

## ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PENDIDIHAN PADA EKSPERIMEN REFLOODING MENGGUNAKAN BAGIAN UJI QUEEN

Mulya Juarsa, A.R. Antariksawan, Joko. P.W., Edy S., Ismu H., Kiswanta  
Pusbang Teknologi Keselamatan Nuklir BATAN

### ABSTRAK

ANALISIS PERPINDAHAN PANAS PENDIDIHAN PADA EKSPERIMEN REFLOODING MENGGUNAKAN BAGIAN UJI QUEEN. Menyusul terjadinya kecelakaan kehilangan air pendingin pada reaktor jenis air tekan, air pendingin darurat diinjeksikan ke dalam teras yang disebut tahap reflooding. Pada saat itu, terjadi fenomena rewetting yang merupakan fenomena fisis kompleks melibatkan fluida multi fasa. Kecepatan rewetting menentukan keberhasilan pendinginan teras darurat, sehingga sangat penting dipelajari. Bagian uji QUEEN dibuat untuk mempelajari fenomena tersebut, termasuk memahami proses perpindahan panas pendidihan selama reflooding untuk konfigurasi bundel bahan bakar. Dalam makalah ini hasil eksperimen dengan bagian uji QUEEN untuk batang pemans tunggal telah dipelajari dan dianalisis, khususnya perpindahan panas pendidihan. Kecepatan rewetting juga dihitung untuk melihat efek perpindahan panas. Dari evaluasi hasil eksperimen dengan menghitung perpindahan panasnya, diperoleh. Kurva pendidihan dan koefisien perpindahan panasnya telah ditentukan dari hasil perhitungan perpindahan panasnya menggunakan data evolusi temperatur. Fluks kalor maksimum adalah 141,81 kW/m<sup>2</sup> pada temperatur 175 °C.

**Kata kunci:** perpindahan panas, pendidihan, reflooding, eksperimen

### ABSTRACT

ANALYSIS OF BOILING HEAT TRANSFER IN THE REFLOODING EXPERIMENT USING QUEEN TEST SECTION. Following a loss of coolant accident in PWR type reactor, emergency core coolant is injected to cooling the core; this stage is called reflooding. During the reflooding, fuel occurs rewetting that represents complex phenomena involving multiphase fluid. The rewetting velocity determines the effectiveness of the emergency core cooling, then it is important to study that phenomena. QUEEN test section is constructed to study reflooding phenomena and to understand boiling heat transfer process in order to arrange the fuel bundle configuration. In this paper, the experimental results using QUEEN test section with single rod has been studying and analyzing, especially on boiling heat transfer. Rewetting velocity also calculated to measure heat transfer effect. Boiling curve and heat transfer coefficient was defined by calculating heat transfer using temperature evolution data. Critical Heat Fluks (CHF) is 141,81 kW/m<sup>2</sup> at 175°C.

**Key words:** heat transfer, boiling, reflooding, experiment

### PENDAHULUAN

Sebagai dasar untuk merancang sistem keselamatan suatu reaktor daya nuklir jenis air tekan (*Pressurized Water Reactor*, PWR) dipostulasikan kecelakaan kehilangan air pendingin (*Loss-of-Coolant Accident*, LOCA). Pada kejadian kehilangan air pendingin, temperatur bahan bakar dapat meningkat pesat akibat berkurangnya kemampuan untuk memindahkan panas peluruhan dan panas yang tertimbun sebelum kejadian berlangsung di dalam teras reaktor. Di samping itu, karena pada kejadian kehilangan air pendingin, tekanan akan menurun, sebagian air berubah

menjadi uap sehingga ada kemungkinan teras menjadi tak tergenangi oleh pendingin. Untuk mengkompensasi kehilangan air pendingin dan memulihkan pengambilan panas tersebut, air diinjeksikan ke dalam reaktor. Sistem yang disiapkan untuk itu disebut sistem pendinginan teras darurat (*Emergency Core Cooling System*, ECCS).

Pada saat injeksi air dari ECCS tersebut memasuki bejana reaktor, teras tergenangi kembali dan memulihkan proses pemindahan panas dari bahan bakar. Tahap penggenangan ini dinamakan *reflooding*. Mengingat pada saat air menggenangi teras temperatur permukaan kelongsong bahan bakar

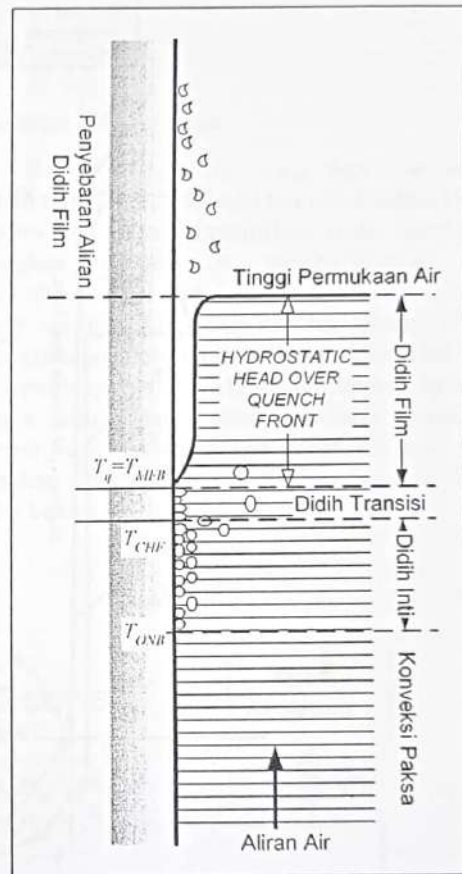


jauh di atas temperatur saturasi air dari ECCS, maka pendinginan teras tidak dapat secara mudah berlangsung; sebagian air yang menyentuh permukaan kelongsong akan mendidih dan berubah menjadi uap secara cepat. Tetapi, karena temperatur permukaan bahan bakar tersebut akan menurun, air yang pada awalnya tidak dapat membasahi permukaan kelongsong akan bersentuhan dengan permukaan itu dan pendinginan dapat terjadi secara lebih baik. Peristiwa pembersihan permukaan kelongsong itu dikenal sebagai *rewetting*. Proses pembersihan tersebut menentukan cepat lambatnya penurunan temperatur bahan bakar, sehingga merupakan proses yang penting sekali untuk dipelajari secara mendalam. Gejala fisis yang berlangsung selama proses *reflooding* (secara khusus *rewetting*) merupakan proses yang kompleks karena melibatkan air dalam bentuk cair, uap dan dalam bentuk butiran (*droplets*) maupun massa kontinu. Selain itu, berbagai parameter diduga mempengaruhi kecepatan *rewetting* tersebut, seperti misalnya: temperatur permukaan kelongsong bahan bakar, fluks panas, temperatur air ECCS atau pun laju alir air.

Penelitian tentang berbagai hal yang terkait dengan gejala yang berlangsung selama proses *reflooding* telah dilakukan sejak hampir dua dekade yang lalu. Namun demikian, karena kompleksitas gejala yang ada, penelitian masih terus berlanjut, seperti misalnya yang dilakukan oleh L. Sepold.<sup>(1)</sup> Dalam konteks untuk mempelajari gejala *rewetting* selama proses *reflooding* tersebut, di Bidang Analisis Risiko dan Mitigasi Kecelakaan (BARMiK), P2TKN – BATAN, telah dibuat program kegiatan eksperimental dengan membuat Bagian Uji QUEEN (*Quenching Experiment*). Program kegiatan tersebut dimaksudkan untuk memahami gejala fisis selama proses *reflooding*, mengevaluasi korelasi yang ada, menambah data eksperimen *reflooding* dan memperoleh korelasi perpindahan panas yang baru. M. Juarsa dkk.<sup>(2)</sup> telah memberikan hasil eksperimen yang menekankan pada analisis fenomena yang berlangsung. Kemudian, R. Ruliandini<sup>(3)</sup> telah mencoba mengaplikasikan korelasi yang ada pada eksperimen dengan bagian uji QUEEN. Dari kedua studi tersebut, pemahaman mengenai perpindahan panas pendidihan selama peristiwa pendinginan pada bagian uji QUEEN belum dilakukan. Makalah ini akan mempelajari karakteristik perpindahan panas pendidihan yang berlangsung selama *reflooding* sebagai studi awal untuk memahami fenomena perpindahan panas pendidihan. Hasil studi dalam makalah ini diharapkan dapat menjadi langkah awal untuk studi selanjutnya, yaitu memperoleh model perpindahan panas selama *reflooding* pada konfigurasi bundel bahan bakar PWR.

## TEORI

*Quenching* adalah proses pendinginan objek yang panas secara tiba-tiba dengan cara ditenggelamkan ke dalam cairan seperti air atau minyak. Fenomena *quenching* muncul dalam berbagai macam aplikasi industri. Selain dalam bidang industri, proses *quenching* juga dijumpai di teras reaktor nuklir setelah mengalami *LOCA*, yaitu saat *reflooding* oleh ECCS. Fenomenanya sendiri lebih sering disebut *rewetting*. Proses *reflooding* dideskripsikan pada Gambar 1.



digambar ulang oleh: Mulya Juarsa

Gambar 1. Proses *reflooding* dari bawah.<sup>(4)</sup>

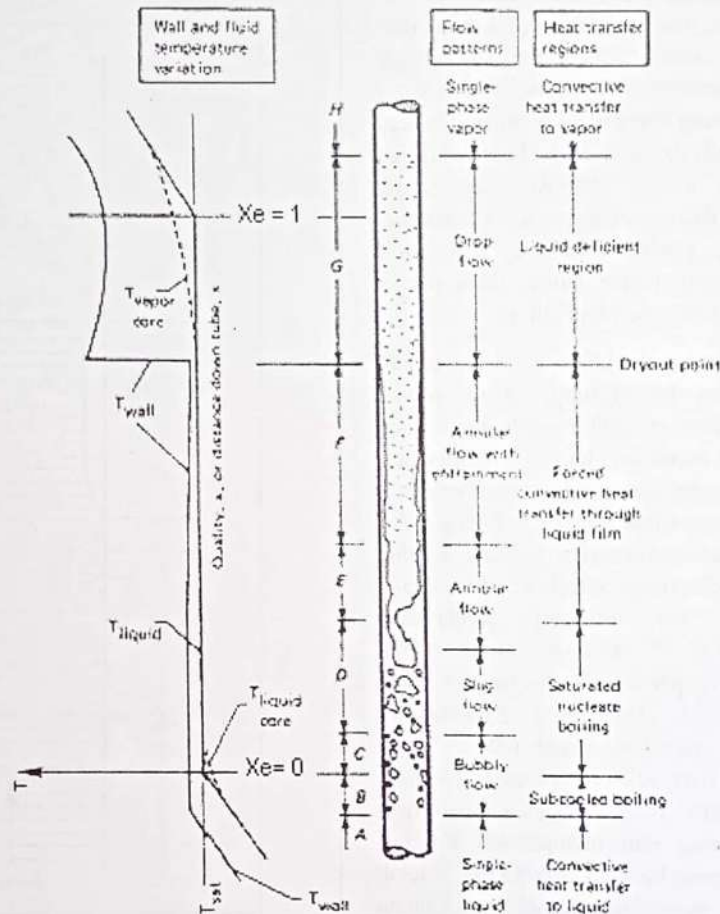
Gambar 1 menunjukkan aliran dan rejim perpindahan panas yang diamati selama *rewetting*. Arah aliran pada Gambar 1 adalah menuju ke atas secara konveksi paksa. Rejim pendidihan dari bagian bawah tersusun sebagai berikut: didih inti, didih transisi dan didih film.  $T_q = T_{MFB}$  merupakan temperatur batas basah (*rewetting front*) atau temperatur didih film minimum (*minimum film boiling, mfb*), yang memisahkan rejim didih transisi dan rejim didih film.



Berbeda dengan pendidihan kolam (*pool boiling*) rejim perpindahan panas pada pendidihan aliran (*flow boiling*) ditentukan oleh berbagai variabel: laju alir massa, jenis fluida, geometri sistem, fluks panas dan distribusi aliran.<sup>(5)</sup>

Gambar 2 memperlihatkan satu contoh rejim perpindahan panas dan aliran. Contoh tersebut untuk aliran mengalir ke atas secara konveksi paksa dalam tabung dan mengalami pemanasan serba sama pada

arah aksial. Fluida masuk ke dalam tabung pada kondisi *sub-cooled* dan sepanjang tabung temperturnya akan naik karena fluks panas yang diterima. Pada ketinggian tertentu, fluida yang berada dekat dinding akan mencapai temperatur saturasi dan gelembung uap mulai terbentuk. Akan tetapi karena temperatur *bulk* masih *sub-cooled*, gelembung tersebut segera kolaps (terkondensasi). Daerah ini disebut pendidihan *sub-cooled* (*sub-cooled boiling*).



Gambar 2. Rejim perpindahan panas pada aliran<sup>(6)</sup>

Ketika temperatur *bulk* mencapai temperatur saturasi, pembentukan gelembung semakin nyata sehingga disebut rejim pendidihan inti saturasi (*saturation nucleate boiling*). Gelembung-gelembung uap pada saat tertentu akan bergabung menjadi kantung-kantung uap. Aliran fluida pada daerah tersebut dinamakan *slug* atau *churn flow*. Kantung-kantung uap tersebut akan bergabung sehingga di tengah saluran terdapat daerah uap yang disebut *vapor core*. Di dalam daerah tersebut,

tersebar butiran-butiran fluida cair yang berasal dari akibat *entrainment* lapisan film fluida. Sepanjang daerah tersebut temperatur dinding praktis konstan.

Semakin ke atas, film fluida makin tipis dan pada titik tertentu, film fluida tersebut hilang. Kondisi ini disebut *dry-out*. Perpindahan panas pada daerah ini sangat buruk sehingga temperatur dinding mendadak naik. Setelah titik *dry-out*, butiran-butiran zat cair yang masih ada dapat membentur dinding

dan mengambil panas sehingga temperatur dinding menurun sedikit. Tetapi setelah butiran tersebut teruapkan, temperatur dinding kembali naik.

### Persamaan Yang Digunakan

Kecepatan rewetting (*rewetting velocity*) ditentukan berdasarkan jarak posisi 2 titik pengukuran temperatur yang dibagi oleh selisih waktu antara saat rewetting pada 2 titik pengukuran. Sehingga, persamaannya adalah :

$$u = \frac{L_{\text{Rew}}}{\Delta t} \quad (1)$$

dengan:

$L_{\text{Rew}}$  = jarak 2 titik pengukuran termokopel (mm).

Untuk melakukan analisis perpindahan panas pendidihan selama proses *reflooding* ini, penulis menggunakan korelasi untuk fluks kalor berdasarkan paper *J.J. Carbajo* dalam studinya mengenai temperatur rewetting<sup>(4)</sup> telah mengkaji fluks kalor pada kelongsong bahan bakar tipe PWR dan juga penelitian mengenai quenching akibat konveksi paksa air yang dilakukan oleh *X.C. Huang et al.*<sup>(7)</sup> Korelasi yang digunakan adalah :

$$\frac{dT}{dt} \rho c_p V = q A \quad (2)$$

dengan :

$q$  = fluks kalor ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$A$  = total area pemanas ( $\text{m}^2$ )

$V$  = volume total kelongsong pada daerah panas ( $\text{m}^3$ )

$\rho$  = massa jenis kelongsong ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

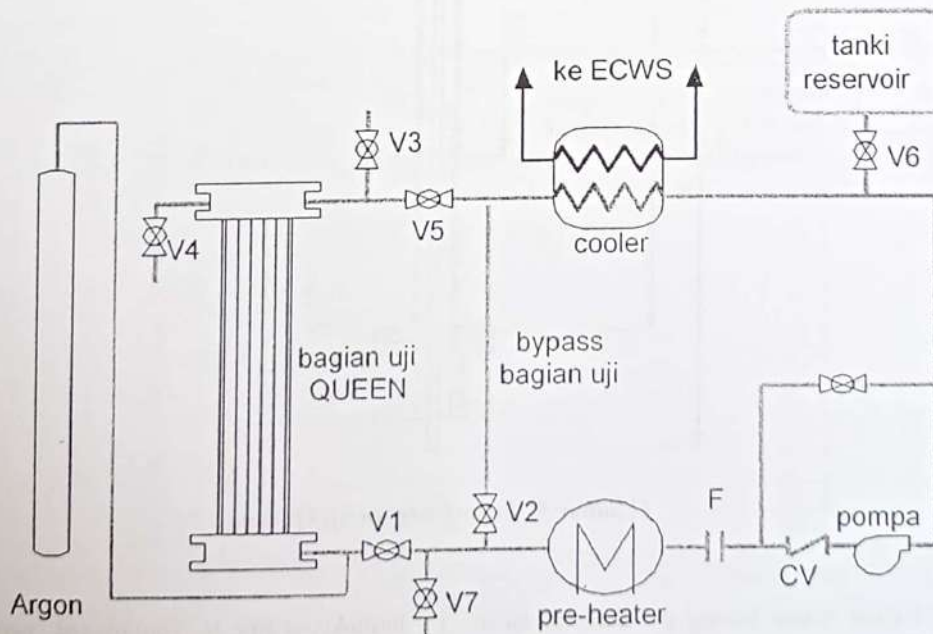
$c_p$  = kapasitas panas spesifik dari kelongsong ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

Untuk gradien temperatur,  $dT/dt$ , diperoleh dari hasil pengukuran eksperimen.

## TATA KERJA

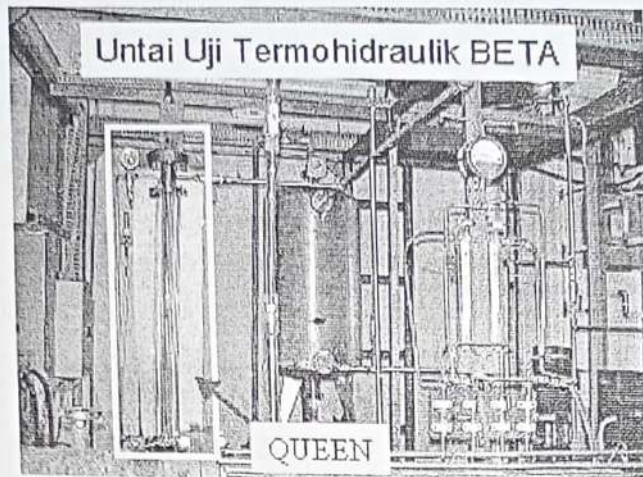
### Peralatan Eksperimen

Bagian uji *QUEEN* yang digunakan dalam studi ini terpasang pada untai termohidraulika *BETA*. Diagram alir sistem ditunjukkan pada Gambar 3. Sedangkan Gambar 4 memperlihatkan foto keseluruhan dari untai termohidraulika *BETA*. Bagian uji *QUEEN* tersusun atas tabung kuarsa dengan ukuran diameter luar 50 mm dan tebal 2,15 mm sepanjang 935 mm. Di dalam tabung tersebut, terdapat satu batang pemanas listrik berukuran diameter luar 9,55 mm dan tebal 1,2 mm yang diletakkan ditengah-tengah daerah aliran di dalam tabung kuarsa.

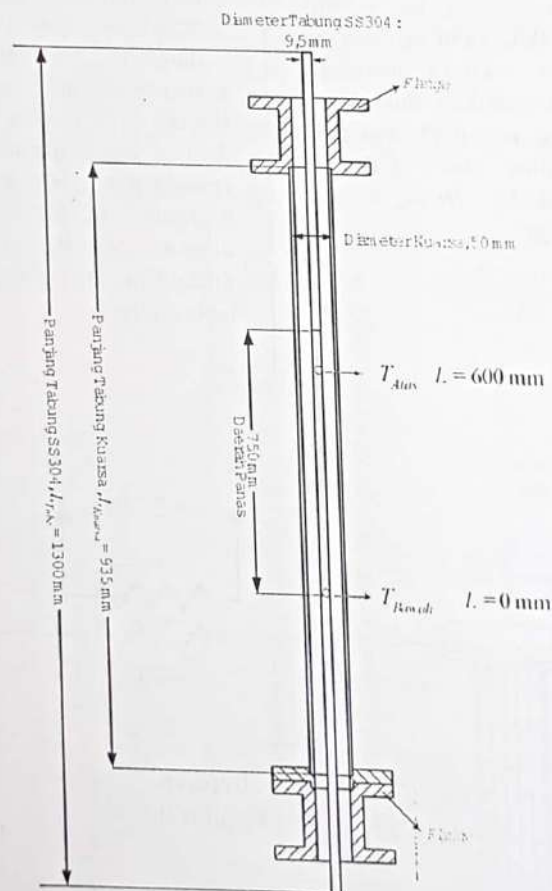


Gambar 3. Diagram alir untai uji BETA.





Gambar 4. Foto untai uji BETA.



Gambar 5. Skema bagian uji Queen.

Di bagian dalam batang pemanas, terdapat lilitan elemen pemanas yang membentuk daerah panas (*heated zone*) sepanjang 750 mm. Untuk mengukur temperatur dinding permukaan luar batang pemanas, pada batang pemanas diletakkan 2

termokopel tipe K. Termokopel pertama dipasang pada di titik 0 mm daerah panas dan termokopel kedua di titik 600 mm di daerah panas. Skema bagian uji Queen diperlihatkan pada Gambar 5.

### Prosedur Eksperimen

Studi eksperimental untuk menganalisa perpindahan panas yang terjadi pada berbagai rejim pendidihan selama proses *quenching* dan pengukuran kecepatan batas basah kali ini terutama didasarkan pada hasil observasi visual dan pengukuran temperatur permukaan dinding batang pemanas yang direkam ke dalam komputer menggunakan DAS (Sistem akuisisi data). Laju alir air yang masuk ke bagian uji QUEEN ditetapkan berdasarkan frekuensi putaran pompa, dalam eksperimen ini ditetapkan sebesar 10 Hz. Temperatur air masukannya adalah 30 °C. Sedangkan, tekanan sistem adalah 1 bar. Sebelum air diinjeksikan, temperatur dinding batang pemanas pada titik nol daerah panas ditetapkan sekitar 500 °C. Temperatur ini diperhitungkan di atas  $T_{ujih}$ . Sebagai pembanding, pada awalnya dilakukan pengisian air ke dalam bagian uji QUEEN tanpa memanaskan batang pemanas dengan laju alir yang sama dengan yang akan digunakan pada proses *rewetting*.

Eksperimen dimulai dengan menaikkan tegangan listrik batang pemanas secara bertahap hingga temperatur titik nol daerah panas yang dikehendaki tercapai. Selama kenaikan temperatur batang pemanas, gas Argon dialirkan ke dalam tabung kuarsa untuk melindungi dinding batang pemanas dari perubahan warna. Setelah temperatur yang dikehendaki tercapai, air mulai diinjeksikan ke dalam bagian uji QUEEN. Sistem akuisisi temperatur dan video kamera dihidupkan. Ketika air

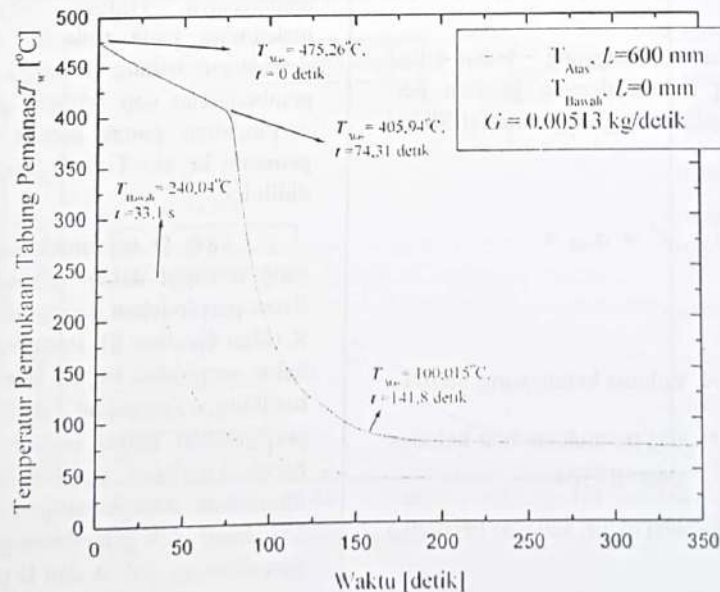
mulai membanjiri dari bagian bawah, catu daya ke batang pemanas diputus. Kejadian selama proses *reflooding* direkam oleh video kamera digital dan evolusi temperatur direkam dalam sistem akuisisi data terkomputerisasi. Eksperimen dihentikan saat seluruh batang pemanas terendam air.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Perhitungan Perpindahan Panas Pendidihan

Peristiwa pendidihan yang terjadi selama proses *reflooding* pada eksperimen ini telah diamati secara visual melalui kamera video. Pembagian daerah pendidihan (rejim pendidihan) telah diperlihatkan selama eksperimen berlangsung, dimana fenomena pendidihan ini telah di bahas pada.<sup>(2,3)</sup> Untuk menghitung perpindahan panas yang terjadi antara batang pemanas dan air serta film uap, terlebih dahulu menentukan titik-titik dimana pemisahan rejim pendidihan terjadi. Dari kurva evolusi temperatur selama eksperimen *reflooding* bisa diidentifikasi rejim didih film (termasuk perpindahan panas radiasi), rejim transisi dan rejim didih inti setelah dilakukan perubahan ke dalam kurva pendidihan melalui perhitungan perpindahan panas yang akan diuraikan.

Hasil pengukuran perubahan temperatur dinding pemanas selama proses *reflooding* ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Evolusi temperatur selama proses *reflooding* untuk 1 batang pemanas.



Dalam Gambar 6, khususnya untuk pembacaan temperatur pada bagian atas (600 mm), penurunan temperatur terjadi secara radiasi kira-kira dari 0 detik hingga 74 detik dimungkinkan juga penurunan temperatur selama 74 detik pertama melibatkan rejim didih film, selain radiasi bebas. Rejim didih film hanya hadir untuk rentang waktu yang sangat pendek, mengingat laju aliran yang digunakan cukup kencang.<sup>(4)</sup> Kemudian dari 74 detik hingga 142 detik temperatur permukaan batang pemanas turun secara tajam untuk rejim transisi dan kemudian mulai melandai untuk rejim didih inti.

Untuk mendekati kurva tersebut dicari persamaan matematisnya melalui *fitting*. Persamaan hasil *fitting* dari kurva evolusi temperatur pada Gambar 6, adalah sebagai berikut:

- Daerah  $t = 0$  detik dengan  $T_w = 475,26^\circ\text{C} \rightarrow t = 74,6$  detik dengan  $T_w = 404,57^\circ\text{C}$ , diidentifikasi dengan menggunakan *polynomial* orde-2, sehingga fungsi temperatur terhadap waktu yang diperoleh adalah:

$$T_w(t) = 0,00133 \times t^2 - 1,00303 \times t + 474,15 \quad (3)$$

- Daerah  $t = 74,8$  detik dengan  $T_w = 404,57^\circ\text{C} \rightarrow t = 141,8$  detik dengan  $T_w = 100,015^\circ\text{C}$ , sehingga dengan menggunakan regresi *Boltzman* diperoleh fungsi temperatur terhadap waktu, sebagai berikut:

$$T_w(t) = \frac{-3190,39}{1 + 0,297e^{0,045t}} + 75,88 \quad (4)$$

Fluks panas dalam kelongsong bahan-bakar (persamaan 2) yang terkait dengan gradien perubahan temperatur pada kelongsong material SS304 menjadi,

$$\frac{dT}{dt} \rho c_{p(ss)} V = q_{rad} A$$

dengan :

$$V = \pi (R_0^2 - R_i^2) L = \text{Volume kelongsong SS304}$$

$$A = 2\pi R_0 L = \text{luas permukaan luar kelongsong SS304}$$

Sehingga diperoleh korelasi akhir, sebagai berikut:

$$q_{rad} = \rho_{ss} c_{p(ss)} \left( \frac{R_0^2 - R_i^2}{2R_0} \right) \times \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

dengan harga-harga konstantanya adalah:

$$\rho_{ss} = 7900 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$c_{p(ss)} = 477 \text{ (J/kg.K)}$$

$$R_0 = 0,004775 \text{ (m)}$$

$$R_i = 0,003537 \text{ (m)}$$

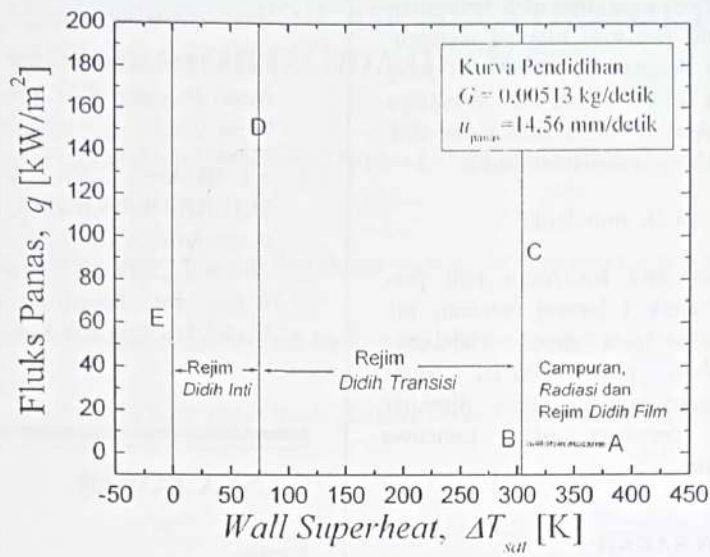
Kemudian harga-harga di atas dimasukkan ke dalam persamaan (5) dan diperoleh persamaan akhir, sebagai berikut :

$$q_{ss} = 3956,715 \times dT/dt \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (6)$$

Dengan mendiferensiasikan persamaan (3) dan (4) terlebih dahulu dan kemudian memasukkan data waktu untuk eksperimen *reflooding* pada batang pemanas tunggal diperoleh fungsi turunannya yang disubstitusikan ke persamaan fluks panas (6) hingga akhirnya diperoleh hasil perhitungannya yang digambarkan pada kurva pendidihan pada Gambar 7.

Daerah A ke B menjelaskan proses perpindahan panas secara radiasi dan dimungkinkan adanya keterlibatan perpindahan panas didih film (diperlihatkan hasil visualisasi video). Terjadi loncatan dari titik B ke C yang mengindikasikan proses pendinginan yang cepat, dimana pembasahan ulang (*rewetting*) mulai terjadi dengan kuantitas air yang cukup banyak, akan tetapi permukaan batang pemanas masih belum terbasahi secara menyeluruh. Keadaan tersebut diindikasikan sebagai rejim didih transisi dari titik C ke D, dimana air dan uap secara bergantian menyelubungi permukaan batang pemanasnya. Hingga, terjadinya fluks panas maksimum pada titik D, air telah menyelubungi permukaan batang pemanas dengan masih adanya pembentukan uap sebagai akibat masih terjadinya perpindahan panas secara konveksi dari batang pemanas ke air. Titik D hingga E merupakan rejim didih inti.

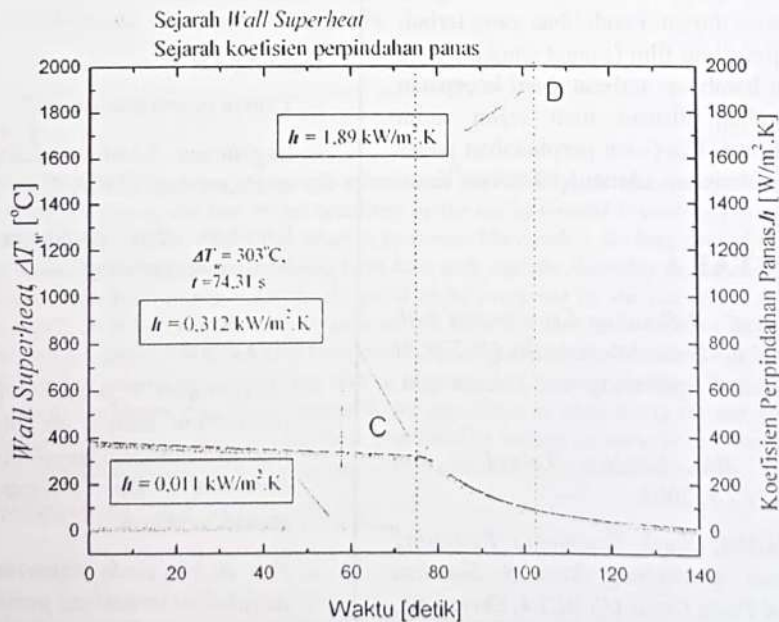
Titik D menunjukkan fluks kalor maksimal yang tercapai dalam eksperimen ini dimana koefisien perpindahan panasnya mencapai  $1,89 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$  (lihat Gambar 8). Pada titik D ini, sebagian besar kalor berpindah ke air setelah rejim didih transisi berakhir. Kemudian dari titik D hingga E, perpindahan panas terjadi pada rejim didih inti, harga koefisien perpindahan panas sangat sulit ditentukan mengingat permukaan batang pemanas terhalangi oleh gelembung-gelembung kecil. Sementara diantara titik A dan B pada daerah perpindahan panas secara radiasi, koefisien perpindahan panasnya cenderung konstan, yakni sebesar  $0,0011 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$ .



**Keterangan :**

- Titik A ( $\Delta T_w = 375 \text{ K} \rightarrow q_{\text{tod}} = 3,86 \text{ kW/m}^2$ )
- Titik B ( $\Delta T_w = 304 \text{ K} \rightarrow q_{\text{tod}} = 4,27 \text{ kW/m}^2$ ).
- Titik C ( $\Delta T_w = 303 \text{ K} \rightarrow q_{\text{tod}} = 100,62 \text{ kW/m}^2$ )
- Titik D ( $\Delta T_w = 75 \text{ K} \rightarrow q_{\text{tod}} = 141,81 \text{ kW/m}^2$ )
- Titik E ( $\Delta T_w = 0,6 \text{ K} \rightarrow q_{\text{tod}} = 69,65 \text{ kW/m}^2$ )

Gambar 7. Kurva pendidihan untuk batang pemanas tunggal.



Gambar 8. Kurva sejarah koefisien perpindahan panas dan Wall Superheat.



### Perhitungan Kecepatan Rewetting

Dari Gambar 7. di atas diperoleh kecepatan rewetting untuk batang pemanas tunggal menggunakan persamaan (1) dengan  $L_{rew}=600$  mm yang kemudian dibagi oleh selisih waktu saat terjadinya rewetting pada titik Atas ( $t=74,31$  detik) dan titik Bawah (33,1 detik), sehingga diperoleh hasil:

$$u_{panas} = 14,56 \text{ mm/detik}$$

Dengan menggunakan data kecepatan laju permukaan saat dingin untuk 1 batang pemanas ini,  $u_{dingin} = 18,37$  mm/detik. Jelas bahwa, perlambatan kecepatan pembasahan pada kondisi panas diakibatkan oleh hambatan laju aliran disekitar permukaan batang pemanas oleh peristiwa pendidihan yang terjadi.

### KESIMPULAN DAN SARAN

Eksperimen dengan pemanas tunggal telah memberikan informasi tentang proses perpindahan panas pendidihan selama *reflooding*. Pada awalnya perpindahan panas terjadi secara radiasi mendominasi. Setelah terjadinya *rewetting* temperatur turun melalui perpindahan panas pendidihan melalui rejim pendidihan transisi dan pendidihan inti. Fluks panas maksimum yang dihitung mencapai  $141,81 \text{ kW/m}^2$ .

Peristiwa pendidihan selama proses *reflooding* ini telah menghambat kecepatan pembasahan atau kecepatan *rewetting* dibandingkan saat batang pemanas dingin. Pendidihan yang terjadi terbagi dalam rejim didih film (sangat singkat) yang justru merupakan hambatan terbesar bagi kecepatan *rewetting*. Kemudian disusul oleh rejim didih transisi dan didih inti. Koefisien perpindahan panas pada fluks kalor maksimum adalah  $1,89 \text{ kW/m}^2\text{K}$ .

### DAFTAR PUSTAKA

1. L. SEPOLD *et al.*, *Reflooding Experiments with LWR-type Fuel Rod Simulators in the QUENCH Facility*, Nuclear Engineering and Design 204, 2001, 205-220.
2. M. JUARSA dkk., *Seminar Teknologi dan Keselamatan PLTN*, 2003.
3. R. RULIANDINI, *Studi Fenomena Rewetting Selama Proses Quenching Melalui Simulasi Eksperimental Pada Untai Uji BETA*, Skripsi S1, Universitas Padjadjaran, 2004.
4. CARBAJO, J.J., *A Study On The Rewetting Temperature*, Nuclear Engineering and Design, Vol, 84 page 21 - 52, 1984.
5. N.E. TODREAS and M.S. KAZIMI, *Nuclear System 1: Thermal Hydraulic Fundamentals*, Hemisphere Publishing, 1<sup>st</sup> ed., 1990.
6. J.H. LIENHARD IV and J.H. LIENHARD V, *A Heat Transfer Text Book*, 3<sup>rd</sup> ed., Phlogiston Press, 2002.
7. X.C.HUANG, G. BARTSCH and D. SCHROEDER-RICHER, *Quenching Experiments with A Circular Test Section of Medium Thermal Capacity Under Forced Convection of Water*, Int. Jurnal of Heat Mass Transefer, Vo.37, No.5,pp.803-818, 1994.

### TANYA JAWAB

#### Utaja

- Bagaimana kurva daya pemanas dari ujung ke ujung.
- Apakah kurva daya mirip (sama) dengan fluks.

#### Mulya Juarsa

- —
- Berbeda, fluks adalah daya termal perluas permukaan :  $q = \frac{Q}{A}$

#### Dudung AR

- Tujuan utama analisis ini?
- Bagaimana kondisi tekanan di teras reaktor setelah terjadi LOCA di kaki dingin?
- Kira-kira dari parameter apa ditentukannya kecepatan *rewetting*?

#### Mulya Juarsa

- Mempelajari proses perpindahan panas pendidihan antara dinding + air saat LOCA, hasilnya antisipasi pelelehan bahan bakar karena burn-out. Dan menganalisa lanjut dengan metode numerik.
- $P = 40$  bar, pada eksperimen 1 bar karena untuk melakukan visualisasi pendidihan tube-nya kuat.
- Rewetting dihitung berdasarkan selisih waktu antara 2 titik pengukuran  $\mu_p = \frac{(600-0) m}{\Delta t}$ .