

---

**PERHITUNGAN FLUKS KALOR UNTUK KURVA DIDIH SELAMA  
EKSPERIMEN *QUENCHING* MENGGUNAKAN SILINDER BERONGGA  
DIPANASKAN**

Mulya Juarsa<sup>1,2</sup>, Raldi Artono Koestor<sup>1</sup>, Nandy Setiadi Djaya Putra<sup>1</sup>  
Anhar Riza Antariksawan<sup>2</sup>, Cukup Mulyana<sup>3</sup>, Riska Khalisa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik  
University of Indonesia, Depok 16424

E-mail : myjuar@yahoo.com

<sup>2</sup>Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)

E-mail : anhar@batan.go.id

<sup>3</sup>KBK Fisika Energi, Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Padjadjaran

Diterima editor 29 Juli 2010

Disetujui untuk dipublikasi 27 Agustus 2010

**ABSTRAK**

**PERHITUNGAN FLUKS KALOR UNTUK KURVA DIDIH SELAMA EKSPERIMEN *QUENCHING* MENGGUNAKAN SILINDER BERONGGA DIPANASKAN.** Salah satu aspek penting manajemen keselamatan dalam pengoperasian reaktor nuklir adalah manajemen termal. Konsep dasar pengelolaan termal adalah untuk mengendalikan kelebihan kalor saat terjadinya kecelakaan. Pemahaman dan investigasi fenomena pendidihan selama kecelakaan yang terjadi secara transien menjadi tahapan penelitian yang penting. Proses *quenching* adalah proses pendinginan tiba-tiba pada obyek yang panas dengan memasukkan ke dalam suatu fluida. Material SS316 dengan geometri silinder berongga pada posisi vertikal merupakan simulasi dari debris dan digunakan sebagai objek yang dipanaskan. Metode eksperimen dilakukan melalui pendinginan *quenching* secara alami pada silinder berongga dengan berbagai variasi temperatur awal dari 300°C sampai 800°C ke dalam temperatur saturasi air. Selama eksperimen data temperatur direkam dan visualisasi pendidihan dilakukan melalui kamera kecepatan tinggi (HSC). Hasil data transien temperatur digunakan untuk menghitung fluks kalor. Rejim didih film pada TC8 (bagian terluar) dalam kurva didih untuk semua temperatur awal menunjukkan kesesuaian dengan korelasi Bromley. Proses didih film paling singkat terjadi selama 1,11 detik untuk temperatur awal 300°C. Fluks kalor kritis pada TC8 untuk temperatur awal dari 800°C, 600°C, 400°C dan 300°C secara berturut-turut adalah 700 kW/m<sup>2</sup>, 500 kW/m<sup>2</sup>, 450 kW/m<sup>2</sup> dan 400 kW/m<sup>2</sup>.

Kata kunci: *quenching*, silinder, pendidihan, fluks kalor

**ABSTRACT**

**HEAT FLUX CALCULATION FOR BOILING CURVE DURING *QUENCHING* EXPERIMENT USING HEATED HOLLOW CYLINDER.** One of the safety management aspects in the operation of nuclear reactors is thermal management. The basic concept of thermal management is to control the excess heat during an accident. The understanding and investigation of boiling phenomenon become important research stage. *Quenching* process is the process of sudden cooling on a hot object by entering into a fluid. SS316 material with hollow cylinder geometry in a vertical position is the simulation of debris and used as a heated object. Method of *quenching* experiments carried out through the natural cooling of the hollow cylinder with different variations of initial temperature from 300°C to 800°C and submerged into the water with saturation temperature. Temperature data was recorded and boiling was captured using high-speed camera (HSC) during the experiment. The results of transient temperature data was used to calculate the heat flux. The film boiling regime on TC8 (outer portion) in the boiling curves for all initial temperatures have a good agreement with Bromley's correlation. The shortest process of film boiling was occurred for 1.11 seconds at the initial temperature of 300°C. Critical heat flux at TC8 from initial temperature of 800°C, 600°C, 400°C and 300°C in respectively is 700 kW/m<sup>2</sup>, 500 kW/m<sup>2</sup>, 450 kW/m<sup>2</sup> and 400 kW/m<sup>2</sup>.

Keywords: *quenching*, cylinder, boiling, heat flux

## PENDAHULUAN

Kegagalan dalam manajemen termal selama kecelakaan PLTN mengakibatkan peristiwa yang paling buruk, yaitu kemungkinan terlepasnya bahan radioaktif ke lingkungan. Meskipun demikian, peran manajemen radioaktif akan bekerja untuk mengantisipasi sebaran radiasi dan memitigasi lepasan bahan radioaktif. Kejadian pada TMI-2 di tahun 1979 menunjukkan bahwa tanpa disadari manajemen termal telah mencegah lepasnya bahan bakar dan elemen radioaktif lainnya ke lingkungan, dalam konsep pertahanan berlapis, peristiwa tersebut hanya merusak lapis kedua saja, rusaknya matriks komponen bahan-bakar[1]. Bejana tekan reaktor (*Reactor Pressure Vessel*, RPV) sebagai pertahan ketiga, tetap terjaga integritasnya. Selama terjadinya pelelehan teras, RPV mengalami gangguan termal (*thermal attack*) selama proses gerakan lelehan teras (debris) dari bagian atas ke bagian terbawah RPV. Ketika debris bergerak ke arah bagian bawah RPV yang masih menyimpan air kemudian debris bersentuhan dengan air, maka penguapan terjadi secara ekstrim dan terjadi pengurangan kuantitas air, kemudian sebagian volume air dipindahkan oleh volume debris. Volume air dalam RPV yang terdorong ke arah berlawanan dengan arah gerak debris kembali lagi ke arah bawah dan memunculkan fenomena penggenangan ulang pada bagian celah yang terbentuk antara debris dan RPV[2]. Peristiwa pendinginan tersebut meskipun termasuk kategori kecelakaan parah dan melibatkan fenomena pendidihan di celah sempit, justeru telah menunjukkan eksistensi yang menghambat timbulnya kerusakan dinding RPV[3]. Bagaimana keberlangsungan fenomena pendinginan ini terjadi tentu perlu dilakukan pengkajian yang dimaksudkan sebagai upaya perbaikan desain, perbaikan pengoperasian dan mitigasi kecelakaan.

Penelitian terkait peristiwa kecelakaan parah dimulai sejak tahun 2007 di Laboratorium Termohidrolika Eksperimental, PTRKN Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) Serpong. Simulasi proses pendinginan pada kasus kecelakaan parah di TMI-2 dilakukan secara eksperimental menggunakan bagian uji HeaTiNG-01 (*Heat Transfer in Narrow Gap*). Kemudian, melalui beberapa hasil risetnya[4,5,6], maka telah diketahui bagaimana fenomena pendidihan yang terjadi ketika proses pendinginan debris oleh air pendingin (*coolant*) berlangsung. Bagian uji sebagai simulasi debris berupa silinder panas (*Heated Rod*). Silinder panas memiliki bentuk geometri berupa silinder yang tengahnya berongga yang disebut *heated rod*. Proses perpindahan kalor berdasarkan data perubahan temperatur transien pada titik pengukuran termokopel di daerah (0,3 mm) terdekat dari permukaan luar silinder panas menjadi kajian dalam riset-riset sebelumnya. Namun, penelitian terdahulu tidak menjelaskan bagaimana proses perpindahan kalor konduksi secara radial, dimana analisis perlu dilakukan melalui perhitungan berdasarkan data transien temperatur di dinding silinder panas (*wall meat*).

Berdasarkan kondisi bagian uji HeaTiNG-01 yang telah terinstalasi tidak dapat memberikan hasil pembacaan distribusi temperatur secara radial, sehingga diperlukan desain alat uji baru, yaitu dengan memasang beberapa termokopel pada *wall meat* (daging dinding) silinder panas pada jarak tertentu untuk tebal 10 mm. Analisis distribusi temperatur pada *wall meat* untuk proses pendinginan baik secara radiasi dan pendidihan untuk kondisi transien perlu dilakukan secara eksperimental yang bertujuan memahami perpindahan kalor secara konduksi berdasarkan perubahan data distribusi temperatur pada *wall meat*. Melalui desain baru tersebut maka dibuatlah RISCa (*radially transient temperature distribution inquiry system contrivance*) untuk meneliti distribusi temperatur transien secara radial, sehingga dapat mengetahui perpindahan kalor secara radial selama proses pendinginan, khususnya melalui penenggelaman tiba-tiba objek panas ke dalam air bertemperatur saturasi

(*quenching*). Proses pendinginan tersebut adalah sebagai simulasi proses pendinginan transien berdasarkan eksperimen pada kasus didih kolam (*pool boiling*).

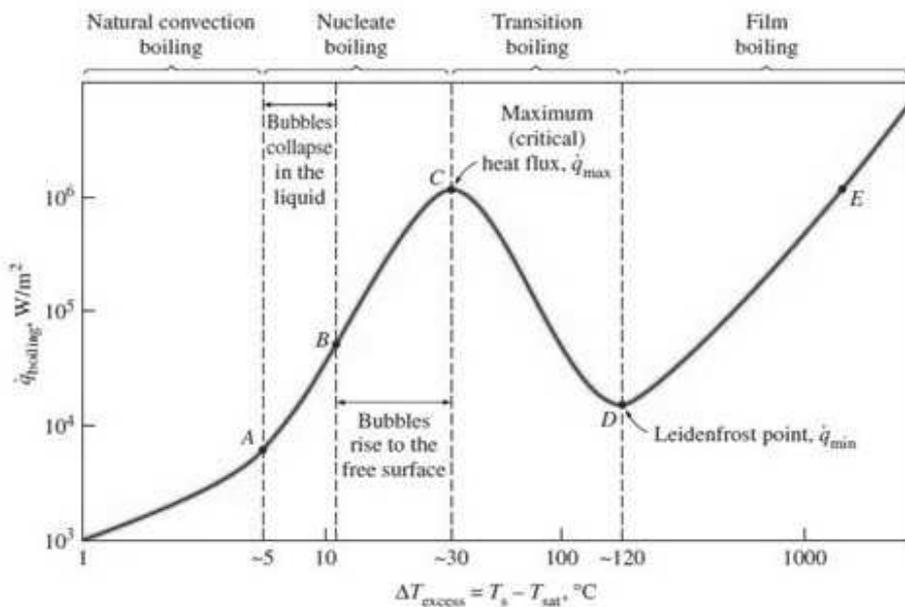
**TEORI**

Perpindahan kalor pendidihan didefinisikan sebagai model perpindahan kalor yang terjadi dengan melibatkan perubahan fasa dari fasa cair menjadi fasa uap. Proses perpindahan kalor pendidihan terbagi menjadi dua jenis yaitu pendidihan kolam dan pendidihan alir. Perpindahan kalor pendidihan kolam dipertimbangkan sebagai perpindahan kalor pendidihan di sekitar permukaan objek panas yang didinginkan pada media fluida tidak bergerak. Sedangkan, rejim pendidihan sendiri telah didefinisikan oleh Nukiyama berdasarkan eksperimen pada pendidihan kolam yang diperlihatkan pada Gambar 1.

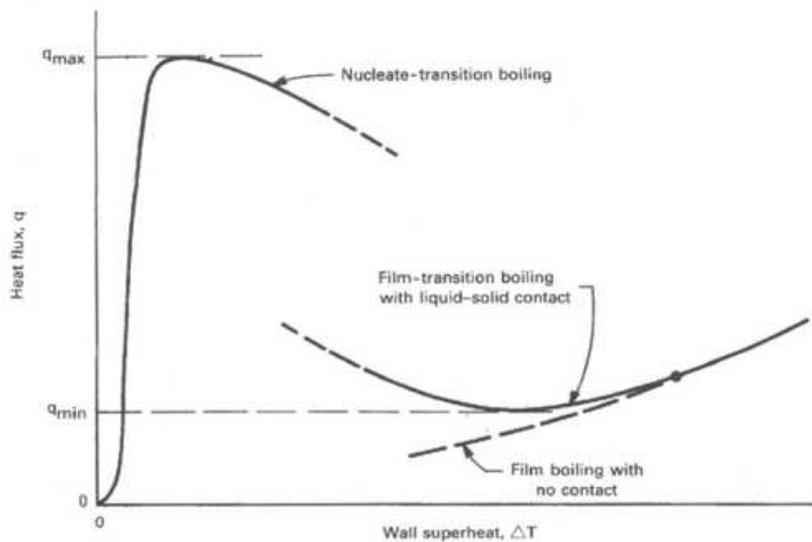
Bentuk kurva pendidihan menunjukkan fluks kalor yang dipindahkan dari permukaan panas menuju pendinginan versus panas lanjut ke arah dinding yang dikenal sebagai kurva didih (*boiling curve*). Perbedaan rejim diklasifikasikan berdasarkan temperatur *wall superheat* (panas lanjut) yaitu perbedaan antara temperatur permukaan dinding ( $T_w$ ) dan temperatur cairan saturasi ( $T_{sat}$ ). Koefisien perpindahan kalor pada kurva didih dinyatakan sebagai:

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_{sat})} \tag{1}$$

dengan  $h$  adalah koefisien perpindahan kalor [ $W/m^2K$ ],  $q''$  adalah fluks kalor [ $W/m^2$ ], dan  $\Delta T_s = (T_w - T_{sat})$  [K atau oC] adalah temperatur *wall superheat*[7].



Gambar 1. Kurva Nukiyama[8]



Gambar 2. Kurva didih transisi[7]

Rejim perpindahan kalor dapat dibedakan menjadi beberapa rejim yaitu:

1. Konveksi bebas, dicirikan dengan konveksi bebas satu fasa dari permukaan panas ke cairan saturasi tanpa adanya pembentukan gelembung.
2. Didih inti, rejim ini merupakan konveksi dua fasa dimana gelembung mulai muncul, tumbuh, dan meninggalkan permukaan panas.
3. Didih transisi, rejim ini adalah rejim yang terjadi ditengah-tengah antara didih inti dan rejim didih film, juga disebut sebagai didih parsial. Penjelasan didih transisi terbagi menjadi dua keadaan dilihat dari ada tidaknya kontak diantara muka air, uap, dan permukaan benda yaitu didih transisi film (tidak ada kontak permukaan benda dengan air) dan didih transisi inti yang merupakan kontak permukaan benda dengan air[7]. Mekanisme tersebut diperlihatkan pada Gambar 2
4. Didih film, rejim ini dicirikan oleh adanya suatu lapisan uap stabil yang terbentuk di antara permukaan panas dan cairan.

Terdapat tiga titik transisi diantara empat rejim. Titik pertama (A) disebut sebagai *incipience of boiling* (IB) atau *onset of nucleate boiling* (ONB), dimana gelembung pertama kali tampak pada permukaan panas. Titik kedua (C) adalah puncak dari kurva dibagian kurva didih inti, disebut sebagai *departure from nucleate boiling* (DNB), *the critical heat flux* (CHF), or *peak heat flux*. Titik transisi terakhir (D) terletak dibagian paling bawah dari rejim didih film dan disebut sebagai titik minimum *film boiling* (MFB) atau *Leidenfrost point*[9].

Didih film fluks kalor mencapai suatu nilai minimum pada saat mencapai nilai  $\Delta T_s$  tertentu, dimana ditunjukkan dengan adanya selimut uap pada seluruh permukaan. Selanjutnya pada saat terjadi penurunan  $\Delta T_s$ , akhir didih film di fluks kalor minimum berhubungan dengan fenomena *rewetting*. Sebagai korelasi kondisi didih film pada permukaan vertikal digunakan korelasi Bromley[10]. Berdasarkan pada stabilitas film uap disekitar silinder horizontal,

$$h_B = \frac{2}{3} \left[ \frac{k_g^3 g \rho_g (\rho_f - \rho_g) \Delta h_{fg}}{\mu_g \Delta T_s L_e} \right]^{0,25} \quad (2)$$

Atau

$$q'' = \frac{2}{3} \left[ \frac{k_g^3 g \rho_g (\rho_f - \rho_g) \Delta h_{fg}}{\mu_g L_e} \right]^{0,25} \Delta T_s^{0,75} \quad (3)$$

Dengan  $L_e$  panjang karakteristik dari instabilitas Taylor dan  $L_h$  adalah panjang yang dipanaskan (*heated length*):

$$\text{Instabilitas Taylor, } \lambda = 2\pi \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right]^{0,5} \quad (4)$$

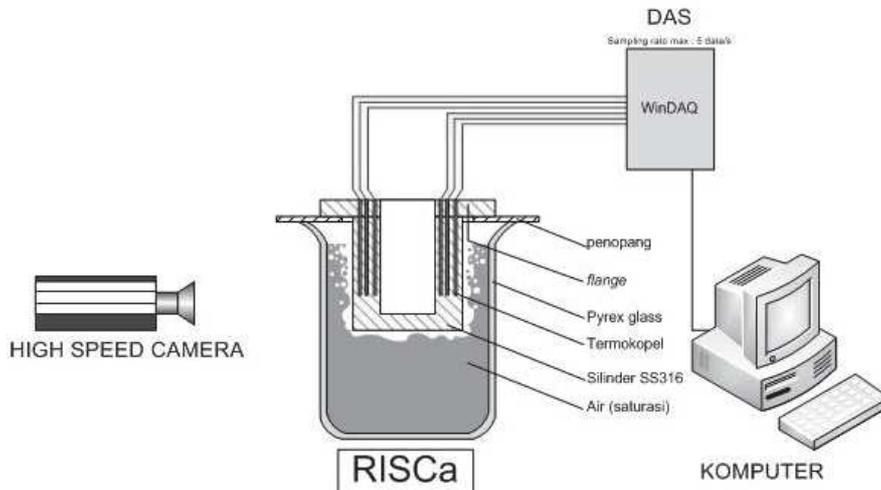
$$L_h < \lambda \rightarrow L_e = L_h$$

$$L_h > \lambda \rightarrow L_e = \lambda$$

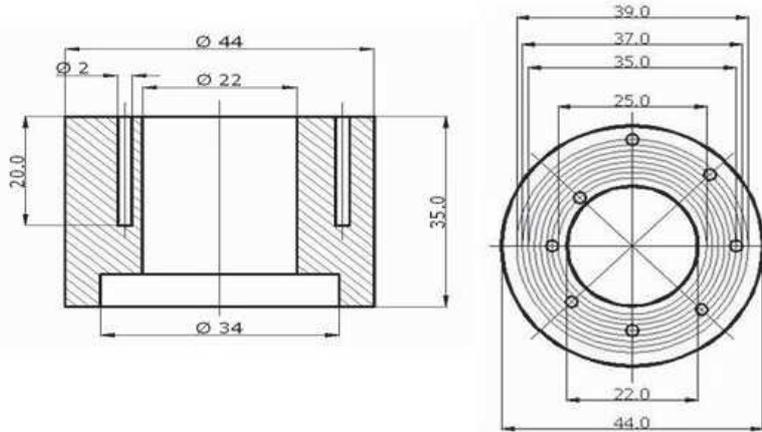
## METODOLOGI

### Peralatan Eksperimen

Objek penelitian yang digunakan diberi nama "RISCa" (*Radially transient temperature distribution Inquiry System Contrivance*) yang merupakan alat uji eksperimen sistem penyelidikan distribusi temperatur transien secara radial. Gambar 3 menunjukkan set-up peralatan eksperimen RISCa.



Gambar 3. Peralatan eksperimen RISCa



Gambar 4. Posisi 8 termokopel pada silinder panas dalam skala milimeter

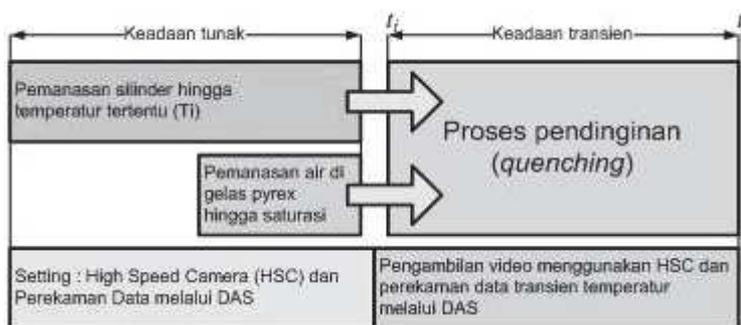
Tabel 1. Posisi radial termokopel berdasarkan penomoran (TC)

| No.Termokopel          | TC1   | TC2 | TC3 | TC4 | TC5 | TC6 | TC7 | TC8  |  |
|------------------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|--|
| Jarak radial, $r$ [mm] | 25    | 27  | 29  | 31  | 33  | 35  | 37  | 39   |  |
| Posisi jari-jari       | DALAM |     |     |     |     |     |     | LUAR |  |

Komponen utama Bagian Uji *RISCa* terdiri dari, silinder panas (*stainless steel SS316*), *Heater* HeaTiNG-01,udukan silinder panas (*flanges, fire brick* dan tiang peyangga), media pencelupan berisi air bertemperatur saturasi (*pyrex glass*), termokopel, DAS, *High Speed Camera* (HSC). Gambar 4 menguraikan geometri ukuran dan posisi penempatan 8 titik termokopel yang dipasang secara radial pada silinder. Jarak radial tiap termokopel adalah 2 mm. Penomoran termokopel dilakukan dari bagian dalam menuju bagian luar secara radial. Detail posisi radial termokopel dan penomoran termokopel ditampilkan pada Tabel 1.

### Prosedur Eksperimen

Eksperimen dilakukan dengan terlebih dahulu dengan memanaskan silinder panas (*heated cylinder*) dengan cara menaikkan daya *heater* secara bertahap, kemudian ketika temperatur awal yang diinginkan tercapai, daya dimatikan. Panas akan meluruh tanpa adanya inputan daya. Sedangkan, pelaksanaan eksperimen secara umum terbagi dalam tahapan berdasarkan urutan kegiatannya seperti ditunjukkan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Diagram tahapan eksperimen quenching

### Pengolahan Data

Pengolahan data eksperimen dilakukan dengan mengolah data masukan temperatur setiap detik. Data primer hasil eksperimen digunakan secara langsung dalam pembuatan kurva distribusi temperatur secara transien. Fluks kalor ditentukan dengan asumsi bahwa fluks kalor yang diukur adalah fluks kalor lokal yang didasarkan pada hasil transien temperatur, dengan luasan area sekitar termokopel (3 mm). Hasil pengukuran dari eksperimen yang pernah dilakukan menunjukkan bahwa nilai fluks kalor umum tidak berbeda jauh dengan nilai fluks kalor lokal, sehingga persamaan dibawah ini dapat digunakan untuk perhitungan fluks kalor lokal,

$$q'' = \frac{m_{ss} c_{p(ss)} dT}{A dt} \quad (5)$$

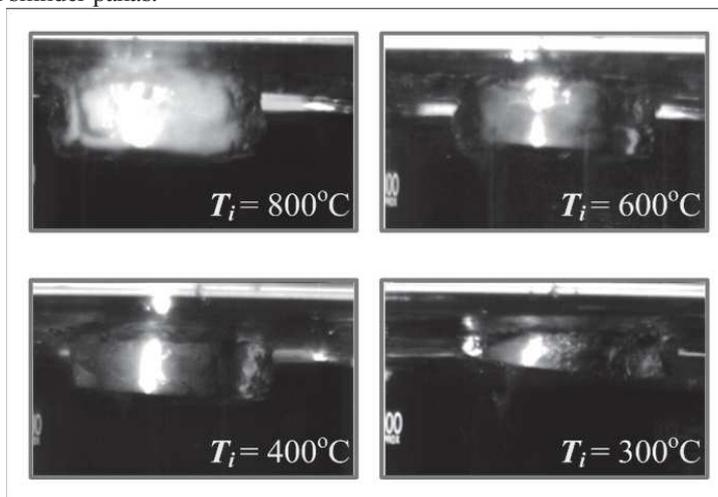
dengan,  $m_{ss} = \rho_{ss} V_{silinder} = \frac{\pi}{4} \rho_{ss} (D_o^2 - D_i^2) L$  untuk  $A = \pi D_o L$

Hasil perhitungan diplot ke dalam kurva didih, yaitu fluks kalor [ $\text{kW/m}^2$ ] versus *wall superheat* [K]. Seluruh pengolahan data dalam pembuatan kurva didih dan kontur temperatur digunakan piranti lunak *Origin 8*. Visualisasi terhadap mekanisme perpindahan kalor pendidihan direkam menggunakan HSC. Pemotongan gambar (*frame*) dari rekaman video diolah menggunakan piranti lunak *AOS Imaging Studio V2.5.2.2*.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Visualisasi Pendidihan Kolan

Fenomena pendidihan kolan yang terjadi selama eksperimen dengan temperatur awal  $800^\circ\text{C}$ ,  $600^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ , dan  $300^\circ\text{C}$  divisualisasi menggunakan HSC. Pengambilan gambar difokuskan saat permulaan air berinteraksi dengan silinder panas (saat pencelupan), karena hal ini sangat penting untuk tujuan keselamatan reaktor nuklir pada saat terjadi kecelakaan terutama pada pemahaman mekanisme yang sebenarnya terjadi antara muka air dengan permukaan silinder panas.



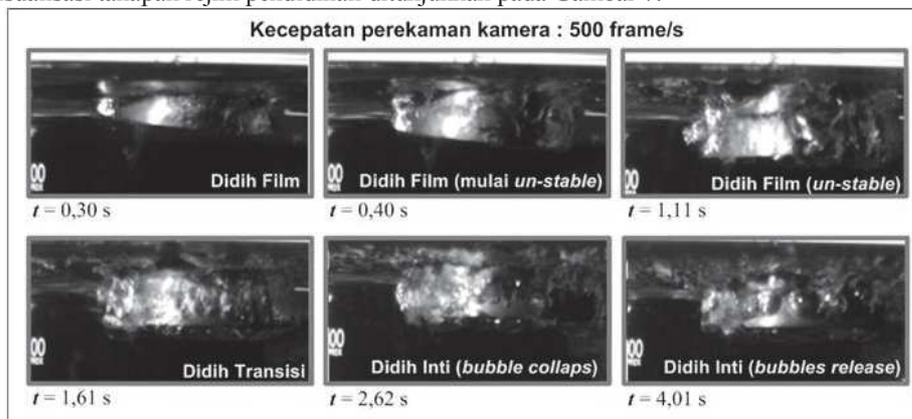
Gambar 6. Awal pencelupan untuk beragam temperatur awal

Proses pendinginan quenching direkam selama rentang waktu 0 detik sampai 6 detik (kemampuan penyimpanan data video di HSC). Waktu permulaan, saat 0 detik ditentukan saat mengamati kontak pertama antara muka air dan permukaan silinder panas. Air pendingin yang berada di dalam gelas *pyrex* adalah air bertemperatur saturasi ( $100^{\circ}\text{C}$ ).

Gambar 6 menunjukkan fenomena pendidihan kolam yang terjadi saat awal pencelupan. Proses pendidihan pada temperatur awal  $800^{\circ}\text{C}$  menunjukkan bahwa silinder panas masih berwarna menyala (merah) akibat masih tingginya temperatur dimana seketika setelah pencelupan ke dalam air saturasi terbentuk lapisan uap (*vapor blanket*) yang menyelimuti seluruh permukaan silinder panas, kondisi ini adalah rejim didih film. Adanya selimut uap tersebut mengakibatkan permukaan silinder panas hanya bersentuhan dengan muka uap, hal ini berarti terjadinya perpindahan kalor secara konveksi dan radiasi terhadap lapisan uap. Sedangkan untuk temperatur awal  $600^{\circ}\text{C}$  dan  $400^{\circ}\text{C}$ , saat detik permulaan menunjukkan masih eksisnya lapisan uap dipermukaan silinder panas, namun kondisi ini nampak berbeda ketika temperatur awal silinder panas yang dicelupkan bertemperatur  $300^{\circ}\text{C}$ . Keadaan lapisan uap atau rejim didih film untuk temperatur awal  $300^{\circ}\text{C}$ , berlangsung secara singkat.

### Visualisasi Rejim Pendidihan

Gambar 7 menunjukkan proses pendidihan yang berlangsung selama 0 – 5 detik untuk temperatur awal  $300^{\circ}\text{C}$ . Visualisasi saat pencelupan berlangsung dilakukan dengan kecepatan kamera 500 frame/s ( $1 \text{ frame} = 2 \text{ ms}$ ). Gambar proses pendidihan yang melibatkan keseluruhan rejim pendidihan (didih film, didih transisi dan didih inti) hanya bisa terekam oleh kamera untuk proses *quenching* pada silinder panas dengan temperatur awal  $300^{\circ}\text{C}$ , sedangkan untuk variasi temperatur awal  $400^{\circ}\text{C}$ ,  $600^{\circ}\text{C}$  dan  $800^{\circ}\text{C}$  tidak tertangkap karena proses pendidihan untuk didih film saja berlangsung rata-rata lebih dari 4 detik. Hasil visualisasi tahapan rejim pendidihan ditunjukkan pada Gambar 7.



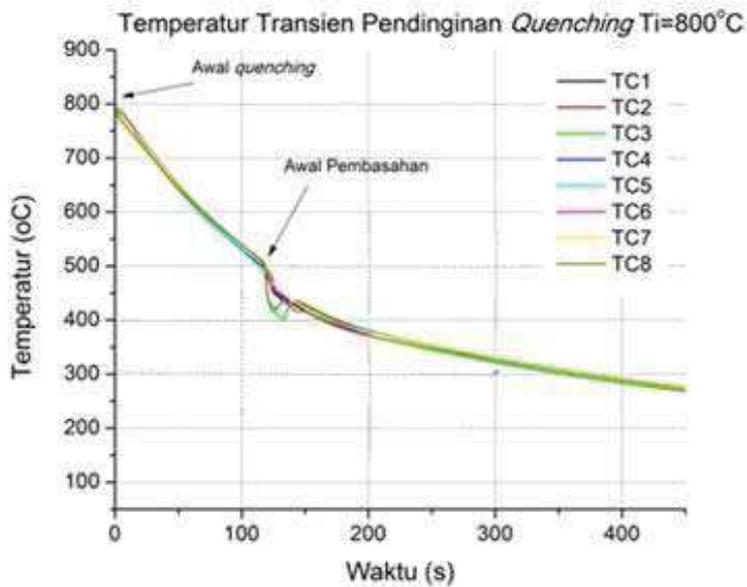
Gambar 7. Mekanisme rejim pendidihan untuk  $T_i=300^{\circ}\text{C}$

Saat 0,3 detik (*frame* ke 151), proses pencelupan diawali pada sisi kanan yang terlebih dahulu tercelup, hal ini terjadi karena saat silinder panas tercelup tidak tegak lurus terhadap air pendingin dan sebagai akibatnya, pada detik pertama tidak seluruh permukaan silinder panas diselimuti oleh lapisan uap hal ini dikarenakan didih film yang terbentuk berlangsung lebih dahulu pada sisi kanan sehingga sisi kanan terlihat mengindikasikan didih film yang tidak stabil. Ketidakstabilan lapisan uap semakin besar sehingga mengindikasikan masuknya ke rejim didih film transisi yang masih belum ada kontak antar muka silinder panas dengan muka air. Kemudian saat 0,4 detik (*frame* ke 200), stabilitas dari didih film

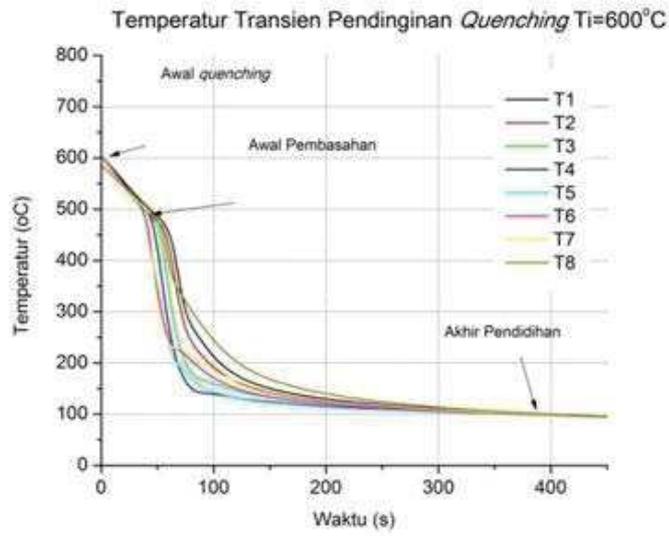
mulai terganggu. Lapisan uap semakin tidak stabil, diperlihatkan kenaikan gelombang instabilitas taylor dipermukaan lapisan antara uap dan air. Kondisi lapisan uap semakin tidak stabil ketika mencapai 1,11 detik (frame ke 556), dimana lapisan uap menjadi tidak merata dan sudah mulai melepaskan gelembung uap ke permukaan, namun permukaan silinder panas masih tetap kering. Kondisi tercapainya didih transisi terjadi saat 1,61 detik (frame ke 806), hal ini ditunjukkannya dengan semakin banyaknya gelembung uap yang terlepas dari permukaan silinder panas dalam berbagai bentuk. Bagian silinder permukaan yang tampak basah mulai terlihat pada posisi yang bergantian. Peristiwa berakhirnya didih transisi terlihat saat 2,62 detik (frame ke 1308), gelembung uap mulai kolaps dan semakin banyak yang terlepas ke permukaan dengan ukuran sedang. Sedangkan bagian permukaan silinder panas yang basah semakin luas. Didih inti masih berlangsung saat 4,01 detik (frame ke 2004), dimana permukaan basah menjadi dominan dan permukaan silinder panas yang melepaskan gelembung semakin sedikit dan melepaskan gelembung dengan bentuk yang kecil.

### Hasil Pengukuran Transien Temperatur

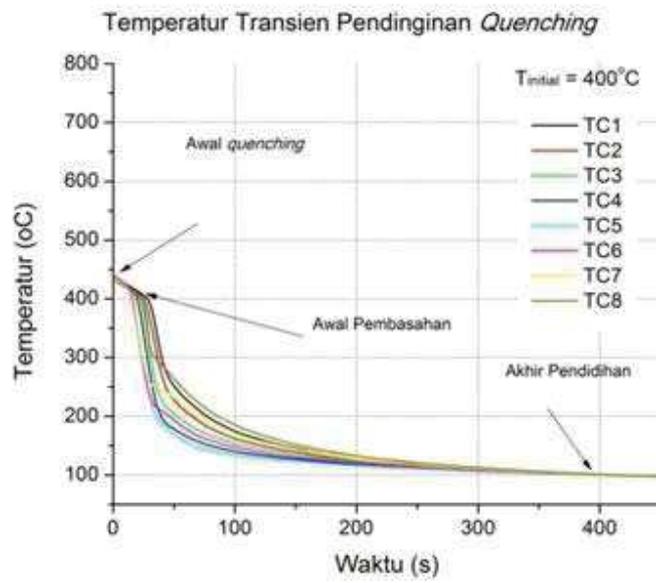
Hasil pengukuran temperatur transien pendinginan quenching berdasarkan perubahan temperatur awal silinder panas adalah 800°C, 600°C, 400°C, dan 300°C disajikan sebagai distribusi temperatur terhadap waktu untuk pendinginan radiasi pada pada Gambar 8, 9, 10 dan 11. Kurva temperatur transien pendinginan *quenching* untuk temperatur awal 800°C (Gambar 8) menguraikan data yang disajikan mulai dari awal pencelupan hingga terjadi konveksi bebas. Pendinginan pada akhirnya terjadi secara konveksi bebas.



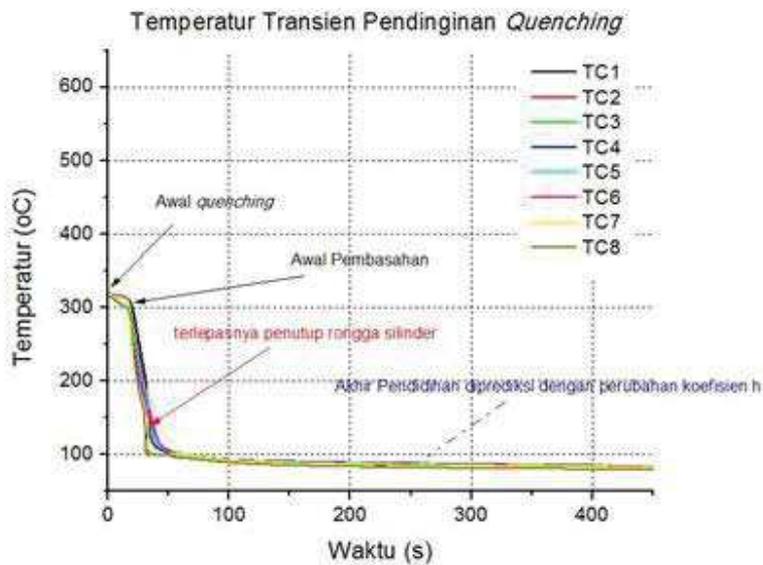
Gambar 8. Kurva temperatur transien pendinginan *quenching*  $T_i=800^\circ\text{C}$



Gambar 9. Kurva temperatur transien pendinginan *quenching*  $T_i=600^\circ\text{C}$



Gambar 10. Kurva temperatur transien pendinginan *quenching*  $T_i=400^\circ\text{C}$



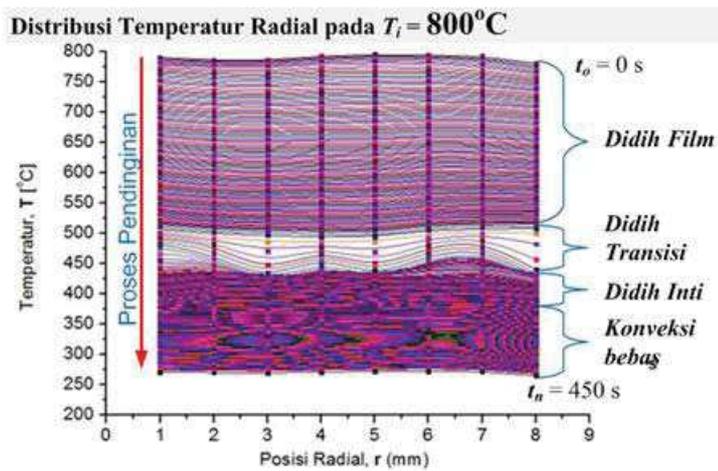
Gambar 11. Kurva temperatur transien pendinginan *quenching*  $T_i=300^\circ\text{C}$

Gambar 9 dan 10 merupakan kurva temperatur transien pendinginan *quenching* dengan temperatur awal  $600^\circ\text{C}$  dan  $400^\circ\text{C}$ , kedua gambar menunjukkan bagaimana proses pembasahan ulang (*rewetting*) berakhir pada permukaan silinder panas secara radial. Sedangkan dinding terluar ( $T8$ ) tampak lebih dulu terbasahi yaitu lebih cepat selesai proses pembasahannya daripada dinding yang terdalam. Gambar 11 merupakan kurva temperatur transien pendinginan kasus *quenching* untuk temperatur awal  $300^\circ\text{C}$  yang penurunan temperaturnya yang terjadi secara cepat. Terlepasnya penutup silinder terjadi pada rejim didih inti, dan hal ini tidak mempengaruhi proses pendidihan yang berlangsung.

Kurva transien temperatur yang ditunjukkan mulai Gambar 8, 9, 10 hingga 11 memperlihatkan, bahwa daerah transien didih film berlangsung dalam waktu yang semakin cepat berdasarkan pengurangan temperatur awal silinder panas. Waktu tersingkat terjadi untuk temperatur awal  $300^\circ\text{C}$ , dalam hal ini proses pendidihan terjadi di bawah 5 detik.

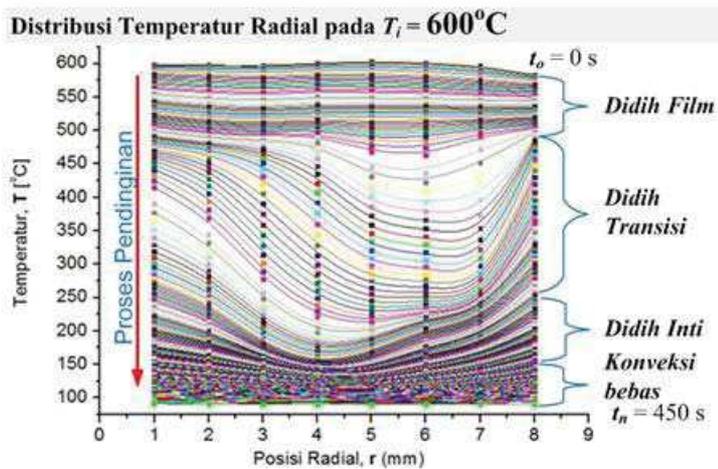
#### Pola Perubahan Temperatur pada Posisi Radial

Distribusi temperatur radial menunjukkan bagaimana perubahan nilai temperatur terhadap jari-jari (radius) dalam daging silinder panas saat pendinginan. Gambar 12, 13, 14 dan 15 menunjukkan distribusi temperatur radial pendinginan *quenching* selang waktu 0 - 450 detik, dimana arah pendinginan dari detik awal ( $t_i$ ) turun kebawah hingga detik akhir yang ditentukan ( $t_n$ ). Perubahan nilai temperatur setiap radius 2 mm memiliki pola beragam dari detik ke 0 hingga detik ke 450. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, bahwa transien temperatur untuk temperatur awal  $800^\circ\text{C}$  terjadi begitu lama yang sekaligus menunjukkan eksistensi lapisan uap atau rejim didih film terjadi cukup lama. Hal tersebut ditunjukkan degradasi temperatur pada setiap titik radial tidak begitu berbeda.

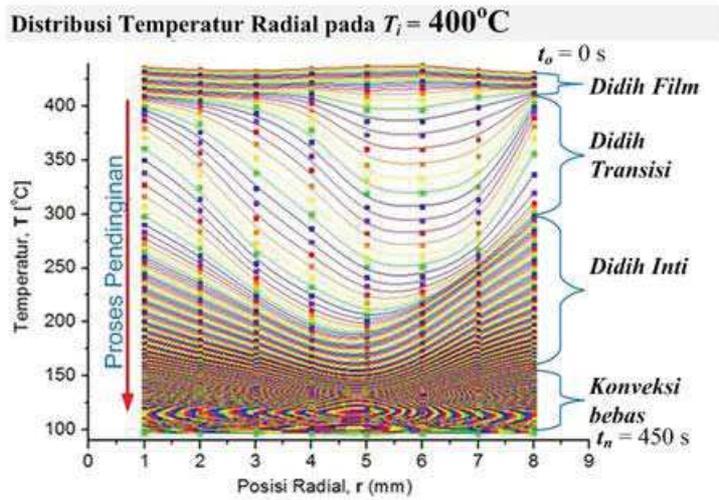


Gambar 12. Distribusi temperatur radial pada  $T_i=800^\circ\text{C}$  untuk  $\Delta t=450$  detik

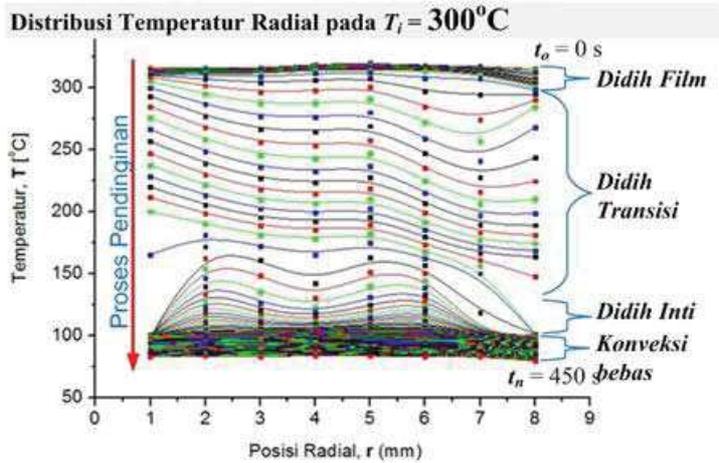
Kemudian daerah didih transisi ditunjukkan dengan degradasi temperatur pada setiap titik radial mengalami fluktuasi yang besar dan penurunan temperatur setiap detik cukup besar. Didih inti ditunjukkan masih adanya degradasi temperatur yang cenderung tidak sama pada setiap titik radial. Konveksi bebas ditandai dengan hampir meratanya temperatur pada setiap titik radial.



Gambar 13. Distribusi temperatur radial pada  $T_i=600^\circ\text{C}$  untuk  $\Delta t=450$  detik



Gambar 14. Distribusi temperatur radial pada  $T_i=400^\circ\text{C}$  untuk  $\Delta t=450$  detik

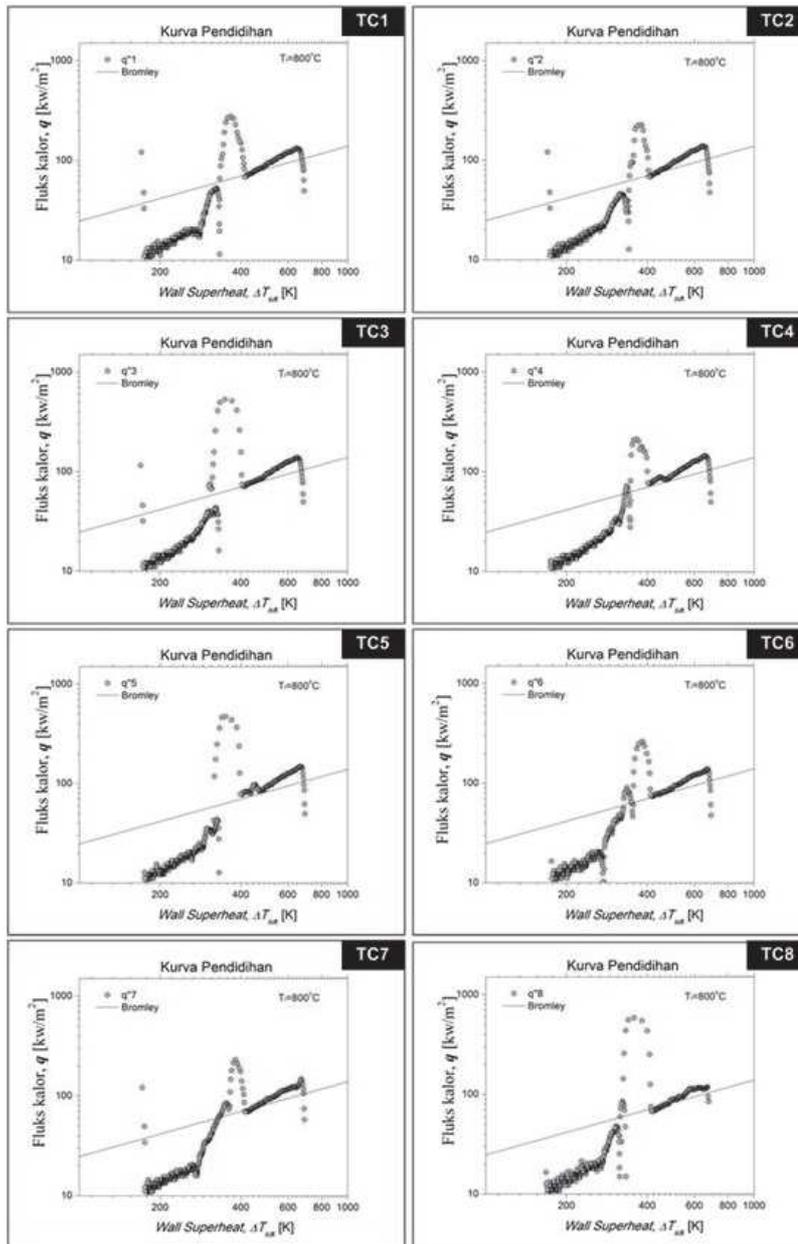


Gambar 15. Distribusi temperatur radial pada  $T_i=300^\circ\text{C}$  untuk  $\Delta t=450$  detik

Berdasarkan Gambar 12 untuk temperatur awal  $800^\circ\text{C}$  yang menjelaskan pola distribusi temperatur pada setiap titik radial selama 450 detik, dimana identifikasi perubahan rejim didih dan konveksi bebas bisa dijelaskan dengan degradasi temperatur setiap titik radial. Sehingga, untuk Gambar 13, 14 dan 15 yang secara berturut-turut menunjukkan proses *quenching* untuk temperatur awal silinder panas  $600^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$  dan  $300^\circ\text{C}$  dapat menyimpulkan bahwa, semakin rendah temperatur awal silinder panas akan ditandai semakin mengecilnya area didih film. Sedangkan pada daerah didih transisi menunjukkan pola yang sama, yaitu terjadi fluktuasi temperatur atau degradasi yang besar pada setiap titik radialnya.

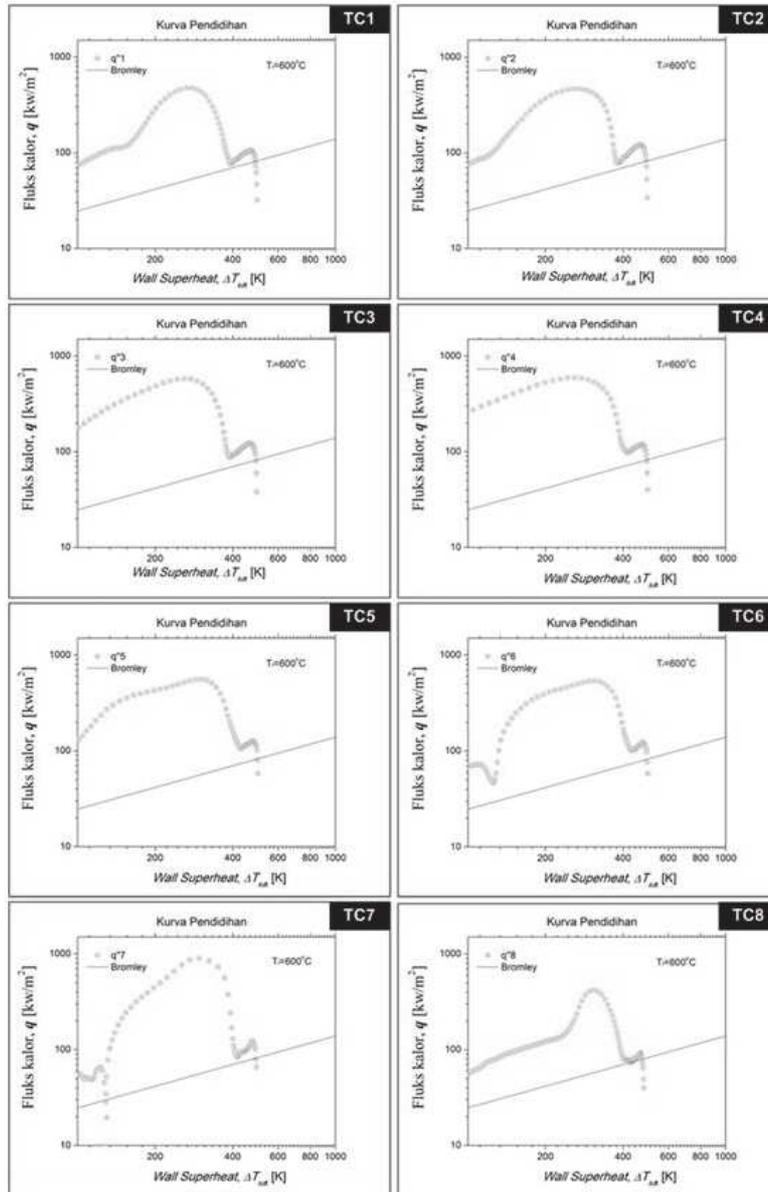
### Hasil Perhitungan Fluks Kalor

Data transien temperatur selama *quenching* digunakan untuk menghitung fluks kalor menggunakan persamaan (4) dan kemudian korelasi Bromley digunakan sebagai pembanding untuk rejim didih film. Hasil perhitungan fluks kalor berupa kurva didih yang membandingkan fluks kalor dan *wall superheat* ditunjukkan pada Gambar 16, 17, 18 dan 19 untuk masing-masing temperatur awal 800°C, 600°C, 400°C dan 300°C.



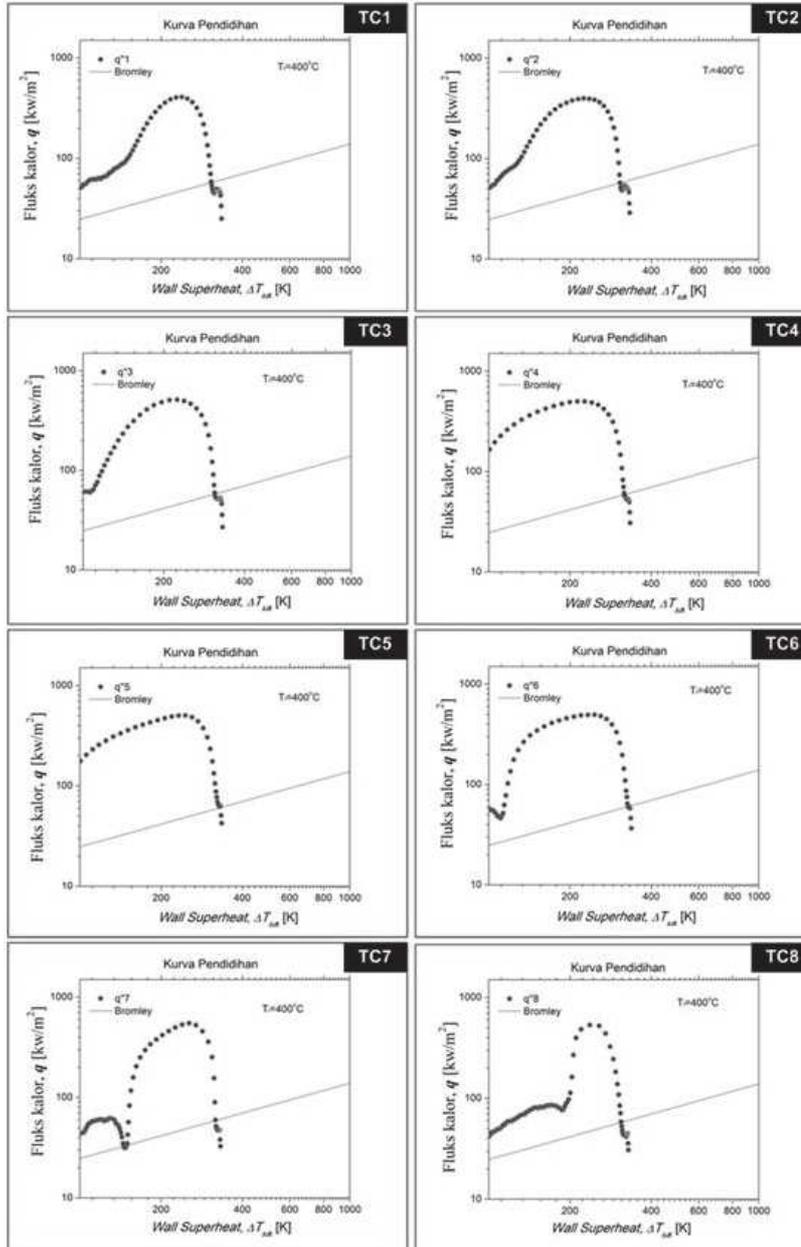
Gambar 16. Kurva didih proses *quenching* pada  $T_i=800^\circ\text{C}$

Gambar 16 menunjukkan kurva didih untuk temperatur awal 800°C, seperti yang telah diperlihatkan pada hasil visualisasi (Gambar 6) dan distribusi temperatur secara radial (Gambar 12) yang menunjukkan rejim didih film berlangsung lama, dan kondisi tersebut ditunjukkan dengan terbentuknya rejim didih film pada kurva didih yang panjang. Keadaan yang menarik adalah, rejim didih film memiliki panjang yang sama untuk semua titik radial dan menjelaskan bahwa perubahan temperatur setiap setiap titik radial tidak begitu besar. Fluks kalor kritis di bagian luar (TC8) adalah 700 kW/m<sup>2</sup>.



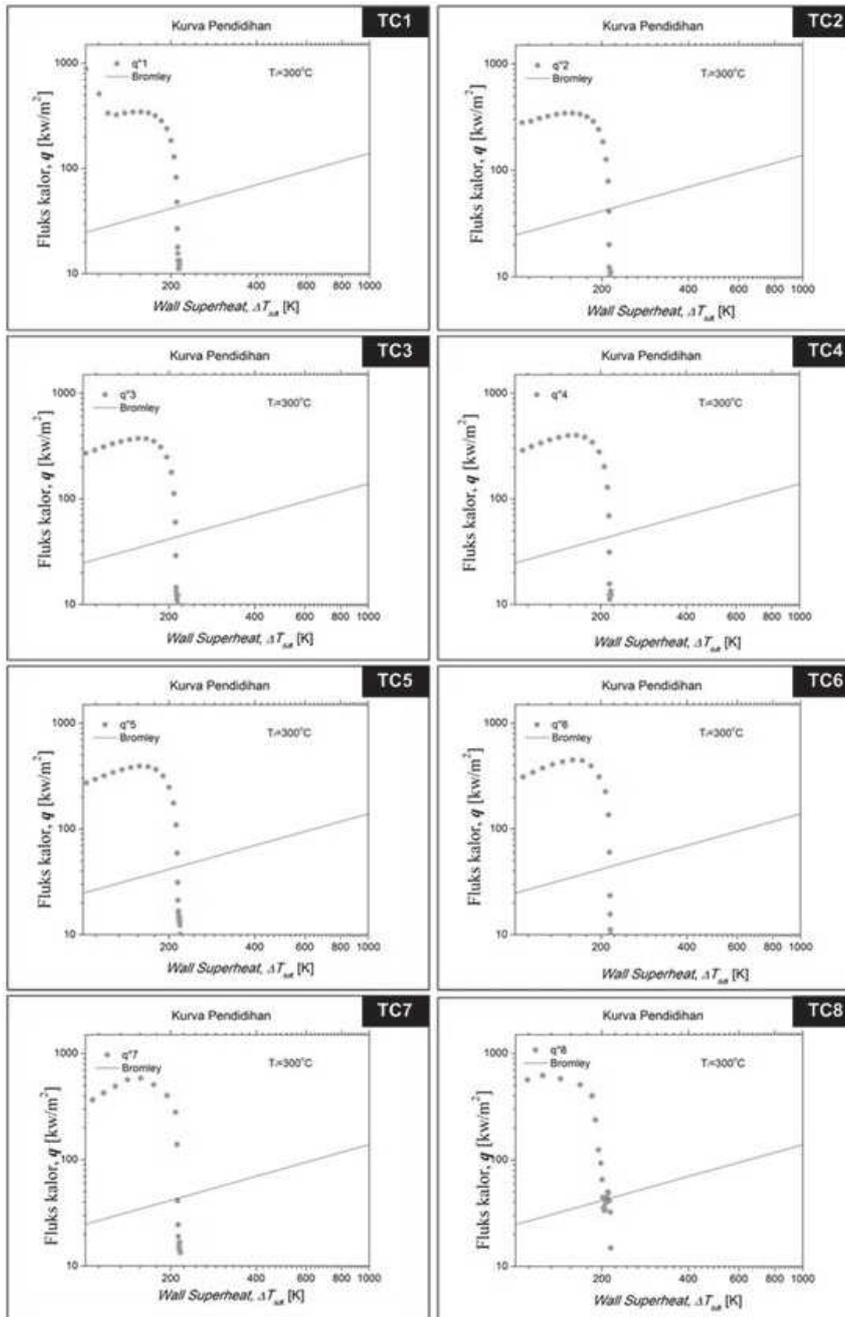
Gambar 17. Kurva didih proses *quenching* pada  $T_i=600^\circ\text{C}$

Gambar 17, 18 dan 19, menunjukkan kurva didih untuk temperatur awal 600°C, 400°C dan 300°C. Ketiga gambar kurva didih menunjukkan bahwa rejim didih film semakin pendek ketika temperatur awal silinder panas semakin rendah. Fluks kalor kritis untuk temperatur awal 600°C hampir sama pada titik radial ke 1 hingga ke 7 (TC1 – TC7), sedangkan pada bagian luar (TC8) agak rendah dibandingkan rata-ratanya. Sedangkan pada temperatur awal 400°C, fluks kalor kritisnya hampir sama pada seluruh titik radial (TC1-TC8).



Gambar 18. Kurva didih proses *quenching* pada  $T_i=400^{\circ}\text{C}$

Gambar 18 dan 19, menunjukkan eksistensi rejim didih film semakin berkurang. Keadaan ini memperjelas bahwa stabilitas lapisan uap tidak dapat bertahan lama untuk temperatur yang lebih rendah dari 600°C. Fluks kalor kritis pada TC8 untuk temperatur awal 400°C adalah 450 kW/m<sup>2</sup>, nilai ini di bawah kondisi temperatur awal 600°C dan 800°C.



Gambar 19. Kurva didih proses *quenching* pada  $T_i=300^\circ\text{C}$

Gambar 19 yang menunjukkan *quenching* pada temperatur awal 300°C, mempertegas bahwa pada bagian dalam (TC1 hingga TC7), daerah didih film tidak terdeteksi. Didih film hanya terdeteksi pada bagian di dekat permukaan, yaitu pada titik TC8, dengan ukuran yang pendek namun berada pada garis korelasi Bromley. Fluks kalor kritis untuk kasus temperatur awal 300°C pada TC8 mencapai 400 kW/m<sup>2</sup>.

Terdapat kesamaan untuk rejim didih film pada kasus 800°C dan 600°C, yaitu kurva rejim didih film hasil eksperimen pada titik radial terluar yaitu TC8 (2 mm dari permukaan luar silinder dan permukaan kontak dengan air) sangat sesuai dengan garis korelasi Bromley. Fluks kalor kritis pada TC8 untuk temperatur awal 600°C adalah 500 kW/m<sup>2</sup>. Sedangkan untuk titik TC1 hingga TC7, rejim didih film hasil eksperimen rata-rata berada di atas garis korelasi Bromley yang dihasilkan berdasarkan data temperatur pada permukaan antara benda panas dan fluida eksperimen. Hasil ini mempertegas bahwa, meskipun termokopel berada kurang lebih 2 mm di bawah permukaan bagian luar silinder yang berhubungan dengan air, rejim didih film tetap sesuai dengan garis korelasi Bromley.

## KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menyimpulkan beberapa hal, sebagai berikut:

1. Eksistensi daerah didih film terjadi hingga 4 detik lebih untuk temperatur awal 800°C, 600°C dan 400°C, sedangkan pada temperatur awal 300°C terjadinya proses didih film terjadi selama 1,11 detik.
2. Distribusi temperatur secara radial dapat dijadikan acuan untuk menentukan rejim didih dan konveksi bebas berdasarkan pola yang terbentuk pada kurva temperatur versus posisi radial termokopel. Pola yang menunjukkan fluktuasi temperatur yang tinggi pada setiap titik radial mengindikasikan rejim didih transisi (*un-stable film boiling*). Degradasi temperatur pada titik radial tidak begitu signifikan untuk rejim didih film, didih inti dan konveksi bebas.
3. Pembacaan temperatur akan semakin baik untuk posisi termokopel yang semakin mendekati permukaan silinder bagian luar yang berhubungan dengan air (fluida) dimana konveksi terjadi. Posisi termokopel terluar (TC8) yang berjarak 2 mm dari permukaan terluar, sesuai dengan prediksi Bromley untuk kasus didih kolam.
4. Fluks kalor kritis di titik terluar (TC8) untuk temperatur awal 800°C adalah 700 kW/m<sup>2</sup>, untuk 600°C adalah 500 kW/m<sup>2</sup>, untuk 400°C adalah 450 kW/m<sup>2</sup> dan untuk 300°C adalah 400 kW/m<sup>2</sup>.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada Ainur Rosidi yang telah mengoperasikan HSC dan membantu selama eksperimen, serta Ismu Handoyo yang bersama penulis mendesain RISCa. Kepada Ka. BOFa, Kasub. Termohidrolika dan teman-teman termohidrolika ucapan terimakasih atas dukungan dan bantuannya.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Broughton JM, Kuan P, Petti DA and Tolma EL. A Scenario on the three mile island unit 2 accident. Nuclear Technology. 2005;87(1):34-5.
2. How the safety of npp is secured in policy terms. Hopes to Make Safe More Secured. Serial, NPP Safety Demonstration/Analysis, ANRE & MITI Japan; 2001.
3. World Nuclear Association. Three Mile Island Accident. [cited 2010 December 25]. Available: <http://www.world-nuclear.org/info/inf36.html>.
4. Juarsa M. Simulasi eksperimental kecelakaan parah pada pemahaman aspek manajemen kecelakaa. J Tek Pengolahan Limbah. Juli 2007; 10(1):58-65.
5. Juarsa M, Umar E, Widiharto A. Analisis fluks kalor pada celah sempit anulus dengan variasi temperatur awal menggunakan bagian uji HeaTiNG-01. BATAN-ITB. Bandung, 2009: 72-80.
6. Juarsa M, Wahono PI, Antariksawan AR. Studi fenomena perpindahan panas pendidihan berdasarkan peristiwa LOCA dan kecelakaan parah. J Nas Sains dan Teknologi Nuklir. Agustus 2009; IX(2);1-15.
7. Lienhard IV JH. Lienhard V JH. A heat transfer textbook. 3th ed. Cambridge: Phlogiston Press; 2002.
8. De Witt DP. and Frank P, Incropera FP. Fundamental of heat transfer. John New York: Wiley & Sons, Inc; 1981.
9. Bejan A. and Kraus AD. Heat transfer hand book. Canada:John Wiley & Sons; 2003.
10. Bromley LA. Heat transfer in stable film boiling. Chem Eng Progress 1950; 46:221-32.