

FLUKS PANAS KRITIS UNTUK KISI-KISI RAPAT BUNDEL BATANG JENIS HCPWR PADA TEKANAN TINGGI DAN ALIRAN SANGAT RENDAH (BOIL OFF)

Henky P. Rahardjo^{*}, Hiroshige Kumamaru^{**}, Yoshinari Anoda^{**} dan Yutaka Kukita^{**}
^{*} Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional
^{**} Japan Atomic Energy Research Institute

ABSTRAK

FLUKS PANAS KRITIS UNTUK KISI-KISI RAPAT BUNDEL BATANG JENIS HCPWR PADA TEKANAN TINGGI DAN ALIRAN SANGAT RENDAH (BOIL OFF). *Burn out* atau titik *dryout* atau fluks panas kritis (CHF) adalah suatu perubahan yang berarti di dalam mekanisme perpindahan panas. Titik ini adalah menggambarkan satu lokasi di permukaan pemanas yang tidak terbasahi atau merupakan satu kerusakan fisik yang terjadi pada permukaan pemanas, karena temperaturnya cukup tinggi sehingga menyebabkan gagalnya material. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian tentang fenomena *dryout* secara benar, terutama dalam memperkirakan kelakuan termohidrolika teras pada saat suatu peristiwa gagalnya pendingin (LOCA) terjadi di sebuah reaktor nuklir. Eksperimen-eksperimen *dryout* telah dilakukan untuk bundel batang kisi-kisi rapat jenis PWR dengan konversi tinggi (HCPWR) pada kondisi kondisi tekanan tinggi dan aliran sangat rendah (boil-off) yang penting dalam penggambaran suatu peristiwa LOCA yang kecil (small break LOCA). Kondisi-kondisi eksperimen yang dilakukan adalah, tekanan dari 3 sampai 12 MPa, fluks massa dari 10 sampai 102 kg/m²s, entalpi subdingin masuk (inlet subcooling) dari 850 sampai 3025 kJ/kg dan fluks panas dari 2 sampai 14 W/cm². Hasil eksperimen fluks panas kritis kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan yang menggunakan persamaan empirik yang ada, yaitu persamaan Katto dan persamaan Bowring. Dibandingkan pula hasil eksperimen tersebut dengan hasil eksperimen untuk bundel batang jenis BWR dan PWR yang telah dilakukan di TPTF (Two Phase Flow Test Facility). Persamaan-persamaan Katto dan Bowring relatif cukup bagus dalam memperkirakan fluks panas kritis untuk bundel-bundel batang HCPWR, PWR dan BWR dan mempunyai kecenderungan perkiraan yang lebih besar (over-prediction).

ABSTRACT

CRITICAL HEAT FLUX FOR TIGHT-LATTICE ROD BUNDLE UNDER HIGH-PRESSURE BOIL-OFF (VERY-LOW FLOW) CONDITION. A burn out or dryout point, i.e. the critical heat flux (CHF) point correspond a significant change in the heat transfer mechanisms. This point is an expression for an unwetted spot on the heated surface or a physical destruction of the heated surface, where the temperature may be high enough to cause material failure. It is therefore important to characterize correctly the dryout phenomena, especially when predicting the core thermal-hydraulic behaviour during a loss-of-coolant accident (LOCA) of a nuclear reactor. Dryout experiments have been conducted in tight-lattice (High Conversion PWR type) rod bundle under high-pressure, boil-off (very-low flow) conditions which are of importance during a small break LOCA. The experimental conditions cover range of pressure from 3 to 12 MPa, mass flux from 10 to 102 kg/m²s, inlet subcooling from 850 to 3025 kJ/kg and heat flux from 2 to 14 W/cm². The CHF data have been compared with two empirical CHF correlations, i.e., Katto and Bowring correlations, that are commonly used to predict CHF behaviour, and with the previous CHF data from an experiment using BWR and PWR type rod bundle in Two Phase Flow Test Facility (TPTF). The Katto and Bowring correlations performs relatively well in correlating the present dryout data, also fairly good to predict CHF for HCPWR, PWR and BWR type rod bundles, and the tendency average is an overprediction.

PENDAHULUAN

Dalam proses-proses termohidrolika seperti pada pendidihan konveksi paksa dengan penguapan cairan fluida pendingin, akan terdapat suatu titik pada permukaan dinding yang tidak terbasahi oleh cairan fluida pendingin secara terus-menerus. Sehingga pada titik tersebut akan terjadi suatu keadaan yang disebut *burn out*.

Ada dua keadaan yang dapat didefinisikan sebagai *burn out*, yaitu:

1. *Burn out* yang diakibatkan karena adanya kenaikan fluks panas, yaitu apabila terjadi kenaikan fluks panas yang kecil akan mengakibatkan kenaikan temperatur dinding yang besar dan mendadak. Hal ini dapat terjadi misalnya pada pemanasan di teras suatu reaktor nuklir atau pemanasan fluida kerja oleh pemanas listrik.
2. *Burn out* yang diakibatkan karena adanya kenaikan temperatur, yaitu apabila terjadi kenaikan temperatur dinding yang kecil mengakibatkan penurunan koefisien perpindahan panas yang besar dan mendadak.

Istilah lain yang dapat digunakan untuk menerangkan fenomena *burn out* adalah *dry out*, DNB (departure from nucleate boiling), *boiling crisis* dan dapat pula berbentuk titik fluks panas kritis (CHF). Titik ini menggambarkan suatu perubahan yang berarti di dalam mekanisme perpindahan panas. Istilah DNB biasanya digunakan sebagai pengganti fluks panas kritis yang terjadi di dalam daerah subdingin akibat dinding pemanas yang diselimuti oleh suatu lapisan uap yang stabil. DNB terjadi pada daerah aliran tinggi.

Burn out atau *dryout* adalah menggambarkan suatu titik pada permukaan pemanas yang tidak terbasahi oleh fluida pendingin, sehingga dapat mengakibatkan kerusakan fisik pada permukaan pemanas. Sering kali *dryout* terlihat pada daerah aliran anular, misalnya pada kondisi-kondisi aliran rendah dan kualitas yang tinggi. Daerah sebelum *dryout* terlihat cairan film menutupi permukaan dan perpindahan panasnya naik, yang mengakibatkan temperatur-temperatur permukaan rendah. Di luar daerah ini cairan tidak terus menerus membasahi permukaan pemanas, sehingga perpindahan panas permukaannya turun. Akhirnya mengakibatkan temperatur permukaan naik secara cepat dan mungkin cukup dapat merusakkan bahan pemanas. Oleh karena itu perlu diteliti karakteristik gejala *dryout* ini secara benar.

Karakteristik *burn out* yang benar penting sekali untuk diketahui, terutama ketika memperkirakan kelakuan termohidrolika teras ketika peristiwa bocornya pendingin (LOCA) terjadi pada suatu reaktor nuklir. Sampai saat ini banyak eksperimen-eksperimen tentang fluks panas kritis yang telah dilakukan terutama untuk meneliti kelakuan-kelakuan termohidrolika teras ketika LOCA terjadi pada suatu reaktor nuklir. Seperti misalnya eksperimen-eksperimen yang menggunakan air tekanan tinggi untuk bundel batang jenis reaktor air mendidih atau BWR (1,2) dan untuk bundel batang jenis reaktor air bertekanan atau PWR (3).

Bundel batang jenis BWR terdiri dari 25 batang-batang pemanas, yang masing-masing berdiameter luar 12,27 mm dan panjang pemanasnya 3,7 m. Sedang bundel batang untuk jenis PWR terdiri dari 24 batang-batang pemanas, yang masing-masing berdiameter luar 9,5 mm dan panjang pemanasnya 3,7 m. Eksperimennya dilakukan untuk kondisi aliran yang sangat rendah pada Fasilitas Uji Aliran Dua Fasa atau Two-Phase Flow Test Facility (TPTF) yang ada di Japan Atomic Energy Research Institute.

Dalam makalah ini diperlihatkan hasil-hasil eksperimen fluks panas kritis untuk bundel batang jenis reaktor air bertekanan dengan konversi yang tinggi atau High Conversion Pressurized Water Reactor (HCPWR) pada kondisi-kondisi tekanan tinggi dan aliran yang sangat rendah. Eksperimen-eksperimen ini dilakukan di TPTF. CHF yang diperoleh dari eksperimen kemudian dibandingkan dengan beberapa persamaan empirik yang ada dan dibandingkan pula dengan hasil eksperimen yang telah dilakukan di TPTF untuk bundel-bundel batang jenis BWR dan PWR.

PERSAMAAN-PERSAMAAN FLUKS PANAS KRITIS

Beberapa persamaan telah diusulkan untuk memperkirakan fluks panas kritis (CHF) pada kondisi-kondisi aliran rendah. Dalam hal ini hanya dua persamaan saja yang akan dibandingkan dengan data *dryout* hasil eksperimen, yaitu persamaan Katto (5) dan persamaan Bowring (6) yang masing-masing mempunyai daerah kerja tertentu. Persamaan-persamaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Persamaan-persamaan pada fluks panas kritis

Correlation	Equation	Data base range
Katto	$q_c = q_{co}(1+K(\Delta H_f/H_{fg}))$	P : 2.6 - 20 MPa
	For L - Regime :	G : 750-4000 Kg/m ² s
		$\Delta H_f: 0 = 931 \text{ KJ/Kg}$
	$\frac{q_{co}}{G H_{fg}} = C \left(\frac{\sigma_1}{G^2 l_{do}} \right)^{0.043} / \left(\frac{l_{do}}{d} \right)$	
	$K = \frac{1.043}{4 C \left(\frac{\sigma_1}{G^2 l_{do}} \right)^{0.043}}$	
	C = 0.25 for $l_{do}/d < 50$	
	= 0.35 for $l_{do}/d > 150$	
	= 0.25 + 0.0009 $\left(\frac{l_{do}}{d} - 50 \right)$ for $50 < \frac{l_{do}}{d} < 150$	
Bowring		P : 0.6 - 15.5 Mpa
		G : 50 - 4000 Kg/m ² s
	For Subcooled inlet Condition :	
	$q_c = \frac{A + B H_i}{C + l_{do} Y}$	Unit :
	P ≤ 1250	q _c : MBtu/ft ² h
	$A = \frac{242.4 F_1 G d_{he}}{1 + \frac{1.52 (F_p d_{he})^2 G}{F_2 d_{hy}^{1.3} (1 + G(0.8 F_p d_{he}/d_{hy} - 1))}}$	d _{he} : in
	B = 0.25 G d _{he} exp(-0.2G)	d _{hy} : in
	C = 60 d _{hy} ^{0.57} G ^{0.27} $\left(1 + \frac{Y-1}{G+1} \right)$	l _{do} : in
	F ₁ = (1.0 - 0.04 P _T (1 + 0.47 P _T ²) ^{0.5}) ²	H _{fg} : Btu/lb
	F ₂ = 0.45 + 1.25 P _T for P ≤ 415	P : psia
	= 0.424 + 1.959 P _T - 1.556 P _T ² for 415 < P ≤ 850	G : Mlb/ft ² h
	= (3.2 - P _T) (0.32 + 0.135 P _T) for P > 850	
	P _T = 0.001 P	
	P > 1250	
	A = A ₂ + (2.250 - 0.001 P) (A ₁ - A ₂)	
	A ₁ = A for P < 1250 with F ₁ = 0.8726 and F ₂ = 0.953	
	A ₂ = 18.0 G + $\frac{0.5 G d_{he}}{0.1 + G}$	
	B = B for P ≤ 1250	
	C = C for P ≤ 1250	
	Y = 1 for uniform axial heat flux distribution	
	F _p = 1 for R.P.F. (Radial Peaking Factor) = 1	

Persamaan-persamaan tersebut dinyatakan dalam satuan-satuan seperti yang digunakan pada makalah aslinya, (5) dan (6). Walaupun demikian, beberapa simbol telah diubah dari makalah aslinya untuk penyesuaian di dalam nomenklatur. Hasil eksperimen yang diperoleh dibandingkan dengan persamaan-persamaan ini.

DISKRIPSI DARI EKSPERIMEN

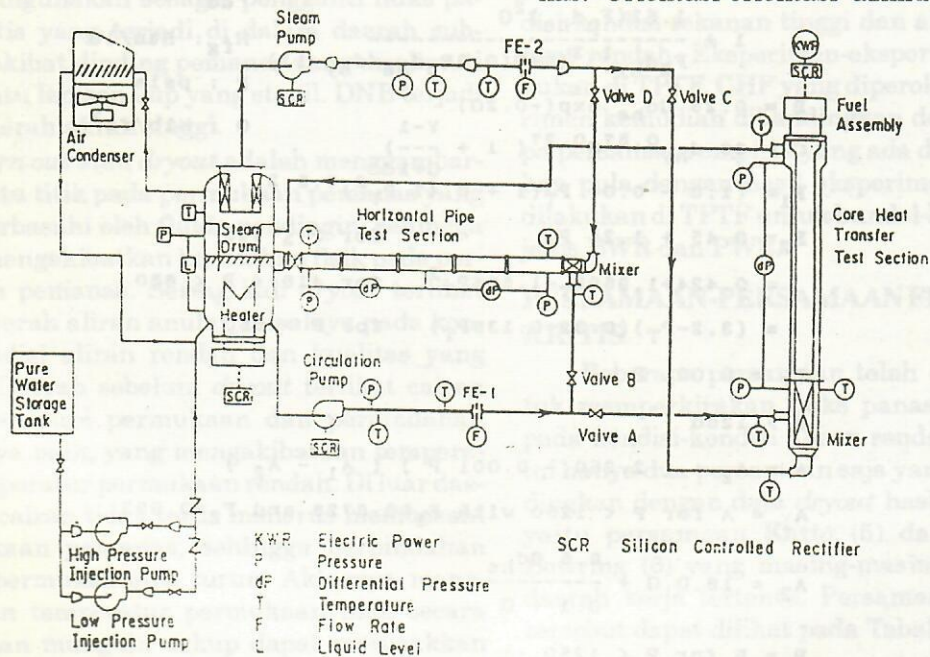
Fasilitas Eksperimen

Eksperimen-eksperimen dilakukan di fasilitas aliran dua fasa (TPTF) yang ada di Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). Diagram alir dari TPTF dapat dilihat pada Gambar 1. Air yang di dalam pendidih (steam drum) setelah dipanasi akan menghasilkan air dan uap yang bertekanan dan bertemperatur tinggi. Secara umum, ketika eksperimen-eksperimen perpindahan panas dilakukan, air dan uap dari pendidih akan mengalir memasuki bagian pencampur yang dipasang pada bagian bawah pipa uji dengan bantuan pompa sirkulasi air dan uap. Laju alir air dan uap diatur untuk memperoleh kualitas campuran aliran dua fasa pada pencampur pada bagian masukan teras pipa uji perpindahan panas. Dalam eksperimen ini, hanya air saja yang dialirkan ke bagian pencampur, sedang uapnya tidak dialirkan ke pipa uji. Air setelah dialirkan melalui teras pipa uji perpindahan panas kemudian dialirkan kembali ke pendidih.

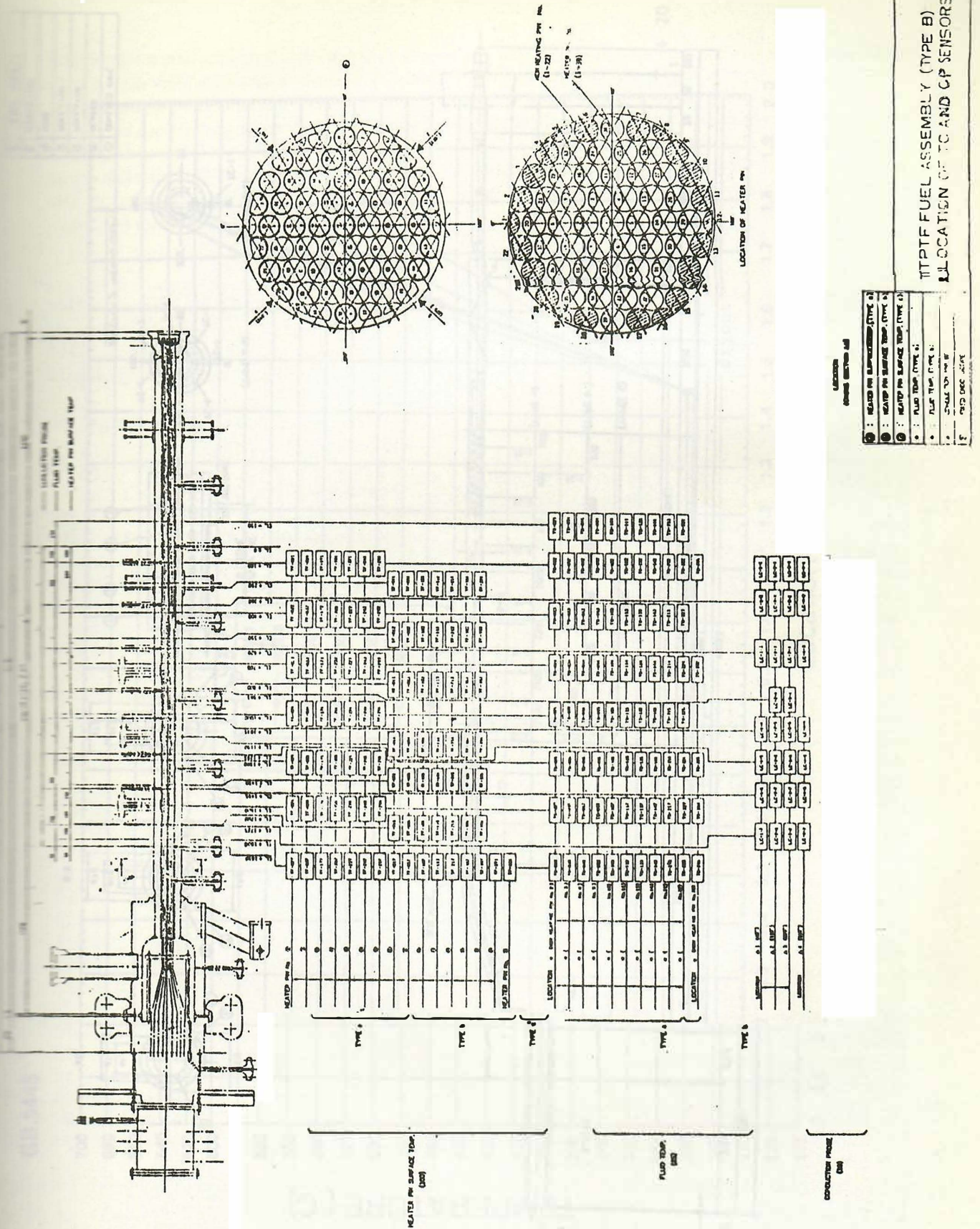
Pada Gambar 2 terlihat simulasi pipa uji untuk bundel batang jenis HCPWR. Pipa uji terdiri dari 39 batang pemanas, kanal-kanal sempit di antara pemanas dan 22 batang bukan pemanas, yang semuanya berdiameter luar 9 mm. Dua puluh dua batang bukan pemanas terletak di posisi *peripheral* dari bundel batang pemanas atau sekeliling batang-batang pemanas. Bundel batang disusun secara sejajar dalam segitiga sama sisi (triangular lattice) dengan jarak antar pusat 10 mm dan diikat oleh kawat yang berbentuk spiral. Distribusi daya aksial dan radial adalah merata. Daya input maksimum adalah 1,0 MW yang sebanding dengan fluks panas 50,40 W/cm². Batang-batang pemanas mempunyai panjang pemanas 1,85 m.

Batang pemanas secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 3. Pembungkus dan elemen pemanas berturut-turut dibuat dari Inconal 600 dan Nichrom-1. Bahan isolator listrik yang berada di dalam elemen pemanas dibuat dari Al₂O₃, sedang isolator di antara pembungkus dan elemen pemanas dibuat dari bahan boron nitrida (BN).

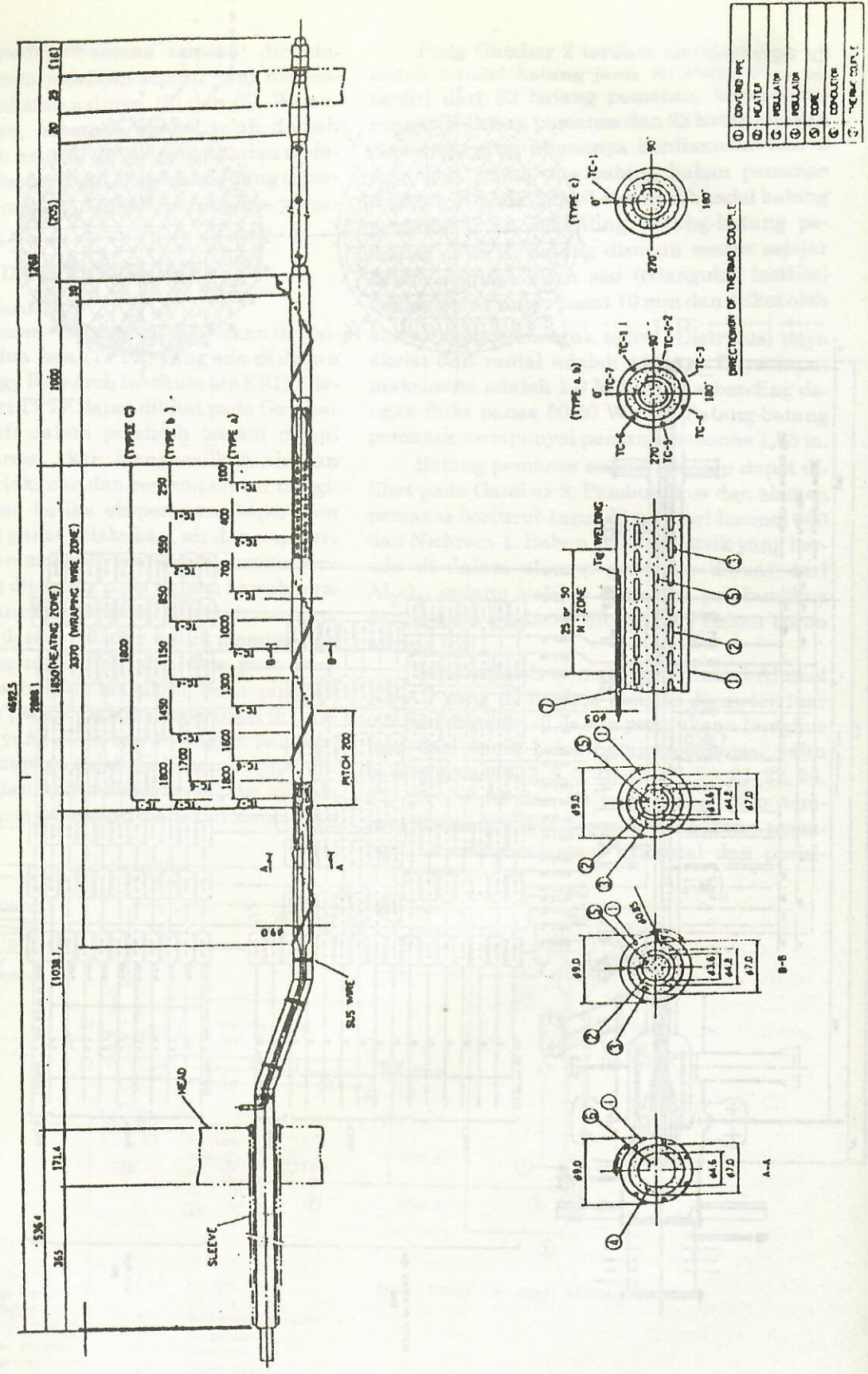
Seratus buah termokopel Chromel-Alumel (Cr-Al) yang dibungkus dengan diameter luar 0,5 mm ditanam di dalam permukaan bungkus luar dari enam belas batang pemanas, yaitu batang nomor 1, 2, 3, 8, 10, 11, 17, 20, 21, 22, 24, 27, 29, 36, 38 dan 39 untuk mengukur temperatur-temperatur permukaan batang pemanas. Orientasi-orientasi azimuthal dan posisi-



Gambar 1. Diagram alir TPTF

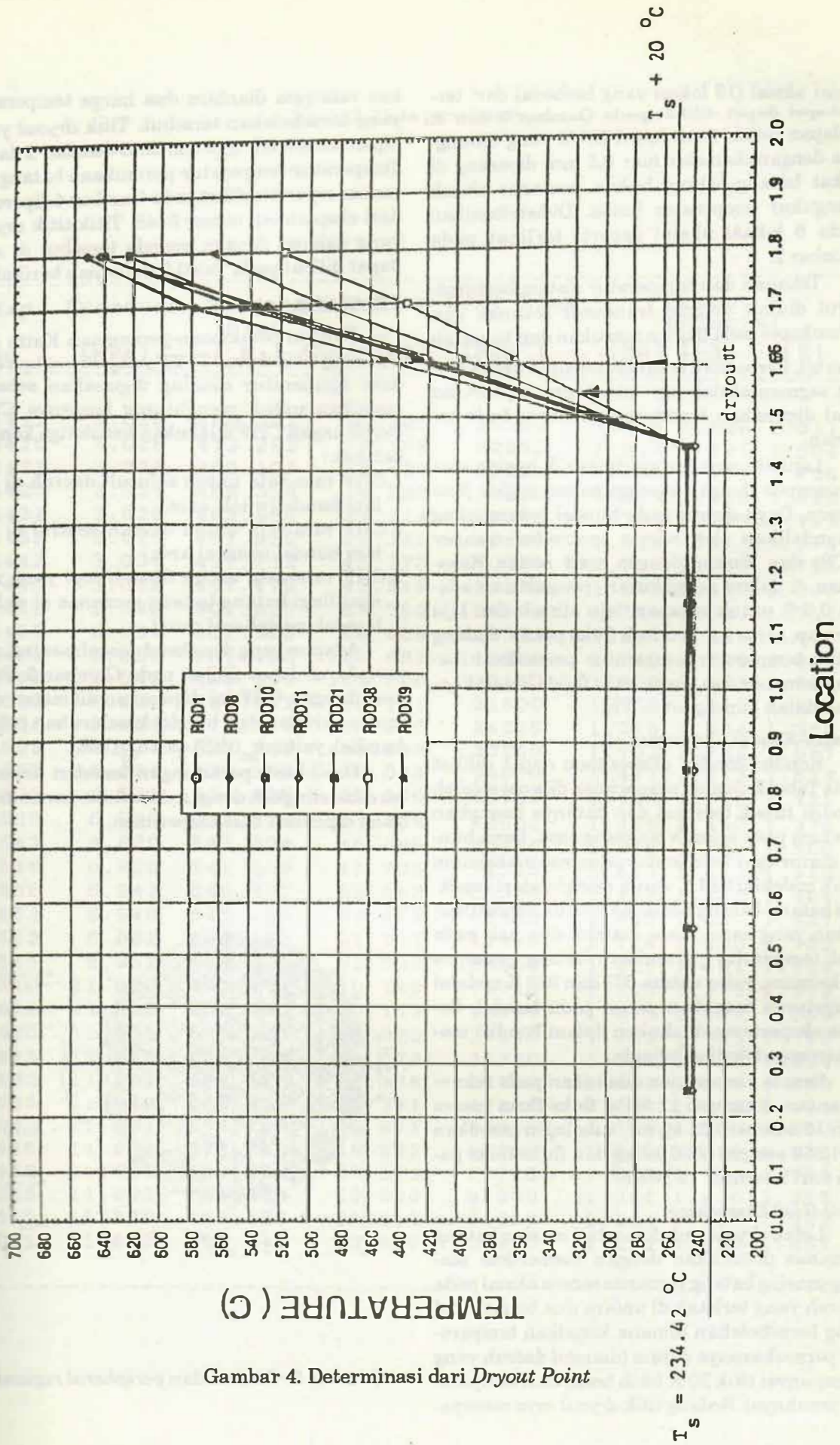


Gambar 2. Test Section HCPWR tipe Rod Bundle



Gambar 3. Rincian dari batang pemanas

GB.5445



Gambar 4. Determinasi dari *Dryout Point*

posisi aksial (13 lokasi yang berbeda) dari termokopel dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3. Delapan puluh termokopel Cr-Al yang dibungkus dengan diameter luar 0,5 mm dipasang di dekat batang-batang bukan pemanas untuk mengukur temperatur fluida. Didistribusikan pada 8 lokasi aksial seperti terlihat pada Gambar 2.

Tekanan dan temperatur sistem berturut-turut diukur dengan transduser tekanan dan termokopel pada bagian masukan dan keluaran pipa uji. Perbedaan tekanan-tekanan untuk empat segmen aksial dan satu panjang pemanas total digunakan transduser-transduser beda tekanan.

Laju alir uap dan air diukur di bagian atas pencampur dengan menggunakan *orifice flow meters*. Daya dicatu pada bundel batang yang dikendalikan oleh *silicon controlled rectifier (SCR)* dan diukur dengan watt meter. Kesalahan di dalam pengukuran-pengukuran adalah 0,6 % untuk tekanan, laju alir air dan laju alir uap, serta 1,4 % untuk fluks panas. Sedangkan untuk temperatur-temperatur permukaan batang pemanas dan temperatur fluida kesalahannya adalah kurang lebih 3 K.

Kondisi-Kondisi Eksperimen

Kondisi-kondisi eksperimen dapat dilihat pada Tabel 2. Semua eksperimen dicapai setelah kondisi tunak tercapai dan datanya kemudian direkam pada sebuah *magnetig tape*. Daya bundel diatur agar temperatur pemanas maksimum tidak melebihi 923 K untuk menghindari rusaknya batang-batang pemanas. Untuk kondisi masukan yang sama, data diambil dua kali pada saat temperatur permukaan batang pemanas maksimum, yaitu antara 673 dan 923 K melalui pengaturan masukan panas pada bundel. Semua eksperimen dilakukan dalam kondisi masukan mendekati subdingin.

Semua eksperimen dilakukan pada tekanan antara 3 sampai 12 MPa, fluks-fluks massa dari 10 sampai 102 kg/m², subdingin masukan dari 850 sampai 3025 kJ/kg dan fluks-fluks panas dari 2 sampai 14 W/cm².

Hasil-Hasil Eksperimen

Letak *dryout* untuk masing-masing batang pemanas ditentukan dengan memeriksa masing-masing batang pemanas secara aksial pada daerah yang terletak di antara dua termokopel yang bersebelahan dimana kenaikan temperatur permukaannya curam (diambil daerah yang mempunyai titik 20 K lebih besar dari temperatur jenuhnya). Sedangkan titik *dryout*-nya merupa-

kan rata-rata diantara dua harga temperatur yang bersebelahan tersebut. Titik *dryout* yang diperoleh adalah ± 15 cm, lihat Gambar 2 dan 4. Temperatur-temperatur permukaan batang pemanas seperti terlihat pada Gambar 4 diperoleh dari eksperimen nomor 5445. Titik-titik *dryout* yang didapat dengan metoda tersebut di atas dapat dilihat pada Tabel 2 (halaman berikut).

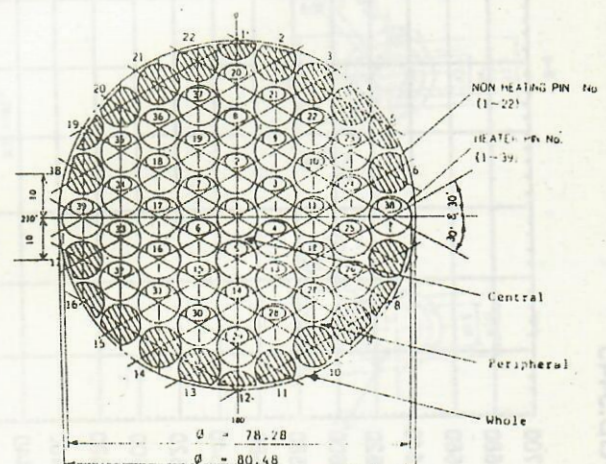
PEMBAHASAN

Dengan persamaan-persamaan Katto dan Bowring, titik *dryout* TPTF yang dihasilkan dari data temperatur dinding digunakan sebagai masukan untuk menghitung besarnya CHF. Perhitungan CHF dilakukan untuk tiga kondisi berikut :

1. CHF rata-rata untuk seluruh daerah di dalam bundel (whole area)
2. CHF rata-rata untuk daerah sentral di dalam bundel (central area)
3. CHF rata-rata untuk daerah tepi yang mengelilingi batang-batang pemanas di dalam bundel (peripheral area).

Adapun yang dimaksud daerah sentral dan *peripheral* dapat dilihat pada Gambar 5. Pada perhitungan CHF ini digunakan diameter-diameter ekuivalen dari bundel keseluruhan (whole bundle), yaitu $d_{he}(WB)$ dan $d_{hy}(WB)$.

Hasil-hasil perhitungan tersebut kemudian dibandingkan dengan data fluks panas kritis yang diperoleh dari eksperimen.



Gambar 5. Central dan *peripheral* regions.

Tabel 2. Data percobaan

No.	Exp. No.	Pressure (MPa)	Temp. inlet (K)	Mass Flux (Kg/m ² .s)	Heat Flux (W/m ²)	Dryout Point(m)			Dryout Quality
						{WB}	{CS}	{P}	{-}
1	5412	3.025	478.392	10.106	20530	1.619	1.629	1.611	1.233
2	5415	3.026	473.293	10.108	22880	1.513	1.521	1.504	1.277
3	5422	3.026	483.103	18.438	32920	1.725	1.725	1.725	1.147
4	5425	3.024	482.309	18.582	37290	1.513	1.513	1.513	1.128
5	5432	3.028	493.966	27.214	43060	1.725	1.725	1.725	1.031
6	5435	3.026	491.935	27.325	49880	1.513	1.513	1.513	1.039
7	5442	3.034	497.712	45.173	70010	1.707	1.700	1.725	1.001
8	5445	3.032	497.479	45.249	80420	1.600	1.600	1.600	1.077
9	5452	3.033	501.625	67.759	100900	1.745	1.637	1.750	0.989
10	5455	3.034	501.153	68.029	110370	1.437	1.429	1.446	0.886
11	5461	3.039	501.466	100.661	116020	1.740	1.640	1.800	0.759
12	5465	3.043	495.298	101.529	138150	1.500	1.443	1.564	0.757
13	5513	6.931	516.651	10.191	21500	1.534	1.513	1.587	1.426
14	5516	6.924	512.076	10.227	24210	1.375	1.364	1.386	1.420
15	5522	6.914	523.564	18.958	30250	1.703	1.725	1.637	1.170
16	5525	6.924	520.906	19.049	34870	1.471	1.513	1.513	1.150
17	5532	6.921	534.177	27.599	40750	1.746	1.725	1.725	1.125
18	5535	6.929	532.375	27.669	48660	1.426	1.450	1.375	1.087
19	5543	6.929	541.304	45.669	63760	1.778	1.750	1.800	1.092
20	5546	6.925	541.539	45.735	74550	1.513	1.513	1.513	1.086
21	5556	6.942	546.777	68.662	106930	1.473	1.482	1.464	1.016
22	5553	6.940	547.283	69.475	93320	1.645	1.637	1.637	0.981
23	5562	6.962	589.283	91.771	117130	1.714	1.500	1.750	1.008
24	5565	6.952	588.931	92.599	133860	1.425	1.404	1.446	0.949
25	5610	11.820	495.471	10.149	19710	1.373	1.375	1.375	1.156
26	5615	11.820	508.303	10.153	23870	1.075	1.064	1.086	1.125
27	5620	11.831	535.997	18.920	27140	1.753	1.725	1.775	1.193
28	5625	11.819	525.265	19.076	35340	1.225	1.225	1.225	1.010
29	5632	11.901	567.557	28.188	36760	1.800	1.800	1.800	1.221
30	5635	11.912	566.856	28.361	47260	1.353	1.375	1.375	1.165
31	5642	11.901	577.749	46.671	55920	1.761	1.750	1.800	1.122
32	5645	11.901	577.743	46.822	67360	1.375	1.375	1.375	1.047
33	5652	11.901	584.682	69.271	76720	1.775	1.750	1.775	1.068
34	5656	11.903	584.604	69.603	95990	1.364	1.400	1.375	1.020
35	5665	11.829	663.127	93.511	123650	1.363	1.343	1.382	1.034
36	5661	11.846	663.347	93.698	102960	1.655	1.650	1.687	1.045

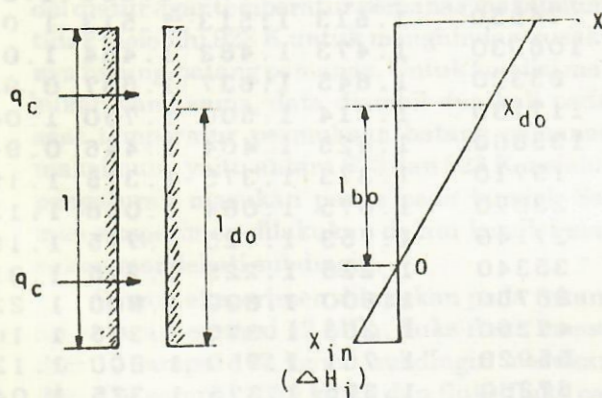
Perbandingan Data Eksperimen dengan Persamaan-Persamaan

Persamaan Katto yang digunakan dalam perbandingan adalah dikembangkan dari data pipa yang mempunyai batas-batas tekanan dari 2,6 sampai 20 MPa, fluks massa dari 750 sampai 4000 kg/m²s dan subdingin masukan dari 0 sampai 931 kJ/kg. Persamaan tersebut terdiri dari empat persamaan, yang masing-masing mempunyai daerah kelakuan *burn out* yang berbeda. Sesuai dengan pengambilan kriteria tersebut di atas, di dalam persamaan Katto semua data *dryout* dari TPTF berada di luar empat daerah yang didefinisikan oleh Katto. Hal ini karena data TPTF semuanya termasuk di daerah yang disebut regim aliran rendah (L - regim).

Di dalam L - regim, *dryout* diasumsikan terjadi terutama oleh evaporasi dari cairan tipis yang melekat pada permukaan pemanas.

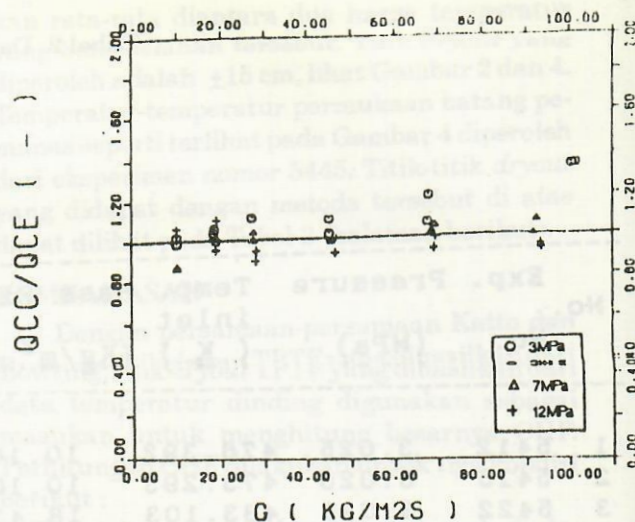
Masing-masing persamaan untuk masing-masing daerah mempunyai persamaan CHF yang berlainan, yaitu q_{co} untuk satu kondisi masukan yang jenuh dan mempunyai satu parameter non dimensional K tertentu (Tabel 1). Persamaan parameter K didapatkan secara analitis dengan menggunakan panjang pendidihan, seperti yang diusulkan Katto (8).

Panjang pendidihan didefinisikan sebagai jarak dari satu titik yang fluidanya diasumsikan dalam kondisi jenuh sampai pada satu titik *dry out* (l_{bo}), lihat Gambar 6.



Gambar 6. Panjang pendidihan

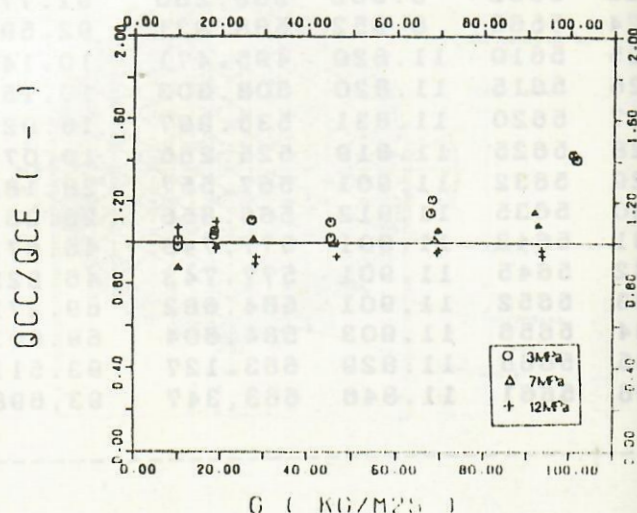
Dari Gambar 7 terlihat perbandingan antara persamaan Katto dengan data *dryout* dari TPTF untuk bundel keseluruhan. Dalam kasus ini terlihat bahwa, persamaan Katto untuk tekanan 3 MPa dan 7 MPa dengan fluks massa lebih besar 10 kg/m²s mempunyai kecenderungan lebih besar (*overpredict*). Untuk harga fluks



Gambar 7. Unjuk kerja korelasi Katto untuk bundel keseluruhan

massa yang sama pada 12 MPa kecenderungannya lebih rendah (*underpredict*).

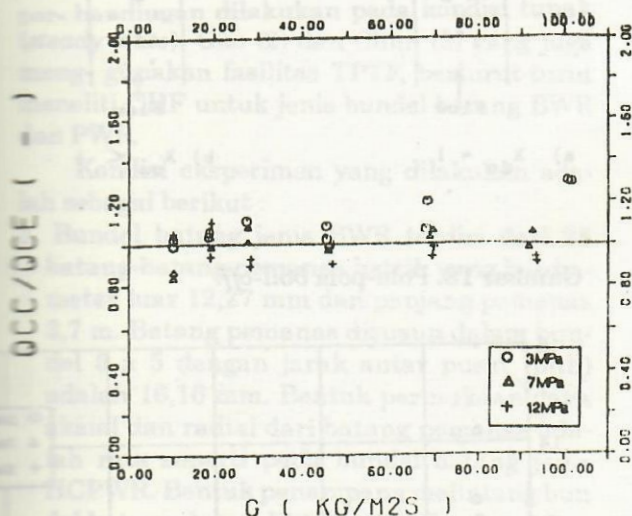
Pada tekanan 3 MPa, persamaan Katto untuk bundel sentral mempunyai kecenderungan lebih besar pada semua harga fluks massa di daerah eksperimen. Pada 7 MPa dan fluks massa lebih besar 20 kg/m²s akan berkecenderungan lebih besar. Sedangkan untuk 12 MPa, kecenderungan persamaan Katto adalah lebih kecil pada 20 kg/m²s. Pada fluks massa lebih kecil dari 20 kg/m²s dan tekanan 7 MPa kecenderungannya lebih kecil, sedang untuk 12 MPa lebih besar (lihat Gambar 8).



Gambar 8. Unjuk kerja korelasi Katto untuk bundel central

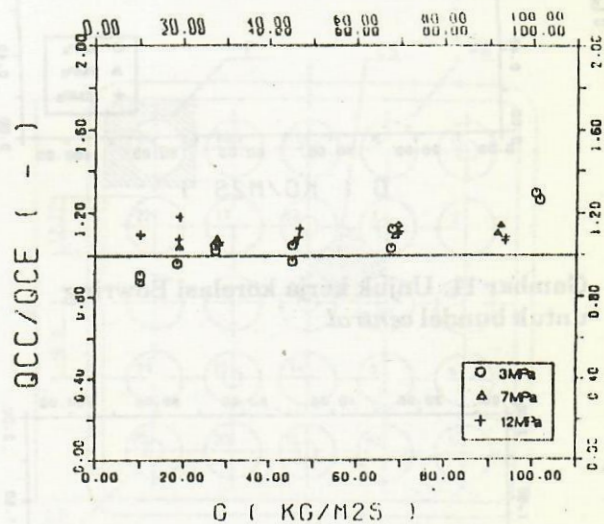
Untuk bundel *peripheral*, pada tekanan 3 MPa dengan semua daerah fluks massa eksperimen, persamaan Katto mempunyai kecenderungan lebih besar. Pada 12 MPa dengan fluks massa lebih besar 20 kg/m²s kecenderungannya lebih kecil. Sedang untuk fluks massa yang lebih kecil 20 kg/m²s kecenderungannya lebih besar dan pada 7 MPa kecenderungan dari persamaan Katto adalah bergantian suatu saat lebih besar, saat lain lebih kecil (Gambar 9).

Persamaan kedua yang digunakan dalam perbandingan adalah persamaan Bowring. Persamaan ini dikembangkan dari data bundel batang yang berada di daerah tekanan 0,6 sampai 15,5 MPa dan fluks massa dari 50 sampai 4000 kg/m²s. Persamaannya terdiri dari beberapa persamaan-persamaan yang sesuai untuk satu geometri pipa uji, kondisi masukan dan sebagainya.



Gambar 9. Unjuk kerja korelasi Katto untuk bundel *peripheral*.

Dari tiga perbandingan di atas, secara umum dapat dikatakan bahwa, persamaan Katto relatif baik untuk memperkirakan CHF rata-rata untuk bundel keseluruhan, sentral dan *peripheral*. Walaupun demikian untuk fluks massa yang lebih besar 100 kg/m²s, penyimpangannya mencapai $\pm 35\%$. Hal ini disebabkan karena persamaan Katto pada L-regim dikembangkan untuk data pipa dan kondisi-kondisi aliran rendah. Disamping itu pula didasarkan pada asumsi bahwa, *dryout* terjadi oleh pengupapan dari lapisan tipis cairan anular. Kemungkinan di dalam kondisi ini tidak terjadi pengupapan lapisan tipis tersebut, karena fluks massanya masih terlalu tinggi untuk mencapai kondisi *boil-off* dan kualitas *dryoutnya* lebih kecil satu, lihat Gambar 13 dan 14. Disamping itu sulit untuk mengevaluasi kesalahan antara hasil-hasil untuk kondisi 3 MPa, 7 MPa dan 12 MPa. Hanya yang penting persamaan Katto tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan CHF dari bundel batang jenis HCPWR pada tekanan tinggi dan kondisi *boil-off*.

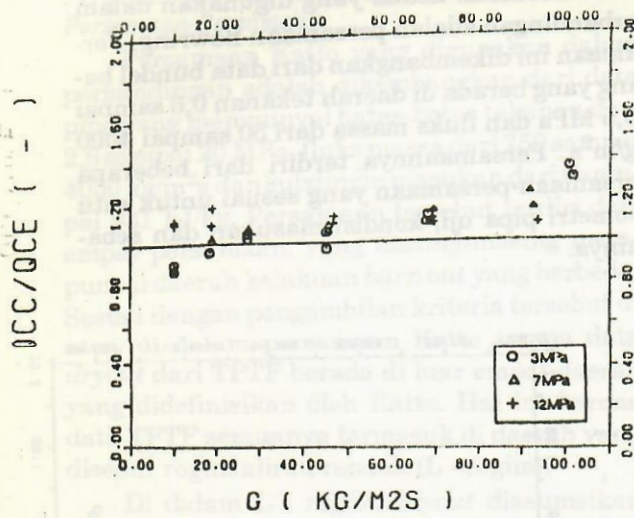


Gambar 10. Unjuk kerja korelasi Bowring untuk bundel keseluruhan

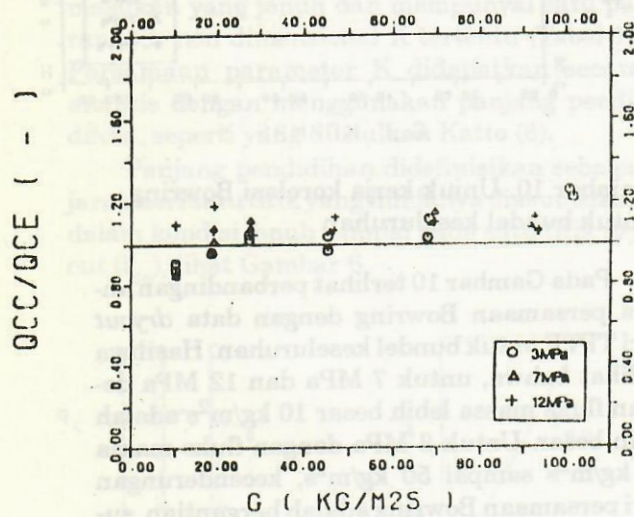
Pada Gambar 10 terlihat perbandingan antara persamaan Bowring dengan data *dryout* dari TPTF untuk bundel keseluruhan. Hasilnya terlihat bahwa, untuk 7 MPa dan 12 MPa dengan fluks massa lebih besar 10 kg/m²s adalah lebih besar. Untuk 3 MPa dengan fluks massa 15 kg/m²s sampai 50 kg/m²s, kecenderungan dari persamaan Bowring adalah bergantian, suatu saat lebih besar dan saat yang lain lebih kecil. Sedang untuk fluks massa lebih besar 50 kg/m²s cenderung lebih besar.

Hasil yang sama juga diperoleh untuk bundel sentral dan *peripheral*, dengan kecenderungan lebih besar pada daerah tekanan dan fluks massa yang sama (lihat Gambar 11 dan 12).

Secara umum dikatakan bahwa, persamaan Bowring relatif baik untuk memperkirakan CHF di tiga daerah di atas, bundel keseluruhan, sentral dan *peripheral*. Penyimpangan maksimum adalah $\pm 30\%$ yaitu pada saat fluks massa lebih besar 100 kg/m²s. Hal ini seperti terlihat



Gambar 11. Unjuk kerja korelasi Bowring untuk bundel *central*

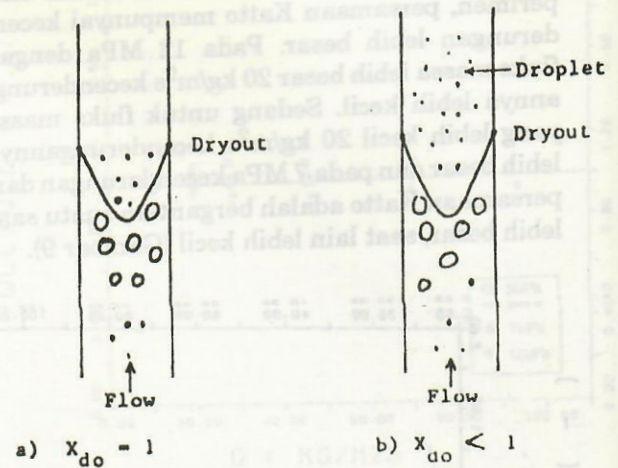


Gambar 12. Unjuk kerja korelasi Bowring untuk bundel *peripheral*

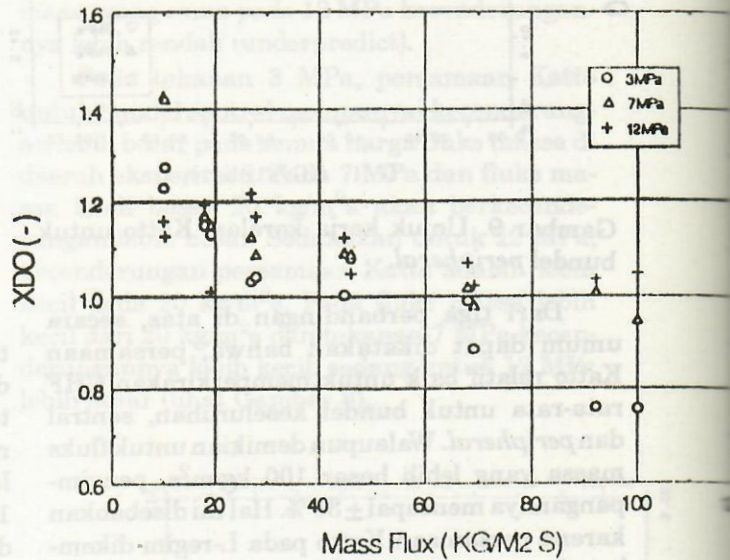
pada persamaan Katto di atas, bahwa persamaan Bowring dapat pula digunakan untuk memperkirakan CHF bagi bundel batang jenis HCPWR pada kondisi *boil-off* dan tekanan tinggi.

Pengaruh Posisi Batang Pemanas

Dalam makalah ini diuraikan pula pengaruh dari posisi batang pemanas di dalam bundel. Jika beberapa batang pemanas mempunyai posisi yang berbeda dengan lainnya, maka kemungkinan akan didapatkan harga titik *dryout* yang berbeda pula. Dari Gambar 7, 8, dan 9



Gambar 13. Pola-pola *boil-off*.



Gambar 14. Kualitas *dry-out* hasil percobaan.

terlihat bahwa di antara bundel keseluruhan, sentral dan *peripheral* jika dievaluasi dengan persamaan Katto ternyata semuanya mempunyai kecenderungan yang sama (kurvanya tidak jauh berbeda). Begitu pula jika dievaluasi dengan persamaan Bowring ternyata hasilnya saling mendekati. Tetapi kecenderungan dari persamaan Katto berbeda dari persamaan Bowring. Hal ini berarti bahwa perkiraan CHF tidak bergantung pada posisi batang pemanas, tetapi tergantung pada persamaan yang akan digunakan. Dengan kata lain bahwa kelakuan termohidrolika di dalam bundel batang adalah sama.

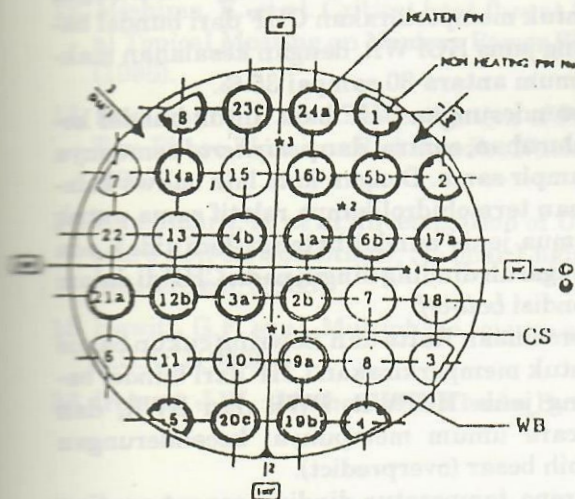
Dalam hal ini hampir tidak ada pengaruh dinding yang dingin terhadap CHF pada kondisi *boil-off*.

Perbandingan Unjuk Kerja Persamaan-Persamaan

Untuk meneliti perbandingan unjuk kerja dari persamaan-persamaan Katto dan Bowring dalam memperkirakan CHF untuk beberapa jenis bundel batang, dalam makalah ini didiskusikan hasil-hasil perkiraan untuk bundel batang jenis HCPWR, PWR dan BWR. Dalam hal ini perbandingan dilakukan pada kondisi tunak (*steady state*). Guo (2) dan Chun (3) yang juga menggunakan fasilitas TPTF, berturut-turut meneliti CHF untuk jenis bundel batang BWR dan PWR.

Kondisi eksperimen yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Bundel batang jenis BWR terdiri dari 25 batang-batang pemanas listrik yang berdiameter luar 12,27 mm dan panjang pemanas 3,7 m. Batang pemanas disusun dalam bundel 5 x 5 dengan jarak antar pusat (pith) adalah 16,16 mm. Bentuk permukaan daya aksial dan radial dari batang pemanas adalah rata seperti pada bundel batang jenis HCPWR. Bentuk penampang melintang bundel batang dapat dilihat pada Gambar 15.

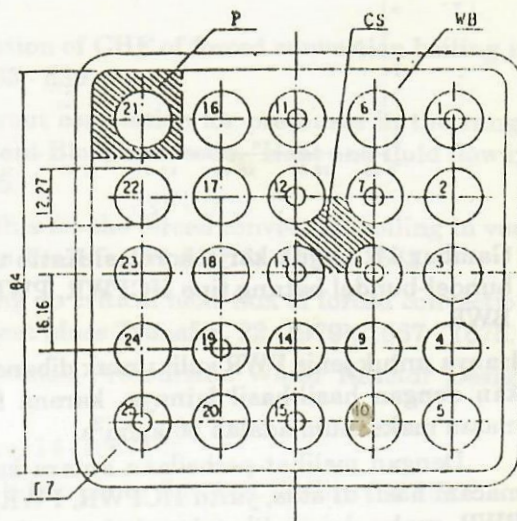


Keterangan:
WB = Whole Bundle Channel; CS = Central Sub-channel;
 d_{he} (WB) = 16,06 mm; d_{hy} (WB) = 12,42 mm; d_{he} (CS) = d_{hy} (CS) = 17,78 mm

Gambar 15. Penampang lintang bundel batang tipe PWR.

2. Bundel batang jenis PWR terdiri dari 24 batang pemanas listrik dan delapan batang bukan pemanas yang berbentuk setengah lingkaran yang masing-masing berdiameter

luar 9,5 mm serta panjang pemanas 3,7 mm. Bundel batang disusun dalam baris bujur sangkar dengan jarak antar pusat 12,6 mm dan diikat oleh pelat pengikat atas dan bawah serta 10 buah pemisah. Bentuk permukaan daya aksial dan radial dari batang pemanas adalah rata seperti pada jenis HCPWR. Adapun penampang melintang bundel batang jenis PWR dapat dilihat pada Gambar 16.

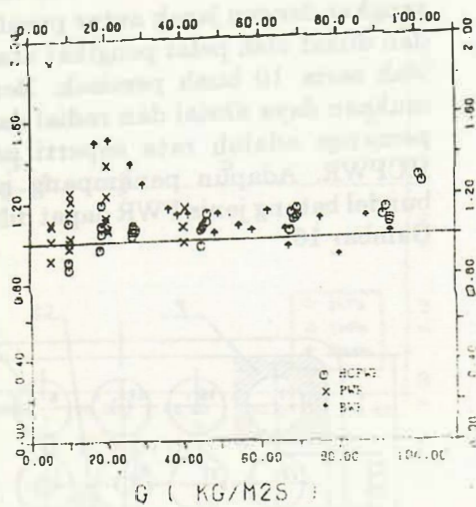


Keterangan:
WB = Whole Bundle Channel; CS = Central Sub-channel;
P = Corner Subchannel; d_{he} (WB) = 16,84 mm; d_{hy} (WB) = 12,61 mm; d_{he} (CS) = d_{hy} (CS) = 14,83 mm; d_{he} (P) = 19,37 mm; d_{hy} (P) = 10,51 mm.

Gambar 16. Penampang lintang bundel batang tipe BWR.

Eksperimen untuk jenis BWR dan PWR dilakukan pada tekanan tinggi dan kondisi *boil-off* seperti pada eksperimen untuk jenis HCPWR. Hasil-hasil perbandingannya dapat dilihat pada Gambar 17.

Dari Gambar 17 terlihat bahwa, kecenderungan persamaan CHF untuk semua jenis baik BWR, PWR maupun HCPWR adalah lebih besar dari hasil eksperimen. Hal ini akan menguntungkan di dalam aplikasi, karena tidak akan membahayakan. Jika dibandingkan hasil-hasil PWR dan BWR kesalahan hasil HCPWR adalah yang paling kecil. Di dalam jenis BWR, hasil untuk fluks massa yang lebih kecil 30 kg/m²s adalah naik dengan lebih besar. Tetapi untuk jenis HCPWR menjadi rata $\pm 10\%$. Di antara 30 sampai 95 kg/m²s untuk jenis BWR dan HCPWR kesalahan rata-rata juga kecil $\pm 10\%$.



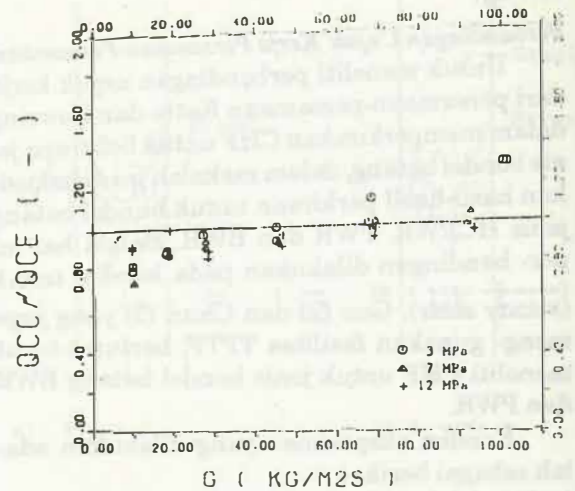
Gambar 17. Unjuk kerja korelasi Katto untuk bundel-bundel batang tipe HCPWR, PWR dan BWR.

Hanya untuk jenis PWR sulit untuk dibandingkan dengan hasil-hasil lainnya, karena fluks massa maksimum adalah $50 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Dengan melihat perbedaan antara ketiga macam hasil di atas, yaitu HCPWR, PWR dan BWR, maka dapat dikatakan bahwa sebenarnya sulit untuk menyamakan, karena banyak kecenderungan yang tidak sesuai dalam unjuk kerja persamaan, yang diperkirakan karena akibat perbedaan jenis bundel. Walaupun demikian secara umum dapat disimpulkan bahwa, persamaan-persamaan Katto dan Bowring adalah cukup bagus dalam memperkirakan CHF untuk bundel-bundel batang jenis HCPWR, PWR dan BWR.

KESIMPULAN

Eksperimen-eksperimen fluks panas kritis (fluks panas dryout) telah dilakukan untuk bundel batang jenis HCPWR, pada kondisi tekanan tinggi dan aliran rendah. Hal ini penting untuk mempelajari kelakuan termohidrolika pada saat terjadi LOCA di suatu reaktor nuklir. Air masukan yang diberikan pada semua eksperimen adalah sangat mendekati kondisi subdingin, dengan tekanan dari 3 sampai 12 MPa, fluks massa dari 10 sampai $102 \text{ kg/m}^2\text{s}$, entalpi masuk dari 850 sampai 3025 kJ/kg dan fluks panas dari 2 sampai 14 W/cm^2 . Data CHF telah dibandingkan dengan dua persamaan empirik, yaitu persamaan Katto dan Bowring yang sering digunakan untuk memperkirakan CHF



Gambar 18. Unjuk kerja korelasi "Evap" untuk bundel keseluruhan

untuk bundel batang jenis BWR dan PWR di dalam eksperimen yang menggunakan fasilitas uji aliran dua fasa (TPTF).

Dari eksperimen ini diperoleh hasil yang dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Persamaan Katto dan Bowring relatif bagus untuk memperkirakan CHF dari bundel batang jenis HCPWR, dengan kesalahan maksimum antara 30 sampai 35 %.
2. Kecenderungan CHF baik untuk bundel keseluruhan, sentral dan *peripheral* semuanya hampir sama. Dengan kata lain bahwa kelakuan termohidroliknya relatif sama untuk semua jenis bundel batang. Jadi tidak ada pengaruh dinding dingin pada CHF di dalam kondisi *boil-off*.
3. Persamaan Katto dan Bowring cukup bagus untuk memperkirakan CHF dari bundel batang jenis HCPWR, PWR dan BWR, dan secara umum mempunyai kecenderungan lebih besar (*overpredict*).
4. Karena temperatur dinding sangat penting untuk menentukan titik *dryout*, maka hasilnya akan lebih baik jika di dalam eksperimen dapat dipasang termokopel dinding yang lebih banyak, terutama pada daerah *dryout*nya.
5. Dengan hasil CHF dan titik *dryout* tersebut, maka dapat diperkirakan lokasi-lokasi kerusakan bahan elemen bakar pada saat peristiwa LOCA terjadi di suatu reaktor nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kumamaru, H. et al. Critical heat flux for uniformly heated rod bundle under high-pressure, low-flow and mixed inlet conditions, *J.Nucl.Sc.Tech.* 26, 5, 544 - 557, Japan (1989).
2. Guo, Z. et al. Critical heat flux for rod bundle under high-pressure boil-off conditions, to be published as JAERI- M Report.
3. Chun, S. et al. Critical heat flux for PWR-type rod bundle under high-pressure boil-off conditions, to be published as JAERI - M Report.
4. Yoder, G. L. et al. Rod bundle burn out data and correlation comparisons, *Nucl. Technol.*, 68 (1985), 355 - 369 .
5. Katto, Y. On the heat-flux/exit-quality type correlation of CHF of forced convection boiling in uniformly heated vertical tubes , *ibid.*, 24 (1981), 533 - 539.
6. Bowring, R. W. MA. A new mixed flow cluster dryout correlation for pressures in the range 0,6 - 15,5 MN/m² (90 - 2250 psia) for use in a transient Blowdown code, "Heat and fluid flow in water reactor safety", *Inst. Mech. Engrs.*, (1977) 175.
7. Katto, Y. A generalized correlation of critical heat flux for the forced convection boiling in vertical uniformly heated round tube, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21 (1978), 1527 - 1542.
8. Katto, Y. An analysis of the effect of inlet subcooling on critical heat flux of forced convection boiling in vertical uniformly heated tubes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 22 (1979), 1567 - 1575.
9. Umeoka, T., et al. Current Status of High Conversion Pressurized Water Reactor Design studies, *Nuclear Technology*, (1988) 80.
10. Biasi, L., et al. Studies on burnout, *energia nucleare*, 14 (1967), 9.
11. Nakamura, H., et al. System description for Rosa-IV two phase flow test facility (TPTF), JAERI, (1983)
12. Mishima, K. et al. Critical heat flux at low velocity and pressure conditions, 2nd International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operation, Japan, (1986).
13. Kumamaru, H. et al. Investigation of Pre and Post-Dryout Heat Transfer of Steam - Water Two Phase Flow in a Rod Bundle, *Nuclear Engineering and Design*, 102, 71 - 84, Amsterdam, (1987).
14. Kumamaru, H. et al. Investigation of Uncovered - Bundle Heat Transfer under High - pressure Boil-off Conditions, *Nuclear Engineering and Design*, 96, 81 - 94, North-Holland, Amsterdam, (1986).
15. Hewitt, G.F. et al. *Multiphase science and technology*, Hemisphere publishing corporation, 2, U.S.A., (1986)
16. Ireland, J.W. : *Mechanics of Fluids*, Butterworth and Co. (Publishers) Ltd. (1971).