



UNIVERSITAS INDONESIA

**DIDIH KOLAM NANO FLUIDA PADA MEDIA BERPORI
VERTIKAL**

TESIS

RIDHO IRWANSYAH

1006735731

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM PASCA SARJANA

DEPOK

JANUARI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**DIDIH KOLAM NANO FLUIDA PADA MEDIA BERPORI
VERTIKAL**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar magister teknik

RIDHO IRWANSYAH

1006735731

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM PASCA SARJANA

DEPOK

JANUARI 2012

HALAMAN PERNYATAN ORISINALITAS

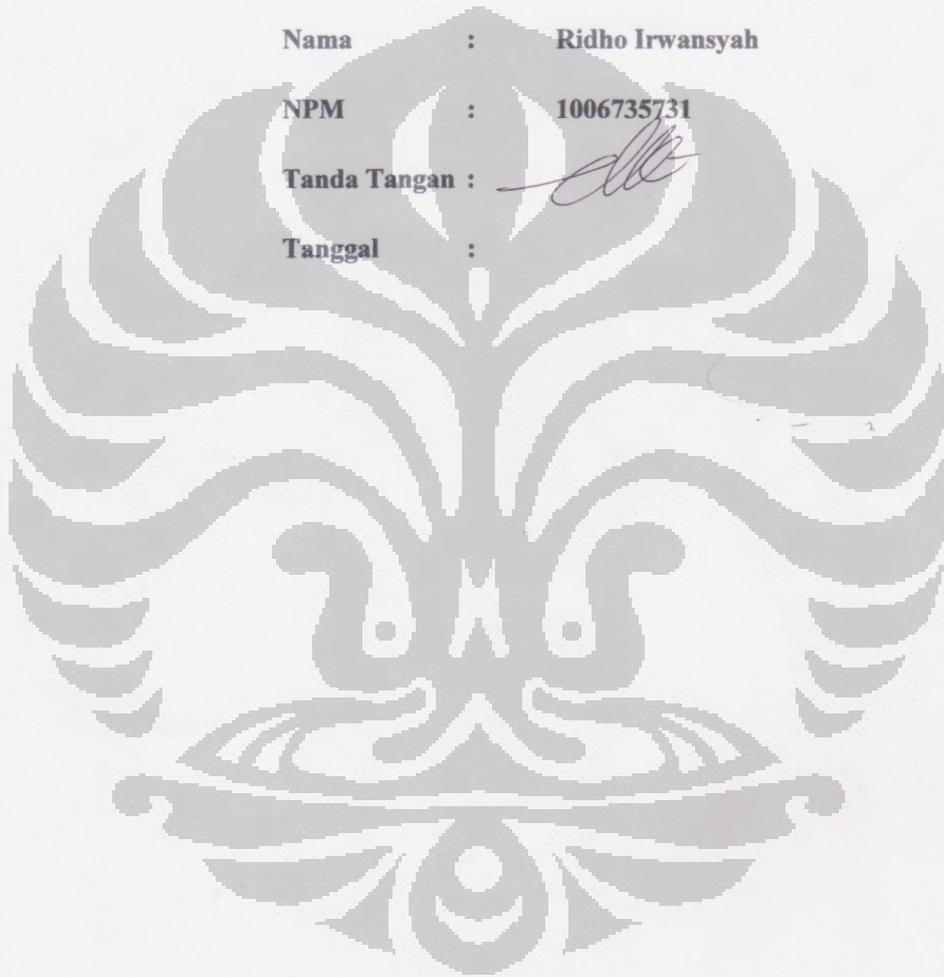
Proposal tesis ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber yang saya kutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Ridho Irwansyah

NPM : 1006735731

Tanda Tangan : 

Tanggal :



HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Ridho Irwansyah
NPM : 1006735731
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tesis : Didih Kolam Nano Fluida Pada Media Berpori
Vertikal

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr.Ing. Nandy Putra (.....)

Penguji : Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer, D.E.A (.....)

Penguji : Dr.Ir.Danardono A.S. DEA. PE (.....)

Penguji : Dr. Agus Pamitran, S.T., M.Eng. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 26 Januari 2012

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah, Puji Syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmatnya sehingga penulis berkesempatan untuk menyelesaikan penelitian berjudul “Didih Kolam Nano Fluida Pada Media Berpori”. Terima kasih juga saya ucapkan kepada :

1. Prof. Dr.-Ing. Nandy Putra pembimbing thesis dan pembimbing akademik yang memberikan banyak masukan, nasehat dan kesempatan untuk melihat dunia.
2. Papi, Mami, Andre dan Sofie yang tanpa lelah dan batas terus memberikan semangat kepada penulis untuk melanjutkan studi ini.
3. Dr. Agus Pamitran selaku koordinator program *fast track* DTM FTUI, yang telah mempercayakan saya untuk mendapatkan beasiswa *fast track*.
4. Elrosa Lamia Rizal, terima kasih untuk semangat, doa dan dukungan yang tanpa henti selama melakukan penelitian
5. Teman-teman seperjuangan di Lab Applied Heat Transfer, Bli Wayan, Bli Agus, Mas Agung, Pak Bro Mulya, Pak Bro Hadi, Ibu Ayi, Ibu Dinni, Madame Yuyu, Ary, Bimo, Gerry, Nisa, Retsa, Rio, Okta, Zein yang setiap hari bahu-membahu dari pagi hingga terbenam fajar di ruang 312 engineering center.
6. Bapak Zainal di Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Bapak Djajat di Departemen Teknik Kimia yang telah banyak membantu dalam pembuatan *experimental setup*, Rekan-rekan laboratorium metrology, terima kasih atas ilmu pengukuran kekasaran permukaan yang telah kalian berikan.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga thesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Ridho Irwansyah

NPM : 1006735731

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Thesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : *DIDIH KOLAM NANO FLUIDA PADA MEDIA BERPORI VERTIKAL*

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 26 Januari 2012

Yang menyatakan



(Ridho Irwansyah)

ABSTRAK

Nama : Ridho Irwansyah

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Didih Kolam Nano Fluida Pada Media Berpori Vertikal

Perkembangan teknologi elektronik menuju arah miniaturisasi dari komponen yang dihasilkan, membutuhkan metode yang sesuai untuk *thermal management* yang lebih baik. Metode penyerapan panas buang mikroprosesor yang sering ditemui masih memanfaatkan prinsip konduksi dan konveksi paksa atau alami yang masih bersifat satu fasa, metode ini tidak sesuai dengan mikroprosesor yang menghasilkan panas buang yang besar. Salah satu metode perpindahan kalor yang banyak digunakan untuk sistem pendingin pada peralatan mikroelektronik adalah *didih kolam*. Hal ini dikarenakan kemampuan memindahkan kalor yang tinggi dan proses ini tidak membutuhkan pompa untuk memindahkan fluida kerja. Pada penelitian ini telah dilakukan pengujian didih kolam dengan permukaan pemanas media berpori *sintered copper* 300 μm dan 400 μm dan media berpori *screen mesh stainless steel* dan tembaga, dengan variasi fluida H_2O , $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 1%, 3% dan 5%. Pengujian didih kolam dengan media berpori *sintered copper* 400 μm menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan media berpori lainnya. Penggunaan H_2O , $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 5% menunjukkan performa yang cenderung menurun dibandingkan dengan fluida lainnya.

Kata Kunci : *Nano Fluida, Sintered Copper, Screen Mesh, Didih Kolam*

ABSTRACT

Name : Ridho Irwansyah

Study Program : Mechanical Engineering

Judul : *Pool Boiling of Nanofluids in Vertical Porous Media*

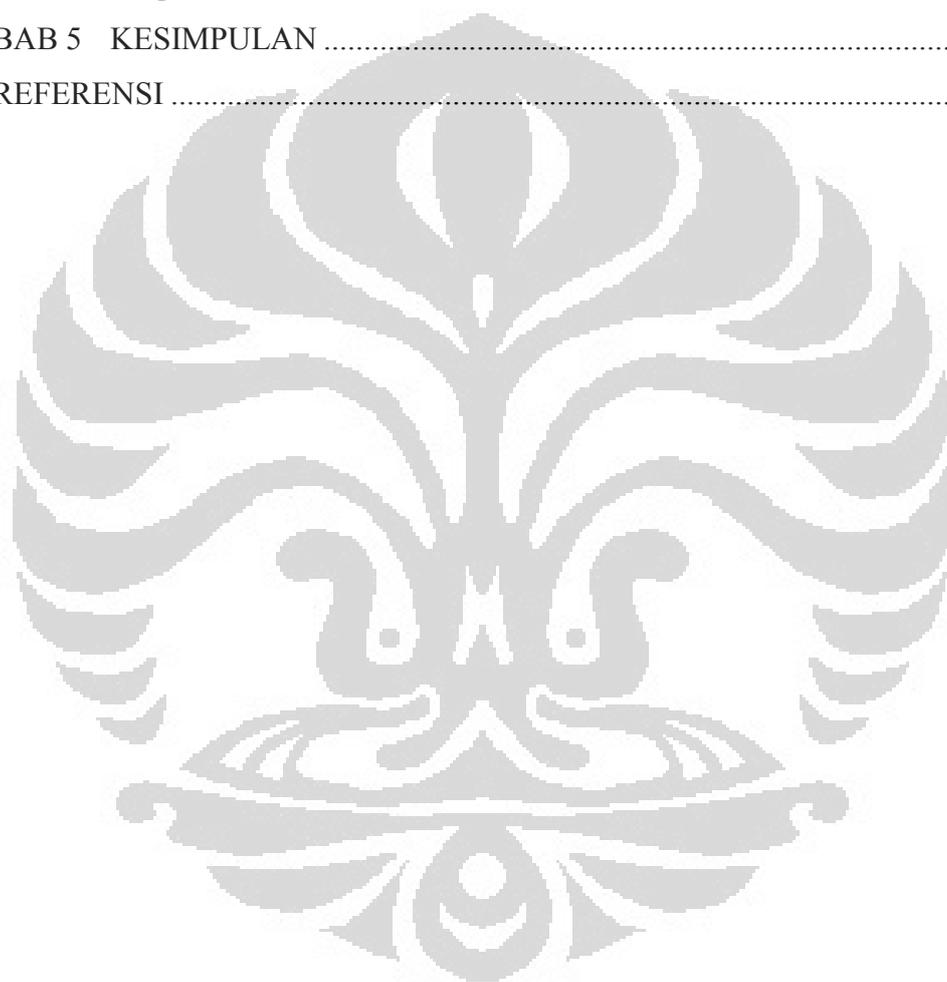
The development of electronic components such as microprocessor requires a better thermal management system to overcome the high heat flux produce by the component. The method to absorb the heat produce by the microprocessor is still use the conduction or either natural or free convection which still in a single phase heat transfer. One of heat transfer method that suitable for a high heat flux application is pool boiling which has a two order of magnitude higher than of a single phase heat transfer and does not require a pump to move the fluid. In this study has been conducted the pool boiling experiment with four different *porous media surface* which are *sintered copper* 300 μm and 400 μm , copper screen mesh and stainless steel screen mesh with four different fluid which are $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 1%, 3% and 5%. The *sintered copper* 400 μm has shown a better heat transfer performance compared to the other porous media. The H_2O , $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 5% has shown a performance no better than $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 1% and 3%.

Key Words : *Nanofluids, Sintered Copper, Screen Mesh, Pool Boiling*

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Batasan Penelitian	7
1.5 Metodologi Penelitian	7
1.6 Sistematika Penulisan	8
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Fenomena Pendidihan	10
2.1.1 Didih Kalam	10
2.1.2 Mekanisme Pertumbuhan Gelembung (<i>Bubble Growth Mechanism</i>) 13	
2.1.3 Perpindahan Kalor Pada Didih Kalam	16
2.2 Nano Fluida	17
2.2.1 Perkembangan Nano Fluida	17
2.2.2 Pembuatan Nano Fluida	19
2.2.3 Penggunaan Nano Fluida Pada Aplikasi Perpindahan Kalor	20
BAB 3 METODE PENELITIAN	24
3.1 Pembuatan Nano Fluida	24
3.2 Proses <i>Sintering</i>	26
3.3 Pengujian Didih Kalam	27
3.4 Variabel Pengujian Didih Kalam	29
3.5 Pengujian Kekerasan Permukaan	31
BAB 4 PEMBAHASAN	32

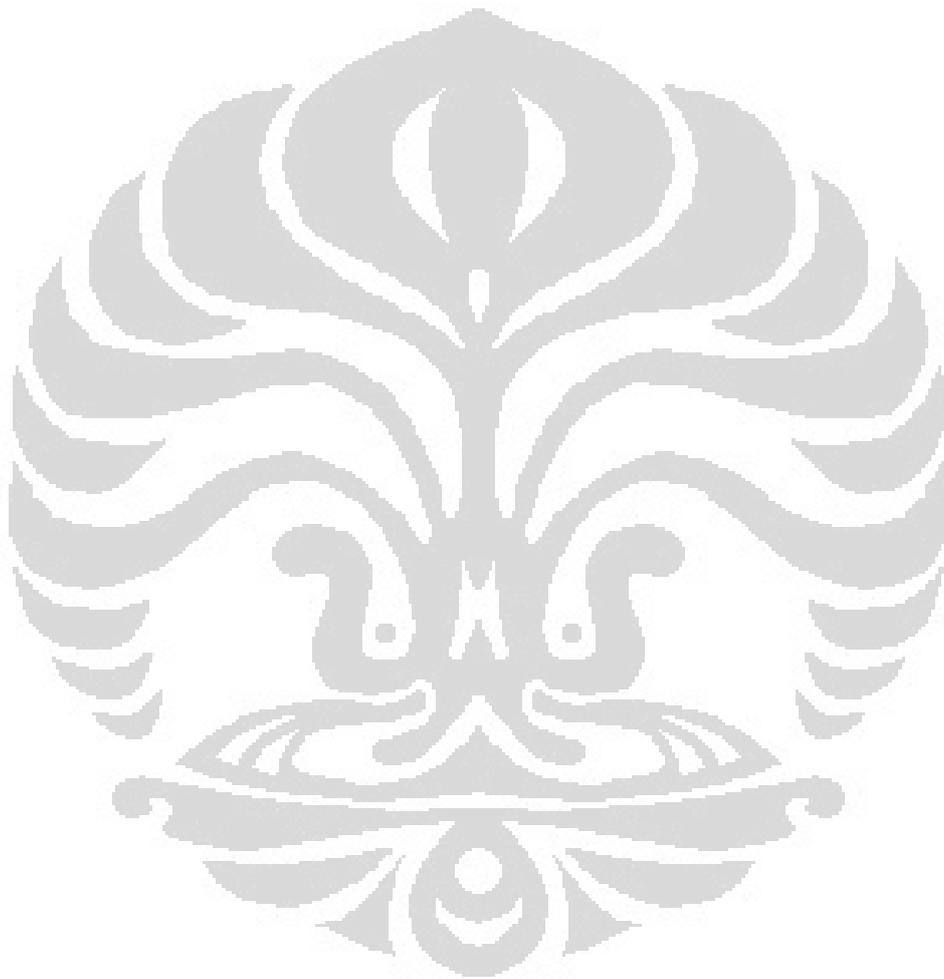
4.1	Pengaruh Jenis Media Berpori Pada Didih Kolan.....	32
4.1.1	Pengujian Didih Kolan Pada Media Berpori Hasil <i>Sintering</i>	32
4.1.2	Pengujian didih kolan pada media berpori <i>screen mesh</i>	35
4.2	Pengaruh Jenis Fluida Pada Didih Kolan.....	39
4.3	Pengaruh Penggunaan Nano Fluida Terhadap Penurunan atau Peningkatan Pendidihan	45
4.4	Pengaruh Penggunaan Nano Fluida Terhadap Kekasaran Permukaan Media Berpori.....	46
BAB 5 KESIMPULAN		50
REFERENSI		51



DAFTAR GAMBAR

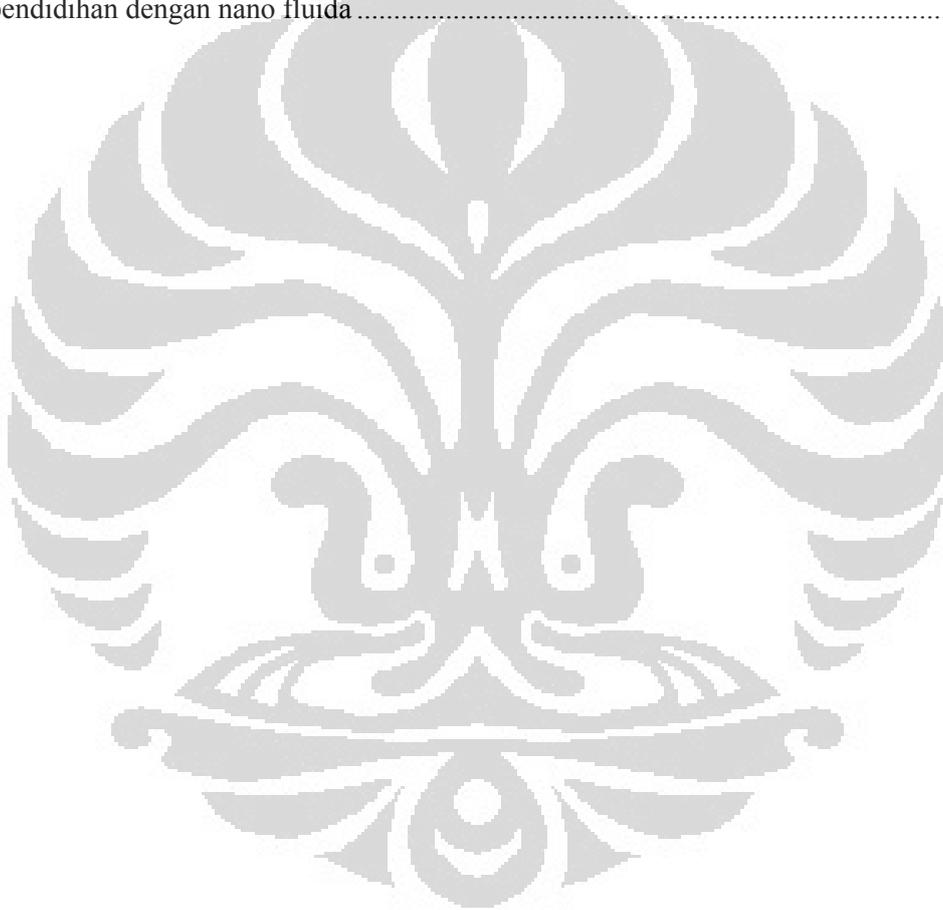
Gambar 1.1 <i>Rodmap</i> perkembangan <i>thermal design</i> untuk semikonduktor [1]	1
Gambar 1.2 Grafik jumlah penelitian pendidihan nano fluida dalam delapan tahun terakhir [26]	6
Gambar 2.1 Kurva pendidihan yang menunjukkan hubungan antara fluks kalor dan ΔT antara dinding pemanas dan suhu saturasi fluida [7]	11
Gambar 2.2 Proses terbentuknya gelembung berdasarkan masing-masing daerah didih kolam [7].....	12
Gambar 2.3 Tahapan-tahapan pada pertumbuhan gelembung pada permukaan superheat dengan fluida pada suhu saturasi [7].....	14
Gambar 2.4 Sistem metastabil dari partikel nano [29].....	20
Gambar 3.1 Pembuatan nano fluida dengan <i>magnetic stirrer</i> dan <i>ultrasonic processor</i> ..	24
Gambar 3.2 Serbuk tembaga 300 μm	26
Gambar 3.3 Proses <i>sintering</i> serbuk tembaga	27
Gambar 3.4 Skema pengujian didih kolam.....	27
Gambar 3.5 Posisi termokopel pada permukaan pemanas	28
Gambar 3.6 Tabung pendidihan.....	29
Gambar 3.7 Media berpori <i>screen mesh</i> tembaga, <i>stainless steel</i> dan <i>sintered copper</i> tembaga	30
Gambar 3.8 Media berpori yang digunakan pada pengujian didih kolam	30
Gambar 3.9 Proses Pengukuran kekasaran permukaan media berpori	31
Gambar 4.1 Kurva pendidihan dengan permukaan pemanas media berpori <i>sintered copper</i> 300 μm	32
Gambar 4.2 Kurva perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor pada <i>sintered copper</i> 300 μm	33
Gambar 4.3 Kurva pendidihan dengan permukaan pemanas media berpori <i>sintered copper</i> 400 μm	34
Gambar 4.4 Kurva perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor pada <i>sintered copper</i> 400 μm	35
Gambar 4.5 Kurva pendidihan dengan permukaan pemanas media berpori <i>screen mesh stainless steel</i>	36
Gambar 4.6 Kurva perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor pada <i>screen mesh stainless steel</i>	37
Gambar 4.7 Kurva pendidihan dengan permukaan pemanas media berpori <i>screen mesh</i> tembaga	38
Gambar 4.8 Kurva perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor pada <i>screen mesh</i> tembaga	39
Gambar 4.9 Kurva pendidihan dengan variasi media berpori menggunakan fluida : (a) H_2O , (b) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 1%, (c) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 3%, (d) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 5%.....	42
Gambar 4.10 Perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor dengan variasi media berpori menggunakan fluida : (a) H_2O , (b) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 1%, (c) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 3%, (d) $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 5%	44
Gambar 4.11 Perbandingan koefisien perpindahan kalor nano fluida terhadap air pada konsentrasi (a) 1%, (b) 3% dan (c) 5%.	46

Gambar 4.12 Hasil Pengukuran kekasaran permukaan media berpori *sintered copper* 300 μm (a) sebelum pengujian didih kolam (b) sesudah pengujian didih kolam 48



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Jenis-jenis <i>heat transfer enhancement techniques</i>	2
Tabel 2.1 Konduktivitas termal beberapa material [29].....	18
Tabel 2.2 Rangkuman penelitian didih kolam menggunakan nano fluida	22
Tabel 3.1 <i>Properties</i> nano partikel Al_2O_3	24
Tabel 3.2 Matriks pembuatan nano fluida	25
Tabel 3.3 Konduktivitas termal nano fluida dan fluida dasar pada 25 °C.....	25
Tabel 3.4 Matriks pengujian didih kolam	29
Tabel 3.5 Tabel pengujian didih kolam	31
Tabel 4.1 Perbandingan kekasaran permukaan media berpori sebelum dan sesudah pendidihan dengan nano fluida	49

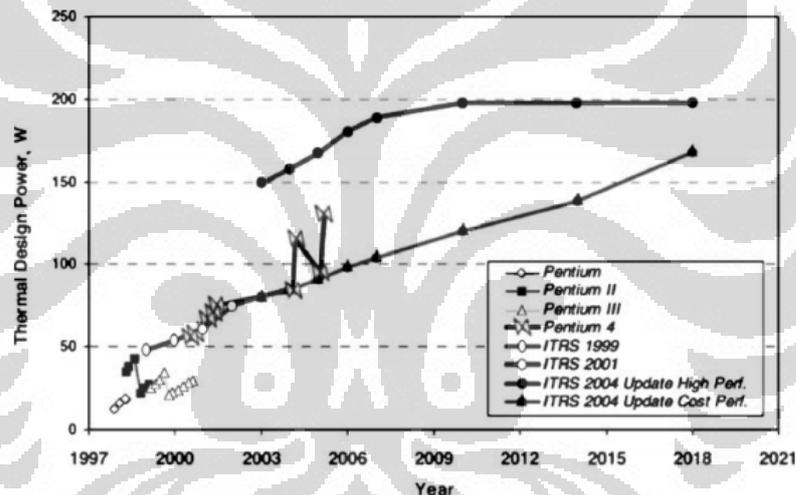


BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi elektronik menuju arah miniaturisasi dari komponen yang dihasilkan, membutuhkan metode yang sesuai untuk *thermal management* yang lebih baik. Mikroprosesor merupakan salah satu contoh komponen elektronik yang memiliki tingkat perkembangan sangat pesat, perkembangan yang juga diikuti dengan meningkatnya panas buang yang dihasilkan ketika mikroprosesor beroperasi, hal ini bisa dilihat dari grafik *International Technology Roadmap for Semiconductors* pada gambar 1.1 [1].



Gambar 1.1 Rodmap perkembangan *thermal design* untuk semikonduktor [1]

Metode penyerapan panas buang mikroprosesor yang sering ditemui masih memanfaatkan prinsip konduksi dan konveksi paksa atau alami yang masih bersifat satu fasa, metode ini tidak sesuai dengan mikroprosesor yang menghasilkan panas buang yang besar [2]. Dibutuhkan metode pendinginan dengan kemampuan menyerap kalor dalam jumlah besar yang berasal dari permukaan mikroprosesor yang memiliki luasan relatif kecil.

Dalam menjawab tantangan *thermal management* pada komponen mikroelektronik, dilakukan penelitian untuk meningkatkan kemampuan memindahkan kalor dari metode penyerapan kalor yang digunakan. Beberapa

metode perpindahan kalor yang banyak digunakan untuk pendingin komponen mikroelektrik adalah konveksi alami satu fasa, konveksi paksa satu fasa dan didih kolam.

Peningkatan kemampuan memindahkan kalor dari metode-metode tersebut dikenal dengan istilah *heat transfer enhancement techniques*. Secara umum terdapat 16 cara untuk meningkatkan kemampuan memindahkan kalor yang sudah teridentifikasi oleh A.E. Bergles, dimana secara garis besar dikelompokkan kedalam metode aktif dan metode pasif. Metode pasif bisa diartikan sebagai metode yang tidak membutuhkan tambahan energi dari luar selama proses perpindahan kalor, sementara itu metode aktif bersifat sebaliknya, dimana penambahan energi dari luar sistem diberikan selama terjadinya proses perpindahan kalor. Tabel 1.1 menunjukkan jenis-jenis dari metode peningkatan kemampuan metode perpindahan kalor [3].

Tabel 1.1 Jenis-jenis *heat transfer enhancement techniques*

Metode Pasif	Metode Aktif
Perlakuan permukaan	Mengaduk Fluida
Kekasaran permukaan	Getaran permukaan
Penambahan permukaan	Getaran pada fluida
Mempercepat perpindahan fluida	Pemberian tegangan pada fluida
Pusaran pada aliran	Pemberian gas pada aliran fluida
Tabung melingkar	Pembersihan uap dari permukaan
Peningkatan tegangan permukaan	Tubrukan berkecepatan tinggi
Penambahan partikel untuk liquid	
Penambahan partikel untuk gas	

Salah satu metode perpindahan kalor yang banyak digunakan untuk sistem pendingin pada peralatan mikroelektronik adalah *didih kolam*. Hal ini dikarenakan kemampuan memindahkan kalor yang tinggi dan proses ini tidak membutuhkan pompa untuk memindahkan fluida kerja [4]. *Didih kolam* dipilih karena memiliki kemampuan memindahkan kalor dua kali lebih baik dibandingkan dengan metode perpindahan kalor satu fasa pada metode pendinginan konvensional [5]. *Boiling* atau pendidihan merupakan fenomena perubahan fase dari cair menjadi uap yang

terjadi pada antarmuka padat-cair yang diawali dengan terbentuknya gelembung-gelembung udara pada permukaan yang dikarenakan terjadinya perpindahan kalor dari permukaan benda padat [6,7,8].

Sistem-sistem yang memanfaatkan *boiling heat transfer* sebagai metode untuk memindahkan kalor dari sumber panas sering terbentur oleh batasan nilai *critical heat flux* (CHF). *Critical heat flux* merupakan nilai maksimum fluks kalor dimana *boiling heat transfer* berada titik efisiensi pendinginan tertinggi. Ketika nilai CHF dilewati permukaan *heater* akan tertutup oleh lapisan udara yang akan menjadi penghalang antara permukaan pemanas dan fluida yang dipanaskan, hal ini dapat menyebabkan menurunnya efisiensi perpindahan kalor [9]. Oleh karena itu, meningkatkan nilai CHF akan memungkinkan meningkatnya batas kemampuan operasi sistem, lebih banyak kalor yang dipindahkan atau mereduksi ukuran dari sistem untuk memindahkan jumlah kalor tertentu [10].

Publikasi yang dihasilkan oleh A.E. Bergles pada tahun 1997 [11] menjadi panduan dalam melakukan penelitian untuk meningkatkan kemampuan perpindahan kalor. Berdasarkan publikasi tersebut dikatakan bahwa peningkatan kemampuan perpindahan kalor dapat diartikan sebagai usaha untuk memenuhi tantangan meningkatnya fluks kalor. Lebih lanjut, metode ini dikenal dengan nama *heat transfer enhancement techniques* yang terbagi atas *passive* dan *active technique*, seperti yang tercantum pada tabel 1.1.

Passive technique lebih banyak dipilih peneliti karena lebih efektif dari segi biaya. Beberapa *passive technique* yang banyak ditemui adalah modifikasi pada permukaan *heater* dan penambahan nanopartikel pada fluida untuk menghasilkan nanofluida [12].

Beberapa penelitian *didih kolam* yang memanfaatkan modifikasi permukaan *heater* dilakukan dengan cara *coating* atau penambahan lapisan nanopartikel pada permukaan *heater* [10,13,14]. Benoit Stutz et.al mendapatkan lapisan permukaan $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ setelah melakukan pendidihan nanofluida dan *electrophoresis* [14]. Y. Takata et.al menemukan bahwa pemberian lapisan nanopartikel TiO_2 pada permukaan *heater* menghasilkan nilai CHF dua kali lebih

besar dibandingkan *heater* tanpa lapisan nanopartikel [13]. Janusz T. Cieslinski melakukan pengujian terhadap penambahan lapisan logam (Al, Cu, Mo, Zn) dengan variasi ketebalan 0.08 – 2.00 mm dengan cara *gas-flame spraying*, proses *coating* ini meningkatkan nilai *boiling heat transfer coefficient* dibandingkan dengan permukaan *heater* yang tidak mengalami *coating* [15]. Selain metode *coating*, modifikasi permukaan heater juga dilakukan dengan metode *extended surface* [4,5,12]. Shoji Mori dan Kunito Okuyama melakukan penelitian dengan menambahkan *porous media* yang memiliki struktur berbentuk *honeycomb*, penambahan *porous media* pada permukaan heater menghasilkan peningkatan 2.5 kali nilai CHF yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa penggunaan *porous media*.

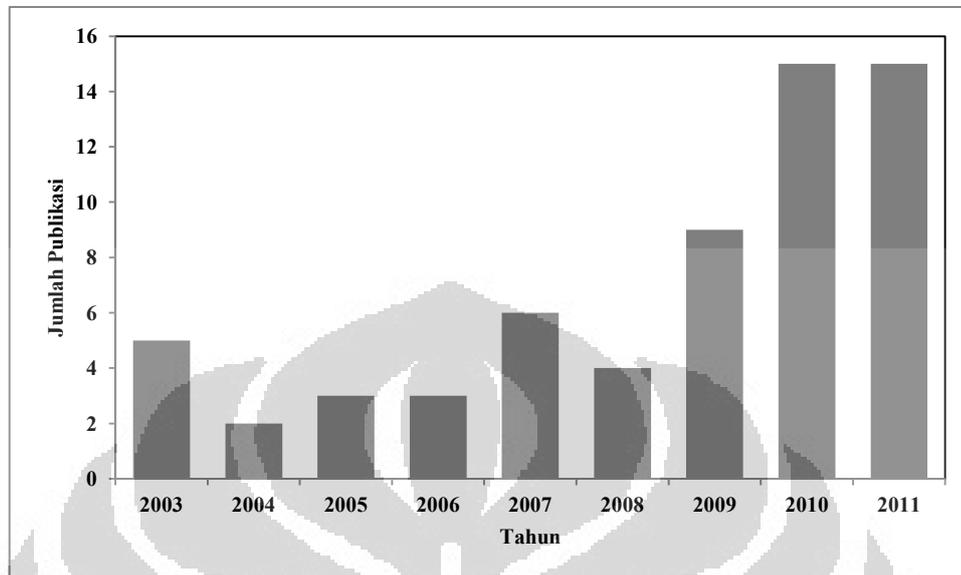
Metode lain yang juga digunakan dalam *heat transfer enhancement technique* adalah *additive for liquids*. Dalam hal ini adalah penambahan partikel berukuran nano (10-100 nm) pada fluida dasar. Penambahan nanopartikel pada fluida dasar berakibat pada meningkatnya nilai konduktivitas termal fluida [16,17]. Choi menjadi *pioneer* konsep nano fluida pada tahun 1995 dengan [18]. Penelitian nano fluida semakin menarik minat peneliti ketika Eastman et.al menemukan bahwa penambahan 0.04 % nano partikel tembaga berukuran 10 nm berhasil meningkat nilai konduktivitas termal fluida hingga 40 % dengan fluida dasar *ethylene glycol* [19].

Nano fluida juga digunakan pada penelitian fenomena pendidihan, hasil dari penelitian-penelitian pendidihan nano fluida terbagi ke dalam dua kelompok yang saling bertolak belakang. Kelompok pertama menemukan bahwa penggunaan nano fluida berujung pada penurunan nilai *boiling heat transfer coefficient* dibandingkan dengan menggunakan fluida dasar (air, *ethylene glycol*, dll). S.K. Das et.al melakukan penelitian didih kolam dengan variasi ukuran pemanas menggunakan nano fluida $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ pada konsentrasi volume 1%, 2% dan 4%, hasil dari penelitian ini menunjukkan peningkatan nilai perbedaan suhu antara dinding pemanas dan fluida seiring dengan meningkatnya konsentrasi nano fluida, yang berakibat pada menurunnya nilai koefisien perpindahan kalor [20]. Fenomena yang sama juga ditemukan oleh In Cheol Bang pada tahun 2004 yang

menggunakan nano fluida $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ pada konsentrasi 0.5%, 1%, 2% dan 4% dengan pemanas berbentuk pelat datar[21]. Penurunan kemampuan *boiling heat transfer* dengan nano fluida pada dua penelitian tersebut dikarenakan terbentuknya lapisan yang berasal dari nano partikel pada permukaan pemanas, hal ini dibuktikan dengan terjadinya penurunan nilai kekasaran permukaan pemanas dibandingkan sebelum nano fluida digunakan [20]. Hasil bertolak belakang ditemukan oleh Hyungdae Kim et.al yang melakukan penelitian didih kolam dengan nano fluida Al_2O_3 dan TiO_2 menemukan peningkatan nilai fluks kalor kritis yang mencapai 170 % dibandingkan dengan menggunakan fluida dasar. Ketika pemanas yang sudah digunakan pada pendidihan nano fluida kembali digunakan untuk fluida dasar, peningkatan fluks kalor kritis juga ditemukan, sehingga disimpulkan bahwa peningkatan nilai fluks kalor kritis lebih dikarenakan oleh terbentuknya lapisan pada permukaan pemanas setelah proses pendidihan dengan nano fluida [22]. Peningkatan nilai fluks kalor kritis hingga 200 % pada didih kolam dengan nano fluida juga ditemukan oleh S.M. You et.al yang menggunakan nano fluida Al_2O_3 dengan variasi konsentrasi 0 g/l – 0.05 g/l [23].

Hasil yang bertolak belakang dari peristiwa pendidihan menggunakan nano fluida mendorong banyak penelitian untuk mendeskripsikan fenomena fisis yang mengakibatkan meningkat atau menurunnya kemampuan dari *boiling heat transfer* (BHT). G. Prakash Narayan et.al melakukan penelitian pendidihan dengan nano fluida Al_2O_3 pada variasi konsentrasi 0.5 %, 1% dan 2% dengan basis massa. Geometri pemanas adalah vertikal dengan tiga nilai kekasaran permukaan rata-rata yang berbeda 48, 98 dan 524 nm. Pemanas dengan permukaan terkasar (524 nm) mampu meningkatkan performa pendidihan hingga 70 % ketika menggunakan nano fluida Al_2O_3 dengan konsentrasi 0.5%. Parameter fisis yang mempengaruhi performa pendidihan nano fluida adalah *properties* dari nano fluida, ukuran nano partikel dan kekasaran permukaan pemanas [24]. Johnathan S. Coursey dan Jungho Kim mengamati interaksi antara permukaan pemanas tipe pelat yang terbuat dari Cu dan CuO terhadap nano fluida Al_2O_3 dengan fluida dasar H_2O dan ethanol (*wettability*). Peningkatan fluks kalor kritis mencapai 37% pada saat konsentrasi nano fluida > 0.525 g/L dengan fluida

dasar air, sementara nano fluida dengan fluida dasar ethanol membutuhkan konsentrasi 10 g/L untuk meningkatkan fluks kalor kritis sebesar 25 % [25].



Gambar 1.2 Grafik jumlah penelitian pendidihan nano fluida dalam delapan tahun terakhir [26]

Jumlah penelitian yang berhubungan dengan fenomena pendidihan nano fluida terus mengalami peningkatan dalam beberapa tahun terakhir dengan optimisme bahwa penggunaan nano fluida sebagai fluida kerja dapat berujung pada meningkatnya nilai fluks kalor kritis, gambar 1.2 menunjukkan grafik rangkuman jumlah penelitian pendidihan dengan nano fluida [26].

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan dapat diketahui bahwa modifikasi jenis permukaan pemanas dapat meningkatkan kemampuan memindahkan kalor pada peristiwa pendidihan. Sementara itu penggunaan nano fluida pada satu sisi terbukti mampu meningkatkan kemampuan memindahkan kalor pada peristiwa pendidihan. Dua hal ini menjadi latar belakang untuk melakukan penelitian pendidihan nano fluida pada pemanas dengan permukaan media berpori.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah :

1. Melakukan pengujian didih kolam nano fluida pada permukaan pemanas yang terbuat dari media berpori.
2. Mengetahui pengaruh konsentrasi nano fluida terhadap penggunaan media berpori pada permukaan pemanas.
3. Mengetahui peningkatan atau penurunan kemampuan memindahkan kalor pendidihan ketika menggunakan nano fluida.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah :

1. Nano fluida yang digunakan pada penelitian ini adalah $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ pada konsentrasi volume 1%, 3% dan 5%.
2. Empat jenis media berpori digunakan sebagai variasi permukaan pemanas yaitu : *sintered copper* 300 mikron, *sintered copper* 400 mikron, *screen mesh stainless steel 40 mesh*, *screen mesh* tembaga 40 *mesh*. Diameter untuk masing-masing media berpori adalah 12 mm dan tinggi 13 cm.
3. Pengujian didih kolam dilakukan pada tekanan 1 atm.

1.5 Metodologi Penelitian

1. Studi Literatur.

Studi literatur merupakan proses pembelajaran bahan-bahan yang berkaitan dengan materi bahasan yang berasal dari buku-buku, jurnal dan situs-situs internet.

2. Pembuatan Media Berpori Melalui Proses *Sintering*.

Proses *sintering* dilakukan dengan cara menahan bubuk tembaga pada suhu $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 15 menit dan didinginkan pada suhu ruangan.

3. Pembuatan Nano Fluida.

Nano fluida dibuat dengan menggunakan *ultrasonic processor*. Proses sonifikasi berlangsung selama 1 jam.

4. Pengujian Didih Kolam Nano Fluida Pada Media Berpori.

Proses pengujian didih kolam dilakukan dengan cara mengukur suhu fluida dan pemanas. Dua jenis pemanas digunakan pada pengujian, pemanas pertama berhungsi sebagai *auxiliary heater* yang memanaskan fluida pada awal proses. *Main heater* adalah heater DC 300 W dengan diameter 6 mm dan tinggi 13 cm.

5. Analisa Hasil Pengujian.

Analisa dilakukan setelah data disajikan kedalam beberapa grafik, yaitu grafik perbandingan fluks kalor terhadap perbedaan suhu dinding pemanas dan suhu fluida, grafik koefisien perpindahan kalor pendidihan terhadap fluks kalor.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan thesis ini dilakukan menurut urutan bab-bab sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisi latar belakang yang melandasi penulisan thesis, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori-teori yang mendasari penelitian ini, yaitu nano fluida, dasar-dasar fenomena pendidihan.

BAB III PENGUJIAN DIDIH KOLAM

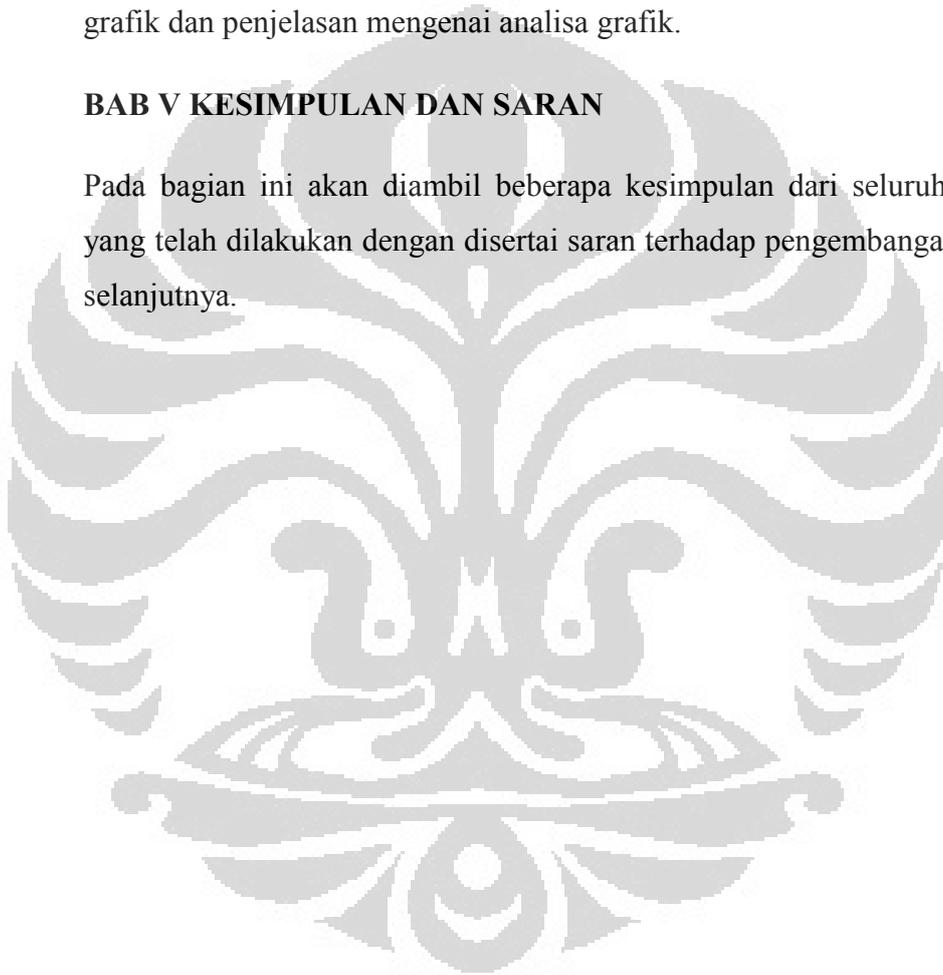
Bab ini menerangkan tentang bagaimana instalasi pengujian dilakukan, komponen yang digunakan dalam pengujian, prosedur dan metode pengujian.

BAB IV HASIL DAN ANALISA

Bab ini memuat data-data hasil pengujian yang diolah menjadi data berupa grafik dan penjelasan mengenai analisa grafik.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bagian ini akan diambil beberapa kesimpulan dari seluruh analisa yang telah dilakukan dengan disertai saran terhadap pengembangan desain selanjutnya.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fenomena Pendidihan

Perpindahan kalor pendidihan (*boiling heat transfer*) dapat diartikan sebagai jenis perpindahan kalor yang ditandai dengan terjadinya perubahan fase dari cair menjadi uap. Terdapat dua jenis pendidihan :

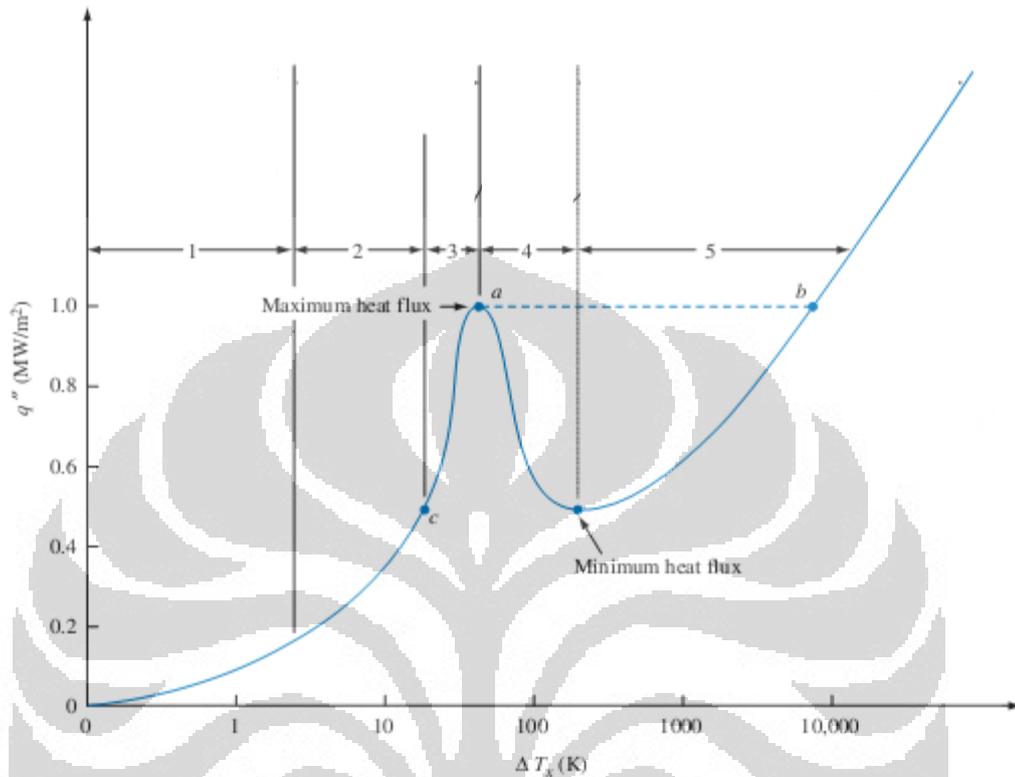
1. Didih kolam : merupakan proses pendidihan ketika elemen pemanas tenggelam pada fluida yang pada awalnya tidak bergerak.
2. Didih alir : merupakan proses pendidihan dari aliran fluida dimana permukaan pemanas dinding tempat fluida mengalir.

Boiling heat transfer (BHT) juga dapat dikelompokkan sebagai *subcooled* atau *saturated boiling*. Pada *subcooled boiling* hampir semua fluida berada dibawah suhu saturasi dan gelembung yang terbentuk pada permukaan *heater* bisa saja mengalami kondensasi pada fluida disekitarnya. Sementara itu *saturated boiling* terjadi ketika suhu fluida mencapai atau melewati tempetarur saturasi. Gelembung-gelembung yang terbentuk pada permukaan pemanas bergerak melewati fluida dikarenakan adanya gaya apung hingga akhirnya terjadi penguapan pada permukaan bebas fluida. [27]

2.1.1 Didih Kolam

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan pengertian dari pendidihan dan jenis-jenisnya. Pada bagian ini akan dijelaskan lebih dalam mengenai fenomena didih kolam. Didih kolam sendiri terbagi atas beberapa daerah (*pool boiling regimes*) yang dibedakan berdasarkan nilai fluks kalor dan perbedaan suhu antara dinding pemanas dan fluida. Nukiyama menjadi peneliti pertama yang berhasil melakukan identifikasi terhadap daerah-daerah yang terdapat pada didih kolam. Untuk memudahkan penjelasan dari fenomena yang terjadi digunakan kurva didih. Gambar 2.1 merupakan bentuk umum dari kurva didih kolam dengan menggunakan fluida air pada tekanan atmosfer dengan menggunakan pemanas tipe

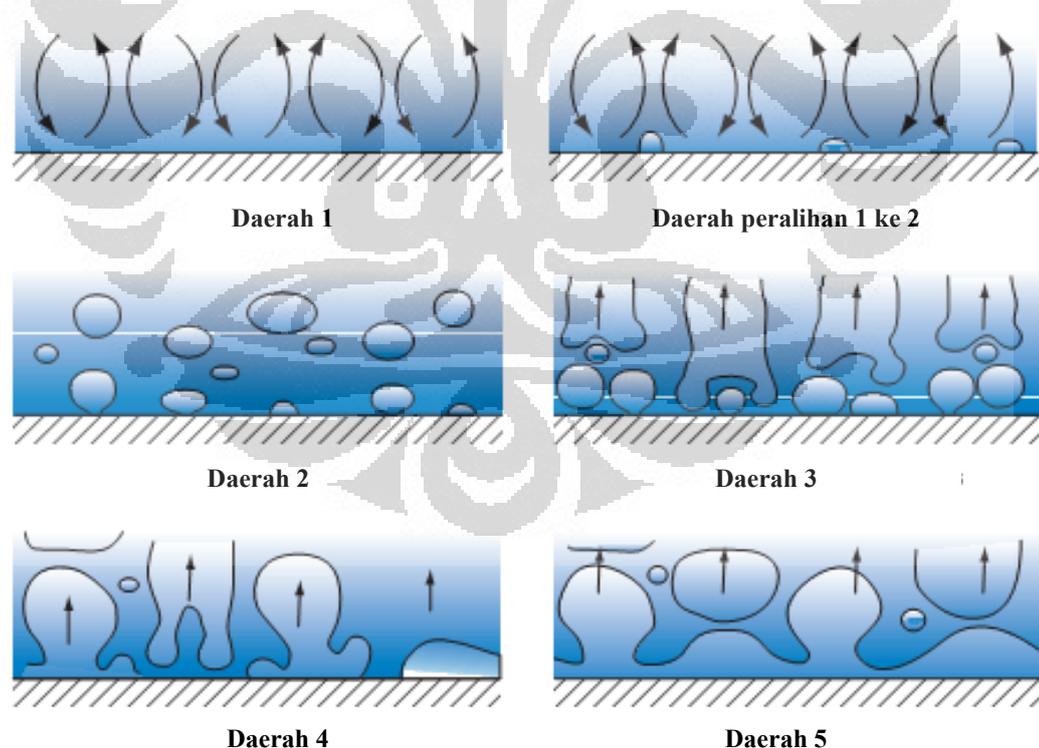
kabel. Pada grafik ini ditampilkan data korelasi antara fluks kalor dan perbedaan antara suhu dinding pemanas dan suhu saturasi fluida.



Gambar 2.1 Kurva pendidhan yang menunjukkan hubungan antara fluks kalor dan ΔT antara dinding pemanas dan suhu saturasi fluida [7]

Berdasarkan gambar 2.1 daerah 1 merupakan daerah dimana fluida dipanaskan melalui mekanisme konveksi alami, gelembung belum terbentuk pada daerah ini, gelembung baru terbentuk pada permukaan pemanas ketika fluida dipanaskan di atas suhu saturasi fluida ($2^{\circ}\text{C} - 6^{\circ}\text{C}$ untuk air), pada akhir daerah 1 sering disebut sebagai *onset of nucleate boiling*. Pada daerah 2 dan 3, fluks kalor meningkat dengan cepat seiring dengan meningkatnya suhu permukaan pemanas. Proses yang terjadi pada daerah ini disebut sebagai didih nukleat (*nucleate boiling*). Gelembung mulai terbentuk pada beberapa bagian permukaan pemanas ketika memasuki daerah 2. Jumlah gelembung terus meningkat diikuti dengan meningkatnya jumlah tempat terbentuknya gelembung (*nucleation site*) hingga mencapai daerah 3. Gelembung yang terbentuk pada daerah 2 akan langsung mengalami kondensasi pada fluida disekitarnya sesaat setelah meninggalkan

permukaan pemanas. Suhu permukaan pemanas akan terus meningkat pada daerah 3 mengakibatkan meningkatnya jumlah gelembung dan *nucleation site*. Gelembung akan bergerak naik ke permukaan bebas fluida dimana akan terjadi pelepasan uap yang terkandung didalam gelembung. Ketika perbedaan antara suhu permukaan pemanas dan suhu saturasi fluida (ΔT_s) terus meningkat laju evaporasi pada permukaan pemanas mencapai suatu nilai dimana permukaan heater terselubungi oleh gelembung-gelembung yang menyulitkan fluida disekitar untuk mendekati dan membasahi permukaan pemanas. Hal ini berakibat pada rendahnya laju peningkatan fluks kalor diikuti dengan terus meningkatnya nilai ΔT_s dan menyentuh bagian akhir pada daerah 3 yang sering disebut sebagai titik fluks kalor maksimum atau kritis (*critical heat flux*). Untuk air pada tekanan atmosfer nilai fluks kalor kritis adalah 1 MW/m^2 . Daerah didih nukleat merupakan daerah pendidihan yang paling banyak diaplikasikan karena laju perpindahan kalor yang tinggi dapat dicapai dengan nilai ΔT_s yang relative rendah ($\Delta T_s = 30 \text{ }^\circ\text{C}$).



Gambar 2.2 Proses terbentuknya gelembung berdasarkan masing-masing daerah didih kolam [7]

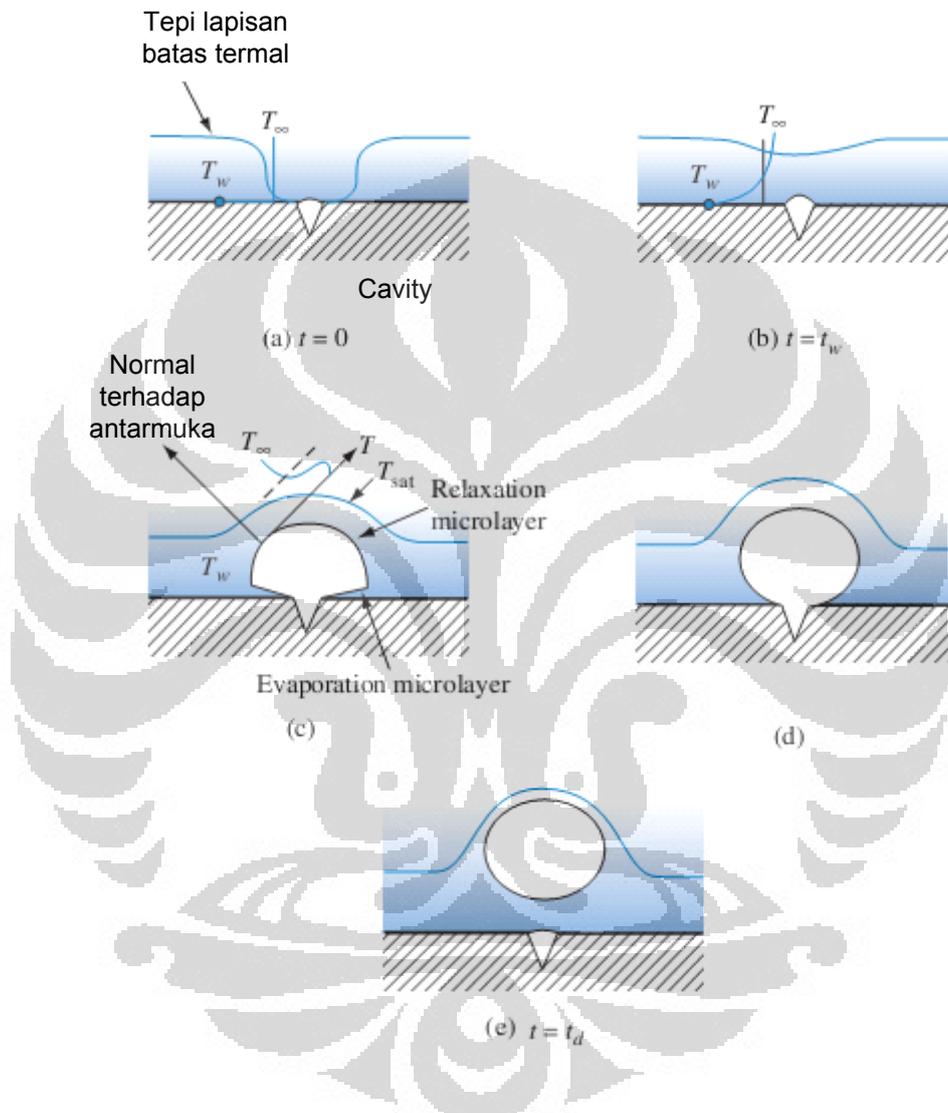
Ketika suhu permukaan pemanas dan ΔT_s terus meningkat melewati daerah 3, nilai fluks kalor mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan permukaan pemanas dilapisi oleh lapisan uap yang menjadi isolator dikarenakan nilai konduktivitas termal uap yang lebih kecil dibandingkan dengan fluida disekitarnya. Daerah 4 ini sering disebut sebagai daerah *transition boiling* atau *unstable film boiling regime*. Pada aplikasi *boiling heat transfer* daerah didih transisi ini dihindari. Pada akhir daerah 4 nilai fluks kalor minimum. Memasuki daerah 5 seluruh permukaan pemanas sudah tertupi oleh lapisan uap, titik awal daerah 5 ini sering disebut sebagai *Leidenfrost point*. Keberadaan lapisan uap antara permukaan pemanas dan fluida mengakibatkan rendahnya laju perpindahan kalor pada daerah *film boiling*. Laju perpindahan kalor meningkat diikuti dengan meningkatnya ΔT_s yang diakibatkan terjadinya perpindahan kalor radiasi dari permukaan pemanas ke fluida melewati lapisan uap yang melapisi pemanas. Proses terbentuknya gelembung dari daerah 1 hingga 5 dapat dilihat pada gambar 2.2 [28].

2.1.2 Mekanisme Pertumbuhan Gelembung (*Bubble Growth Mechanism*)

Ketika fluida berada pada suhu saturasi T_{sat} bersentuhan dengan suatu permukaan yang dipanaskan dengan kondisi $T_w > T_{sat}$, gelembung-gelembung akan terbentuk pada lapisan batas termal (*thermal boundary layer*). Proses pertumbuhan gelembung merupakan peristiwa yang rumit, namun terdapat dua kondisi dasar yang menjadi pembatas : pertumbuhan yang dikontrol oleh inersia (*inertia-controlled growth*) dan pertumbuhan yang dikontrol oleh perpindahan kalor (*heat transfer-controlled growth*). Pada *inertia-controlled growth*, perpindahan kalor berlangsung sangat cepat dan pertumbuhan gelembung dibatasi oleh seberapa cepat gelembung dapat menekan fluida disekitarnya. Kondisi ini terjadi ketika kondisi awal terbentuknya gelembung, namun pada tahap-tahap berikutnya ketika ukuran gelembung bertambah besar, laju perpindahan kalor menjadi faktor pembatas.

Setelah gelembung meninggalkan permukaan pemanas, liquid pada suhu $< T_{sat}$ (*bulk fluid suhu*) yang berada di sekitar pemanas bergerak menuju permukaan panas. Dalam selang waktu tertentu kalor dari pemanas bergerak ke fluida hingga

mencapai kondisi *superheat*, namun pertumbuhan gelembung belum terjadi. Selang waktu ini t_w disebut sebagai waktu tunggu (*waiting period*). Proses pertumbuhan gelembung pada permukaan horizontal dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tahapan-tahapan pada pertumbuhan gelembung pada permukaan superheat dengan fluida pada suhu saturasi [7]

Saat proses pertumbuhan gelembung dimulai, energi termal yang dibutuhkan untuk menguapkan fluida cair pada antarmuka cari-uap muncul, setidaknya sebagian, dari fluida cair yang berdekatan dengan gelembung. Karena fluida cair dengan cepat bersentuhan dengan antarmuka akan mengalami kondisi *superheat* pada tahap-tahap awal dari pertumbuhan gelembung, perpindahan kalor

ke antarmuka bukanlah faktor pembatas. Namun dengan terbentuknya calon gelembung (*embryonic bubble*) pada tempat terbentuknya gelembung (*nucleation site cavity*), ekspansi yang sangat cepat terjadi diakibatkan oleh peningkatan ukuran gelembung secara tiba-tiba. Pertumbuhan gelembung yang sangat cepat pada awal diatasi oleh inersia dari fluida cair. Untuk tahap awal proses pertumbuhan gelembung yang dikontrol inersia, gelembung berkembang dalam bentuk yang hampir menyerupai bola seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.3 (c). Pada tahapan ini terbentuk lapisan tipis mikro dari fluida cair diantara bagian bawah gelembung dan permukaan pemanas. Lapisan tipis ini sering disebut sebagai *evaporation microlayer* yang memiliki ketebalan bervariasi dari mendekati nol pada daerah sekitar *nucleation site cavity* hingga nilai tertentu pada bagian ujung dari gelembung. Kalor dipindahkan dari permukaan pemanas melalui lapisan tipis ke antarmuka dan menguapkan fluida pada permukaan secara langsung. Lapisan tipis ini bias menguap secara keseluruhan di dekat *cavity* dimana nukleasi dimulai dan meningkatkan temperatur permukaan secara signifikan. Ketika peristiwa ini terjadi, permukaan pemanas akan kering dan kembali dibasahi secara berkala dan suhu permukaan akan mengalami fluktuasi dikarenakan pengulangan proses pertumbuhan dan pelepasan gelembung.

Daerah liquid yang berdekatan dengan antarmuka yang terkadang sering disebut sebagai *relaxation microlayer* secara perlahan akan menipis dikarenakan pertumbuhan gelembung. Profil suhu pada daerah pada tahapan menengah dari proses pertumbuhan gelembung ini dapat dilihat pada gambar 2.3 (c). Antarmuka cair-uap berada pada suhu saturasi berhubungan dengan tekanan lingkungan pada liquid. Suhu liquid meningkat dengan meningkatnya jarak dari antarmuka, mencapai puncak, dan kemudian menurun hingga mencapai suhu lingkungan. Pertumbuhan gelembung berlanjut, perpindahan kalor ke antarmuka bias menjadi faktor pembatas, dan pertumbuhan gelembung menjadi *heat transfer controlled bubble growth*.

Ketika proses pertumbuhan gelembung dikendalikan oleh perpindahan kalor, tekanan dan gaya inersia fluida menjadi relatif kecil dan tegangan permukaan mengakibatkan gelembung berbentuk bola seperti yang ditunjukkan

oleh gambar 2.3 (d). Selama proses pertumbuhan gelembung, tegangan antar permukaan terjadi pada sepanjang garis kontak (dimana antarmuka cair-uap memenuhi permukaan pemanas). Gaya apung, gesek, angkat dan inersia yang berhubungan dengan gerakan fluida disekitar cenderung untuk menarik gelembung menjauh dari permukaan pemanas. Gaya-gaya yang bekerja ini semakin kuat dikarenakan gelembung yang semakin besar [gambar 2.3 (d)] hingga akhirnya lepas dari permukaan pemanas seperti pada gambar 2.3 (e) yang terjadi saat $t=t_d$.

2.1.3 Perpindahan Kalor Pada Didih Kalam

Mekanisme perpindahan kalor yang paling dominan adalah konveksi paksa satu fasa dimana turbulensi percampuran partikel fluida panas dan dingin terjadi. Pada konveksi paksa, data hasil eksperimen tanpa terjadi pendidihan dapat ditulis sebagai :

$$Nu = \Phi(Re, Pr) \quad (2.1)$$

$$Nu = C_{sf} Re^n Pr^m$$

Dimana :

$$Re = \frac{\rho_l v D}{\mu_l} \quad (2.2)$$

Dimana bilangan Reynolds merupakan besarnya turbulensi dan gabungan gerakan yang berhubungan dengan aliran. Peningkatan laju perpindahan kalor dicapai dengan didih nukleat merupakan hasil agitasi yang sangat kuat dari fluida berasal dari gerakan gelembung-gelembung uap. Untuk menghubungkan data hasil eksperimen pada fenomena pendidihan, persamaan bilangan Reynold pada persamaan (2.2) dimodifikasi sehingga berhubungan dengan turbulensi dan gabungan gerakan pada proses pendidihan. Jenis khusus dari bilangan Reynolds, Re_b yang menunjukkan besarnya agitasi dari liquid pada perpindahan kalor didih seperti yang ditunjukkan pada persamaan (2.3)

$$Re_b = \frac{q D_b}{h_{fg} \mu_l} \quad (2.3)$$

$$Nu_b = \frac{h_b D_b}{k_l} \quad (2.4)$$

Dimana

$$D_b = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \quad (2.4)$$

$$h_b = \frac{q}{\Delta T} \quad (2.5)$$

$$q = \frac{VI}{A} \quad (2.6)$$

Re_b : Bilangan Reynolds gelembung

D_b : Diameter rata-rata gelembung (m)

C_{sf} : Koefisien kombinasi liquid-permukaan pemanas

σ : Tegangan permukaan (N/m)

g : Percepatan gravitasi (m^2/s)

ρ_l : Massa jenis fase liquid (Kg/m^3)

ρ_g : Massa jenis fase uap (Kg/m^3)

q : Fluks kalor (W/m^2)

h_{fg} : Kalor laten penguapan (J/Kg)

μ_l : Viskositas liquid ($N.s/m^2$)

h_b : Koefisien perpindahan kalor (W/m^2K)

V : Tegangan listrik (Volt)

I : Arus Listrik (ampere)

A : Luas permukaan pemanas (m^2)

2.2 Nano Fluida

2.2.1 Perkembangan Nano Fluida

Dalam perkembangan fluida perpindahan kalor yang efisien, konduktivitas termal dari fluida memiliki peran yang sangat penting. Disamping banyak penelitian dan pengembangan yang sudah dilakukan sebelumnya pada peningkatan kemampuan perpindahan kalor, peningkatan pada kemampuan

pendinginan sangat terbatas dikarenakan fluida-fluida yang digunakan dalam proses perpindahan kalor saat ini seperti air, pelumas, dan ethylene glycol yang memiliki nilai konduktivitas termal yang buruk dibandingkan dengan material padat. Pada suhu ruangan, logam dalam fase padat memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan fluida. Sebagai contoh, konduktivitas termal dari tembaga pada suhu ruangan 700 kali lebih besar dibandingkan air dan 3000 kali lebih besar dibandingkan pelumas. Konduktivitas termal logam pada fase likuid lebih besar dibandingkan dengan likuid yang tidak mengandung logam. Oleh karena itu, konduktivitas fluida yang mengandung partikel logam padat diharapkan mampu meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan.

Tabel 2.1 Konduktivitas termal beberapa material [29]

	Material	Konduktivitas Termal [W/m.K]
Material Padat Logam	Perak	429
	Tembaga	401
	Aluminium	237
Material Padat Non-Logam	Berlian	3300
	<i>Carbon nanotubes</i>	3000
	silikon	148
	Alumina (Al ₂ O ₃)	40
Material Likud - Logam	Sodium (Suhu 644 K)	72.3
Material Likuid-Non Logam	Air	0.613
	Ethylene Glycol	0.253
	Pelumas	0.145

Nanoteknologi moderen telah memungkinkan produksi nanopartikel baik logam ataupun non logam dengan ukuran partikel dibawah 100 nm. Sifat-sifat mekanikal, optikal, elektrikal, dan termal dari nano partikel jauh lebih baik dibandingkan material dasar dalam bentuk butiran. Kesempatan untuk menerapkan nanoteknologi pada bidang rekayasa termal telah memunculkan ide dari Choi untuk mengembangkan nano fluida dengan tujuan untuk mematahkan hambatan teknis yang sudah berabad-abad dengan cara menelusuri sifat-sifat unik dari nanopartikel. Nano fluida merupakan fluida yang masuk kedalam kategori

fluida baru yang tersusun atas fluida dasar dan partikel dalam ukuran nano (1-100 nm) yang terdispersi pada fluida dasarnya.

2.2.2 Pembuatan Nano Fluida

Ikatan yang stabil antara nano partikel dan fluida dasar dapat dihasilkan melalui dua cara : metode dua langkah dan metode satu langkah. Metode dua langkah merupakan metode yang diawali dengan pembuatan nano partikel terlebih dahulu sebelum proses dispersi dilakukan. Metode satu langkah merupakan metode yang secara simultan menggabungkan pembuatan nano partikel dan langsung didispersikan pada fluida dasar. Untuk metode dua langkah, proses dispersi yang bisa digunakan adalah *high shear* dan *ultrasound*.

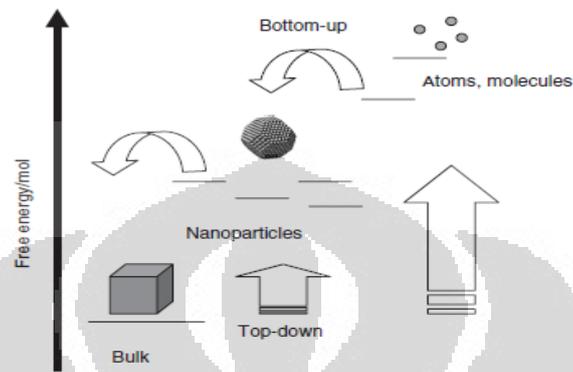
Metode pembuatan fluida nano dapat digolongkan ke dalam proses fisika dan proses kimia. Proses secara fisika termasuk didalamnya adalah proses kondensasi inert gas dikembangkan oleh Granqvist dan Buhrman (1976), metode ini termasuk deposisi uap kimia (CVD), presipitasi kimia, mikro emulsi, semprot termal, dan pirolisis semprot. Sulick pada tahun 1996 mengembangkan sebuah metode sonikimia, metode ini telah dikembangkan untuk membuat suspensi nano partikel besi yang distabilkan oleh asam oleat. Metode yang banyak digunakan dalam pembuatan fluida nano adalah metode dua langkah dan metode satu langkah. Metode dua langkah (*two step-method*), pertama dilakukan proses pembentukan partikel nano melalui salah satu proses seperti diatas, kemudian langkah ke dua adalah dengan mendispersikan partikel nano ke dalam fluida dasar. Untuk metode satu langkah (*single step-method*) proses antara langkah pertama dan langkah kedua berlangsung secara bersamaan.

Dalam pembentukan fluida nano ada beberapa faktor yang perlu untuk diperhatikan, antara lain: stabilitas termal, pendispersian pada berbagai jenis media serta kompabilitas dan manipulasi secara kimia.

2.2.2.1 Stabilitas termal

Partikel nano merupakan suatu sistem partikel yang metastabil, karena itu partikel nano ini akan berubah dari keadaan stabil, sehingga partikel tersebut

memiliki energy bebas . Karena sifat dari partikel nano adalah metastabil maka untuk kembali kedalam ikatan molekulnya dan bersatu dalam bentuk bongkahan bisa dalam waktu yang cukup lama. Gambar 2.4 memperlihatkan sifat sistem metastabil dari partikel nano.



Gambar 2.4 Sistem metastabil dari partikel nano [29]

2.2.2.2 Pendispersian pada berbagai media

Partikel nano memiliki suatu inti sel yang nantinya menentukan sifat dari partikel tersebut. Sifat inti ini nantinya dapat mempengaruhi kelarutan dalam pendispersian pada fluida dasar. Dalam pendispersian partikel nano pada fluida dasarnya, kelarutan yang diinginkan bukanlah kelarutan yang nantinya dapat dipisahkan melalui proses fisika sederhana akan tetapi kelarutan yang diinginkan adalah kelarutan yang membentuk suatu fluida nano yang memiliki sifat metastabil dan membentuk suatu sifat termal yang lebih baik.

Nano partikel logam dapat membentuk ikatan terhadap bentuk oksidasi yang nantinya menyelimuti permukaan dari partikel nano tersebut, hal ini disebut dengan *monolayer* atau lapisan capping. Hal ini nantinya akan membentuk nano partikel yang memiliki *boundary layer* atau lapisan yang melindungi partikel tersebut[29].

2.2.3 Penggunaan Nano Fluida Pada Aplikasi Perpindahan Kalor

Ide awal dari pengembangan nano fluida adalah untuk meningkatkan

konduktivitas termal dari beberapa fluida yang sering digunakan dalam proses perpindahan kalor seperti air, pelumas dan ethylene glycol, pengaruh nano partikel ternyata lebih mendalam dibandingkan hanya mempertimbangkan konduktivitas termal saja. Disaat kebanyakan penelitian saat ini masih difokuskan pada konduktivitas termal, mengabaikan perubahan sifat lainnya dari nano fluida terutama viskositas dan sifat-sifat permukaan. Efektivitas dari perpindahan kalor dapat diketahui dari nilai koefisien perpindahan kalor h yang merupakan fungsi dari beberapa sifat *thermo-physical* dari fluida yang digunakan, diantaranya konduktivitas termal k , kapasitas kalor c_p , viskositas μ , densitas ρ , dan jika terjadi perubahan fase maka tegangan permukaan σ juga memberikan pengaruh. Penambahan nano partikel pada fluida dasar bisa memberikan pengaruh sifat-sifat yang berdampak pada efektivitas perpindahan kalor.

Banyak penelitian melaporkan bahwa nano fluida memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan fluida dasar, pada umumnya terjadi peningkatan 10% konduktivitas termal untuk penambahan 1% nanofluida [30], namun belum ditemukan korelasi yang jelas akan hubungan antara konsentrasi partikel terhadap peningkatan nilai konduktivitas termal fluida. Pengaruh penggunaan nano partikel terhadap nilai kapasitas kalor nano fluida telah diteliti oleh Zhou & Ni pada 2008, penggunaan nano fluida $Al_2O_3-H_2O$ mengalami penurunan nilai kapasistas kalor dengan meningkatnya konsentrasi nano partikel [31]. Pengaruh penggunaan nano partikel pada tegangan permukaan atau secara umum *wettability* masih dilakukan pada tahap awal. Secara umum, dari hasil penelitian ditemukan bahwa penggunaan nano partikel bisa meningkatkan *wettability* dari fluida dasar dan bisa berpengaruh pada tingginya peningkatan nilai fluks kalor kritis, namun pendapat ini masih belum bisa menghasilkan kesimpulan akhir [22,25].

2.2.3.1 Penggunaan Nano Fluida Pada Perpindahan Kalor Pendidihan

Penggunaan nano fluida pada perpindahan kalor konveksi yang diikuti ataupun tidak diikuti oleh perubahan fase telah banyak diteliti. Namun seperti penelitian mengenai sifat-sifat nano fluida, hasil dari penelitian pada bidang ini

masih belum menghasilkan kesimpulan akhir. Sementara itu, kesepakatan yang bersifat kualitatif telah disetujui pada peristiwa perpindahan kalor konveksi menggunakan nano fluida, banyak hasil yang saling bertolak belakang ditemukan pada peristiwa didih kolom. Peningkatan kemampuan perpindahan kalor dibandingkan dengan menggunakan fluida dasar didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh Liu et.al pada 2007, Park & Jung pada 2007 dan Wen et.al pada 2006 [32,33,34]. Hasil yang bertolak belakang ditemukan oleh Das et.al pada 2003 dan Bang & Chang pada 2005 yang menemukan terjadinya penurunan kemampuan perpindahan kalor didih, dimana kurva didih nano fluida memiliki nilai *wall superheat* yang lebih tinggi dibandingkan dengan fluida dasar [20,21,35].

Tabel 2.2 Rangkuman penelitian didih kolom menggunakan nano fluida

Peneliti	Tahun	Jenis Pemanas	Nano Fluida	Hasil
You et.al [36]	2003	Pelat Tembaga	Al ₂ O ₃ - H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan Fluks kalor kritis hingga 200%, • Tidak ditemukan hubungan antara peningkatan fluks kalor kritis dengan peningkatan konduktivitas termal nano fluida
Das et.al [20]	2003	Pemanas Silinder <i>stainless steel</i>	Al ₂ O ₃ - H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan nilai <i>wall superheat</i> dengan meningkatnya konsentrasi nano partikel. • Pembentukan lapisan nano partikel pada permukaan pemanas
Vassallo et.al [37]	2004	Pemanas Kabel NiCr	SiO ₂ -H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan fluks kalor kritis sebesar 60%
Wen dan Ding [38]	2005	Pelat <i>stainless steel</i>	Al ₂ O ₃ - H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan fluks kalor kritis sebesar 40% dan ditemukan lapisan nano partikel pada permukaan pemanas
Bang dan Chang [21]	2005	Pelat <i>stainless steel</i>	Al ₂ O ₃ - H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan fluks kalor panas sebesar 50%, penurunan nilai koefisien perpindahan kalor dibandingkan fluida dasar. • Lapisan nano partikel pada permukaan pemanas

				meningkatkan <i>wettability</i> .
Milanova dan Kumar [39]	2005	Pemanas Kabel NiCr	SiO ₂ -H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Nilai fluks kalor kritis 3 kali lebih besar dibandingkan dengan fluida dasar
Kim et al. [40]	2006	Pelat <i>stainless steel</i>	Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ , SiO ₂ - H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan fluks kalor kritis pada permukaan pemanas disebabkan oleh lapisan nano partikel pada permukaan pemanas, lapisan berbentuk struktur berpori yang tidak seragam meningkatkan <i>wettability</i>
Kim et al. [41]	2006	Pemanas Kabel NiCr	TiO ₂ -H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan Fluks Kalor Kritis hingga 200%
Coursey dan Kim [25]	2008	Pelat Cu dan CuO & Pelat dilapisi kaca dan emas	Al ₂ O ₃ -H ₂ O & Al ₂ O ₃ -Ethanol	<ul style="list-style-type: none"> • Hubungan antara performa pendidihan dengan kombinasi fluida-permukaan pemanas. • Peningkatan fluks kalor kritis 37%
Milanova dan Kumar [42]	2008	Kabel NiCr	SiO ₂ -H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan fluks kalor kritis 50%, tidak ditemukan lapisan nano partikel pada permukaan pemanas
Gulobovic [43]	2009	Kabel NiCr	Al ₂ O ₃ -H ₂ O & Bi ₂ O ₃ -H ₂ O	<ul style="list-style-type: none"> • Peningkatan fluks kalor kritis 50% pada Al₂O₃ dan 33% pada Bi₂O₃. • Peningkatan <i>wettability</i> dikarenakan terbentuknya lapisan nano partikel pada permukaan pemanas

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Pembuatan Nano Fluida



Gambar 3.1 Pembuatan nano fluida dengan *magnetic stirrer* dan *ultrasonic processor*

Pada penelitian ini digunakan nano partikel Al_2O_3 dan fluida dasar yang digunakan adalah air murni (H_2O). *Properties* nano partikel Al_2O_3 dapat dilihat pada tabel 3.1. Ada dua tahapan dalam pembuatan nano fluida, tahap pertama adalah pengadukan campuran partikel nano dan fluida dasar menggunakan *magnetic stirrer* selama 15 menit, gambar 3.2 melihat proses pencampuran partikel nano dan fluida dasar.

Tabel 3.1 *Properties* nano partikel Al_2O_3

Properties Al_2O_3	
Konduktivitas Termal [W/m.K]	40
Densitas [kg/m ³]	260
Kalor Jenis [J/kg. K]	765
Diameter Rata-Rata Partikel [nm]	20

Tahap kedua dalam pembuatan nano fluida adalah sonifikasi dari campuran H₂O – Al₂O₃ dengan menggunakan *ultrasonic processor*. Campuran partikel nano dan fluida dasar didispersikan pada intensitas 60% selama 60 menit.

Tabel 3.2 Matriks pembuatan nano fluida

Fluida Dasar	Nano Partikel	Fraksi Volume [%]
		1
H ₂ O	Al ₂ O ₃	3
		5

Penggunaan dua tahap dalam pembuatan nano fluida ini bertujuan untuk mendapatkan larutan yang bersifat homogen. Table 3.1 menunjukkan variasi fraksi volume nano fluida dalam tiga konsentrasi yang berbeda, yaitu 1%, 3% dan 5 % dengan pada volume nano fluida 1200 ml. Persamaan 3.1 digunakan untuk menentukan fraksi volume dari nano fluida.

$$\% \text{ Fraksi Volume} = \frac{\frac{W_{\text{nano partikel}}}{\rho_{\text{nano partikel}}}}{\frac{W_{\text{nano partikel}}}{\rho_{\text{nano partikel}}} + \frac{W_{\text{fluida dasar}}}{\rho_{\text{fluida dasar}}}} \quad (3.1)$$

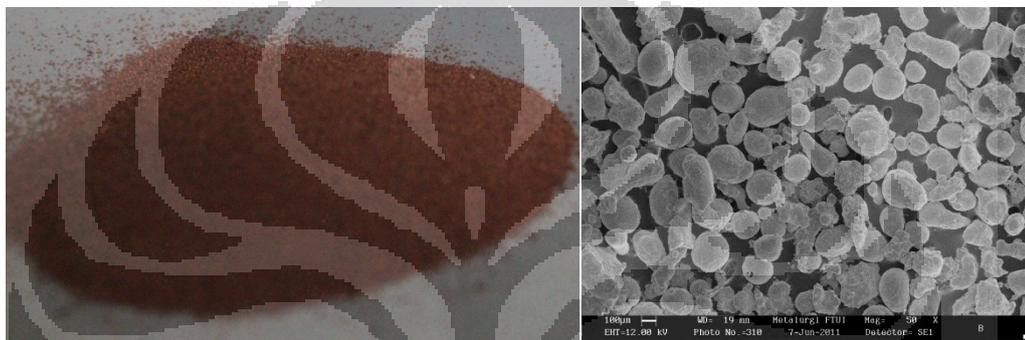
Setelah proses sonifikasi, didapatkan nilai konduktivitas termal nano fluida Al₂O₃ pada temperatur 25 °C untuk masing-masing konsentrasi seperti yang ditampilkan pada tabel 3.3. Penambahan

Tabel 3.3 Konduktivitas termal nano fluida dan fluida dasar pada 25 °C

Fluida	Konduktivitas Termal [W/m. 0C]	Rasio k_n/k_{bf}	Peningkatan Konduktivitas Termal [%]
H ₂ O	0.56	-	-
H ₂ O-Al ₂ O ₃ 1%	0.67	1.19	19.64
H ₂ O-Al ₂ O ₃ 3%	0.69	1.23	23.21
H ₂ O-Al ₂ O ₃ 5%	0.72	1.28	28.57

3.2 Proses *Sintering*

Sintering merupakan metode yang digunakan untuk membuat suatu objek yang berasal dari serbuk dengan menahan material pada suhu dibawah titik lebur dan selang waktu tertentu. Pada penelitian ini dilakukan proses *sintering* terhadap dua jenis serbuk tembaga dengan ukuran partikel yang berbeda 300 μm dan 400 μm yang diproduksi oleh MHC Industrial. Gambar 3.2 menunjukkan serbuk tembaga dengan ukuran 300 μm dan hasil pemindaian dengan *scanning electron microscope* (SEM).



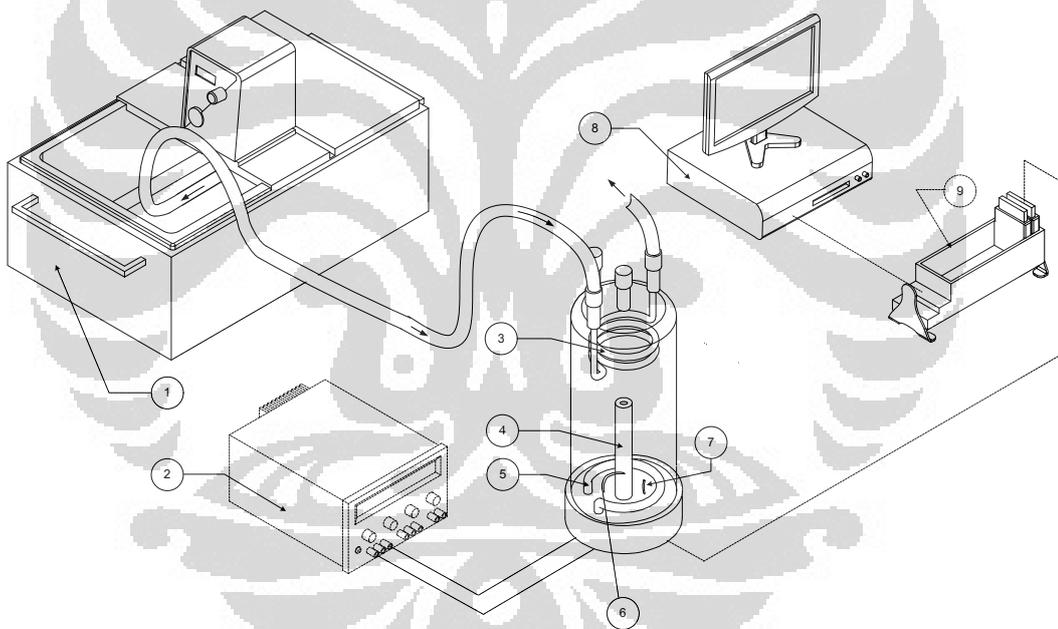
Gambar 3.2 Serbuk tembaga 300 μm

Proses *sintering* serbuk tembaga bertujuan untuk membentuk ikatan antara partikel sehingga menjadi suatu padatan yang porositas tetap terjaga. Cetakan yang digunakan pada proses *sintering* terbuat dari pelat tembaga dengan tebal 0.5 mm. Serbuk tembaga yang dimasukkan ke dalam cetakan akan diproses pada *furnace*. Suhu *furnace* yang digunakan dalam proses *sintering* adalah 920 $^{\circ}\text{C}$ dengan waktu tahan 15 menit. Setelah 15 menit, serbuk tembaga didinginkan pada udara lingkungan. Gambar 3.3 menunjukkan ketika proses *sintering* selesai dilakukan dan sampel dikeluarkan dari *furnace*. Proses *sintering* dilakukan pada laboratorium metalography Departemen Teknik Metalurgi dan Material Univeristas Indonesia.



Gambar 3.3 Proses *sintering* serbuk tembaga

3.3 Pengujian Didih Kolan

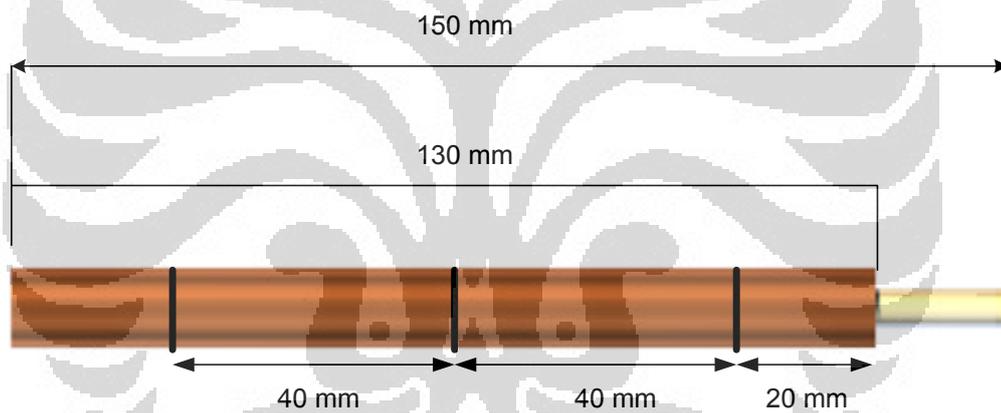


Gambar 3.4 Skema pengujian didih kolan

Keterangan :

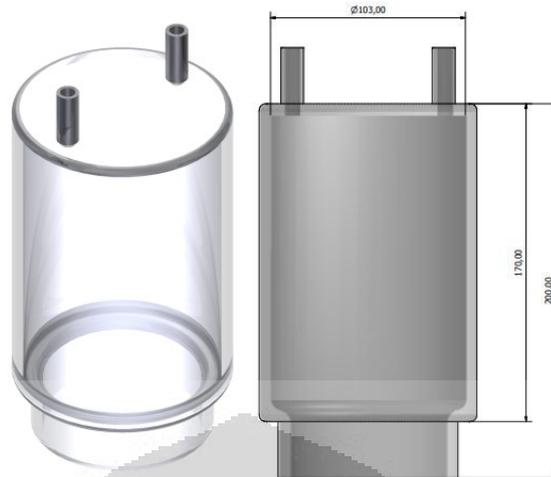
- | | | | |
|---|-------------------------------|---|----------------------------|
| 1 | Circulating Thermostatic Bath | 6 | Termokopel Dinding Pemanas |
| 2 | DC Power Supply | 7 | Termokopel Fluida |
| 3 | kondensier | 8 | Komputer |
| 4 | Pemanas Utama | 9 | Data Akuisisi |
| 5 | Pemanas Pembantu | | |

Gambar 3.4 menunjukkan skema pengujian didih kolam, pada pengujian ini digunakan pemanas listrik komersil dengan daya maksimum 300 W dan tegangan maksimum 30 V, pemanas ini terhubung dengan *adjustable DC power supply*. Dimensi dari pemanas listik adalah : panjang 150 mm dan diameter 6 mm yang terbuat dari *stainless stell*. Sebelum pemanas utama digunakan, proses pendidihan dibantu dengan pemanas tambahan. Pengukuran suhu dilakukan dengan menggunakan termokopel tipe k pada lima titik, tiga titik pada permukaan pemanas dan dua titik pada fluida. Gambar 3.5 menunjukkan posisi termokopel pada permukaan pemanas. Termokopel dihubungkan dengan data akuisisi NI 9201 yang mengirimkan sinyal analog yang akan diubah menjadi sinyal digital pada komputer melalui perangkat lunak LabView jumlah sampel data yang diambil adalah 1 data per detik.



Gambar 3.5 Posisi termokopel pada permukaan pemanas

Bagian kondenser terhubung dengan *circulating thermostatic bath* HUBER K12 yang beroperasi pada suhu 25 °C. Tabung yang digunakan pada pengujian pendidihan ini terbuat dari kaca *pyrex* dengan tebal 6 mm, tinggi 200 mm, diameter terluar 115 mm dan diameter bagian dalam tabung 103 mm gambar 3.6 menunjukkan dimensi dari tabung pendidihan. bagian terbawah terbuat dari aluminium yang juga berfungsi sebagai tempat dudukan pemanas. Selama proses pengujian didih kolam tabung ditutupi dengan material isolator *thermaflex* untuk mengurangi panas yang terbuang ke lingkungan.



Gambar 3.6 Tabung pendidihan

3.4 Variabel Pengujian Didih Kolan

Secara keseluruhan terdapat 16 variasi penujian yang dilakukan pada penelitian didih kolan yang terbagi atas 4 jenis permukaan pemanas dan 4 jenis fluida yang diujikan, gambar 3.7 merupakan gambar masing-masing jenis media berpori yang digunakan pada pengujian ini. Tabel 3.2 menunjukkan detail pengujian didih kolan pada penelitian ini.

Tabel 3.4 Matriks pengujian didih kolan

Media Berpori	Fluida Kerja
<i>Sintered Copper</i> 300 μm	H ₂ O
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 1%
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 3%
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 5%
<i>Sintered Copper</i> 400 μm	H ₂ O
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 1%
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 3%
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 5%
Screen Mesh Tembaga	H ₂ O
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 1%
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 3%
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 5%
Screen Mesh <i>Stainless Steel</i>	H ₂ O
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 1%
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 3%
	H ₂ O+ Al ₂ O ₃ 5%



Gambar 3.7 Media berpori *screen mesh* tembaga, *stainless steel* dan *sintered copper* tembaga

Secara garis besar media berpori yang digunakan dalam pengujian ini dapat dikelompokkan kedalam dua kelompok besar yaitu : media berpori yang berasal dari serbuk tembaga (*copper powder*) dan media berpori yang berasal dari *screen mesh* (jaring) seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Media berpori yang digunakan pada pengujian didih kolam

Pada awal pengujian pemanas tambahan digunakan untuk memanaskan fluida di dalam tabung. Setelah fluida mencapai suhu $\pm 99^{\circ}\text{C}$, pemanas tambahan tetap digunakan selama 30 menit untuk memastikan suhu fluida lebih merata. Setelah 30 menit, pemanas utama digunakan menggantikan pemanas tambahan. Untuk setiap pengujian didih kolam digunakan Sembilan variasi fluks kalor. Tabel 3.3 menunjukkan variasi yang diterapkan pada setiap pengujian didih kolam. Nilai suhu dinding yang ditampilkan merupakan nilai suhu rata-rata dari tiga titik yang diukur pada dinding pemanas. Selanjutnya data yang didapatkan seperti pada tabel 3.3 akan diolah untuk mendapatkan nilai fluks kalor.

Tabel 3.5 Tabel pengujian didih kolam

Tegangan [Volt]	Arus [amp]	T_{dinding} [°C]	T_{fluida} [°C]
6			
9			
12			
15			
18			
20			
22			
24			
26			

3.5 Pengujian Kekasaran Permukaan

Pengujian kekasaran permukaan dilakukan sebelum dan sesudah pengujian didih kolam dilakukan. Pengujian kekasaran permukaan bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan nano fluida terhadap kekasaran permukaan media berpori yang digunakan selama proses pendidihan. Berdasarkan beberapa referensi, penggunaan nano fluida dapat mengubah nilai kekasaran permukaan pemanas dikarenakan terbentuknya lapisan nano partikel pada permukaan pemanas [20,21,44,45]. Gambar 3.8 menunjukkan proses pengukuran kekasaran permukaan media berpori yang terbuat dari serbuk tembaga dengan ukuran partikel 300 μ m. Proses pengujian kekasaran permukaan dilakukan di Laboratorium Metrologi Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.

**Gambar 3.9** Proses Pengukuran kekasaran permukaan media berpori

BAB 4

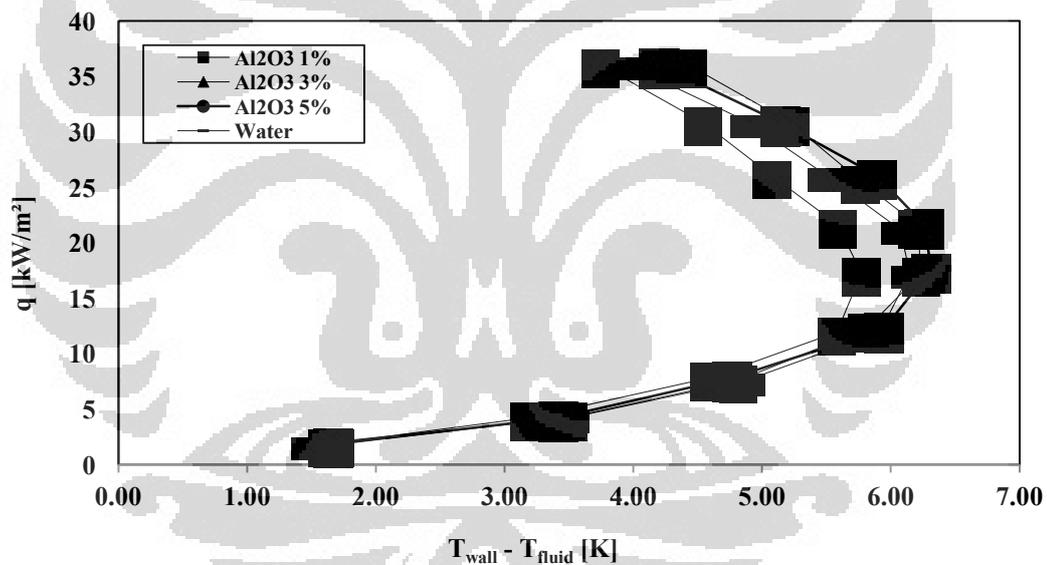
PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh Jenis Media Berpori Pada Didih Kolan.

Pengujian didih kolan pada empat jenis fluida dan empat jenis media berpori telah dilakukan. Pada bagian ini akan ditampilkan perbandingan fluida terhadap media berpori yang digunakan.

4.1.1 Pengujian Didih Kolan Pada Media Berpori Hasil *Sintering*

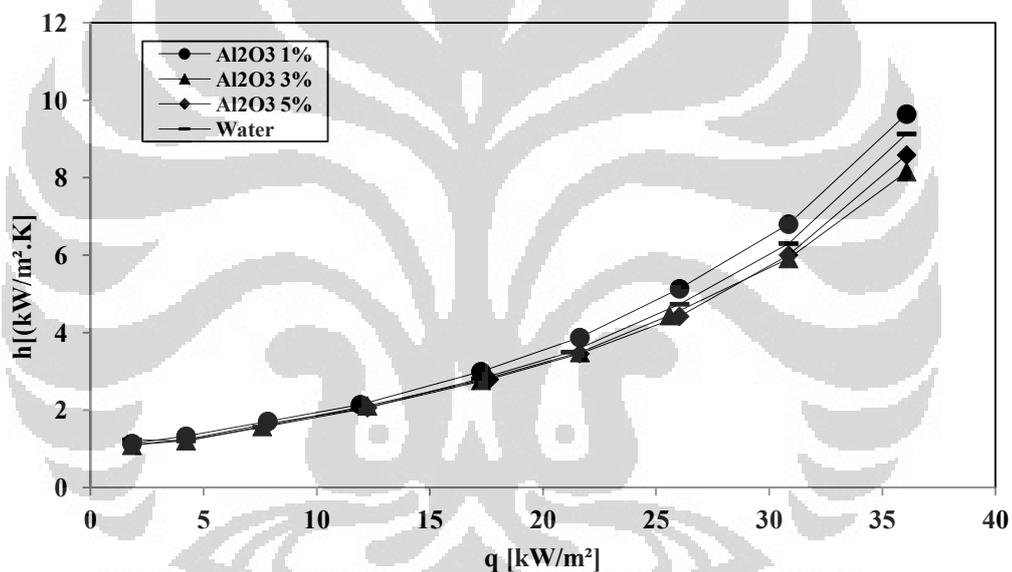
4.1.1.1 Pengujian Didih Kolan Dengan Media Berpori *Sintered Powder Copper* 300 μm .



Gambar 4.1 Kurva pendidihan dengan permukaan pemanas media berpori *sintered copper* 300 μm

Gambar 4.1 menunjukkan hubungan antara perbedaan suhu (ΔT) dinding pemanas dan fluida dengan fluks kalor pada variasi fluida kerja yang digunakan. Pada saat fluks kalor rendah ($< 10 \text{ kW/m}^2$) perbedaan performa antara empat jenis fluida kerja tidak terlalu jauh. Perbedaan mulai terlihat ketika fluks kalor 15 kW/m^2 dimana nano fluida 1% mampu memberikan nilai ΔT yang lebih rendah dibandingkan fluida lainnya. Nano fluida dengan konsentrasi 3% dan 5%

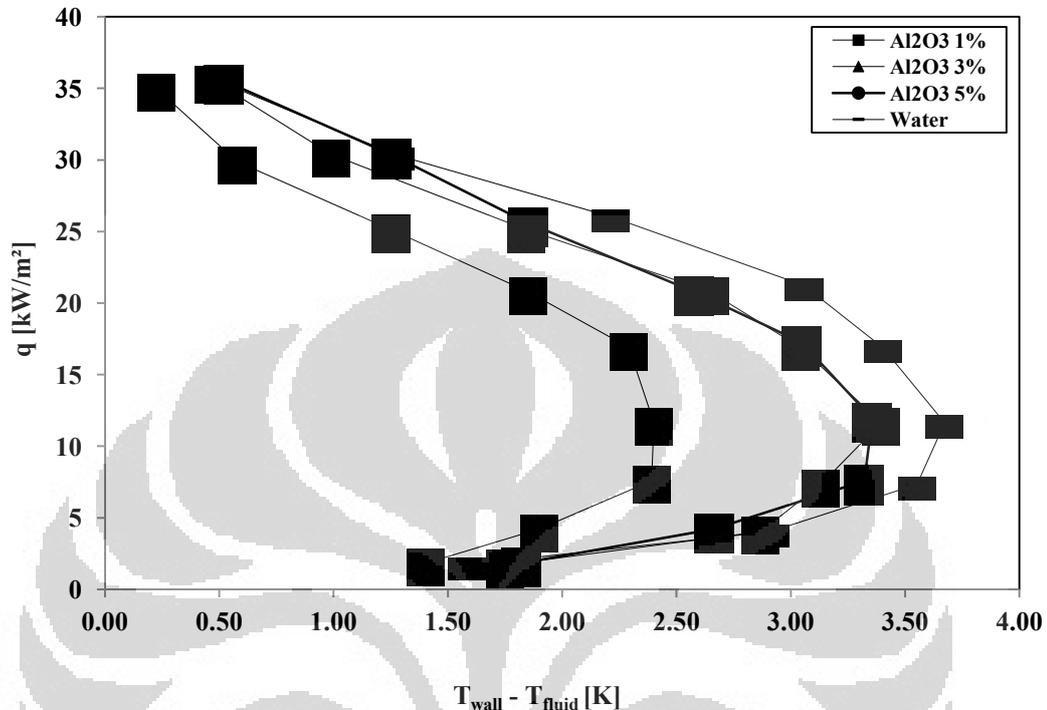
menunjukkan kemampuan memindahkan kalor yang tidak lebih baik dibandingkan fluida dasar. Pada saat fluks kalor tertinggi (35 kW/m^2) nano fluida dengan konsentrasi 1% secara konsisten menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan fluida lainnya dengan perbedaan suhu dinding pemanas-fluida sebesar $3.74 \text{ }^\circ\text{C}$. Nano fluida dengan konsentrasi 3% dan 5% menunjukkan performa yang lebih buruk dibandingkan fluida dasar. Pada kondisi fluks panas tertinggi, fluida dasar menunjukkan perbedaan suhu sebesar $3.95 \text{ }^\circ\text{C}$, pada saat nano fluida 5% digunakan nilai ΔT adalah $4.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Nilai ΔT tertinggi dicapai ketika menggunakan nano fluida 5%, yaitu sebesar $4.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Fenomena yang sama juga ditemukan oleh [24] ketika melakukan pengujian didih kolam menggunakan nano fluida Al_2O_3 dengan variasi jenis kekasaran permukaan pemanas.



Gambar 4.2 Kurva perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor pada *sintered copper* $300 \mu\text{m}$

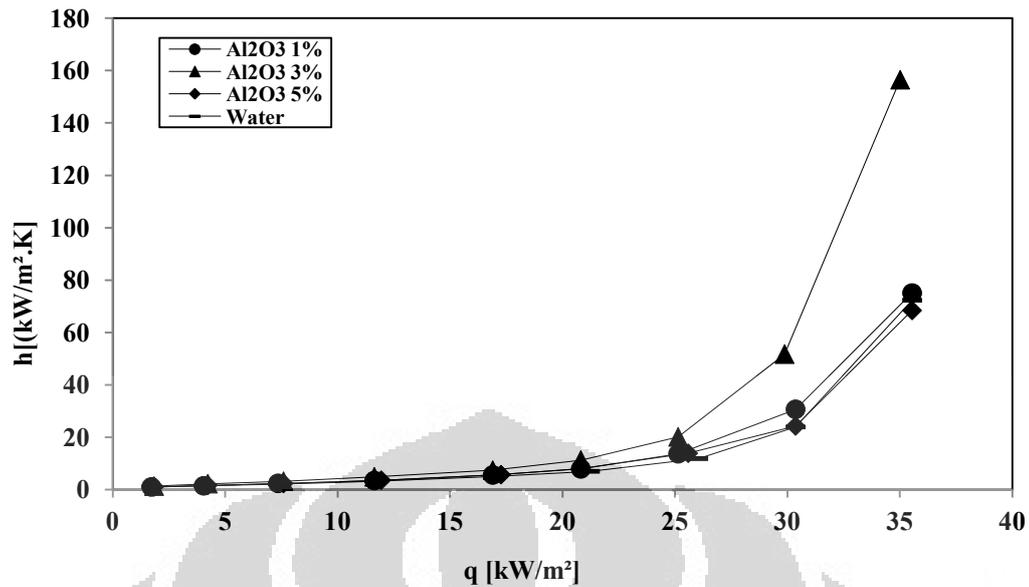
Perbandingan nilai koefisien perpindahan kalor untuk setiap jenis fluida dapat dilihat pada kurva yang ditampilkan pada gambar 4.2. Penambahan 1% Al_2O_3 terbukti meningkatkan nilai koefisien perpindahan kalor dari pendidihan pada media berpori *sintered copper* $300 \mu\text{m}$. Peningkatan konsentrasi nano partikel yang digunakan pada fluida ternyata tidak berbanding lurus dengan peningkatan perpindahan kalor pada didih kolam.

4.1.1.2 Pengujian Didih Kolam Dengan Media Berpori *Sintered Powder Copper* 400 μm .



Gambar 4.3 Kurva pendidihan dengan permukaan pemanas media berpori *sintered copper* 400 μm

Gambar 4.3 menunjukkan kurva pendidihan ketika menggunakan media berpori jenis sintered copper 400 μm dengan variasi jenis fluida. Penambahan partikel nano sebesar 3% menunjukkan peningkatan performa didih kolam. Dibandingkan dengan tiga fluida lainnya, nano fluida 3% mampu memberikan nilai ΔT yang lebih kecil yaitu 0.22 $^{\circ}\text{C}$ pada saat nilai fluks kalor tertinggi. Penggunaan nano fluida 1% dan 5% mampu memberikan nilai ΔT yang lebih rendah dibandingkan fluida dasar (H_2O) pada saat fluks kalor berada pada nilai 10 kW/m^2 hingga 30 kW/m^2 , pada saat fluks kalor tertinggi digunakan, nano fluida 1%, 5% dan fluida dasar tidak memeperlihatkan perbedaan yang signifikan. Dari hasil pengujian ini tidak bisa disimpulkan hubungan antara penignkatan konsentrasi nano fluida terhadap performa pendidihan.



Gambar 4.4 Kurva perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor pada *sintered copper* 400 μm

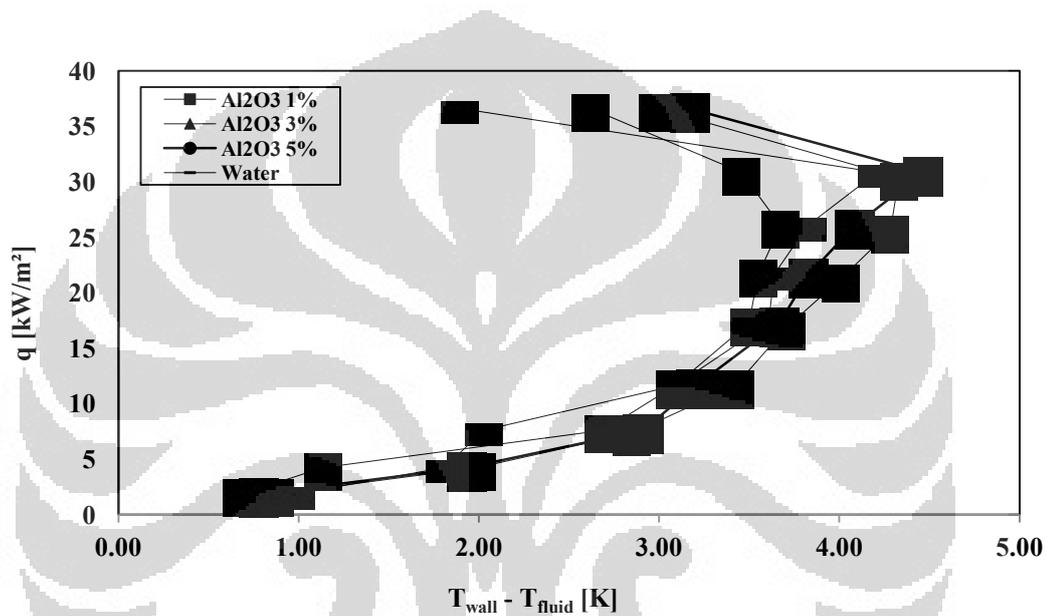
Perbandingan nilai fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor ketika menggunakan media berpori *sintered copper* 400 μm ditampilkan pada gambar 4.4. Pada saat fluks kalor $< 20 \text{ kW/m}^2$ tidak terlihat perbedaan yang signifikan dari nilai koefisien perpindahan kalor yang didapatkan. Perbedaan nilai koefisien perpindahan kalor baru terlihat signifikan pada saat fluks kalor 30 kW/m^2 hingga 35 kW/m^2 , dimana pada kondisi ini penggunaan nano fluida dengan konsentrasi 3% mampu memberikan nilai koefisien perpindahan kalor yang lebih baik dari tiga jenis fluida lainnya.

4.1.2 Pengujian didih kolom pada media berpori *screen mesh*

Pada bagian ini pengujian didih kolom dengan menggunakan media berpori jenis *screen mesh* dilakukan. Terdapat dua jenis *screen mesh* yang digunakan dalam pengujian. Kedua jenis *screen mesh* memiliki jumlah mesh yang sama, yaitu 40 mesh. Yang membedakan kedua jenis *screen mesh* adalah material dasar. *Screen mesh* pertama terbuat dari *stainless steel* dan *screen mesh* kedua terbuat dari tembaga.

4.1.2.1 Pengujian didih kolom dengan media berpori *screen mesh stainless steel* 40 mesh.

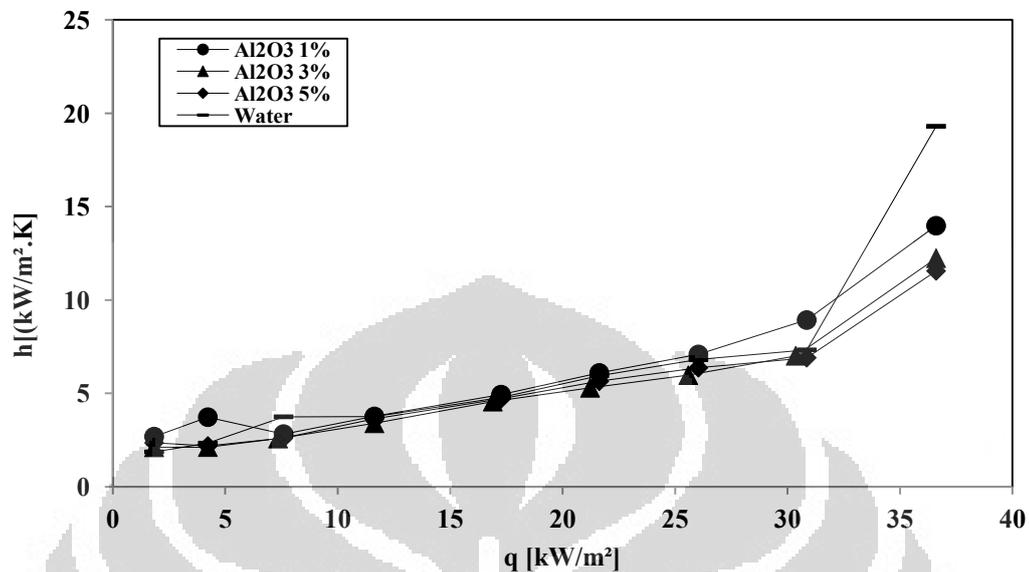
Kurva didih untuk pengujian media berpori *screen mesh stainless steel* ditampilkan pada gambar 4.5. Pengujian didih kolom dilakukan dengan menggunakan empat fluida. Pengujian pertama dilakukan menggunakan fluida dasar (H_2O) dan dilanjutkan dengan pengujian dengan nano fluida 1%, 3% dan 5%.



Gambar 4.5 Kurva pendidihan dengan permukaan pemanas media berpori *screen mesh stainless steel*

Perbedaan perpindahan kalor masing-masing fluida pada didih kolom tidak terlihat begitu signifikan ketika fluks kalor $< 20 \text{ kW/m}^2$. Pada saat fluks kalor berada pada rentang $25 \text{ kW/m}^2 - 30 \text{ kW/m}^2$ nano fluida 1% secara konsisten menunjukkan perpindahan kalor yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan fluida lainnya. Pada saat fluks kalor 30 kW/m^2 nano fluida 1% memberikan nilai ΔT $3.67 \text{ }^\circ\text{C}$, terendah dibandingkan dengan fluida lainnya. Pada saat fluks kalor terbesar 35 kW/m^2 diberikan, fluida dasar (H_2O) menunjukkan perpindahan kalor yang lebih baik dibandingkan fluida lainnya. Fenomena yang hampir sama juga ditemukan pada beberapa penelitian [20,35] dimana penggunaan fluida dasar menunjukkan perpindahan kalor yang lebih baik dibandingkan nano fluida. Dari penelitian tersebut diketahui bahwa penggunaan

nano fluida mengakibatkan penurunan nilai kekasaran permukaan pemanas yang memberikan pengaruh yang cukup besar pada proses pendidihan.



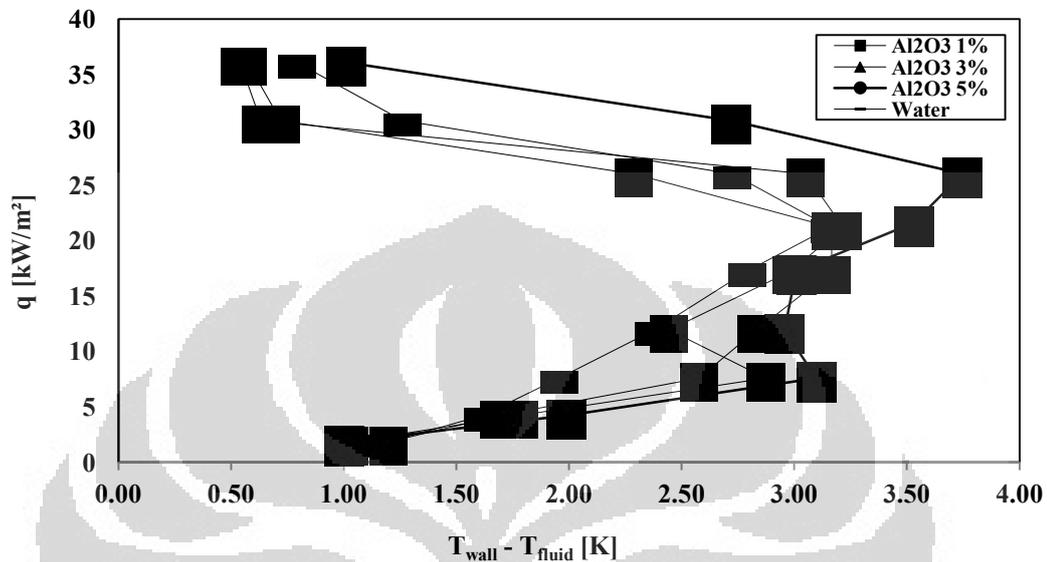
Gambar 4.6 Kurva perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor pada *screen mesh stainless steel*

Perbandingan nilai fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor pada didih kolam menggunakan *screen mesh stainless steel* ditampilkan pada gambar 4.6. Nano fluida 1% secara konsisten menunjukkan perpindahan kalor yang lebih baik dibandingkan fluida lainnya pada rentang fluks kalor $25 \text{ kW/m}^2 - 33 \text{ kW/m}^2$. Untuk pengujian ini tidak bisa ditarik kesimpulan korelasi antara konsentrasi nano fluida yang digunakan terhadap peningkatan atau penurunan koefisien perpindahan kalor dengan menggunakan media berpori jenis *screen mesh stainless steel*.

4.1.2.2 Pengujian didih kolam dengan media berpori *screen mesh tembaga* 40 mesh.

Jenis *screen mesh* berikutnya yang digunakan dalam pengujian didih kolam adalah tembaga yang memiliki bilangan mesh yang sama dengan *screen mesh stainless steel*. Pengujian didih kolam dilakukan dengan menggunakan empat fluida yang yaitu H_2O dan nano fluida $\text{H}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ 1%, 3% dan 5%.

Kurva didih *screen mesh* tembaga ditampilkan pada gambar 4.7. Penggunaan nano fluida 1% dan 3% secara konsisten menunjukkan perpindahan kalor yang lebih baik dibandingkan nano fluida 5% dan fluida dasar.

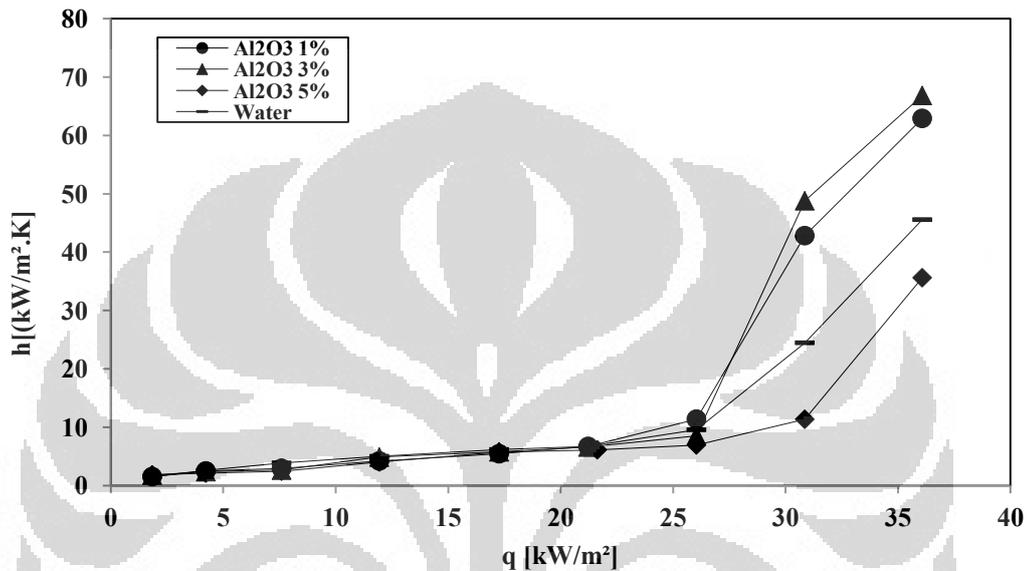


Gambar 4.7 Kurva pendidihan dengan permukaan pemanas media berpori *screen mesh* tembaga

Pada saat fluks kalor maksimum 36 kW/m^2 diberikan tidak terlihat perbedaan yang signifikan antara nano fluida 1% dan 3% dimana ΔT yang dihasilkan adalah $0.57 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $0.54 \text{ }^\circ\text{C}$. Sementara itu penggunaan nano fluida 5% menunjukkan perpindahan kalor yang tidak lebih baik dibandingkan dengan fluida dasar pada saat fluks kalor maksimal, dimana ΔT yang dihasilkan pada saat menggunakan nano fluida 5% adalah $1.01 \text{ }^\circ\text{C}$ sedangkan ΔT sebesar $0.79 \text{ }^\circ\text{C}$ dihasilkan pada pengujian dengan fluida dasar.

Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan nilai fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor didih kolam menggunakan *screen mesh* tembaga. Pada rentang fluks kalor $2 \text{ kW/m}^2 - 21 \text{ kW/m}^2$ tidak terlihat perbedaan perpindahan kalor yang signifikan untuk ke empat fluida yang digunakan dalam pengujian didih kolam. Perbedaan nilai koefisien perpindahan kalor mulai terlihat ketika fluks kalor $> 25 \text{ kW/m}^2$, dimana nano fluida 1% dan 3% secara konsisten memberikan nilai koefisien perpindahan kalor yang lebih tinggi dibandingkan

dengan nano fluida 5% dan fluida dasar. Koefisien perpindahan kalor yang dihasilkan pada saat fluks kalor maksimal untuk fluida dasar, nano fluida 1%, 3% dan 5% adalah $45.6 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $62.9 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $66.85 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ dan $35.6 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.



Gambar 4.8 Kurva perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor pada *screen mesh* tembaga

4.2 Pengaruh Jenis Fluida Pada Didih Kolan

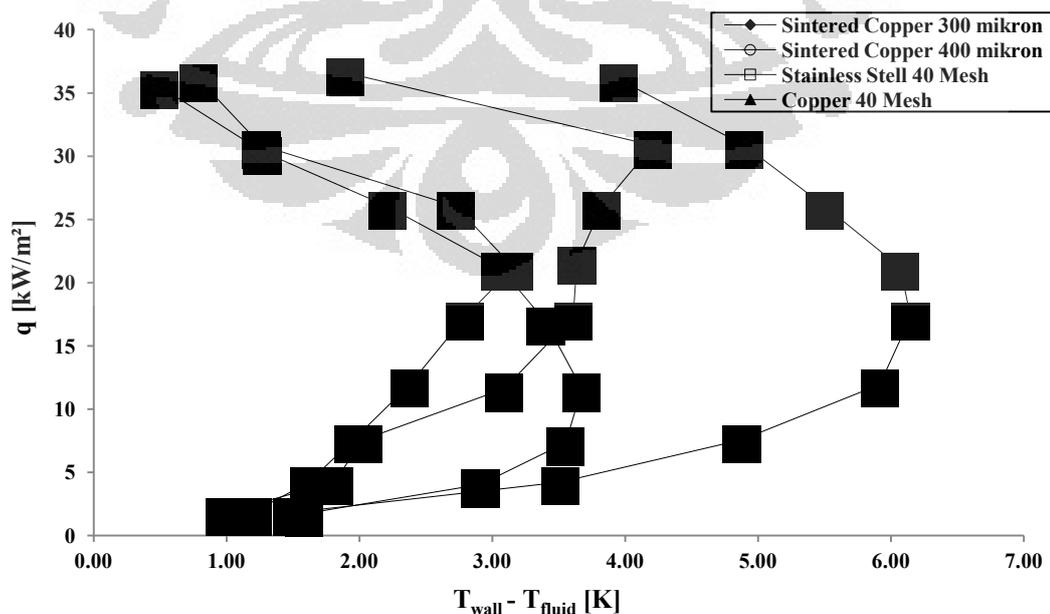
Pengujian didih kolan pada empat jenis fluida dan empat jenis media berpori telah dilakukan. Pada bagian ini akan ditampilkan perbandingan jenis media berpori terhadap fluida yang digunakan.

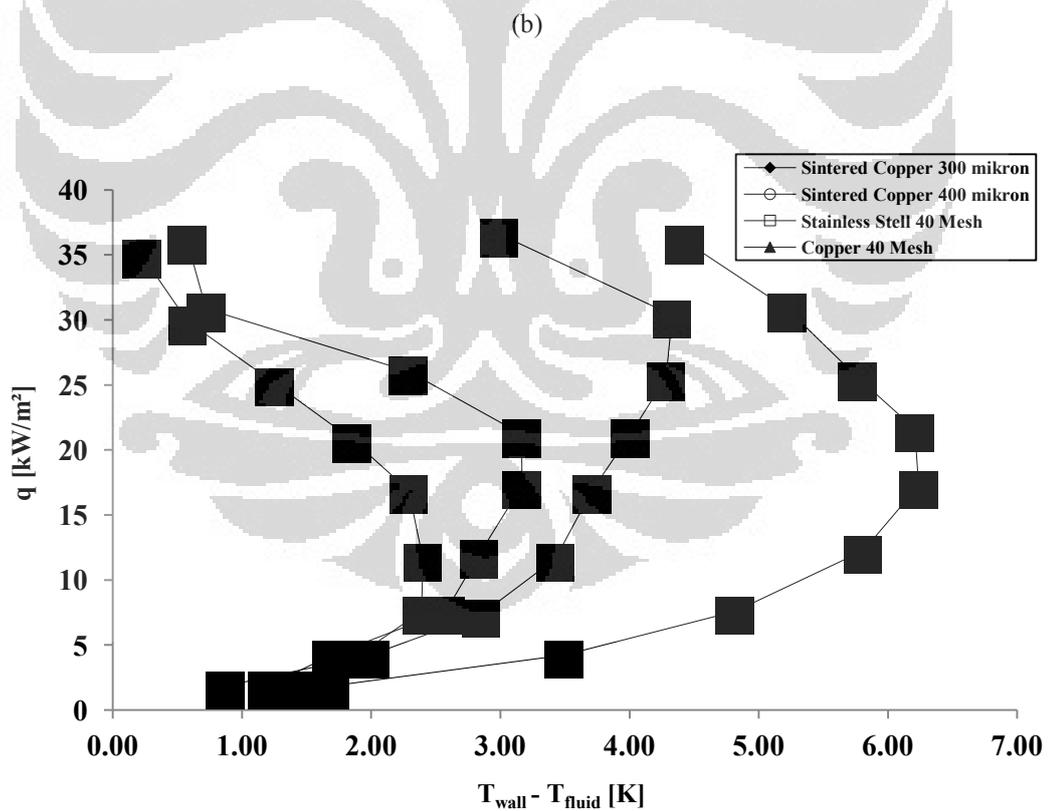
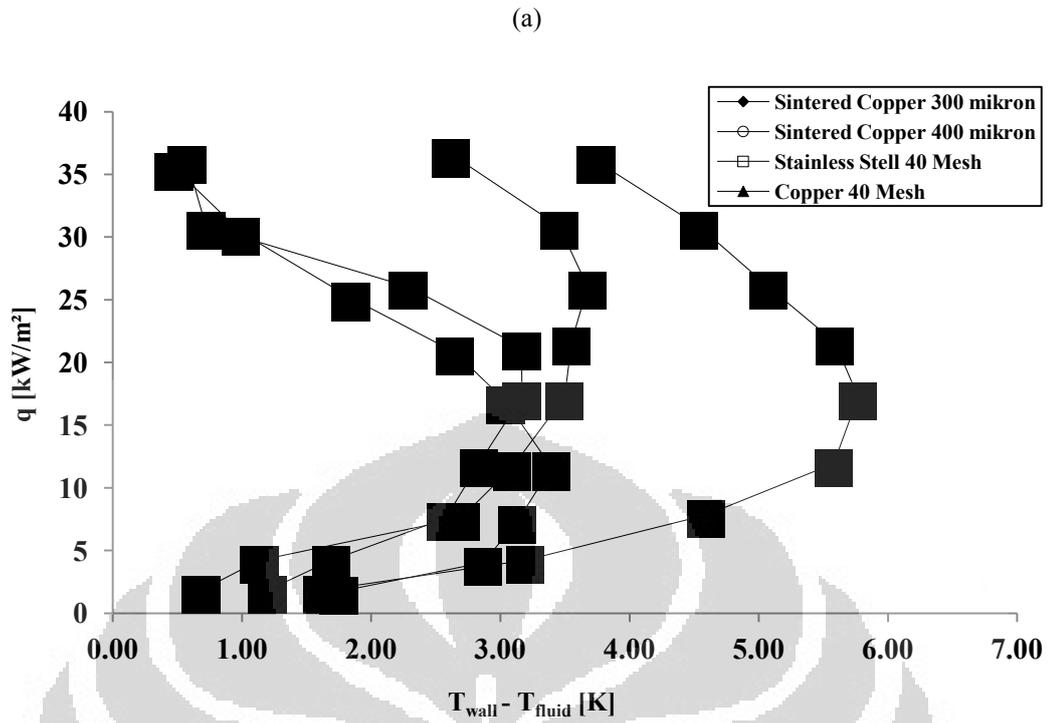
Pengujian didih kolan menggunakan fluida H_2O dilakukan menggunakan variasi jenis permukaan pemanas, yaitu : *sintered copper* 300 mikron, *sintered copper* 400 mikron, *screen mesh* tembaga, *screen mesh stainless steel*. Kurva pendidihan H_2O dengan variasi media berpori dapat dilihat pada gambar 4.9.(a) Media berpori yang menunjukkan perpindahan kalor lebih baik dibandingkan dengan media berpori lainnya adalah *sintered cooper* 400 μm dimana nilai ΔT adalah $0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ pada saat fluks kalor maksimum 35 kW/m^2 diberikan. *Screen mesh*

tembaga menunjukkan perpindahan kalor yang tidak terlalu jauh dibandingkan dengan *sintered copper* 300 μm pada saat fluks kalor maksimum 35 kW/m^2 diberikan, dimana nilai ΔT adalah 0.79 $^{\circ}\text{C}$.

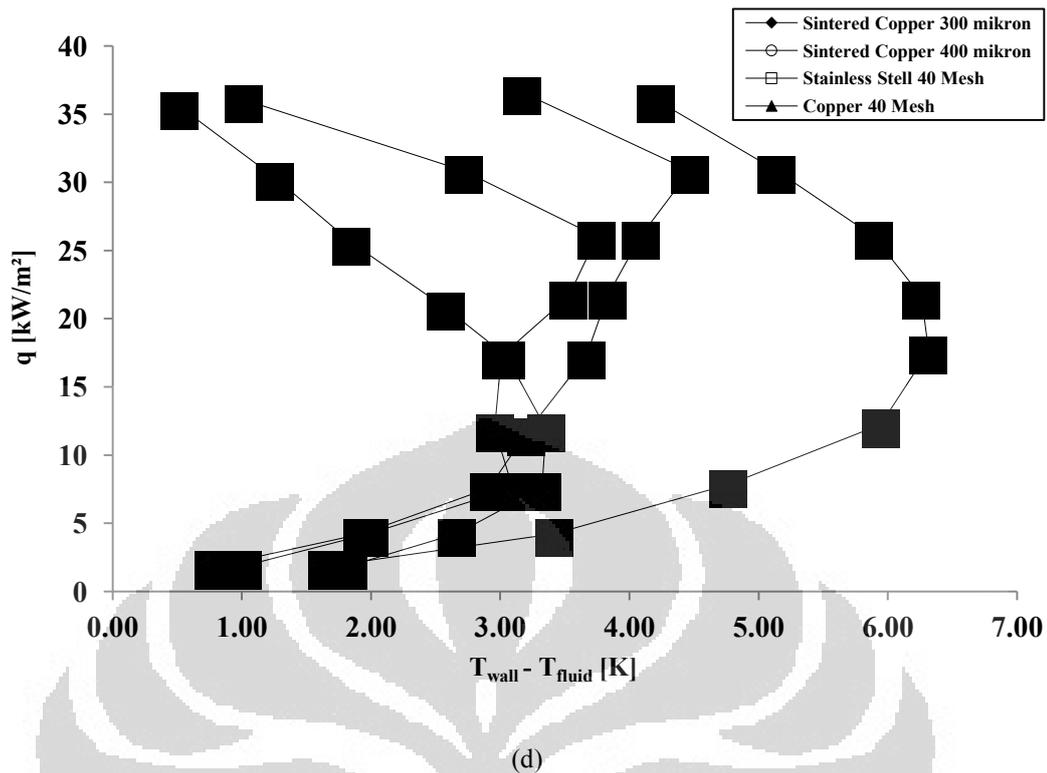
Penggunaan nano fluida pada pengujian didih kolom dengan variasi jenis media berpori pada permukaan pemanas juga dilakukan. Gambar 4.9 (b), (c) dan (d) menunjukkan kurva pendidihan ketika menggunakan nano fluida $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 1%, 3% dan 5%. Hasil pengujian menggunakan nano fluida menunjukkan fenomena yang sama ketika menggunakan H_2O , dimana media berpori *sintered copper* 400 μm menunjukkan perpindahan kalor yang lebih baik dibandingkan dengan tiga jenis media berpori lainnya, diikuti oleh *screen mesh* tembaga, *screen mesh stainless steel* dan *sintered copper* 300 μm .

Perbedaan perpindahan kalor dari masing-masing jenis media berpori dikarenakan oleh beberapa hal, salah satu faktor yang mempengaruhi pendidihan ketika menggunakan permukaan pemanas yang berbeda-beda adalah konduktivitas termal dari material permukaan pemanas [46]. Faktor lain yang juga mempengaruhi pendidihan adalah kekasaran permukaan, kalor jenis dan densitas dari material permukaan pemanas [47].



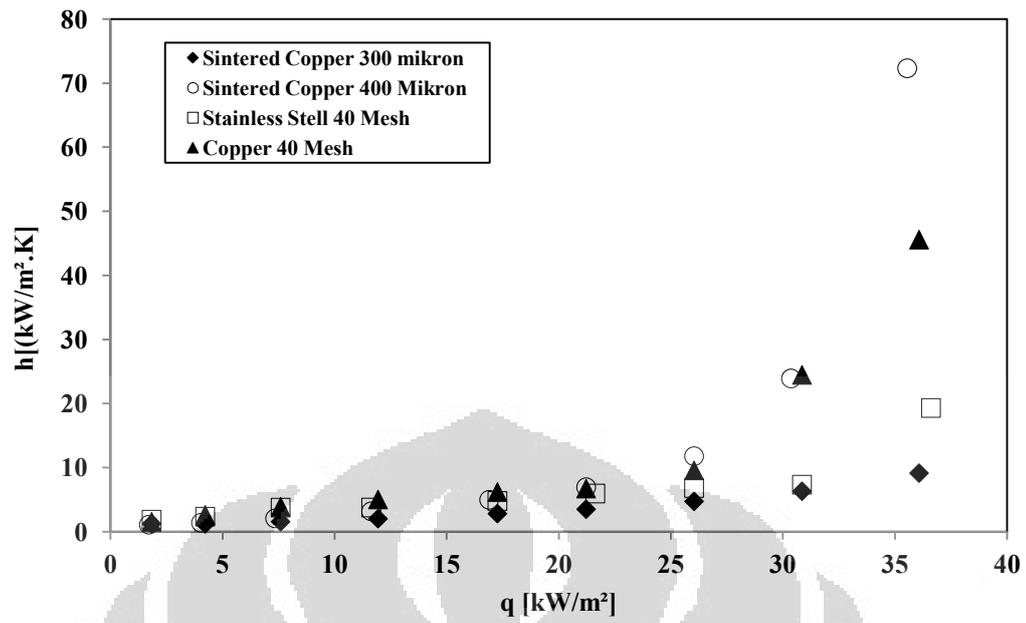


(c)

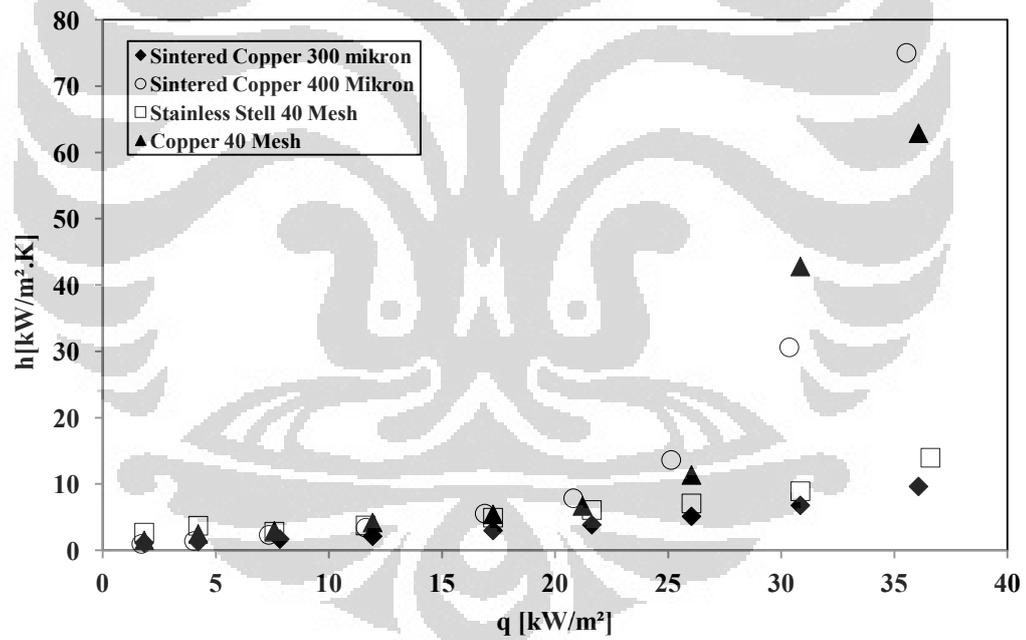


Gambar 4.9 Kurva pendidihan dengan variasi media berpori menggunakan fluida : (a) H₂O, (b) H₂O-Al₂O₃ 1%, (c) H₂O-Al₂O₃ 3%, (d) H₂O-Al₂O₃ 5%

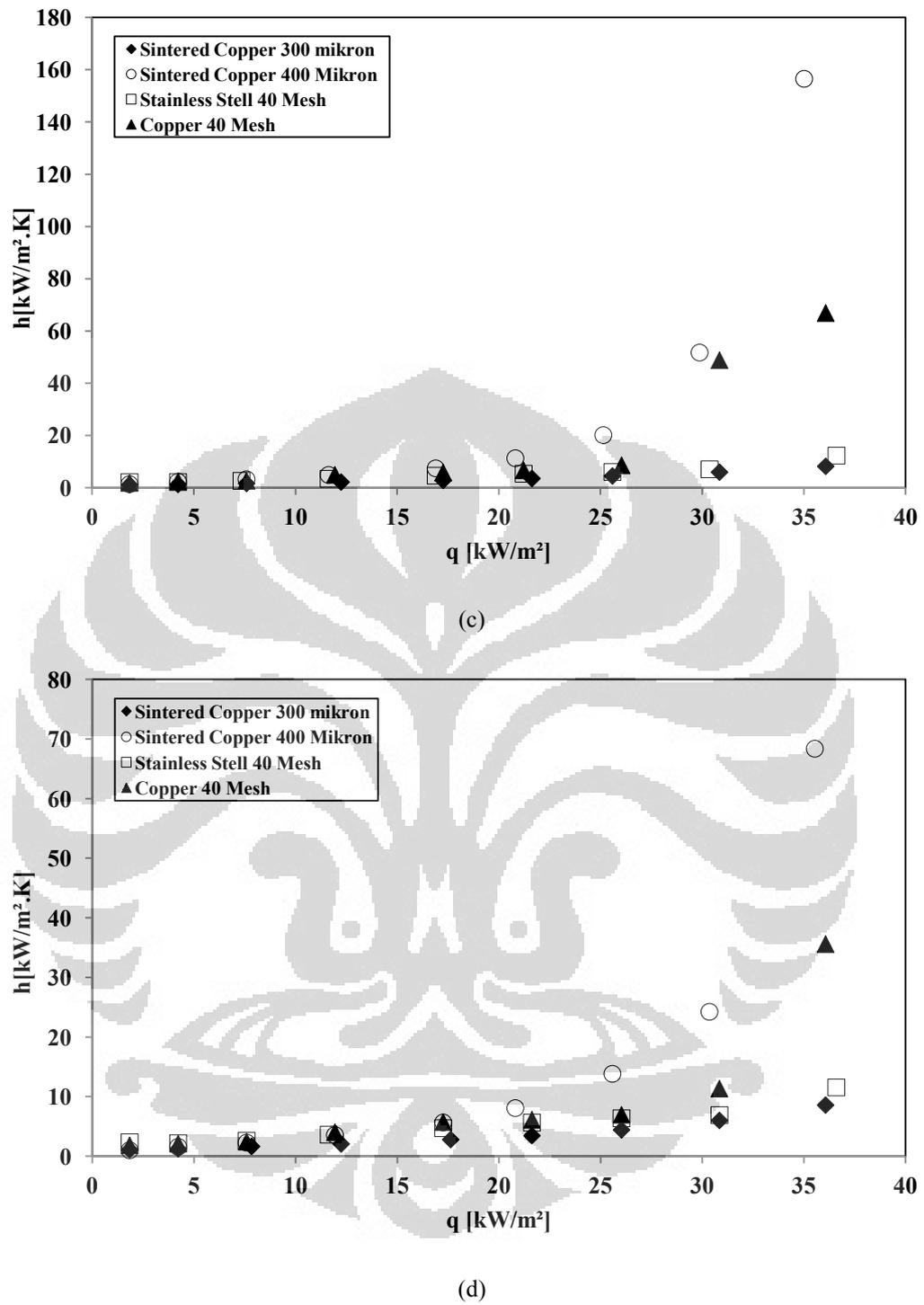
Perbandingan nilai fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor untuk masing-masing pengujian variasi fluida dapat dilihat pada gambar 4.10 : (a) H₂O, (b) H₂O-Al₂O₃ 1%, (c) H₂O-Al₂O₃ 3% dan (d) H₂O-Al₂O₃ 5%. Untuk setiap jenis fluida yang digunakan, media berpori *sintered copper* 400 μm menunjukkan nilai koefisien perpindahan kalor yang lebih tinggi dibandingkan dengan media berpori lainnya pada saat fluks kalor maksimum 35 kW/m² diberikan. Nilai koefisien perpindahan kalor ketika menggunakan H₂O, H₂O-Al₂O₃ 1%, H₂O-Al₂O₃ 3% dan H₂O-Al₂O₃ 5% adalah 72.30 kW/m².K, 75.02 kW/m².K, 156.49 kW/m².K dan 68.37 kW/m².K. Peningkatan koefisien perpindahan kalor dibandingkan ketika menggunakan fluida dasar terjadi ketika menggunakan nano fluida 1% dan 3%. Penurunan terjadi ketika menggunakan nano fluida 5%, fenomena ini dikarenakan terbentuknya lapisan nano partikel pada permukaan pemanas.



(a)

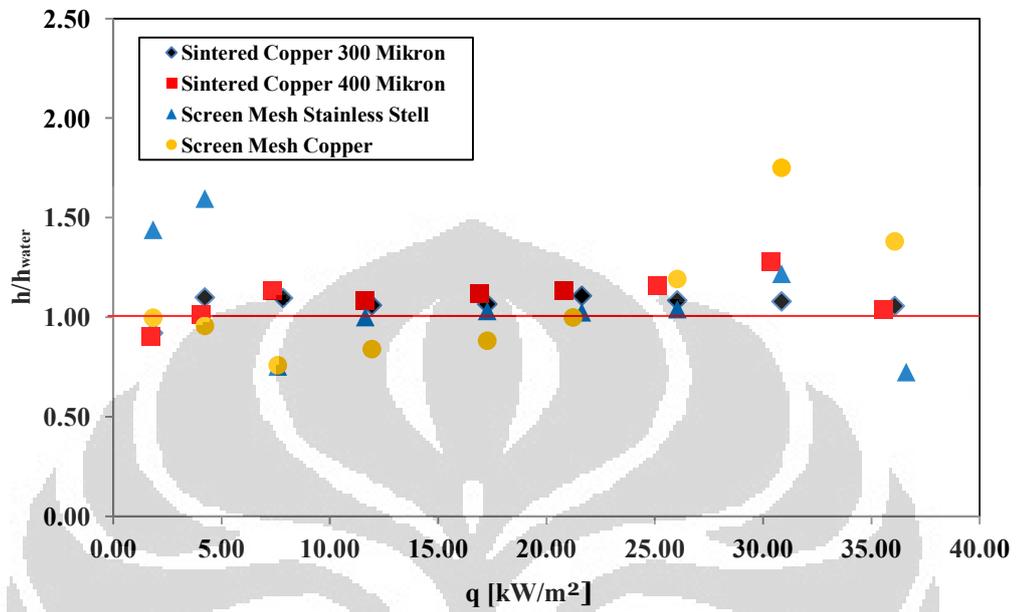


(b)

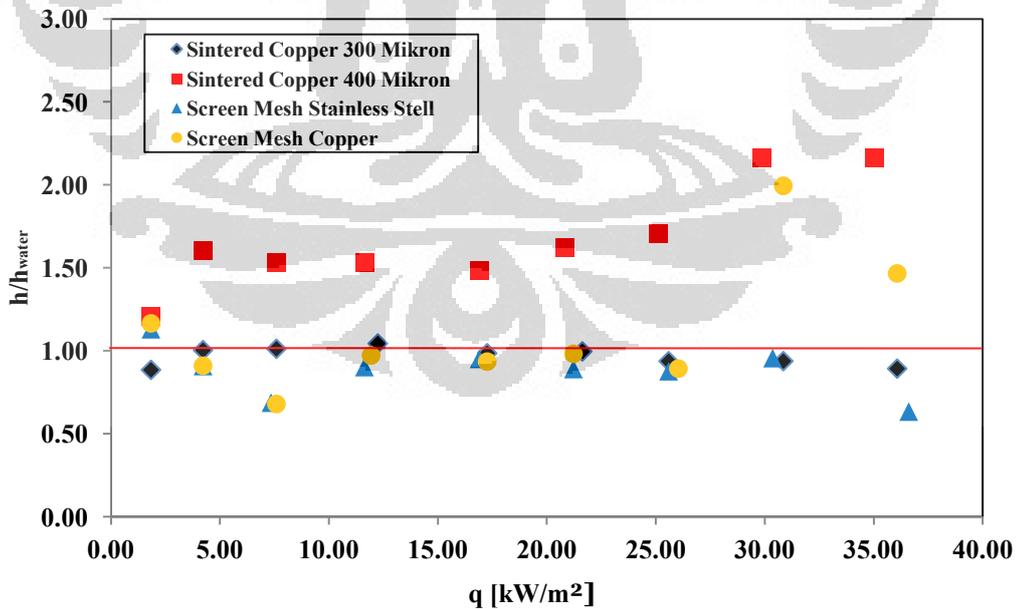


Gambar 4.10 Perbandingan fluks kalor terhadap koefisien perpindahan kalor dengan variasi media berpori menggunakan fluida : (a) H₂O, (b) H₂O-Al₂O₃ 1%, (c) H₂O-Al₂O₃ 3%, (d) H₂O-Al₂O₃ 5%

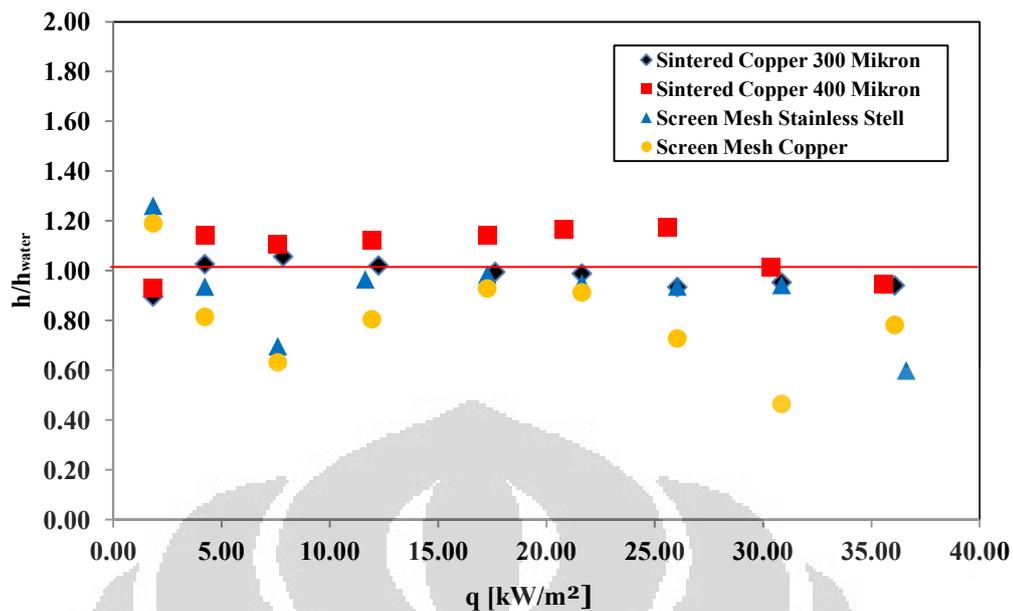
4.3 Pengaruh Penggunaan Nano Fluida Terhadap Penurunan atau Peningkatan Pendidihan



(a) 1%



(b) 3%



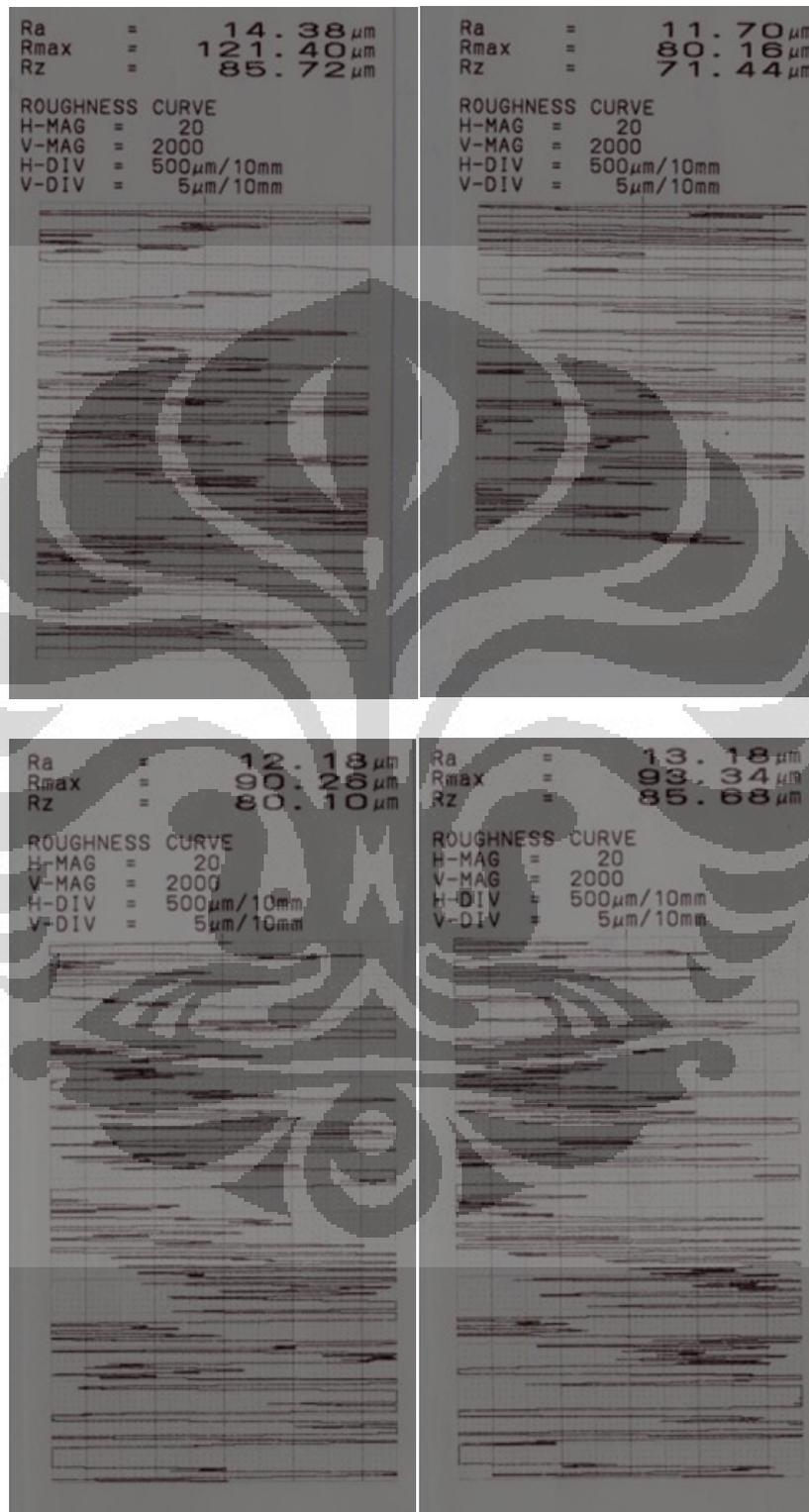
(c) 5%

Gambar 4.11 Perbandingan koefisien perpindahan kalor nano fluida terhadap air pada konsentrasi (a) 1%, (b) 3% dan (c) 5%.

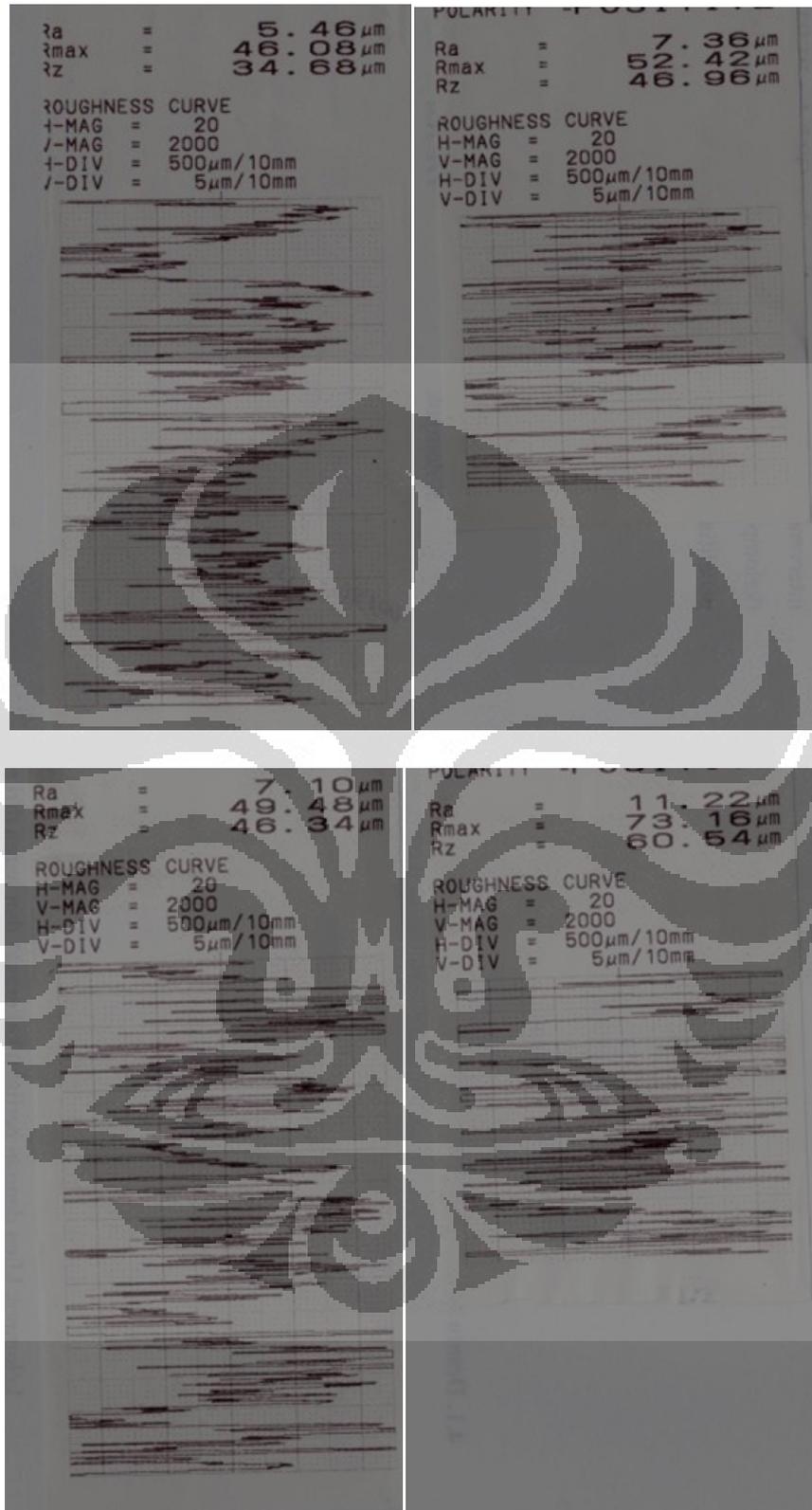
4.4 Pengaruh Penggunaan Nano Fluida Terhadap Kekasaran Permukaan Media Berpori

Setelah melakukan pengujian didih kolam ditemukan penurunan perpindahan kalor pendidihan menggunakan nano fluida terutama ketika menggunakan dengan konsentrasi 5%. Berdasarkan beberapa referensi, terjadinya penurunan didih kolam disebabkan terbentuknya lapisan diatas permukaan pemanas. Lapisan ini terbentuk setelah proses pendidihan menggunakan nano fluida, dimana partikel nano yang terdispersi pada fluida dasar membentuk lapisan pada permukaan pemanas, Narayan [24] mendeskripsikan fenomena ini dikarenakan ketidakstabilan ikatan antara fluida dan nano partikel sehingga ketika pendidihan terjadi dan gelembung terbentuk nano partikel tertinggal pada permukaan pemanas. Untuk membuktikan terbentuknya lapisan nano partikel pada permukaan pemanas, beberapa referensi [20,21,35] melakukan pengujian terhadap kekasaran permukaan pemanas sebelum dan sesudah pengujian didih kolam menggunakan nano fluida dilakukan. Pada penelitian ini dilakukan pengujian kekasaran permukaan *media berpori sintered copper* 300 μm untuk membuktikan terbentuknya lapisan nano partikel pada permukaan pemanas.

Terbentuknya lapisan nano partikel pada permukaan pemanas dapat dibuktikan dengan terjadinya penurunan nilai kekasaran permukaan dari media berpori.



(a)



(b)

Gambar 4.12 Hasil Pengukuran kekasaran permukaan media berpori *sintered copper* 300 μm
 (a) sebelum pengujian didih kolam (b) sesudah pengujian didih kolam

Gambar 4.12 merupakan grafik hasil pengukuran kekasaran permukaan media berpori *sintered copper* 300 μm . Pengukuran dilakukan pada 4 titik pada permukaan media berpori sebelum dan sesudah pengujian didih kolam menggunakan nano fluida dilakukan. Tabel 4.1 menunjukkan nilai kekasaran permukaan media berpori sebelum dan sesudah pengujian didih kolam. Nilai kekasaran permukaan yang ditampilkan adalah nilai kekasaran permukaan rata-rata sepanjang pengukuran.

Tabel 4.1 Perbandingan kekasaran permukaan media berpori sebelum dan sesudah pendidihan dengan nano fluida

Titik Pengukuran	Ra Sebelum Pendidihan [μm]	Ra Setelah Pendidihan [μm]
1	14.38	5.46
2	11.7	7.36
3	12.18	7.1
4	13.18	11.22

Dari hasil pengukuran kekasaran permukaan dapat diketahui terjadi pengurangan kekasaran permukaan media berpori setelah dilakukan pengujian didih kolam menggunakan nano fluida. Menurut [35] salah satu penyebab penurunan didih kolam pada saat menggunakan nano fluida dengan konsentrasi tinggi (4%) dikarenakan terjebaknya nano partikel yang memiliki ukuran lebih kecil dibandingkan dengan kekasaran permukaan pemanas.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan beberapa hal dapat disimpulkan dari pengujian didih kolam menggunakan nano fluida pada media berpori:

1. Penggunaan nano fluida Al_2O_3 pada konsentrasi 5% menunjukkan kemampuan perpindahan kalor yang tidak lebih dibandingkan fluida dasar. Untuk setiap media berpori yang digunakan, nano fluida dengan konsentrasi 5% menunjukkan nilai ΔT yang lebih besar dibandingkan dengan fluida dasar, Al_2O_3 1% dan 3%.
2. Media berpori *sintered copper* 400 μm secara konsisten memberikan perpindahan kalor yang lebih baik untuk setiap fluida yang digunakan pada pengujian didih kolam.
3. Terbentuknya lapisan nano partikel Al_2O_3 pada permukaan media berpori, hal ini dibuktikan dengan menurunnya nilai kekasaran permukaan media berpori *sintered copper* 300 μm setelah dilakukan pengujian didih kolam menggunakan nano fluida. Penurunan kekasaran permukaan ini menjadi salah satu faktor yang mengakibatkan penurunan didih kolam nano fluida 5%.

REFERENSI

- [1] L.P. Yarin, A. Mosyak, and G. Hetsroni, *Fluid Flow Heat Transfer and Boiling in Micro Channels*. Leipzig: Springer, 2009.
- [2] B. Pulvirenti, A. Matalone, and U. Barucca, "Boiling heat transfer in narrow channels with offset strip fins: Application to electronic chipsets cooling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 2138-2145, 2010.
- [3] Warren M. Rohsenow, James P. Hartnett, and Young I. Cho, *Handbook of Heat Transfer Third Edition*. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [4] Shoji Mori and Konito Okuyama, "Enhancement of the critical heat flux in saturated pool boiling using honeycomb porous media," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 35, pp. 946-951, 2009.
- [5] Z.G. Xu, Z.G. Qu, C.Y. Zhao, and W.Q. Tao, "Pool boiling heat transfer on open-celled metallic foam sintered surface under saturation condition," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, pp. 3856-3867, 2011.
- [6] Satish G. Kandlikar, Masahiro Shoji, and Vijay K. Dhir, *Handbook of Phase Change : Boiling and Condensation*. Philadelphia: Taylor & Francis, 1999.
- [7] Frank Kreith, Raj M. Manglik, and Mark S. Bohn, *Principle of Heat Transfer*. Stamford: Cengage Learning, 2011.
- [8] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, and David P. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer Sixth Edition*. Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [9] Ho Seon Ahn et al., "Pool boiling CHF enhancement by micro/nanoscale modification of zircaloy-4 surface," *Nuclear Engineering Design*, vol. 240, pp. 3350-3360, 2010.
- [10] Erik Williamson Erik Forrest, Jacopo Buongiorno, Lin-Wen Hu, Michael Rubner, and Robert Cohen, "Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 58-67, 2010.
- [11] Arthur E. Bergles, "Enhancement of pool boiling," *International Journal of Refrigeration*, vol. 20, no. 8, pp. 545-551, 1997.
- [12] A.K. Das, P.K. Das, and P. Saha, "Performance of different structured surfaces in nucleate boiling," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 3643-3653, 2009.
- [13] Y. Takata et al., "Effect of surface wettability on boiling and evaporation," *Energy*, vol. 30, pp. 209-220, 2005.
- [14] Benoit Stutz, Carlos Henrique Silveira Morceli, Maria de Fatima da Silva, Serge Cioulachtjian, and Jocelyn Bonjour, "Influence of nanoparticle surface coating on

- pool boiling," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011.
- [15] Janusz T. Cieslinski, "Nucleate pool boiling on porous metallic coatings," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 25, pp. 557-564, 2002.
- [16] S.M. Sohel Murshed, C.A. Nieto de Castro, M.J.V. Lourenco, M.L.M Lopes, and F.J.V. Santos, "A review of boiling and convective heat transfer with nanofluids," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 2342-2354, 2011.
- [17] Robert A. Taylor and Patrick E. Phealan, "Pool boiling of nanofluids: Comprehensive review of existing data and limited new data," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 5339-5347, 2009.
- [18] S. Choi, D.A. Siginer, and H.P. Wang (Eds), "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Development and Applications of Non-Newtonian Flows," *ASME*, vol. 231, pp. 99-105, 1995.
- [19] J.A. Eastman, U.S. Choi, S. Li, W. Y, and L.J. Thompson, "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nano-fluids containing copper nano-particles," *Applied Physics Letter*, vol. 78, pp. 718-720, 2001.
- [20] Sarit K. Das, Nandy Putra, and Wilfried Roetzel, "Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 29, pp. 1237-1247, 2003.
- [21] In Cheol Bang and Soon Heung Chang, "Boiling heat transfer performance and phenomena of Al₂O₃-water nano-fluids from a plain surface in a pool," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, pp. 2407-2419, 2005.
- [22] Hyungdae Kim, Jeongbae Kim, and Moo Hwan Kim, "Effect of nanoparticles on CHF enhancement in pool boiling of nano-fluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 5070-5074, 2006.
- [23] S.M. You, J.H. Kim, and K.H. Kim, "Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer," *Applied Physics Letters*, vol. 83, pp. 3374-3376, 2003.
- [24] G. Prakash Narayan, K.B. Anoop, and Sarit K. Das, "Mechanism of enhancement/deterioration of boiling heat transfer using stable nanoparticle suspensions over vertical tubes," *Journal of Applied Physics*, vol. 102, pp. 074317-1 - 074317-7, 2007.
- [25] Jonathan S. Coursey and Jungho Kim, "Nanofluid boiling: The effect of surface wettability," *International journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 29, pp. 1577-1585, 2008.
- [26] Jacquiline Barber, David Brutin, and Lounes Tadrist, "A review on boiling heat transfer enhancement with nanofluids," *Nanoscale Research Letters*, vol. 6, pp. 1-16, 2011.
- [27] Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, and David P. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer*, 6th ed. Jefferson City, United States of America:

John Wiley & Sons Inc., 2011.

- [28] Yunus A. Cengel, *Heat Transfer A Practical Approach*, 2nd ed.: McGraw-Hill, 2007.
- [29] Sarit K. Das, Stephen U.S. Choi, Wenhua Yu, and T. Pradeep, *Nanofluids Science and Technology*, 1st ed. New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, 2008.
- [30] W.H. Yu, D.M. Routbort, and S. Choi, "Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancement," *Heat Transfer Engineering*, vol. 29, pp. 423-460, 2008.
- [31] S.Q. Zhou and R. Ni, "Measurement of the specific heat capacity of water-based Al₂O₃ nanofluids," *Applied Physics Letters*, vol. 92, 2008.
- [32] Z.H. Liu, J.G. Xiong, and R. Bao, "Boiling heat transfer characteristics of nanofluids in a flat heat pipe evaporator with micro-grooved heating surface," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 33, pp. 1284-1295, 2007.
- [33] K.J. Park and D. Jung, "Enhancement of nucleate boiling heat transfer using carbon nanotubes," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 4499-4502, 2007.
- [34] D.S. Wen, "Mechanisms of convective heat transfer of nanofluids," in *ASME Micro/Nanoscale International Heat Transfer Conference*, Taiwan, 2008.
- [35] Sarit K. Das, Nandy Putra, and Wilfried Roetzel, "Pool boiling characteristics of nano-fluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46, pp. 851-862, 2003.
- [36] You S.M., Kim J.H., and Kim K.H., "Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer," *Applied Physics Letter*, vol. 83, pp. 3374-3376, 2003.
- [37] Vassallo P, Kumar R, and D'Amico S, "Pool boiling heat transfer experiments in silica water nano-fluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 407-411, 2004.
- [38] D. Wen and Y. Ding, "Experimental investigation into the pool boiling heat transfer of aqueous based-alumina nanofluids," *Journal Nanoparticle Research*, vol. 7, pp. 265-274, 2005.
- [39] D. Milanova and R. Kumar, "Role of ions in pool boiling heat transfer of pure and silica nanofluids," *Applied Physics Letter*, vol. 87, pp. 233107-1-3, 2005.
- [40] S.J. Kim, I.C. Bang, J. Buongiorno, and L.W. Hu, "Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids," *Applied Physics Letter*, vol. 89, pp. 153107-1-3, 2006.
- [41] H.D. Kim, J.H. Kim, and M.H. Kim, "Experimental study on CHF characteristics of

- water-TiO₂ nanofluids," *Nuclear Engineering Technology*, vol. 38, p. 61, 2006.
- [42] D. Milanova and R. Kumar, "Heat transfer behaviour of silica nanoparticles in pool boiling experiment," *Journal Heat Transfer*, vol. 130, pp. 1-6, 2008.
- [43] M.N. Glubovic, H.D.Madhawa Hettiarachchi, W.M. Worek, and W.J. Minkowycz, "Nanofluids and critical heat flux, experimental and analytical study," *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 1281-1288, 2009.
- [44] Sarit K. Das, G. Prakash Narayan, and Anoop K. Baby, "Survey on nucleate pool boiling of nanofluids: the effect of particle size relative to roughness," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 10, pp. 1099-1108, 2008.
- [45] G. Harish, V. Emilin, and V. Sajith, "Effect of surface particle interaction during pool boiling of nanofluids," *International Journal of Thermal Science*, vol. 50, pp. 2318-2327, 2011.
- [46] M. Mann, K. Stephan, and P. Stephan, "Influence of heat conduction in the wall on nucleate boiling heat transfer," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 43, pp. 2193-2203, 2000.
- [47] R.J. Benjamin and A.R. Balakrishnan, "Nucleation site density in pool boiling of saturated pure liquids : effect of surface microroughness and surface and liquid physical properties," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 15, pp. 32-42, 1997.