

PENGARUH LAJU ALIRAN PADA PERPINDAHAN KALOR PENDIDIHAN DI VERTICAL RECTANGULAR NARROW GAP

M. Hadi Kusuma¹, Mulya Juarsa¹, Anhar Riza Antariksawan²

¹Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional

²Penelitian Dasar dan Terapan, Badan Tenaga Nuklir Nasional

Email untuk korespondensi : luluikal@batan.go.id

ABSTRAK

PENGARUH LAJU ALIRAN PADA PERPINDAHAN KALOR PENDIDIHAN DI VERTICAL RECTANGULAR NARROW GAP. Fenomena perpindahan kalor pendidihan pada vertical rectangular narrow gap merupakan fenomena yang berhubungan dengan keselamatan reaktor nuklir. Untuk itu perlu dilakukan penelitian tentang hal tersebut agar didapatkan pemahaman yang benar tentang keselamatan reaktor nuklir dari sisi perpindahan kalor pendidihan. Penelitian difokuskan pada perhitungan fluks kalor selama proses pendinginan di celah sempit rektanguler berukuran 1 mm, dengan suhu awal pelat rektanguler 600 °C dan variasi debit aliran air pendingin 0,1 – 0,3 liter/detik. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan fasilitas HeaTiNG-02 untuk celah rektanguler. Eksperimen dilakukan dengan menginjeksikan air pada debit aliran 0,1-0,3 liter/detik dengan suhu air 85°C ke dalam celah sempit rektanguler. Data hasil eksperimen digunakan untuk menghitung fluks kalor pendidihan dan koefisien perpindahan kalornya. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan kalor terhadap perubahan laju alirannya. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa pendinginan pelat bersuhu 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik menghasilkan nilai fluks kalor kritis sebesar 213,27 kW/m², 479,56 kW/m², dan 547,50 kW/m². Serta nilai koefisien perpindahan kalornya sebesar 1,0422 kW/(m². °C), 2,1059 kW/(m². °C), dan 2,2177 kW/(m². °C). Semakin besar debit aliran yang dialirkan ke permukaan pelat yang memiliki suhu sama pada vertical rectangular narrow gap, maka akan menghasilkan kenaikan nilai fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan panasnya. Fenomena counter current flow yang terjadi selama pendinginan menghambat proses pendinginan pelat panas dan mengakibatkan kecilnya nilai fluks kalor.

Kata kunci: laju alir, perpindahan kalor, pendidihan, narrow gap, rectangular

ABSTRACT

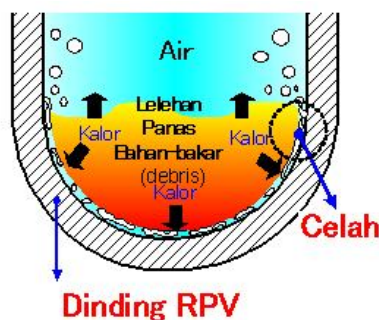
THE EFFECT OF FLOW RATE ON VERTICAL RECTANGULAR NARROW GAP BOILING HEAT TRANSFER. The phenomena of boiling heat transfer in vertical narrow rectangular gap related to nuclear reactor safety. In order to address the problem, it is crucial to conduct research to get a better understanding of nuclear safety reactor regarding to boiling heat transfer. The study focused on the calculation of heat flux during the cooling process in 1 mm rectangular narrow gap with initial temperature 600 °C and the cooling water flow rate variation of 0.1 to 0.3 liters / sec. Experimental study was conducted using the facilities HeaTiNG-02 for the rectangular narrow gap. Experiments were carried out by injecting water into the hot plate at a flow rate 0.1-0.3 liters/sec to 85 °C cooling water temperature. Data used to calculate heat flux and boiling heat transfer coefficient. This study aims to understand the phenomenon of quenching process on the vertical rectangular narrow gap cooling and to study heat flux boiling curves. The analysis shows that during cooling plate 600 °C with flow rate 0.1 liters/second, 0.2 liters/second, and 0.3 liters/sec results the critical heat flux value are 213.27 kW/m², 479.56 kW/m², 547.50 kW/m². Also the coefficient heat transfer are 1.0422 kW/(m². °C), 2.1059 kW/(m². °C), and 2.2177 kW/(m². °C). The critical heat flux value and heat transfer coefficient will be greater when the water cooling flow into the vertical rectangular narrow gap also increases. Counter current flow phenomena that occur during cooling of the hot plate hamper the cooling process.

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

PENDAHULUAN

Dari berbagai macam pilihan penggunaan energi yang ada saat ini, pilihan menggunakan pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dapat digunakan oleh pemerintah untuk memenuhi kebutuhan energi nasional yang semakin besar. Pengalaman penggunaan teknologi PLTN oleh negara lain memperlihatkan bahwa teknologi ini dapat menutupi kekurangan energi yang dibutuhkan, aman, dan ramah lingkungan. Disamping itu, pengalaman juga memperlihatkan bahwa pernah terjadi beberapa kasus kecelakaan PLTN yang mengakibatkan terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan dan kegagalan dalam pengoperasiannya sehingga mengakibatkan melelehnya bahan bakar serta teras reaktor, seperti kecelakaan PLTN Three Mile Island Unit 2 (TMI-2), Amerika Serikat, tahun 1979, kecelakaan PLTN Chernobyl, Ukraina, tahun 1986 dan kecelakaan PLTN Fukushima Daiichi, Jepang, 2011.

Dalam rangka untuk menjamin tingkat keselamatan pengoperasian PLTN, banyak penelitian dilakukan untuk meneliti penyebab terjadinya kecelakaan dan mencari solusi agar apabila terjadi kecelakaan serupa maka dampak yang ditimbulkan tidak akan merusak integritas reaktor dan merugikan masyarakat. Salah satunya adalah dengan melakukan penelitian tentang perpindahan panas yang terjadi pada kecelakaan reaktor TMI-2. Kecelakaan pada TMI-2 mengakibatkan melelehnya bahan bakar dan teras reaktor. Pada kenyataannya, lelehan bahan bakar dan teras (*debris*) yang bersuhu lebih tinggi dari titik leleh dinding bejana tekan reaktor tidak mengakibatkan kerusakan pada bejana tekan reaktor. Fenomena ini terjadi dikarenakan terbentuknya celah antara debris dan dinding bejana tekan reaktor. Terbentuknya celah sempit (*narrow gap*) yang terisi fluida di antara keduanya menjaga integritas bejana tekan tetap utuh dan debris tidak keluar ke lingkungan. Ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi Keadaan Debris Pada Bagian Bawah Reactor Pressure Vessel

Maruyama pada tahun 1999 melakukan simulasi dengan program CAMP dan mengindikasikan adanya *narrow gap* antara lelehan teras yang bagian luarnya membeku dengan dinding bejana dengan ukuran *gap* sekitar 1 mm hingga 2 mm. Hasil perbandingan perhitungan dengan eksperimen memprediksi adanya fenomena perpindahan kalor secara konduksi dan radiasi melalui uap kalor lanjut (*superheated steam*) yang ada di dalam celah tersebut^[1]. Hidaka pada tahun 1999 melakukan simulasi dengan program RELAP/SCDAPSIM mendapatkan prediksi ukuran *narrow gap* sebesar 1,0 mm dan pengaruh air yang mengisi *narrow gap* itu mempengaruhi fenomena perpindahan kalornya^[2]. Horner pada tahun 1999 melakukan eksperimen fenomena perpindahan kalor pada *narrow gap* menggunakan fluida R134a. Dalam eksperimen tersebut ukuran *narrow gap* yang digunakan adalah 1-11 mm dan sudut kemiringan celah antara 0° hingga 25°. Observasi visual menunjukkan gelembung uap yang terbentuk bergerak ke atas, sedangkan air mengalir sepanjang dinding dingin ke bawah. Adanya uap tersebut mencegah kontak antara air dengan permukaan pemanas^[3]. Antariksawan pada tahun 2005 melakukan simulasi dengan program MELCOR mengindikasikan adanya celah sempit antara lelehan teras yang bagian luarnya membeku dengan dinding bejana reaktor^[4].

Dari banyak penelitian yang telah dilakukan dalam kasus perpindahan kalor di *narrow gap* berbentuk rektanguler dengan berbagai variasi variabel yang diduga berpengaruh terhadap karakteristik dari perpindahan kalor tersebut, masih menunjukkan adanya beberapa parameter yang belum diamati. Salah satunya adalah kombinasi antara suhu awal pelat panas dan variasi debit aliran air pendinginnya. Untuk itu, maka perlu dilakukan analisa pengaruh laju aliran air pendingin pada perpindahan kalor pendinginan di *vertical rectangular narrow gap* dengan kombinasi antara suhu awal pelat panas dengan memvariasikan debit aliran pendingin yang memasuki *narrow gap* tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan kalor terhadap perubahan laju alirannya di pendinginan *vertical rectangular narrow gap*.

TEORI

Definisi dan Ukuran Narrow Gap

Narrow gap adalah celah sempit yang terbentuk antara dua pelat sejajar. Apabila fluida dialirkan melalui *narrow gap* dan kemudian dipanaskan, maka akan terdapat dua fenomena

pendidihan yang terjadi yaitu pendidihan kolam dan pendidihan alir.

Pengklasifikasian ukuran *narrow gap* telah dilakukan oleh Kandlikar dan Juan Huang. Kandlikar pada tahun 2002 mengklasifikasikan *narrow gap* berdasarkan ukuran celahnya. Pengklasifikasian tersebut dijadikan acuan untuk mengidentifikasi rentang ukuran *narrow gap*-nya. Hal ini dikarenakan ukuran *narrow gap* merupakan salah satu hal yang dapat mempengaruhi karakteristik perpindahan kalornya, walaupun pada kenyataannya pengaruh yang muncul pada *narrow gap* akan tergantung pada sifat-sifat fluida, suhu, dan tekanannya. Kategori *narrow gap* mencakup ukuran mikro, mini dan konvensional dengan *range* ukuran dari 0,02 mm sampai 3 mm^[5]. Menurut Juan Huang pada tahun 2009 *narrow gap* dikategorikan sebagai berikut: jika ukuran *narrow gap* ≥ 3 mm, maka disebut *big channel*. Jika ukurannya diantara 1 – 3 mm, maka disebut *narrow channel*. Jika ukurannya ≤ 1 mm, maka disebut *micro channel*^[6].

Perpindahan Kalor Pendidihan pada Narrow Gap

Ishibashi pada tahun 1969 melakukan penelitian pendidihan alir tentang koefisien perpindahan kalor pada berbagai ukuran *gap*, hasilnya menunjukkan bahwa konfigurasi *gap* memiliki pengaruh yang sangat berarti dalam meningkatkan perpindahan kalor^[7]. Monde pada tahun 1982 telah melakukan studi fluks kalor kritis untuk pendidihan konveksi alamiah pada *rectangular vertical gap* dengan keadaan dasar tertutup (tidak ada aliran air yang keluar dari sistem). Ukuran *gap* yang digunakan adalah 0,45 mm hingga 7,0 mm, dengan panjang pemanas aktif (*heated length*) 20 mm - 50 mm. Hasil penelitiannya menunjukkan adanya korelasi fluks kalor kritis untuk pemanasan satu sisi^[8]. Xia pada tahun 1992 mengamati dua rejim untuk pendidihan R-113 pada *rectangular vertical channel*, hasilnya pada saat lebar celah sempit > 3 mm, gelembung tidak terbentuk dan bentuk pendidihan alirnya sangat mirip dengan pendidihan konveksi paksa pada pipa vertikal. Pada lebar celah sempit < 3 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. Pada penelitian lainnya^[9] Xia pada tahun 1996 melakukan eksperimen dengan menggunakan fluida R-113, hasil yang didapatkan menunjukkan bentuk aliran pendidihan bergantung pada ukuran celah dan fluks kalornya^[10]. J. Bonjour pada tahun 1998 melakukan eksperimen bentuk aliran pendidihan di *narrow gap*. Fluida yang digunakan adalah R-113.

Hasilnya menunjukkan adanya 3 pola aliran dalam pendidihan inti, yaitu pendidihan inti dengan gelembung terisolasi, dengan gabungan gelembung, dan bagian yang kering dengan air^[11]. Peng pada tahun 1998 melakukan analisis pada *Stainless Steel* persegi dengan menggunakan Metanol sebagai fluida ujinya. Hasil analisisnya menunjukkan bahwa kecepatan fluida, *subcooling*, sifat fluida dan ukuran celah sempit memiliki pengaruh yang signifikan dalam karakteristik perpindahan kalor, performansi pendinginan, dan transisi pola aliran^[12].

Fujita pada tahun 2002 melakukan analisis pada *Stainless Steel* rektanguler dengan menggunakan R-113 sebagai fluida ujinya. Hasil analisisnya menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran celah maka semakin besar koefisien perpindahan kalor ketika fluks kalornya rendah. Terdapat pola aliran dengan bentuk gelembung bola, bentuk gelembung datar, pola aliran *slug* dan *bubble*^[13]. Mulya Juarsa pada tahun 2003 melakukan penelitian pada *annuli narrow gap* dengan ukuran 0,5 mm, 1 mm dan 2 mm. Hasil analisis menunjukkan rejim didih film sendiri 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^[14]. Jian Zhang pada tahun 2003 mengindikasikan bahwa perpindahan kalor selama pendinginan celah secara signifikan dibatasi oleh *counter current flow limitation* dalam celah sempit. 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^[15]. Investigasi yang dilakukan oleh Zeng pada tahun 2007 mengenai 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^[16].

Juan Huang pada tahun 2009 melakukan eksperimen dalam memprediksi fluks kalor kritis aliran dua fasa pendidihan menggunakan *narrow rectangular channel* dengan *gap* tidak kurang dari 5 mm. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa dengan memperkecil ukuran celah, nilai fluks kalor kritis akan meningkat dan kehilangan tekanan akan

naik secara simultan^[6]. Qing Lu pada tahun 2010 melakukan penelitian tentang perpindahan kalor konveksi alamiah pada *vertical rectangular channel* dengan dua pelat *Stainless Steel* berukuran panjang 800 mm, lebar 60 mm yang dipanaskan, menggunakan pendingin udara, dan dengan variasi *gap* 1 mm, 1.8 mm, serta 2.5 mm. Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa karakteristik perpindahan kalor konveksi alamiah udara mempunyai nilai yang mirip pada berbagai variasi *gap* tersebut dan tidak ada kenaikan nilai suhu dinding sepanjang arah alirannya, namun pada titik atas dekat *channel* keluar terjadi kenaikan nilai suhu dinding^[17]. Salah El-Din El-Morshedy pada tahun 2012 melakukan investigasi perpindahan kalor konveksi alamiah dalam *narrow vertical rectangular channel* yang dipanaskan dari dua sisi dengan *narrow rectangular channel* berbahan *Stainless Steel* yang panjangnya 80 cm, lebar 7 cm dan lebar *gap* 2.7 mm. Pendingin yang digunakan adalah air demineralisasi dengan tekanan di bawah atmosfer. Hasilnya didapatkan suatu korelasi yang dapat digunakan untuk memprediksi *local Nusselt number* pada analisa keselamatan reaktor^[18].

METODOLOGI PENELITIAN

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

1. Melakukan eksperimen untuk memperoleh data perpindahan kalor pada *vertical rectangular narrow gap* dengan parameter suhu awal pelat dan variasi debit aliran air pendingin
2. Melakukan perhitungan fluks kalor kritis dan koefisien perpindahan panas dari perubahan laju aliran air pendingin
3. Menarik kesimpulan dari hasil analisa yang didapatkan.

Skematik Pengujian

Dalam penelitian ini digunakan metode eksperimental. Eksperimen yang dilakukan untuk mengetahui fenomena perpindahan kalor pada *vertical rectangular narrow gap* selama proses *quenching* menggunakan *loop* terbuka. Gambar 2 memperlihatkan skematik pengujian yang dilakukan pada eksperimen ini. *Loop* terdiri dari bagian uji yang berupa dua buah pelat *Stainless Steel* 316 sejajar (pelat penutup dan pelat utama) sehingga antara keduanya akan membentuk *narrow gap*.

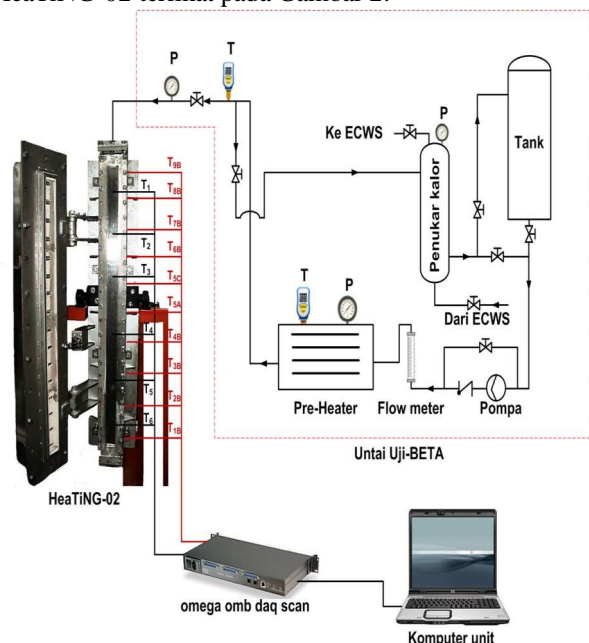
Pelat penutup merupakan pelat yang dipanaskan dengan *heater* yang dihubungkan dengan *slide regulator voltage* dengan daya maksimal 25 kW. Kalor yang dihasilkan oleh *heater* dipindahkan secara radiasi ke pelat penutup. Kalor yang diterima oleh pelat penutup bagian atas secara

konveksi akan mengalir ke bagian bawahnya. Kemudian kalor tersebut dipindahkan secara radiasi ke pelat utama. Setelah pelat utama mencapai suhu yang diinginkan, kemudian aliran listrik ke *heater* dimatikan.

Peralatan uji *vertical rectangular narrow gap* (HeaTiNG-02) dihubungkan dengan loop air pendingin (untai uji BETA). Untai uji BETA mensirkulasikan air pendingin ke dan dapat menjaga suhu air tetap berada pada suhu yang diinginkan. Air pendingin kemudian dialirkan ke dalam HeaTiNG-02. Dalam eksperimen ini air masukan yang dialirkan memiliki suhu 85 °C. Air disirkulasikan dengan pompa ke dalam HeaTiNG-02. Apabila air yang terdapat pada untai uji BETA habis, maka air yang ada di dalam tangki (terbuka terhadap udara luar) secara otomatis akan mengalir ke dalam untai uji BETA tersebut untuk kemudian dipanaskan kembali oleh *preheater* dan dialirkan lagi ke dalam HeaTiNG-02.

Pengambilan dan perekaman data hasil eksperimen dilakukan ketika semua aliran listrik menuju HeaTiNG-02 dimatikan. Data suhu selama proses pemanasan pelat direkam dengan menggunakan data akuisisi sistem yang dihubungkan dengan komputer. Pada proses *quenching*, perekaman data suhu terus dilakukan dan dihentikan setelah suhu pelat utama mencapai suhu yang sama dengan suhu masukan air pendingin.

Skematik pengujian menggunakan HeaTiNG-02 terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skematik Pengujian HeaTing-02

Prosedur Eksperimen

Prosedur eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaturan ukuran *narrow gap*.
Pengaturan ukuran *narrow gap* dilakukan dengan memberikan lapisan *grafoil* yang diletakkan antara pelat utama dengan pelat penutup pada alat HeaTiNG-02. *Grafoil* yang digunakan memiliki ketebalan 0,5 mm dan memiliki ketahanan hingga suhu 3000 °C. Selain berfungsi untuk mengatur ukuran *narrow gap*, juga berfungsi untuk menahan air yang akan dilewatkan agar tidak bocor melewati sisi-sisi bagian uji.
2. Pengaturan suhu dan laju alir air pendingin.
Alat uji HeaTiNG-02 digabungkan dengan untai uji BETA. Untai uji BETA berfungsi sebagai *loop* aliran air pendingin. Air pendingin yang akan dilewatkan melalui *narrow gap* harus diatur suhu dan laju alirnya. Suhu air pendingin diatur dengan menggunakan *preheater*. *Preheater* dapat mengatur dan mempertahankan suhu air pendingin yang akan dimasukkan ke dalam celah sempit. Air di dalam sistem pendingin mulai dipanaskan oleh *preheater* hingga mencapai suhu 85 °C. Sedangkan laju aliran air pendingin diatur dengan menggunakan pompa primer. Pompa primer dihidupkan dengan frekuensi tertentu agar debit air pendingin sesuai dengan yang diinginkan. Pembacaan suhu dan laju aliran air pendingin ini menggunakan alat ukur digital yang terpasang pada untai uji BETA.
3. Pemanasan pelat persegi.
Pemanasan alat uji HeaTiNG-02 dilakukan secara radiasi oleh keramik *heater* secara horizontal dengan daya total 15000 Watt. Pengaturan masukan tegangan selama pemanasan menggunakan *Slide regulator voltage* dengan daya maksimal 25000 Watt. Tegangan dinaikkan secara bertahap agar distribusi kalor dapat merata pada bidang yang dipanaskan. Satu tahapan kenaikan tegangan dilakukan hingga suhu pelat mencapai kondisi *steady*, kemudian tegangan akan terus dinaikkan hingga mencapai suhu yang diinginkan. Setelah suhu pelat persegi yang diinginkan tercapai, kemudian suplai listrik ke *heater* dimatikan.
4. Pembukaan penutup keramik *heater*.
Pembukaan penutup keramik *heater* dilakukan secara vertikal setelah suplai listrik yang diberikan pada *heater* dimatikan.
5. Perekaman gambar dengan kamera *infra-red*.
Perekaman ini bertujuan untuk memastikan distribusi suhu yang terdapat pada *heater* dan pelat penutup.

6. Pendinginan pelat persegi
Pendinginan dilakukan dengan memasukkan air pendingin yang telah diatur suhu dan laju alirnya dengan menggunakan untai uji BETA. Kran penutup air pendingin dibuka dan air mulai dialirkan ke dalam *narrow gap*. Pendinginan dimulai pada saat dibukanya penutup keramik *heater* dan berakhir pada saat suhu pelat persegi berada di bawah suhu air pendingin yang dimasukkan.
7. Perekaman data suhu.
Perekaman data suhu selama pemanasan dan proses *quenching* pelat persegi dilakukan dengan menggunakan sistem akuisisi data yang dihubungkan dengan komputer.
8. Perhitungan Fluks Kalor Pendidihan
Fluks kalor adalah laju kalor yang ditransfer persatuan luas. Besarnya laju perpindahan kalor dalam proses pendinginan pelat rektangular adalah sebagai berikut:

$$Q \cdot dt = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Untuk kasus pelat rektangular dalam kondisi transien, maka

$$Q = M_{ss} \cdot c_p(T_w) \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1.a)$$

karena

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

maka persamaannya menjadi:

$$Q = \rho_{ss} \cdot p \cdot l \cdot t \cdot c_p(T_w) \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1.b)$$

nilai fluks kalor pendidihan diperoleh dengan persamaan berikut ini:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

sehingga nilai fluks kalor pendidihan menjadi:

$$q = \frac{\rho_{ss} \cdot p \cdot l \cdot t \cdot c_p(T_w) \cdot (T_{w_{n+1}} - T_{w_n})}{A \cdot (t_{n+1} - t_n)} \quad (3)$$

dan untuk mencari nilai koefisien perpindahan kalor adalah sebagai berikut:

$$h = \frac{q}{\Delta T_{surface}} \quad (4)$$

Variabel Eksperimen

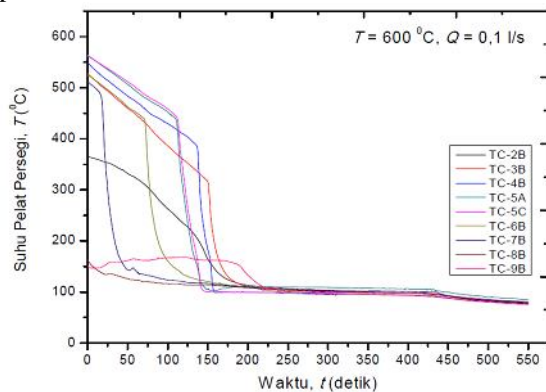
Variabel yang digunakan dalam eksperimen ini adalah:

- a. $T_{initial \text{ pelat}} = 600 \text{ } ^\circ\text{C}$, suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit 85 °C, ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik.

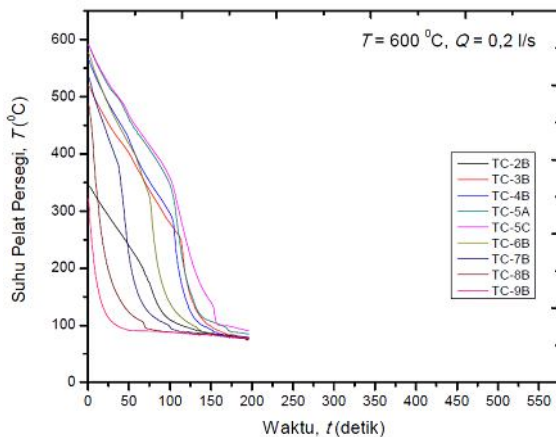
- b. $T_{initial\ pelat} = 600\ ^\circ\text{C}$, suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit $85\ ^\circ\text{C}$, ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik.
- c. $T_{initial\ pelat} = 600\ ^\circ\text{C}$, suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit $85\ ^\circ\text{C}$, ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,3 liter/detik

HASIL DAN PEMBAHASAN

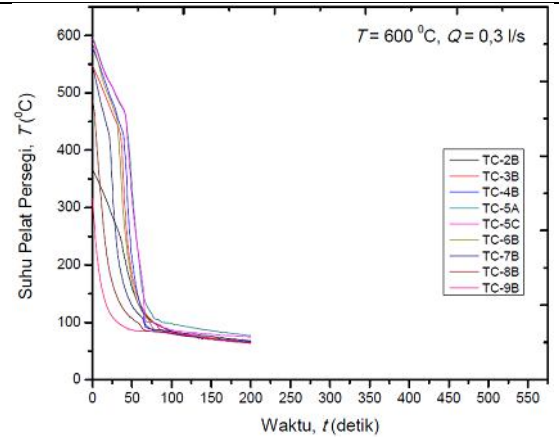
Dari eksperimen yang telah dilakukan dengan suhu awal pelat $600\ ^\circ\text{C}$, suhu air pendingin yang masuk ke celah $85\ ^\circ\text{C}$, lebar celah 1 mm, dan dengan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik didapatkan kurva transien suhu awal pelat persegi seperti ditunjukkan pada



Gambar 3. Kurva Transien Suhu Awal Pelat Persegi $600\ ^\circ\text{C}$ Pada Debit Aliran Air Pendingin 0,1 liter/detik



Gambar 4. Kurva Transien Suhu Awal Pelat Persegi $600\ ^\circ\text{C}$ Pada Debit Aliran Air Pendingin 0,2 liter/detik



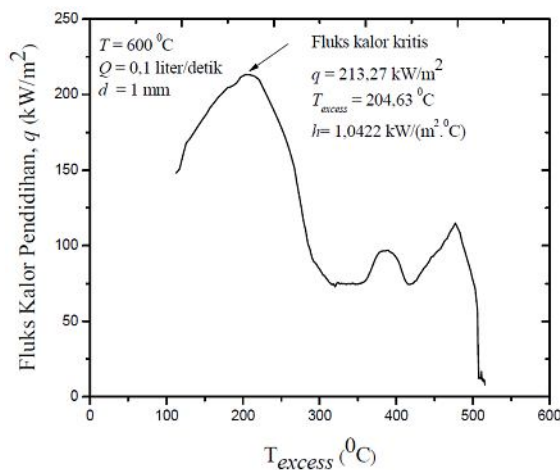
Gambar 5. Kurva Transien Suhu Awal Pelat Persegi $600\ ^\circ\text{C}$ Pada Debit Aliran Air Pendingin 0,3 liter/detik

Dari Gambar 3-5 terlihat bagian bawah pelat (Tc-9B) memiliki suhu yang paling rendah. 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. Pada bagian atas pelat (Tc-2B) juga memiliki suhu yang rendah namun sedikit di atas suhu bagian bawah. Pelat bagian atas walaupun tertutup oleh *plenum*, pendinginan juga cepat terjadi dikarenakan pendinginan oleh air pendingin yang melewati celah sempit dan adanya *transfer* kalor ke *plenum* serta pipa saluran air pendingin yang tidak terisolasi. Pada bagian tengah pelat (Tc-5C) memiliki suhu yang paling tinggi dikarenakan menumpuknya fluks kalor di tengah. Fluks kalor yang terakumulasi ini termasuk sumbangan fluks kalor dari arah pelat bawah dan pelat atas yang terdistribusi ke segala arah mengakibatkan menumpuknya fluks kalor di bagian tengah pelat persegi. Disamping itu, pendinginan yang terjadi pada pelat bagian tengah hanya berasal dari aliran air pendingin yang masuk ke *narrow gap* saja, sehingga suhunya lebih lambat turun jika dibandingkan dengan suhu pada pelat bagian atas dan bawah pelat.

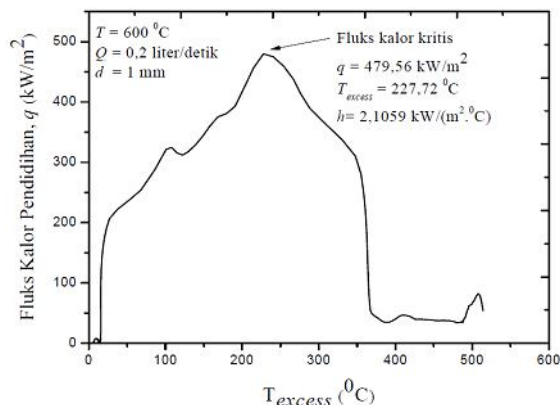
Fenomena pendinginan yang terjadi juga memperlihatkan adanya *counter current flow*, yaitu adanya uap yang menahan air pendingin masuk pertama kali ke dalam celah. Hal ini ditunjukkan dengan tersendatnya air pendingin yang keluar melalui lubang keluaran celah (*open loop*). Air yang keluar melalui lubang 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.

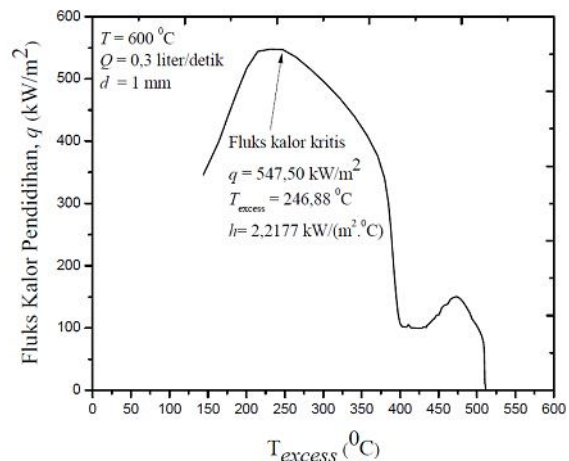
Dari analisa data hasil eksperimen yang dilakukan juga didapatkan kurva fluks kalor terhadap T_{excess} . Gambar 6-8 memperlihatkan perubahan fluks kalor sebagai fungsi T_{excess} .



Gambar 6. Kurva Fluks Kalor Pendidihan Terhadap T_{excess} Pelat Rektangular Pada Debit Aliran Air Pendingin 0,1 liter/detik dan Suhu Pelat 600 °C



Gambar 7. Kurva Fluks Kalor Pendidihan Terhadap T_{excess} Pelat Rektangular Pada Debit Aliran Air Pendingin 0,2 liter/detik dan Suhu Pelat 600 °C



Gambar 8. Kurva Fuks Kalor Pendidihan Terhadap T_{excess} Pelat Rektangular Pada Debit Aliran Air Pendingin 0,3 liter/detik dan Suhu Pelat 600 °C

Dari kurva fluks kalor pendidihan terhadap T_{excess} pelat rektangular, terlihat bahwa pada debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik memiliki nilai fluks kalor kritis sebesar 213,27 kW/m² dan koefisien perpindahan kalor 1,0422 kW/(m²·°C). Pada debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik memiliki nilai fluks kalor kritis sebesar 479,56 kW/m² dan koefisien perpindahan kalor 2,1059 kW/(m²·°C). Pada debit aliran air pendingin 0,3 liter/detik memiliki nilai fluks kalor kritis sebesar 547,50 kW/m² dan koefisien perpindahan kalor 2,2177 kW/(m²·°C). Hal ini menunjukkan bahwa pada suatu suhu permukaan pelat yang sama, nilai fluks kalor kritis akan semakin besar ketika debit aliran air pendingin yang dialirkan ke dalam *vertical rectangular narrow gap* juga semakin besar.

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. 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. Sedangkan koefisien heat transfer menunjukkan suatu nilai yang menyatakan besarnya kalor yang ditransfer pada tiap perubahan suhu pelat per satuan luas untuk setiap perbedaan suhu 1 °C.

Pada suhu permukaan pelat rectangular 600 °C, terjadi semua fenomena pendidihan ketika air pendingin dilewatkan ke dalam celah sempit persegi yaitu rejim pendidihan film, rejim pendidihan transisi, rejim pendidihan inti, dan rejim perpindahan kalor konveksi satu fasa. Pada rejim pendidihan *film*, air pendingin tidak dapat membasahi pelat panas. Air pendingin akan menjadi uap ketika menyentuh pelat panas pada rejim ini. Tidak terjadi penyerapan kalor yang besar pada pendidihan *film* ini, yang berarti bahwa penurunan suhu tidak terlalu signifikan ketika air menyentuh pelat panas. Pada saat titik *Leidenfrost (minimum film boiling)* tercapai, air pendingin yang melewati *vertical rectangular narrow gap* mulai dapat menyentuh permukaan pelat panas secara *establish*. Kondisi inilah yang disebut dengan titik *rewetting*. Titik *rewetting* terjadi pada saat pelat panas berada pada kondisi pendidihan *film* minimal. Hal ini ditandai dengan terjadinya penyerapan kalor pelat panas yang semakin besar oleh air pendingin. 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.

KESIMPULAN

1. Pendinginan pelat bersuhu 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik menghasilkan nilai fluks kalor kritis sebesar 213,27 kW/m², 479,56 kW/m², dan 547,50 kW/m². Serta nilai koefisien perpindahan kalornya sebesar 1,0422 kW/(m². °C), 2,1059 kW/(m². °C), dan 2,2177 kW/(m². °C).
2. Pada suatu suhu permukaan pelat yang sama, nilai fluks kalor kritis akan semakin besar ketika debit aliran air pendingin yang dialirkan ke dalam *vertical rectangular narrow gap* juga semakin besar.
3. Fenomena *counter current flow* yang terjadi selama pendinginan menghambat proses pendinginan pelat panas dan mengakibatkan kecilnya nilai fluks kalor.

ARTI SIMBOL (NOMENCLATURE)

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

DAFTAR PUSTAKA

1. Y. Maruyama et al., (1999), 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.
2. A. Hidaka et al., (1999), 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.
3. P. Horner et al., (1999), Simulation Gap Cooling Phenomena of a Melt in the Lower Head of a RPV. Proceeding of the Workshop on Severe Accident Research (SARJ-98), JAERI-Conf 99-005.
4. A.R. Antariksawan (2005), Analisis Degradasi Teras PWR Pada Kejadian Kehilangan Catu Daya. Jurnal Tri Dasa Mega, Vol. 2, No. 3.
5. Kandlikar, S.G., (2002), Heat Transfer Mechanisms during Flow Boiling in Microchannels. Journal of Heat Transfer, No.8, Vol.126.
6. Jun Huang et. al., (2009), Numerical Study on Effect of Gap Width of Narrow Rectangular Channel on Critical Heat Flux Enhancement. Int. J. Nuclear Engineering and Design 239: 320-326.
7. Ishibashi, E., Nishikawa, K., (1969), Saturated Boiling Heat Transfer in Narrow Spaces. International Journal of Heat Mass Transfer 12: 863-894.
8. Monde. M., Kusuda, H., and Uehara, H., (1982), Critical Heat Flux during Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular

- Channel Submerged in Saturated Liquid. Trans. ASME 104: 300-303.
9. Xia, C., Guo, Z., Hu, W., (1992), Mechanism of Boiling Heat Transfer in Narrow Channels. San Diego CA 197: 111-119.
 10. Chunlin Xia, Weilin Hu, Zengyuan Guo (1996) Natural Convective Boiling in Vertical Rectangular Narrow Channels. Experimental Thermal and Fluid Science 12: 313-324.
 11. J. Bonjour, M. Lallemand (1998), Flow Patterns during Boiling in a Narrow Space between Two Vertical Surfaces. International Journal of Multiphase Flow 24: 947-960.
 12. Peng, X.F., and Wang, B.X., (1998), Forced Convection and Boiling Characteristics in Microchannels. Heat Transfer, Proceedings of 11th IHTC, Kyongju, Korea, Vol. 1: 371-390.
 13. Fujita, Y., and Yang, Y., (2002), Boiling Heat Transfer in Rectangular Channels of Small Gaps. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol. 62, No. 4.
 14. M. Juarsa, (2003), *Study on Boiling Heat Transfer Under Transient Cooling in an Annulus with A Narrow Gap*. Master Degree Thesis of Fundamental Energy Science, Kyoto University.
 15. Jian Zhang, Futoshi Tanaka, Mulya Juarsa, Kaichiro Mishima (2003), Calculation of Boiling Curves during Rewetting of a Hot Vertical narrow Channel. The 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9.
 16. H.Y. Zeng, S.Z. Qiu, and D.N. Jia (2007), Investigation on the Characteristics of the Flow and Heat Transfer in Bilaterally Heated Narrow Annuli. International Journal of Heat and Mass Transfer 50: 492-501.
 17. Qing Lu, Suizheng Qiu, Guanghui Su, Wenxi Tian, Zhonghao Ye (2010), Experimental Research on Heat Transfer of Natural Convection in Vertical Rectangular Channels with Large Aspect Ratio. International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science 34: 73-80.
 18. Salah El-Din El-Morshedy, Adel Alyan, and Loula Shouman (2012), Experimental Investigation of Natural Convection Heat Transfer in Narrow Vertical Rectangular Channel Heated from Both Sides. International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science 36: 72-77.