

ANALISIS PERBANDINGAN TERMOHIDROLIKA KANAL DAN SUBKANAL DALAM PERANGKAT BAHAN BAKAR AP1000

Muh. Darwis Isnaini

PTRKN – BATAN, Kawasan Puspiptek Gd.80 Serpong, Tangerang, 15310

Email : darwis@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS PERBANDINGAN TERMOHIDROLIKA KANAL DAN SUBKANAL DALAM PERANGKAT BAHAN BAKAR AP1000. Telah dilakukan suatu analisis untuk membandingkan perhitungan termohidrolika kanal dan subkanal dalam perangkat bahan bakar AP1000. Latar belakang penelitian ini adalah kesahihan suatu hasil perhitungan membutuhkan ketelitian di dalam pemodelan kanal dan subkanal. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui besarnya deviasi hasil perhitungan model kanal perangkat bahan bakar dengan model subkanal tunggal. Hal ini perlu dilakukan mengingat dalam model perangkat bahan bakar, luas kanal dihitung sebagai jumlahan luas ketiga jenis subkanal, sedangkan dalam analisis subkanal sangat tergantung dari jenis subkanal. Sebuah perangkat bahan bakar AP1000, mempunyai ukuran jarak antar *rod* (pitch) sebesar 1,26 cm, diameter *rod* 0,95 cm, diameter *thimble* pengarah 1,224 cm dan jarak antar *rod* pada perangkat lain 1,346 cm. Metodologi yang dilakukan melakukan perhitungan dan membandingkan hasil analisis kanal perangkat bahan bakar dan analisis subkanal yang terdiri atas subkanal standar yang terbentuk antar *rod* dalam satu perangkat bahan bakar (sk-1), subkanal antara *rod* dengan *thimble* pengarah (sk-2) dan subkanal antar *rod* dari 2 perangkat bahan bakar yang berbeda (sk-3). Dari perhitungan dengan data seperti daya, penurunan tekanan, fluks massa pendingin dan rapat daya radial yang sama menggunakan kode COBRA-EN, diperoleh bahwa terjadi fluktuasi fluks pendingin pada sk-2 karena luasan aliran yang kecil, dan sk-3 karena luasan aliran yang besar. Temperatur *meat*, kelongsong dan pendingin pada subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3 dibandingkan dengan temperatur pada kanal H-8 menunjukkan perbedaan yang kecil (kurang dari 2%). Dari perbandingan ini dapat disimpulkan bahwa analisis termohidrolika kanal harus disertai analisis subkanal standar karena berkaitan dengan batasan temperatur maksimum bahan bakar.

Kata kunci : Analisis perbandingan termohidrolika, kanal, subkanal, AP1000.

ABSTRACT

COMPARATIVE THERMAL-HYDRAULICS ANALYSIS OF CHANNEL AND SUBCHANNEL IN AP1000'S FUEL ASSEMBLY. The analysis for comparing the thermal-hydraulics calculation on channel of fuel assembly to subchannel in the AP1000 fuel assembly has been carried out. The background of this research was the validity of calculation results need channel and subchannel modeling, accurately. The objective of this research in order to find out how difference between the calculation results of channel model to single subchannel models. It was important to be analyzed caused, in channel model, the channel flow area was the sum of all areas of three types subchannel, whereas in subchannel analysis depend on the subchannel types. An AP1000 fuel assembly has fuel rod pitch was 1.26 cm, fuel rod diameter was 0.95 cm, the guide thimble diameter was 1.224 cm, and fuel rod pitch in adjacent fuel assembly was 1346 cm. The methodology were bringing out some calculations and comparing the result between the channel analysis and subchannel analysis such as standard subchannel formed between rod-to-rod in a fuel assembly (sc-1), subchannel formed between rod and guide thimble in a fuel assembly (sc-2), and subchannel formed between rod-to-rod of other fuel assembly (sc-3). The calculation use the same data for each case, such as thermal power, pressure drop, coolant mass flux and radial power density using COBRA-EN code, it was found that coolant mass flux fluctuation has been occurred in sc-2 caused tight flow area, and sc-3 caused wide flow area. The coolant, cladding and meat temperature of sc-1, sc-2 and sc-3 subchannels compare to temperature of H-8 channel showed small deviation (less than 2%). From these comparisons, it could be summarized that the channels thermal-hydraulics analysis should be attached with standard subchannel analysis, caused related to the constraint of fuel maximum temperature.

Keywords: Comparative thermal-hydraulics analysis, channel, subchannel, AP1000..

PENDAHULUAN

Ketelitian di dalam pemodelan dan perhitungan, merupakan tuntutan yang sejalan dengan persyaratan dalam verifikasi desain dan perizinan oleh pihak regulator. Tingkat ketelitian hasil perhitungan juga ditentukan dari seberapa akurat data geometri subkanal yang dibentuk oleh *rod* bahan bakar yang berkaitan dengan luasan subkanal yang dilalui oleh aliran pendingin untuk mengambil panas yang dibangkitkan di dalam bahan bakar. Berdasarkan aspek termohidrolika, perbedaan luasan subkanal akan menyebabkan kecepatan massa pendingin yang melalui subkanal akan berbeda, dan hal ini akan berakibat pada besarnya temperatur pendingin dan temperatur *meat* bahan bakar, dan pada akhirnya akan berakibat pada tingkat keselamatan reaktor.

Pada penelitian sebelumnya [1] telah dilakukan pemetaan distribusi temperatur dan DNBR pada perangkat bahan bakar AP1000-EU [2], di mana dalam pemetaan tersebut dilakukan verifikasi kode COBRA-EN [3] terhadap data desain dengan penekanan pada *rod* bahan bakar terpanas untuk kondisi terburuk. Dalam verifikasi tersebut, model *thimble* pengarah (*guide thimble*) yang digunakan dianggap mempunyai ukuran diameter yang sama besarnya dengan diameter *rod* bahan bakar. Jika dibandingkan antara hasil perhitungan distribusi temperatur bahan bakar dengan data desain pada kondisi *rod* bahan bakar terpanas diperoleh perbedaan kurang dari 1%, hal ini menunjukkan bahwa pemodelan *rod* bahan bakar dan perhitungan dengan *code* COBRA-EN sudah valid. Adapun pada penelitian lainnya [4,5], telah dilakukan perbandingan desain termohidrolika subkanal AP1000-EU dan PWR1000 Tipikal, yang mempunyai jumlah perangkat bahan bakar dan ukuran diameter *rod* bahan bakar yang berbeda, diperoleh distribusi temperatur pendingin dan kelongsong yang hampir sama, meskipun pembangkitan panas per *rod* untuk bahan bakar AP1000-EU lebih tinggi dibanding pada PWR1000 Tipikal.

Verifikasi parameter desain dengan data yang lebih akurat perlu dilakukan. Oleh sebab itu perlu dilakukan suatu analisis yang lebih teliti terkait dengan pendinginan antar *rod* bahan bakar dan analisis teras yaitu yang berkaitan dengan pendinginan teras atau per perangkat bahan bakar, distribusi temperatur kelongsong dan *meat* bahan bakar, fluks panas dan sebagainya.

Di dalam makalah ini akan disajikan perbandingan hasil analisis termohidrolika parameter desain yang berkaitan dengan pendinginan pada kanal perangkat bahan bakar dengan subkanal yang terbentuk oleh: (1) antar *rod* (batang) bahan bakar dalam satu perangkat bahan bakar, (2) antara *rod* bahan bakar dengan *thimble* pengarah, dan (3) antara *rod* bahan bakar dari satu perangkat dengan *rod* bahan bakar dari perangkat yang lain. Data faktor radial per perangkat bahan bakar yang digunakan di dalam perhitungan ini terdapat di dalam Dokumen Kendali Desain (*Design Control Document – DCD*) AP1000[2], adapun faktor radial tiap *rod* bahan bakar pada perangkat bahan bakar yang sama diasumsikan seragam, sehingga akan diketahui seberapa besar pengaruh perbedaan beda jarak dan luas subkanal terhadap pendinginan pada *rod* bahan bakar.

Pada penelitian ini, ditekankan pada pembuatan model perhitungan untuk *thimble* pengarah dan *rod* bahan bakar yang lebih baik, sehingga terlihat jelas perbedaan subkanal (celah) antar *rod* dalam satu perangkat, subkanal antara *rod* dengan *thimble* pengarah, dan subkanal antara *rod* dalam perangkat yang satu dengan perangkat yang lain dengan menggunakan kode COBRA-EN. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya deviasi hasil perhitungan termohidrolika model kanal perangkat bahan bakar dengan model subkanal tunggal pada 3 subkanal yang berbeda luas penampangnya.

DESKRIPSI TERAS REAKTOR AP1000[2]

Pada Dokumen Kendali Desain AP1000 disebutkan bahwa reaktor AP1000 ini terdiri atas 157 perangkat bahan bakar dengan daya termal nominal sebesar 3400 MWt. Tiap perangkat tersusun atas matriks 17 x 17 yang terdiri dari 264 batang bahan bakar, 24 *thimble*

pengarah (*guide thimble*) untuk batang kendali, dan 1 tabung pengarah instrumentasi. Data spesifikasi teknis AP1000 tertera pada Tabel 1.

Tabel 1. Data teknis desain AP1000[2]

Jenis PLTN	AP1000
Desainer	Westinghouse
Daya Termal (MW)	3400
Laju alir minimum (kg/jam)	$48,44 \times 10^6$
Tekanan operasi (MPa)	15,10
Temperatur <i>inlet</i> pendingin (°C)	279,44
Temperatur <i>outlet</i> pendingin (°C)	324,66
Diameter teras (cm)	304,04
Tinggi teras (cm)	426,72
Desain perangkat bahan bakar	
Jumlah perangkat	157
Tipe	17 x 17
Ukuran perangkat (cm x cm)	21,40 x 21,40
Jumlah <i>rod</i> /perangkat	264
Jarak antar pusat <i>rod</i> (cm)	1,26
Diameter <i>rod</i> (cm)	0,950
Diameter pelet (cm)	0,819
Diameter <i>thimble</i> pengarah (cm)	1,224
Jarak pusat <i>rod</i> antar perangkat (cm)	1,346

TEORI

Besarnya daya yang dioperasikan dari suatu reaktor, tidak dapat dilepaskan dari kemampuan pendingin primer untuk memindahkan panas yang dibangkitkan di dalam bahan bakar, perisai panas dan bejana reaktor.

Hantaran panas dari dinding solid ke fluida pendingin, jika proses pencampuran panas dan fluida dingin tidak disertai pendidihan atau kondensasi, disebut hantaran panas secara konveksi. Pada hantaran panas secara konveksi, bagian kecil dari fluida menerima panas dari dinding dan memindahkan pada sisi lainnya. Apabila fluida pendingin tersebut dialirkan dengan menggunakan pompa, maka terjadi hantaran panas secara konveksi paksa.[6,7,8,9]

Beberapa persamaan yang digunakan di dalam kode COBRA-EN[3], antara lain:

- Untuk kondisi aliran turbulen (konveksi paksa satu fase) digunakan korelasi Dittus-Boelter untuk menghitung koefisien perpindahan panas:

$$h = 0,023 \text{Re}^{0.8} \text{Pr}^{0.4} \left(\frac{k}{D_h} \right) \quad (1)$$

di mana :

- k = konduktivitas termal pendingin (W/m/K),
- D_h = diameter hidraulik ekuivalen (m),
- Re = bilangan Reynolds (= GD_h/μ),
- Pr = bilangan Prandtl (= $c_p \mu/k$),
- G = fluks massa pendingin (kg/s/m^2),
- μ = viscositas dinamis (kg/s/m),
- c_p = panas spesifik (J/kg/K).

Semua sifat air atau uap dihitung pada temperatur pendingin *bulk*.

- Untuk perhitungan fluks panas pada kondisi saturasi, digunakan korelasi Thom :

$$q''_{\text{Thom}} = 0,05358 \cdot e^{P/630} \cdot (T_w - T_{\text{sat}})^2 \quad (2)$$

di mana:

P = Tekanan sistem (kPa),

T_w = temperatur permukaan *rod* bahan bakar (K),

T_{sat} = temperatur saturasi pendingin (K),

q'' = fluks kalor pendingin (W/m^2)

- Adapun perbedaan antara temperatur permukaan *rod* dan temperatur *bulk* pendingin dihitung dengan persamaan :

$$(T_w - T_b) = \frac{q''}{h} \quad (3)$$

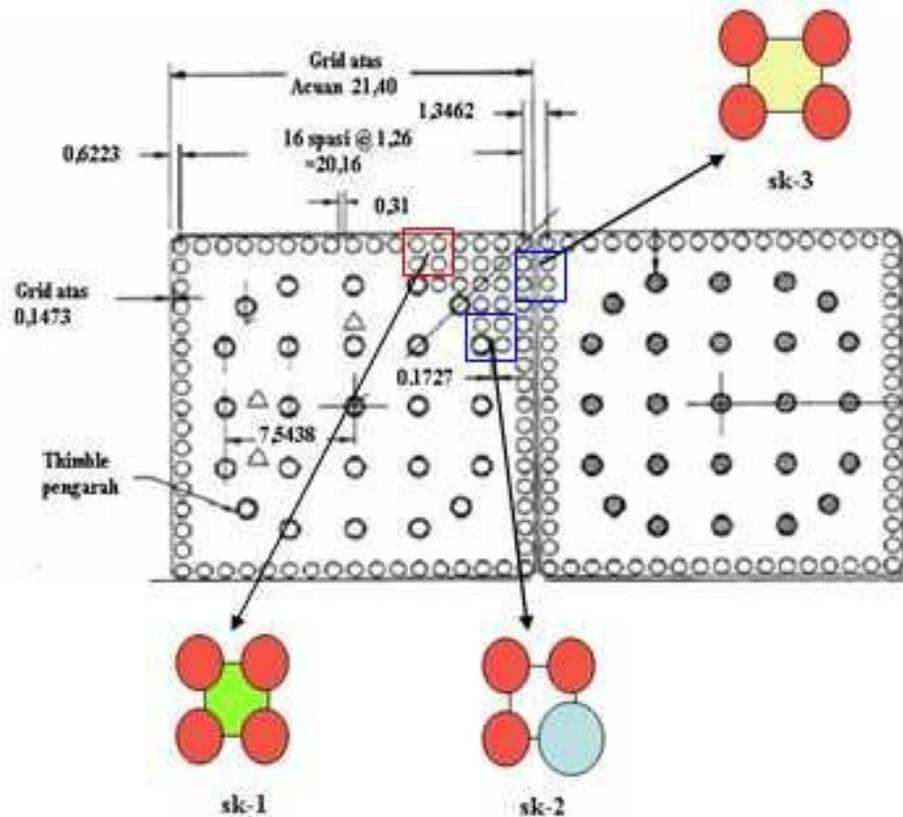
di mana:

T_b = temperatur *bulk* pendingin (K).

METODE PERHITUNGAN

Sebagai model dalam analisis termohidrolika beda luas subkanal ini digunakan data teras PLTN jenis PWR dengan daya listrik terbangkit sekitar 1000 MWe, yaitu AP1000 yang didesain oleh Westinghouse, Amerika Serikat. Ringkasan data teknis AP1000 tertera pada Tabel 1 di muka. Dari data tersebut, dibuat 2 model perhitungan, yaitu model perangkat bahan bakar dan model subkanal tunggal seperti tertera pada Gambar 1.

Dari data teknis yang terdapat di dalam Tabel 1 dan Gambar 1, terlihat ada 3 jenis subkanal yang berbeda akibat adanya perbedaan ukuran lebar celah subkanal yang terbentuk antar *rod* (sk-1) dan subkanal antara *rod* dengan *thimble* pengarah dalam satu perangkat bahan bakar (sk-2), serta subkanal yang terbentuk antar perangkat bahan bakar (sk-3), dan selanjutnya dihitung luas tampang aliran, perimeter basah, perimeter panas dan diameter ekuivalen aliran seperti dirangkum dalam Tabel 2.



Gambar 1. Model kanal dan model subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3 di dalam perangkat bahan bakar AP1000.

Tabel 2. Perbedaan ukuran luas, perimeter basah dan perimeter panas dari kanal dan subkanal (sk) dalam perangkat bahan bakar AP1000[2]

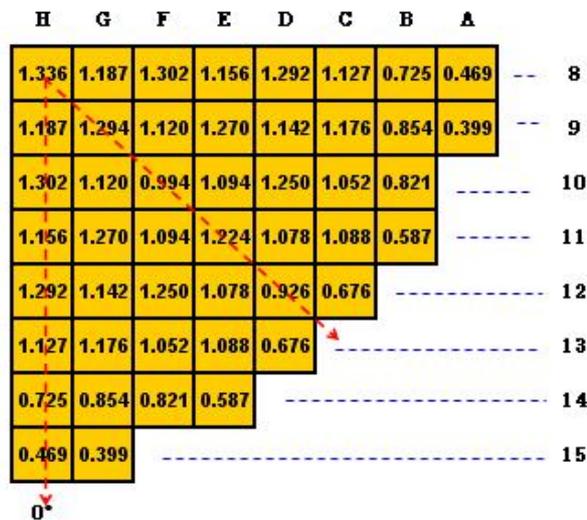
	Kanal	subkanal-1	subkanal-2	subkanal-3
	Perangkat bahan bakar 264 rod 25 thimble	Antar rod dalam 1 perangkat	Antara rod dengan thimble pengarah	Antar rod dari perangkat yg berbeda
Jarak antar sumbu rod, cm		1,26	1,26	1,26
Jarak antar sumbu rod dari perangkat berbeda, cm		--	--	1,346
Diamter rod, cm	0,95	0,95	0,95	0,95
Diameter thimble guide, cm	1,224	-	1,224	-
Luas tampang aliran, cm ²	253,9669	0,87914	0,76224	0,98775
Perimeter basah, cm	882,5242	2,9830	3,1981	2,9830
Perimeter panas, cm	787,9114	2,9830	2,2373	2,9830
Diameter ekuivalen aliran, cm	1,151	1,179	0,953	1,325
Deviasi diameter ekuivalen subkanal terhadap kanal		(2,43%)	(-17,20%)	(15,12%)

Adapun tata cara perhitungan adalah sebagai berikut:

Untuk perhitungan model perangkat bahan bakar dilakukan dengan cara melakukan perhitungan termohidrolika teras, di mana setiap perangkat bahan bakar dimodelkan menjadi satu kanal, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Dari hasil perhitungan termohidrolika teras, diambil sebagai model perangkat bahan bakar dengan rapat daya tertinggi 1,336 yaitu posisi H-8, kemudian dibuat 3 model subkanal tunggal yang mewakili subkanal yang terbentuk di antara 4 rod di dalam satu perangkat (sk-1), subkanal yang terbentuk di antara 3 rod dan 1 thimble pengarah (sk-2) dan subkanal di antara 4 rod antar dua perangkat (sk-3). Perhitungan termohidrolika subkanal dilakukan dengan menggunakan acuan penurunan tekanan teras yang sama dan rapat daya yang sama yaitu 1,336.

Dilakukan perbandingan hasil perhitungan termohidrolika kanal perangkat dan ketiga jenis subkanal.



Gambar 2. Distribusi rapat daya radial ternormalisasi perangkat bahan bakar AP1000, pada kondisi awal siklus, Gray Bank disisipkan, Daya penuh, Xenon setimbang.[2]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan termohidrolika teras AP1000 dengan data masukan antara lain daya nominal 3400 MWt dan fluks massa rerata 3468,2 kg/m².s menggunakan kode COBRA-EN, diperoleh penurunan tekanan teras reaktor sebesar 268,79 kPa, seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Dengan menggunakan acuan penurunan tekanan teras tersebut, kemudian dilakukan perhitungan termohidrolika ketiga jenis subkanal, yang secara garis besar hasilnya juga ditunjukkan pada Tabel 3, agar dapat diperbandingkan dengan hasil perhitungan teras.

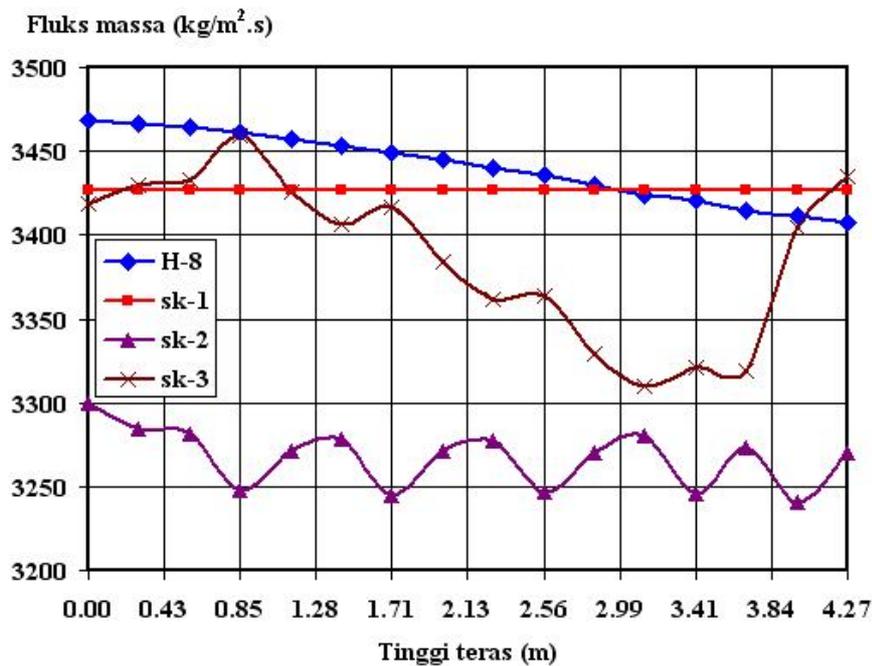
Tabel 3. Hasil perhitungan termohidrolika model kanal dan ketiga jenis subkanal tunggal di dalam perangkat bahan bakar AP1000, dengan temperatur masukan pendingin 279,44oC.

	Kanal	Subkanal-1		Subkanal-2		Subkanal-3	
	Nilai	Nilai	Dev. (%)	Nilai	Dev. (%)	Nilai	Dev. (%)
Penurunan tekanan (kPa)	268,79	268,79	0,0	268,79	0,0	268,79	0,0
Fluks massa rerata (kg/m ² .s)	3440,48	3426,70	-0,40	3267,65	-5,02	3388,34	-1,52
Densitas pend. min. (kg/m ³)	663,23	646,67	-2,50	681,76	2,79	642,72	-3,09
Kecep. pend. Maks (m/s)	5,14	5,30	3,14	4,80	-6,63	5,34	4,02
Temperatur maks. T (°C)							
T <i>meat</i>	974,85	978,55	0,38	969,15	-0,58	974,75	-0,01
T <i>meat outer</i>	458,45	462,45	0,87	452,25	-1,35	458,45	0,00
T kelongsong <i>inner</i>	366,15	370,45	1,17	359,55	-1,80	366,15	0,00
T kelongsong <i>outer</i>	341,15	345,65	1,32	334,45	-1,96	340,85	-0,09
T <i>outlet</i> pendingin	324,82	329,99	1,59	318,53	-1,94	323,45	-0,42
Kenaikan temp. pendingin	45,38	50,55	11,39	39,09	-13,86	44,01	-3,02
Fluks kalor maks (kW/m ²)	839,69	839,69	0,0	839,69	0,0	839,69	0,0
Koef.hant. panas (kW/m ² .K)	35,477	35,373	-0,29	36,762	3,62	33,971	-4,25
DNBR min	4,440	4,813	8,40	3,759	-15,34	7,752	75,49

Dari Tabel 3 terlihat bahwa:

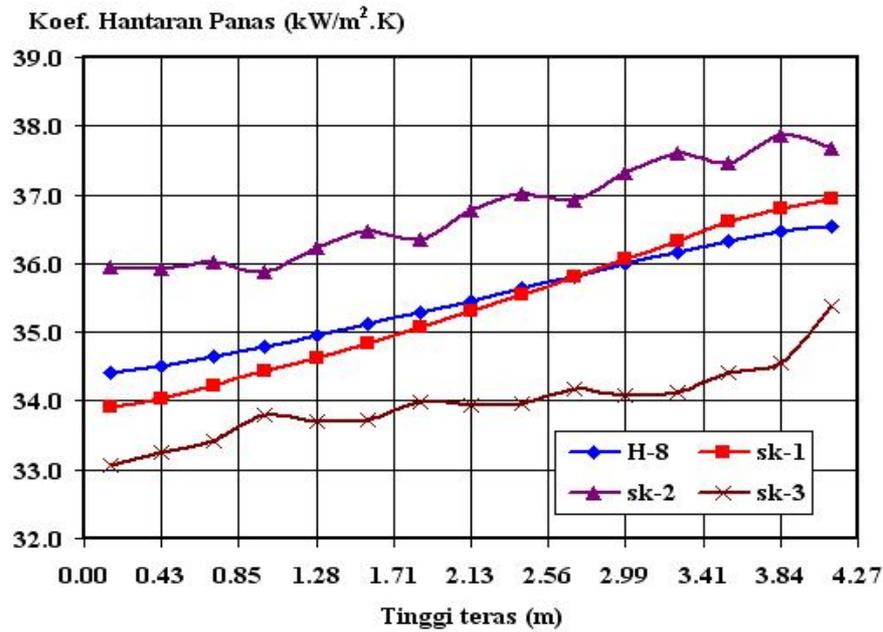
Walapun data masukan fluks massa untuk perhitungan kanal, sk-1, sk-2 dan sk-3 besarnya sama yaitu 3468,2 kg/m².s, namun dengan batasan bahwa penurunan tekanan teras sebesar 268,79 kPa, maka kode COBRA-EN akan melakukan iterasi, sehingga akan diperoleh hasil keluaran hitungan fluks massa rerata model kanal (H-8) sebesar 3440,48 kg/m².s lebih besar dibanding fluks massa model sk-1 (3426,70 kg/m².s), model sk-2 (3267,65 kg/m².s) dan model sk-3 (3388,44 kg/m².s). Hal ini antara lain disebabkan karena di dalam perhitungan distribusi fluks massa dilakukan berdasarkan acuan penurunan tekanan, luas area pendingin (kanal atau subkanal) dan panas yang diterima dari *rod* sekelilingnya.

Pada perhitungan termohidrolika teras, perangkat bahan bakar dimodelkan sebagai satu kanal dengan diameter ekuivalen 1,151 cm, sementara diameter ekuivalen sk-1 1,179 (deviasi 2,4%), sk-2 0,953 cm (-17,20%) dan sk-3 1,325 cm (15,12%). Karena diameter ekuivalen sk-2 dan sk-3 memiliki deviasi yang besar dibanding diameter ekuivalen kanal dan subkanal standar sk-1, agar terjadi kesetimbangan massa dan momentum pada sk-2 dan sk-3, maka fluks massa pada sk-2 dan sk-3 akan mengalami fluktuasi yang nilainya saling berlawanan satu dengan yang lain karena adanya aliran silang (*crossflow*), seperti terlihat pada Gambar 3.



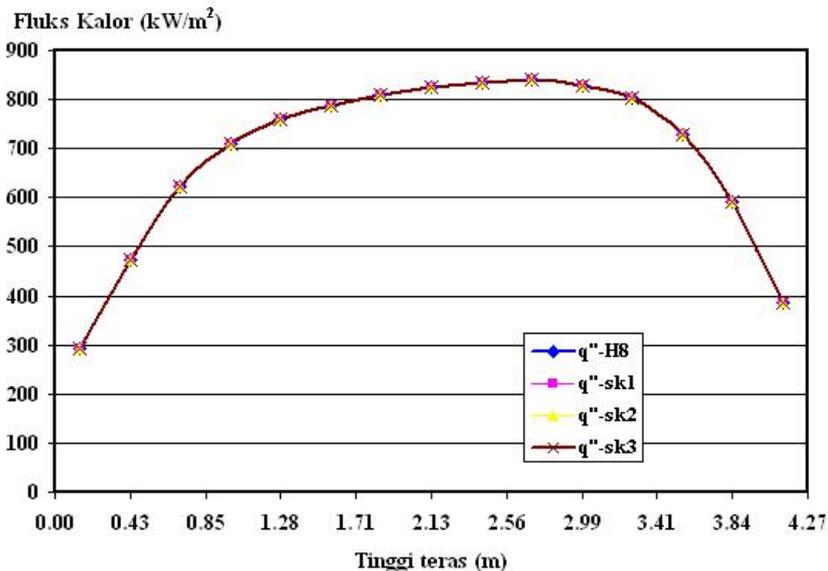
Gambar 3. Perbandingan distribusi fluks massa aliran kanal dan subkanal

Gambar 4 menunjukkan kurva distribusi koefisien hantaran panas oleh pendingin kanal H-8 dan subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3. Nilai koefisien hantaran panas dapat dihitung dari persamaan (1), di mana nilai koefisien hantaran panas dipengaruhi oleh besarnya fluks massa pendingin. Karena fluks massa pendingin pada sk-2 dan sk-3 mengalami fluktuasi, maka nilai koefisien hantaran panas pada sk-2 dan sk-3 juga mengalami fluktuasi. Dari Tabel 3 dan Gambar 4 terlihat bahwa koefisien hantaran panas pada model kanal memiliki deviasi dengan sk-1 sebesar -0,29%, dengan sk-2 sebesar 3,62% dan dengan sk-3 sebesar -4,25%. Koefisien hantaran panas paling besar terjadi pada sk-2 yang memiliki diameter ekuivalen aliran paling kecil, dan koefisien hantaran paling kecil terjadi pada sk-3 yang memiliki diameter ekuivalen aliran paling besar.



Gambar 4. Kurva distribusi koefisien hantaran panas oleh pendingin kanal H-8 dan subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3.

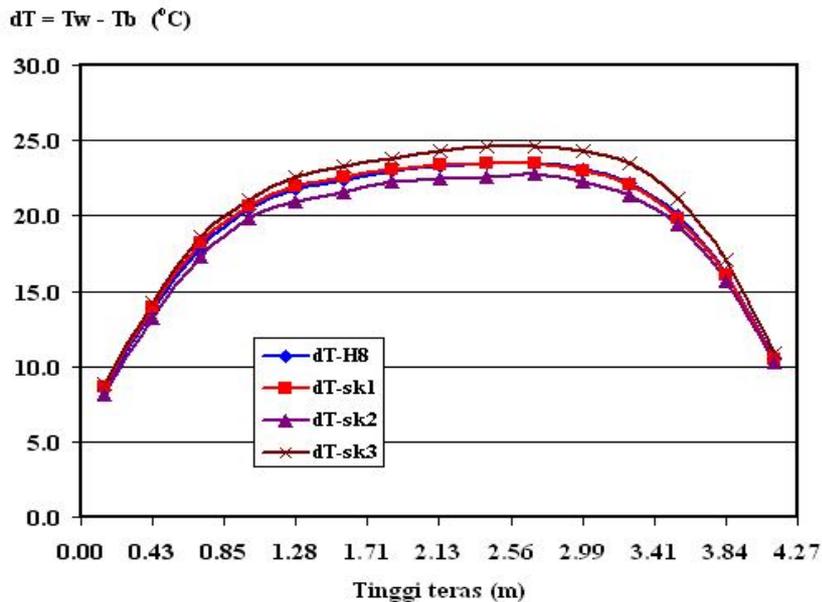
Gambar 5 menunjukkan distribusi fluks kalor untuk kanal H-8 dan subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3, dengan nilai fluks kalor maksimum sebesar 839,69 kW/m². Tidak terdapat perbedaan nilai fluks kalor antara kanal H-8 dengan subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3, dikarenakan rapat daya radial untuk kanal H-8 dianggap merata untuk model subkanal.



Gambar 5. Distribusi fluks kalor untuk kanal H-8 dan subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3.

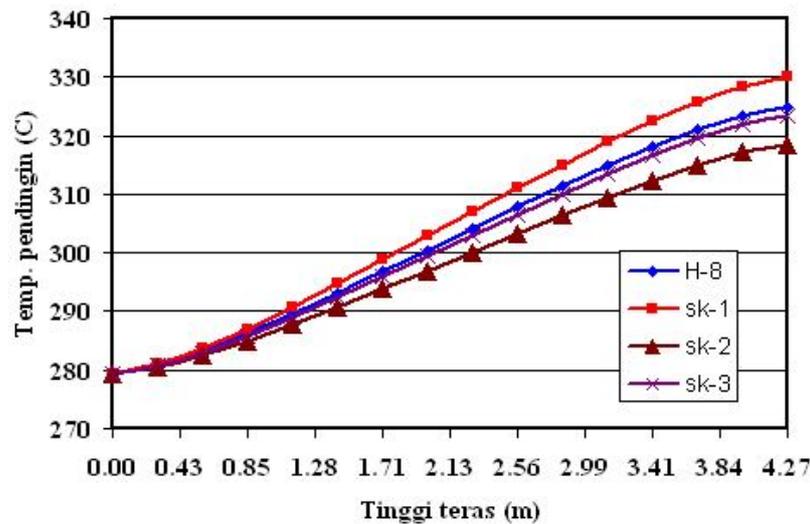
Gambar 6 menunjukkan distribusi beda temperatur kelongsong (T_w) dengan temperatur *bulk* pendingin (T_b) untuk kanal H-8 dan subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3, yaitu $dT = (T_w - T_b)$ yang dihitung menggunakan persamaan (3). Untuk kanal H-8 dan subkanal sk-1 yang mempunyai koefisien hantaran panas h lurus, diperoleh kurva dT yang mulus, demikian juga untuk subkanal sk-2 dan sk-3 dengan

kurva koefisien hantaran panas yang berfluktuasi, ternyata diperoleh kurva dT yang hampir mulus juga. Hal ini ditunjukkan dengan hitungan sederhana untuk kurva sk-2, sebagai contoh pada titik ke-6 sampai 9, dari Gambar 5 diperoleh fluks kalor masing-masing sebesar $786,68 \text{ kW/m}^2$, $809,62 \text{ kW/m}^2$, $825,67 \text{ kW/m}^2$, dan $835,55 \text{ kW/m}^2$, dan dari Gambar 4 diperoleh koefisien hantaran panas masing-masing sebesar $36,47 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$, $36,35 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$, $36,77 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$, dan $37,01 \text{ kW/m}^2\cdot\text{K}$. Dihitung dengan menggunakan persamaan (3), maka diperoleh dT untuk masing-masing sebesar $21,57 \text{ K}$, $22,27 \text{ K}$, $22,46 \text{ K}$ dan $22,58 \text{ K}$.



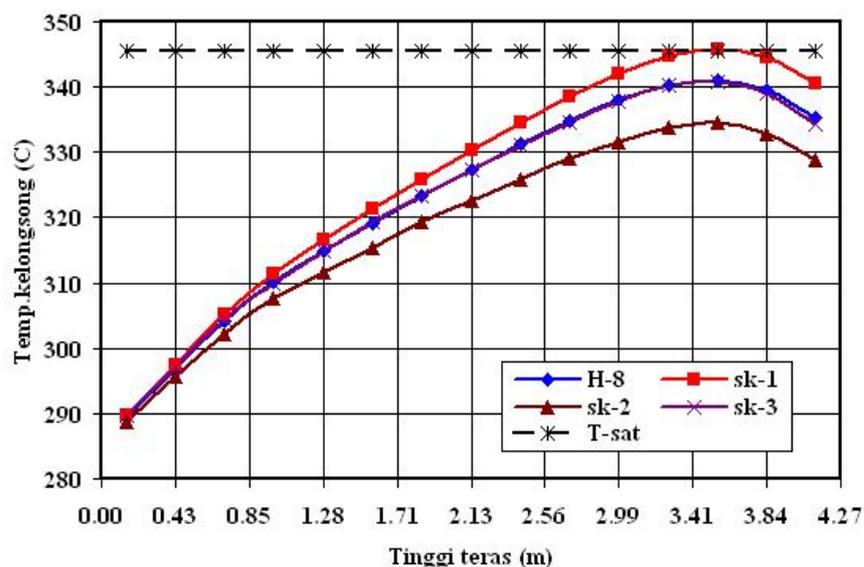
Gambar 6. Grafik distribusi beda temperatur kelongsong dengan temperatur bulk pendingin yaitu $dT = (T_w - T_b)$ sebagai fungsi tinggi teras.

Pada hasil keluaran untuk temperatur *meat*, kelongsong dan pendingin untuk sk-3 nilainya memiliki deviasi paling kecil terhadap temperatur *meat*, kelongsong dan pendingin dari model kanal dibanding nilai pada sk-1 dan sk-2. Luasan aliran kanal perangkat bahan bakar ($264 \text{ rod} + 25 \text{ thimble}$ pengarah) hanya dipanasi oleh 264 rod sebanding dengan luasan aliran sk-3 yang dipanasi 4 rod (2 rod pada perangkat tersebut dengan rapat daya $1,336$ dan 2 rod dari perangkat sebelahnya dengan rapat daya $1,187$). Pada subkanal sk-1 yang mempunyai luasan aliran standar dan dipanasi 4 rod dalam satu perangkat dengan rapat daya $1,336$ diperoleh temperatur *meat*, kelongsong dan pendingin sedikit lebih besar dibanding model kanal, tetapi justru nilai deviasi temperatur ini dapat dipakai sebagai ralat dari temperatur kanal. Sebagai contoh perbandingan, ditunjukkan distribusi temperatur pendingin pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva distribusi temperatur pendingin untuk kanal, sk-1, sk-2 dan sk-3.

Dari Tabel 3 terlihat bahwa temperatur permukaan kelongsong luar (*outer*) maksimum diperoleh untuk kanal H-8, subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3 masing-masing sebesar 341,15oC, 345,65oC, 318,53oC dan 323,45oC, dengan deviasi untuk sk-1, sk-2 dan sk-3 masing-masing 1,59%, -1,94% dan -0,42%. Pada reaktor yang beroperasi dengan tekanan 15,513 MPa, didapatkan karakteristik pendingin memiliki temperatur jenuh (saturasi) sebesar 345,60oC. Jika dilihat dari temperatur kelongsong maksimum tersebut semuanya masih berada di bawah temperatur saturasi, kecuali temperatur kelongsong sk-1, hal ini berarti kondisi pendingin pada kanal H-8, dan subkanal sk-2 dan sk-3 masih dalam kondisi satu fase, kecuali pada sk-1 pendinginan terjadi pada kondisi satu fase tetapi sempat terjadi satu kondisi pendidihan inti subcooled, seperti ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Distribusi temperatur permukaan kelongsong kanal H-8, subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3.

Secara umum hasil analisis kanal harus disertai dengan analisis subkanal standar (sk-1) terutama untuk mendapatkan nilai temperatur *meat*, kelongsong dan pendingin, karena model kanal perangkat

bahan bakar menggunakan luasan yang terbentuk dari 264 *rod* dan 25 *thimble* pengarah, yang mendapatkan panas dari 264 *rod*, sedangkan subkanal standar menggunakan luasan yang terbentuk dari 4 x $\frac{1}{4}$ *rod* dengan panas yang berasal dari 4 x $\frac{1}{4}$ *rod* (1 *rod* dikelilingi 1 subkanal). Selain itu temperatur *meat* dan kelongsong berkaitan dengan batasan keselamatan operasi PLTN khususnya yang berkaitan dengan kekuatan material bahan bakar dan kelongsong.

KESIMPULAN

Perhitungan dengan ketiga model subkanal tunggal, menunjukkan bahwa terjadi fluktuasi fluks massa pendingin pada sk-2 karena luasan aliran yang kecil dan sk-3 karena luasan aliran yang besar. Terdapat perbedaan temperatur *meat*, kelongsong dan pendingin pada subkanal sk-1, sk-2 dan sk-3 yang kecil (kurang dari 2%) bila dibandingkan dengan perhitungan dengan model kanal H-8. Meskipun demikian untuk menjaga agar batasan keselamatan operasi tidak terlampaui seperti temperatur maksimum *meat* bahan bakar dan kelongsong dan untuk melengkapi analisis termohidrolika kanal maka harus disertai analisis subkanal standar berupa subkanal yang terbentuk antar *rod* dalam satu perangkat bahan bakar.

DAFTAR PUSTAKA

1. ISNAINI, M. Darwis, Pemetaan Distribusi Suhu dan DNBR pada Perangkat Bahan Bakar Nuklir AP1000-EU, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega, Vol. 12. Nomor 2, Juni 2010, ISSN 1411-240X, 2010; p 103-113.
2. "AP1000 European Design Control Document" Westinghouse, 2009. Available from http://www.ukap1000application.com/doc_pdf_library.aspx.
3. Basile, D., et al. COBRA-EN: an Upgraded version of the COBRA-3C/MIT code for thermal-hydraulic transient analysis of LWR fuel assemblies and cores; 2008
4. ISNAINI, M.D. dan Subekti, M., Perbandingan Desain Termohidrolika Subkanal AP1000-EU dan PWR1000 Tipikal, Prosiding Seminar Keselamatan 2010, 5 Agustus 2010, BAPETEN, Jakarta, 2010, p. 284-294.
5. Isnaini, M.D., dan Pudjijanto, "Verifikasi desain termohidrolika teras PWR kelas 1000 MWe", Prosiding Seminar Nasional TKPFN ke-15, PTRKN-BATAN dan UNS, Surakarta, 2009, p 22-27.
6. UHCIDA Masaaki, **Thermal-Hydraulics of Nuclear Reactors**, Tokai Training Center, Nuclear Technology and Education Center, JAERI, Japan, 2001, p189-190.
7. Sumio Fujii, **Nuclear Fuel and Reactor Core**, Information Exchange Meeting, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. ,2009.
8. Ridwan, M., dkk, "Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir", BATAN, Jakarta (1986).
9. El Wakil, "Nuclear Heat Transport", International Textbook Company, New York (1971).

DISKUSI / TANYA JAWAB :

PERTANYAAN : (Agung Abadi Kiswandono, Program S3-Kimia UGM)

- Mengapa nilai deviasi hasilnya negatif (sepengetahuan penanya, yang namanya deviasi itu selalu positif)?
- Apa yang menyebabkan ke-3 model tersebut hampir sama dan pada beberapa titik (kalau tidak salah, titik ke-3 dan ke-6) hampir sama (tidak naik dan tidak turun)?

JAWABAN : (Darwis Isnaini, PTRKN-BATAN)

- Deviasi negatif artinya nilai perhitungan lebih kecil dibandingkan nilai ukuran standarnya,
- Kalau dilihat dari Gambar 6, dimana $dT=(T_w-T_b)=q''/h$, nilai fluks kalor q'' sama pada ketiga subkanal, sedangkan koefisien hantaran panas (h) fluktuasinya kecil dan nilainya juga hampir sama. Oleh sebab itu, akan diperoleh grafik distribusi beda temperatur yang hampir sama (mempunyai pola yang sama).

PERTANYAAN : (Jupiter Sitorus, PTRKN-BATAN)

- Apa nama code yang digunakan dalam perhitungan (fokus pada perhitungan kanal dan subkanal)?
- Ada code lain yang membahas tentang sistem DCS dan bagaimana hasil perhitungan di atas dibandingkan dengan perhitungan sistem?

JAWABAN : (Darwis Isnaini, PTRKN-BATAN)

- Code yang digunakan COBRA-EN.
- Ada code lain yang digunakan vendor yaitu VIPRE, dimana di SAR AP1000 hanya ditampilkan temperatur pendingin dan hasil perhitungan dengan code COBRA-EN valid (perbedaan kurang dari 3%).