

ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA KANAL UJI UNTAI UJI TERMOHIDROLIKA REAKTOR

Anhar R. Antariksawan, Hendro Tjahjono, Bintoro Aji
Pusat Penelitian Teknologi Keselamatan Reaktor - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PADA KANAL UJI UNTAI UJI TERMOHIDROLIKA REAKTOR. Dari pengoperasian Untai Uji Termohidrolika Reaktor pada daya nominal (3,2 MW) dapat diidentifikasi beberapa permasalahan yang perlu dikaji lebih dalam. Salah satu permasalahan yang dianalisis pada makalah ini adalah perpindahan panas pada kanal uji (perpindahan panas dari batang pemanas ke air pendingin). Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran dengan perhitungan mempergunakan paket program COBRA IV. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa temperatur batang pemanas yang terukur pada eksperimen lebih tinggi daripada yang ditunjukkan oleh hasil perhitungan. Penyebab dari perbedaan ini diperkirakan berasal dari adanya kerak pada permukaan luar batang pemanas yang berpengaruh pada turunnya koefisien perpindahan panas global.

ABSTRACT

HEAT TRANSFER ANALYSIS ON THE TEST BUNDLE OF THE REACTOR THERMOHYDRAULIC TEST LOOP. From the operation of Reactor Thermohydraulic Test Loop at nominal power (3.2 MW) we can identify some problems that need deeper analysis. One of the problem analyzed in this paper is the heat transfer between the heated rods and the coolant in the test bundle. Analysis is carried out by comparing the measurement results of heated rod temperature to COBRA IV results. The results show that the heated rod temperature measured in the experiment is higher than that obtained from the calculation. This could be caused by an unexpected layer on the heated rod external surface that decreases the global heat transfer coefficient value.

PENDAHULUAN

Untai Uji Termohidrolika Reaktor (UUTR) merupakan satu instalasi yang dirancang untuk mensimulasikan (dari aspek termohidrolik teras dan sisi pendingin primer) reaktor jenis PR Westinghouse 1000 MWe. Simulasi meliputi kondisi operasi normal maupun kondisi kecelakaan (Lost of Coolant Accident, LOCA).

Uji coba operasi yang dilakukan sejak tahun 1991 banyak menghadapi kendala dan baru pada 13 Oktober 1993 untuk pertama kali dapat dicapai daya nominal 3,2 MW. Meskipun demikian beberapa masalah masih dihadapi dan perlu diatasi untuk menyempurnakan unjuk kerja instalasi.

Salah satu permasalahan yang terlihat adalah temperatur batang pemanas yang sudah tinggi, bahkan mencapai batas maksimum 380°C, meskipun temperatur air pendingin masih terlalu rendah akibat pendinginan lebih (over cooling) alat penukar panas.

Analisis dalam makalah ini dilakukan untuk mengetahui penyebab tingginya temperatur batang pemanas. Hal ini dilakukan dengan melakukan perbandingan antara hasil peng-

ukuran dengan perhitungan menggunakan paket program COBRA IV.

TEORI

Untuk bisa membandingkan hasil pengukuran pada UUTR dan hasil perhitungan dengan menggunakan paket program COBRA, perlu dilakukan perhitungan konduksi pada suatu pipa dengan 2 cara pembangkitan panas berbeda.

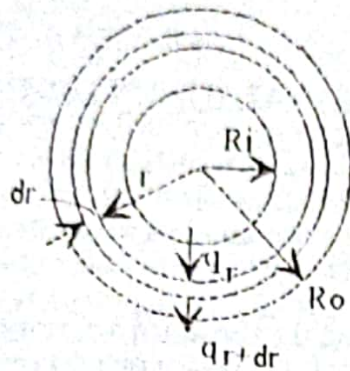
Konduksi pada pipa dengan sumber panas pada ketebalannya (kasus pada batang pemanas UUTR)

Gambar 1 memperlihatkan penampang lintang silinder berlubang (pipa) dengan diameter luar R_o dan diameter dalam R_i dimana terdapat pembangkitan panas sebesar q'' Watt/m³.

Ditinjau elemen yang berdiameter r dan ketebalan dr . Apabila panas dianggap hanya merambat ke arah radial (kasus dimana diameter pipa jauh lebih kecil dibanding panjangnya), neraca energi pada kondisi mantap untuk satu satuan panjang silinder dapat ditulis :

$$(2\pi r dr) q'' = q_{r+dr} - q_r \quad (1)$$

dengan memasukkan harga-harga :



Gambar 1. Penampang lintang silinder

$$q_r = -k \cdot 2\pi r \left(\frac{dT}{dr} \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{dan } q_{r+dr} &= q_r + (dq_r/dr) dr \\ &= q_r - k \cdot 2\pi [r(d^2T/dr^2) + (dT/dr)] dr \quad (3) \end{aligned}$$

maka persamaan (1) menjadi :

$$2\pi r dr q_r = -k \cdot 2\pi [r(d^2T/dr^2) + (dT/dr)] dr \quad (4)$$

atau dapat ditulis :

$$\left(\frac{d^2T}{dr^2} \right) + \left(\frac{dT}{dr} \right) / r + q_r / k = 0 \quad (5)$$

Penyelesaian persamaan diferensial tersebut di atas adalah :

$$T = - (q_r r^2 / k) / 4 + C_1 \ln r + C_2 \quad (6)$$

C_1 dan C_2 , konstanta integrasi, dapat dihitung dari kondisi batas sebagai berikut :

$$dT/dr = 0 \quad \text{pada } r = R_i$$

$$T = T_o \quad \text{pada } r = R_o$$

Sehingga diperoleh : $C_1 = - (q_r R_i / k^2) / 2$

$$C_2 = T_o + (q_r R_o^2 / 4k) - (q_r R_i^2 / 2k) \ln R_o$$

Akhirnya diperoleh :

$$T = T_o + (q_r / 4k) (R_o^2 - r^2) + (q_r R_i^2 / 2k) \ln (r / R_o) \quad (7)$$

Apabila pada $r = R_i$ temperatur adalah T_i , maka :

$$T_i - T_o = (q_r / 4k) (R_o^2 - R_i^2) + (q_r R_i^2 / 2k) \ln (R_i / R_o) \quad (8)$$

Pada Untai Uji Termohidrolika Reaktor panas per satuan volume diberikan oleh:

$$q_r = P / [36 L \pi (R_o^2 - R_i^2)]$$

P adalah daya total yang dibangkitkan dan L panjang aktif batang pemanas. Dengan demikian persamaan (8) menjadi :

$$T_i - T_o = \frac{P}{36\pi L k} \left\{ \frac{1}{4} - \frac{1}{2} \left[\ln(R_o/R_i) / ((R_o/R_i)^2 - 1) \right] \right\} \quad (9)$$

Konduksi pada pipa tanpa sumber panas pada ketebalannya (kasus COBRA)

Jika panas tidak dibangkitkan pada ketebalan ($R_o - R_i$), akan tetapi pada rongga silinder tersebut (kasus bahan bakar reaktor nuklir), maka dari persamaan konduksi Fourier kita peroleh :

$$T_i - T_o = \frac{P}{72 \pi L k} \ln (R_o / R_i) \quad (10)$$

Apabila dibandingkan persamaan (9) dan (10), maka diperoleh :

$$\begin{aligned} (T_i - T_o)_s / (T_i - T_o)_{ts} &= [1 / \{2 \ln(R_o / R_i)\}] - \\ & [1 / \{(R_o / R_i)^2 - 1\}] \quad (11) \end{aligned}$$

indeks s dan ts berarti dengan sumber dan tanpa sumber panas pada ketebalan silinder.

Untuk Untai Uji Termohidrolika Reaktor, $R_i = 3,95$ mm dan $R_o = 4,75$ mm, sehingga diperoleh: $(T_i - T_o)_s / (T_i - T_o)_{ts} = 0,5$

TATAKERJA

Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran pada UUTR dengan hasil perhitungan COBRA. Untuk keperluan tersebut akan diuraikan secara singkat deskripsi dari UUTR dan COBRA IV.

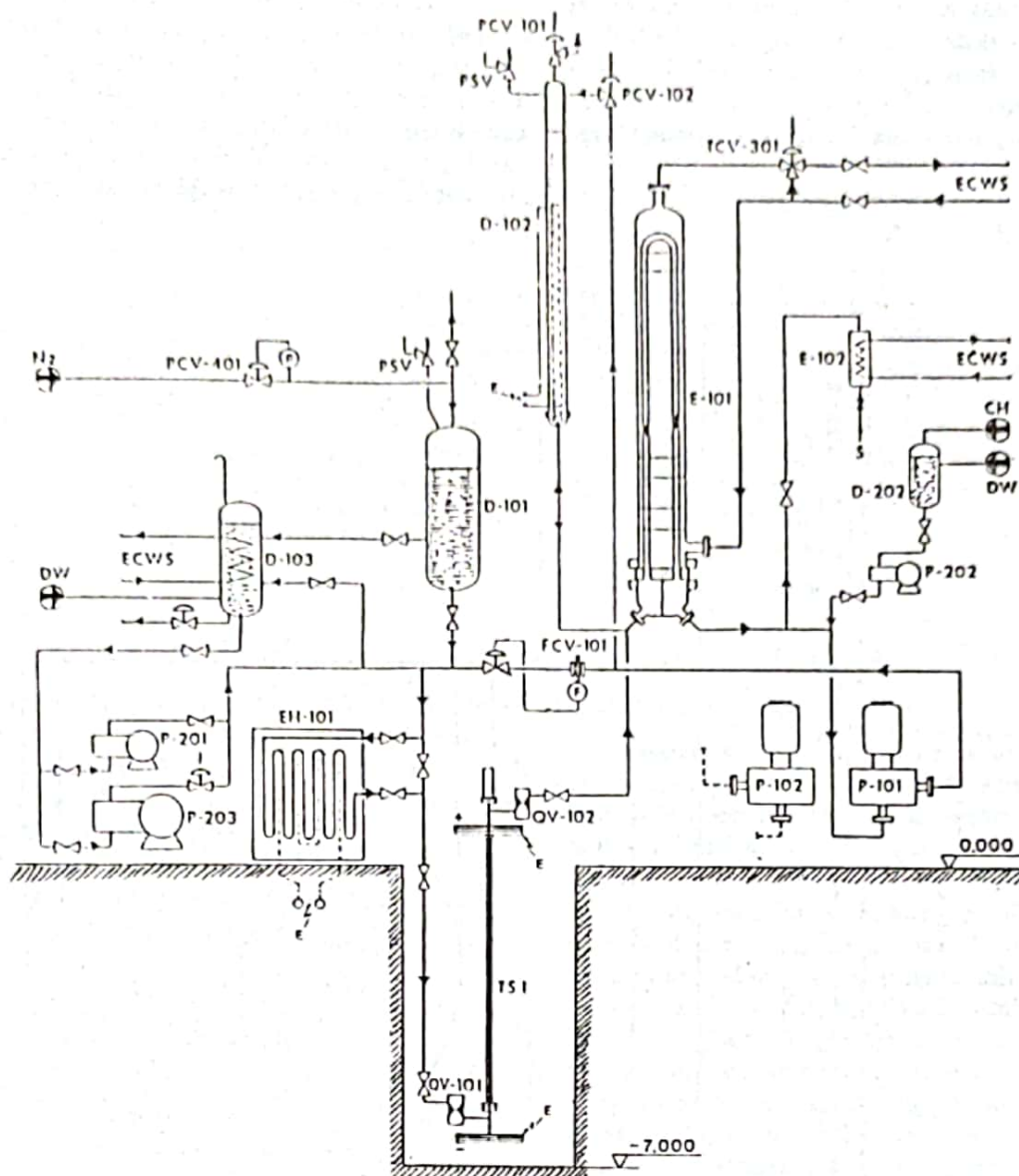
Deskripsi Untai Uji Termohidrolika Reaktor

Perbandingan daya dan volume antara Untai Uji Termohidrolika Reaktor dengan reaktor PWR yang diacu adalah 1/1150. Ketinggian komponen-komponen utama dijaga sama (1:1). Tata letak dan bentuk pipa diusahakan sedekat mungkin dengan acuan. Sedangkan, diameter pipa disesuaikan dengan rugi-rugi tekanan keseluruhan.

Kondisi desain kanal uji dan untai pendingin primer adalah sebagai berikut : daya nominal = 3,2 MW; temperatur desain = 357° C; tekanan disain = 18 MPa; laju alir maksimum = 11,8 kg/detik.

Diagram alir Untai Uji Termohidrolika Reaktor ditunjukkan pada Gambar 2.

Sisi primer untai uji tersusun atas komponen-komponen utama : kanal uji, tabung penekan (pressurizer), penukar panas (heat exchanger), pompa primer dan sistem pemipaan. Instalasi dilengkapi pula dengan pemanas mula (pre-heater) dan sistem darurat (pompa darurat, tangki darurat dan lain-lain).



Gambar 2. Diagram alir Untai Uji Termohidrolika Reaktor

Keterangan :

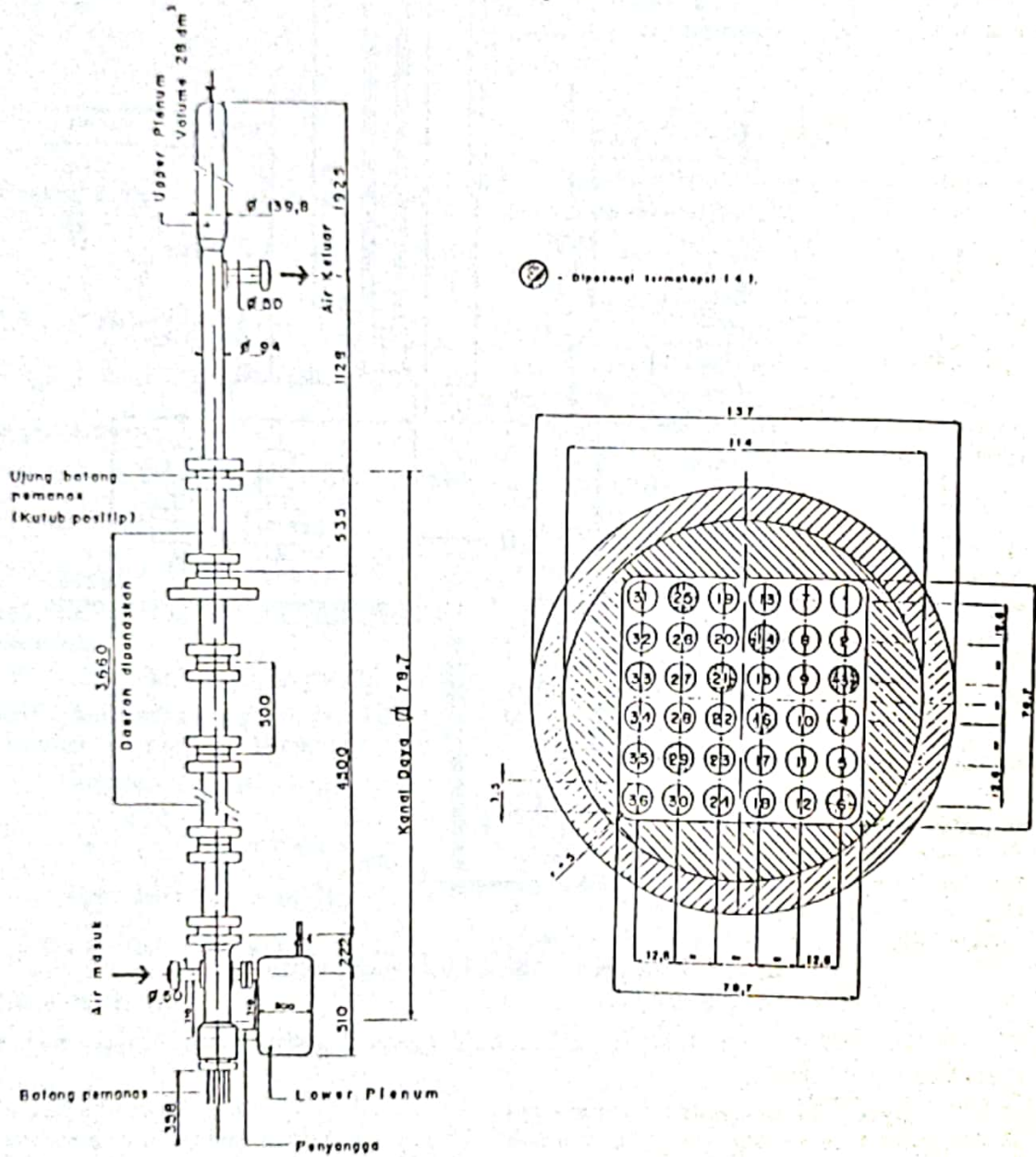
TS1 = kanal uji PWR; D102 = tabung penekan; E101 = penukar panas; P101/102 = pompa primer; EH101 = pemanas mula

Di sisi sekunder mengalir air yang selalu berada pada kondisi fasa cair. Selain untuk mengambil panas dari air pendingin primer melalui alat penukar panas, air pendingin sekunder ini digunakan pula sebagai pendingin perangkat yang lain. Air pendingin sekunder membuang panasnya dengan bantuan menara pendingin kering (dry cooling tower). Keseluruhan sistem pendinginan ini disebut Equipment Cooling Water System.

Kanal uji yang merupakan bagian utama dari instalasi dimaksudkan untuk mensimulasikan bejana reaktor. Di dalam kanal uji terdapat perangkat uji (Test Bundle) yang terdiri dari 36 batang pemanas dengan konfigurasi 6x6. Batang-batang pemanas ini dipanaskan dengan arus listrik searah (25,2 kA, 127 Vdc). Panjang total batang pemanas sekitar 6 meter. Sedang panjang aktifnya (yang dipanaskan) hanya sekitar 3,66 meter. Batang pemanas ber-

diameter luar sekitar 9,5 mm dan memiliki ketebalan sekitar 0,8 mm. Bagian tengah daerah aktif batang pemanas berongga. Geometri dan penampang lintang kanal uji serta penampang batang pemanas ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.

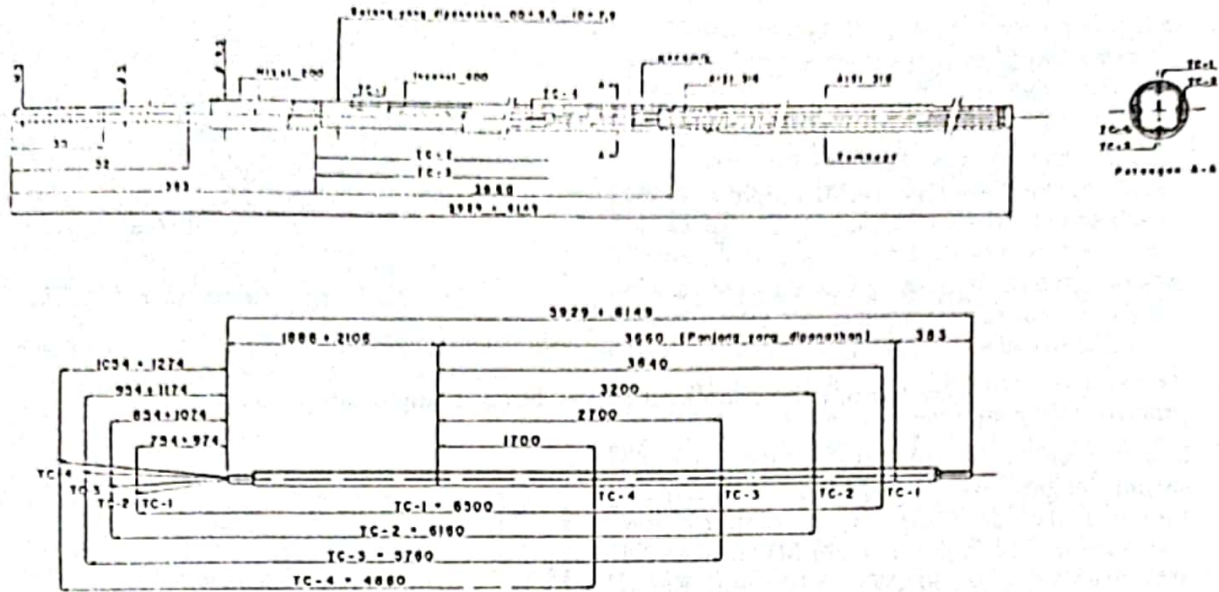
Pada kanal uji ini dipasang beberapa instrumen yang berfungsi untuk keselamatan operasi dan untuk pemantauan parameter-parameter termohidrolik. Instrumentasi tersebut adalah transmitter pengukur tekanan (8 buah) dan termoresistance (8 buah) untuk pengukur temperatur air pendingin. Alat-alat ukur terse-



a. Geometri Kanal Uji.

b. Penampang Lintang Kanal Uji.

Gambar 3. Geometri dan penampang lintang kanal uji



Gambar 4. Batang pemanas Untai Uji Termohidrolika Reaktor

but dipasang sepanjang kanal uji. Pada 8 buah batang pemanas juga dipasang termokopel (masing-masing 4 buah termokopel) untuk mengikuti sifat termal batang pemanas tersebut dan untuk menghindari terjadinya *burn-out*. Termokopel-termokopel tersebut terpasang pada permukaan dalam dari batang pemanas.

Paket program komputer COBRA IV-I

Deskripsi umum

COBRA (Coolant Boiling in Rod Arrays) IV-I adalah sebuah program komputer untuk analisis termohidrolika teras reaktor. Paket program ini telah digunakan secara luas untuk membuat perkiraan unjuk kerja termal elemen bakar nuklir dan juga dalam perancangan serta analisis keselamatan teras reaktor berpendingin logam cair, air maupun gas.

COBRA menggunakan konsep dasar analisis sub kanal. Luasan aliran perangkat dibagi ke dalam sub kanal-sub kanal dengan batas-batas permukaan batang bahan bakar yang berhadapan. Sub kanal dibagi secara aksial ke dalam volume-volume diskrit yang kemudian ditulis persamaan-persamaan kontinuitas, momentum dan energi.

Secara umum, program ini mampu melakukan perhitungan untuk kondisi mantap maupun transien untuk berbagai bundel bahan bakar atau teras reaktor.

Model bahan bakar

Model perpindahan panas konduktif di dalam bahan bakar dibuat untuk menghitung distribusi temperatur. Model ini mempertimbangkan konduksi aksial dan konduktivitas termal gayut temperatur.

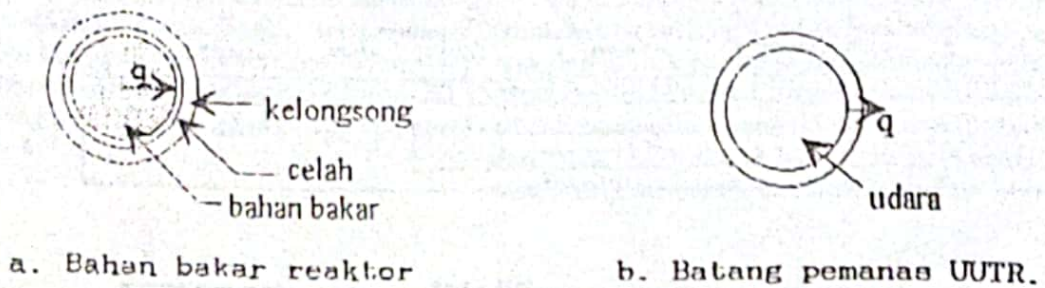
Konfigurasi bahan bakar yang dipakai pada model perhitungan ini terdiri dari bahan bakar dan kelongsong dengan celah di antara keduanya. Panas dibangkitkan di dalam bahan bakar dan mengalir secara konduksi dan konveksi ke air pendingin melalui celah dan kelongsong. Berbeda dengan batang pemanas dimana tidak terdapat bahan bakar, panas dibangkitkan pada ketebalannya (identik dengan kelongsong). Gambar 5 menunjukkan perbedaan kedua konfigurasi dan pembangkitan panas tersebut.

Perbedaan konfigurasi dan pembangkitan panas ini mengakibatkan perbedaan distribusi temperatur terutama pada kelongsong. Akan tetapi, untuk kondisi temperatur dan aliran fluida yang sama, temperatur permukaan kelongsong akan sama untuk fluksi panas yang sama pada permukaan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran

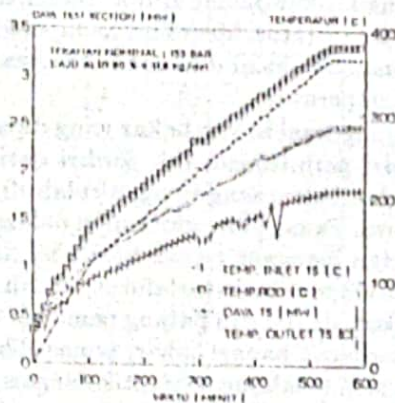
Pengoperasian Untai Uji Termohidrolika Reaktor hingga daya nominal 3,2 MW dilaku-



Gambar 5. Perbedaan konfigurasi dan pembangkitan panas

kan dengan menaikkan daya secara bertahap sesuai dengan prosedur operasi. Pada daya 0 hingga 1 MW, kenaikan daya adalah 100 kW tiap 10 menit. Sedangkan dari 1 MW hingga 3,2 MW, kenaikan daya 50 kW tiap 10 menit. Kenaikkan daya secara bertahap ini dimaksudkan untuk menghindari tegangan termal yang berlebihan.

Gambar 6 menunjukkan evolusi daya, temperatur inlet dan outlet kanal uji selama pengoperasian hingga daya nominal.



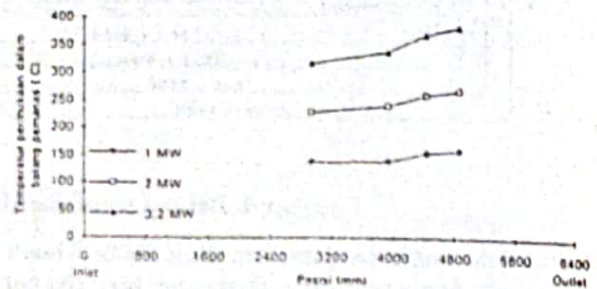
Gambar 6. Evolusi daya, temperatur inlet dan outlet Kanal Uji dalam mencapai daya nominal

Gambar 7 memperlihatkan temperatur permukaan dalam salah satu batang pemanas (no.16) pada empat titik pengukuran dan pada daya 1, 2 dan 3,2 MW.

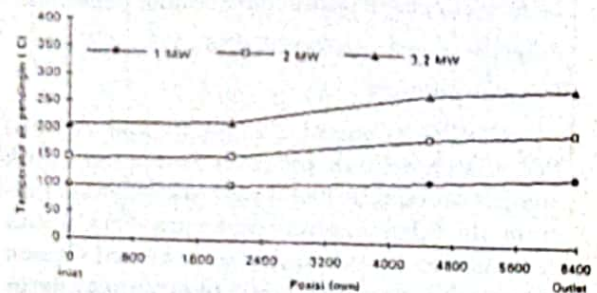
Temperatur air pendingin pada empat titik pengukuran sepanjang kanal uji dan pada daya 1, 2 dan 3,2 MW ditunjukkan pada Gambar 8.

Hasil perhitungan COBRA

Masukan untuk perhitungan adalah data-data geometri kanal uji, sifat-sifat fisika material (air pendingin dan batang pemanas) serta kondisi operasi (tekanan, laju alir dan tempe-



Gambar 7. Hasil pengukuran temperatur permukaan dalam dari batang pemanas No.16



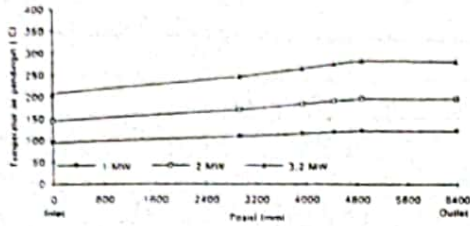
Gambar 8. Hasil pengukuran temperatur air pendingin sepanjang kanal uji

ratur inlet). Kanal uji dibagi ke dalam 49 sub-kanal dan 71 volume diskrit (ke arah aksial).

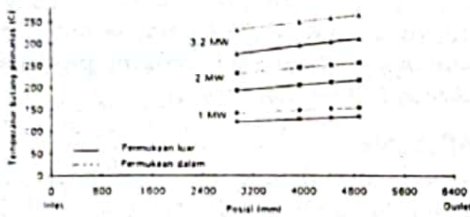
Hasil perhitungan temperatur air pendingin pada beberapa posisi (ketinggian terhadap inlet) sepanjang kanal uji untuk daya 1, 2 dan 3,2 MW diperlihatkan pada Gambar 9.

Gambar 10 menunjukkan temperatur permukaan dalam dan luar batang pemanas no.16 pada empat titik pengukuran untuk masing-masing daya sebesar 1, 2 dan 3,2 MW.

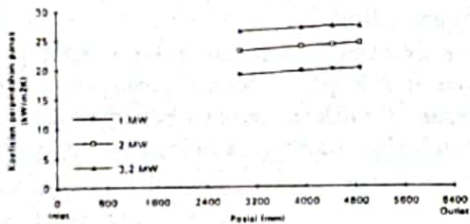
Dari perhitungan tersebut, diperoleh pula harga koefisien perpindahan panas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 9. Hasil perhitungan temperatur air pendingin sepanjang kanal uji



Gambar 10. Hasil Perhitungan Temperatur Permukaan Dalam dan Luar dari Batang Pemanas No.16



Gambar 11. Harga-harga koefisien perpindahan panas sepanjang kanal uji yang diperoleh dari perhitungan COBRA

Harga-harga koefisien perpindahan panas tersebut dihitung untuk empat titik perhitungan dan masing-masing pada daya 1, 2 dan 3,2 MW. Terlihat bahwa harga koefisien perpindahan panas bervariasi antara 18 hingga 28 kW/m²K.

Pembahasan, analisis dan interpretasi

Harga koefisien perpindahan panas

Koefisien perpindahan panas pada titik tertentu (lokal) dihitung dari persamaan umum 11:

$$q/A = h (T_0 - T_1) \quad (11)$$

q/A = panas yang dibangkitkan persatuan luas;
 T_0 = temperatur permukaan luar batang pemanas;
 T_1 = temperatur air pendingin; h = koefisien perpindahan panas.

Untuk menghitung temperatur permukaan luar batang pemanas dipakai persamaan (9) dengan temperatur dalam (T_i) diperoleh dari hasil pengukuran.

Sedangkan temperatur air pendingin diperoleh dengan interpolasi/ekstrapolasi linier dari data hasil pengukuran. Asumsi yang diambil adalah homogenitas temperatur air pendingin pada arah radial satu titik pengukuran tertentu. Hal ini mengingat turbulensi aliran dan kecilnya panas yang hilang ke sekeliling.

Perhitungan koefisien perpindahan panas dilakukan untuk empat titik pengukuran dan pada daya 1, 2 dan 3,2 MW. Hasil-hasil yang diperoleh ditampilkan pada Tabel 1. Pada tabel 1 ditampilkan pula harga tahanan termal $R = 1/h$ dan dibandingkan dengan harga tahanan termal yang diperoleh dari perhitungan COBRA.

Terlihat bahwa harga koefisien perpindahan panas yang diperoleh dari hasil pengukuran kurang dari separuh harga yang diperoleh dari perhitungan COBRA. Sebaliknya, tahanan termal pengukuran lebih tinggi dari yang dihitung dengan COBRA.

Kenaikan tahanan termal ini diperkirakan karena adanya lapisan pengotor (kerak) pada permukaan luar batang pemanas. Akan diperlihatkan bahwa lapisan kerak yang tipis pun akan dapat menurunkan koefisien perpindahan panas secara berarti.

Terhadap posisi ketinggian, pada Tabel 1, terlihat bahwa koefisien perpindahan panas cenderung menurun pada posisi semakin tinggi atau dengan kata lain lapisan kerak semakin menebal. Kecenderungan ini secara kualitatif bisa diterangkan sebagai berikut: lapisan kerak yang selain bersumber dari pengendapan produk-produk korosi yang terbawa oleh air juga dimungkinkan bersumber dari terkorosinya permukaan batang pemanas itu sendiri sehingga terbentuk lapisan oksida yang pada umumnya bersifat isolatif (konduktivitas termal rendah). Korosi tersebut akan lebih meningkat pada temperatur dan perbedaan potensial antara logam dan air yang semakin tinggi. Pada batang pemanas, semakin tinggi posisi, temperatur dan beda potensialnya memang semakin tinggi sehingga memungkinkan terjadinya kecenderungan tersebut.

Estimasi tebal lapisan kerak

Tahanan termal yang diperoleh dari pengukuran merupakan tahanan termal total [12].

Tabel 1. Perhitungan koefisien perpindahan panas empat titik pengukuran pada daya 1, 2, dan 3,2 MW.

Posisi (mm)	1 MW					2 MW					3,2 MW				
	Tb	ht	Rt	hc	Re	Tb	ht	Rt	hc	Re	Tb	ht	Rt	hc	Re
2938	126,8	10,5	0,095	19,05	0,052	208,4	11,6	0,086	23,13	0,043	296,2	12,8	0,078	26,48	0,038
3938	128,0	12,3	0,081	19,7	0,051	219,7	12,4	0,081	23,90	0,042	306,2	15,7	0,064	27,06	0,037
4438	144,5	7,2	0,139	19,98	0,050	230,0	9,5	0,105	24,18	0,041	336,9	11,4	0,088	27,44	0,036
4878	148,5	6,9	0,145	20,11	0,049	248,0	9,1	0,110	24,52	0,041	352,9	10,5	0,095	27,42	0,036

Keterangan:

Tb dalam °C; ht dan hc dalam kW/m²; Rt dan Re dalam m²K/kW

$$R_{tot} = R_{kerak} + R_{konveksi} \quad (12)$$

R adalah tahanan termal yang dihitung dengan COBRA.

Ambil contoh harga tahanan termal pada titik pengukuran tertinggi pada daya 3,2 MW, R = 0,095 m²K/kW dan R = 0,037 m²K/kW. Sehingga kita peroleh harga R = 0,058 m²K/kW.

Apabila lapisan kerak tersebut kita dekati seperti pelat, maka tahanan termal kerak adalah (13): R = e/k.

e adalah ketebalan kerak dan k konduktivitas termal kerak.

Jika kita ambil harga konduktivitas termal kerak sebesar 2 W/mK (orde besaran kerak oksida), maka kita peroleh ketebalan kerak e = 0,119 mm.

Tampak bahwa hanya dengan ketebalan kerak sebesar 0,119 mm, koefisien perpindahan

panas turun hingga setengah harga koefisien perpindahan panas apabila batang pemanas tersebut bersih (tanpa kerak).

KESIMPULAN

Dari perbandingan hasil pengukuran dan perhitungan dapat diketahui adanya lapisan pengotor (kerak) pada permukaan luar batang pemanas Untai Uji Termohidrolika Reaktor. Lapisan pengotor tersebut walaupun tipis dapat menurunkan secara berarti harga koefisien perpindahan panas. Akibatnya, temperatur batang pemanas pada pengoperasian Untai Uji menjadi lebih tinggi.

Terlihat pula kecenderungan semakin menebalnya kerak pada posisi semakin tinggi yang dapat dikaitkan dengan naiknya temperatur dan beda potensial antara logam dan air.

DAFTAR PUSTAKA

1. Antariksawan, A.R., dkk. Fasilitas Uji Termohidrolika Reaktor (General Loop). PPTKR-BATAN (November 1993).
2. Stewart, C.W., et al. COBRA IV-I, The Model and The Method, BNWL 2214, Battelle Pacific Northwest Laboratories, (July 1977).
3. Holman, J.P. (alih bahasa Jasjfi E.), Perpindahan Kalor, edisi 6, Penerbit Erlangga, (1988).
4. Scully, J.C., The Fundamentals of Corrosion, Pergamon Press, 3th edition, (1990).
5. Uhlig, H.H. and Revie, R.W., Corrosion and Corrosion Control, An Introduction to Corrosion Science and Engineering, 3th edition, (1991).

DISKUSI

Suhandar:

Apakah ada asumsi-asumsi yang dipakai dalam perhitungan sehubungan dengan adanya aliran lateral karena gradien tekanan, suhu dan pengaruh molekuler antara sub kanal yang berdekatan.

A.R. Antariksawan:

Paket program COBRA IV telah memperhitungkan adanya transfer massa dan energi secara lateral (antar sub-buluh).

Efrison:

1. Berapa frekuensi pengukuran temperatur untuk satu data?
2. Apakah termokopel sudah dikalibrasi untuk bentangan temperatur yang lebar?
3. Kalau belum, kenapa hanya kerak saja yang dianggap sebagai penyebab temperatur pemanas besar, mungkin saja pembacaan termokopel.

A.R. Antariksawan:

1. Pada pengukuran di lapangan, suhu dapat diukur beberapa kali, yang kita ambil adalah suhu pada saat kondisi sudah *steady*.
2. Pada saat sebelum pemasangan, semua termokopel sudah dikalibrasi, akan tetapi setelah terpasang hingga sekarang belum pernah sebab ada kendala teknis dimana kami tidak dapat melepas TC tersebut dari dalam batang pemanas. Melihat unjuk kerja dari TC tersebut selama operasi kami yakin akan penunjukannya, artinya masih dapat dipercaya (pada batas ketelitian TC, sekitar 12).

B. Soekodijat:

Air yang dipakai apakah air yang murni?

A.R. Antariksawan:

Betul, air tersebut kami peroleh dari Demin Water Plant yang kita miliki.

Widji Edioloeigito:

Apa sudah diselidiki sifat-sifat kimia dari kerak?. Apa terlalu banyak zat kapur?.

A.R. Antariksawan:

Belum. Hal itu karena kita masih belum mampu untuk membongkar Kanal Uji.

M. Yusan Naim:

Apakah dasar yang digunakan sehingga Saudara dapat memastikan bahwa dengan kerak 100 μm dapat mengurangi panas sampai 50%?

A.R. Antariksawan:

Angka tersebut kami dapat dengan mengasumsikan bahwa kerak tersebut adalah suatu oksida yang mempunyai konduktivitas termal $2 \text{ W/m}^2\text{k}$.