

STUDI EKSPERIMENTAL PROSES QUENCHING BERKAS PIPA PANAS SEBAGAI PEMODELAN PROSES REFLOODING TERAS REAKTOR NUKLIR

Muhadi Ayub Wasitho

*Mahasiswa Program Pasca Sarjana, Program Studi Rekayasa Energi Nuklir,
ITB, Bandung 40132*

Aryadi Suwono

*Laboratorium Termodinamika, Pusat Antar Universitas Ilmu Rekayasa, ITB,
Bandung 40132*

ABSTRAK

Untuk memahami karakteristik termohidraulika proses pembasahan kembali (reflooding) saat teras reaktor nuklir mengalami kekeringan, telah dilakukan studi eksperimental terhadap sebuah model teras berbentuk berkas pipa silindrik. Model reaktor terdiri dari tabung transparan terbuat dari kuarsa berdiameter 50 mm sebagai cangkang dan berkas pipa terbuat dari 4 buah pipa zirkaloy-4 dengan diameter 10,7 mm yang didalamnya dilengkapi dengan pemanas listrik. Berkas pipa merupakan susunan sebaris dengan jarak antar sumbu sama yaitu 14,2 mm dan pipa yang dipakai adalah yang lazim berfungsi sebagai selongsong bahan bakar nuklir. Proses quenching dilakukan dengan mengalirkan air pendingin di dalam cangkang dari arah bawah. Pengamatan penurunan suhu berkas pipa dan kenaikan suhu air untuk berbagai kecepatan pembasahan, suhu awal berkas pipa dan air pendingin telah dilakukan selain pengamatan secara visual dari gejala perpindahan panas dan aliran saat quenching yang terjadi. Kisaran parameter suhu awal berkas pipa dan kecepatan linier pembasahan masing-masing adalah 100 - 500 °C dan 4 - 20 cm/s.

ABSTRACT

To simulate the thermohydraulic characteristics of reflooding process of a nuclear core reactor during lost of cooling accident, an experimental study using a reduced model was carried-out. The core reactor model consists of a 50 mm tubular transparent shell made of quartz and a bundle of 4 zircaloy-4 pipes of equal diameter 10.7 mm which are equipped with electrical heaters in the inside. The configuration of pipe bundle is in-line with the distance between pipe axis is 14.2 mm. The pipes are identic to those usually used as nuclear reactor fuel claddings. The quenching process was done by flooding the pipe bundle from the bottom. The observation temperature drop of the pipes surface and temperature rise of cooling water for various wetting velocity, initial pipe temperature and cooling water were recorded and analyzed. The quenching phenomenon was also observed visually. The initial pipe temperature and wetting velocity range are 100 - 500 °C and 4 - 20 cm/s, respectively.

KEYWORDS : QUENCHING, REFLOODING, CLADDING, REWETTING, REAKTOR

1. PENDAHULUAN

Untuk menjamin tingkat keamanan, operasi, sebuah PLTN lazimnya menerapkan konsep keamanan yang andal. Untuk tujuan ini, berbagai postulasi yang akan menyebabkan ketidak-amanan mulai dari tingkat operasi yang abnormal, pencegahan terjadinya kecelakaan hingga penanggulangan akibat kecelakaan telah mulai diujikan pada tingkat perancangannya. Konsep keamanan dengan melengkapi pencegahan pelepasan radioaktivitas ke lingkungan pada berbagai tingkatan (defence in depth), kungkungan materi fisi secara fisik yang berlapis (multiple barrier) dan pengendalian keamanan alami dari teras (inherent safety), merupakan persyaratan baku bagi sebuah PLTN yang modern. Pengkajian probabilitas keamanan (Probabilistic Safety Assesment, PSA) dan pengelolaan kecelakaan (Accident Management, AM) yang memberikan gambaran jenis kecelakaan pada PLTN, kemungkinannya serta cara mengatasinya perlu diidentifikasi dari sejak konsep awal. Teras reaktor yang mengalami kekeringan akibat kebocoran

air pendingin kemudian dialiri air kembali oleh sistem pengamanan, merupakan salah satu kejadian yang dipostulasikan dalam sistem kamanan sebuah reaktor berpendingin air (PWR, BWR, PHWR). Integritas teras dan ketahanan selongsong bahan bakar merupakan sasaran utama yang diamankan dalam sistem tersebut. Dalam kaitannya dengan proses tersebut, tegangan termal dan perubahan struktur dari teras dan selongsong merupakan hal yang penting untuk dikaji. Akan tetapi karena kedua aspek tersebut sangat erat kaitannya dengan proses termal yang terjadi, maka pemahaman aspek termohidraulikanya menjadi sangat penting. Usaha pemahaman secara rinci dari gejala yang terlibat dalam proses tersebut memang telah dirintis oleh beberapa peneliti[1], akan tetapi dilandasi oleh ketersediaan informasi untuk masalah tersebut yang masih sangat terbatas, maka dalam tulisan ini akan diketengahkan hasil studi eksperimental proses quenching terhadap berkas pipa model reaktor dengan pengaliran dari bawah (bottom reflooding). Untuk pendinginan mendadak dengan semburan air, Bukur dan Isbin[2] telah melakukan studi numerik yang diterapkan

pada kasus model teras reaktor tertentu. Di lain pihak studi kasus pendinginan dengan cara menjatuhkan lapisan cairan, (falling liquid film), yang merupakan landasan dari proses pendinginan dengan pengaliran dari atas (top reflooding), telah diketengahkan oleh Sun[3] dalam kajiannya untuk kasus permukaan tunggal vertikal. Sejauh ini hanya Huang[4] yang mengetengahkan hasil studi eksperimental dan inipun terbatas pada pipa tunggal terbuat dari baja, dan hanya Ghiaasian[5] dan Dhir[6] yang mengaitkan gejala tersebut secara langsung dengan proses yang berlangsung pada teras reaktor.

2. PERANGKAT DAN PROSEDUR UJI

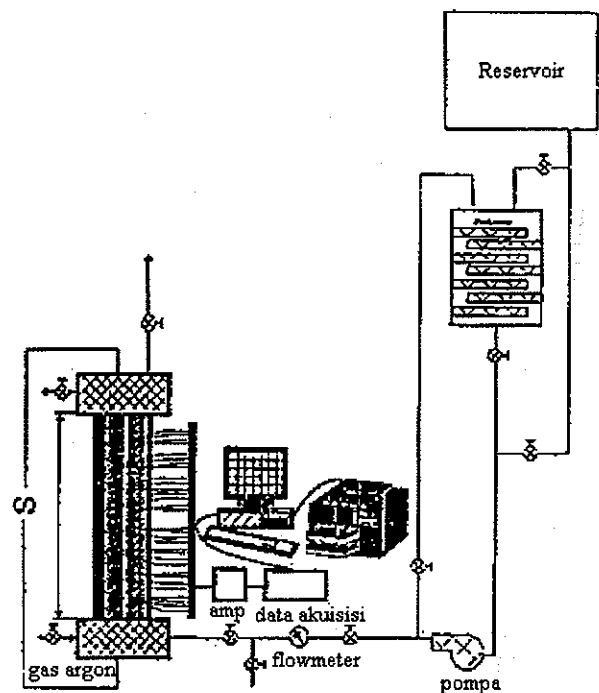
Perangkat uji

Perangkat Uji untuk studi proses quenching model reaktor ditunjukkan secara skematik dalam Gambar 1, yang secara garis besar terdiri dari 4 bagian utama yaitu seksi uji, daur air pendingin, pemanas awal, dan sistem pengukuran. Seksi uji berbentuk cangkang dan berkas pipa, di mana cangkang terbuat dari tabung kuarsa transparan berdiameter dalam 50 mm sedangkan berkas pipa terbuat dari 4 buah pipa zirkaloy-4 berdiameter luar 10,7 mm, tebal 0,86 mm dengan panjang efektif 1,2 m yang disusun sebaris dengan jarak antar sumbu sama yaitu 14,2 mm. Untuk pembangkitan panas pada berkas pipa hingga dapat mencapai suhu maksimum 500 °C, di dalam tiap pipa dipasang elemen pemanas listrik. Pemasangan elemen listrik dilakukan dengan cara melilitkan terlebih dahulu pada tulang yang terbuat dari pipa baja berdiameter 8 mm. Isolator listrik yang bersifat konduktor termal dilapiskan pada elemen pemanas untuk mencegah terjadinya hubungan singkat.

Daur air pendingin yang secara garis besar terdiri dari penampung, pompa, sistem pemipaan dan katup yang dapat menjamin pengaliran air dari bagian bawah cangkang dengan kecepatan pembasahan hingga 20 cm/s. Pengaturan laju pembasahan dilakukan melalui pemasangan beberapa katup dan pipa by-pass pada sistem pemipaan. Pemanas awal dipasang untuk dapat mengatur suhu air pendingin saat masuk seksi uji. Pemanasan air pendingin dilakukan dengan membangkitkan panas dari elemen pemanas listrik yang ditempatkan dalam reservoir, elemen pemanas berjumlah 33 buah dengan daya total maksimum mencapai 3 KW.

Besaran yang diukur dalam pengujian meliputi suhu pipa, suhu celah, dan kecepatan pembasahan, sedang untuk pengukuran suhu digunakan termokopel. Untuk memperoleh korelasi antara suhu pipa pada saat quenching dengan kecepatan pembasahan, pengukuran suhu pada pipa dilakukan pada berbagai ketinggian. Pada ketinggian yang sama didalam celah antar pipa juga ditempatkan termokopel untuk pengukuran air pendingin pada saat melewati ketinggian tersebut. Untuk tujuan ini, dipasang delapan pasang termokopel masing-masing pada ketinggian 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, dan 120 cm. Pencatatan suhu dilakukan dengan menggunakan PCL yang memungkinkan pencacahan tiap saat untuk selang kurun waktu yang cukup singkat. Termokopel yang digunakan adalah tipe K. Kalibrasi termokopel dilakukan dengan menempatkan termokopel yang telah terpasang ke dalam tungku pemanas yang telah dilengkapi dengan pengukur suhu. Karena pada saat

pengujian diperkirakan akan sulit untuk menentukan kecepatan pembasahan akibat kemungkinan berlangsungnya proses pendidihan, maka pengukuran laju pembasahan dilakukan secara tidak langsung melalui pengukuran laju alir air yang masuk seksi uji. Korelasi antara laju pembasahan dan laju alir dikalibrasi sebelum pelaksanaan pengujian.



Gambar 1. Perangkat uji

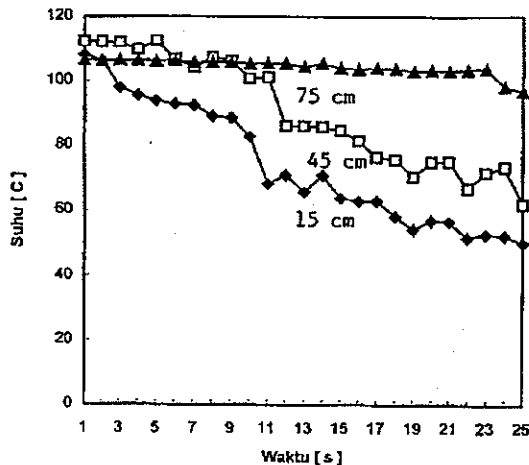
Prosedur Pengujian

Berkas pipa uji dipanaskan dengan menghu-bungkan ke catu listrik hingga suhu pipa mencapai suhu yang telah ditetapkan. Catu listrik pemanas diputus, dan secara serempak air pendinginan dialirkan dengan laju alir sesuai dengan kecepatan pembasahan yang diinginkan. Suhu tiap termokopel direkam dengan komputer. Pengaliran air dihentikan bila ketinggian air hampir memenuhi tabung cangkang. Pengujian diulangi untuk kombinasi parameter lain. Parameter uji untuk studi ini adalah suhu awal pipa, suhu awal air pendingin dan kecepatan pembasahan. Variasi suhu awal pipa adalah 100, 200, 300, 400, dan 500 °C dan suhu awal air pendingin adalah 30, 40, 50, 60, 70, dan 80 °C. Sedangkan variasi kecepatan pembasahan adalah 4,375, 8,75, 17, dan 20 cm/s.

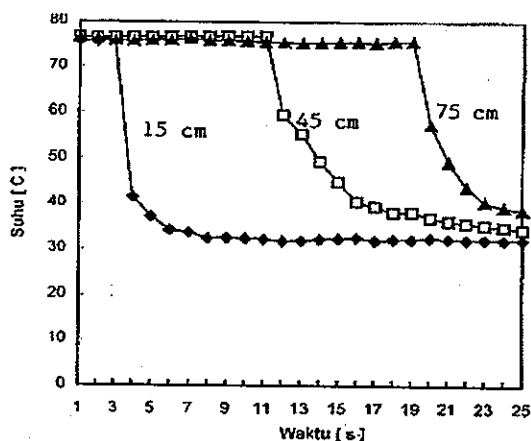
Untuk pengamatan visual, sebuah kamera ditempatkan dengan arah bidikan seksi uji. Semula pengamatan visual ini ditujukan untuk memahami mekanisme pembasahan, terutama untuk suhu pipa tinggi di mana diperkirakan kecepatan pembasahan tidak persis sama dengan kecepatan kenaikan muka air yang disebabkan oleh desakan gelembung akibat penguapan lokal. Akan tetapi, untuk tujuan tersebut nampaknya pemakaian kamera/video kecepatan tinggi mutlak diperlukan agar dapat diperoleh hasil yang lebih akurat. Untuk sementara dalam pengolahan data akan diterapkan anggapan bahwa kecepatan pembasahan sama dengan kecepatan kenaikan muka air pada kondisi dingin.

3. HASIL PENGUJIAN

Dalam Gambar 2 dan 3 ditunjukkan sejarah suhu pipa dan suhu celah untuk suhu awal pipa 100 °C, suhu air pendingin awal masuk seksi uji 30 °C dan kecepatan kenaikan tinggi muka air pendingin 4,375 cm/s untuk berbagai ketinggian tempat pengukuran.



Gambar 2. Sejarah suhu lokal pipa untuk suhu awal pipa 100 °C

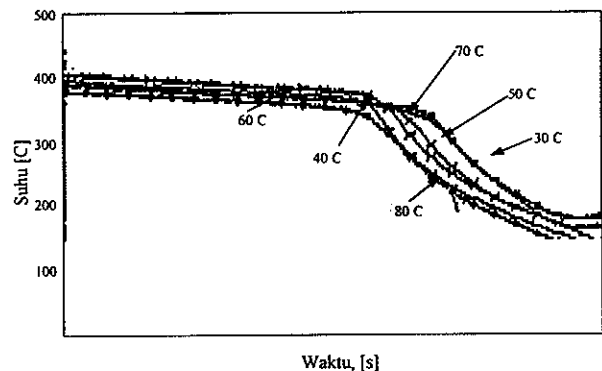


Gambar 3. Sejarah suhu lokal celah antara pipa untuk suhu awal pipa 100 °C

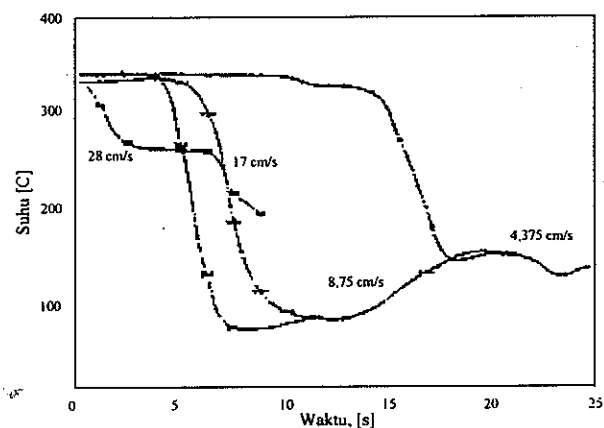
Sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2 dan 3 tersebut, pembasahan lokal selongsong dapat teramati, baik dari mulai terjadinya penurunan suhu lokal pipa maupun suhu celah antar pipa. Tingginya suhu awal celah berkas pipa adalah diakibatkan oleh pemanasan awal pipa terhadap udara pengisi celah. Secara umum, dapat dilihat bahwa suhu lokal pipa turun tidak drastis. Meskipun terlihat terjadi fluktuasi sesaat, kecenderungan penurunan suhu secara asimptotik secara eksponensial nampak dengan jelas. Terjadinya fluktuasi sesaat diperkirakan akibat terbentuknya gelembung air atau gas di dalam air pada lokasi pengukuran suhu yang ditempatkan pada kulit pipa. Sebaliknya, pada sisi celah antar pipa, suhu turun sangat drastis untuk kemudian naik secara monoton.

Untuk suhu awal pipa yang lebih tinggi, sejarah suhu pipa dan celah antar pipa yang diwakili oleh suhu awal pipa 400 °C, ditunjukkan dalam Gambar 4 dan 5. Dapat dilihat bahwa

prakiraan fluktuasi suhu ditimbulkan oleh kemungkinan terbentuknya gelembung lokal tersebut nampak lebih jelas dan terus menerus pada kondisi suhu yang tinggi ini. Tingginya suhu permukaan pipa membuat kemungkinan terjadinya kondisi kering lokal semakin besar dan lebih lama.



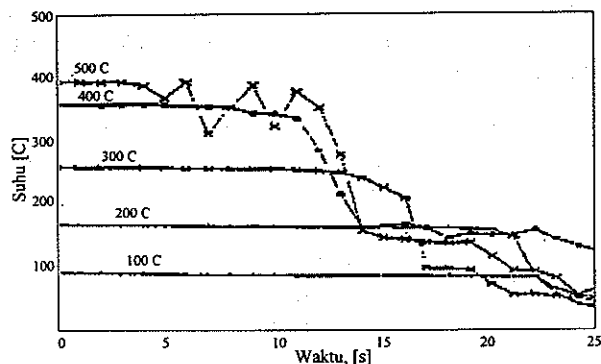
Gambar 4. Sejarah suhu lokal pipa untuk suhu awal pipa 400 °C



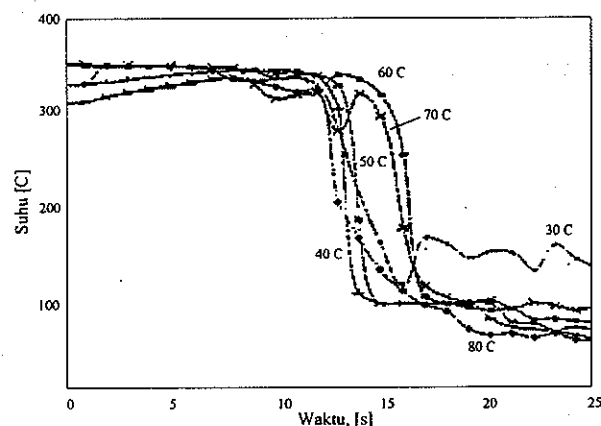
Gambar 5. Sejarah suhu lokal celah antar pipa untuk suhu awal pipa 400 °C

Pada kondisi suhu yang lebih tinggi ini, juga dapat dilihat bahwa suhu lokal pipa juga menurun dengan laju yang cukup tajam sebelum terjadi pembasahan meskipun tidak sedrastis pada kondisi setelah berlangsung proses quenching. Hal ini mungkin diakibatkan selain oleh perpindahan panas radiasi ke sekeliling dan konduksi dalam arah aksial dalam dinding pipa, juga akibat peningkatan perpindahan panas konveksi ke udara di dalam celah yang beralih ke konveksi paksa akibat produksi uap air dari proses quenching di bagian bawah.

Fluktuasi suhu untuk kasus suhu permukaan pipa yang tinggi, nampak lebih jelas bila ditinjau dari suhu air pendingin setelah berlangsung proses quenching, sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 6. Dalam gambar ini ditunjukkan suhu celah antar pipa pada ketinggian 90 cm. Pada kondisi dingin permukaan air akan mencapai titik ini dalam selang waktu sekitar 22 sec. Terjadinya desakan uap yang terjadi pada saat quenching dapat membuat muka air mencapai lebih awal, sebagaimana dapat dilihat untuk kasus suhu awal pipa yang lebih tinggi. Bahkan pada suhu awal pipa 500 °C, lonjakan permukaan air yang diperkirakan akibat letupan uap membuat fluktuasi yang cukup besar di sisi suhu celah, meskipun ditinjau dari kecepatan naiknya muka air seharusnya belum mencapai ketinggian tersebut.



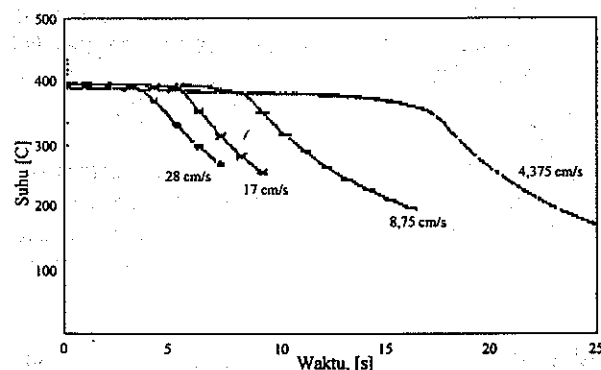
Gambar 6. Sejarah suhu lokal celah antar pipa untuk berbagai suhu awal pipa



Gambar 7. Sejarah suhu lokal pipa untuk berbagai suhu awal air pendingin

Gambar 7 menunjukkan pengaruh suhu awal air pendingin terhadap penurunan suhu lokal pipa, terlihat bahwa untuk kisaran suhu 30 hingga 80 °C pengaruh pada proses quenching untuk kisaran suhu pipa yang diteliti tidak begitu dominan.

Pengaruh kecepatan kenaikan muka air terhadap penurunan suhu lokal ditunjukkan dalam Gambar 8. Dalam gambar ini perbedaan saat mulai terjadinya penurunan suhu hanya diakibatkan oleh perbedaan saat pembasahan. Bila keempat kurva diimpitkan berdasarkan saat terjadinya pembasahan, penurunan suhu lokal pipa mempunyai pola yang hampir sama.



Gambar 8. Sejarah suhu lokal pipa untuk berbagai kecepatan naik muka air

4. ANALISIS DAN KORELASI DATA

Analisis

Ketebalan pipa yang terbuat dari selongsong bahan bakar nuklir adalah relatif tipis dibanding dengan jejari kelengkungannya, sehingga pendekatan anggapan sebagai pelat datar diharapkan cukup memadai.

Bila z adalah sumbu dalam arah memanjang permukaan pipa, y adalah sumbu normal pada permukaan pipa dalam arah ketebalan pipa dari permukaan dan t adalah waktu, dengan mengabaikan perpindahan panas dari permukaan ke media sebelum terbasahi, maka sejarah distribusi suhu pada selongsong, T dapat dinyatakan dengan persamaan,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_s \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

dengan kondisi awal dan kondisi batas,

$$\begin{aligned} t=0 \quad T &= T_0 \\ t>0 \quad 0 < z < ut \quad y=0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{h}{k} (T_w - T_\infty) \\ y=\delta \quad \frac{\partial T}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

di mana α_s , dan k adalah difusivitas dan konduktivitas termal bahan pipa. T_0 , T_w , dan T_∞ masing-masing adalah suhu awal pipa, suhu dinding setelah terbasahi dan suhu air pendingin. Sedangkan u , h , dan δ masing-masing adalah kecepatan pembasahan, koefisien perpindahan panas konveksi ke media pendingin dan ketebalan pipa. Kondisi batas terakhir menyatakan asumsi kondisi adiabatik dari permukaan pipa bagian dalam.

Penyelesaian persamaan diferensial di atas telah dilakukan[6] secara analitik dengan menggunakan pendekatan sistem koordinat yang bergerak mengikuti permukaan air pembasahan. Dengan memilih koordinat z baru tersebut dan memilih arah positif dalam arah datangnya aliran mulai dari permukaan air maka,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} = -u \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

Dalam sistem koordinat baru, Pers. (1) dapat ditulis iv dalam bentuk tunak yaitu,

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{u}{\alpha_s} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

dengan kondisi batas,

$$\begin{aligned} z < 0 \quad T &= T_0 \\ z \geq 0 \quad y=0 \quad \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{h}{k} (T_w - T_\infty) \end{aligned} \quad (5)$$

$$y = \delta \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

Suhu quenching pada permukaan pipa diperoleh dengan memberikan harga $y = z = 0$ pada solusi yang dihasilkan dari persamaan diferensial di atas. Dalam bentuk tak berdimensi, pendekatan untuk $Bi \gg 1$ memberikan,

$$\bar{u} = \frac{2}{\pi} Bi \bar{T} \left[1 - \frac{4Bi}{\pi^2} \bar{T} \right]^{1/2} \quad (6)$$

atau,

$$\frac{\bar{T}}{\bar{u}} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{Bi} \left[1 - \frac{4Bi}{\pi^2} \bar{T} \right]^{1/2} \quad (7)$$

di mana, $T = (T_w - T_\infty)/(T_0 - T_\infty)$ dan $u = u\delta/\alpha_s$, dan Bi adalah bilangan Biot, $h\delta/k$.

Sedangkan untuk $Bi \ll 1$, pemecahan menjadi lebih sederhana karena kasusnya menjadi persoalan satu dimensi, dan dapat ditunjukkan bahwa persamaan (7) menjadi,

$$\frac{\bar{T}}{\bar{u}} = Bi^{1/2} \quad (8)$$

Korelasi Data

Pada kisaran suhu eksperimental, gkonduktivitas selongsong adalah sekitar 20 W/m OK. Sedangkan harga koefisien konveksi proses quenching yang terjadi sulit untuk ditentukan. Akan tetapi untuk tebal pipa 0,86 mm dan harga koefisien konveksi hasil taksiran, maka harga Bi kondisi eksperimen tidak dapat dikategorikan ke dalam kedua kasus ekstrim sebagaimana peruntukan dari persamaan-persamaan (7) dan (8).

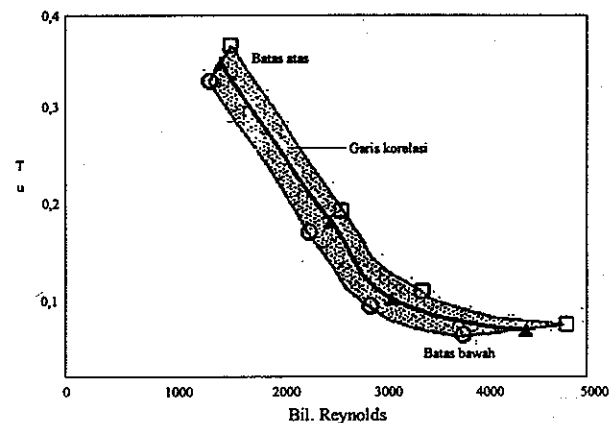
Untuk dimensi dan bahan selongsong yang telah tertentu, dalam penerapan akan lebih menarik untuk membuat korelasi langsung antara suhu quenching awal terhadap geometri dan karakteristik aliran. Untuk tujuan tersebut, karena media pendingin sudah tertentu yaitu air, maka dengan mengacu pada bentuk persamaan-persamaan (7) dan (8) akan diketengahkan di sini persamaan korelasi dalam bentuk,

$$\frac{\bar{T}}{\bar{u}} = f(Re) \quad (9)$$

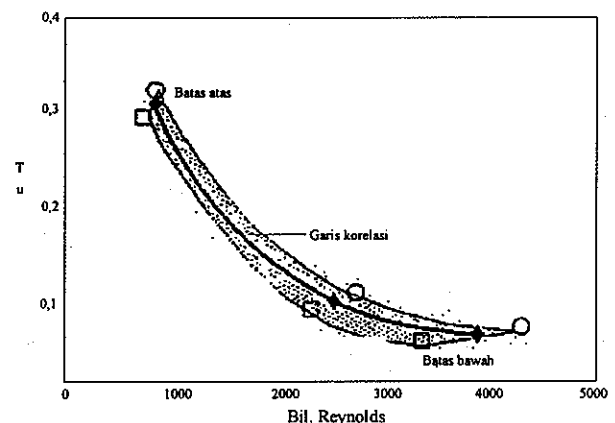
Bilangan Reynolds; Re , di sini didefinisikan sebagai, $D_h u/v$. Di mana D_h dan v masing-masing adalah diameter hidraulik celah berkas pipa dan viskositas kinematik air.

Dalam Gambar 9 dan 10 ditunjukkan hasil ekstraksi data eksperimental masing-masing untuk suhu awal pipa 300 dan 500 °C beserta garis korelasinya. Dapat dilihat dari kedua gambar grafik tersebut bahwa dalam bentuk besaran tak berdimensi T/u menurun dengan peningkatan bilangan Reynolds. Karena koefisien konveksi diharapkan meningkat dengan peningkatan bilangan Reynolds, didasarkan pada kecenderungan

korelasi yang ditunjukkan dalam Gambar 8 dan 9, nampaknya untuk kasus yang dikaji pendekatan satu dimensi atau $Bi \ll 1$ akan kurang tepat.



Gambar 9. Korelasi $T/u = f(Re)$ untuk $T_0 = 300$ °C



Gambar 10. Korelasi $T/u = f(Re)$ untuk $T_0 = 500$ °C

5. KESIMPULAN

Untuk lebih memahami gejala yang berlangsung pada saat proses pembasahan kembali (reflooding) teras reaktor nuklir saat mengalami kehilangan media pendingin, telah dilakukan studi eksperimen terhadap model reaktor yang terbuat dari berkas pipa terbuat dari selongsong bahan bakar nuklir zirkaloy-4. Parameter yang dianggap penting terkait dengan proses tersebut seperti suhu awal pipa, suhu air pendingin dan kecepatan pembasahan ditinjau yaitu dengan melakukan variasi dari parameter tersebut dalam pengujian. Pengamatan visual serta pengukuran distribusi dan sejarah suhu pada permukaan pipa, telah memberikan gambaran yang jelas dari gejala yang terjadi. Untuk kisaran parameter yang dipakai pengaruh suhu air pendingin terlihat tidak menonjol.

Dengan memanfaatkan model matematik dan persamaan yang dihasilkan dari pemecahan persamaan yang dibentuk, telah memberikan gambaran yang baik dari korelasi antara suhu saat awal quenching dan koefisien perpindahan panas konveksi yang terjadi.

Hasil ekstraksi data memberikan bahwa untuk lingkup kasus yang dikaji, koefisien konveksi tersebut tidak dapat hanya dinyatakan sebagai fungsi dari kecepatan pembasahan. Proses pendidihan yang berlangsung nampaknya membuat

pengaruh beda suhu terhadap koefisien konveksi menjadi cukup dominan. Dengan demikian studi yang lebih rinci untuk koefisien konveksi untuk kasus khusus tersebut nampaknya merupakan kunci yang penting dan perlu.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. V.K. Dhir, Quenching studies of a zircaloy rod bundles, J. Heat Mass Transfer, 103, pp.293-299, 1981.
2. D.B. Bukur, and S. Isbin, Numerical solution of the Yamanouchi model for core spray cooling, Nuclear Engineering, 23, pp 195-197, 1975.
3. K.H. Sun, Cooling of a very hot vertical surface by falling liquid film, Trans. ASME, pp 126 131, 1974.
4. X.C. Huang, Quenching experiments with a circular test section of medium thermal capacity under forced convection of water, Int. Journal Heat Mass Transfer, 37, pp. 803 -818, 1994.
5. S.M. Ghiasian, Bottom reflooding of pressurized Water Reactor Part 1: Forced reflooding and core thermal hydraulic, Nuclear Technology, 81, pp 13-26, 1988.
6. Blair, Analitical to a two-dimensional of the rewetting a hot dry rod, Nuclear Engineering, 32, pp1S9-170, 1975.
7. M. A. Wasitho, Studi eksperimental karakteristik proses quenching pada model bundel elemen bakar, Thesis S-2 Rek. Energi Nuklir, ITB, Bandung, 1995.