



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI EKSPERIMENTAL FENOMENA *REWETTING*  
PADA CELAH SEMPIT PERSEGI  
SELAMA PROSES *QUENCHING***

**TESIS**

**M. HADI KUSUMA  
1006788523**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JUNI 2012**

**Universitas Indonesia**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI EKSPERIMENTAL FENOMENA *REWETTING*  
PADA CELAH SEMPIT PERSEGI  
SELAMA PROSES *QUENCHING***

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik  
(M.T)**

**M. HADI KUSUMA**

**1006788523**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI  
DEPOK  
JUNI 2012**

**Universitas Indonesia**

**PERNYATAAN ORISINALITAS**

MAKALAH PENYAJIAN

Dalam rangka...

Nama : M. Hadi Kusuma

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : M. Hadi Kusuma  
No. Penerimaan : 1006788523

Tanda Tangan : 

Tanggal : 19 Juni 2012

Diketahui dan disetujui oleh Dosen Pembimbing I dan Pembimbing II

Dosen Pembimbing I : Dr. Ir. Agus Permana, ST, MSi  
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Agus Permana, ST, MSi

Program Studi : Teknik Informatika  
Fakultas : Teknik  
Universitas : Universitas Indonesia

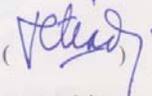
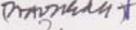
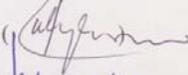
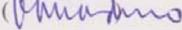
iii

### HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :  
 Nama : M. Hadi Kusuma  
 NPM : 1006788523  
 Departemen : Teknik Mesin  
 Judul Tesis : **Studi Eksperimental Fenomena *Rewetting*  
 Pada Celah Sempit Persegi selama Proses  
*Quenching***

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I	: Prof. Dr-Ing. Nandy Putra	(  )
Pembimbing II	: Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan, DEA.	(  )
Penguji	: Prof. Dr. Ir Raldi Artono Koestoer, DEA.	(  )
	Dr. Ir. R. Danardono, A.S., DEA.PE	(  )
	Dr. Agus Pamitran, ST, MSc.	(  )

Ditetapkan di : Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia  
 Kampus Baru UI - Depok

Tanggal : 19 Juni 2012

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil ‘alamin, akhirnya tesis tentang Studi Eksperimental Fenomena *Rewetting* pada Celah Sempit Persegi selama Proses *Quenching* ini dapat diselesaikan. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Magister Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa masih sangat banyak kekurangan dalam penulisannya, oleh karena itu kritik dan saran sangat diharapkan agar didapatkan mutu yang lebih baik.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr-Ing Nandy Putra selaku Pembimbing I yang telah sangat banyak menyediakan pikiran, waktu, tenaga dan dukungannya dalam memberikan ilmu dan bimbingannya.
2. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan, DEA selaku Pembimbing II yang telah sangat banyak menyediakan pikiran, waktu, tenaga dan dukungannya dalam memberikan ilmu dan bimbingannya..
3. Kementerian Riset dan Teknologi yang telah memberikan beasiswa melalui Program Beasiswa Pascasarjana 2010.
4. Prof. Raldi Artono Koestoer atas ilmu dan bimbingannya.
5. Uniek, Lulu, dan Haikal tercinta yang selalu mendoakan, mendukung dan merelakan waktunya demi selesainya perjuangan ini.
6. Orang tua dan adik-adik yang selalu memberikan doa dan dukungan.
7. Bro Mulya Juarsa atas bimbingan, ilmu, dan pengalaman yang diberikan sehingga dapat terselesaikannya tesis ini.
8. Mas Wayan Nata, Bro Ridho Irwansyah, Mbak Ayie Ratino, Bli Agus Triputra, Bu Dini Agustina, Bro Agung, dan *Applied Heat Transfer Research Group team*.
9. Tim Termohidrolika BOFA PTRKN BATAN

Depok, Juni 2012

Penulis,

**Universitas Indonesia**

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Hadi Kusuma  
NPM : 1006788523  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Besas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**"Studi Eksperimental Fenomena *Rewetting* pada Celah Sempit Persegi selama Proses *Quenching*"**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 19 Juni 2012

Yang menyatakan,



(M. Hadi Kusuma)

## ABSTRAK

Nama : M. Hadi Kusuma  
Departemen : Teknik Mesin  
Judul : Studi Eksperimental Fenomena *Rewetting* pada Celah Sempit Persegi selama Proses *Quenching*

Fenomena *rewetting* pada celah sempit persegi selama proses *quenching* berhubungan dengan manajemen termal ketika terjadinya suatu kecelakaan nuklir, baik kecelakaan karena kehilangan air pendingin maupun kecelakaan lain yang mengakibatkan lelehnya teras reaktor nuklir. Untuk itu perlu dilakukan penelitian tentang hal tersebut di atas agar didapatkan pemahaman yang benar tentang keselamatan reaktor nuklir dari sisi pendinginan khususnya fenomena *rewetting* di celah sempit persegi selama proses *quenching* dan juga dapat berguna bagi perbaikan desain reaktor generasi selanjutnya. Penelitian difokuskan pada penentuan suhu, waktu, dan kecepatan *rewetting* di celah sempit persegi berukuran 1 mm dengan 3 variasi suhu awal pelat persegi dan 3 variasi laju aliran air pendingin. Eksperimen dilakukan dengan menginjeksikan air pada laju aliran 0,1-0,3 liter/detik pada suhu air pendingin 85°C. Data transien suhu hasil pengukuran direkam melalui sistem akuisisi data. Data tersebut digunakan untuk mengetahui suhu transien pendinginan celah sempit persegi dan menentukan suhu, waktu, dan kecepatan *rewetting* dari proses *quenching* tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh data eksperimen perubahan suhu dinding pelat panas selama proses *quenching* pada celah sempit persegi, memahami fenomena *rewetting* pada proses *quenching* pada celah sempit persegi, dan mempelajari pengaruh suhu awal pelat panas dan laju alir air pendingin terhadap *rewetting*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pada suhu 205 °C dengan debit aliran 0,1-0,3 liter/detik, suhu *rewetting* terletak pada rentang 201,38-205 °C, waktu *rewetting* terjadi pada 0 detik dan kecepatan rerata *rewetting* pada 0 meter/detik. Pada suhu 400 °C dengan debit aliran 0,1-0,3 liter/detik, suhu *rewetting* terletak pada rentang 358,66-387,5 °C, waktu *rewetting* terjadi pada 2,73-44,48 detik, dan kecepatan *rewetting* pada 0,0094-0,1037 meter/detik. Pada suhu 600 °C dengan debit aliran 0,1-0,3 liter/detik, suhu *rewetting* terletak pada rentang 426,63-480,55 °C, waktu *rewetting* terjadi pada 34,77-88,23 detik, dan kecepatan rerata *rewetting* pada 0,0025-0,0072 meter/detik. Dari penelitian ini menunjukkan suhu terjadinya *rewetting* akan meningkat seiring dengan kenaikan suhu permukaan pelat panas persegi. Pada suhu permukaan pelat panas persegi yang sama, semakin besar debit aliran air pendingin yang dilewatkan melalui celah sempit maka waktu dan kecepatan *rewetting* yang dibutuhkan untuk mendinginkan permukaan pelat persegi tersebut akan semakin cepat. Meningkatnya suhu pelat panas persegi bagian tengah pada suatu debit aliran yang sama akan menyebabkan semakin lamanya waktu yang dibutuhkan oleh air pendingin untuk melakukan *rewetting*. Dapat diperkirakan bahwa gelembung uap yang terbentuk akibat pemanasan pelat persegi tersebut bergerak ke atas dan mengakibatkan terjadinya *counter current* yang menghambat laju aliran air pendingin untuk melakukan pendinginan celah sempit persegi.

Kata kunci: *rewetting*, *quenching*, celah sempit, keselamatan nuklir

## ABSTRACT

Name : M. Hadi Kusuma  
Department : Mechanical Engineering  
Title : Experimental Study of Rewetting Phenomena on Rectangular Narrow Gap During Quenching Process

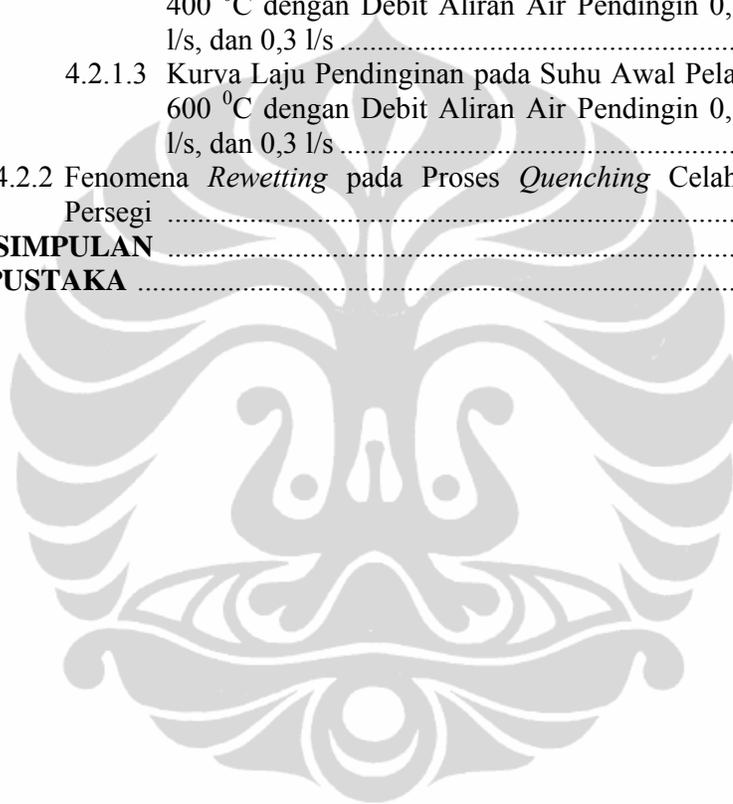
Rewetting phenomena on a rectangular narrow gap during quenching process is related to thermal management when the occurrence of a nuclear accident due to loss of coolant accident or other kind of accidents resulting in core melted. In order to address the problem, it is crucial to conduct research to get a better understanding of nuclear safety reactor regarding to cooling especially in rewetting phenomena in a rectangular narrow gap during quenching process. The influence of the initial temperature of the hot plate and cooling water flow rate of rewetting was also observed. The study focused on determining the temperature, time, and velocity of rewetting in 1 mm narrow gap with 3 variations of the initial temperature of hot plates and 3 variations of the cooling water flow rate. Experiments were carried out by injecting water into the hot plate whose temperature ranging from 205 to 600 °C at a flow rate 0.1-0.3 liters/sec to 85 °C cooling water temperature. Data of transient temperature measurements were recorded using a data acquisition system in order to record the temperature, time, and velocity of rewetting during the quenching process. This study aims to understand the phenomenon of rewetting during the quenching process and to study the influence of the initial temperature of the hot plate and cooling water flow rate of rewetting on a rectangular narrow gap. The results shows that at 205 °C with a flow rate 0.1-0.3 l/s, rewetting temperature range 201.38 - 205 °C, rewetting time occurred at 0 second, and average rewetting velocity is 0 m/s. At 400 °C with flow rates 0 - 0.3 l/s, rewetting temperature is 358.66 – 387.5 °C, the rewetting time is 2.73 – 44.48 seconds, and average rewetting velocity is 0.0094 - 0.1037 m/s. At 600 °C with flow rates from 0.1- 0.3 l/s, rewetting temperature range from 426.63 to 480.55 °C, the rewetting time from 34.77 – 88.23 seconds, and the average rewetting velocity from 0.0025 -0.0072 m/s. The results indicates that rewetting temperature will increase with rising temperature of rectangular hot plate. At the same temperature of hot plate, the greater flow rate of cooling water passed through a rectangular narrow gap the faster the resulted time and velocity of rewetting will be. Increasing the temperature of the hot plate on the center plate in a similar flow rate will cause the length of time required by the cooling water for rewetting. It is estimated that the amount of gas formed by heating a rectangular plate moved up and resulted a counter current that inhibits the cooling water flow rate in the cooling of rectangular hot plate.

Keywords: rewetting, quenching, narrow gap, nuclear safety

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	ii
<b>PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	iii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iv
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI</b> .....	vi
<b>ABSTRAK INDONESIA</b> .....	vii
<b>ABSTRAK INGGRIS</b> .....	viii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ix
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xiv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	4
1.3 Batasan Penelitian .....	5
1.4 Manfaat Penelitian .....	5
1.5 Metodologi Penelitian .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1 Pendidihan .....	6
2.1.1 Pendidihan Kolam .....	6
2.1.2 Pendidihan Alir .....	9
2.2 <i>Rewetting</i> pada Permukaan Bersuhu Tinggi .....	11
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	18
3.1 Skematik Pengujian .....	18
3.2 Peralatan Eksperimen .....	19
3.3 Prosedur Eksperimen .....	22
3.4 Matriks Eksperimen .....	23
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	25
4.1 HASIL .....	25
4.1.1 Visualisasi Distribusi Suhu Pelat Utama sebelum dilakukan Proses <i>Quenching</i> .....	25
4.1.2 Karakteristik Suhu Transien selama Proses <i>Quenching</i> .....	29
4.1.2.1 Kurva Suhu Transien dan <i>Isotime</i> Pelat Persegi pada 205 °C dengan Debit Aliran Air Pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s, dan 0,3 l/s .....	30
4.1.2.2 Kurva Suhu Transien dan <i>Isotime</i> Pelat Persegi pada 400 °C dengan Debit Aliran Air Pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s, dan 0,3 l/s .....	34
4.1.2.3 Kurva Suhu Transien dan <i>Isotime</i> Pelat Persegi pada 600 °C dengan Debit Aliran Air Pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s, dan 0,3 l/s .....	38
4.1.3 Pengaruh Debit Aliran Air Pendingin pada Proses <i>Quenching</i> .....	42

4.1.3.1 Perbandingan Kurva Transien pada Suhu Awal Pelat Persegi 205 °C, 400 °C, dan 600 °C dengan Variasi Debit Aliran Air Pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s, dan 0,3 l/s.....	43
4.2 PEMBAHASAN .....	45
4.2.1 Pengaruh Suhu Awal Pelat Panas dan Laju Aliran Air Pendingin terhadap <i>Rewetting</i> .....	45
4.2.1.1 Kurva Laju Pendinginan pada Suhu Awal Pelat Persegi 205 °C dengan Debit Aliran Air Pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s, dan 0,3 l/s .....	45
4.2.1.2 Kurva Laju Pendinginan pada Suhu Awal Pelat Persegi 400 °C dengan Debit Aliran Air Pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s, dan 0,3 l/s .....	48
4.2.1.3 Kurva Laju Pendinginan pada Suhu Awal Pelat Persegi 600 °C dengan Debit Aliran Air Pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s, dan 0,3 l/s .....	52
4.2.2 Fenomena <i>Rewetting</i> pada Proses <i>Quenching</i> Celah Sempit Persegi .....	57
<b>BAB V KESIMPULAN</b> .....	60
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	62



## DAFTAR GAMBAR

<i>Gambar 1</i>	<i>Konfigurasi keadaan debris pada bagian bawah Reactor Pressure Vessel serta dan pemodelan dengan bagian ujinya</i>	3
<i>Gambar 2.1</i>	<i>Kurva pendidihan</i>	7
<i>Gambar 2.2</i>	<i>Jenis-jenis daerah aliran yang dapat terjadi pada pendidihan alir</i>	10
<i>Gambar 2.3</i>	<i>Kurva transien suhu kelongsong bahan bakar pada saat dilakukan bottom reflooding dengan laju aliran air yang tinggi</i>	13
<i>Gambar 2.4</i>	<i>Fenomena fisik rewetting pada tube dan rod pada suhu 300-800 °C</i>	14
<i>Gambar 2.5</i>	<i>Rewetting permukaan pelat pada suhu 600 °C dengan lebar celah sempit 1 mm</i>	15
<i>Gambar 2.6</i>	<i>Visualisasi perpindahan kalor selama proses quenching pada flat-end cylindrical probe bersuhu 900 °C dengan subcooled water</i>	16
<i>Gambar 2.7</i>	<i>Kurva suhu permukaan dan gradiennya pada pendinginan transien</i>	17
<i>Gambar 3.1</i>	<i>Skematik pengujian HeaTing-02</i>	19
<i>Gambar 3.2</i>	<i>Susunan termokopel pada pelat utama HeaTiNG-02</i>	20
<i>Gambar 3.3</i>	<i>Susunan termokopel pada pelat penutup HeaTiNG-02</i>	21
<i>Gambar 4.1</i>	<i>Posisi alat uji celah sempit persegi pada saat di capture dengan kamera infra red</i>	25
<i>Gambar 4.2</i>	<i>Distribusi suhu heater</i>	26
<i>Gambar 4.3</i>	<i>Profil suhu heater</i>	26
<i>Gambar 4.4</i>	<i>Distribusi suhu permukaan pelat penutup alat uji celah sempit persegi</i>	27
<i>Gambar 4.5</i>	<i>Profil suhu permukaan pelat luar persegi pada suhu awal 400 °C</i>	27
<i>Gambar 4.6</i>	<i>Distribusi suhu heater</i>	28
<i>Gambar 4.7</i>	<i>Profil suhu heater</i>	28
<i>Gambar 4.8</i>	<i>Distribusi suhu permukaan pelat penutup celah sempit persegi pada suhu awal pelat 600 °C</i>	29
<i>Gambar 4.9</i>	<i>Profil suhu permukaan pelat luar persegi pada suhu awal 600 °C</i>	29
<i>Gambar 4.10</i>	<i>Kurva transien suhu awal pelat persegi 205 °C pada debit aliran air pendingin 0,1 l/s</i>	31
<i>Gambar 4.11</i>	<i>Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi 205 °C dan debit aliran air pendingin 0,1 l/s</i>	31
<i>Gambar 4.12</i>	<i>Kurva transien suhu awal pelat persegi 205 °C pada debit aliran air pendingin 0.2 l/s</i>	32
<i>Gambar 4.13</i>	<i>Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi 205 °C dan debit aliran air pendingin 0,2 l/s</i>	32

Gambar 4.14	Kurva transien suhu awal pelat persegi 205 °C pada debit aliran air pendingin 0,3 l/s	33
Gambar 4.15	Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi 205 °C dan debit aliran air pendingin 0,3 l/s	33
Gambar 4.16	Kurva transien suhu awal pelat persegi 405 °C pada debit aliran air pendingin 0,1 l/s	35
Gambar 4.17	Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi 405 °C dan debit aliran air pendingin 0,1 l/s	35
Gambar 4.18	Kurva transien suhu awal pelat persegi 405 °C pada debit aliran air pendingin 0,2 l/s	36
Gambar 4.19	Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi 405 °C dan debit aliran air pendingin 0,2 l/s	36
Gambar 4.20	Kurva transien suhu awal pelat persegi 405 °C pada debit aliran air pendingin 0,3 l/s	37
Gambar 4.21	Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi 405 °C dan debit aliran air pendingin 0,3 l/s	37
Gambar 4.22	Kurva transien suhu awal pelat persegi 600 °C pada debit aliran air pendingin 0,1 l/s	39
Gambar 4.23	Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi 600 °C dan debit aliran air pendingin 0,1 l/s	39
Gambar 4.24	Kurva transien suhu awal pelat persegi 600 °C pada debit aliran air pendingin 0,2 l/s	40
Gambar 4.25	Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi 600 °C dan debit aliran air pendingin 0,2 l/s	40
Gambar 4.26	Kurva transien suhu awal pelat persegi 600 °C pada debit aliran air pendingin 0,3 l/s	41
Gambar 4.27	Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi 600 °C dan debit aliran air pendingin 0,3 l/s	41
Gambar 4.28	Kurva transien suhu awal pelat persegi 205 °C terhadap variasi debit aliran air pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s dan 0,3 l/s	43
Gambar 4.29	Kurva transien suhu awal pelat persegi 405 °C terhadap variasi debit aliran air pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s dan 0,3 l/s	44
Gambar 4.30	Kurva transien suhu awal pelat persegi 600 °C terhadap variasi debit aliran air pendingin 0,1 l/s, 0,2 l/s dan 0,3 l/s	44
Gambar 4.31	Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 205 °C dengan debit aliran air pendingin 0,1 l/s	46
Gambar 4.32	Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 205 °C dengan debit aliran air pendingin 0,2 l/s	46
Gambar 4.33	Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 205 °C dengan debit aliran air pendingin 0,3 l/s	47
Gambar 4.34	Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 405 °C dengan debit aliran air pendingin 0,1 l/s	49
Gambar 4.35	Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 405 °C dengan debit aliran air pendingin 0,2 l/s	49

<i>Gambar 4.36</i>	<i>Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 405 °C dengan debit aliran air pendingin 0,3 l/s</i>	50
<i>Gambar 4.37</i>	<i>Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,1 l/s</i>	52
<i>Gambar 4.38</i>	<i>Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,2 l/s</i>	53
<i>Gambar 4.39</i>	<i>Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,3 l/s</i>	53



**DAFTAR TABEL**

<i>Tabel 3.1</i>	<i>Matriks Eksperimen HeaTiNG-02</i>	23
<i>Tabel 4.1</i>	<i>Suhu, waktu dan kecepatan rerata rewetting sebagai fungsi dari suhu awal pelat panas dan debit aliran air pendingin</i>	55



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

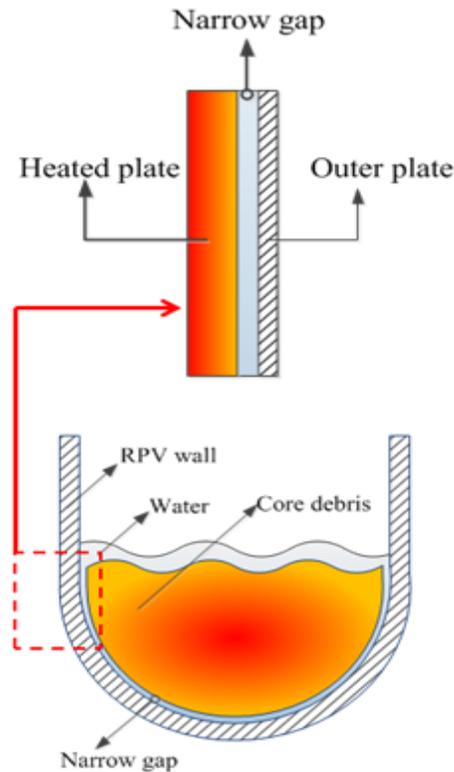
### **1.1 Latar Belakang**

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). Untuk memenuhi hal itu, pemerintah telah menetapkan kebijakan pemanfaatan energi nuklir secara nasional di masa mendatang. Sesuai dengan Peraturan Presiden No. 5 Tahun 2006 tentang kebijakan energi nasional, bahwa sampai dengan tahun 2025 sekitar 4000 MWe suplai listrik akan dibangkitkan oleh PLTN. Diharapkan dengan penggunaan PLTN ini, krisis energi di Indonesia akan dapat diatasi (1,2).

Namun tidak bisa dipungkiri, setiap penggunaan teknologi pasti mendatangkan manfaat dan juga potensi bahaya yang ditimbulkan. Salah satu potensi bahaya yang akan terjadi dalam penggunaan PLTN adalah 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 Daiichi, Jepang, 2011.

Terkait dengan kecelakaan PLTN khususnya yang pernah terjadi di TMI-2 hingga menyebabkan melelehnya teras reaktor, sehingga kini banyak penelitian dilakukan untuk menjamin tingkat keselamatan PLTN. Salah satu penelitian yang saat ini masih terus dilakukan adalah interaksi antara lelehan teras di bagian bawah bejana dengan dinding bejana reaktor yang membentuk celah sempit diantara keduanya. Celah sempit yang terisi fluida ini dapat menjadi kunci untuk penanganan integritas bejana reaktor. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi kondisi lelehan teras di bagian bawah bejana reaktor yang membentuk celah sempit di antara lelehan teras dan dinding bejana serta pemodelan dengan bagian ujinya.

*Maruyama et al.* (1999) melakukan simulasi ALPHA dengan program CAMP. Hasilnya mengindikasikan adanya celah sempit antara lelehan teras yang bagian luarnya membeku dengan dinding bejana dengan ukuran celah 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. *Hidaka et al.* (1999) melakukan simulasi dengan program RELAP/SCDAPSIM mendapatkan prediksi ukuran celah sempit sebesar 1,0 mm dan pengaruh air yang mengisi celah sempit itu mempengaruhi fenomena perpindahan kalornya. *Antariksawan* (2005) melakukan simulasi dengan program MELCOR mengindikasikan adanya celah sempit antara lelehan teras yang bagian luarnya membeku dengan dinding bejana reaktor. *Kandlikar* (2002) mengklasifikasikan celah sempit berdasarkan ukuran celahnya. Pengklasifikasian celah sempit hanya sebagai acuan untuk mengidentifikasi rentang ukuran celah sempit tertentu. Ukuran celah sempit merupakan salah satu hal yang dapat mempengaruhi karakteristik perpindahan kalornya, walaupun pada kenyataannya pengaruh yang muncul pada celah sempit akan tergantung pada sifat-sifat fluida, suhu, dan tekanannya. Kategori celah sempit mencakup ukuran mikro, mini dan konvensional dengan *range* ukuran celah sempit dari 0,02 mm sampai 3 mm. Menurut *Juan Huang, et. al.* (2009) celah sempit dikategorikan sebagai berikut: jika ukuran celah sempit  $\geq 3$  mm, maka disebut *big channel*. Jika ukuran celah sempit diantara 1 mm – 3 mm, maka disebut *narrow channel*. Jika ukuran celah sempit  $\leq 1$  mm, maka disebut *micro channel*.



Gambar 1. Konfigurasi keadaan debris pada bagian bawah Reactor Pressure Vessel serta dan pemodelan dengan bagian ujinya

Penelitian perpindahan kalor pada celah sempit telah banyak dilakukan oleh para peneliti. *Xia et al.* (1992) mengamati dua rejim untuk pendidihan R-113 pada *rectangular vertical channel*, hasilnya pada saat lebar celah sempit  $> 3\text{mm}$ , gelembung 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. *Peng and Wang* (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. *Horner et al.* (1999) melakukan eksperimen fenomena perpindahan kalor pada celah sempit menggunakan fluida R134a.

Dalam eksperimen tersebut ukuran celah sempit yang digunakan adalah 1-11 mm dan sudut kemiringan celah antara  $0^\circ$  hingga  $25^\circ$ . 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. *Mulya Juarsa* (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. *Jian Zhang et al.* (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.

Dari banyak penelitian yang telah dilakukan dalam kasus perpindahan kalor di celah sempit berbentuk persegi dengan berbagai variasi variabel yang diduga berpengaruh terhadap karakteristik dari perpindahan kalor tersebut, masih menunjukkan adanya beberapa parameter yang belum diamati. Salah satunya adalah fenomena *rewetting* pada celah sempit persegi selama proses *quenching* dengan kombinasi antara variasi suhu awal pelat dan variasi debit air pendingin. Untuk itu, maka perlu dilakukan studi eksperimental fenomena *rewetting* pada celah sempit persegi selama proses *quenching* dengan kombinasi antara variasi suhu awal pelat dan variasi debit air pendingin.

## 1.2 Tujuan Penelitian

1. Memperoleh data eksperimen perubahan suhu dinding pelat panas selama proses *quenching* pada celah sempit persegi.
2. Mempelajari pengaruh suhu awal pelat panas dan laju alir air pendingin terhadap *rewetting*.
3. Memahami fenomena *rewetting* pada proses *quenching* pada celah sempit persegi.

### 1.3 Batasan Penelitian

1. Celah sempit persegi hanya digunakan ukuran 1 mm.
2. Variasi suhu awal pelat adalah 205 °C, 400 °C dan 600 °C.
3. Variasi debit aliran yang masuk ke dalam celah sempit adalah 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik.
4. Bahasan hanya difokuskan pada pemahaman fenomena *rewetting* sebagai aspek yang penting dalam keselamatan reaktor nuklir selama pendinginan terkait kondisi *quenching*.
5. Analisis *cooling rate* merupakan bagian terpenting dalam menentukan batas-batas rejim pendidihan yang terjadi selama proses *quenching*.

### 1.4 Manfaat Penelitian

- Diperolehnya hasil analisis yang sistematis dan ilmiah terkait dengan fenomena *rewetting* pada celah sempit persegi selama proses *quenching*.
- Menjadi pertimbangan dalam analisa *rewetting* pada celah sempit persegi selama proses *quenching* yang terkait dengan pendinginan dalam reaktor nuklir.

### 1.5 Metodologi Penelitian

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

- a. Melakukan *literature survey* dari penelitian tentang fenomena *rewetting* pada celah sempit persegi selama proses *quenching* yang pernah dilakukan.
- b. Melakukan eksperimen untuk memperoleh data *rewetting* pada celah sempit persegi selama proses *quenching* dengan parameter perubahan suhu awal pelat dan laju aliran air pendingin yang masuk ke celah sempit.
- c. Menentukan distribusi suhu pada celah sempit persegi.
- d. Melakukan analisis terhadap hasil yang telah didapatkan.
- e. Menarik kesimpulan dari perbandingan antara hasil eksperimen dengan perhitungan.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Pendidihan

Fasa suatu zat dapat berubah dari satu fasa ke fasa yang lain. Perubahan fasa yang terjadi dari fasa cair menjadi fasa uap disebut penguapan atau pendidihan. Penguapan terjadi pada permukaan antara cairan dan uap ketika tekanan uap lebih kecil dari tekanan cairan pada suhu tertentu. Penguapan merupakan fenomena yang terjadi pada permukaan cairan. Dalam proses penguapan dicirikan dengan tidak terjadi pembentukan dan pergerakan gelembung. Sedangkan proses pendidihan terjadi pada permukaan antara padatan dan cairan ketika cairan kontak dengan permukaan padatan yang bersuhu  $T_s$  dimana  $T_s$  lebih besar dari suhu jenuh ( $T_{sat}$ ) cairan. Dalam proses pendidihan dicirikan dengan terjadi pembentukan dan pergerakan gelembung (13). Demikian juga peristiwa kebalikannya adalah pada proses penurunan tekanan. Jika tekanan air tiba-tiba turun dan berada di bawah tekanan saturasinya, maka air dengan seketika akan mendidih tanpa adanya masukan kalor, yang dikenal dengan peristiwa *flashing* (14).

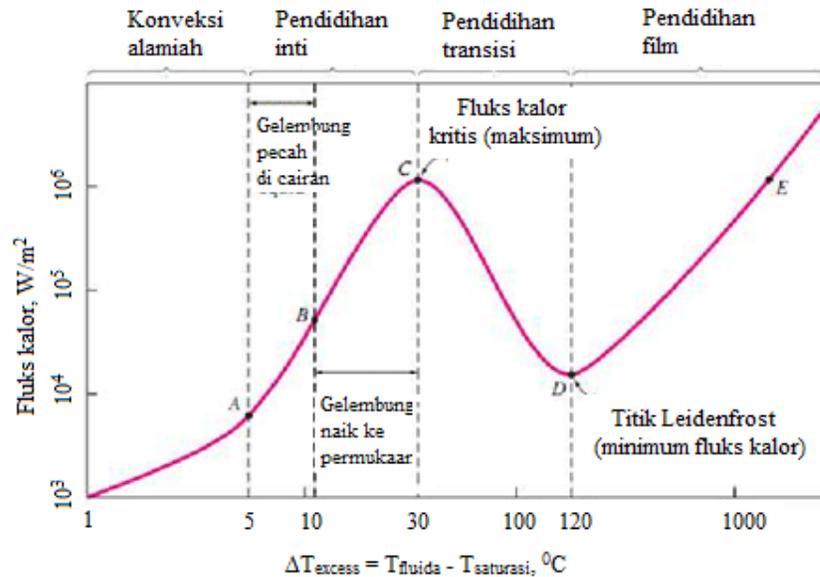
Menurut gerakan fluida yang terjadi pada proses pendidihan, pendidihan dapat diklasifikasikan menjadi pendidihan kolam (*pool boiling*) dan pendidihan alir (*flow boiling*).

##### 2.1.1 Pendidihan Kolam

Pendidihan kolam terjadi pada cairan fluida yang diam. Pemanas terbenam/terdapat di bawah permukaan fluida dan memindahkan kalor ke fluida yang diam disekitarnya. Gerakan fluida di daerah permukaan pemanas disebabkan oleh konveksi bebas, gerakan pembentukan dan pelepasan gelembung.

Pendidihan kolam terdiri dari 4 daerah yang berbeda yang diklasifikasikan berdasarkan pada perbedaan antara suhu permukaan dinding ( $T_w$ ) dan suhu saturasi cairan ( $T_{sat}$ ), yang selanjutnya disebut  $\Delta T_{excess}$ . Keempat daerah pendidihan tersebut adalah daerah konveksi alamiah (*natural convection*), daerah pendidihan inti (*nucleate boiling*), daerah pendidihan transisi (*transition boiling*),

dan daerah pendidihan *film* (*film boiling*). Keempat daerah tersebut digambarkan dalam bentuk kurva yang menunjukkan besarnya fluks kalor yang dipindahkan dari permukaan panas menuju pendingin *versus*  $\Delta T_{excess}$  seperti terlihat pada Gambar 2.1 (13).



Gambar 2.1. Kurva pendidihan (telah diolah kembali 13)

Ciri keempat daerah tersebut adalah sebagai berikut:

1. **Konveksi alamiah.** Perpindahan kalor dan pergerakan fluida yang terjadi merupakan efek dari konveksi alamiah dari permukaan pemanas ke fluida tanpa terjadinya pembentukan gelembung. Daerah ini terletak pada  $\Delta T_{excess} < 5$  °C, belum ada aktivitas pendidihan, dan gelembung uap air belum terbentuk.
2. **Pendidihan inti.** Daerah pendidihan ini terletak pada  $5$  °C  $< \Delta T_{excess} < 30$  °C dan. Daerah ini terletak diantara titik A yang merupakan titik awal pembentukan gelembung dan titik B yang merupakan titik transisi. Pemanas memindahkan kalor secara langsung ke fluida yang berada disekitarnya. Pada daerah ini mulai terbentuk gelembung-gelembung dan melepaskan diri dari

permukaan pemanas serta berkondesasi dan pecah di dalam fluida dalam perjalanannya menuju permukaan fluida. Gelembung terbentuk dari suatu titik pada permukaan pemanas yang berupa lubang atau *cavity*. Gelembung-gelembung ini terbentuk dari gas atau uap yang terbentuk di dalam *cavity*. Semakin meningkatnya kalor yang diberikan, maka akan semakin banyak gas atau uap yang terbentuk di dalam *cavity* dan hingga akhirnya lepas dari permukaan pemanas dan naik ke atas mencapai ke permukaan bebas. Terlepasnya gelembung menyebabkan *cavity* kosong sehingga fluida yang berada di sekitarnya akan mengisi kekosongan tersebut dan membentuk gelembung baru berikutnya. Gelembung yang terbentuk akan tumbuh sampai suatu ukuran tertentu yang tergantung pada tegangan permukaan, suhu dan tekanannya. Gelembung dapat pecah seketika, dapat membesar, dan lepas dari permukaan pemanas hingga akhirnya pecah dalam fluida. Pada beda suhu yang besar, gelembung tumbuh dan membesar serta lepas dari permukaan pemanas kemudian naik menuju permukaan cairan dan pecah. Pergerakan gelembung ini mengakibatkan pencampuran fluida di sekitar permukaan padat sehingga meningkatkan fluks kalor dan koefisien perpindahan kalor konveksi. Pada daerah B-C makin banyak gelembung yang terlepas dari pori-pori dan berbentuk lonjong. Pergerakannya yang sangat cepat menyebabkan saling bersentuhan dan bertabrakan sehingga nilai koefisien perpindahan kalor dan fluks kalor pada daerah ini menjadi maksimum pada titik C. Titik C disebut sebagai fluks kalor kritis (*critical heat flux*).

3. **Pendidihan transisi.** Pendidihan pada daerah ini terletak diantara pendidihan inti dan pendidihan *film*. Pendidihan transisi disebut juga didih parsial (*partial boiling*). Daerah pendidihan transisi terletak antara  $30^{\circ}\text{C} < \Delta T_{\text{excess}} < 120^{\circ}\text{C}$ . Pembentukan gelembung sedemikian cepatnya sehingga mulai terbentuk lapisan *film*. Uap air menyelimuti permukaan padat yang memisahkan sisi permukaan padat dengan cair. Dengan naiknya suhu permukaan makin banyak pula permukaan padat yang ditutupi oleh lapisan *film*. Pada sembarang titik antara C dan D kondisi pendidihan masih tidak stabil, kadang turun ke pendidihan inti kadang pula naik ke pendidihan *film*.

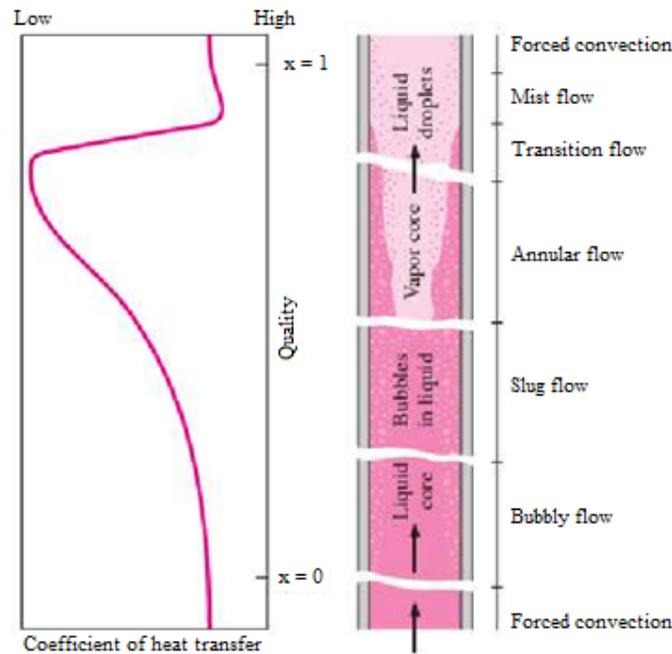
Karena itu daerah ini disebut pula daerah pendidihan *film* tidak stabil (*unstable film boiling*) atau pendidihan *film* sebagian (*partial film boiling*). Fluks kalor menurun dengan meningkatnya suhu karena konduktifitas uap air (gas) jauh lebih kecil dari pada air (cair).

4. **Pendidihan *film*.** Pendidihan pada daerah ini dicirikan oleh adanya suatu lapisan stabil uap yang terbentuk diantara permukaan panas dan cairan. Permukaan pemanas diselimuti oleh *film* uap, dimana panas dikonduksikan melalui uap dan fluida menguap pada batas fasa cairan-uap. Daerah pendidihan *film* terletak pada  $\Delta T_{excess} > 120^{\circ}\text{C}$ . Pada titik D disebut titik *Leidenfrost*. Fluks kalor bernilai minimum, karena itu titik ini sering pula disebut titik fluks kalor minimum (*Minimum Heat Flux*) yang merupakan kebalikan dari fluks kalor kritis. Seluruh permukaan telah diselimuti oleh uap. Perpindahan kalor dari permukaan pemanas ke fluida terjadi secara konduksi dan radiasi. Dengan naiknya suhu permukaan fluks kalor juga meningkat dan perpindahan kalor secara radiasi makin dominan (13, 15-19).

### 2.1.2 Pendidihan Alir

Pendidihan alir terjadi pada fluida yang mengalir. Fluida mengalir melalui saluran atau di atas permukaan yang berada pada suhu yang lebih tinggi dari suhu jenuh fluidanya. Pada pendidihan alir, fluida dipaksa bergerak oleh sumber eksternal, seperti pompa, selama proses perubahan fasa. Pendidihan jenis ini merupakan kombinasi fenomena konveksi alamiah dan/atau konveksi paksa serta pendidihan kolam. Pendidihan alir dapat diklasifikasikan sebagai aliran internal atau eksternal tergantung fluida yang mengalir melalui permukaan panas atau di dalam pipa yang dipanaskan. Pola aliran yang umum berlaku pada saluran vertikal dengan arah aliran ke atas pada pendidihan alir adalah konveksi paksa (dalam bentuk cair), aliran bergelembung (ukuran gelembung uap *uniform*), aliran gas yang mengalir membentuk ukuran gelembung yang besar (*slug*), aliran pada dinding saluran terdapat sebagian fasa cairan yang berlaku sebagai film, dan pada bagian tengah saluran terdapat sebagian tetesan yang terdistribusi dalam gas yang mengalir (*annular*), aliran transisi, *mist flow*, dan konveksi paksa (dalam bentuk

uap). Gambar mengenai jenis-jenis daerah aliran yang dapat terjadi pada pendidihan alir dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Jenis-jenis daerah aliran yang dapat terjadi pada pendidihan alir (13)

Dalam penelitian yang dilakukan ini, pendidihan alir yang terjadi adalah fluida mengalir melalui saluran yang suhunya lebih tinggi dari suhu jenuh fluidanya. Aliran yang terjadi adalah aliran dua fasa, yang merupakan campuran dua-fasa dari fluida dan uapnya.

Dalam konfigurasi aliran, pemisahan air dan uap diperlukan untuk memprediksi perhitungan penurunan tekanan dan perhitungan koefisien perpindahan kalor antara fluida dalam kondisi dua fasa dan dinding saluran. Parameter fisik yang penting dalam menentukan pola aliran adalah tegangan permukaan, yang menjaga dinding saluran tetap basah dan cenderung untuk membuat tetesan-tetesan cairan dan gelembung gas kecil serta gravitasi, yang cenderung mendorong cairan pada dasar saluran.

Proses perubahan fasa melibatkan perubahan densitas, viskositas, kalor spesifik, dan konduktivitas kalor fluida sedangkan kalor laten fluida diserap. Oleh karena itu koefisien perpindahan kalor untuk peristiwa pendidihan akan jauh lebih rumit dibandingkan proses konveksi satu fasa (13, 15-18).

## 2.2 *Rewetting* pada Permukaan Bersuhu Tinggi

Pemahaman tentang *rewetting* sangat dibutuhkan untuk manajemen pengendalian termal ketika terjadi kecelakaan reaktor khususnya kecelakaan yang diakibatkan oleh kehilangan air pendingin (LOCA, loss of coolant accident). Banyak penelitian yang telah dilakukan berkaitan dengan hal tersebut. Penelitian-penelitian tersebut dilakukan dalam rangka menginvestigasi penyebab kecelakaan dan manajemen pengendalian termal ketika kecelakaan reaktor terjadi.

Pengertian *Rewetting* adalah *re-establishment* dari kontak fluida dengan permukaan batang bahan bakar dan menyebabkannya dapat basah. Sisi depan dari kontak *area* ini disebut dengan *wet front*. Permukaan batang bahan bakar yang sangat panas tersebut tidak dapat terbasahi oleh air (suhu awal lebih tinggi dari suhu *Leidenfrost*-nya hingga suhu permukaan tersebut diturunkan ke suhu *Leidenfrost*). Proses *rewetting* terjadi ketika suhu permukaan berada di bawah suhu *Leidenfrost*. Ketika air dialirkan ke permukaan yang sangat panas maka akan terjadi kontak dengan permukaan tersebut hingga permukaan tersebut dapat basah. Pada proses *rewetting* koefisien perpindahan kalor memiliki nilai yang paling tinggi. Kecepatan *rewetting* meningkat dengan meningkatnya laju aliran air yang diberikan dan kecepatan *rewetting* menurun dengan meningkatnya suhu awal permukaan pada suatu laju aliran tertentu. Juga diketahui bahwa fluks kalor kritis akan meningkat seiring dengan meningkatnya laju aliran massa (19-23).

*Kim et.al* (1979) melakukan studi tentang korelasi empirik suhu *rewetting* menggunakan analisis dimensional pada *vertical circular channel* dengan kondisi *bottom flooding*. Dari korelasi tersebut terlihat bahwa suhu *rewetting* akan meningkat seiring dengan meningkatnya suhu pelat panas. Korelasi yang didapatkan adalah sebagai berikut:

$$T_q = 19.51xT_{ws}x\left(\frac{T_{sc}}{T_{ws}}\right)^{0.107}x\left(\frac{c_p.G.\delta}{k}\right)^{-0.162}x\left(\frac{k.\rho^2.T_{ws}}{\delta.G^3}\right)^{-0.0989}x\left(\frac{Z}{\delta}\right)^{-0.163} + T_s \dots (2.1)$$

dimana:

$T_q$  = Suhu *rewetting*, K

$T_s$  = Suhu saturasi fluida, K

$T_{ws}$  = Suhu *wall superheated* = selisih antara suhu dinding dan suhu saturasi fluida, K

$T_{sc}$  = Selisih antara suhu saturasi fluida terhadap suhu *coolant*, K

$c_p$  = Kalor spesifik bahan pipa, J/kg.K

$G$  = Laju aliran massa, kg/m<sup>2</sup>.s

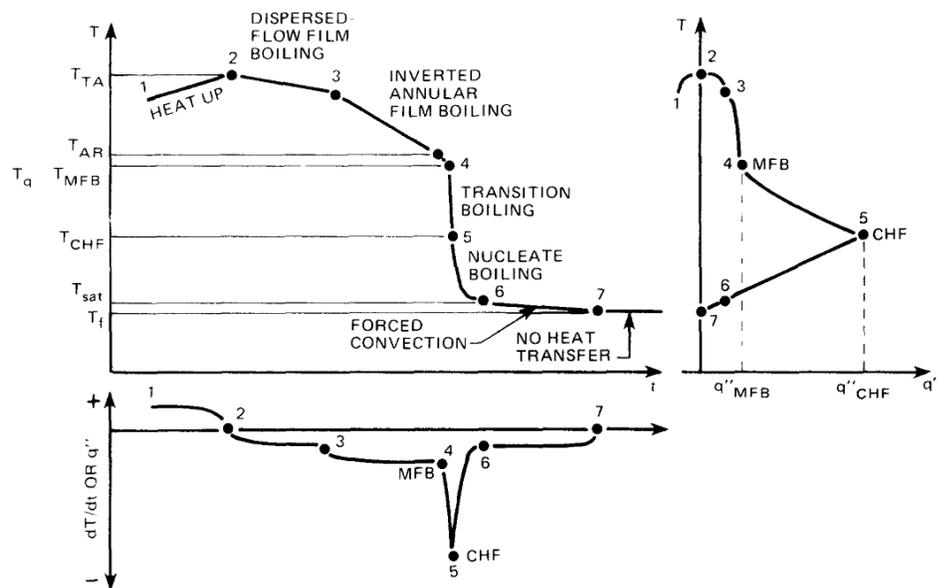
$\delta$  = Ketebalan dinding pipa, m

$k$  = Konduktifitas termal tabung uji, W/m.K

$\rho$  = densitas massa bahan pipa, kg/m<sup>3</sup>

$Z$  = Jarak *axial* dari *inlet*, m

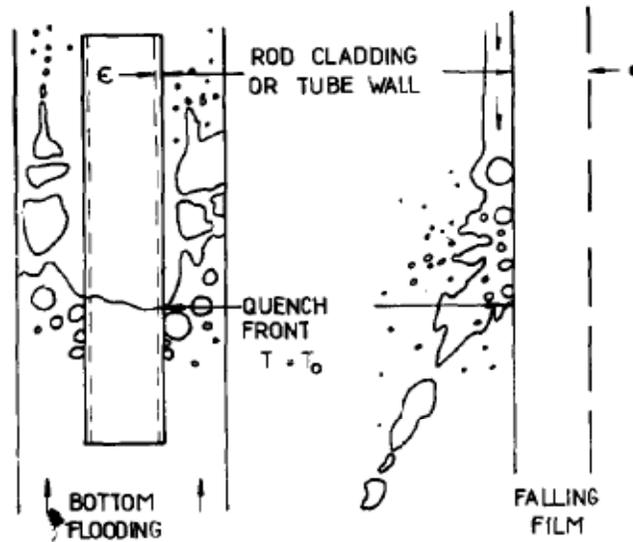
*Carbajo* (1985) dalam investigasinya tentang suhu *rewetting* menggambarkan pembagian daerah pendinginan ketika terjadi *rewetting* pada kelongsong bahan bakar menjadi *dispersed flow film boiling*, *inverted annular film boiling*, *transition boiling*, *nucleate boiling*, *force convection*, dan *no heat transfer* seperti tampak pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Kurva transien suhu kelongsong bahan bakar pada saat dilakukan bottom reflooding dengan laju aliran air yang tinggi (25)

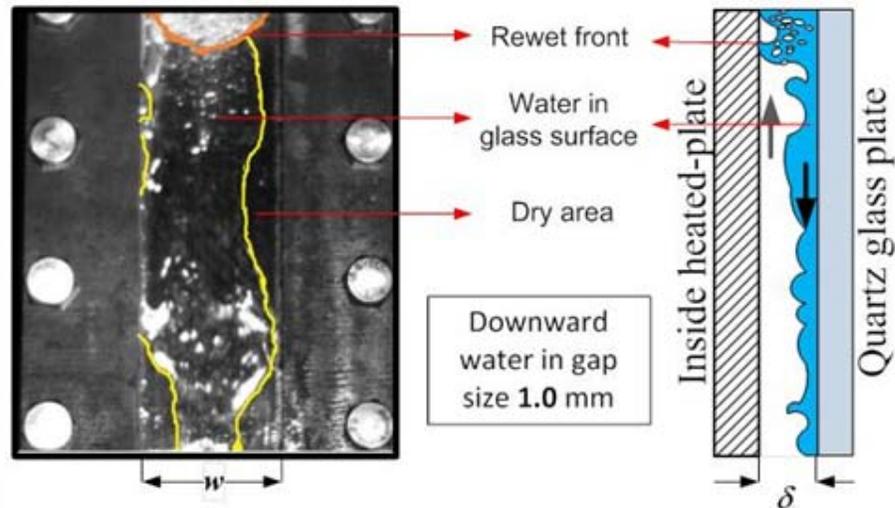
Adam *et.al.* (1995) melakukan penelitian tentang aliran pendidihan *film* dan *rewetting* di permukaan panas pada kondisi nilai gravitasi normal dan gravitasi di bawah normal. Penelitian dilakukan guna mempelajari karakteristik pendidihan alir pada kondisi nilai gravitasi di bawah normal ini dengan *flow quenching* terhadap pelat permukaan yang sangat panas menggunakan Freon-113 yang dialirkan pada kondisi *subcooled*  $20^{\circ}\text{C}$  pada kondisi gravitasi di bawah normal dan menggunakan air dengan suhu  $20^{\circ}\text{C}$  – suhu *subcooled* pada kondisi gravitasi normal. Hasil yang didapatkan menunjukkan karena tebalnya lapisan uap, perpindahan kalor selama pendidihan *film* dari permukaan panas ke fluida yang dialirkan pada kondisi nilai gravitasi di bawah normal berkurang jika dibandingkan dengan pada kondisi nilai gravitasi normal. Didapatkan juga bahwa terjadi peningkatan nilai *wall superheat* dan fluks kalor permukaan pada permulaan *rewetting* selama proses *quenching* permukaan panas.

Fenomena fisik dalam *rewetting* dan visualisasi runtuhnya kondisi film cairan pada proses *rewetting* juga dapat dilihat dari hasil penelitian Duffey *et.al.* (1973) seperti terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Fenomena fisik rewetting pada tube dan rod pada suhu 300-800 °C (27)

Visualisasi yang direkam dengan *high speed video camera* tentang fenomena *rewetting* yang terjadi pada celah sempit persegi 1 mm dengan suhu 600 °C dapat dilihat pada Gambar 2.5. Pada gambar tersebut air bersuhu 90 °C mengalir di antara celah sempit persegi 1 mm yang memiliki suhu permukaan pelat 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,09 liter/detik. Dari visualisasi tersebut tampak bahwa *rewet front* terjadi pada batasan antara daerah kering dan daerah basah pada permukaan pelat panas. Air mulai membasahi permukaan pelat ketika suhu kondisi film di permukaan pelat telah hilang.



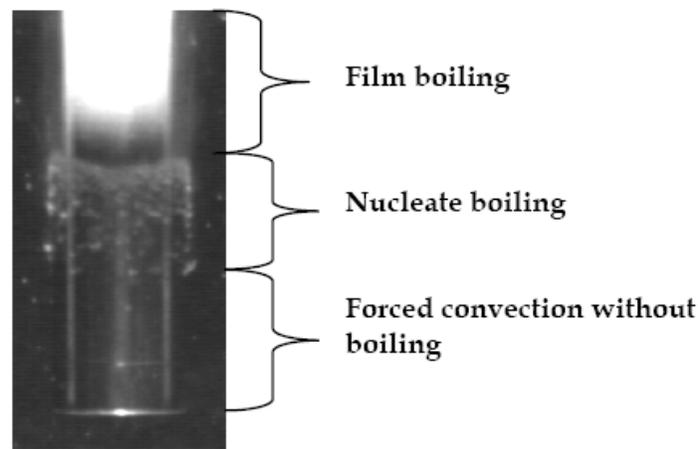
Gambar 2.5. Rewetting permukaan pelat pada suhu  $600^{\circ}\text{C}$  dengan lebar celah sempit 1 mm [courtesy by Mulya Juarsa]

Sahu et. al. (2010) melakukan investigasi proses *quenching* terhadap *vertical heater* panas dengan menginjeksikan air pada laju aliran yang tinggi. Suhu permukaan *heater* yang diuji adalah  $200\text{-}500^{\circ}\text{C}$  dengan laju aliran massa air konstan pada  $5,77\text{-}30,98\text{ g/s}$ . Hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa untuk laju aliran  $21,58\text{ g/s}$  dan suhu  $300^{\circ}\text{C}$ , *circumferentially symmetric wet front* terdapat pada dekat titik injeksi pendingin dimasukkan dan kecepatan rewetting bervariasi dari  $1\text{-}2\text{ cm/detik}$ . Pendinginan suatu permukaan vertikal yang panas terjadi ketika *film* cairan (selimut uap yang memisahkan air dengan permukaan panas) mulai hilang. Setelah selimut uap hilang maka cairan mulai dapat melakukan kontak secara *establish* dengan permukaan panas tersebut. Fenomena ini disebut dengan *rewetting*. Sebelum rewetting terjadi, laju pendinginan relatif rendah. Namun setelah terjadi rewetting, proses pendinginan pada permukaan yang panas akan lebih cepat terjadi.

*Rewetting* hanya terjadi ketika dilakukan pendinginan suatu permukaan yang sangat panas dimana terdapat kondisi uap film yang terbentuk antara permukaan dengan *layer* fluida di atas permukaan tersebut. Fenomena turunya suhu secara drastis disebut dengan *rewetting*. Pada saat terjadi *rewetting*, suhu fluida pendingin cukup rendah untuk mengkondensasikan gelembung uap sehingga akhirnya membasahi permukaan yang panas dan kemudian suhu permukaan turun

secara drastis. Rejim perpindahan kalor berubah dari pendidihan *film* ke pendidihan transisi dan pendidihan inti. Pendinginan yang efektif terjadi setelah permukaan panas tersebut berada di bawah suhu rewetting. Pada kondisi *rewetting*, fluida dapat melalui lapisan uap permukaan panas dan terjadi kontak yang *re-establish* dengan permukaan panas yang kering, dan akhirnya menuju rejim perpindahan kalor konveksi paksa kondisi *steady state* (28-34).

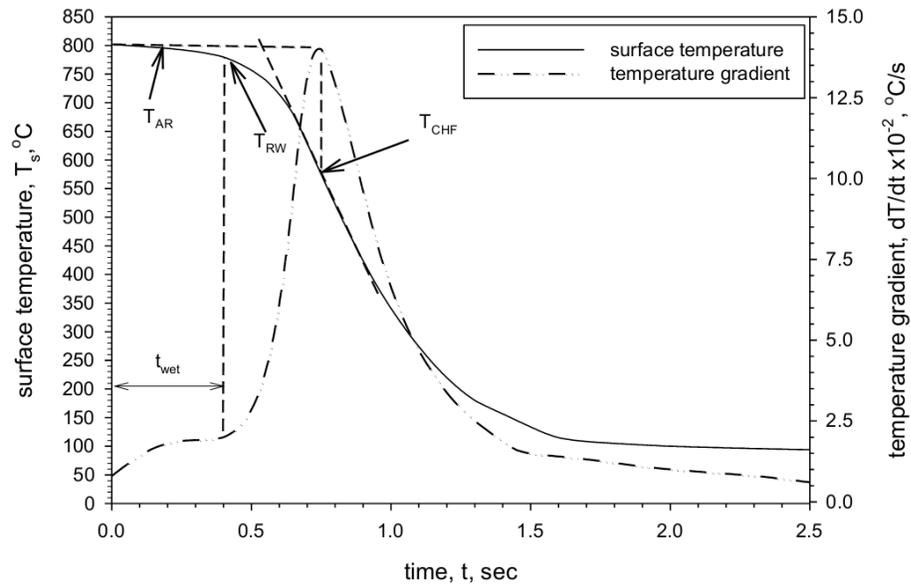
Visualisasi mengenai pembagian rejim perpindahan kalor selama proses *quenching* pada *flat-end cylindrical probe* bersuhu  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan suhu air pendingin  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan laju aliran  $0,2\text{ m/s}$  dapat dilihat pada Gambar 2.6. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa *wetting front* terjadi pada batas antara wilayah pendidihan *film* dan pendidihan boiling.



Gambar 2.6. Visualisasi perpindahan kalor selama proses *quenching* pada *flat-end cylindrical probe* bersuhu  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan *subcooled water* (33)

Agrawal *et. al* (2012) melakukan penelitian tentang efek diameter *jet* terhadap *rewetting* dari permukaan horizontal panas selama *quenching* menggunakan *Stainless Steel* dengan ketebalan  $0,25\text{ mm}$  dan suhu awal permukaan  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Permukaan panas tersebut didinginkan oleh *water jet* dengan suhu  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hasilnya menunjukkan bahwa *suhu rewetting*, waktu tunda *wetting*, dan kecepatan *rewetting* menentukan kinerja dari suatu pendinginan permukaan

panas. Gambar 2.7 di bawah ini merupakan kurva suhu permukaan dan gradiennya pada pendinginan transien yang didapatkan dari penelitiannya.



Gambar 2.7. Kurva suhu permukaan dan gradiennya pada pendinginan transien  
(35)

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Skematik Pengujian

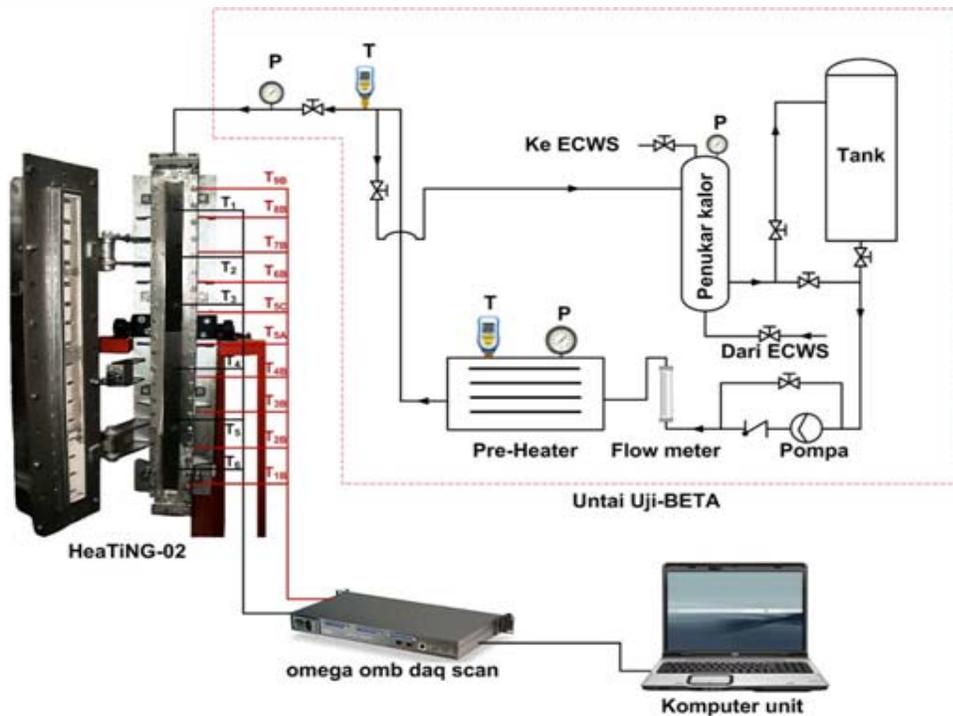
Dalam penelitian ini digunakan metode eksperimental. Eksperimen yang dilakukan untuk mengetahui fenomena *rewetting* pada celah sempit persegi selama proses *quenching* menggunakan *loop* terbuka. Gambar 3.1 memperlihatkan skematik pengujian yang dilakukan pada eksperimen ini. *Loop* terdiri dari bagian uji yang berupa dua buah pelat *Stainless Steel* 316 sejajar (pelat penutup dan pelat utama) sehingga antara keduanya akan membentuk celah sempit.

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 celah sempit persegi (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. Sebelum dilakukan proses *quenching*, kamera *infra-red*

digunakan untuk mengetahui distribusi suhu di *heater* dan pelat penutup. 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 3.1.



Gambar 3.1. Skematik pengujian HeaTing-02

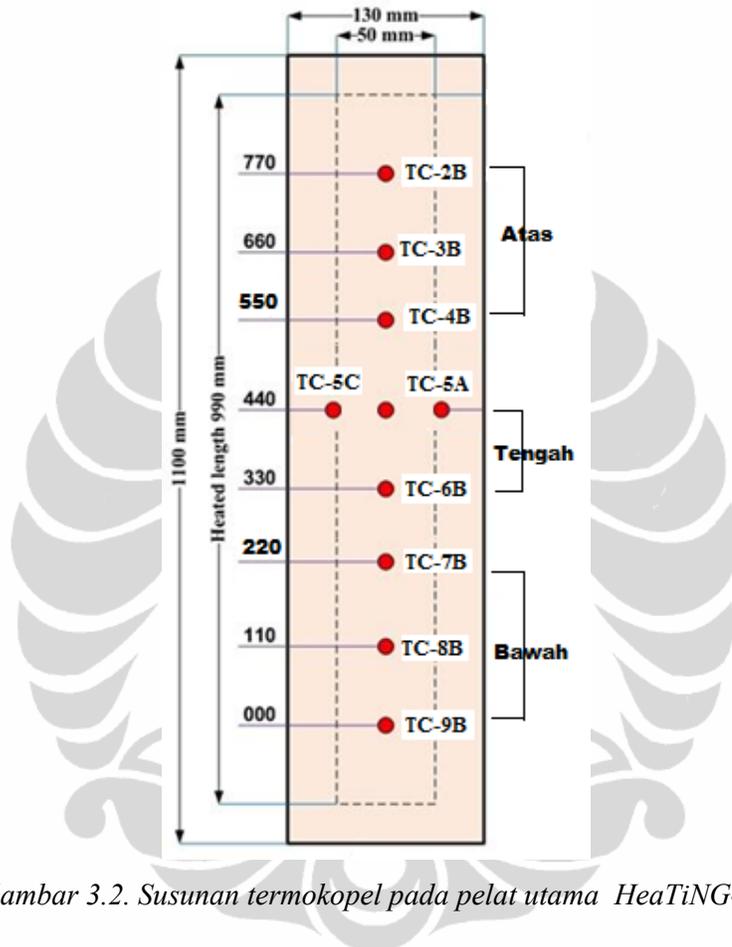
### 3.2 Peralatan Eksperimen

Komponen HeaTiNG-02 adalah sebagai berikut:

#### - Pelat utama

Pelat uji ini berukuran 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 *Stainless Steel 316*. Pada bagian pelat uji ini dipasang 9 titik termokopel tipe K. Termokopel tipe K yang digunakan memiliki rentang suhu  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  -  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan tingkat ketidakpercayaan pengukuran  $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Termokopel ini digunakan untuk mengukur perubahan suhu selama proses

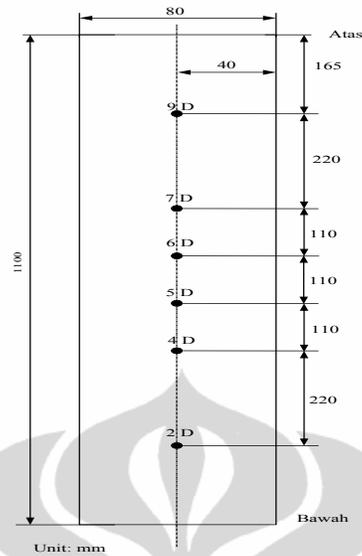
pemanasan dan pendinginan. Pemasangan termokopel pada pelat utama dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Susunan termokopel pada pelat utama HeaTiNG-02

#### - Pelat Penutup

Pelat penutup berukuran lebar 80 mm, panjang 1100 mm dan tebal 4 mm dengan bahan *Stainless Steel* 316. Pelat penutup dilengkapi dengan 6 buah termokopel tipe K. Pemasangan termokopel pada pelat penutup dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Susunan termokopel pada pelat penutup HeaTiNG-02

- **Plenum atas dan plenum bawah**

*Plenum* atas berfungsi sebagai tempat untuk mengalirkan air pendingin, dengan bahan dari pelat *Stainless Steel* 316 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 *Stainless Steel* 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 Volt adalah 10302 Watt. 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  $80 \times 114 \times 220 \text{ mm}^3$ .

### 3.3 Prosedur Eksperimen

Prosedur eksperimen studi eksperimental fenomena *rewetting* pada celah sempit persegi selama proses *quenching* adalah sebagai berikut:

1. Pengaturan lebar celah sempit.

Pengaturan lebar celah sempit dilakukan dengan memberikan lapisan *grafoil* yang diletakkan antara pelat utama dengan pelat penutup pada alat HeaTiNG-2. *Grafoil* yang digunakan memiliki ketebalan 0,5 mm dan memiliki ketahanan hingga suhu 3000 °C. Selain berfungsi untuk mengatur lebar celah sempit, 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 celah sempit 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 celah sempit. 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.

### 3.4 Matriks Eksperimen

Berikut ini adalah tabel matriks eksperimen yang telah dilakukan.

Tabel 3.1. Matriks Eksperimen HeaTiNG-02

Ukuran celah sempit persegi [mm]	Suhu awal pelat persegi [°C]	Laju aliran air pendingin [liter/detik]	Suhu air pendingin [°C]
1	205	0,1	85
		0,2	
		0,3	
	400	0,1	85
		0,2	
		0,3	

(Sambungan Tabel 3.1)

	600	0,1	85
		0,2	
		0,3	

Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan suhu awal pelat dan laju aliran yang masuk ke dalam celah sempit persegi yang memiliki ukuran 1 mm. Air masukan memiliki suhu tetap 85 °C.

Pada  $T_{initial\ pelat} = 205\ ^\circ C$ , variasi eksperimen dilakukan dengan:

- $T_{initial\ pelat} = 205\ ^\circ C$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit 85 °C, ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik.
- $T_{initial\ pelat} = 205\ ^\circ C$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit 85 °C, ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik.
- $T_{initial\ pelat} = 205\ ^\circ C$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit 85 °C, ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,3 liter/detik

Pada  $T_{initial\ pelat} = 400\ ^\circ C$ , variasi eksperimen dilakukan dengan:

- $T_{initial\ pelat} = 400\ ^\circ C$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit 85 °C, ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik.
- $T_{initial\ pelat} = 400\ ^\circ C$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit 85 °C, ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik.
- $T_{initial\ pelat} = 400\ ^\circ C$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah sempit 85 °C, ukuran celah sempit = 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,3 liter/detik

Pada  $T_{initial\ pelat} = 600\ ^\circ C$ , variasi eksperimen dilakukan dengan:

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

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 HASIL

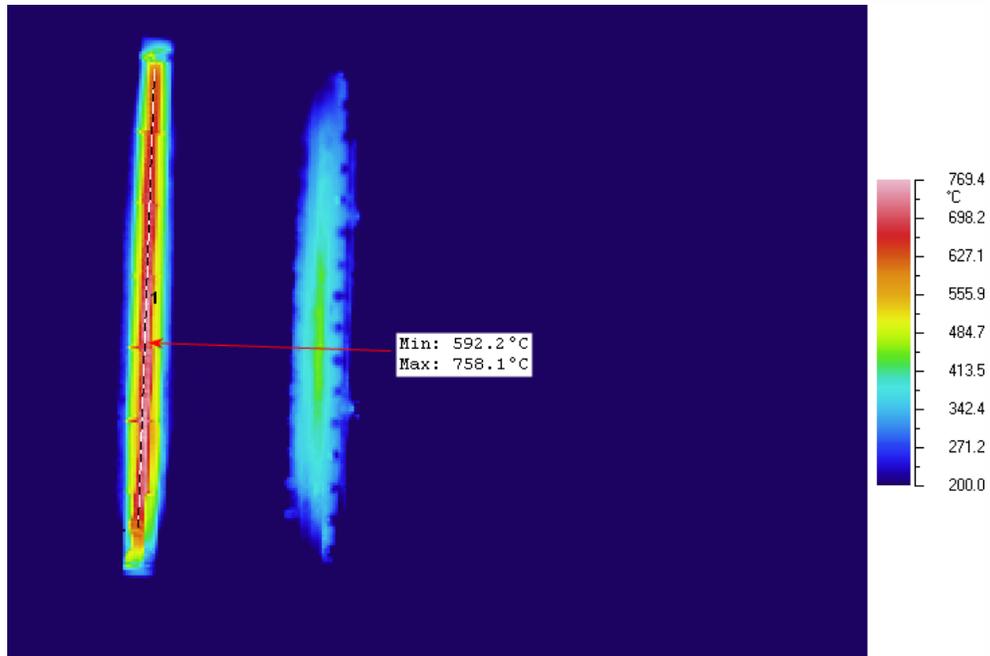
##### 4.1.1 Visualisasi Distribusi Suhu Pelat Utama sebelum dilakukan Proses *Quenching*

Kalor yang diterima oleh *heater* berasal dari sumber daya listrik PLN, kemudian dipindahkan secara radiasi ke pelat penutup. Setelah terjadi perpindahan kalor konveksi pada pelat penutup, kalor kemudian secara radiasi dipindahkan ke pelat utama. Posisi alat uji celah sempit persegi dapat dilihat pada Gambar 4.1.

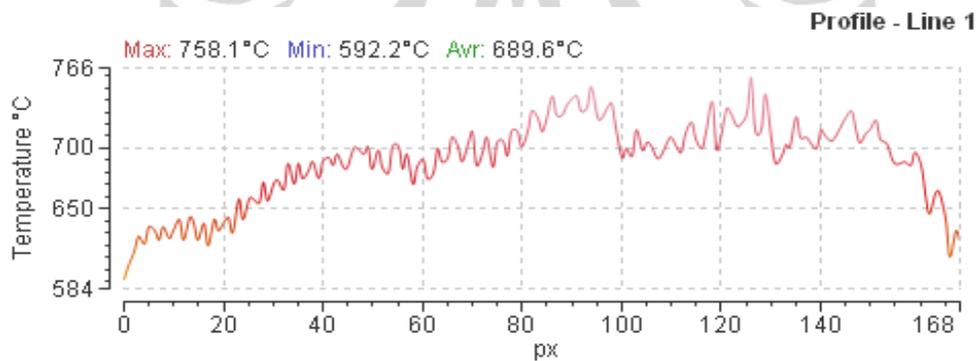


*Gambar 4.1. Posisi alat uji celah sempit persegi pada saat di capture dengan kamera infra red*

Distribusi dan profil suhu *heater* adalah seperti terlihat pada Gambar 4.2 dan 4.3.

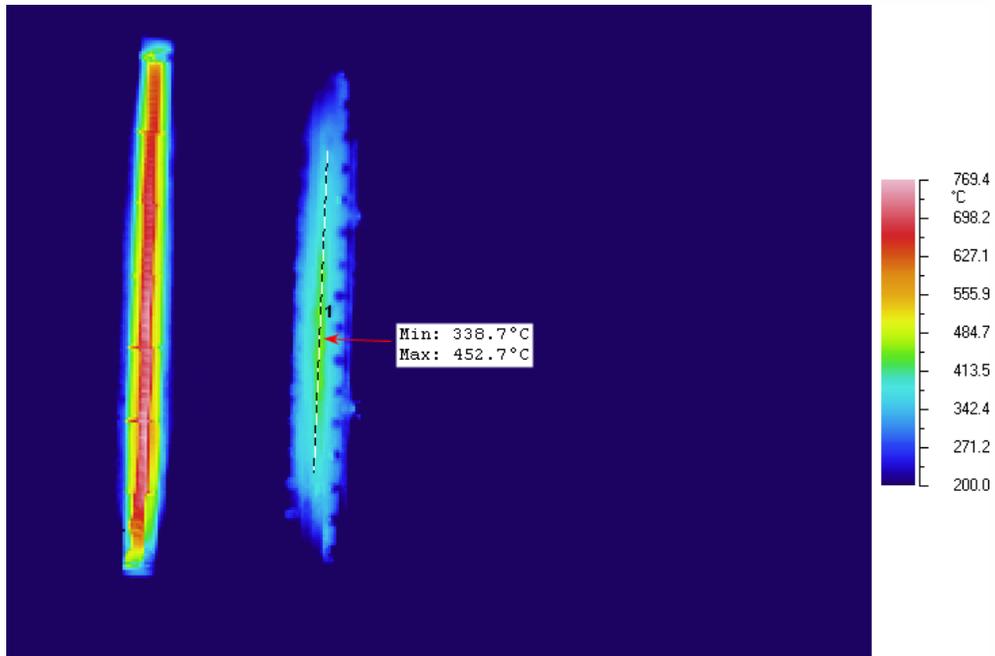


Gambar 4.2. Distribusi suhu heater

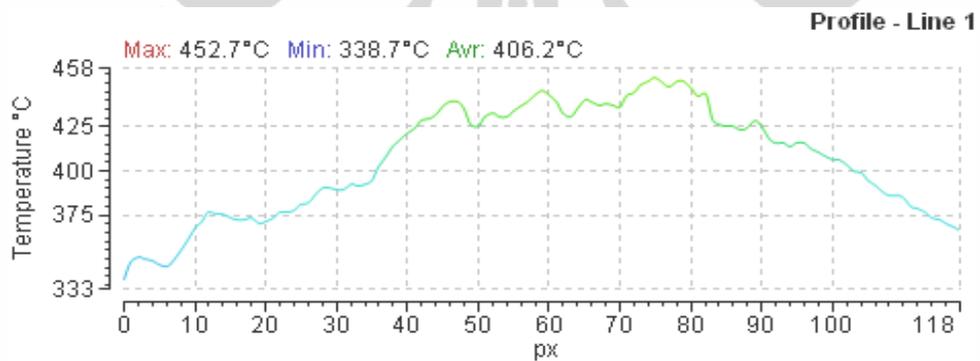


Gambar 4.3. Profil suhu heater

Distribusi dan profil suhu permukaan pelat penutup celah sempit persegi setelah dilakukan pemanasan hingga suhu awal pelat utama mencapai  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  adalah seperti terlihat pada Gambar 4.4 dan 4.5.

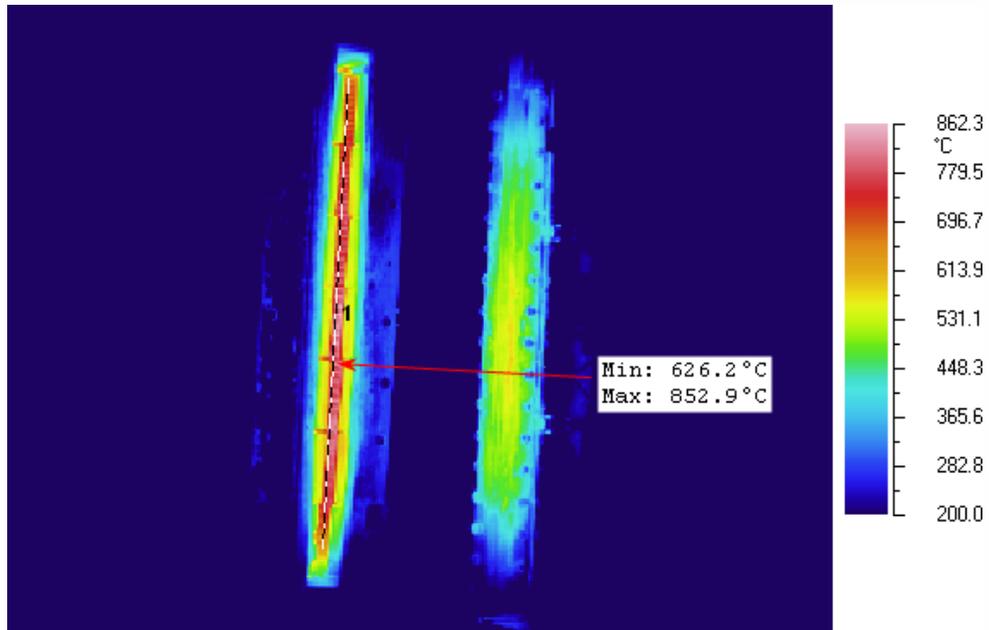


Gambar 4.4. Distribusi suhu permukaan pelat penutup alat uji celah sempit persegi

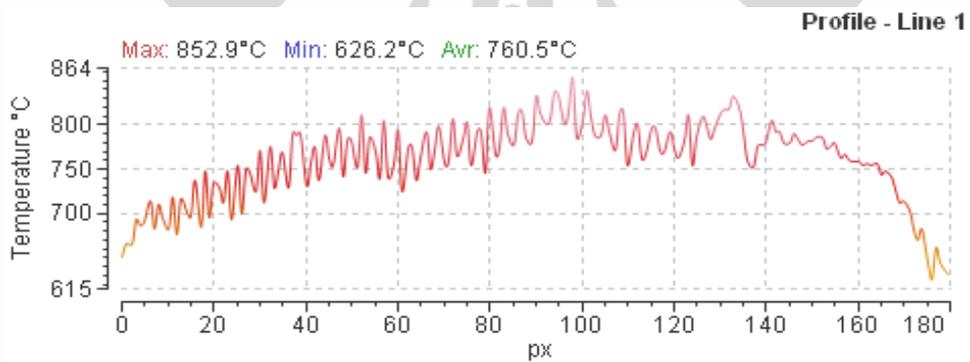


Gambar 4.5. Profil suhu permukaan pelat luar persegi pada suhu awal 400 °C

Distribusi dan profil suhu permukaan pelat penutup celah sempit persegi setelah dilakukan pemanasan hingga suhu awal pelat utama mencapai 600 °C adalah seperti terlihat pada Gambar 4.6 dan 4.7.

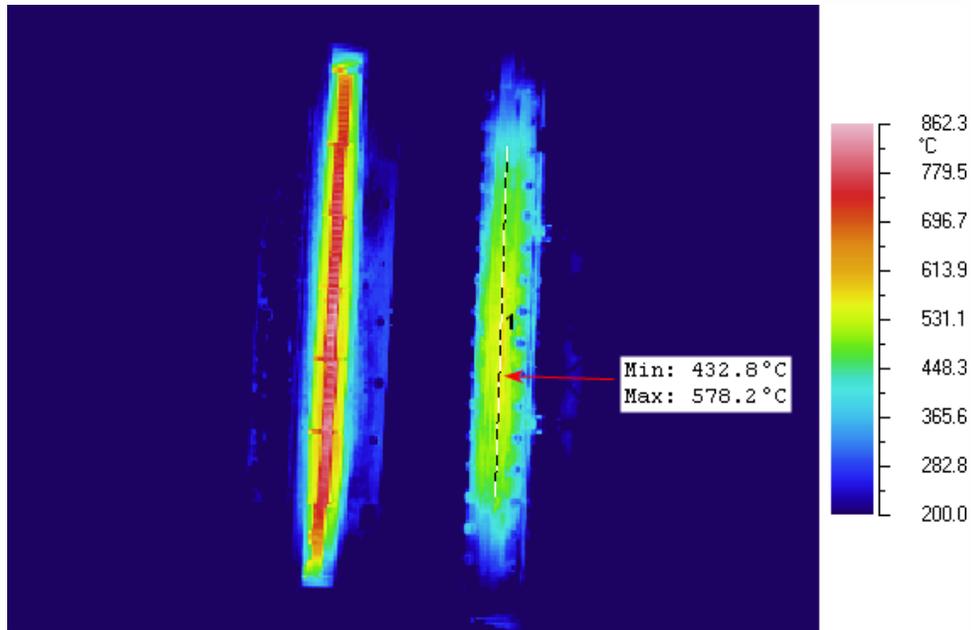


Gambar 4.6. Distribusi suhu heater

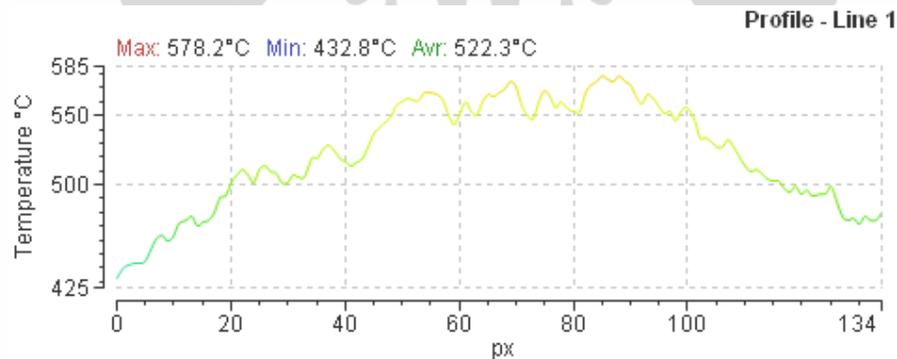


Gambar 4.7. Profil suhu heater

Distribusi dan profil suhu permukaan pelat penutup celah sempit persegi setelah dilakukan pemanasan hingga suhu awal pelat utama mencapai 600 °C adalah seperti terlihat pada Gambar 4.8 dan 4.9.



Gambar 4.8. Distribusi suhu permukaan pelat penutup celah sempit persegi pada suhu awal pelat  $600^{\circ}\text{C}$



Gambar 4.9. Profil suhu permukaan pelat luar persegi pada suhu awal  $600^{\circ}\text{C}$

#### 4.1.2 Karakteristik Suhu Transien selama Proses *Quenching*

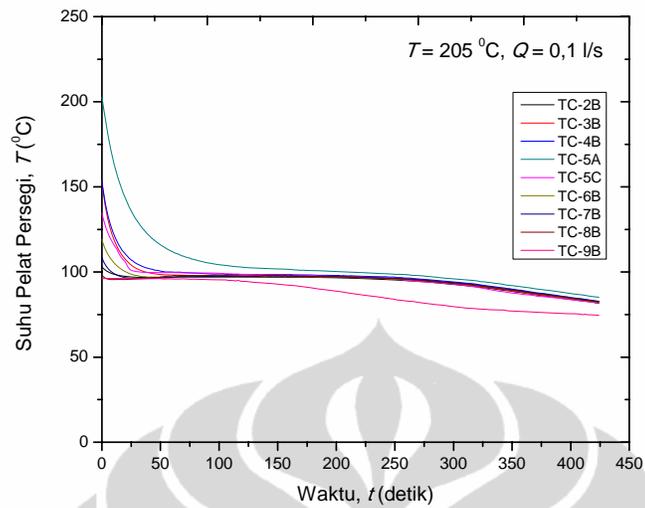
Suhu transien merupakan perubahan suhu yang diukur oleh termokopel selama eksperimen per satuan waktu dari awal hingga akhir proses pendinginan. Suhu transien yang ditampilkan adalah hasil pembacaan dari masing-masing titik termokopel yang terpasang pada pelat utama sebanyak 9 buah termokopel. Termokopel yang digunakan adalah tipe K, dengan rentang suhu  $-200^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $1200^{\circ}\text{C}$ . Termokopel diletakkan pada 3 bagian pelat, yaitu bagian atas,

bagian tengah, dan bagian bawah. Termokopel Tc-2B, Tc-3B, dan Tc-4B mewakili bagian atas, Tc-5A, Tc-5C, dan Tc-6B mewakili bagian tengah, serta Tc-7B, 8B, dan 9B mewakili bagian bawah pelat persegi.

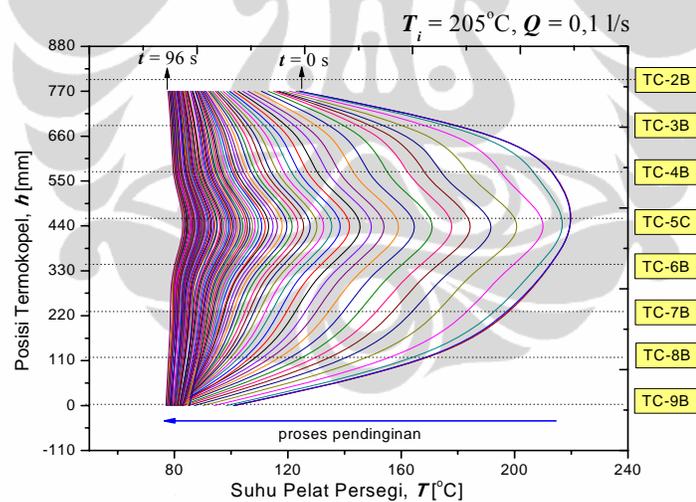
Pengukuran suhu transien selama proses pendinginan pelat persegi dilakukan berdasarkan variasi temperatur awal pelat pemanas yaitu 205 °C, 400 °C, 600 °C, dan variasi debit aliran air pendingin yang dilairkan ke dalam celah sempit dengan debit 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, 0,3 liter/detik, dengan lebar celah sempit 1 mm. Proses pendinginan dilakukan ketika suhu pelat persegi yang dinginkan tercapai dan kemudian air pendingin mulai dialirkan ke dalam celah sempit. Aliran air pendingin dihentikan ketika suhu pelat mencapai temperatur 85 °C sesuai dengan suhu air masuk. Pada karakteristik suhu transien selama proses *quenching*, ditampilkan hasil pengukuran berupa kurva suhu transien dan kurva *isotime* selama proses *quenching*. Gambar 4.10-4.27 memperlihatkan distribusi suhu terhadap waktu untuk pendinginan pada termokopel yang letaknya mewakili bagian atas, tengah dan bawah dari pelat uji pada setiap variasi suhu dan debit aliran air pendingin.

#### **4.1.2.1 Kurva Suhu Transien dan *Isotime* Pelat Persegi pada 205 °C dengan Debit Aliran Air Pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik.**

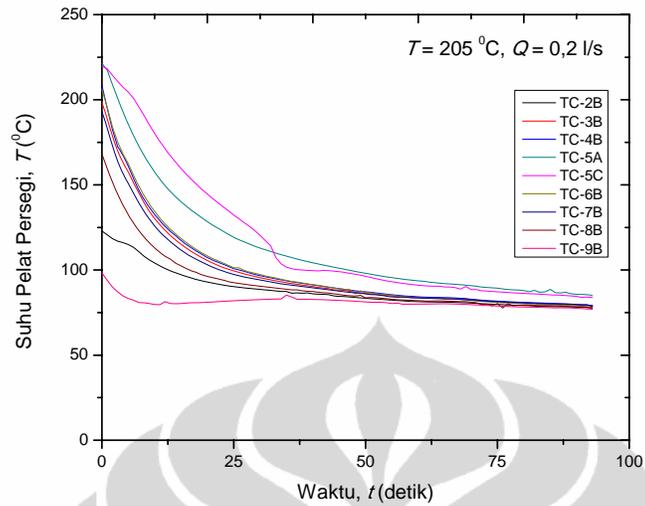
Dari eksperimen yang telah dilakukan dengan suhu awal pelat 205 °C, suhu air pendingin yang masuk ke celah 85 °C, lebar celah 1 mm, dan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik didapatkan kurva transien suhu awal pelat persegi dan kurva *isotime* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10-4.15.



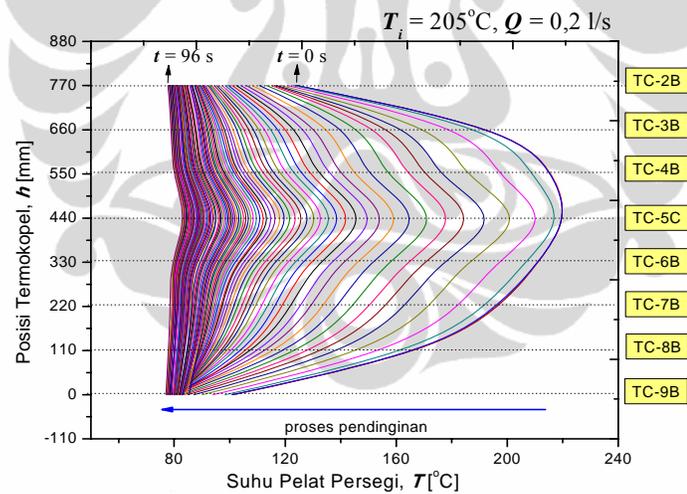
Gambar 4.10. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin  $0,1$  liter/detik



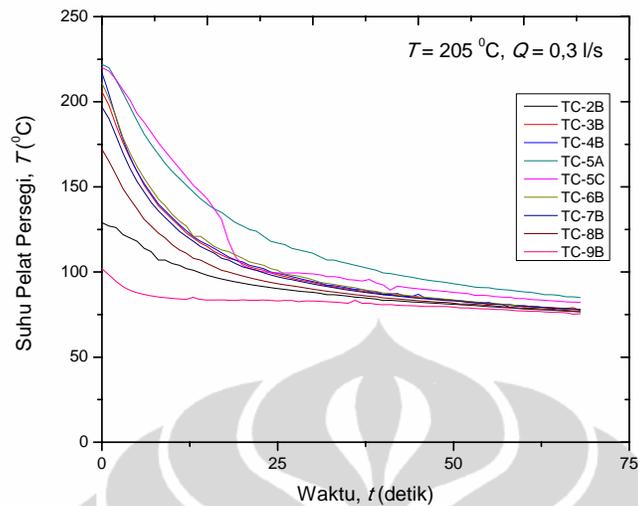
Gambar 4.11. Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran air pendingin  $0,1$  liter/detik



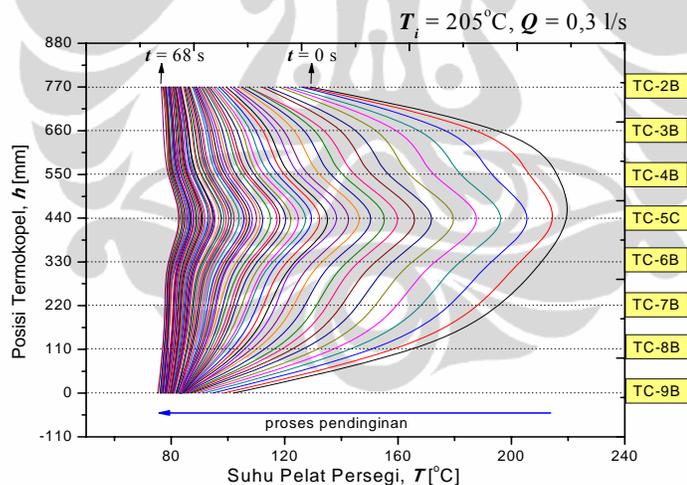
Gambar 4.12. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik



Gambar 4.13. Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik



Gambar 4.14. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin  $0,3$  liter/detik



Gambar 4.15. Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran air pendingin  $0,3$  liter/detik

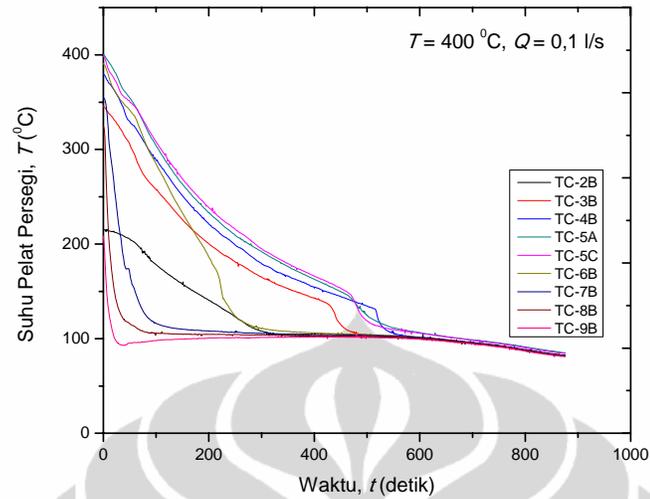
Dari Gambar 4.10-4.15 terlihat pelat bagian bawah (Tc-9B) memiliki suhu yang paling rendah. Rendahnya suhu pada bagian ini disebabkan karena bagian bawah memiliki sisi yang terbuka dengan udara luar, sehingga menghambat kenaikan suhu pelat persegi bagian bawah. Pendinginan bagian bawah pelat juga

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-5A) 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 celah sempit saja, sehingga suhunya lebih lambat turun jika dibandingkan dengan suhu pada pelat bagian atas dan bawah pelat.

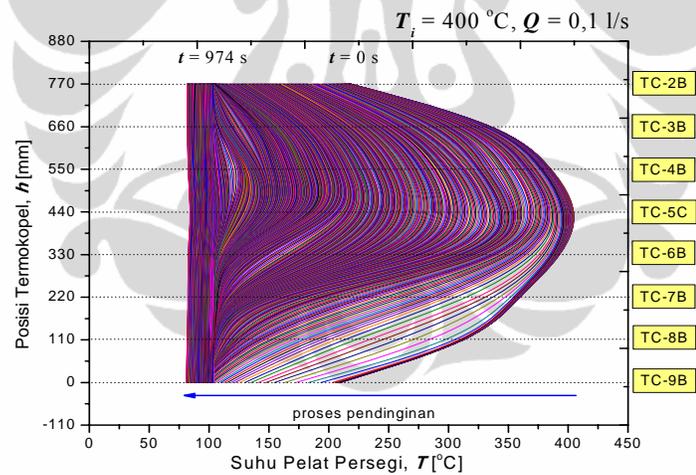
Proses pendinginan oleh air pendingin yang masuk ke celah sempit dihentikan pada saat suhu pelat persegi sama dengan suhu masukan air pendingin sebesar  $85^{\circ}\text{C}$ . Untuk debit aliran air pendingin  $0,1$  liter/detik pendinginan pelat bagian tengah membutuhkan waktu  $413$  detik. Untuk debit aliran air pendingin  $0,2$  liter/detik pendinginan pelat bagian tengah membutuhkan waktu  $97$  detik. Untuk debit aliran air pendingin  $0,3$  liter/detik pendinginan pelat bagian tengah membutuhkan waktu  $68$  detik.

#### **4.1.2.2 Kurva Suhu Transien dan *Isotime* Pelat Persegi pada $400^{\circ}\text{C}$ dengan Debit Aliran Air Pendingin $0,1$ liter/detik, $0,2$ liter/detik, dan $0,3$ liter/detik.**

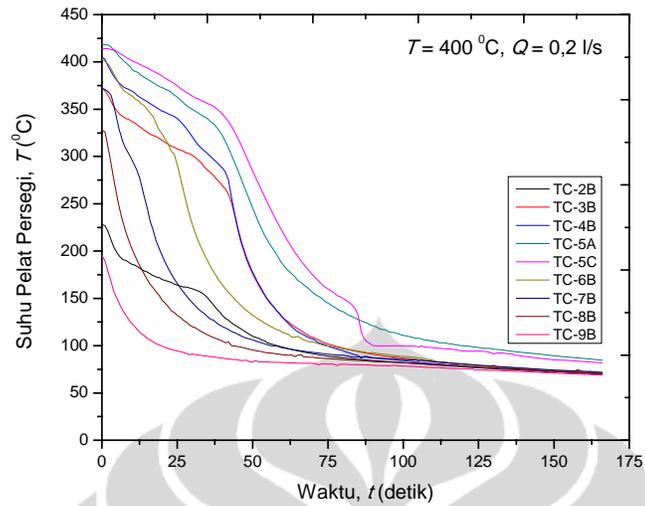
Dari eksperimen yang telah dilakukan dengan suhu awal pelat  $400^{\circ}\text{C}$ , suhu air pendingin yang masuk ke celah  $85^{\circ}\text{C}$ , lebar celah  $1$  mm, dan dengan debit aliran air pendingin  $0,1$  liter/detik,  $0,2$  liter/detik, dan  $0,3$  liter/detik didapatkan kurva transien suhu awal pelat persegi dan kurva *isotime* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.16-4.21.



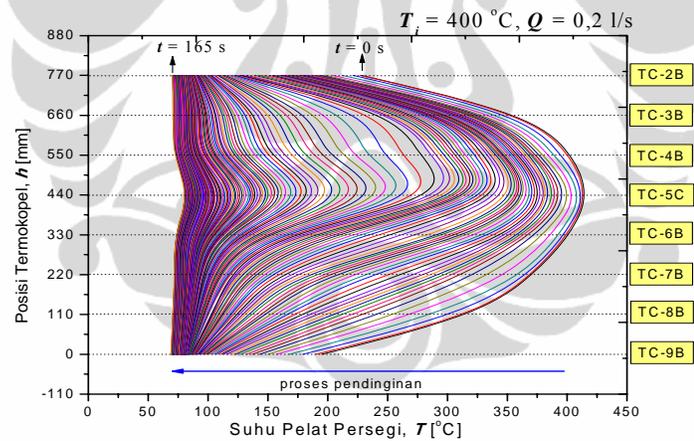
Gambar 4.16. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin  $0,1$  liter/detik



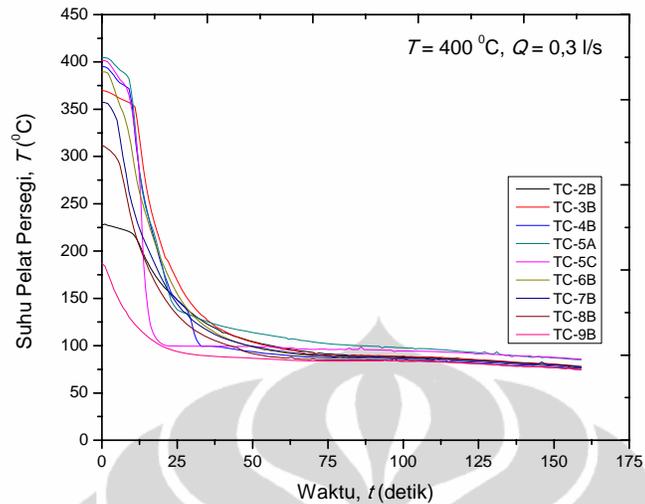
Gambar 4.17. Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran air pendingin  $0,1$  liter/detik



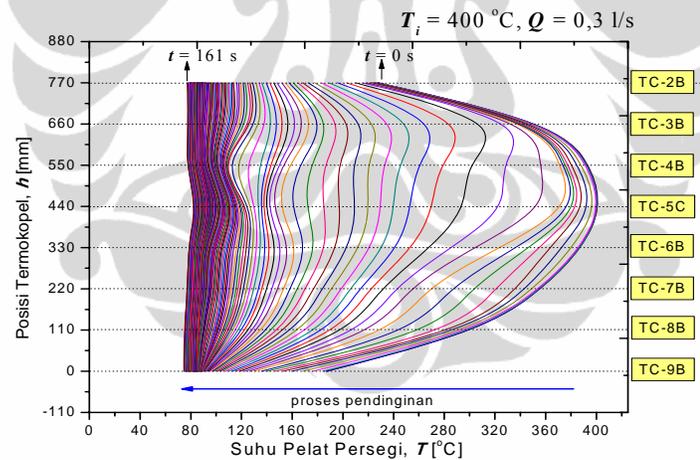
Gambar 4.18. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $400^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin  $0,2$  liter/detik



Gambar 4.19. Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi  $400^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran air pendingin  $0,2$  liter/detik



Gambar 4.20. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $400^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin  $0,3$  liter/detik



Gambar 4.21. Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi  $400^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran air pendingin  $0,3$  liter/detik

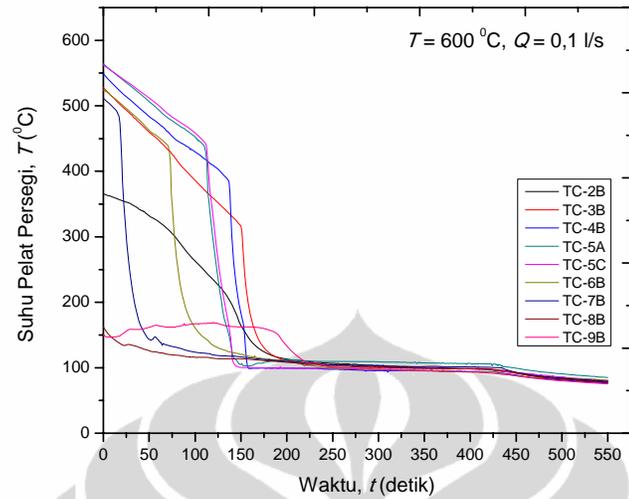
Dari Gambar 4.16-4.21 terlihat pelat bagian bawah (Tc-9B) memiliki suhu yang paling rendah. Rendahnya suhu pada bagian ini disebabkan karena bagian bawah memiliki sisi yang terbuka dengan udara luar, sehingga menghambat kenaikan suhu pelat persegi bagian bawah. Pendinginan bagian bawah pelat juga terlihat 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-5A) 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 celah sempit saja, sehingga suhunya lebih lambat turun jika dibandingkan dengan suhu pada pelat bagian atas dan bawah pelat.

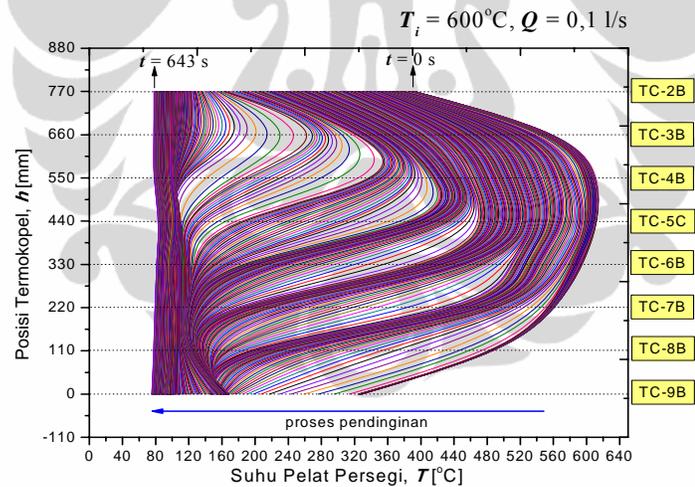
Proses pendinginan oleh air pendingin yang masuk ke celah sempit dihentikan pada saat suhu pelat persegi sama dengan suhu masukan air pendingin sebesar 85 °C. Untuk debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik pendinginan pelat bagian tengah membutuhkan waktu 851 detik. Untuk debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik pendinginan pelat bagian tengah membutuhkan waktu 159 detik. Untuk debit aliran air pendingin 0,3 liter/detik pendinginan pelat bagian tengah membutuhkan waktu 155 detik.

#### **4.1.2.3 Kurva Suhu Transien dan *Isotime* Pelat Persegi pada 600 °C dengan Debit Aliran Air Pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik.**

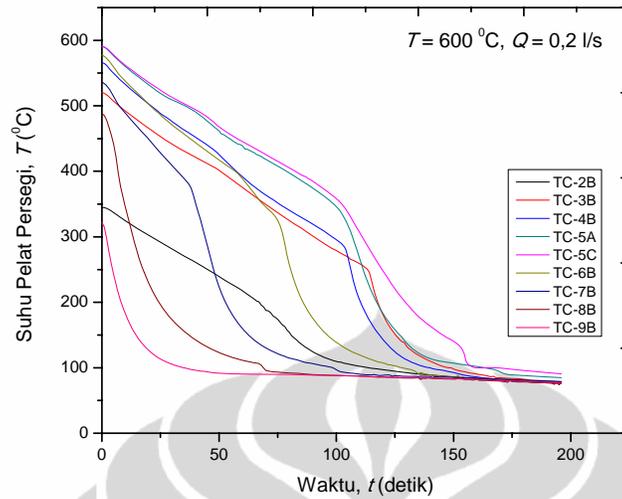
Dari eksperimen yang telah dilakukan dengan suhu awal pelat 600 °C, suhu air pendingin yang masuk ke celah 85 °C, lebar celah 1 mm, dan dengan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik didapatkan kurva transien suhu awal pelat persegi dan kurva *isotime* seperti ditunjukkan pada Gambar 4.22-4.27.



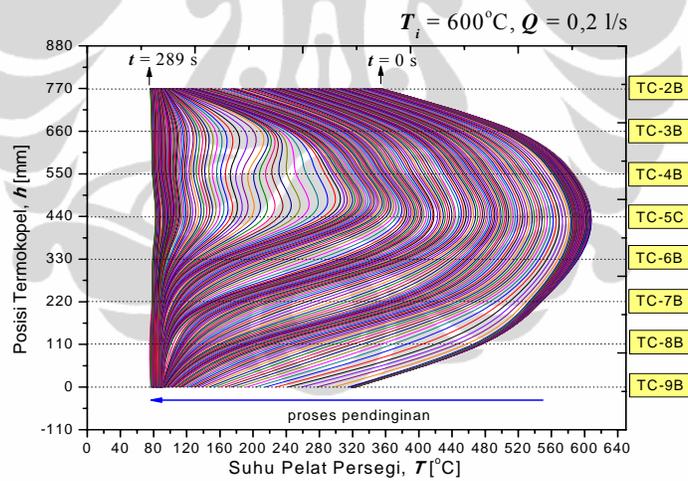
Gambar 4.22. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $600^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin  $0,1 \text{ liter/detik}$



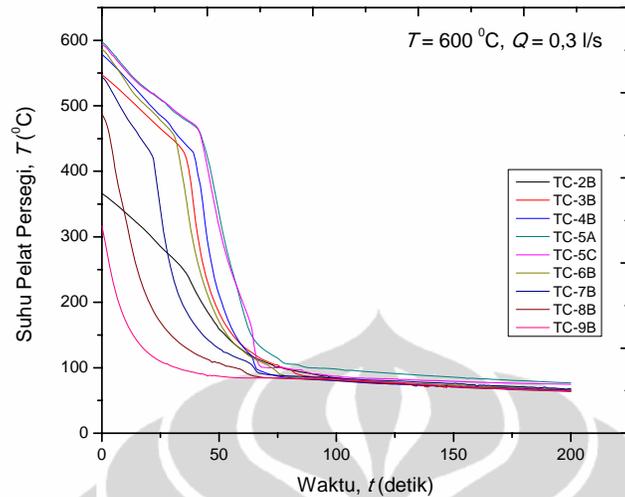
Gambar 4.23. Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi  $600^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran air pendingin  $0,1 \text{ liter/detik}$



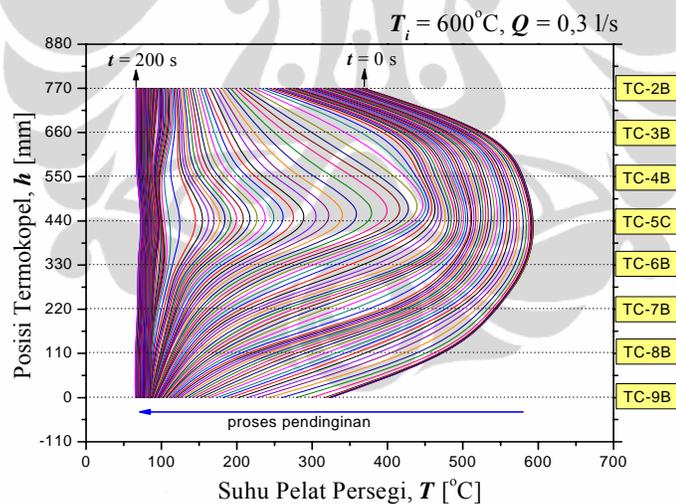
Gambar 4.24. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $600^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin  $0,2$  liter/detik



Gambar 4.25. Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi  $600^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran air pendingin  $0,2$  liter/detik



Gambar 4.26. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $600^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin 0,3 liter/detik



Gambar 4.27. Kurva isotime pada suhu awal pelat persegi  $600^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran air pendingin 0,3 liter/detik

Dari Gambar 4.22-4.27 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 celah sempit saja, sehingga suhunya lebih lambat turun jika dibandingkan dengan suhu pada pelat bagian atas dan bawah pelat.

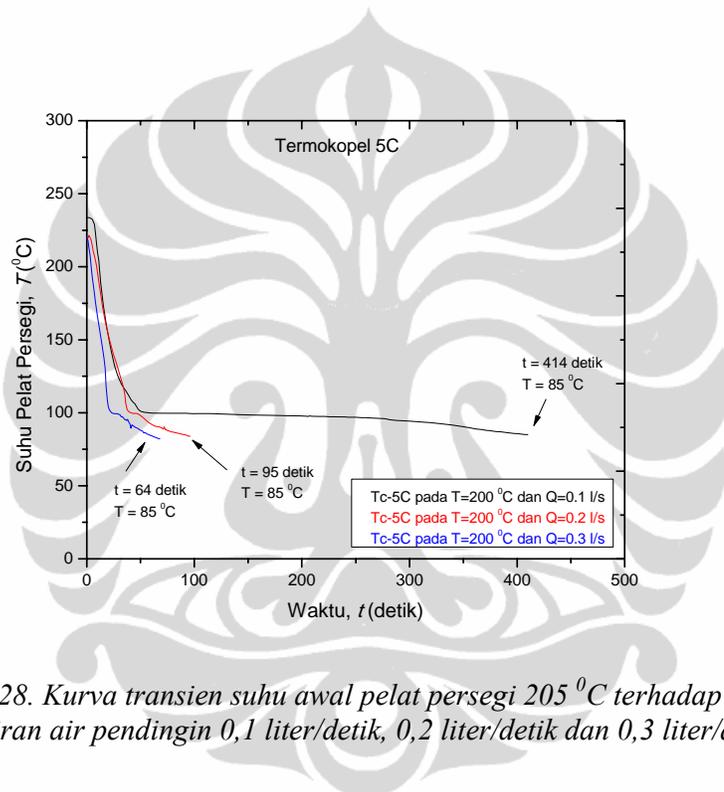
Untuk debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik pendinginan pelat bagian tengah membutuhkan waktu 582 detik. Untuk debit aliran air pendingin 0,2 liter/detik pendinginan pelat bagian tengah membutuhkan waktu 230 detik. Untuk debit aliran air pendingin 0,3 liter/detik pendinginan pelat bagian tengah membutuhkan waktu 161 detik.

#### **4.1.3 Pengaruh Debit Aliran Air Pendingin pada Proses *Quenching***

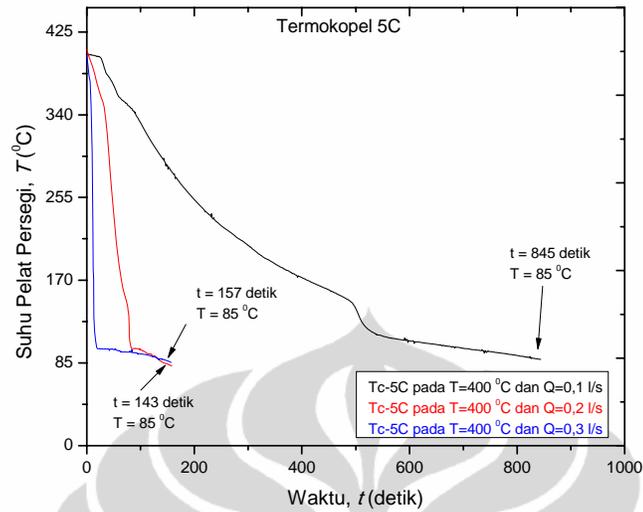
Pada hasil hanya ditampilkan hasil pembacaan suhu di termokopel 5C saja. Hal ini dikarenakan pembacaan suhu di termokopel 5C adalah yang paling tinggi, dan dijadikan ukuran penghentian kalor yang berikan oleh *heater* ke pelat ketika pembacaan suhu di termokopel 5C mencapai suhu 205 °C, 400 °C, dan 600 °C. Sementara pada saat yang sama, pembacaan suhu di termokopel lain menunjukkan angka di bawah 205 °C, 400 °C, dan atau 600 °C.

**4.1.3.1 Perbandingan Kurva Transien pada Suhu Awal Pelat Persegi 205 °C, 400 °C dan 600 °C dengan Variasi Debit Aliran Air Pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik.**

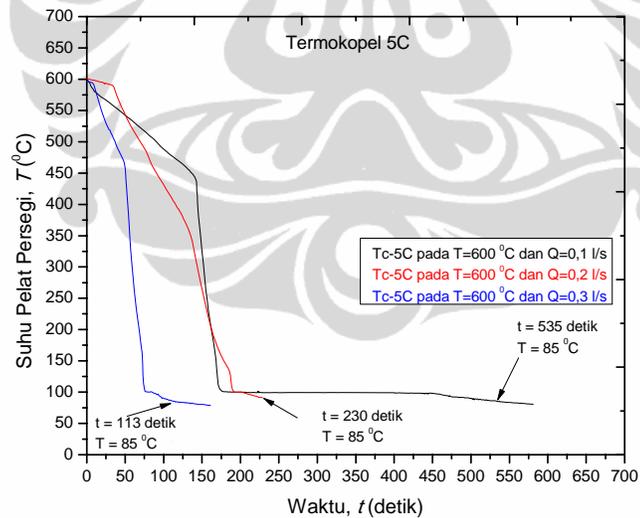
Kurva transien suhu awal pelat persegi 205 °C, 400 °C, dan 600 °C terhadap variasi debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik yang melewati celah sempit persegi dapat dilihat pada Gambar 4.28-4.30.



Gambar 4.28. Kurva transien suhu awal pelat persegi 205 °C terhadap variasi debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik



Gambar 4.29. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $400^{\circ}\text{C}$  terhadap variasi debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik



Gambar 4.30. Kurva transien suhu awal pelat persegi  $600^{\circ}\text{C}$  terhadap variasi debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik

Pada suhu  $205^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran 0,1 liter/detik, proses pendinginan pelat persegi bagian tengah membutuhkan waktu 414 detik untuk mencapai suhu  $85^{\circ}\text{C}$ .

Pada suhu  $205^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran  $0,2$  liter/detik, proses pendinginan pelat persegi bagian tengah membutuhkan waktu  $95$  detik untuk mencapai suhu  $85^{\circ}\text{C}$ . Pada suhu  $205^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran  $0,3$  liter/detik, proses pendinginan pelat persegi bagian tengah membutuhkan waktu  $64$  detik untuk mencapai suhu  $85^{\circ}\text{C}$ .

Pada suhu  $400^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran  $0,1$  liter/detik, proses pendinginan pelat persegi bagian tengah membutuhkan waktu  $845$  detik untuk mencapai suhu  $85^{\circ}\text{C}$ . Pada suhu  $400^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran  $0,2$  liter/detik, proses pendinginan pelat persegi bagian tengah membutuhkan waktu  $157$  detik untuk mencapai suhu  $85^{\circ}\text{C}$ . Pada suhu  $400^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran  $0,3$  liter/detik, proses pendinginan pelat persegi bagian tengah membutuhkan waktu  $143$  detik untuk mencapai suhu  $85^{\circ}\text{C}$ .

Pada suhu  $600^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran  $0,1$  liter/detik, proses pendinginan pelat persegi bagian tengah membutuhkan waktu  $535$  detik untuk mencapai suhu  $85^{\circ}\text{C}$ . Pada suhu  $600^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran  $0,2$  liter/detik, proses pendinginan pelat persegi bagian tengah membutuhkan waktu  $230$  detik untuk mencapai suhu  $85^{\circ}\text{C}$ . Pada suhu  $600^{\circ}\text{C}$  dan debit aliran  $0,3$  liter/detik, proses pendinginan pelat persegi bagian tengah membutuhkan waktu  $113$  detik untuk mencapai suhu  $85^{\circ}\text{C}$ .

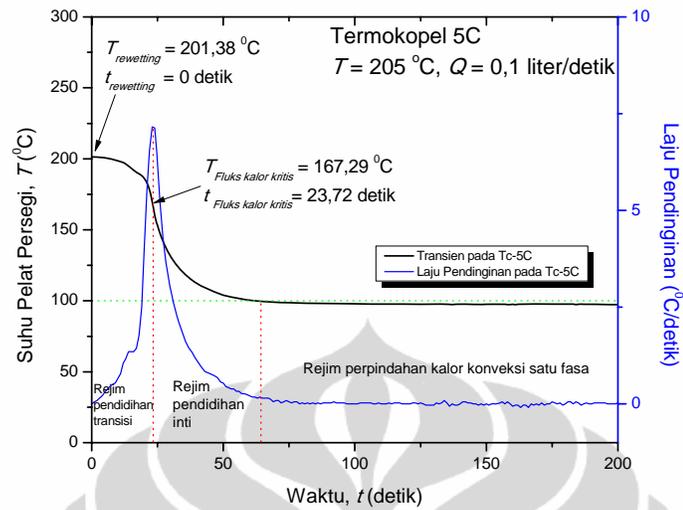
Dari fenomena di atas dapat diketahui bahwa semakin besar debit aliran air pendingin yang masuk ke dalam celah sempit maka akan semakin cepat waktu yang dibutuhkan untuk mendinginkan pelat persegi.

## **4.2 PEMBAHASAN**

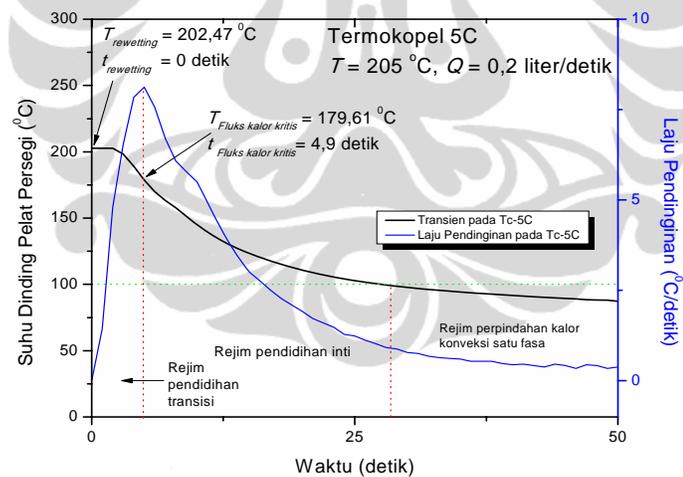
### **4.2.1 Pengaruh Suhu Awal Pelat Panas dan Laju Aliran Air Pendingin terhadap *Rewetting***

#### **4.2.1.1 Kurva Laju Pendinginan pada Suhu Awal Pelat Persegi $205^{\circ}\text{C}$ dengan Debit Aliran Air Pendingin $0,1$ liter/detik, $0,2$ liter/detik dan $0,3$ liter/detik**

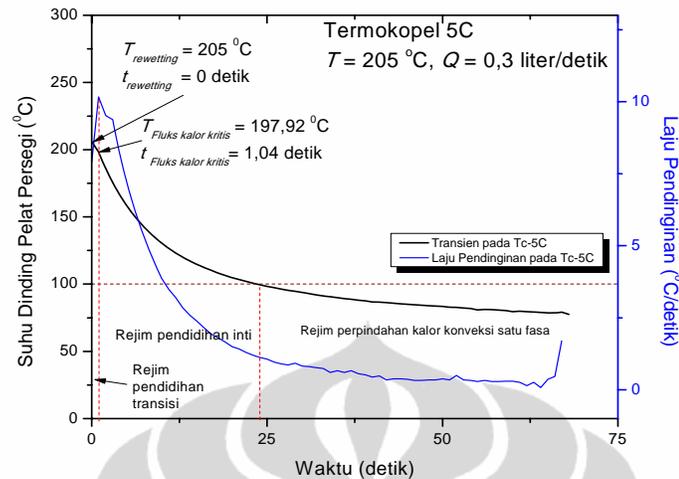
Kurva laju pendinginan pada suhu awal dinding pelat  $205^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,1$  liter/detik,  $0,2$  liter/detik, dan  $0,3$  liter/detik dapat dilihat pada Gambar 4.31-4.33.



Gambar 4.31. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,1$  liter/detik



Gambar 4.32. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,2$  liter/detik



Gambar 4.33. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,3$  liter/detik

Pada pembahasan terdapat istilah suhu, waktu, kecepatan, dan kecepatan rerata *rewetting*. Definisi dari istilah-istilah tersebut adalah sebagai berikut. Suhu *rewetting* adalah suhu pada saat mulai terjadinya *rewetting* pertama kali pada pelat panas persegi. Waktu *rewetting* adalah waktu yang dibutuhkan oleh air pendingin ketika mulai dialirkan ke dalam celah sempit persegi hingga dapat melakukan *rewetting* pertama kali pada pelat panas. Kecepatan *rewetting* adalah perpindahan yang dilakukan oleh air pendingin untuk melakukan *rewetting* pertama kali pada pelat panas persegi setiap satuan waktu pada titik pengukuran tertentu. Sedangkan kecepatan rerata *rewetting* adalah hasil rerata dari masing-masing kecepatan *rewetting* yang terjadi di sepanjang pelat panas persegi.

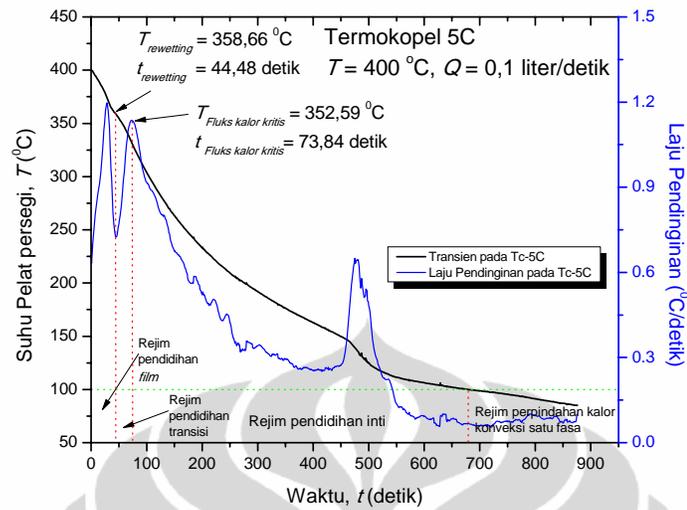
Dari kurva *isotime* dan kurva laju pendinginan pada suhu  $205^{\circ}\text{C}$  pada debit aliran air pendingin  $0,1 - 0,3$  liter/detik, secara umum dapat dilihat bahwa terjadi pola dan kecepatan *rewetting* yang sama di sepanjang pelat panas. Kecepatan *rewetting* di berbagai titik pengukuran termokopel menunjukkan bahwa titik *rewetting* mempunyai nilai yang sama pada posisi pengukuran atas, tengah dan bawah. Titik awal terjadinya *rewetting* hampir seragam di setiap titik pengukuran. Ketika air pendingin mulai dialirkan ke dalam celah sempit persegi, langsung terjadi *rewetting* ketika air pendingin dimasukkan ke dalam celah sempit persegi.

Tidak terjadi pendidihan film pada suhu permukaan pelat persegi  $205^{\circ}\text{C}$ . Air pendingin langsung membasahi pelat panas secara *establish* setelah dialirkan ke dalam celah sempit persegi, yang menunjukkan bahwa suhu kondisi ini berada di bawah rejim pendidihan *film* minimal (titik *Leidenfrost*). Mengalirnya air pendingin secara *establish* menunjukkan bahwa fluks kalor yang terdapat di pelat panas banyak terserap oleh air pendingin dan tercapainya fluks kalor kritis setelah rejim pendidihan transisi terlampaui, kemudian menuju rejim pendidihan inti, dan hingga akhirnya memasuki rejim perpindahan kalor satu fasa konveksi hingga suhu pendinginan yang diinginkan tercapai.

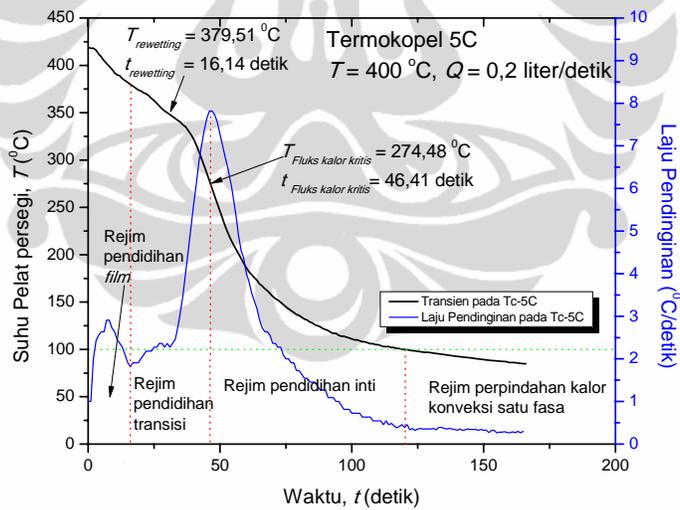
Pada suhu permukaan pelat  $205^{\circ}\text{C}$ , terjadi fenomena tersendatnya aliran air pendingin ketika dimasukkan ke dalam celah sempit persegi. Ini terlihat dari tersendatnya aliran air pendingin yang keluar dari sisi keluaran saluran celah sempit persegi. Hal ini diperkirakan karena terbentuknya gas di sepanjang pelat panas dan mengakibatkan terjadinya efek *counter current flow* yang menghambat laju aliran air pendingin ketika memasuki celah sempit persegi. Fenomena ini tidak berlangsung lama, dan sesaat kemudian air pendingin secara kontinu dapat melalui celah sempit persegi dengan lancar. Fenomena ini menunjukkan bahwa *counter current flow* yang terbentuk menghambat laju pendinginan pelat panas.

#### **4.2.1.2 Kurva Laju Pendinginan pada Suhu Awal Pelat Persegi $400^{\circ}\text{C}$ dengan Debit Aliran Air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik**

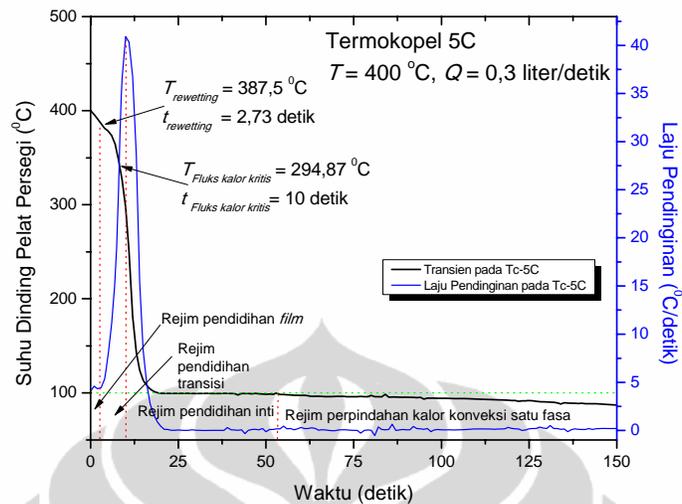
Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi  $400^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik dapat dilihat pada Gambar 4.34-4.36.



Gambar 4.34. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi  $400$   $^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,1$  liter/detik



Gambar 4.35. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi  $400$   $^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,2$  liter/detik



Gambar 4.36. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi  $400^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,3$  liter/detik

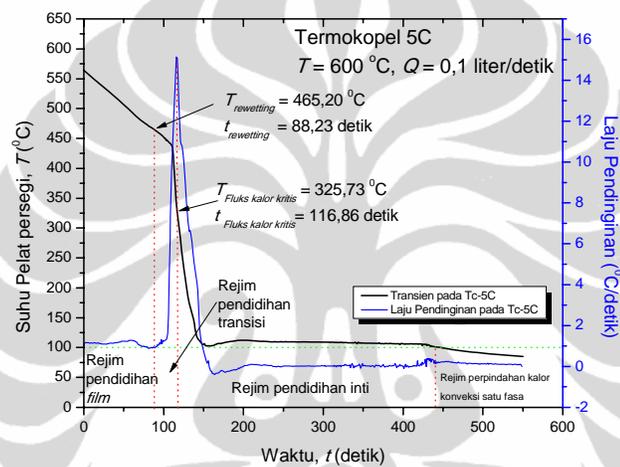
Dari kurva *isotime* dan kurva laju pendinginan pada suhu  $400^{\circ}\text{C}$  pada berbagai variasi debit aliran air pendingin secara umum dapat dilihat bahwa terjadi pola dan kecepatan *rewetting* yang berbeda di sepanjang pelat panas. Titik mulai terjadinya *rewetting* lebih cepat terjadi di bagian bawah pelat persegi, baru kemudian terjadi *rewetting* di bagian atas dan tengah pelat persegi. Fenomena ini terjadi karena tingginya suhu dibagian tengah jika dibandingkan dengan bagian atas dan bawah, yang berarti bahwa kecepatan *rewetting* di bagian bawah lebih cepat dari pada di bagian atas dan tengah pelat persegi. Suhu yang tinggi mengakibatkan semakin lamanya waktu yang dibutuhkan oleh air pendingin untuk melakukan *rewetting* pada pelat panas. Hal inilah yang menyebabkan titik *rewetting* terjadi lebih cepat di pelat bagian bawah, atas, dan kemudian di bagian tengah. Tersendatnya aliran air pendingin di sisi keluaran saluran celah sempit persegi menunjukkan pula bahwa terjadi fenomena *counter current flow* terhadap aliran air pendingin tersebut. Hal ini 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.

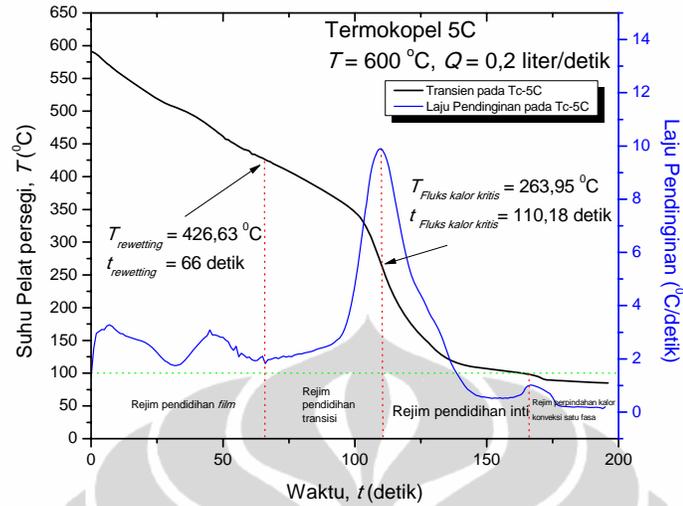
Pada suhu permukaan pelat persegi  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , terjadi semua fenomena pendidihan ketika air pendingin dilewatkan ke dalam celah sempit persegi yaitu rejim pendidihan film, rejim pendidihan transisi, rejim pendidihan inti, dan rejim perpindahan kalor konveksi satu fasa. Pada rejim 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. Semakin lama, kondisi pendidihan *film* akan hilang seiring dengan terus terjadinya kontak dengan air pendingin. Hilangnya rejim pendidihan *film* menyebabkan terjadinya perubahan rejim pendidihan ke rejim pendidihan transisi. Pada saat titik *Leidenfrost* tercapai, yang berarti kondisi *film* sangat minim, air pendingin yang melewati celah sempit persegi 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. Pada kurva 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. Kondisi ini 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.

#### 4.2.1.3 Kurva Laju Pendinginan pada Suhu Awal Pelat Persegi 600 °C dengan Debit Aliran Air Pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik dan 0,3 liter/detik

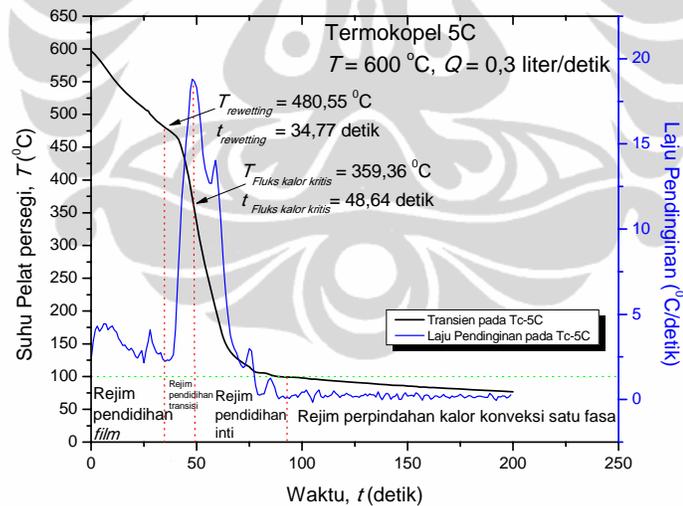
Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik dapat dilihat pada Gambar 4.37-4.39.



Gambar 4.37. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi 600 °C dengan debit aliran air pendingin 0,1 liter/detik



Gambar 4.38. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,2\text{ liter/detik}$



Gambar 4.39. Kurva laju pendinginan pada suhu awal pelat persegi  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,3\text{ liter/detik}$

Fenomena *rewetting* yang terjadi di sepanjang pelat panas persegi pada suhu  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  dengan debit aliran air pendingin  $0,1 - 0,3\text{ liter/detik}$  memiliki pola yang mirip dengan fenomena *rewetting* yang terjadi di sepanjang pelat panas persegi

pada 400 °C dengan debit aliran air pendingin 0,1 – 0,3 liter/detik. Dari kurva *isotime* dan kurva laju pendinginan pada suhu 600 °C pada berbagai variasi debit aliran air pendingin secara umum dapat dilihat bahwa terjadi pola dan kecepatan *rewetting* yang berbeda di sepanjang pelat panas. Titik mulai terjadinya *rewetting* lebih cepat terjadi di bagian bawah pelat persegi, baru kemudian terjadi *rewetting* di bagian atas dan tengah pelat persegi. Fenomena ini terjadi karena tingginya suhu dibagian tengah jika dibandingkan dengan bagian atas dan bawah, yang berarti bahwa kecepatan *rewetting* di bagian bawah lebih cepat dari pada di bagian atas dan tengah pelat persegi. Suhu yang tinggi mengakibatkan semakin lamanya waktu yang dibutuhkan oleh air pendingin untuk melakukan *rewetting* pada pelat panas. Hal inilah yang menyebabkan titik *rewetting* terjadi lebih cepat di pelat bagian bawah, atas, dan kemudian di bagian tengah. Tersendatnya aliran air pendingin di sisi keluaran saluran celah sempit persegi menunjukkan pula bahwa terjadi fenomena *counter current flow* terhadap aliran air pendingin tersebut. Hal ini 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.

Pada suhu permukaan pelat persegi 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. Semakin lama, kondisi pendidihan *film* akan hilang seiring dengan terus terjadinya kontak dengan air pendingin. Hilangnya rejim pendidihan *film* menyebabkan terjadinya perubahan rejim pendidihan ke rejim pendidihan transisi. Pada saat titik *Leidenfrost* tercapai, yang

berarti kondisi *film* sangat minim, air pendingin yang melewati celah sempit persegi 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. Pada kurva 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. Kondisi ini 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 keseluruhan proses *rewetting* yang terjadi pada suhu awal permukaan pelat persegi 205 °C, 400 °C, dan 600 °C dengan debit aliran 0,1 liter/detik, 0,2 liter/detik, dan 0,3 liter/detik dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Suhu, waktu dan kecepatan rerata *rewetting* sebagai fungsi dari suhu awal pelat panas dan debit aliran air pendingin

Suhu awal pelat persegi [°C]	Debit aliran air pendingin [liter/detik]	Posisi Termokopel	Suhu <i>rewetting</i> [°C]	Waktu <i>rewetting</i> [s]	Kecepatan <i>rewetting</i> rerata [m/s]
205	0,1	3B	191,76	0	0
		5C	201,38	0	
		8B	192,51	0	
	0,2	3B	202,47	0	0
		5C	202,47	0	
		8B	173,54	0	

(Sambungan Tabel 4.1)

	0,3	3B	206	0	0
		5C	205	0	
		8B	172	0	
400	0,1	3B	346,56	17,95	0,0094
		5C	358,66	44,48	
		8B	324,69	23,41	
	0,2	3B	275,67	31,07	0,0142
		5C	379,51	16,14	
		8B	225	0	
	0,3	3B	359,06	5,73	0,1037
		5C	387,5	2,73	
		8B	304,61	1,09	
600	0,1	3B	323,17	174,96	0,0025
		5C	465,2	88,23	
		8B	490,72	0,63	
	0,2	3B	265,95	138,92	0,0046
		5C	426,63	66	
		8B	489,15	30,8	
	0,3	3B	549,83	4,14	0,0072
		5C	480,55	34,77	
		8B	490,06	4,09	

Analisa mulai terjadinya titik *rewetting* dapat dilakukan dengan menggunakan kurva laju pendinginan dan *isotime*. Dengan kurva laju pendinginan dapat diketahui dengan pasti penurunan suhu permukaan pelat panas ketika dilewati oleh air pendingin dan dapat digunakan untuk menandai rejim-rejim pendidihan yang terjadi berdasarkan pola kurvanya. Hasil analisa terjadinya titik *rewetting* pada pelat panas persegi hampir menyerupai hasil analisa yang didapatkan oleh *Agrawal et.al*.

Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk terjadinya *rewetting* akan semakin cepat seiring dengan kenaikan debit aliran air pendingin pada suhu pelat panas yang sama, dan ini mengakibatkan kecepatan *rewetting* juga meningkat seiring dengan semakin besarnya debit aliran yang dialirkan ke dalam celah sempit persegi pada suhu pelat panas yang sama. Meningkatnya suhu pelat panas persegi bagian tengah pada suatu debit aliran yang sama akan menyebabkan semakin lamanya waktu yang dibutuhkan oleh air pendingin untuk melakukan *rewetting*, hal ini disebabkan karena pendidihan *film* akan semakin lama terjadi seiring dengan kenaikan suhu pelat panas pada debit aliran yang sama. Peningkatan suhu *rewetting* terjadi seiring dengan kenaikan suhu permukaan pelat panas, hal ini terjadi karena pelat dipanaskan berada pada perbedaan tiga kondisi suhu yang sangat signifikan. Perbedaan suhu yang signifikan ini menyebabkan terjadinya perubahan nilai kalor spesifik dan termal konduktifitas pelat yang digunakan sebagai benda uji. Perbedaan suhu yang tinggi juga menyebabkan berbedanya nilai suhu *wall superheat*, yaitu selisih dari suhu dinding panas terhadap suhu saturasi fluidanya, dan berubahnya sifat fisik pelat uji serta berbedanya rejim pendidihan yang dialami oleh fluida yang melewati celah sempit tersebut.

Fenomena yang didapatkan ini menunjukkan bahwa suhu *rewetting* dipengaruhi oleh suhu permukaan pelat panas persegi, debit aliran air pendingin dan suhu air pendingin yang dilewatkan ke dalam celah sempit persegi. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini memperkuat korelasi yang didapatkan oleh *Kim et.al.*

#### **4.2.2 Fenomena *Rewetting* pada Proses *Quenching* Celah Sempit Persegi**

Aliran air pendingin di antara bahan bakar pada reaktor nuklir didisain tidak hanya pada kondisi operasi normal, tetapi juga pada kondisi abnormal dan kecelakaan. Pendinginan suatu permukaan yang sangat panas adalah sesuatu yang sangat penting dalam aplikasi keselamatan reaktor nuklir, seperti dalam hal terjadi kecelakaan kehilangan air pendingin (*LOCA, loss of coolant accident*). Ketika terjadi kecelakaan karena kehilangan air pendingin pada suatu reaktor nuklir, suhu permukaan kelongsong bahan bakar akan meningkat secara drastis. Kalor yang

dihasilkan dari kecelakaan tersebut harus dibuang bahkan hingga saat reaktor telah *shutdown* sekalipun. Kalor yang terbentuk pun akan mengurangi air yang terdapat di dalam kolam reaktor. Secara otomatis sistem pendingin teras darurat (ECCS, *emergency core cooling system*) akan beroperasi untuk membuang kalor berlebihan yang terdapat pada kelongsong, bahan bakar, dan teras reaktor dengan mengisi kembali air di kolam reaktor dengan cara penggenangan. Penggenangan yang dilakukan bisa dengan cara menginjeksikan air dengan *top spray* atau dengan cara *bottom flooding*. Setelah air diinjeksikan, tidak langsung terjadi proses *rewetting* terhadap permukaan panas tersebut. Pada kondisi ini proses pendinginan menjadi sangat lambat dikarenakan permukaan panas tersebut tidak dapat dibasahi oleh air pendingin karena masih terdapat kondisi *film* di permukaan tersebut. Proses *rewetting* terjadi apabila suhu permukaan benda panas tersebut berada di bawah suhu *Leidenfrost*-nya (pendidihan *film* minimal). Setelah suhu permukaan berada di bawah suhu *Leidenfrost*, mulai terjadi kontak antara air dengan permukaan benda panas tersebut. Proses pendinginan permukaan panas pada kondisi ini akan lebih cepat terjadi. Fenomena *rewetting* menjadi sesuatu yang penting karena pada saat itulah banyak kalor dari permukaan yang terambil dan terjadi penurunan suhu yang cukup signifikan. Dalam proses pendinginan permukaan panas tersebut terdapat kejadian yang disebut dengan *counter current flow*, yaitu adanya uap yang menahan laju aliran air pendingin untuk melakukan pendinginan. *Counter current flow* yang terjadi menghambat pendinginan permukaan panas. Fenomena *counter current flow* akan hilang setelah gas yang terbentuk di antara permukaan panas hilang atau ketika kondisi pendidihan *film* telah hilang. Hilangnya *counter current flow* berarti menandai mulai terjadinya *rewetting* di permukaan panas dan menunjukkan mulai *establish*-nya aliran air pendingin untuk melewati permukaan benda panas. *Rewetting* dicirikan dengan adanya penurunan suhu yang signifikan dikarenakan kalor yang terdapat di pelat terserap oleh air pendingin. Oleh karena itulah maka suhu, waktu, dan kecepatan mulai terjadi *rewetting* menjadi penting untuk diketahui. Diketuainya suhu, waktu dan kecepatan *rewetting* sangat penting dalam mengevaluasi *performance* dari proses pendinginan yang dilakukan oleh sistem pendingin dan sistem pendingin teras darurat ketika kecelakaan kehilangan air pendingin terjadi, dan

bahkan hingga menyebabkan bahan bakar dan teras meleleh. Titik awal terjadinya *rewetting* adalah sebuah proses fundamental yang penting untuk diketahui sehubungan dengan pendinginan ketika terjadinya kecelakaan kehilangan air pendingin maupun kecelakaan parah pada sebuah reaktor nuklir. Dengan mengetahui fenomena ini, maka manajemen termal ketika kecelakaan terjadi dapat terus diperbaiki. Dengan demikian integritas bahan bakar nuklir, kelongsong bahan bakar, dan *reactor pressure vessel* dapat terjaga apabila kecelakaan kehilangan air pendingin terjadi.



## BAB 5

### KESIMPULAN

- Titik *rewetting* dari pendinginan permukaan pelat panas persegi dengan suhu awal 205 °C pada debit aliran 0,1 – 0,3 liter/detik langsung terjadi ketika air pendingin dimasukkan ke dalam celah sempit persegi.
- Titik *rewetting* dari pendinginan permukaan pelat panas persegi dengan suhu awal 400 °C pada debit aliran 0,1 liter/detik terjadi pada suhu *rewetting* 358,66 °C dengan kecepatan rerata *rewetting* sebesar 0,0094 meter/detik. Pada debit aliran 0,2 liter/detik terjadi pada suhu *rewetting* 379,51 °C dengan kecepatan rerata *rewetting* sebesar 0,0142 meter/detik. Pada debit aliran 0,3 liter/detik terjadi pada suhu *rewetting* 387,5 °C dengan kecepatan rerata *rewetting* sebesar 0,1037 meter/detik.
- Titik *rewetting* dari pendinginan permukaan pelat panas persegi dengan suhu awal 600 °C pada debit aliran 0,1 liter/detik terjadi pada suhu *rewetting* 465,2 °C dengan kecepatan rerata *rewetting* sebesar 0,0025 meter/detik. Pada debit aliran 0,2 liter/detik terjadi pada suhu *rewetting* 426,63 °C dengan kecepatan rerata *rewetting* sebesar 0,0046 meter/detik. Pada debit aliran 0,3 liter/detik terjadi pada suhu *rewetting* 480,55 °C dengan kecepatan rerata *rewetting* sebesar 0,0072 meter/detik.
- Suhu terjadinya *rewetting* akan meningkat seiring dengan kenaikan suhu permukaan pelat panas persegi.
- Pada suhu permukaan pelat panas persegi yang sama, semakin besar debit aliran air pendingin yang dilewatkan melalui celah sempit maka waktu dan kecepatan *rewetting* yang dibutuhkan untuk mendinginkan permukaan pelat persegi tersebut akan semakin cepat.
- Meningkatnya suhu pelat panas persegi bagian tengah pada suatu debit aliran yang sama akan menyebabkan semakin lamanya waktu yang dibutuhkan oleh air pendingin untuk melakukan *rewetting*.

- Dapat diperkirakan bahwa gelembung uap yang terbentuk akibat pemanasan pelat persegi tersebut bergerak ke atas dan mengakibatkan terjadinya *counter current flow* yang menghambat laju aliran air pendingin untuk melakukan pendinginan celah sempit persegi.



## DAFTAR PUSTAKA

1. Peraturan Presiden No.5 Tahun 2006 tentang *Kebijakan Energi Nasional*, 2006.
2. Dewan Riset Nasional, *Agenda Riset Nasional 2006 – 2009*, 2006.
3. 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.
4. 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.
5. A.R. Antariksawan, *Analisis Degradasi Teras PWR Pada Kejadian Kehilangan Catu Daya*, Jurnal Tri Dasa Mega, Vol. 2, No. 3, 2005.
6. Kandlikar, S.G., *Heat Transfer Mechanisms during Flow Boiling in Microchannels*, Journal of Heat Transfer, No.8, Vol.126, 2002.
7. 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 239, 320-326, 2009.
8. Xia, C., Guo, Z., Hu, W., *Mechanism of Boiling Heat Transfer in Narrow Channels*, San Diego, CA 197, 111-119, 1992.
9. Peng, X.F., and Wang, B.X., *Forced Convection and Boiling Characteristics in Microchannels*, Heat Transfer, Proceedings of 11th IHTC, Kyongju, Korea, Vol. 1, pp. 371-390, August 23-28, 1998.
10. P. Horner et al., *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, 1999.
11. M. 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.
12. Jian Zhang, Futoshi Tanaka, Mulya Juarsa, Kaichiro Mishima, *Calculation of Boiling Curves during Rewetting of a Hot Vertical narrow Channel*, The 10<sup>th</sup>

- International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-10), Seoul, Korea, October 5-9, 2003.
13. Cengel, Y.A., *Heat Transfer: A Practical Approach*, 2<sup>nd</sup> Ed., Mc. Graw Hill, 2003.
  14. Bejan, A., dan Kraus, A.D., 2003, *Heat Transfer Hand Book*, John Wiley & Sons, New Jersey, Canada, 2003.
  15. Raldi Artono Koestoer dan Nandy Putra, Fenomena Pendidihan, Departemen Teknik Mesin FTUI, 2003.
  16. Raldi Artono Koestoer, dan Sasanti Proborini, Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis, PT. Pradnya Paramita, Jakarta, 1994.
  17. J.P. Holman, Perpindahan Kalor, Edisi keenam, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1994.
  18. Raldi Artono Koester, Perpindahan Kalor, Edisi Pertama, Penerbit Salemba Teknik, 2002.
  19. Hsu-Chieh YEH, *An Analysis of Rewetting of Nuclear Fuel Rod in Water Reactor Emergency Core Cooling*, International Journal of Nuclear Engineering and Design 34, 317-322, 1975.
  20. B.D.G. Piggott and D.T.C. Porthouse, *A correlation of Rewetting Data*, International Journal of Nuclear Engineering and Design 32, 171-181, 1975.
  21. S.S. Dua and C.L. Tien, *An Experimental Investigation of Falling-Film Rewetting*, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 21, pp. 955-965, 1978.
  22. A.K. Saxena, V. Venkat Raj, and V. Govardhana Rao, *Experimental Studies on Rewetting of Hot Vertical Annular Channel*, International Journal of Nuclear Engineering and Design 208, 283-303, 2001.
  23. Frerichs F., and Luebben, T., *The Influence of Surface Temperature on Rewetting Behavior During Immersion Quenching of Hollow and Solid Cylinders*, Journal of ASTM International (JAI), Vol. 1523, pp. 1032-1054, 2010.
  24. A.K. Kim and Y. Lee, *A Correlation of Rewetting Temperature*, Letters in Heat and Mass Transfer, Vol. 6, pp. 117-123, 1979.

25. Juan J. Carbajo, *A Study on The Rewetting Temperature*, International Journal of Nuclear Engineering and Design 84, 21-52, 1985.
26. K. Adham-Khodaparast, J.J. Xu, and M. Kawaji, *Flow Film Boiling Collapse and Surface Rewetting in Normal and Reduced Gravity Conditions*, International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 38, No. 15, pp. 2749-2760, 1995.
27. R.B. Duffey and D.T.C. Porthouse, *The Physics of Rewetting in Water Reactor Emergency Core Cooling*, International Journal of Nuclear Engineering and Design 25, 379-394, 1973.
28. Michitsugu Mori, and Yukihsa Yabushita, *Visualization of Quench-rewetting Phenomena of Liquid-film Falling during Dryout and Rewetting on Fuel Rods in High Temperature and Pressure BWR Operating Conditions*, Journal of The Visualization Society of Japan 2011, 139–144 DOI 10.1007/s12650-011-0115-9, 2012.
29. S.K. Sahu, P.K. Das, S. Bhattacharyya, *An Experimental Investigation on the Quenching of a Hot Vertical Heater by Water Injection at High Flow Rate*, International Journal of Nuclear Engineering and Design 240, 1558-1568, 2010.
30. Nitin Karwa, Tatiana Gambaryan-Roisman, Peter Stephan, Cam Tropea, *A Hydrodynamic Model for Subcooled Liquid Jet Impingement at the Leidenfrost Condition*, International Journal of Thermal Sciences 50, 993-1000, 2011.
31. Albert M. C. Chan, *Refilling and Rewetting of a Hot Horizontal Tube: Part I—Experiments*, ASME Journal of Heat Transfer, May 1981, Volume 103, Issue 2, 281-286, 1981.
32. 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 51, 1226–1237, 2008.
33. Nitin Karwa, Tatiana Gambaryan-Roisman, Peter Stephan, Cameron Tropea, *Experimental Investigation of Circular Free-surface Jet Impingement*

- Quenching: Transient Hydrodynamics and Heat Transfer*, International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science 35, 1435–1443, 2011.
34. B. Hernández-Morales, H.J. Vergara-Hernández, G. Solorio-Díaz and G.E. Totten, *Experimental and Computational Study of Heat Transfer During Quenching of Metallic Probes*, Evaporation, Journal of Condensation and Heat Transfer
35. C. Agrawal, R. Kumar, A. Gupta, B. Chatterjee, *Effect of Jet Diameter on the Rewetting of Hot Horizontal Surfaces during Quenching*, International Journal of Experimental Thermal and Fluid Science, accepted 22 March 2012.

