

STUDI EKSPERIMENTAL *QUENCHING* PADA CELAH SEMPIT

Mulya Juarsa dan A.R. Antariksawan
Pusat Pengembangan Teknologi Keselamatan Nuklir - BATAN

ABSTRAK

STUDI EKSPERIMENTAL *QUENCHING* PADA CELAH SEMPIT. Proses *quenching* sangat banyak dijumpai di berbagai bidang industri, termasuk bidang nuklir. Khususnya, proses *quenching* pada celah sempit terkait erat dengan fenomena kecelakaan parah di mana diasumsikan teras yang meleleh dapat terkumpul di bagian bawah bejana reaktor. Eksperimen dan analisis data hasil eksperimen proses *quenching* pada celah sempit ukuran 0,5 mm dan 7 mm telah dilakukan untuk memahami proses *quench* berdasarkan perbedaan lebar celah. Untuk celah ukuran 7 mm, hasil eksperimen dapat digambarkan secara baik untuk beberapa korelasi yang ada, termasuk korelasi untuk pendidihan kolam, sedangkan untuk celah 0,5 mm, sebagian besar korelasi belum dapat menggambarkan hasil eksperimen. Proses *quenching* pada celah sangat sempit tersebut sangat dibatasi oleh CCFL dan kapilaritas yang sangat berbeda dengan pendidihan kolam. Oleh karena itu pula, *quenching* pada celah sempit terjadi lebih lama daripada celah yang lebih lebar. Koefisien perpindahan panas maksimum rata-rata untuk celah 7 mm dan 0,5 mm berturut-turut adalah 15 kW/m²K dan 3 kW/m²K.

Kata kunci: eksperimen, *quenching*, celah sempit, kecelakaan parah

ABSTRACT

THE EXPERIMENTAL STUDY OF *QUENCHING* IN A NARROW GAP. The quenching process could be found in many kinds of industrial processes, including nuclear industry. Especially, quenching in a narrow gap is close related to the severe accident phenomena where the molten core is assumed relocated in the reactor vessel lower head. The experiments and data analysis had been performed for quenching in a narrow gap of 0.5 and 7 mm width to investigate a quench process based on a narrow width difference. In the case of 7 mm gap, experimental results agreed well with the prediction of existing heat transfer correlation, including the pool boiling correlations. For the gap of 0.5 mm, almost all of the existing correlation could not predicted the experimental results. The quenching in the narrow gap is restricted by CCFL and capillary effects which is very different with the pool boiling. For that

reason, the cooling of hot surface in the narrow gap occurred slower than in the case of wider gap. The average maximum heat transfer coefficient for 7 and 0.5 mm gap were 15 kW/m²K and 3 kW/m²K, respectively.

Key words: experiment, quenching, narrow gap, severe accident

PENDAHULUAN

Quenching adalah pendinginan mendadak suatu permukaan panas yang terjadi saat permukaan tersebut terendam dalam zat cair. Permukaan panas yang pada awalnya bertemperatur di atas temperatur saturasi zat cair pendingin akan diselimuti uap. Permukaan akan mendingin dengan cepat saat selimut uap (*vapor film*) runtuh dan memungkinkan zat cair kontak langsung dengan permukaan tersebut. Dalam hal ini, fenomena *quenching* adalah fenomena transien dan melibatkan interaksi termal antara permukaan padat dan zat cair dua fasa. Fenomena *quenching* dapat ditemui di berbagai bidang industri, termasuk dalam bidang keselamatan reaktor nuklir khususnya berbagai kejadian yang mengikuti kecelakaan kehilangan pendingin (*Loss-of-coolant Accident, LOCA*) [1].

Pada kecelakaan TMI-2, sebagian teras meleleh dan tertumpuk di bagian bawah bejana reaktor [2]. Pada saat itu, dinding bagian bawah bejana reaktor diestimasi *overheated* hingga 1000 °C sekitar 30 menit dan kemudian mengalami pendinginan yang cepat pula sehingga bagian bawah bejana tidak mengalami kerusakan. Satu mekanisme yang dihipotesiskan mampu melakukan pendinginan cepat tersebut adalah *quenching* pada celah sempit yang terbentuk antara lelehan teras dengan dinding bejana, di mana air dapat memasuki celah sempit tersebut dan mendinginkan permukaan lelehan. Lebar celah dari berbagai penelitian diperkirakan rata-rata sebesar 1 mm [3, 4, 5]. Namun demikian, penetrasi air ke dalam celah selain akibat gravitasi akan banyak ditentukan oleh karakteristik perpindahan panas dalam celah sempit tersebut [5].

Murase et al [6] melakukan *review* terhadap eksperimen perpindahan panas pada celah sempit panas yang telah dilakukan. Dari hasil *review* tersebut dapat diketahui bahwa karakteristik perpindahan panas pada celah sempit sangat berbeda dari perpindahan panas pada kolam. Untuk itu Murase et al. mengusulkan korelasi tersendiri. Keterpakaian korelasi tersebut telah diteliti oleh Juarsa [7] melalui eksperimen dengan lebar celah yang diamati berturut-turut 1, 2 dan 4 mm dan Tanaka et al. [8] menambahkan lagi dengan analisis pada fluks kalor kritis

Studi eksperimental kali ini akan melengkapi kedua studi yang disebut terakhir dengan lebar celah berbeda, yaitu 0,5 mm dan 7 mm. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengkonfirmasi kecenderungan karakteristik perpindahan panas yang telah diamati pada kedua penelitian sebelumnya, di mana korelasi Bromley untuk perpindahan panas pada didih kolam (*pool boiling*) hampir mendekati hasil eksperimen dengan lebar celah 4,0 mm. Sementara untuk korelasi aliran uap laminar pada annulus dengan angka *Nusselt* 5,0 sesuai dengan lebar celah 1,0 mm. Dalam penelitian ini dihipotesiskan bahwa celah 0,5 mm akan memiliki karakteristik berbeda dari didih kolam dan efek *counter current flow limitation (CCFL)* akan semakin kuat mempengaruhi waktu pendinginan, sedangkan untuk celah 7 mm karakteristik *quenching* diprediksikan akan memenuhi keadaan didih kolam. Temperatur permukaan panas yang dipilih dalam studi ini adalah 500°C. Temperatur tersebut telah melampaui temperatur minimum didih film [9], sehingga fenomena *quenching* akan dapat diamati.

METODE

Studi ini merupakan studi eksperimental. Deskripsi alat dan prosedur eksperimen akan diterangkan di bawah. Data yang diambil adalah pengukuran temperatur dinding batang SUS304 selama proses transien *quenching* dan hasil observasi rekaman video digital. Dari data temperatur akan dihitung fluks panas dan koefisien perpindahan panas. Kurva fluks panas eksperimental akan dibandingkan

dengan kurva fluks panas berdasarkan beberapa korelasi yang telah dikenal [9]. Interpretasi fenomena akan dibantu dengan observasi visual.

Fluks panas pada permukaan batang SUS304 dihitung dari data pengukuran temperatur dengan menyelesaikan persamaan konduksi transien di dinding batang SUS304. Persamaan konduksi panas transien satu dimensi yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

dan syarat batas

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} &= 0 \quad \text{untuk } r = r_i \\ T &= T_m \quad \text{untuk } r = r_o \end{aligned}$$

dengan T adalah temperatur ($^{\circ}\text{C}$), t adalah waktu (detik), α adalah difusivitas termal (m^2/detik), r adalah jari-jari (m), r_i dan r_o berturut-turut jari-jari dalam dan luar batang SUS304 dan T_m adalah temperatur terukur.

Beberapa korelasi yang digunakan sebagai perbandingan di dalam kurva pendidihan adalah sebagai berikut :

a. Rejim didih transisi dan didih inti

Pada rejim ini, korelasi Kutateladze (1952) telah mengalami modifikasi oleh Murase et al. [6], menjadi:

$$\left(\frac{q_H}{\Delta T_{sat}} \right) \left(\frac{L_e}{k_f} \right) = C \left[\frac{k_f \Delta T_{sat}}{\rho_g H_{fg} \nu_f} \right]^{n_1} \left[\frac{P L}{\sigma} \right]^{n_2} \quad (2)$$

di mana P adalah tekanan (Pascal), ν_f adalah viskositas kinematik (m^2/s), dan σ adalah tegangan permukaan (N/m) dengan menggunakan nilai-nilai C , n_1 and n_2 berdasarkan data Henry and Hammersley untuk ukuran celah 2,0 mm, sbb :

- Didih inti (*nucleate boiling*) :
Untuk air panas lanjut rendah $C = 1,1$, $n_1 = 0,3$, $n_2 = 0,32$
Untuk air panas lanjut tinggi $C = 2,2$, $n_1 = -0,1$, $n_2 = 0,32$
- Didih transisi (*transition boiling*) : $C = 1,2 \times 10^{14}$, $n_1 = -5,5$, $n_2 = 0,32$

b. Rejim didih film

Perhitungan fluks panas pada rejim didih film menggunakan korelasi perpindahan panas pada celah annulus, untuk aliran uap laminar dengan angka *Nusselt*, $Nu = 5$ (untuk celah annulus), sebagai berikut

$$q = Nu \cdot \left(\frac{k_g}{D_h} \right) \Delta T_{sat} \quad (3)$$

Bromley [10] melakukan eksperimen didih kolam dengan menggunakan plat vertikal panas untuk memahami perpindahan panas didih film menghasilkan korelasi, sebagai berikut

$$h_B = C \left[\frac{k_g^3 g \rho_g (\rho_f - \rho_g) H_{fg}}{\mu_g \Delta T_{sat} L_e} \right]^{1/4} \quad \text{untuk plat vertikal } C=0,667 - 0,943 \quad (4)$$

dengan q adalah fluks panas (kW/m^2), k_g adalah konduktivitas termal uap ($W/m.K$), ρ_g adalah kerapatan uap (kg/m^3), ρ_f adalah kerapatan air (kg/m^3), ΔT_{sat} adalah perbedaan temperatur saturasi (K), μ_g adalah viskositas uap ($N.s/m^2$), H_{fg} adalah panas penguapan (kJ/kg), L_e adalah panjang (m), D_h adalah diameter hidrodinamik (m) dan C adalah konstanta.

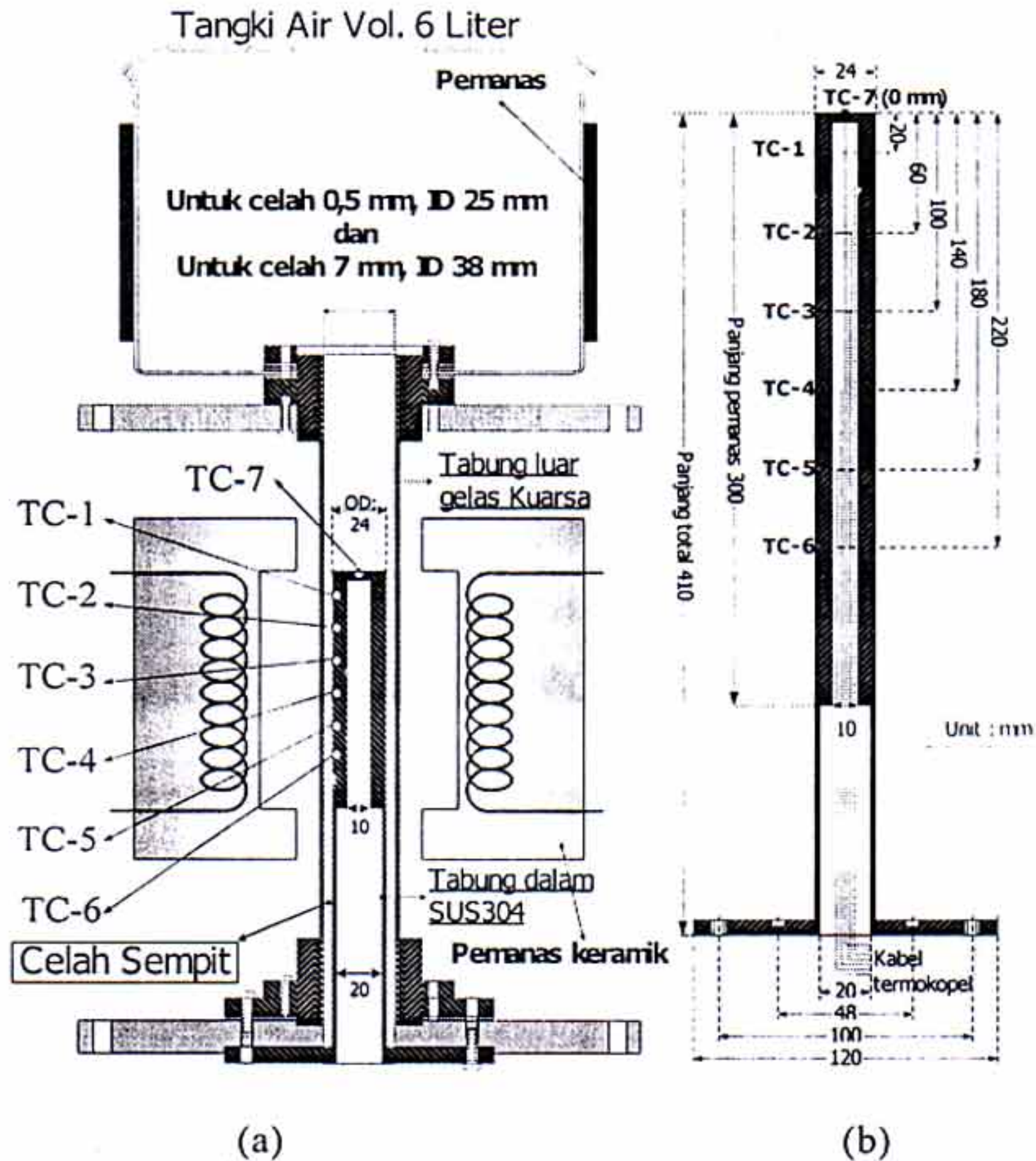
ALAT DAN TATA KERJA

Alat Eksperimen

Skema bagian uji (*test section*) untuk studi eksperimental ini ditunjukkan pada Gambar 1 (a). Bagian uji terdiri atas tangki air, kanal yang tersusun dari tabung kuarsa dengan batang SUS304 di dalamnya sehingga membentuk celah anulus sempit, alat pemanas dan sistem akuisisi data. Diameter luar batang SUS304 adalah 24 mm dan tebal 7 mm. Dua tabung kuarsa dengan diameter dalam berukuran berturut-turut 25 mm dan 38 mm sehingga membentuk celah dengan batang SUS304 untuk eksperimen dengan 2 variasi lebar celah, berturut-turut 0,5 mm dan 7 mm. Sebagai pemanas digunakan satu pasang semi silindris *fiber-heater* dengan panjang pemanas 300 mm menyelubungi kanal. Dengan pemanas tersebut, temperatur permukaan batang SUS304 dapat dinaikkan hingga 800°C secara radiasi. Untuk pengamatan temperatur dinding batang SUS304 digunakan termokopel tipe K yang diletakkan pada 7 posisi vertikal berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 1 (b).

Di bagian atas kanal diletakkan tangki air yang terbuka sehingga bertekanan atmosferik. Sedangkan bagian bawah kanal tertutup. Pada saat yang dikehendaki katup yang membatasi tangki air dan kanal akan dibuka untuk mengalirkan air ke kanal. Sabuk pemanas digunakan di sekeliling tangki air untuk mengkondisikan air yang dialirkan pada temperatur saturasi 100°C.

Sistem perekam data terdiri dari *signal conditioner* untuk signal dengan frekuensi 100 Hz (1 detik merekam 100 data) pada eksperimen ini dan *Analog-Digital Converter Board* (tipe PCI 3133).



Gambar 1. (a) Skema bagian uji (b) Letak termokopel pada batang SUS304

Tata Kerja

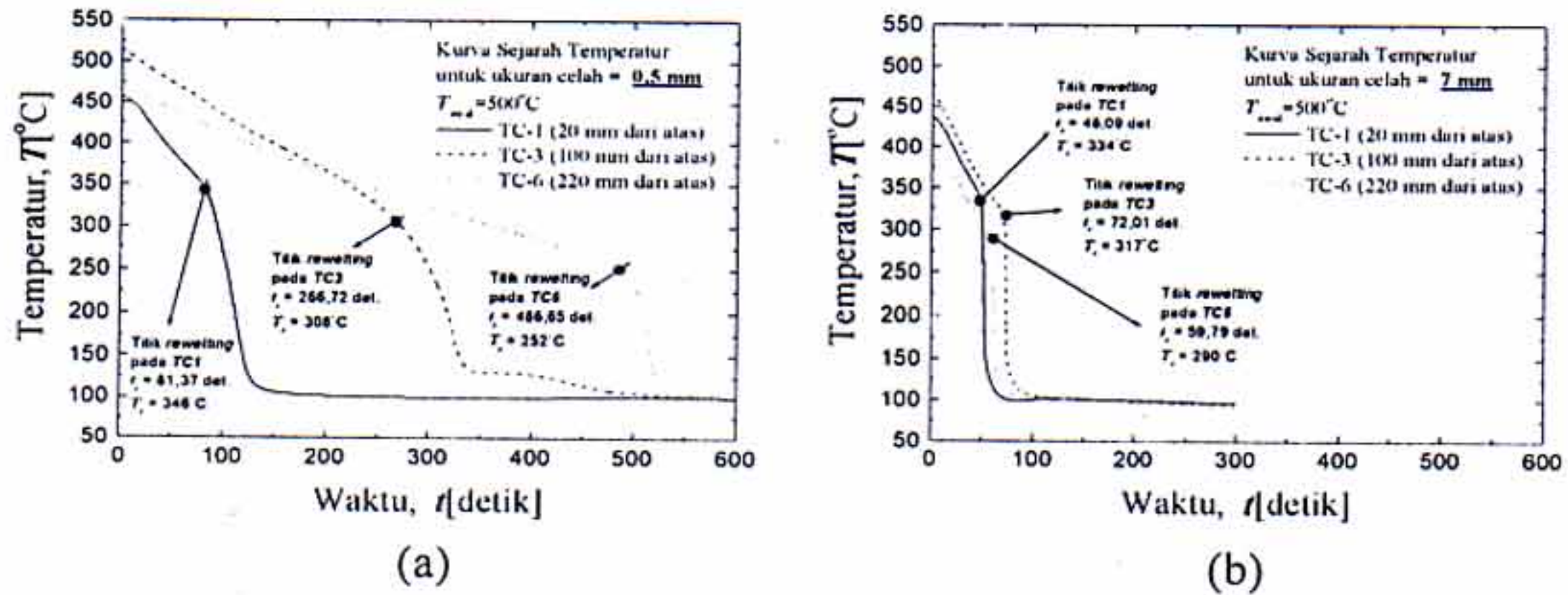
Pemanas listrik dihidupkan untuk memanaskan batang SUS304 hingga mencapai temperatur awal yang dikehendaki. Pada saat yang sama air di tangki dipanaskan hingga temperatur 100 °C. Ketika temperatur awal batang SUS304 telah mencapai nilai yang dikehendaki (dalam eksperimen ini 500 °C), pemanas dimatikan dan dipindahkan dari sekeliling kanal. Sesaat kemudian, katup pemisah tangki dan kanal dibuka dan air mengalir secara gravitasi ke dalam kanal (celah). Selama proses

transien, pengukuran temperatur dari sensor termokopel direkam pada sistem akuisisi data. Observasi visual proses *quenching* direkam dengan kamera video digital. Eksperimen dihentikan saat seluruh kanal terendam air.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Evolusi Temperatur

Hasil pengukuran temperatur selama proses *quenching* dari tiga termokopel, masing-masing TC1, TC2 dan TC3 untuk dua variasi celah ditunjukkan pada Gambar 2. Tampak jelas bahwa pendinginan untuk celah ukuran 7 mm terjadi lebih cepat daripada celah ukuran 0,5 mm. Meskipun demikian, keduanya memiliki pola kecenderungan evolusi temperatur yang sama. Pada saat awal perpindahan panas terjadi hanya karena radiasi, sehingga tampak kurva lebih landai. Setelah beberapa saat, pada saat temperatur permukaan batang SUS304 turun hingga mencapai temperatur di bawah temperatur minimum didih film, permukaan batang terbasahi air (*wetting*) dan perpindahan panas terjadi secara konveksi dua fasa (rejim pendidihan transisi dan inti). Ketika itu, temperatur permukaan turun lebih cepat dan kurva tampak lebih curam. Perbedaannya, pada celah 7 mm, temperatur turun lebih cepat daripada pada celah 0,5 mm. Hal ini dapat dimengerti karena fluks panas pada celah 7 mm lebih besar mengingat air yang terkumpul di celah lebih banyak. Perlu diingat bahwa pada celah 0,5 mm air akan lebih sulit melakukan penetrasi disebabkan temperatur permukaan batang yang panas dan temperatur tabung kuarsa yang juga relatif panas selain keadaan celah yang sangat sempit. Dengan demikian, akibat sedikitnya kapasitas air yang mengisi celah menyebabkan aliran uap yang terbentuk yang mengalir ke atas berlawanan secara kuat dengan aliran air yang turun karena gravitasi. Kejadian ini yang disebut CCFL.



Gambar 2. Evolusi temperatur permukaan dinding batang SUS304.

Perbedaan lain yang tampak adalah urutan pendinginan. Tabel 1 menunjukkan waktu dan temperatur pembasahan yaitu saat air kontak dengan dinding pemanas yang mengakibatkan temperatur dinding turun dengan lebih cepat.

Tabel 1. Waktu dan temperatur pembasahan

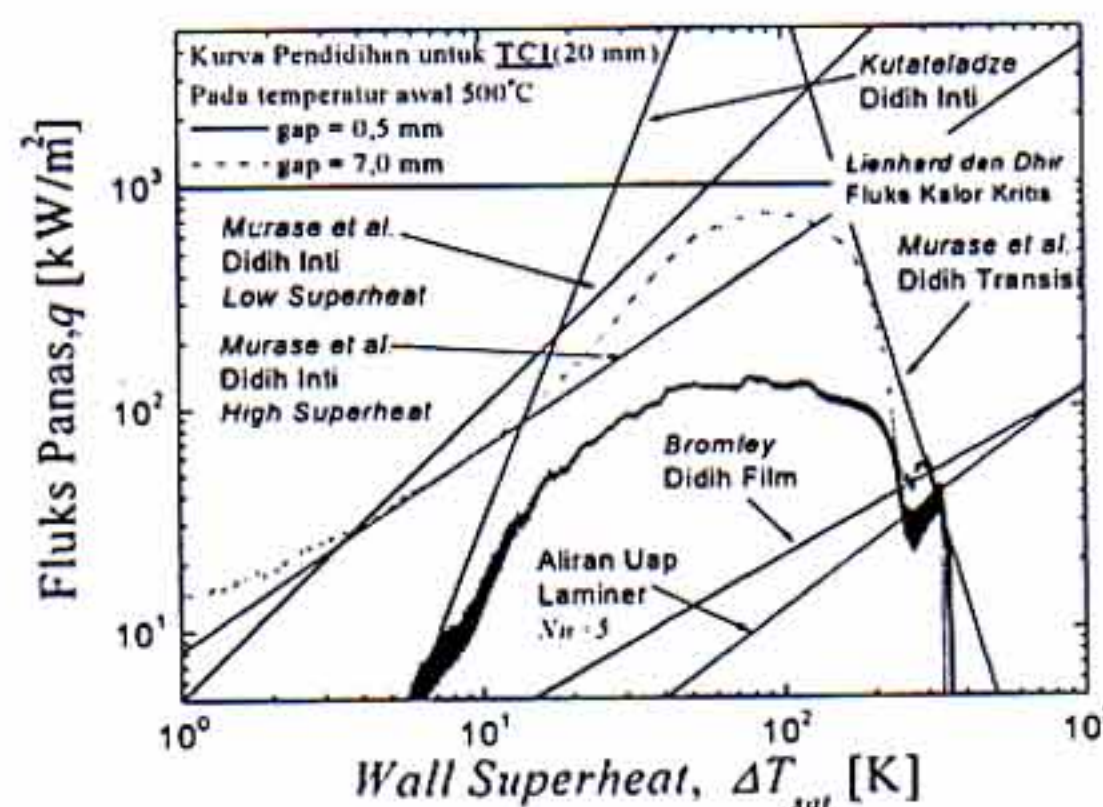
Ukuran Celah	TC1 (20 mm)		TC3 (100 mm)		TC6 (220 mm)	
	t (det.)	T ($^{\circ}\text{C}$)	t (det.)	T ($^{\circ}\text{C}$)	t (det.)	T ($^{\circ}\text{C}$)
0,5 mm	81,37	346	226,72	308	486,65	252
7,0 mm	48,09	334	72,01	317	59,79	290

Pada kasus celah 0,5 mm, temperatur permukaan dinding batang SUS304 turun akibat pembasahan dari bagian atas, sehingga berturut-turut dari atas ke bawah tampak TC1 turun lebih dahulu, kemudian TC3 dan terakhir TC6 pada bagian bawah. Hal ini menunjukkan tidak terjadinya *bottom flooding* karena halangan CCFL yang kuat, sedangkan pada kasus celah 7 mm, pembasahan terjadi dari bagian atas (TC1), kemudian dari bagian bawah (lihat TC6) setelah itu bagian tengah (diwakili pengukuran TC3). Hal ini dapat terjadi karena kapasitas air yang masuk ke celah cukup banyak sehingga dinding kuarsa lebih cepat mendingin dibandingkan pada celah

0,5 mm sehingga mengalir melalui dinding kuarsa yang selanjutnya aliran air dapat mengalahkan perlawanan aliran uap ke atas sehingga mulai berkumpul pada bagian bawah yang tertutup untuk kemudian air bergerak ke atas (menyentuh TC6) di saat air mulai turun membasahi TC1 dari arah atas untuk kemudian berkumpul di bagian tengah celah (pada daerah TC3).

Kurva Pendidihan

Gambar 3 memperlihatkan kurva pendidihan hasil perhitungan berdasarkan data temperatur yang tercatat oleh TC1. Sumbu ordinat menunjukkan fluks panas yang dihitung, sedangkan sumbu absis adalah *wall superheat*, yaitu selisih temperatur dinding dengan temperatur saturasi. Kondisi eksperimen terbaca pada sumbu tersebut dari sebelah kanan ke sebelah kiri yang menggambarkan proses pendinginan. Dengan memasukkan beberapa sifat fisika termal air pada temperatur saturasi dan tekanan atmosfer sebagai konstanta, yang kemudian q (kW/m^2) dan ΔT_{sat} (K) sebagai parameter bebasnya, diperoleh garis-garis yang mewakili beberapa korelasi seperti terlihat di dalam kurva pendidihan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva pendidihan berdasarkan pengukuran TC1.

Pada saat air mulai mengalir di kanal, fluks panas naik dengan segera dan pendidihan film berlangsung. Proses pendidihan film berlanjut hingga kondisi temperatur pendidihan film tercapai. Ketika itu, proses *quenching* terjadi dan fluks panas meningkat pesat. Saat itu, pendidihan terjadi pada rejim pendidihan transisi hingga mencapai fluks panas maksimum yang dikenal sebagai fluks panas kritis (*Critical Heat Flux, CHF*). Selanjutnya, fluks panas akan turun kembali dan pendidihan terjadi pada rejim pendidihan inti dan pendidihan satu fasa sampai mencapai temperatur kesetimbangan dengan air.

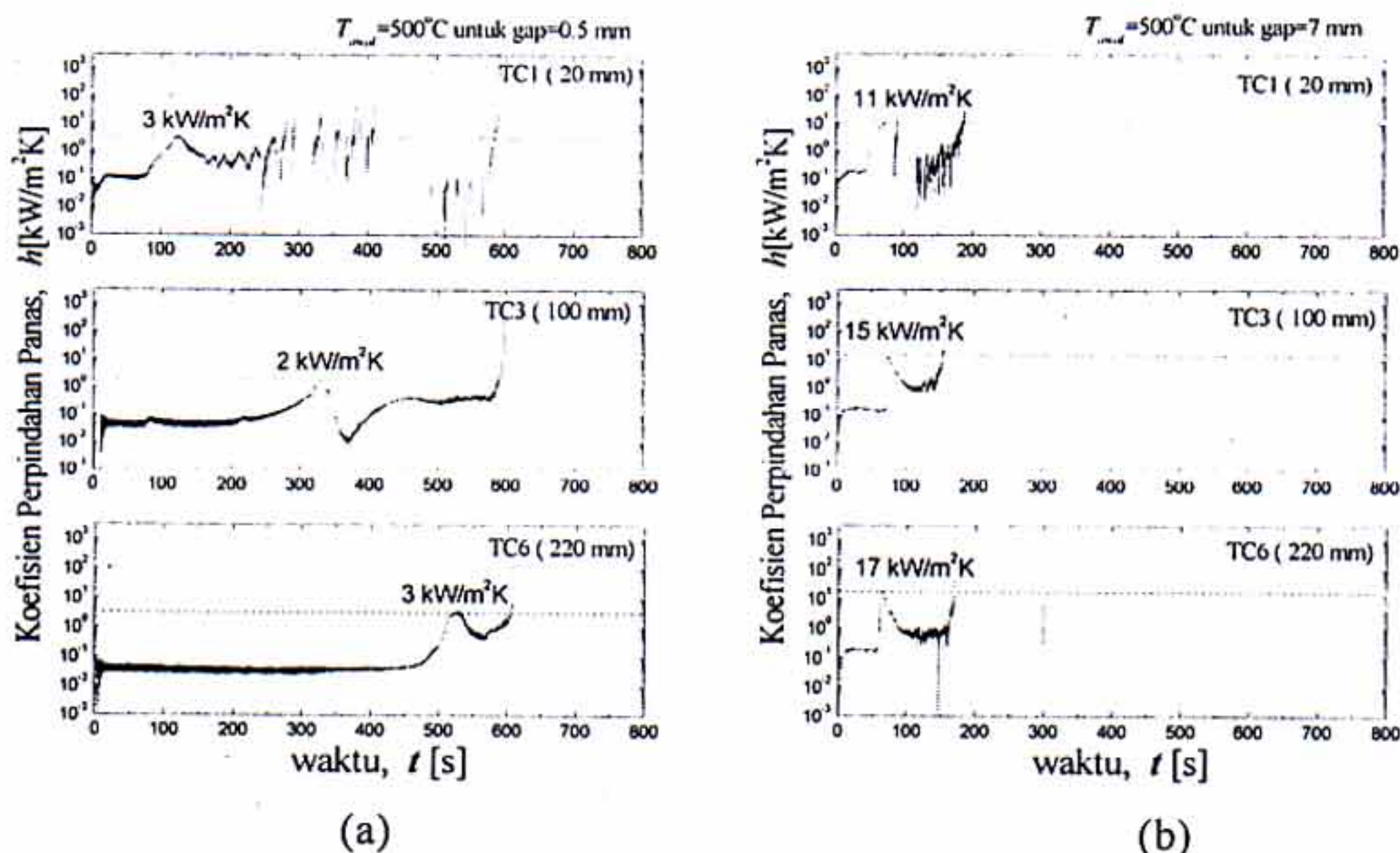
Perhitungan fluks panas dengan beberapa korelasi yang dikenal diberikan pada Gambar 3 tersebut untuk perbandingan dengan hasil eksperimen. Beberapa hal dapat diindikasikan dari kurva tersebut, yaitu:

1. Perbedaan karakteristik *quenching* pada celah sangat sempit yang ditunjukkan oleh kasus celah 0,5 mm dan celah yang lebih lebar seperti pada kasus celah 7 mm dibandingkan dengan korelasi yang ada. Secara umum, hasil eksperimen celah 0,5 mm berbeda jauh dengan hasil perhitungan menggunakan korelasi yang ada, kecuali untuk perhitungan pendidihan film. Sedangkan hasil eksperimen celah yang lebih lebar, yaitu celah 7 mm, mendekati beberapa korelasi yang ada. Kecenderungan ini juga diamati oleh Juarsa [7] dan Tanaka [8] untuk perbandingan celah 1 mm dan 4 mm.
2. Pada celah 7 mm, di daerah pendidihan inti, hasil eksperimen berada antara hasil perhitungan dengan korelasi Murase et al. untuk *low* dan *high superheat*. Nilai fluks panas kritis eksperimen mendekati perhitungan fluks panas kritis kondisi pendidihan kolam yang diberikan oleh korelasi Lienhard dan Dhir. Korelasi fluks panas didih film untuk pendidihan kolam yang diberikan oleh Bromley juga menghasilkan nilai yang sangat dekat dengan hasil eksperimen. Sedangkan pada daerah pendidihan transisi, sekali lagi korelasi Murase et al. memberikan hasil yang sangat baik.

3. Pada celah 0,5 mm, beberapa korelasi yang ada belum dapat menggambarkan hasil eksperimen. Hasil perhitungan fluks panas kritis dan pendidihan film menegaskan bahwa karakteristik pendidihan pada celah sangat sempit jauh berbeda dengan pendidihan kolam. Dapat diamati bahwa fluks panas pada celah sempit jauh di bawah fluks panas pendidihan kolam. Hal ini dapat dimengerti karena proses pendinginan dinding panas SUS304 dibatasi oleh sangat sedikitnya penetrasi air ke dalam celah akibat CCFL. Efek kapiler sangat mungkin berpengaruh pada kasus ini. Korelasi pendidihan film aliran uap laminar dengan bilangan *Nusselt* = 5 sejauh ini juga memberikan hasil yang baik.
4. Fluks panas pada celah 7 mm lebih besar dari pada celah 0,5 mm. Hal ini karena air yang masuk ke celah semakin banyak dan film cair semakin tebal, sebaliknya film uap semakin tipis. Hal ini mengakibatkan fluks panas yang semakin besar.
5. Pada eksperimen dengan lebar celah 0,5 mm dan 7 mm, di daerah pendidihan inti, fluks panas masih di bawah fluks panas yang diprediksi oleh korelasi Kutateladze untuk pendidihan kolam.

Koefisien Perpindahan Panas

Gambar 4(a) dan 4(b) memperlihatkan kurva koefisien perpindahan panas pada tiga titik untuk kedua celah 0,5 dan 7 mm yang dihitung dengan membagi fluks panas, q (kW/m²) oleh *wall superheat*, ΔT_{sat} (K).



Gambar 4. Koefisien perpindahan panas selama pendinginan transien.

Pada awal pendinginan, pendidihan terjadi pada daerah pendidihan film sehingga tampak koefisien perpindahan panas relatif rendah dan relatif konstan. Kemudian pada saat *quenching* terjadi (atau lebih tepat saat pembasahan permukaan), koefisien perpindahan panas melonjak dan mencapai maksimum pada saat fluks panas kritis berlangsung. Setelah itu, koefisien perpindahan panas akan turun kembali. Koefisien perpindahan panas maksimum pada celah 0,5 mm, rata-rata sekitar 3 kW/m²K. Sedangkan pada celah 7 mm, koefisien perpindahan panas maksimum rata-rata lebih besar, yaitu sekitar 15 kW/m²K. Hal ini sesuai dengan perhitungan fluks panas sebelumnya, dimana fluks panas untuk celah 7 mm cenderung lebih besar dibandingkan pada celah 0,5 mm.

KESIMPULAN

Eksperimen dan analisis data hasil eksperimen proses *quenching* pada celah sempit ukuran 0,5 mm dan 7 mm telah dilakukan. Untuk celah ukuran 7 mm, hasil eksperimen dapat digambarkan baik untuk beberapa korelasi yang ada, termasuk korelasi untuk pendidihan kolam, di mana hasil eksperimen pada celah 7 mm ternyata sangat sesuai untuk korelasi Bromley dibandingkan untuk celah 4 mm hasil eksperimen oleh Juarsa [7]. Akan tetapi, untuk celah 0,5 mm daerah didih film yang dibandingkan dengan korelasi aliran uap laminar pada annulus dengan bilangan *Nusselt* 5,0 memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan celah 1 mm hasil eksperimen Juarsa, sebagian besar korelasi untuk transisi dan didih inti belum dapat menggambarkan hasil eksperimen dengan baik. Proses *quenching* pada celah sangat sempit tersebut sangat dibatasi oleh CCFL dan kapilaritas yang sangat berbeda dengan pendidihan kolam atau pendidihan untuk celah yang lebih lebar. Oleh karena itu pula, *quenching* pada celah sempit terjadi lebih lama daripada celah yang lebih lebar sehingga dapat disimpulkan, bahwa untuk mempercepat proses pendinginan pada celah sangat sempit yang mungkin mencapai orde 0,5 hingga 1 mm yang terbentuk antara lelehan elemen bahan bakar dan dinding bawah bejana tekan reaktor saat terjadinya kecelakaan parah adalah dengan menurunkan temperatur bejana secara cepat, sehingga akan tercapai koefisien perpindahan panas yang tinggi dan proses pendinginan pada lelehan elemen bahan bakar akan menjadi cepat pula sehingga integritasnya benar-benar dapat terjaga dengan baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Eksperimen dilakukan di Heat Transport Laboratory, Research Reactor Institute, Kyoto University. Penulis mengucapkan terimakasih pada Prof. Kaichiro MISHIMA, D.Eng sebagai Professor pembimbing penulis. Demikian pula kepada Mr. Futoshi TANAKA atas bantuannya selama melakukan eksperimen.