

ANALISA FLUKS KALOR KRITIS PADA PERUBAHAN SUHU PELAT DAN LAJU ALIRAN AIR PENDINGIN UNTUK KASUS PEMANASAN-GANDA DI CELAH SEMPIT REKTANGULAR

M. Hadi Kusuma¹, Mulya Juarsa¹, Anhar Riza Antariksawan²

¹Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional,
Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang 14310

²Penelitian Dasar dan Terapan, Badan tenaga Nuklir Nasional

Email: luluikal@batan.go.id

Diterima editor 09 Januari 2013

Disetujui untuk publikasi 11 Februari 2013

ABSTRAK

ANALISA FLUKS KALOR KRITIS PADA PERUBAHAN SUHU PELAT DAN LAJU ALIRAN AIR PENDINGIN UNTUK KASUS PEMANASAN-GANDA DI CELAH SEMPIT REKTANGULAR.

Fenomena perpindahan kalor pendidihan pada celah sempit rektangular merupakan fenomena yang berhubungan dengan keselamatan reaktor nuklir. Untuk itu perlu dilakukan penelitian tentang hal tersebut di atas agar didapatkan pemahaman yang benar tentang keselamatan reaktor nuklir dari sisi perpindahan kalor pendidihan dan juga dapat berguna bagi perbaikan desain reaktor generasi selanjutnya. Penelitian difokuskan pada perhitungan fluks kalor selama proses pendinginan di celah sempit rektangular berukuran 1,0 mm, dengan suhu awal pelat rektangular 200 °C, 400 °C, dan 600 °C serta laju aliran air pendingin yang masuk ke dalam celah sempit rektangular 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik. Eksperimen dilakukan dengan menginjeksikan air pada laju aliran tertentu dengan suhu air 85°C. Data transien suhu hasil pengukuran direkam melalui sistem akuisisi data (DAS, *data acquisition system*). Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh hubungan fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan kalor terhadap perubahan suhu pelat dan laju aliran air pendingin untuk kasus pemanasan-ganda di celah sempit rektangular. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa pada suatu nilai laju aliran air pendingin yang sama, semakin besar suhu pelat panas maka akan semakin besar pula nilai fluks kalor kritis yang dihasilkan. Sedangkan pada suatu nilai suhu pelat panas yang sama, semakin besar laju aliran air pendingin maka akan menghasilkan nilai koefisien perpindahan kalor yang semakin besar pula. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa laju aliran air pendingin dan suhu pelat panas memiliki pengaruh yang signifikan pada nilai fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan kalor yang dihasilkan pada proses *quenching* celah sempit rektangular dengan kasus pemanasan ganda.

Kata Kunci: pendidihan, kalor, celah sempit, rektangular, aliran

ABSTRACT

CRITICAL HEAT FLUX ANALYSIS ON CHANGE OF PLATE TEMPERATURE AND COOLING WATER FLOW RATE FOR RECTANGULAR NARROW GAP WITH BILATERAL-HEATED CASES.

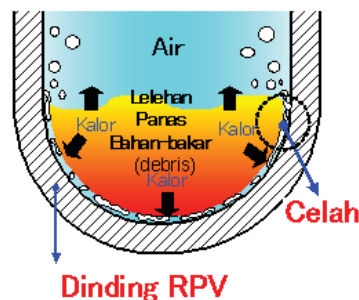
Boiling heat transfer phenomena on rectangular narrow gap was related to the safety of nuclear reactors. Research done in order to study the safety of nuclear reactors in particular relating to boiling heat transfer and useful on the improvement of next-generation reactor designs. The research focused on calculation of the heat flux during the cooling process in rectangular narrow gap size 1.0 mm, with initial temperatures 200 °C, 400 °C, and 600 °C, also the flow rates of cooling water 0,1 liters/second, 0,2 liters/second, and 0,3 liters/second. Experiments carried out by injecting water at a certain flow rate with the water temperature 85 °C. Transient temperature measurement data recorded by the data acquisition system. Transient temperature measurement data is used to calculate the flux of heat gain is then used to obtain the heat transfer coefficient. This research aimed to obtain the correlation between critical heat flux and heat transfer coefficient to changes in temperatures and water flow rates for bilaterally-heated cases on rectangular narrow gap. The results obtained for a constant cooling water flow rate, critical heat flux will increase when hot plate temperature also increased. While on a constant hot plate temperature, coefficient heat transfer will increase when cooling water flow rate also increased. Thus it can be said that the cooling water flow rate and temperature of the hot plate has a significant effect on the critical heat flux and heat transfer coefficient resulted in quenching process of vertical rectangular narrow gap with double-heated cases.

Keywords: boiling, heat, narrow gap, rectangular, flow

PENDAHULUAN

Meningkatnya kebutuhan energi saat ini mendorong pemerintah untuk mencari sumber energi baru yang ramah lingkungan. Salah satu alternatifnya adalah penggunaan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Namun tidak bisa dipungkiri, setiap penggunaan teknologi pasti mendatangkan manfaat dan juga kerugian yang ditimbulkan. Salah satu kerugian yang akan terjadi dalam penggunaan PLTN adalah potensi terlepasnya zat radioaktif apabila terjadi kecelakaan dan kegagalan dalam pengoperasiannya. Hal ini akan memberikan dampak bagi pekerja dan masyarakat di sekitarnya. Seperti diketahui pernah terjadi kecelakaan PLTN di dunia, diantaranya adalah kecelakaan PLTN Three Mile Island Unit 2 (TMI-2), Amerika Serikat, tahun 1979, kecelakaan PLTN Chernobyl, Ukraina, tahun 1986 dan kecelakaan PLTN Fukushima, Jepang, 2011.

Banyak penelitian dilakukan untuk menjamin tingkat keselamatan PLTN, salah satu penelitian yang saat ini masih terus dilakukan adalah permasalahan yang berhubungan dengan interaksi antara lelehan teras di bagian bawah bejana dengan dinding bejana reaktor yang membentuk celah sempit diantara keduanya. Celah sempit yang terisi fluida ini menjadi kunci untuk penanganan integritas bejana reaktor. Gambar 1 menunjukkan interaksi antara lelehan teras dengan dinding bejana reaktor yang membentuk celah sempit diantara keduanya.



Gambar 1. Konfigurasi keadaan debris pada bagian bawah *Reactor Pressure Vessel*

Maruyama et al. [1] melakukan eksperimen ALPHA dengan program CAMP. Antariksawan [2] dengan program MELCOR juga mengindikasikan adanya celah sempit antara lelehan teras yang bagian luarnya membeku dengan dinding bejana reaktor. Hidaka et al. [3] melakukan analisis dengan program SCDAPSIM dan memprediksi adanya celah dengan ukuran lebar celah 1,0 mm dan pengaruh air yang mengisi celah sempit itu mempengaruhi fenomena perpindahan kalornya. Kandlikar [4] mengklasifikasikan celah sempit berdasarkan ukuran celahnya. Kategori celah sempit adalah celah yang mencakup ukuran celah mikro, celah mini dan celah konvensional dengan range ukuran celahnya dari 0,02 mm sampai 3 mm.

Penelitian perpindahan kalor pada celah sempit telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Penelitian pada celah sempit anulus dengan ukuran 0,5 mm, 1 mm dan 2 mm dan efek suhu awal terhadap fluks kalor kritis dalam celah sempit rektanguler dengan bilateral heated menunjukkan kesesuaian terhadap korelasi laju aliran uap laminer dengan angka Nusselt 5 dan fluks kalor kritis pada rektanguler bagian dalam yang dipanaskan lebih tinggi daripada rektanguler bagian luar yang dipanaskan [5-6]. Penelitian lain yang pernah dilakukan peneliti sebelumnya menggunakan fluida Refrigeran, Methanol dan air. Hasil analisisnya menunjukkan bahwa kecepatan liquid, subcooling, sifat fluida dan ukuran celah memiliki pengaruh yang signifikan dalam karakteristik perpindahan kalor, performansi pendinginan, dan transisi pola aliran. Pola alirannya berbentuk gelembung bola, gelembung datar, slug dan bubble [7-8].

Berbagai penelitian yang telah dilakukan dengan berbagai variasi variabel yang diduga berpengaruh terhadap karakteristik perpindahan kalornya tersebut, masih menunjukkan adanya beberapa parameter yang belum diamati. Salah satunya adalah kombinasi antara variasi perubahan suhu pelat rektanguler dan laju aliran air pendingin. Untuk itu, perlu dilakukan analisis fluks kalor kritis pada perubahan suhu pelat dan laju aliran pendingin untuk kasus pemanasan-ganda di celah sempit rektanguler. Tujuan penelitian ini adalah memperoleh hubungan fluks kalor kritis dan koefisien

perpindahan kalor terhadap perubahan suhu pelat dan laju aliran air pendingin untuk kasus pemanasan-ganda di celah sempit rektangular.

TEORI

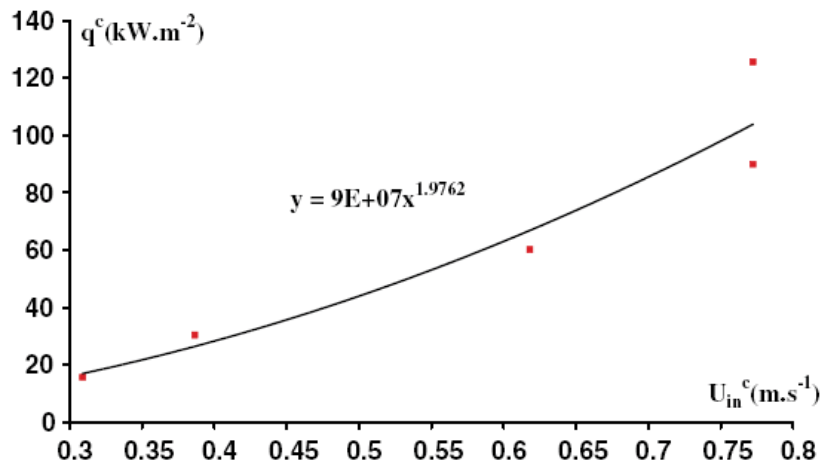
Konfigurasi celah sempit memiliki pengaruh yang sangat berarti dalam meningkatkan perpindahan kalor. Pada ukuran celah sempit $> 3\text{mm}$, gelembung akibat pendidihan tidak terbentuk dan bentuk pendidihan alirnya sangat mirip dengan pendidihan konveksi paksa pada pipa vertikal. Pada lebar celah sempit $< 3\text{ mm}$, gelembung yang berbatasan bergabung dan satu titik permukaan pemanas ditutupi oleh uap atau cairan. Dan bentuk pendidihan alirnya tidak hanya bergantung pada ukuran celah sempit, tapi juga bergantung pada proses pemanasannya, ukuran celah dan fluks kalornya. Semakin kecil ukuran celah maka semakin besar koefisien perpindahan kalor ketika fluks kalornya rendah. Pada kondisi suhu awal yang sama dan ukuran celahnya besar, maka rewetting pada dinding bagian dalam akan lebih cepat terjadi pada fluks kalor yang lebih tinggi dan fluks kalor kritis juga tinggi. Karakteristik aliran dan perpindahan kalor pada bilaterally-heated narrow annuli menunjukkan bahwa karakteristik perpindahan kalor dipengaruhi oleh rasio dari fluks panas pada dinding dalam terhadap dinding luar saluran, dan ukuran celahnya. Pada kondisi aliran laminar, pengurangan ukuran celah mengakibatkan menurunnya perpindahan kalor pada dinding dalam dan dinding luar. Sedangkan pada kondisi turbulen, pengurangan ukuran gap akan mengakibatkan menurunnya perpindahan kalor pada dinding saluran bagian dalam, namun akan mengakibatkan meningkatnya koefisien perpindahan kalor pada dinding saluran bagian luar. Sedangkan dengan memperkecil ukuran celah, nilai fluks kalor kritis akan meningkat dan kehilangan tekanan akan naik secara simultan. Pada proses quenching (pendinginan mendadak) pelat rektangular menunjukkan bahwa rejim didih film yang terbentuk merupakan daerah dimana permukaan suatu bidang yang panas tidak bersentuhan dengan air, hanya tertutupi oleh uap yang berbatasan dengan air. Keadaan ini cukup berbahaya bila berlangsung lama. Kondisi ini mengakibatkan gas yang dihasil selama pemanasan tertumpuk di sepanjang celah sempit dan mengakibatkan terjadinya counter current flow yang membatasi secara signifikan perpindahan kalor selama pendinginan celah sempit [7-13]. Untuk kasus pendinginan benda panas secara flow boiling, fluks kalor kritis yang terbentuk akan meningkat seiring dengan kenaikan laju aliran air pendingin yang dialirkan ke benda panas tersebut. Fenomena ini digambarkan dalam korelasi yang didapatkan oleh L. Tadriss. Korelasi tersebut tersebut menggambarkan bahwa fluks kalor kritis akan meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan inlet kritis cairan yang dialirkan untuk mendinginkan benda panas yang memiliki celah sempit [14].

$$q^c = \left(R_{fb} \frac{\rho_1^2 \rho_v}{\rho_1 - \rho_v} \right)^{\frac{1}{2}} h_{1g} u_{in}^c \quad (1)$$

dengan:

- q^c = fluks kalor kritis (kW/m^2)
- u_{in}^c = kecepatan inlet kritis (m/s)
- R_{fb} = *pressure different governing the liquid flow* (Pa)
- h_{1g} = kalor laten penguapan (Joule)
- ρ_1 = densitas gas (kg/m^3)
- ρ_v = densitas cairan (kg/m^3)

Variasi dari fluks kalor kritis dan kecepatan inlet kritis yang didapatkan dari korelasi tersebut digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Variasi dari fluks kalor kritis dan kecepatan inlet kritis pada pendidihan n-pentane dengan diameter hidrolis 0,9 mm [14]

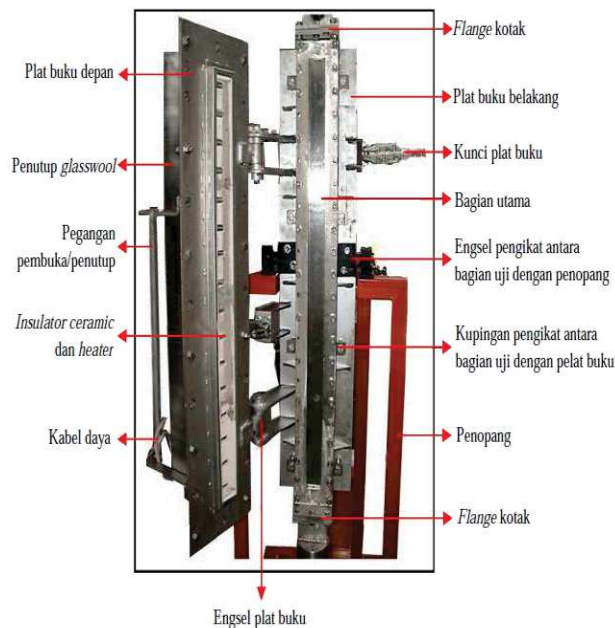
METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metodologi eksperimental dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Melakukan eksperimen untuk memperoleh data perpindahan kalor pada *vertical rectangular narrow gap* dengan parameter suhu pelat rektangulir dan laju aliran air pendingin.
- Menghitung fluks kalor dan koefisien perpindahan kalornya.
- Melakukan analisis terhadap hasil yang telah didapatkan.
- Menarik kesimpulan dari hasil analisa yang didapatkan.

Peralatan Eksperimen

Alat yang digunakan dalam eksperimen ini adalah bagian uji HeaTiNG-02. Bagian uji HeaTiNG-02 dapat dilihat pada Gambar 3.

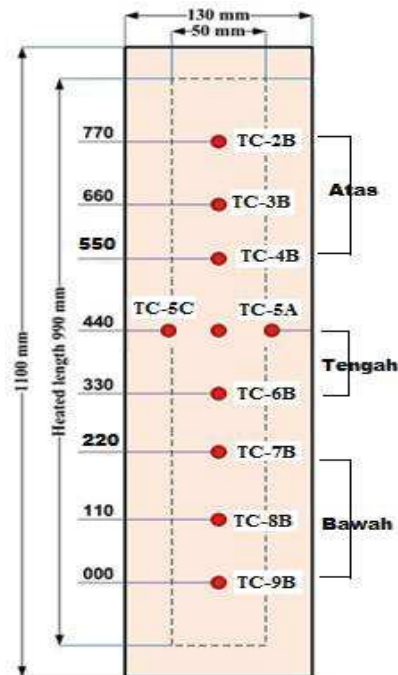


Gambar 3. Bagian Uji HeaTiNG-02 [foto Mulya Juarsa]

Komponen alat uji HeaTiNG-02 adalah sebagai berikut:

- **Pelat utama**

Pelat utama merupakan pelat uji yang akan dipanaskan dengan *heater*, kemudian didinginkan dengan air pendingin. Pelat uji ini memiliki ukuran tebal 8 mm, panjang 1100 mm, dan lebar total 130 mm, dengan lebar wilayah untuk aliran air adalah 50 mm, dan terbuat dari bahan pelat SS 316. Pada bagian pelat uji ini dipasang 30 titik termokopel. Termokopel yang digunakan adalah tipe K. Termokopel ini digunakan untuk mengukur perubahan temperatur selama proses pemanasan dan pendinginan. Posisi termokopel pada pelat utama dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Susunan termokopel yang terpasang pada pelat utama Heating-02.

- **Pelat Penutup**

Merupakan pelat yang menutupi bagian rektanguler dan sebagai bagian yang dipanaskan, sehingga antara pelat utama dan pelat penutup akan terbentuk celah rektanguler. Pelat penutup adalah pelat dengan ukuran lebar 80 mm, panjang 1100 mm dan tebal 4 mm dengan bahan SS 316.

- **Plenum atas dan bawah**

Plenum atas berfungsi sebagai tempat untuk mengalirkan air pendingin, dengan bahan dari pelat SS316 dan tebal 3 mm. Bagian atasnya berbentuk segi empat dan bagian bawahnya dibentuk prisma segi empat, dengan ukuran bagian atas $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}^3$ dan bagian bawah $30 \times 200 \times 20 \text{ mm}^3$. *Plenum* bawah berfungsi sebagai tempat keluarnya air pendingin setelah melewati celah sempit. *Plenum* bawah berbahan SS 316 dengan tebal 3 mm dan berbentuk silinder dengan diameter 110 mm dan tinggi 50 mm.

- **Pemanas (Heater)**

Heater ini berfungsi untuk memanaskan pelat uji. Bagian ini terdiri dari kawat *open coil heater* dan *insulating ceramic brick*. Kawat *open coil heater* dengan diameter kawat 2 mm dibuat secara seri, daya maksimal pada tegangan 220 V adalah 10302 W. Dan *insulating ceramic brick* berfungsi sebagaiudukan kawat *open coil heater* sebagai sumber panas. Jenis *insulating*

ceramic brick yang digunakan adalah C2 dengan dimensi: $80 \times 114 \times 880 \text{ mm}^3$, disusun dari 4 brick berukuran $80 \times 114 \times 220 \text{ mm}^3$.

Prosedur Eksperimen

Pemanasan alat uji HeaTiNG-02 dilakukan secara radiasi oleh keramik heater secara horizontal dengan daya total kurang dari 15000 W. Pengaturan masukan tegangan selama pemanasan menggunakan slide regulator voltage dengan daya maksimal 25000 W. Tegangan dinaikkan secara bertahap agar distribusi kalor dapat merata pada bidang yang dipanaskan. Kemudian, setelah tegangan yang diberikan pada alat uji HeaTiNG-02 dimatikan, dilakukan pendinginan dengan memasukkan air pendingin yang telah diatur suhu dan laju alirnya dengan menggunakan untai uji BETA. Perekaman data suhu hasil eksperimen ini dilakukan dengan menggunakan data akuisisi sistem (DAS). DAS diaktifkan bersamaan dengan dimulainya air pendingin masuk ke dalam celah sempit dan dinonaktifkan ketika suhu pelat rektanguler berada di bawah suhu air pendingin.

Perhitungan Fluks Kalor Pendidihan

Fluks kalor adalah laju kalor yang ditransfer persatuan luas. Besarnya laju perpindahan kalor dalam proses pendinginan pelat rektanguler adalah sebagai berikut:

$$Q \cdot dt = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (2)$$

Untuk kasus pelat rektanguler dalam kondisi transien, maka

$$Q = M_{ss} \cdot c_{p(T_w)} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2a)$$

dengan,

$$M_{ss} = \rho_{ss} \cdot p \cdot l \cdot t$$

Sehingga persamaan (2a) menjadi:

$$Q = \rho_{ss} \cdot p \cdot l \cdot t \cdot c_{p(T_w)} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2b)$$

Untuk menentukan nilai fluks kalor pendidihan digunakan persamaan berikut ini:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

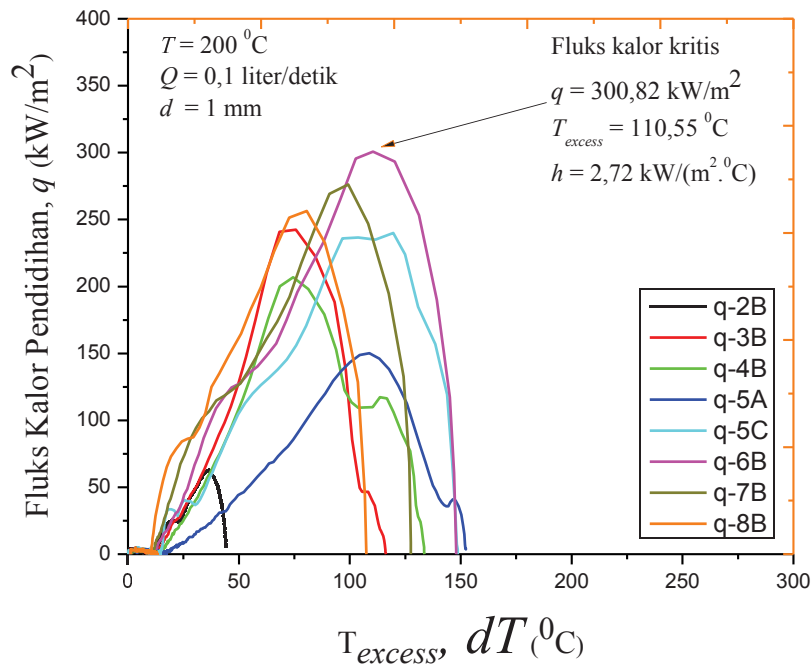
$$q = \frac{\rho_{ss} \cdot p \cdot t \cdot l \cdot c_{p(T_w)} \cdot (T_{w_{n+1}} - T_{w_n})}{A \cdot (t_{n+1} - t_n)} \quad (5)$$

Untuk menentukan nilai koefisien perpindahan kalor ditentukan dengan menggunakan:

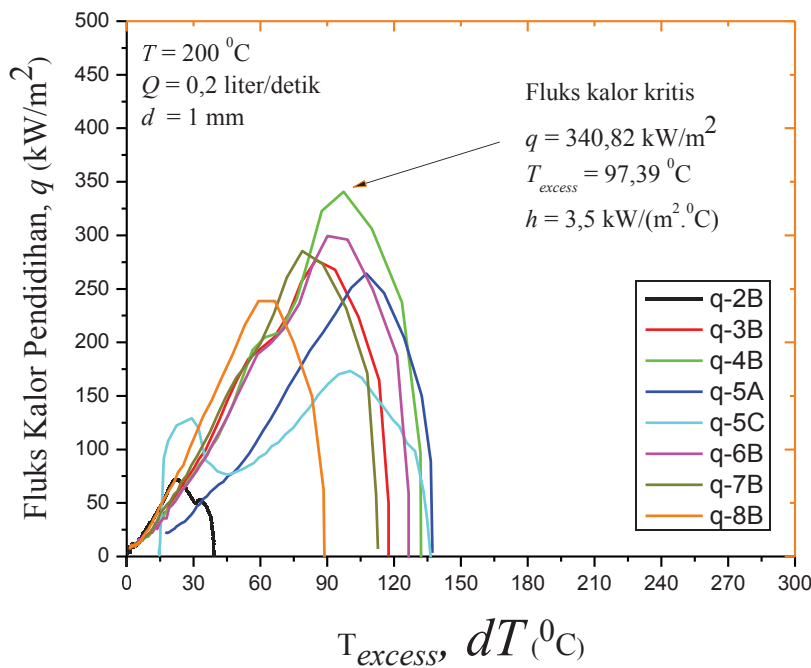
$$h = \frac{q}{\Delta T_{excess}} \quad (6)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

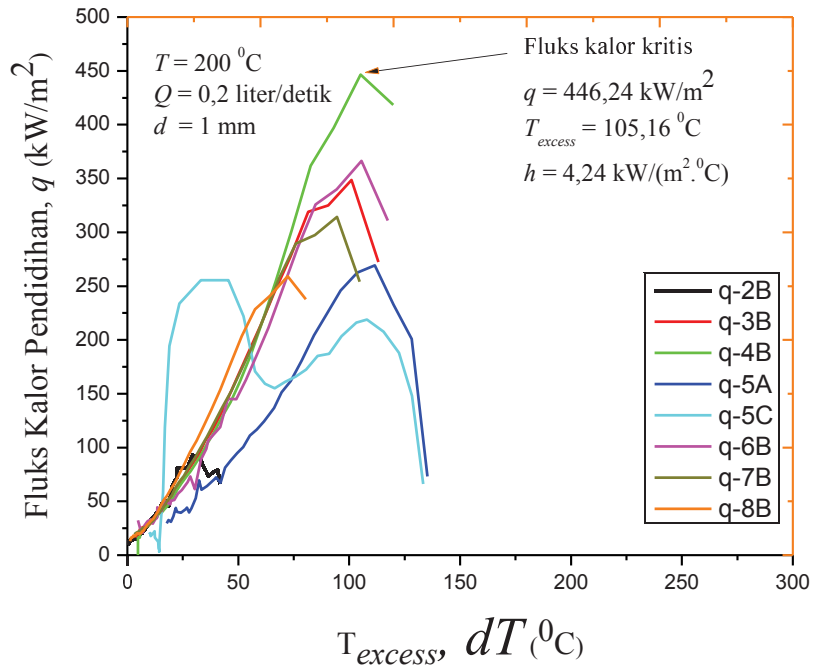
Dari pengolahan data hasil eksperimen dengan suhu pelat $200 \text{ }^\circ\text{C}$, $400 \text{ }^\circ\text{C}$, dan $600 \text{ }^\circ\text{C}$, serta laju aliran air pendingin yang masuk ke dalam celah sempit $0,1 \text{ liter/detik}$, $0,2 \text{ liter/detik}$, dan $0,3 \text{ liter/detik}$ didapatkan kurva fluks kalor terhadap T_{excess} seperti terlihat pada Gambar 5-13.



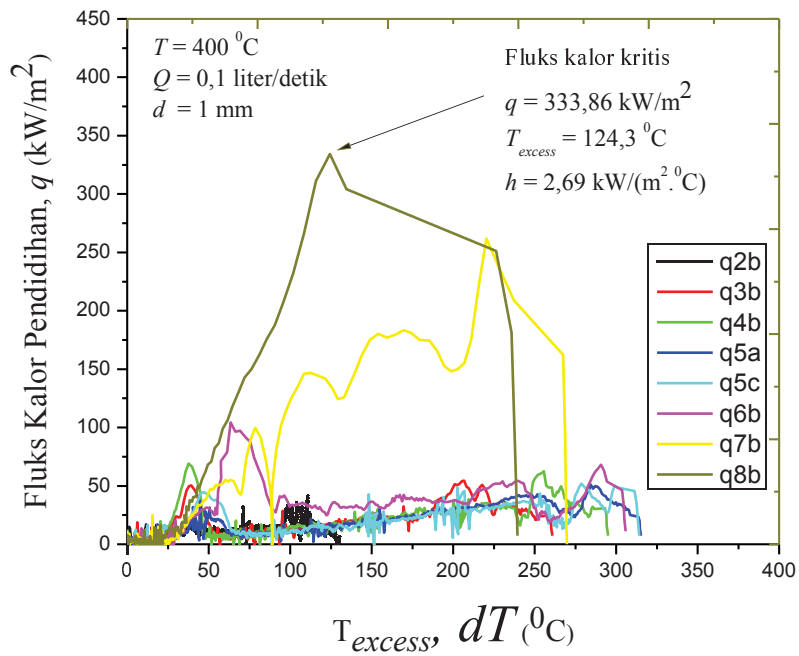
Gambar 5. Kurva fluks kalor terhadap T_{excess} pada suhu pelat rektangulr $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan debit aliran air $0,1\text{ liter/detik}$



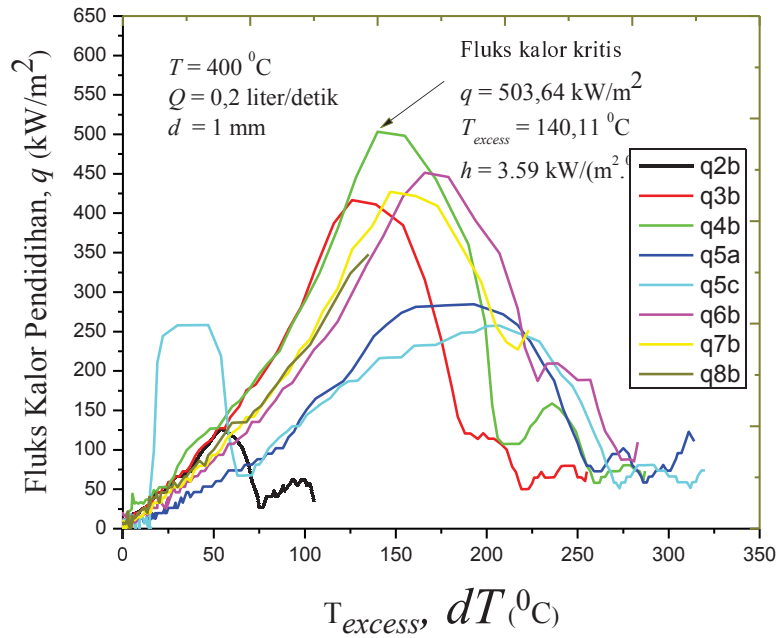
Gambar 6. Kurva fluks kalor terhadap T_{excess} pada suhu pelat rektangulr $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan debit aliran air $0,2\text{ liter/detik}$



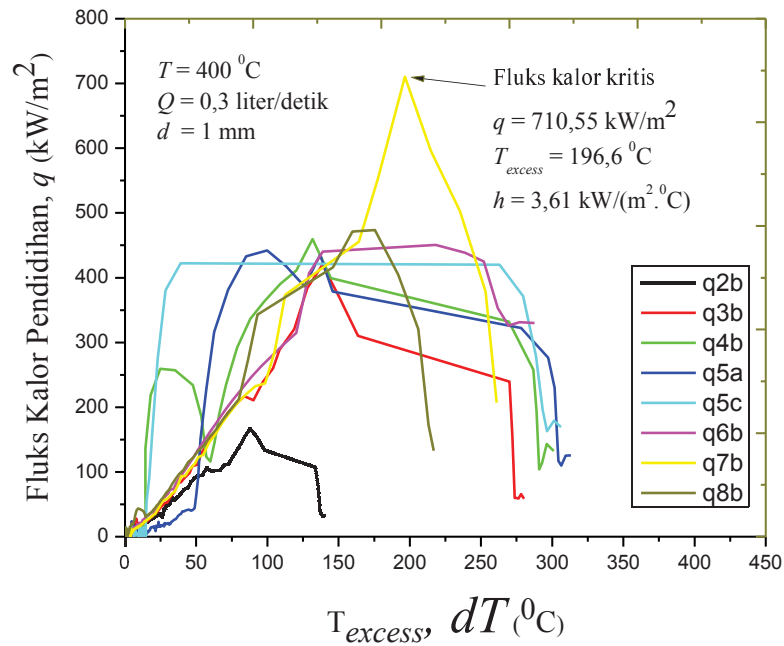
Gambar 7. Kurva fluks kalor terhadap T_{excess} pada suhu pelat rektanguler 200 °C dan debit aliran air 0,3 liter/detik



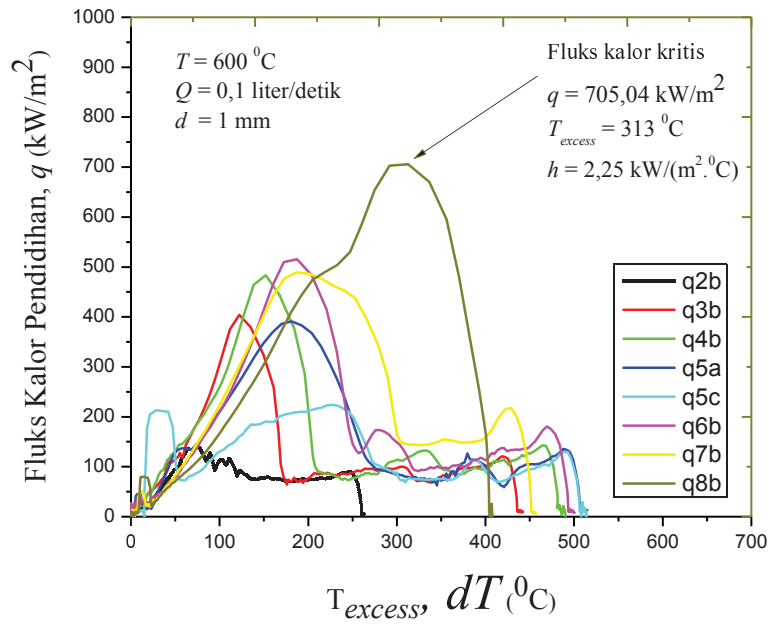
Gambar 8. Kurva fluks kalor terhadap T_{excess} pada suhu pelat rektanguler 400 °C dan debit aliran air 0,1 liter/detik



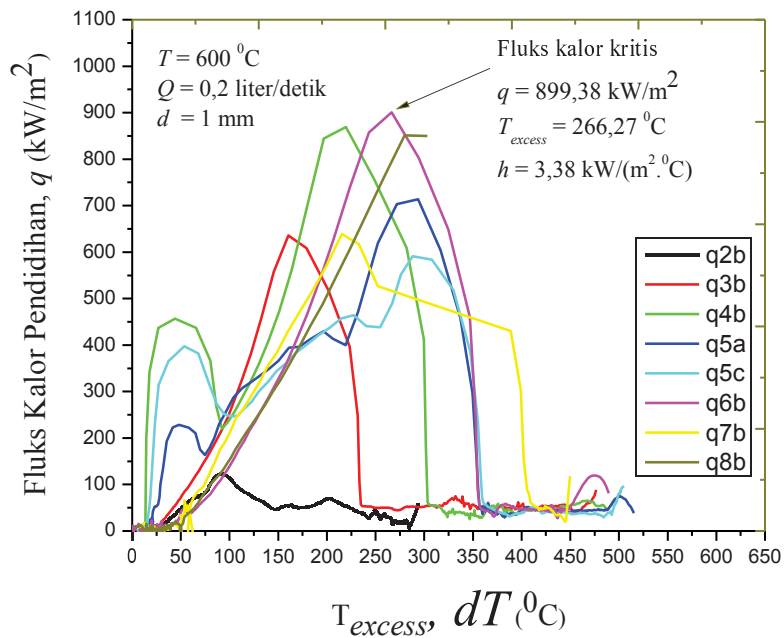
Gambar 9. Kurva fluks kalor terhadap T_{excess} pada suhu pelat rektangular $400\text{ }^\circ\text{C}$ dan debit aliran air $0,2$ liter/detik



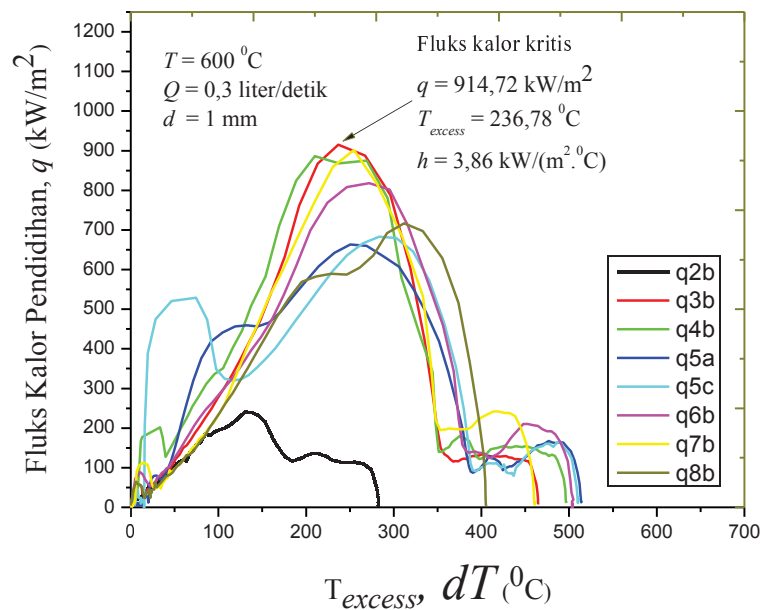
Gambar 10. Kurva fluks kalor terhadap T_{excess} pada suhu pelat rektangular $400\text{ }^\circ\text{C}$ dan debit aliran air $0,3$ liter/detik



Gambar 11. Kurva fluks kalor terhadap T_{excess} pada suhu pelat rektangular 600 °C dan debit aliran air 0,1 liter/detik



Gambar 12. Kurva fluks kalor terhadap T_{excess} pada suhu pelat rektangular 600 °C dan debit aliran air 0,2 liter/detik



Gambar 13. Kurva fluks kalor terhadap T_{excess} pada suhu pelat rektangulair 600 °C dan debit aliran air 0,3 liter/detik

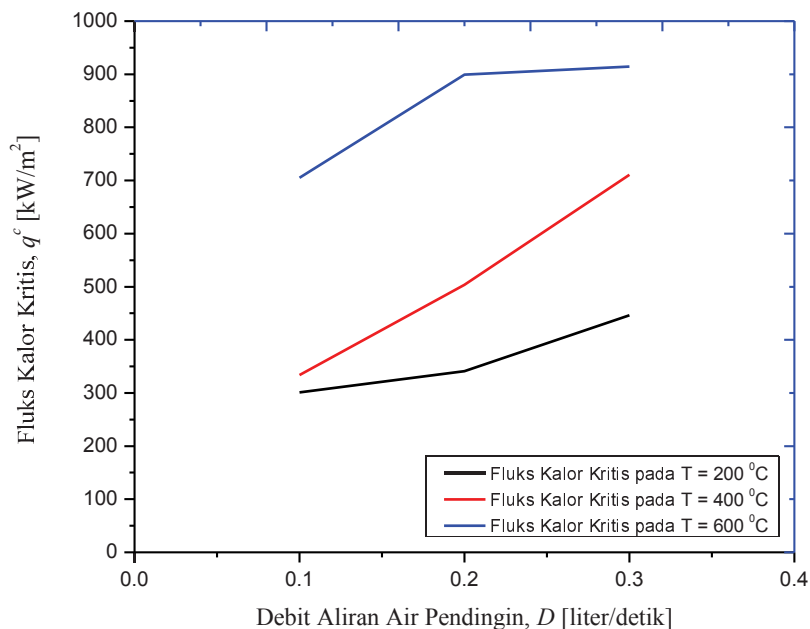
Secara umum dari Gambar 5-13 terlihat bahwa pelat bagian tengah memiliki suhu yang paling tinggi di dibandingkan dengan pelat bagian atas atau bawah. Tingginya kalor di bagian tengah ini disebabkan karena kalor yang dihasilkan dari heater memiliki suhu yang paling tinggi di bagian tengah yang secara radiasi dipancarkan ke pelat. Suhu pelat bagian tengah menjadi lebih tinggi karena menumpuknya kalor di bagian tengah akibat akumulasi kalor yang diberikan oleh kalor dari arah pelat bawah dan pelat atas yang terdistribusi ke segala arah. Disamping itu, pendinginan yang terjadi pada pelat bagian tengah hanya berasal dari aliran air pendingin yang masuk ke celah sempit saja, sehingga suhunya lebih lambat turun jika dibandingkan dengan suhu pada pelat bagian atas dan bawah pelat. Sedangkan pada pelat bagian atas memiliki suhu yang rendah dibandingkan suhu pelat bagian tengah, namun sedikit lebih tinggi daripada suhu pelat bagian bawah. Pelat bagian atas walaupun tertutup oleh plenum, namun kalor yang mengarah ke atas terbangun ke plenum dan pipa saluran air pendingin. Pipa air pendingin yang terhubung ke celah sempit dan tidak terisolasi menyerap kalor yang berasal dari pelat bagian atas. Pelat bagian atas mengalami pendinginan yang lebih cepat karena air pendingin ketika masuk ke dalam celah sempit menyentuh pelat pertama kali dan menyerap kalor yang ada di bagian atas. Pelat bagian bawah memiliki suhu yang paling rendah dibandingkan bagian atas dan tengah. Rendahnya suhu pada bagian ini disebabkan karena bagian bawah memiliki sisi yang terbuka dengan udara luar, sehingga menghambat kenaikan suhu pelat persegi bagian bawah. Pendinginan bagian bawah pelat juga terlihat lebih cepat karena selama didinginkan oleh air pendingin yang masuk ke dalam celah sempit, juga dibantu oleh udara dari lingkungan. Dapat dilihat bahwa fluks kalor tertinggi terdapat pada pelat bagian tengah, sedangkan pelat bagian bagian bawah dan atas memiliki fluks kalor yang kecil. Ini dikarenakan suhu pelat bawah dan atas lebih kecil dari suhu pelat bagian tengah. Suhu yang lebih kecil diakibatkan oleh celah bagian bawah yang terbuka sehingga pengaruh dari udara luar cukup dominan untuk menghambat kenaikan suhu pelat bagian bawah. Begitu pula untuk pelat bagian atas, walaupun tertutup namun masih terjadi perpindahan kalor ke bagian plenum atas dan ke pipa saluran air pendingin yang tidak terisolasi. Hal ini menunjukkan besarnya fluks kalor dipengaruhi oleh perubahan suhu pelat rektangulair. Hasil ini menunjukkan kesesuaian dengan hasil analisis yang dilakukan oleh peneliti sebelumnya bahwa kecepatan liquid memiliki pengaruh yang signifikan dalam karakteristik perpindahan kalor, performansi pendinginan, dan transisi pola alirannya.

Hasil pengolahan data pada analisa fluks kalor kritis dengan perubahan suhu pelat dan laju aliran air pendingin untuk kasus pemanasan-ganda di celah sempit rectangular di tunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengolahan data analisa fluks kalor kritis pada suhu 200 °C, 400 °C, dan 600 °C serta laju aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik.

No	Suhu, T (°C)	Laju aliran air pendingin, Q (liter/detik)	Fluks kalor kritis (kW/m ²)	Koefisien perpindahan kalor, h (kW/(m ² .°C))
1.	200	0,1	300,82	2,72
2.		0,2	340,82	3,50
3.		0,3	446,24	4,24
4.	400	0,1	333,86	2,29
5.		0,2	503,64	3,59
6.		0,3	710,55	3,61
7.	600	0,1	705,04	2,25
8.		0,2	899,38	3,38
9.		0,3	914,72	3,86

Hasil yang didapatkan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa semakin besar suhu dan debit aliran yang dialirkan ke celah sempit rectangular pada kasus pemanasan ganda maka akan menghasilkan kenaikan nilai fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan panasnya. Untuk membandingkan dengan hasil yang didapatkan oleh L. Tadrist, maka dibuat sebuah kurva yang menggambarkan tentang hubungan antara debit aliran air pendingin yang masuk ke dalam celah sempit dan fluks kalor kritis yang dihasilkan pada penelitian ini. Kurva dapat dilihat pada Gambar 14. Hasil yang didapatkan menunjukkan kesesuaian dan memperkuat korelasi yang didapatkan oleh L. Tadrist.



Gambar 14. Hubungan debit aliran air pendingin yang masuk ke dalam celah sempit dan fluks kalor kritis pada suhu pelat panas 200 °C, 400 °C, dan 600 °C.

Dari penelitian ini dapat dilihat bahwa penyerapan kalor yang paling besar menunjukkan laju pendinginan terlihat mulai terjadinya penurunan suhu yang signifikan karena banyaknya kalor yang terserap oleh air. Kalor yang terserap akan mencapai puncaknya pada kondisi fluks kalor kritis. Pada

kondisi ini terjadi penyerapan kalor yang paling besar oleh air pendingin yang melewati pelat panas. Penyerapan kalor berlangsung terus secara establish hingga tercapainya rejim pendidihan inti dan rejim perpindahan kalor satu fasa konveksi. Hal ini menunjukkan bahwa pendinginan pelat panas akan cepat tercapai ketika kondisi pendidihan film minimal terlampaui. Pada kondisi ini air pendingin dapat secara establish melakukan pendinginan pelat panas hingga suhu pendinginan yang diinginkan tercapai. Secara fisis dapat dikatakan bahwa nilai fluks kalor menunjukkan besarnya kalor yang ditransfer pada tiap perubahan suhu pelat. Nilai fluks kalor bernilai kecil pada saat air pendingin mulai masuk ke dalam narrow gap karena belum terjadi kontak langsung antara air pendingin dengan permukaan pelat. Perpindahan kalor terjadi secara radiasi yang menyebabkan koefisien perpindahan kalornya kecil. Namun ketika terjadi kontak antara air pendingin dengan permukaan pelat, terlihat peningkatan nilai fluks kalor. Nilai koefisien perpindahan kalor bernilai kecil pada saat air pendingin mulai masuk ke dalam celah karena belum terjadi kontak langsung antara air pendingin dengan permukaan pelat. Perpindahan kalor terjadi secara radiasi yang menyebabkan koefisien perpindahan kalornya kecil. Namun ketika terjadi kontak antara air pendingin dengan permukaan pelat, terlihat peningkatan nilai koefisien perpindahan kalor. Ini menunjukkan perpindahan kalor yang besar dari pelat ke air pendingin yang mengalir pada permukaan pelat terjadi setelah adanya rewetting dan terjadi secara konveksi. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa nilai fluks kalor tergantung pada kontak antara air pendingin yang masuk dengan permukaan pelat rektangular. Kenaikan atau penurunan nilai fluks kalor akan mempengaruhi kenaikan atau penurunan nilai koefisien perpindahan kalornya.

Peristiwa lain yang terjadi pada saat pendinginan celah sempit rektangular adalah counter current flow, yaitu adanya uap yang menahan air pendingin masuk pertama kali ke dalam celah. Hal ini ditunjukkan dengan tersendatnya air pendingin yang keluar melalui lubang keluaran celah (open loop). Air yang keluar melalui lubang keluaran merupakan campuran antara uap dan air pendingin. Namun setelah fenomena counter current flow hilang, air pendingin yang keluar setelah melewati narrow gap akan normal dan tidak bercampur uap setelah air pendingin kontak langsung dengan permukaan pelat rektangular. Terjadinya fenomena counter current flow terhadap aliran air pendingin diperkirakan karena terbentuknya gas di sepanjang pelat panas. Gas yang terbentuk terakumulasi di bagian tengah pelat panas karena pelat bagian tengah memiliki suhu yang lebih tinggi dari bagian atas dan bawah pelat. Gas tersebut menghambat sentuhan air terhadap pelat panas. Air pendingin yang mengalir sepanjang pelat membasahi bagian bawah dan atas terlebih dahulu, baru kemudian membasahi bagian tengah. Hal ini menunjukkan bahwa counter current flow menghambat pendinginan pelat panas. Distribusi suhu masih sangat tinggi ketika air pendingin belum kontak dengan permukaan pelat, dan counter current flow masih terjadi. Distribusi suhu terlihat menurun setelah air pendingin mengalami kontak langsung dengan permukaan pelat. Kejadian ini disebut sebagai rewetting point, yaitu titik ketika air pendingin mulai kontak secara establish dengan permukaan pelat.

KESIMPULAN

Fluks kalor kritis pada suhu pelat 200 °C mengalami kenaikan sebesar 13,29 % dan 48,34 % ketika debit aliran dinaikkan dari 0,1 liter/detik ke 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik. Sedangkan koefisien perpindahan kalornya mengalami kenaikan sebesar 28,68 % dan 55,88 %. Fluks kalor kritis pada suhu pelat 400 °C mengalami kenaikan sebesar 50,85 % dan 112,83 % ketika debit aliran dinaikkan dari 0,1 liter/detik ke 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik. Sedangkan koefisien perpindahan kalornya mengalami kenaikan sebesar 56,77 % dan 57,64 %. Fluks kalor kritis pada suhu pelat 600 °C mengalami kenaikan sebesar 27,56 % dan 29,74 % ketika debit aliran dinaikkan dari 0,1 liter/detik ke 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik. Sedangkan koefisien perpindahan kalornya mengalami kenaikan sebesar 50,22 % dan 71,56 %. Fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan kalor yang didapatkan dalam penelitian ini meningkat seiring dengan kenaikan debit aliran yang dialirkan ke celah sempit rektangular pada suatu suhu pelat panas untuk kasus pemanasan ganda.

ARTI SIMBOL (Nomenclature)

Q	= laju perpindahan kalor (watt)
M_{ss}	= massa pelat rektangular <i>Stainless Steel</i> (kg),
$C_{p(Tw)}$	= kalor spesifik pelat rektangular (J/kg.°C)
dT/dt	= perubahan suhu pada pelat rektangular terhadap waktu (°C/detik)
ρ_{ss}	= densitas pelat rektangular <i>Stainless Steel</i> (kg/m ³)
p	= panjang pelat rektangular (m)
l	= lebar pelat rektangular (m)
t	= tebal pelat rektangular (m)
q	= fluks kalor pendidihan (watt/m ²)
A	= Luas pelat rektangular (m ²)
h	= koefisien perpindahan kalor (watt/m ² .°C)
T_{excess}	= Suhu <i>wall superheat</i> = $T_w - T_{sat}$ (°C)
T_w	= Suhu dinding pelat rektangular (°C)
T_{sat}	= Suhu saturasi air (°C)

DAFTAR PUSTAKA

1. Y. Maruyama et al. Application of CAMP Code to Analysis of Debris Coolability Experiments in ALPHA Program. Proceeding of the Workshop on Severe Accident Research (SARJ-98). JAERI-Conf 99-005; 1999.
2. A.R. Antariksawan. Analisis Degradasi Teras PWR Pada Kejadian Kehilangan Catu Daya. Jurnal Tri Dasa Mega. 2005; Vol. 2, No. 3.
3. A. Hidaka et al. Analysis of ALPHA in Vessel Debris Coolability Experiments with SCDAPSIM Code. Proceeding of the Workshop on Severe Accident Research (SARJ-98). JAERI-Conf 99-005; 1999.
4. Kandlikar, S.G. Heat Transfer Mechanisms during Flow Boiling in Microchannels. Journal of Heat Transfer. 2002; 8: 27-35.
5. Mulya Juarsa. Study on Boiling Heat Transfer Under Transient Cooling in an Annulus with A Narrow Gap. Master Degree Thesis of Fundamental Energy Science. Kyoto University; 2003.
6. Mulya Juarsa, Raldi Artono Koestoer, Nandy Putra, Anhar Riza Antariksawan, Indarto, IGN. Bagus Catrawerdana. Experimental Study on the Effect of Initial Temperature to CHF in a Rectangular Narrow Channel with Bilateral-Heated. FTEC2011-The 7th International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion; 2011 September 24 – 27. Zhengzhou, China; 2011
7. Jian Zhang, Futoshi Tanaka, Mulya Juarsa, Kaichiro Mishima. Calculation of Boiling Curves during Rewetting of a Hot Vertical Narrow Channel. The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10); 2003 October 5 - 9. Seoul, Korea; 2003.
8. Fujita. Y., and Yang, Y. Boiling Heat Transfer in Rectangular Channels of Small Gaps. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University. 2002; Vol. 62, No. 4.
9. Salah El-Din El-Morshedy, Adel Alyan, and Loula Shouman. Experimental Investigation of Natural Convection Heat Transfer in Narrow Vertical Rectangular Channel Heated from Both Sides. International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science. 2012; 36: 72-77.
10. Qing Lu, Suizheng Qiu, Guanghui Su, Wenxi Tian, Zhonghao Ye. Experimental Research on Heat Transfer of Natural Convection in Vertical Rectangular Channels with Large Aspect Ratio. International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science. 2010; 34: 73-80.

11. H.Y. Zeng, S.Z. Qiu, and D.N. Jia. Investigation on the Characteristics of the Flow and Heat Transfer in Bilaterally Heated Narrow Annuli. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007; 50: 492-501.
12. Md. Ashraful Islam, Masanori Monde, Peter Lloyd Woodfield, Yuichi Mitsutake. Jet Impingement Quenching Phenomena for Hot Surfaces Well above the Limiting Temperature for Solid-liquid Contact. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008; 51: 1226-1237.
13. Jun Huang et. al., Numerical Study on Effect of Gap Width of Narrow Rectangular Channel on Critical Heat Flux Enhancement. *International Journal of Nuclear Engineering and Design*. 2009; 239: 320-326.
14. L. Tadrist. Review on Two-Phase Flow Instabilities in Narrow Spaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007; 28: 54-62