiasi Central, PNRS = *Pneumatic Rabbit System*, HYRS = *Hydraulic Rabbit System* (kelas fraksi bakar dalam baris ke-2)

Gambar 1. Posisi iradiasi U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al di teras RSG-GAS.



Gambar 2. Posisi PEB U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al di dalam EBU.

Program perhitungan

Analisis ini menggunakan 3 (tiga) program komputasi masing-masing adalah COOLOD-N2 yang merupakan program komputasi termohidrolika 1 dimensi yang dikembangkan untuk menganalisis termohidrolika teras reaktor riset untuk elemen bakar tipe MTR pada kondisi tunak^[9]. NATCON merupakan program komputasi untuk analisis termohidrolika dalam keadaan tunak untuk bahan bakar nuklir jenis pelat dalam sebuah reaktor riset yang didinginkan secara konveksi alami^[10]. FLUENT adalah program perhitungan dinamika fluida 3 dimensi (CFD-3D =

computational fluid dynamic 3 dimension) berbasis volume hingga (*finite volume*) yang mampu memprediksi dan menganalisis fenomena dinamika aliran fluida secara teliti dan memberikan visualisasi yang baik^[11]. Ketiga program komputasi tersebut digunakan untuk memberikan hasil analisis keselamatan yang sinergis.

Pemodelan dan input program

Analisis EBU dilakukan pada posisi teras G7. Target iradiasi ditempatkan pada kanal ini dengan distribusi fluks neutron pada posisi aksial maksimum. Input data yang digunakan dalam perhitungan keselamatan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data masukan perhitungan termohidrolika kanal EBU U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al di dalam teras RSG-GAS posisi G7.

Parameter	Nilai Kanal
Pembangkitan panas di teras reaktor, MW	30,000
Tekanan pendingin ke teras, kg/cm ²	2,0360
Temperatur pendingin masuk ke teras, °C	44,500
Laju alir pendingin ke teras, kg/det.	800,000
Laju alir pendingin min. per elemen bakar, m ³ /jam	46,540
Faktor-faktor puncak daya :	
Faktor puncak daya radial, FR	2,122
F _{cool}	1,167
F _{film}	1,200
F _{hftx}	1,200
F _{kelongsong} , F _{bond} , F _{meat}	1,000
Faktor puncak daya aksial, F _A	1,757

Sifat termal bahan bakar U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al

Bahan bakar U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al dengan tingkat muat 7 gU/cm³ dan 5,2 gU/cm³ akan memiliki persamaan sifat termal dengan bahan bakar silisida, yaitu konduktivitas dan densitas bahan bakar bergantung pada fraksi volume bahan bakar dalam U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al. Selain itu, konduktivitas dan densitas juga bergantung pada porositas bahan bakar untuk menampung gas produk fisi pada awal proses iradiasi. Nilai spesifik dan konduktivitas bahan bakar U-7Mo/Al dan

U-6Zr/Al diperoleh dari literatur^[3]. Panas spesifik bahan bakar U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al memiliki nilai yang relatif konstan pada 0,155 J/gK^[3].

Beberapa variasi konduktivitas termal *meat* bahan bakar ditentukan oleh jenis perlakuan fabrikasi bahan bakar. Selain itu, konduktivitas *meat* bahan bakar juga ditentukan oleh *burn-up* (fraksi bakar). Laju *swelling* dan reaksi matriks bahan bakar akan menurunkan konduktivitas termal *meat* bahan bakar. Tabel 3 menampilkan parameter termal EBU.

Tabel 3. Parameter termal EBU dibandingkan dengan bahan bakar uranium silisida.

Parameter	U ₃ Si ₂ /Al	U-7Mo/Al	U-6Zr/Al	Kelongsong
ρ , g/cm ³	5,124	16,336 (Porositas 18%)	17,260 (Porositas 23%)	2,700
Cp, J/g°C	0,484	0,155	0,155	0,961
k, W/cm°C	1,070	0,15 – 0,25	0,20 – 0,30	2,160

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembangkitan panas total perpelat EBU sangat kecil, sehingga analisis keselamatan yang dipilih dari aspek termohidrolika hanya terkait dengan kondisi operasi RSG-GAS, yaitu konveksi paksa kondisi tunak dan konveksi alam. Hasil perhitungan termohidrolika 1 dimensi konveksi paksa (daya tinggi) dilakukan pada kondisi tunak dengan daya reaktor 30 MW

sesuai batasan Laporan Analisis Keselamatan (LAK) RSG-GAS dan daya 15 MW sesuai daya operasionalnya, sedangkan program komputasional 3 dimensi FLUENT digunakan untuk memberikan hasil perhitungan yang lebih detail. Analisis juga dilakukan dalam perhitungan termohidrolika konveksi alam (daya rendah) dimana sistem pendingin primer sengaja tidak dioperasikan.

Verifikasi FLUENT

Program perhitungan termohidrolika COOLOD-N2, NATCON serta perhitungan distribusi laju alir CAUDVAP telah terverifikasi dan digunakan untuk menganalisis keselamatan teras RSG-GAS^[12], sehingga program FLUENT dapat diverifikasi dengan program-program tersebut. Verifikasi dilakukan terhadap obyek yang sama yaitu bahan bakar U_3Si_2/Al pada daya 30 MW. Hasil perhitungan temperatur pendingin kondisi tunak menggunakan FLUENT yang diverifikasi dengan hasil pengukuran dan perhitungan perbandingan menggunakan COLOOD-N2

ditunjukkan dalam Tabel 4. Hasil perhitungan dengan basis input temperatur dan pembangkitan panas yang sama menunjukkan deviasi sebesar 4,95% dan 6,87%. Perbandingan antara FLUENT dan CAUDVAP serta LAK RSG GAS untuk perhitungan laju alir ditunjukkan dalam Tabel 5. FLUENT mempunyai kesesuaian yang sangat baik tanpa ada deviasi dengan hasil yang diberikan oleh LAK, bahkan dapat memberikan informasi lebih detil mengenai profil aliran di sepanjang pelat hingga pipa luaran elemen bakar (Gambar 3). Berdasarkan data tersebut terbukti bahwa FLUENT terverifikasi dengan baik.

Tabel 4. Hasil perhitungan FLUENT pada kondisi tunak elemen bakar RSG-GAS menggunakan bahan bakar U_3Si_2/Al pada daya 30 MW.

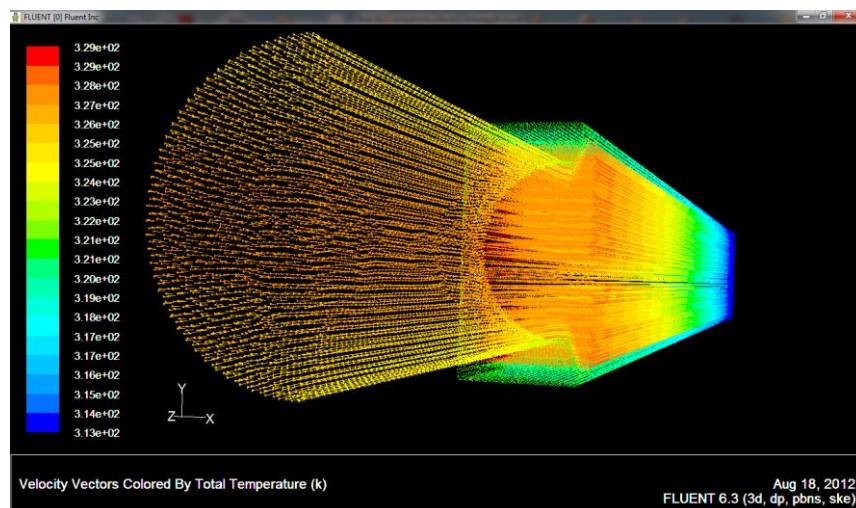
Parameter	FLUENT	LAK
Temperatur Air Masukan (<i>input</i>)	40,5 °C (EB)	40,5 °C (EB)
Temperatur Air Luaran	53,0 °C (EB)	50,5 °C (Teras) 52,4 °C (EB)*
Temperatur Air maksimum	56,0 °C (EB)	

Tabel 5. Hasil perhitungan kecepatan aliran FLUENT pada kondisi operasi elemen bakar RSG-GAS menggunakan bahan bakar U_3Si_2/Al pada daya 30 MW.

Posisi Aliran	Distribusi kecepatan aliran		
	FLUENT	CAUDVAP	LAK
Celah pelat	3,66 m/s	3,67 m/s	3,66 m/s
Bawah celah pelat	2,76 m/s	-	-
<i>Fitting</i> bawah	5,93 m/s	-	-
Pipa luaran elemen bakar	8,65 m/s	-	-

Gambar 3 menunjukkan visualisasi hasil perhitungan distribusi temperatur di dalam satu elemen bakar U_3Si_2/Al pada

daya 30 MW menggunakan program perhitungan FLUENT.



Gambar 3. Hasil perhitungan distribusi temperatur dalam elemen bakar RSG-GAS menggunakan bahan bakar U₃Si₂/Al pada daya 30 MW.

Analisis termohidrolika kondisi tunak konveksi paksa

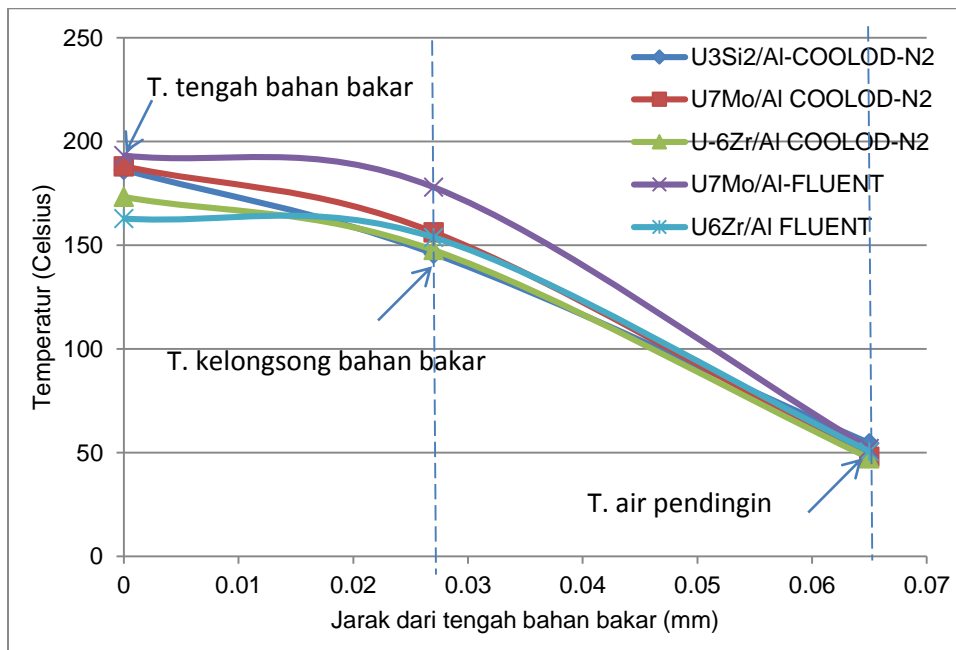
Tabel 6 dan Gambar 4 memperlihatkan hasil perhitungan distribusi temperatur kondisi tunak EBU U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al pada daya tinggi 30 MW menggunakan FLUENT dan COOLOD-N₂. Hasil perhitungan temperatur antara FLUENT dan COOLOD-N₂ yang diberikan pada Tabel 6 memberikan deviasi antara 2,78% hingga 13,92%. Perbedaan terbesar terjadi dalam perhitungan temperatur kelongsong. Perhitungan 1 dimensi

COOLOD-N₂ menggunakan seluruh pendingin yang masuk dalam subkanal untuk mendinginkan dinding kelongsong dengan lebar 62.75 mm, sedangkan lebar *meat* hanya sebesar 15 mm. Perhitungan FLUENT memperhitungkan kondisi interior 3D dimana hanya bagian pendingin air yang dekat dengan lebar *meat* saja yang efektif mendinginkan kelongsong. Gambar 4 menunjukkan hasil perhitungan temperatur di zona kelongsong langsung menurun (COOLOD-N₂), sedangkan dengan FLUENT lebih tinggi.

Tabel 6. Hasil perhitungan distribusi temperatur kondisi tunak EBU U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al pada daya tinggi 30 MW.

Parameter Kritisal	U ₃ Si ₂ /Al (30 MW)	U-7Mo/Al (30 MW)	U-6Zr/Al (30 MW)	Batas
T _{air masukan} , °C	44,50	44,50	44,50	44,50
T _{meat} , °C	186,37	193,32 ¹ 188,09 ²	162,88 ¹ 173,35 ²	450,00
T _{kelongsong} , °C	145,96	178,06 ¹ 156,30 ²	153,77 ¹ 147,71 ²	250,00
T _{air maksimum} , °C	54,57	52,13 ¹ 48,01 ²	50,57 ¹ 47,34 ²	125,68 (T _{ONB})
Kecepatan pendingin, m/s	3,65	3,65	3,65	15,00
Marjin terhadap instabilitas aliran, S (-)	3,01	3,46 ²	4,42 ²	-
Densitas Daya, W/cm ³	8.210	10.068	7.921	11.300

Keterangan: ¹ Hasil perhitungan FLUENT, ² Hasil perhitungan COOLOD-N₂.



Gambar 4. Perbandingan hasil perhitungan distribusi temperatur arah radial U_3Si_2/Al , $U-7Mo/Al$ dan $U-6Zr/Al$ dengan COOLOD-N2 dan FLUENT.

Hasil perhitungan COOLOD-N2 pada Tabel 7 menampilkan perbandingan profil termohidrolika kedua pelat EBU $U-7Mo/Al$ dan $U-6Zr/Al$ pada daya 30 MW dan

15 MW yang dilengkapi dengan nilai pembanding elemen bakar U_3Si_2/Al 2,96 gU/cm^3 pada daya 30 MW dan nilai batas sesuai LAK RSG-GAS.

Tabel 7. Perbandingan hasil perhitungan COOLOD-N2 bahan bakar $U-7Mo/Al$ dan $U-6Zr/Al$ pada daya tinggi 30 MW dan 15 MW.

Parameter Kritisal	U_3Si_2/Al (30 MW)	$U-7Mo/Al$	$U-6Zr/Al$	Batas
$T_{air\ masuk}$, °C	44,50	44,50	44,50	44,50
T_{meat} , °C	186,37	188,09 ¹ 145,83 ²	173,35 ¹ 127,69 ²	450,00
$T_{kelongsong}$, °C	145,96	156,30 ¹ 128,83 ²	147,71 ¹ 113,93 ²	250,00
$T_{air\ maksimum}$, °C	54,57	48,01 ¹ 46,26 ²	47,34 ¹ 45,91 ²	125,68 (T_{ONB})
Kecepatan pendingin, m/s	3,65	3,65	3,65	15,00
Marjin terhadap instabilitas aliran, S (-)	3,01	3,46 ¹ 7,04 ²	4,42 ¹ 9,01 ²	-
Densitas Daya 30 MW, W/cm^2	8.210	10.068	7.921	11.300
Densitas Daya 15 MW, W/cm^2	4.105	5.034	3.960,5	5.650

Keterangan: ¹ Hasil perhitungan daya 30 MW, ² Hasil perhitungan daya 15 MW.

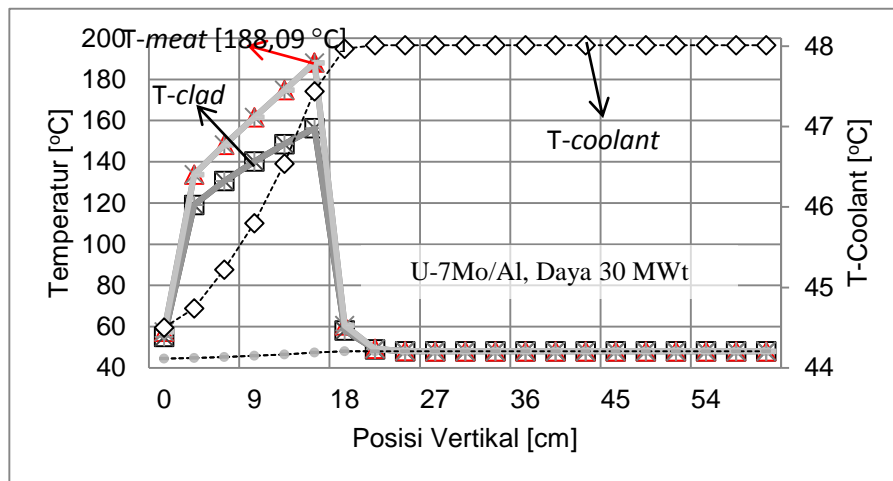
Gambar 5 dan 6 masing-masing memperlihatkan profil temperatur di sepanjang kanal pelat, baik yang berisi EBU

$U-7Mo/Al$ dan $U-6Zr/Al$ maupun pelat *dummy* paduan aluminium pada daya 30 MW. Dalam pemodelan COOLOD-N2,

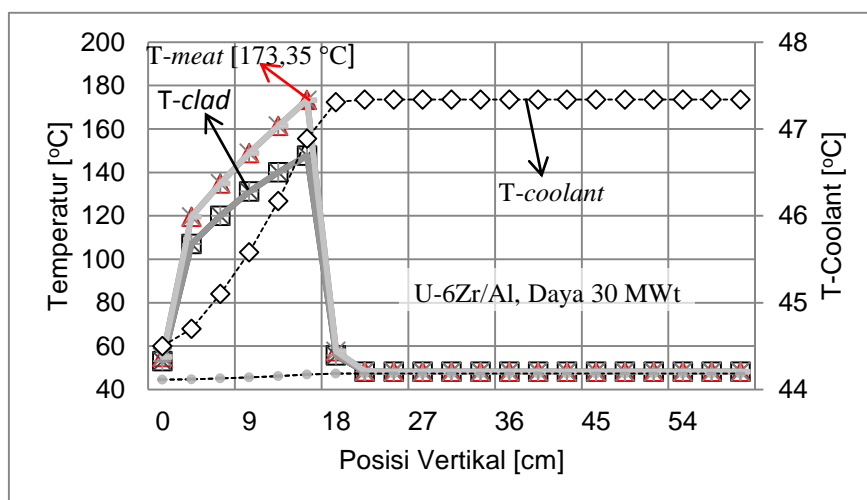
perpindahan panas dari pelat elemen bakar ke pendingin di hitung dari *inlet* hingga *outlet* subkanal bahan bakar, meskipun pembangkitan panas hanya berasal dari PEB. Konduktivitas U-7Mo/Al lebih kecil daripada U₃Si₂/Al, hal ini menyebabkan perpindahan panas dari tengah *meat* bahan bakar ke kelongsong lebih rendah sehingga temperatur kelongsong EBU U-7Mo/Al menjadi lebih panas. Temperatur *meat* maupun kelongsong turun secara drastis di ujung bawah PEB dari nilai maksimumnya karena pembangkitan panas fisi berakhir, selanjutnya temperature *meat* mendekati temperatur *inlet*, sedangkan temperatur

pendingin relatif konstan sesuai temperatur maksimum yang dicapai.

Fenomena yang sama terjadi pada EBU U-6Zr/Al, meskipun demikian temperatur *meat* maupun kelongsong kedua EBU ini masih memenuhi batas yang ditetapkan, demikian pula dengan batas keselamatan terhadap instabilitas aliran. Tabel 7 juga menampilkan nilai parameter termohidrolika pada daya 15 MW. Nilai ini memberikan kepercayaan bahwa insersi kedua EBU pada daya operasional RSG-GAS 15 MW aman, karena nilai seluruh parameter jauh di bawah batas yang dipersyaratkan.



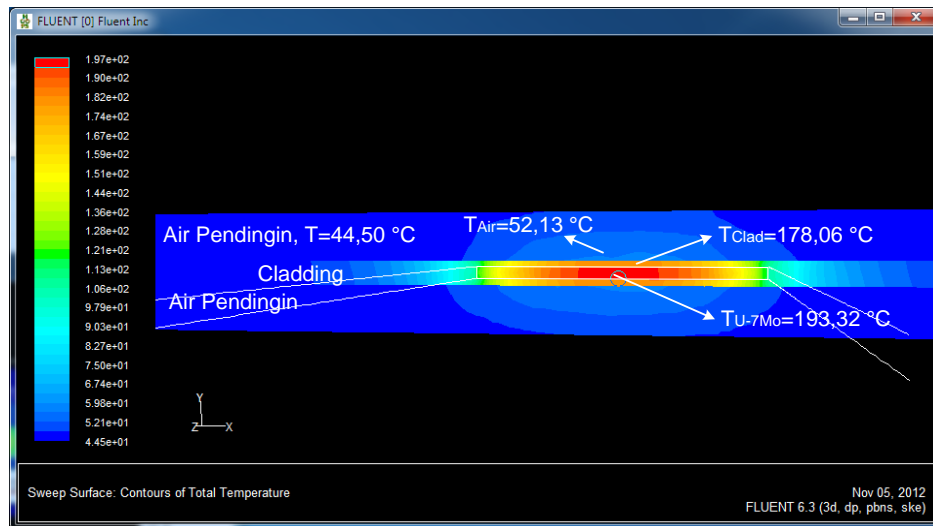
Gambar 5. Distribusi temperatur di dalam kanal EBU U-7Mo/Al, daya 30 MW.



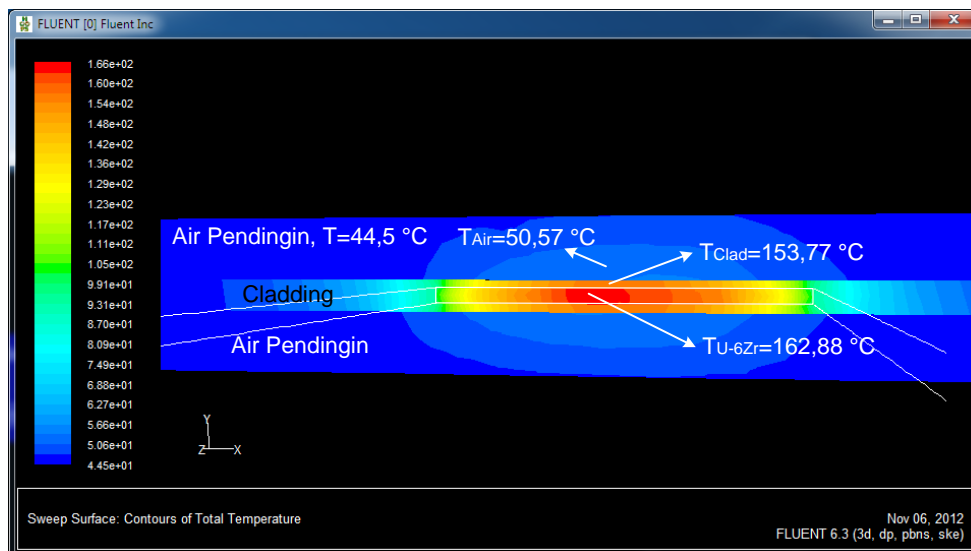
Gambar 6. Distribusi temperatur di dalam kanal EBU U-6Zr/Al, daya 30 MW.

Hasil perhitungan FLUENT memberikan visualisasi karakteristik termohidrodinamika di dalam EBU dan pendingin subkanal seperti ditunjukkan pada Gambar 7,8 dan 9. Gambar-gambar tersebut

memperlihatkan lebih jauh hasil perhitungan terhadap distribusi temperatur aksial dalam air pendingin, kelongsong dan bahan bakar U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al pada posisi di tengah EBU pada daya reaktor 30 MW.

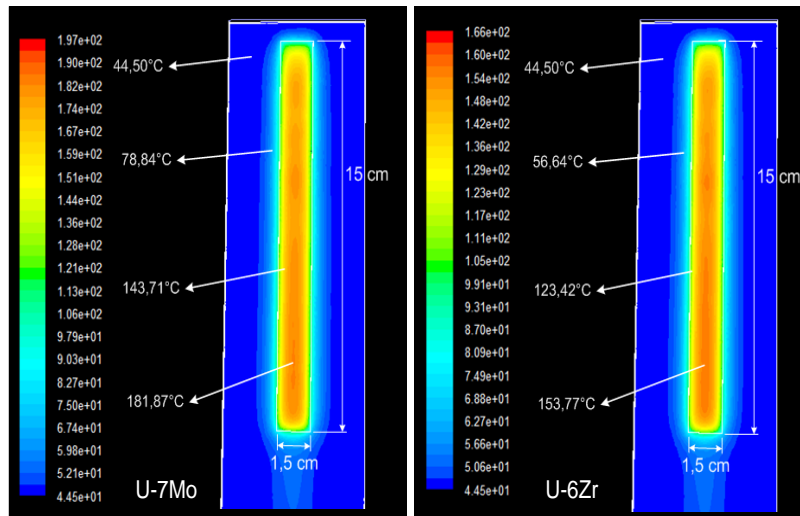


(a) PEB U-7Mo/Al

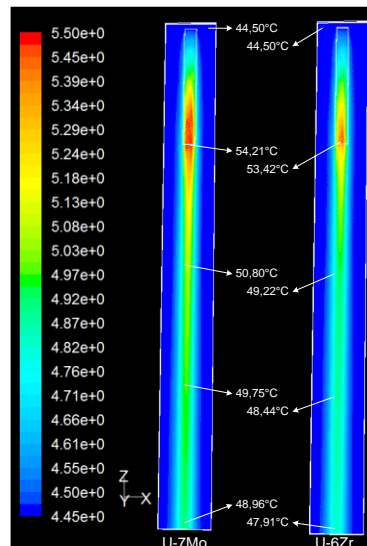


(b) PEB U-6Zr/Al

Gambar 7. Distribusi temperatur aksial air pendingin, kelongsong dan bahan bakar U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al pada posisi di tengah EBU pada daya reaktor 30 MW.



Gambar 8. Perbandingan distribusi temperatur di dalam pelat EBU.



Gambar 9. Distribusi temperatur horizontal pendingin air yang menempel pada kelongsong U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al pada daya reaktor 30 MW.

Tampak jelas pada Gambar 9 profil temperatur di dalam pelat EBU turun secara drastis di dalam pelat *dummy* paduan aluminium. Peningkatan sifat termal bahan bakar sebagai fungsi tingkat muat uranium menyebabkan temperatur bahan bakar dan kelongsong kedua pelat EBU ini lebih tinggi daripada U₃Si₂/Al, meskipun demikian karena daya yang dibangkitkan pelat EBU berukuran mini persatuan luas, berada jauh di bawah batas yang diizinkan seperti ditunjukkan pada Tabel 7, maka insersi ini masih aman.

Kedua EBU ini memiliki temperatur *meat* dan kelongsong yang cukup tinggi, dibandingkan dengan bahan bakar U₃Si₂/Al pada daya yang sama, tetapi temperatur air meningkat sedikit karena panas yang dipindahkan oleh air sangat kecil. Total volume target iradiasi dalam 1 pelat EBU adalah $(1,5 \times 15 \times 0,0631) \text{ cm}^3 = 1,42 \text{ cm}^3$, sehingga panas yang dipindahkan oleh pendingin air dalam *meat* U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al adalah 9139,47 W dan 7403,05 W. Batas keselamatan terhadap temperatur maupun instabilitas aliran (S), baik pada

daya 30 MW maupun 15 MW masih terpenuhi.

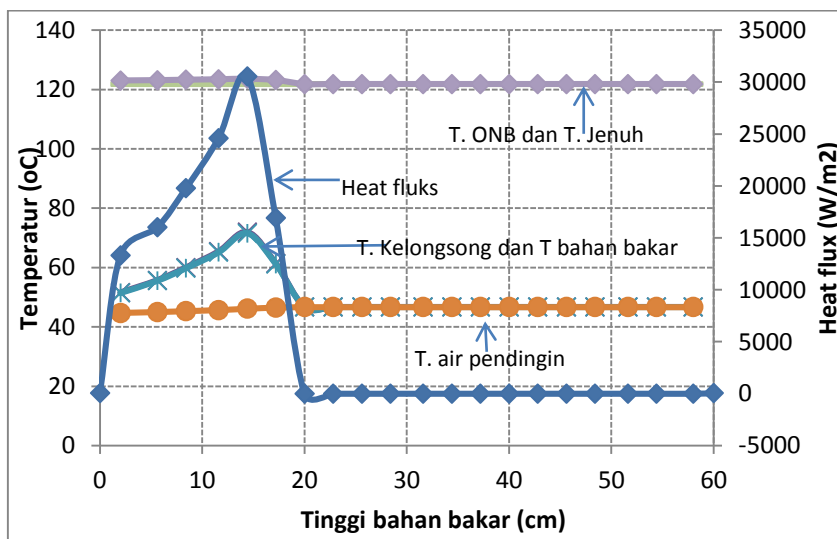
Analisis termohidrolika kondisi tunak konveksi alam

Dalam analisis kondisi tunak konveksi alam, digunakan perhitungan termohidrolika NATCON pada 1% daya nominal atau 300 kW. Tabel 8 menampilkan parameter kritikal perbandingan hasil perhitungan NATCON pada bahan bakar U_3Si_2/Al , $U-7Mo/Al$ dan $U-6Zr/Al$ dengan batasan kondisi operasi RSG-GAS, sementara Gambar 10 dan 11 menunjukkan karakteristik temperatur bahan bakar. Batas keselamatan diukur dari perbedaan temperatur pendingin air T_{ONB} yang masih mencukupi. Hasil perhitungan dalam analisis moda konveksi alam EBU $U-7Mo/Al$ menunjukkan bahwa temperatur *meat*,

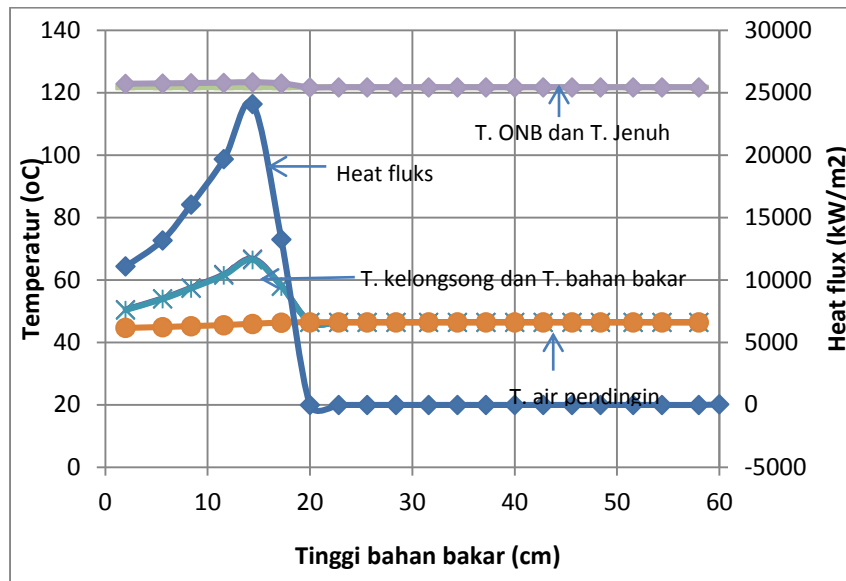
kelongsong, dan pendingin air luaran lebih rendah dari pada temperatur bahan bakar U_3Si_2/Al . Hal ini disebabkan karena pembangkitan panas dalam bentuk kupon jauh lebih kecil daripada U_3Si_2/Al dalam bentuk pelat utuh, meskipun konduktivitasnya lebih rendah. Temperatur terjadinya awal pendidihan inti ($TONB=$ *temperature onset of nucleate boiling*) berada jauh di atas temperatur kelongsong bahan bakar, tidak terjadi pendidihan inti pada ketiga jenis bahan bakar tersebut, sehingga insersi EBU $U-7Mo/Al$ dan $U-6Zr/Al$ dapat dilakukan pada moda konveksi alam secara bersamaan. Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa iradiasi EBU ini memenuhi persyaratan keselamatan dalam kondisi tunak konveksi alam.

Tabel 8. Hasil perhitungan NATCON temperatur kondisi tunak konveksi alam EBU $U-7Mo/Al$ dan $U-6Zr/Al$ daya 300 kW.

Parameter Kritikal	U_3Si_2/Al	$U-7Mo/Al$	$U-6Zr/Al$	Batas
$T_{air\ masuk}$, °C	44,50	44,50	44,50	44,50
T_{meat} , °C	85,33	71,95	66,80	126,57
$T_{kelongsong}$, °C	85,26	71,55	66,49	126,38
$T_{air\ luaran}$, °C	67,40	46,12	45,97	85,90
(ΔT_{ONB}) , °C		52,04	56,91	121-126 (T_{ONB})
Kecepatan pendingin, m/s	0,0073	0,0073	0,0073	0,0154
Daya Reaktor, kW	300	300	300	758



Gambar 10. Karakteristik termohidrolika EBU $U-7Mo/Al$ moda konveksi alam.



Gambar 11. Karakteristik termohidrolika EBU U-6Zr/Al moda konveksi alam.

SIMPULAN

Dari hasil analisis keselamatan termohidrolika dapat disimpulkan bahwa iradiasi pelat EBU U-7Mo/Al dan U-6Zr/Al yang dilaksanakan secara bersamaan di dalam *stringer* elemen bakar *dummy* dapat dilaksanakan pada daya 30 MW maupun 15 MW pada moda operasi kondisi tunak. Iradiasi juga dapat dilaksanakan pada moda operasi konveksi alam, dan batas keselamatan yang dihasilkan pada kedua moda ini masih memenuhi LAK RSG-GAS.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada rekan-rekan anggota tim penyusunan LAK atas sumbangan *input*, diskusi serta masukan yang konstruktif.

DAFTAR PUSTAKA

- IAEA. (1980). *Research Reactor Core Conversion From The Use Of Highly Enriched Uranium To The Use Of Low Enriched Uranium Fuels Guide Book*. IAEA-TECDOC-233, Vienna.
- Lee, S.H., Park J.M. and Kim C.K. (2005). *Thermophysical Properties of U-Mo/Al Alloy Dispersion Fuel Meats*. Korea Research Institute of Standards and Science, ECTP.
- CREASY J.T. (2011). *Thermal Properties of Uranium-Molybdenum Alloys: Phase Decomposition Effects of Heat Treatments*. Master of Science Thesis, Texas A&M University, Texas.
- GA. TECHNOLOGIES, INC. (1992). *Uranium-Zirconium Hydride TRIGA-LEU Fuel*. Research Reactor Core Conversion Guidebook, Vol. 4: Fuels, IAEA-TECDOC-643.
- Endiah P.H. Dkk. (2010). Dokumen Teknis PTRKN 2010: User Criteria Document (UCD) Reaktor Riset Inovatif. BATAN-RKN-C-2010-01-001, PTRKN-BATAN.
- Supardjo, Agoeng K., Aslina B.G. (2011). Pembuatan Pelat Elemen Bakar Mini

-
- UMo-Al Dengan Densitas Uranium 6 dan 7 gU/cm³. *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, 7(1), 107-121.
7. Aslina B.G., Masrukan, Husna A.H.M. (2007). Pengaruh Temperatur Terhadap Sifat Termal Paduan U-Zr Dengan variasi kandungan Zr. *Jurnal Urania* 13(3), 123-132.
8. PRSG-BATAN. (2010). Laporan Analisis Keselamatan RSG-GAS Revisi 10, Volume 2, Jakarta.
9. Kaminaga. (1994). COOLOD-N: A Computer Code for the Analysis of Steady State Thermal Hydraulics in Plate Type Research Reactor. JAERI-JAPAN.
10. R. S. Smith dan W. L. Woodruff. A Computer Code, NATCON, for The Analyses of Steady-State Thermal-Hydraulics and Safety Margins in Plate-Type Research Reactors Cooled by Natural Convection. ANL/RERTR/TM-12, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.
11. Fluent Incorporated. (1998). CFD Modelling of Turbulent Flows. Fluids Review, TRN-98-004.
12. Praptoriadi G., et al. (1995). Thermohydraulics Benchmark Test for The RSG-GAS Working Core During Steady State Condition. Workshop on Computational for Nuclear Science and Technology, BATAN, January 24-25, Jakarta.