



UNIVERSITAS INDONESIA

ANALISIS PERPINDAHAN KALOR PADA *MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER* DENGAN MENGGUNAKAN FLUIDA KERJA AIR DAN NANO FLUIDA Al_2O_3 -AIR

SKRIPSI

ARY MAULANA

0806329855

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

ANALISIS PERPINDAHAN KALOR PADA *MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER* DENGAN MENGGUNAKAN FLUIDA KERJA AIR DAN NANO FLUIDA AL_2O_3 -AIR

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar sarjana teknik**

ARY MAULANA

0806329855

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN


FAKULTAS TEKNIK

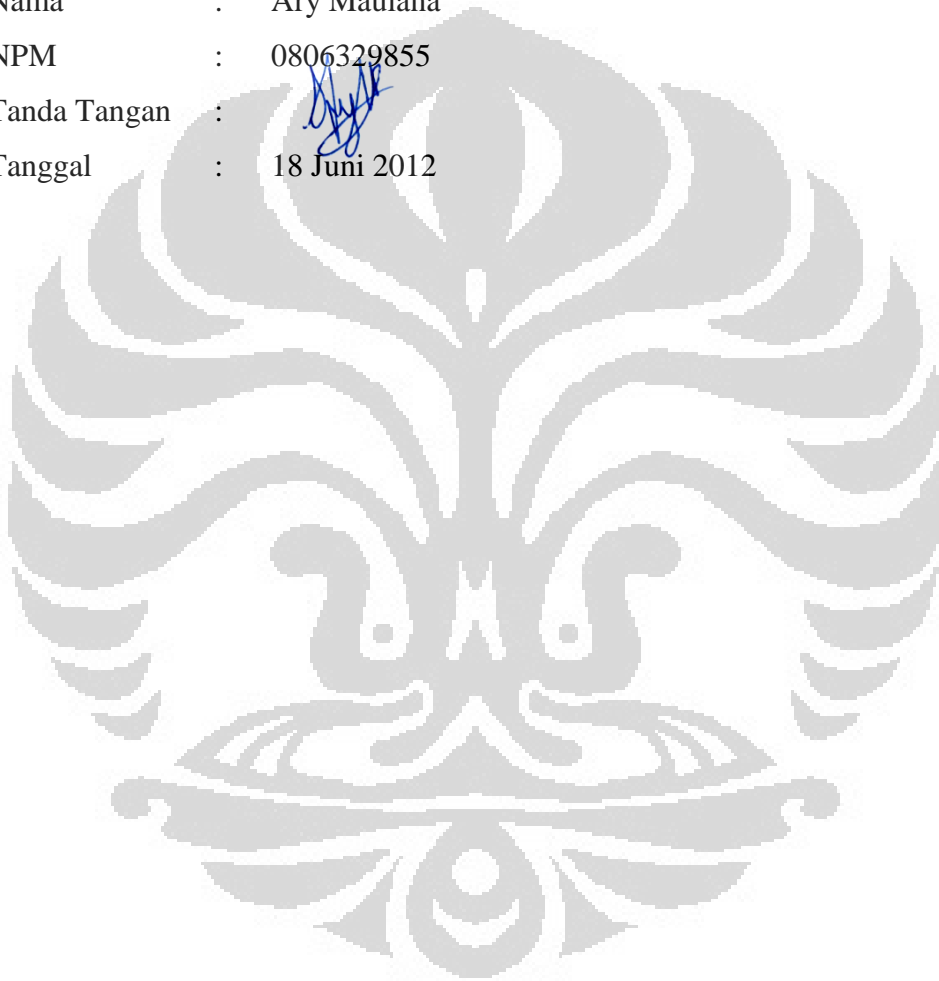
DEPOK

JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ary Maulana
NPM : 0806329855
Tanda Tangan : 
Tanggal : 18 Juni 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Ary Maulana

NPM : 0806329855

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Skripsi : **Analisis Perpindahan Kalor pada *Microchannel Heat Exchanger* dengan Menggunakan Fluida Kerja Air dan Nano Fluida Al_2O_3 -Air**

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr.-Ing. Ir. Nandy Setiadi Djaya Putra ()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer, DEA ()

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

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

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 18 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kehadiran Allah SWT, karena atas berkat rahmat dan hidayah-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia. Dalam penyusunan ini saya ucapkan terimakasih ke beberapa pihak, yaitu:

1. Orang tua dan keluarga saya yang selalu mendoakan saya dan memberikan dukungan moril dan materi,
2. Prof. Dr-ing. Ir. Nandy Setiadi Djaya Putra sebagai dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu memberikan pengarahan, diskusi, dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik,
3. Gerry Julian sebagai *partner* skripsi ini,
4. Ridho Irwansyah, Wayan Nata, Mulya Juarsa, Dinni Fakhrizal, dan Hadi Lulu Ikal sebagai senior pembimbing di Laboratorium AHTRG Gedung EC Ruang 311 dan 312,
5. Annisa Nurulianthy, Ashar Okta, Bimo Sakti, Retsa Anugrah, Rio Wirawan, dan Zein Hamid sebagai teman satu bimbingan skripsi,
6. Endang Wijaya dari Politeknik Negeri Jakarta yang membantu instalasi pengukuran *pressure drop*.
7. Teman-teman Departemen Teknik Mesin khususnya angkatan 2008, dan
8. Sekar Sinaringati yang telah memberikan perhatian, dukungan, semangat, dan doa hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Akhir kata, saya berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juni 2012

Penulis

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

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

Nama : Ary Maulana
NPM : 0606073184
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian 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 :

**Analisis Perpindahan Kalor pada *Microchannel Heat Exchanger* dengan
Menggunakan Fluida Kerja Air dan Nano Fluida Al_2O_3 -Air**


berserta 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 tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 18 Juni 2012

Yang menyatakan


(Ary Maulana)

ABSTRAK

Nama : Ary Maulana
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Analisis Perpindahan Kalor pada *Microchannel Heat Exchanger* dengan Menggunakan Fluida Kerja Air dan Nano Fluida Al_2O_3 -Air

Kinerja perpindahan kalor pada alat penukar kalor dapat ditingkatkan dengan mengurangi ukuran diameter hidrolis atau dengan menggunakan fluida kerja yang memiliki konduktivitas termal lebih baik dibandingkan dengan fluida kerja konvensional. Salah satu contoh penggunaan diameter hidrolis yang kecil adalah *microchannel heat exchanger* (MCHE). Pada penelitian ini, perancangan alat dan pengujian kinerja perpindahan kalor pada MCHE berkonfigurasi *counter-flow* dengan menggunakan fluida kerja air dan nano fluida Al_2O_3 -air dengan konsentrasi 1%, 3%, dan 5% sebagai fluida pendingin telah dilakukan. Dalam pengujian, temperatur masuk fluida pada sisi panas dan sisi dingin MCHE diatur tetap pada temperatur 50°C dan 25°C , sedangkan debit aliran pada saluran masuk divariasikan dari 100 ml/menit hingga 300 ml/menit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi partikel nano pada fluida dasar dapat meningkatkan kinerja perpindahan kalor fluida dasar tersebut. Pada konsentrasi partikel nano tertinggi yang digunakan dalam pengujian, nano fluida Al_2O_3 -air konsentrasi 5% dapat menyerap panas sebesar 9% lebih baik dibandingkan air biasa dan dapat meningkatkan koefisien perpindahan kalor keseluruhan MCHE sebesar 13% lebih besar dibandingkan dengan air.

Kata kunci : *microchannel heat exchanger*, nano fluida, perpindahan kalor

ABSTRACT

Name : Ary Maulana
Major : Mechanical Engineering
Title : Heat Transfer Analysis of Microchannel Heat Exchanger
Using Water and Nanofluid Al₂O₃-Water as Its Working Fluid

The heat transfer performance in heat exchanger can be enhanced by decreasing its hydraulic diameter or using working fluid that has better thermal conductivity than the conventional one. One of the examples of small hydraulic diameter application is microchannel heat exchanger (MCHE). Designing the MCHE and doing experimental investigation of the heat transfer performance on counter-flow MCHE by using water and Al₂O₃-water nanofluid with nanoparticle concentration 1%, 3%, and 5% as coolant fluid has been done in this experiment. Inlet fluid temperatures in hot and cold side are set at 50°C and 25°C, meanwhile the inlet flow rate is set from 100 to 300 ml/minute. The experimental results show that the increase of nanoparticle concentration in the base fluid can enhance its heat transfer performance. In highest concentration of nanoparticle used in this experiment, Al₂O₃-water 5% nanofluid can absorb heat 9% better than conventional water do and can enhance the overall heat transfer coefficient of MCHE 13% higher than water.

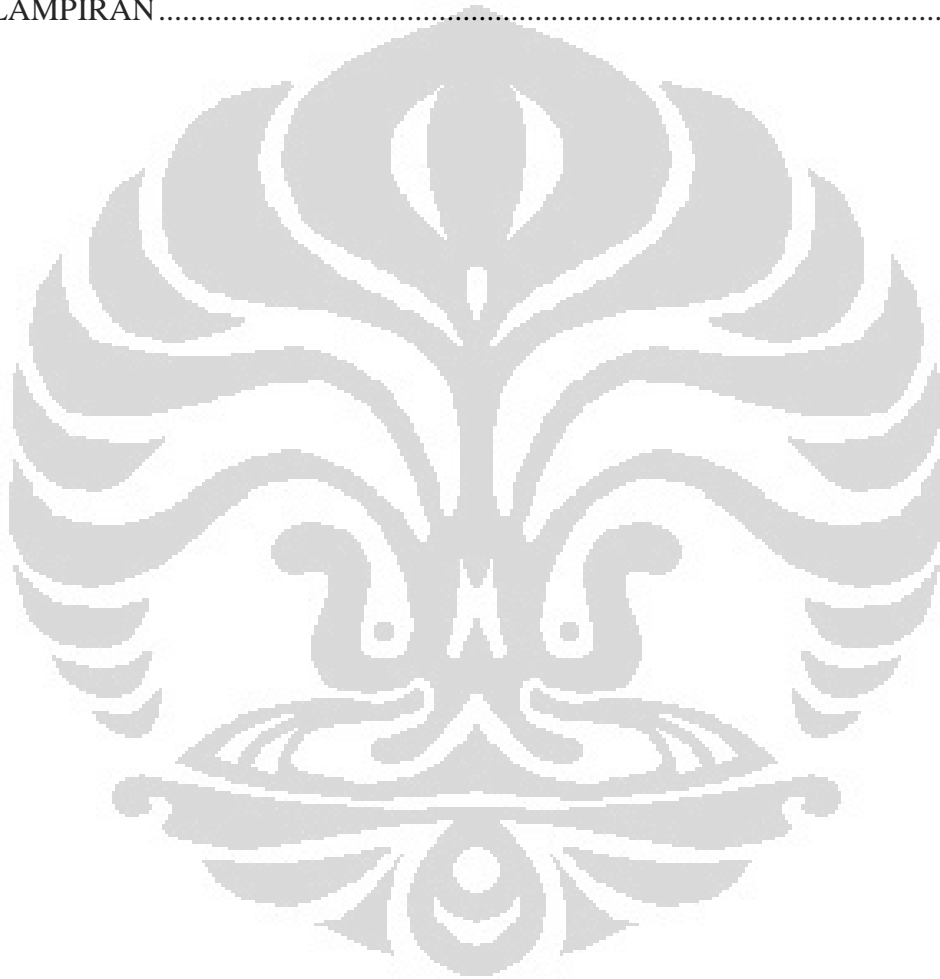
Keywords: microchannel heat exchanger, nanofluid, heat transfer

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS..... | ii |
| HALAMAN PENGESAHAN..... | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS | v |
| ABSTRAK..... | vi |
| ABSTRACT..... | vii |
| DAFTAR ISI..... | viii |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR TABEL..... | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN..... | xiv |
| DAFTAR SINGKATAN | xv |
| DAFTAR ISTILAH DAN SIMBOL | xvi |
| BAB I PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 LATAR BELAKANG..... | 1 |
| 1.2 TUJUAN PENELITIAN..... | 3 |
| 1.3 PEMBatasan MASALAH..... | 4 |
| 1.4 METODOLOGI PENELITIAN..... | 4 |
| 1.5 SISTEMATIKA PENULISAN | 5 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA..... | 6 |
| 2.1 ALAT PENUKAR KALOR..... | 6 |
| 2.2 <i>MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER</i> | 6 |
| 2.3 KLASIFIKASI SALURAN | 11 |
| 2.4 NANO FLUIDA..... | 12 |

| | | |
|--|---|----|
| 2.3.1 | Nano Fluida pada Alat Penukar Kalor Konvensional | 13 |
| 2.3.2 | Nano Fluida pada <i>Microchannel Heat Exchanger</i> | 14 |
| BAB III PERANCANGAN ALAT <i>MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER</i> | | 17 |
| 3.1 | KONSEP RANCANGAN | 17 |
| 3.2 | PEMBUATAN ALAT | 21 |
| 3.3 | PROSES PERAKITAN ALAT | 22 |
| 3.4 | SPESIFIKASI TEKNIS | 24 |
| BAB IV PENGUJIAN ALAT <i>MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER</i> | | 25 |
| 4.1 | TUJUAN PENGUJIAN | 25 |
| 4.2 | INSTALASI PENGUJIAN | 25 |
| 4.3 | VARIASI PENGUJIAN..... | 28 |
| 4.4 | PEMBUATAN NANO FLUIDA..... | 29 |
| 4.5 | PENGUKURAN SIFAT FISIKA NANO FLUIDA | 30 |
| BAB V HASIL DAN ANALISIS | | 32 |
| 5.1 | ANALISIS DATA TEMPERATUR KELUAR PADA SISI PANAS DAN DINGIN..... | 32 |
| 5.2 | ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN MASSA TERHADAP KALOR YANG DISERAP OLEH FLUIDA PENDINGIN..... | 33 |
| 5.3 | ANALISIS KALOR YANG DISERAP OLEH FLUIDA PENDINGIN TERHADAP PERUBAHAN TEMPERATUR | 34 |
| 5.4 | ANALISIS KOEFISIEN PERPINDAHAN KALOR KESELURUHAN PADA MCHE | 35 |
| 5.5 | ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI PARTIKEL NANO PADA FLUIDA KERJA TERHADAP BILANGAN NUSSELT | 37 |
| 5.6 | ANALISIS NILAI <i>EFFECTIVENESS</i> DAN NTU PADA MCHE | 39 |
| 5.7 | ANALISIS <i>PRESSURE DROP</i> PADA MCHE | 41 |

| | |
|---|----|
| 5.8 ANALISIS PERBANDINGAN TEMPERATUR PERMUKAAN LUAR MCHE | 42 |
| BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN | 45 |
| 6.1 KESIMPULAN | 45 |
| 6.2 SARAN | 45 |
| DAFTAR PUSTAKA | 46 |
| LAMPIRAN | 49 |



DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 1. 1 Kecepatan mikroprosesor yang meningkat dari tahun ke tahun [2]. . 1 | 1 |
| Gambar 1. 2 Tren fluks kalor pada komputer dari tahun 1970 hingga 2010 [4]. ... 2 | 2 |
| Gambar 2. 1 Variasi koefisien perpindahan kalor terhadap ukuran saluran pada aliran laminar berkembang penuh dari fluida udara dan air [12]. 7 | 7 |
| Gambar 2. 2 MCHE berbahan dasar keramik yang diujikan oleh Kee <i>et al.</i> [13]. 8 | 8 |
| Gambar 2. 3 Grafik hasil pengujian yang dilakukan oleh Dang <i>et al.</i> [16]..... 9 | 9 |
| Gambar 2. 4 Grafik perbandingan temperatur <i>chip</i> antara pendinginan udaradengan MCHS..... 10 | 10 |
| Gambar 2. 5 Perbandingan temperatur antar MCHS <i>single-layered</i> dan <i>double-layered</i> 11 | 11 |
| Gambar 2. 6 Bentuk saluran persegi..... 12 | 12 |
| Gambar 2. 7 Peningkatan kinerja termal pada radiator kendaraan dengan menggunakan nano fluida sebagai fluida kerjanya [22]. 14 | 14 |
| Gambar 2. 8 Perbandingan kinerja perpindahan kalor pada MCHS yang menggunakan air dan nano fluida sebagai fluida kerjanya [23]. 15 | 15 |
| Gambar 2. 9 Perbandingan koefisien perpindahan kalor keseluruhan antara air dan nano fluida CuO pada miniatur <i>plate heat exchanger</i> 16 | 16 |
| Gambar 3. 1 Gambar 3D <i>microchannel heat exchanger</i> 17 | 17 |
| Gambar 3. 2 Konsep <i>plate heat exchanger</i> yang dijadikan inspirasi. 18 | 18 |
| Gambar 3. 3 Susunan bagian-bagian <i>microchannel heat exchanger</i> 18 | 18 |
| Gambar 3. 4 Bagian <i>top side</i> dan <i>end side</i> 19 | 19 |
| Gambar 3. 5 Polyoxymethylene sebagai isolator. 20 | 20 |
| Gambar 3. 6 Bagian <i>hot side</i> dan <i>end side</i> sebagai tempat fluida mengalir. 20 | 20 |
| Gambar 3. 7 Bagian <i>hot side</i> atau <i>end side</i> yang terbuat dari pelat tembaga. 21 | 21 |
| Gambar 3. 8 Susunan bagian-bagian dari <i>microchannel heat exchanger</i> 22 | 22 |
| Gambar 3. 9 Proses pengencangan baut dengan menggunakan kunci L heksagonal. 23 | 23 |
| Gambar 3. 10 Proses pengencangan <i>fitting</i> selang dengan menggunakan kunci pas ukuran 10. 23 | 23 |
| Gambar 3. 11 Dimensi <i>microchannel heat exchanger</i> 24 | 24 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4. 1 Skema pengujian alat <i>microchannel heat exchanger</i> | 28 |
| Gambar 4. 2 <i>Ultrasonic processor</i> sebagai alat bantu pembuatan nano fluida. ... | 30 |
| Gambar 5. 1 Temperatur keluar fluida kerja pada sisi panas dan dingin. | 32 |
| Gambar 5. 2 Pengaruh laju aliran massa terhadap kalor yang diserap pada sisi dingin. | 34 |
| Gambar 5. 3 Kalor yang diserap pada sisi dingin sebagai fungsi dari perbedaan temperatur. | 35 |
| Gambar 5. 4 Koefisien perpindahan kalor keseluruhan untuk setiap fluida kerja. | 37 |
| Gambar 5. 5 Bilangan Nusselt fluida kerja pada variasi bilangan Reynolds yang berbeda..... | 38 |
| Gambar 5. 6 Nilai <i>effectiveness</i> dan NTU pada MCHE..... | 40 |
| Gambar 5. 7 Prediksi <i>effectiveness</i> yang terjadi pada MCHE. | 41 |
| Gambar 5. 8 Perbandingan antara hasil eksperimen dan prediksi <i>pressure drop</i> yang terjadi dengan menggunakan fluida kerja air dan nano fluida. | 42 |
| Gambar 5. 9 <i>Thermal imaging</i> pada sisi bagian atas MCHE..... | 43 |
| Gambar 5. 10 <i>Thermal imaging</i> pada titik tertentu di bagian atas MCHE. | 43 |
| Gambar 5. 11 <i>Thermal imaging</i> pada baut pengikat MCHE. | 44 |
| Gambar 5. 12 <i>Thermal imaging</i> pada bagian pelat tembaga tempat fluida kerja mengalir. | 44 |

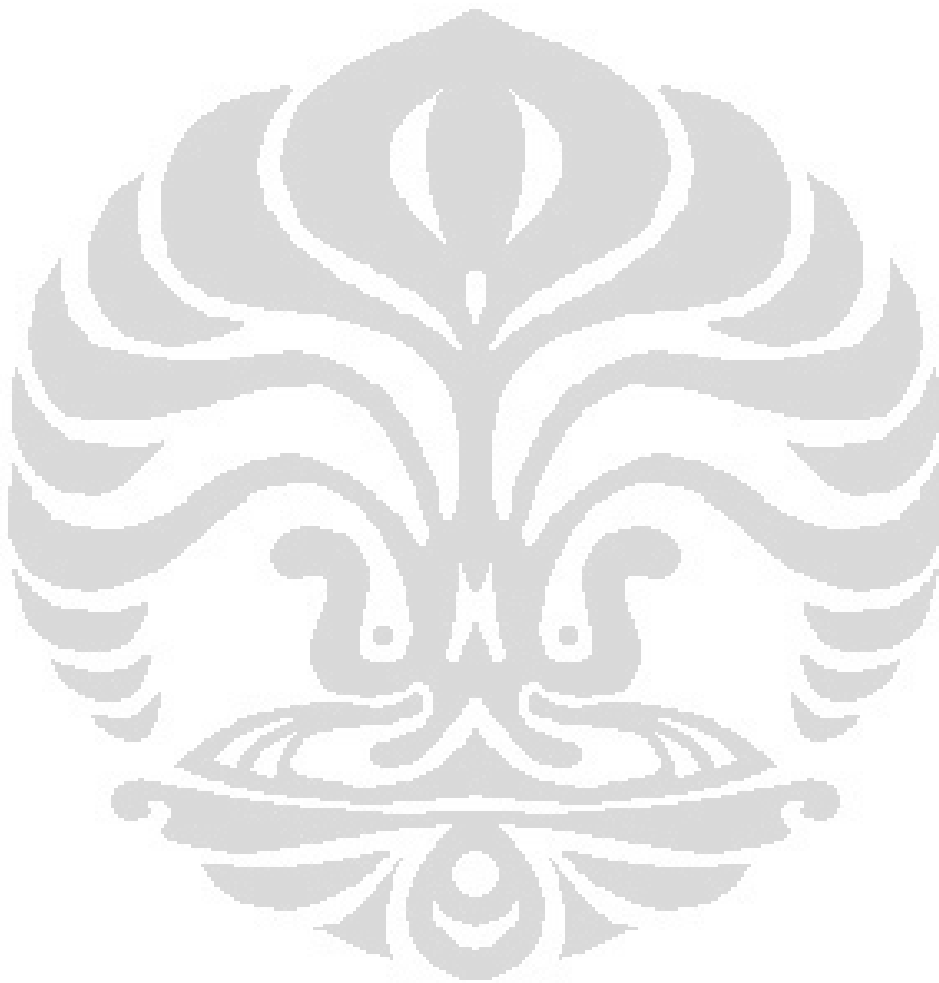
DAFTAR TABEL

| | | |
|------------|--|----|
| Tabel 2. 1 | Klasifikasi saluran fluida..... | 11 |
| Tabel 3. 1 | Keterangan gambar susunan bagian-bagian MCHE. | 19 |
| Tabel 4. 1 | Spesifikasi modul data akuisisi NI 9211. | 26 |
| Tabel 4. 2 | Spesifikasi pompa peristaltik FPU500 OMEGAFLEX | 26 |
| Tabel 4. 3 | Spesifikasi CTB yang digunakan dalam pengujian. | 27 |
| Tabel 4. 4 | Variasi pengujian alat MCHE | 29 |
| Tabel 4. 5 | Nilai konduktivitas termal dan viskositas dinamik fluida kerja yang digunakan dalam pengujian..... | 31 |



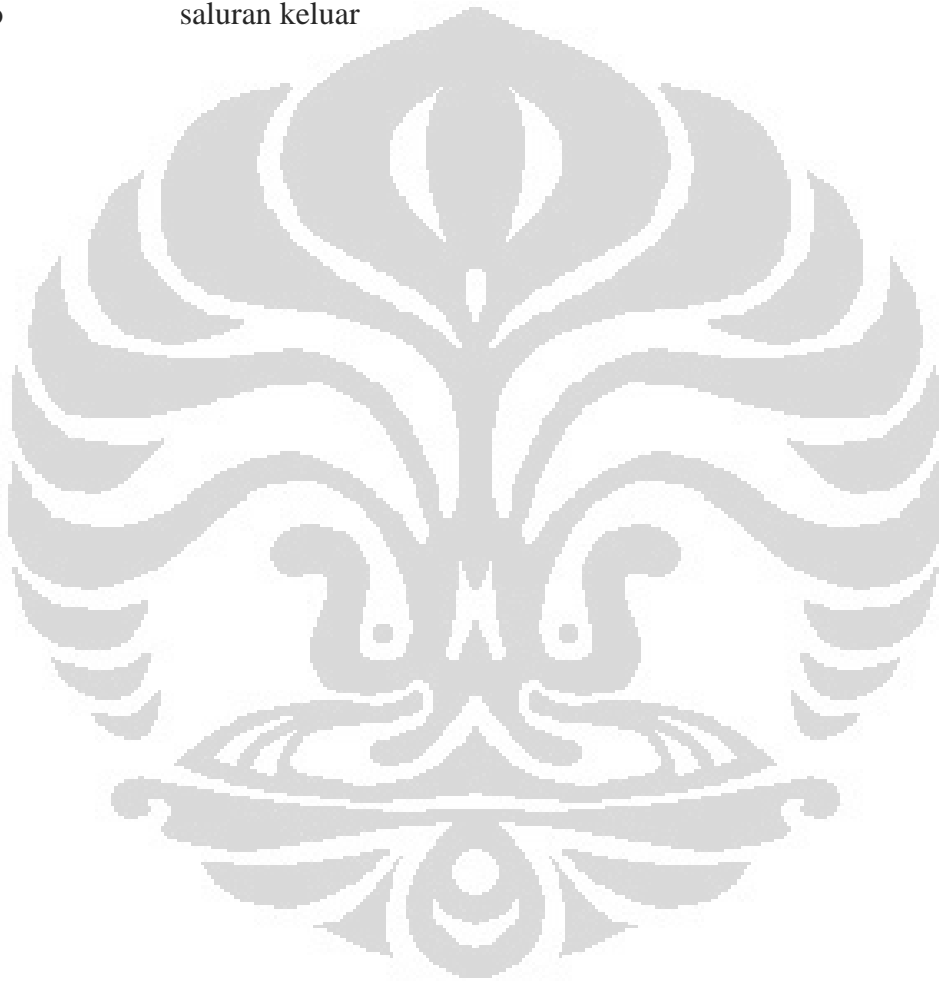
DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Data pengukuran tinggi saluran *microchannel heat exchanger*
Lampiran 2 Gambar kerja



DAFTAR SINGKATAN

| | |
|------|------------------------------------|
| MCHE | <i>microchannel heat exchanger</i> |
| POM | <i>polyoxymethylene</i> |
| h | sisi panas |
| c | sisi dingin |
| i | saluran masuk |
| o | saluran keluar |



DAFTAR ISTILAH DAN SIMBOL

| Simbol | Arti | Satuan |
|------------------|---|---------------------|
| A | luas area | m ² |
| C _{min} | kapasitas kalor spesifik minimum | J/K |
| C _p | kapasitas kalor | J/kg.K |
| D _h | diameter hidrolis | m |
| f | faktor friksi Fanning | - |
| h | koefisien perpindahan kalor konveksi | W/m ² .K |
| k | konduktivitas termal | W/m.K |
| L | panjang saluran | m |
| m | laju aliran massa | kg/s |
| NTU | <i>number of transfer unit</i> | - |
| Nu | bilangan Nusselt | - |
| Po | bilangan Poiseuille | - |
| Q | kalor yang diserap atau dilepas | Watt |
| Q _{max} | kalor maksimum | Watt |
| R'' _f | faktor pengerakan (<i>fouling</i>) | m ² .K/W |
| Re | bilangan Reynolds | - |
| R _w | hambatan termal dinding | m ² .K/W |
| T | temperatur | °C |
| U | koefisien perpindahan kalor keseluruhan | W/m ² .K |
| v | kecepatan aliran fluida | m/s |

Huruf Yunani

| | | |
|-------------------|---------------------------------|--------------------|
| Δp | <i>pressure drop</i> | Pa |
| ΔT _m | logaritmik temperatur rata-rata | °C |
| ΔT _{max} | perbedaan temperatur maksimum | °C |
| ε | <i>effectiveness</i> | - |
| μ | viskositas dinamik | N.s/m ² |

BAB I

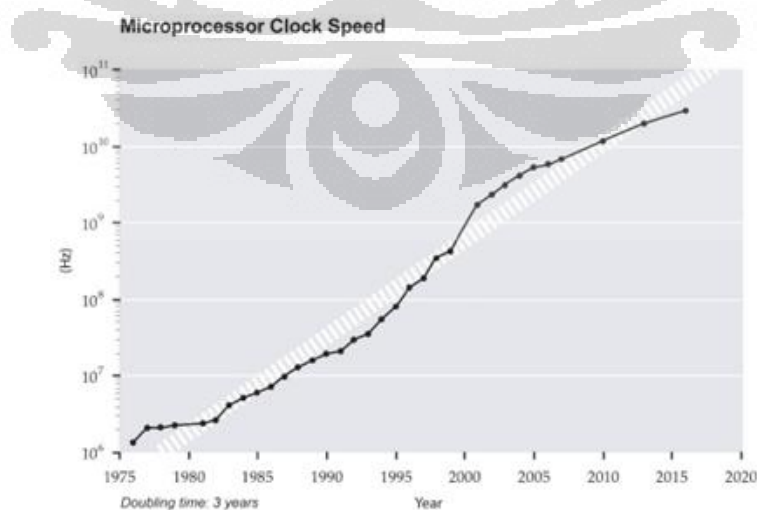
PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Pada era modern saat ini, kita tidak bisa terlepas dari yang namanya komputer. Hampir semua kegiatan seperti: membuat laporan, melakukan penghitungan, membaca artikel, belajar, maupun hanya sekedar bermain pasti menggunakan komputer.

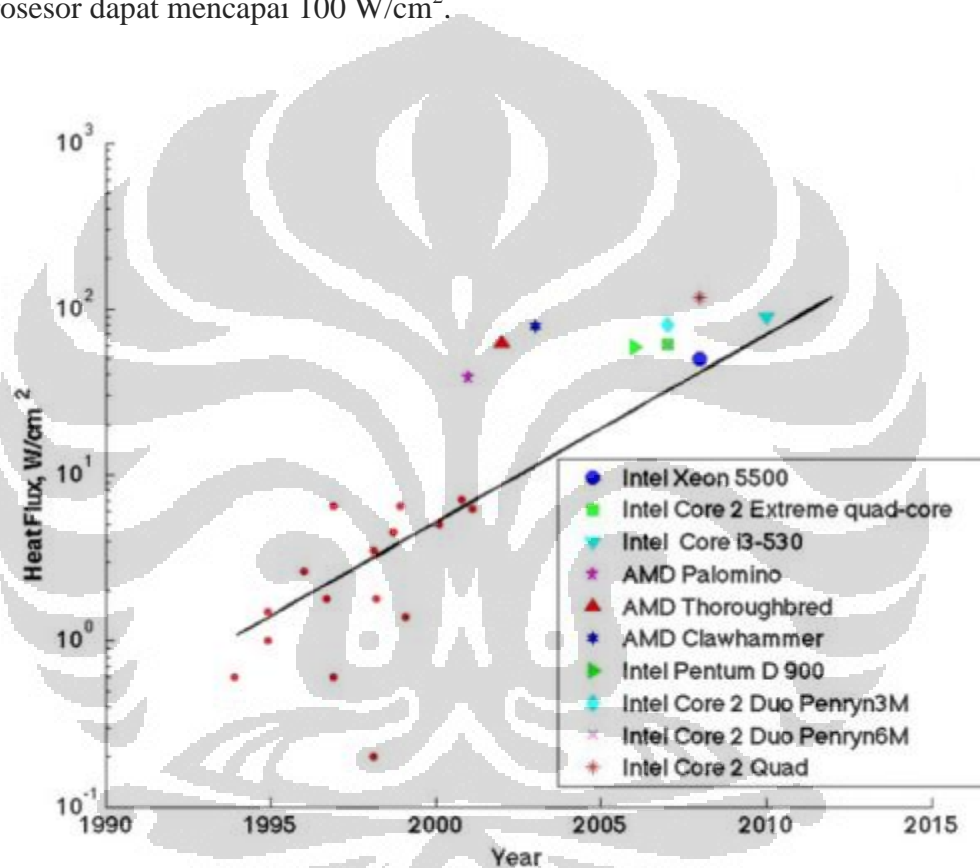
Dalam perkembangannya, beban kerja komputer semakin lama semakin berat. Komputer harus bisa menyelesaikan pekerjaan-pekerjaan yang berat maupun melakukan banyak pekerjaan atau biasa disebut dengan *multitasking*. Tentu hasil semua pekerjaan itu akan ditentukan oleh mikroprosesor pada komputer tersebut.

Mikroprosesor atau biasa disebut juga dengan MPU (*micro processing unit*) merupakan sebuah chip pada komputer yang berfungsi untuk memproses data [1]. Umumnya karakteristik mikroprosesor ditentukan oleh *clock speed*. *Clock speed* merupakan kecepatan mikroprosesor mengolah data dengan satuan Hertz. Dari tahun ke tahun, kecepatan mikroprosesor mengolah data semakin tinggi seperti yang ditunjukkan **Gambar 1.1**. Peningkatan kecepatan ini juga berbanding lurus dengan panas yang dihasilkan oleh mikroprosesor tersebut.



Gambar 1. 1 Kecepatan mikroprosesor yang meningkat dari tahun ke tahun [2].

Dalam beberapa tahun terakhir ini, peningkatan yang signifikan terhadap daya disipasi mikroprosesor akibat meningkatnya kecepatan prosesor mengolah data mengakibatkan peningkatan fluks kalor yang cukup tinggi yang diperkirakan melebihi 100 W/cm^2 [3]. Oleh karena itu, *thermal management* menjadi salah satu hal yang menantang dan penting mengenai kinerja sistem pendinginan. **Gambar 1.2** menunjukkan tren fluks kalor dari mikroprosesor dari tahun ke tahun. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa fluks kalor yang bisa dihasilkan oleh mikro prosesor dapat mencapai 100 W/cm^2 .



Gambar 1. 2 Tren fluks kalor mikro prosesor pada komputer dari tahun ke tahun [4].

Sistem pendinginan konvensional dengan menggunakan udara sudah tidak mampu lagi untuk menyerap fluks kalor yang telah disebutkan sebelumnya [3] [5]. Oleh karena itu, sistem pendinginan menggunakan cairan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan fluks kalor yang tinggi [6].

Seiring dengan berjalannya waktu, kemampuan dari sistem berpendingin cairan saat ini masih dirasa kurang optimal untuk dapat menyerap panas. Banyak ide untuk meningkatkan perpindahan kalor pada sistem berpendingin cairan yang

telah diteliti oleh banyak pihak. Ada dua ide yang dikemukakan oleh Jang dan Choi [7], yaitu menentukan geometri yang optimum untuk alat pendinginan tersebut untuk meningkatkan kinerja pendinginan dan mengurangi panjang karakteristik, D_h , untuk meningkatkan nilai perpindahan kalor, h . Ide kedua ini biasa disebut dengan *microchannel*. Penelitian mengenai sistem berpendingin cairan dengan saluran mikro menunjukkan bahwa sistem pendinginan tersebut dapat menyerap fluks kalor lebih banyak hingga ratusan W/cm^2 [8].

Selain dengan cara mengurangi panjang karakteristik, mengganti fluida kerja air dengan fluida kerja lain yang memiliki nilai termal konduktivitas yang lebih baik dapat juga meningkatkan nilai perpindahan kalor [9] [10]. Salah satu fluida kerja lain tersebut adalah nano fluida. Nano fluida adalah suatu suspensi antara fluida dasar dengan partikel solid yang mempunyai ukuran diameter dalam satuan nanometer atau 10^{-9} m. Dengan menggunakan partikel solid yang memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih baik daripada konduktivitas termal fluida dasar, secara teoritis suspensi ini akan memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih baik dibandingkan dengan fluida konvensional.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan diharapkan dengan memanfaatkan keunggulan-keunggulan dari *microchannel heat exchanger* dan nano fluida dapat diperoleh suatu sistem pendinginan yang optimal untuk peralatan elektronik.

1.2 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini antara lain:

1. Merancang dan menguji *prototype microchannel heat exchanger*.
2. Membandingkan kinerja perpindahan kalor dan *pressure drop* (jatuh tekan) pada *microchannel heat exchanger* dengan menggunakan fluida kerja air dan nano fluida.

1.3 PEMBATASAN MASALAH

Pembatasan masalah pada penelitian ini meliputi:

1. Merancang dan menguji alat *microchannel heat exchanger* dengan menggunakan air maupun nano fluida sebagai fluida kerjanya.
2. Pengujian dilakukan untuk mendapatkan data temperatur dan *pressure drop* pada *microchannel heat exchanger*.
3. Asumsi-asumsi perhitungan *microchannel heat exchanger* menggunakan asumsi-asumsi perhitungan alat penukar kalor konvensional.

1.4 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur
Sumber informasi yang terkait dengan topik didapat dari buku-buku, jurnal ilmiah internasional, dan situs-situs di internet.
2. Pembuatan prototipe alat
Pembuatan alat dilakukan melalui tahap perancangan yang dilakukan menggunakan *software* 3D Autodesk Inventor kemudian melakukan order pengerjaan di *workshop* pihak luar.
3. Pengujian alat
Pengujian dilakukan untuk mendapatkan data temperatur dan *pressure drop* pada *microchannel heat exchanger*.
4. Analisis dan kesimpulan hasil pengujian
Data yang didapat melalui hasil pengujian ditampilkan sebagai grafik kemudian data tersebut diolah menjadi besaran yang lain. Hasil pengolahan dan grafik pengujian ini kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan data lain untuk melihat apakah hasil pengujian dapat diterima atau tidak.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

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

BAB I: PENDAHULUAN

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

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini berisi tentang dasar teori alat penukar kalor, *microchannel heat exchanger*, dan nano fluida.

BAB III: PERANCANGAN ALAT *MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER*

Bagian ini berisi tentang bagaimana bentuk, spesifikasi, proses perakitan, dan konstruksi dari alat *microchannel heat exchanger*.

BAB IV: PENGUJIAN ALAT *MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER*

Bagian ini berisi tentang tujuan, instalasi, skema, serta variasi pengujian *microchannel heat exchanger* dan peralatan yang dibutuhkan dalam pengujian.

BAB V: ANALISIS HASIL DAN PERHITUNGAN

Bagian ini berisi tentang analisis hasil yang didapat dari pengujian, serta perhitungan-perhitungan yang dilakukan untuk mendapatkan besaran yang lain yang akan ditampilkan di grafik.

BAB VI: KESIMPULAN DAN SARAN

Bagian ini berisi tentang kesimpulan dari hasil pengujian yang telah dilakukan dan saran untuk pengembangan penelitian kedepannya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 ALAT PENUKAR KALOR

Alat penukar kalor (*heat exchanger*) adalah suatu alat yang digunakan untuk memindahkan energi termal antara dua fluida atau lebih, atau antara material solid dengan fluida, pada temperatur yang berbeda [11]. Biasanya alat penukar kalor digunakan untuk memanaskan atau mendinginkan aliran fluida maupun untuk proses evaporasi atau kondensasi satu fluida atau lebih.

Klasifikasi alat penukar kalor secara garis besar terbagi dalam dua macam, yaitu alat penukar kalor langsung dan alat penukar kalor tidak langsung. Alat penukar kalor langsung adalah tipe alat penukar kalor di mana terjadi pencampuran antara fluida-fluidanya. Alat penukar kalor langsung biasa disebut dengan *regenerator*. Sedangkan alat penukar kalor tidak langsung adalah alat penukar kalor di mana fluida-fluidanya dipisahkan oleh dinding pemisah. Alat penukar kalor tidak langsung biasa disebut dengan *recuperator*.

Contoh dari alat penukar kalor adalah *shell and tube exchanger*, *plate heat exchanger*, radiator kendaraan, kondensor, evaporator, pemanas air, *heat pipe*, *heat sink*, dan *cooling tower*.

2.2 MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER

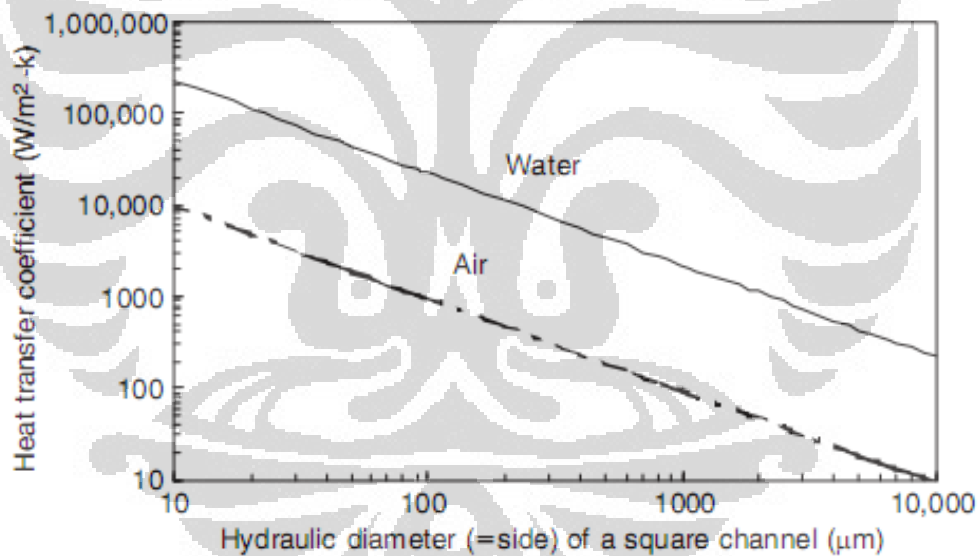
Microchannel heat exchanger adalah alat penukar kalor dengan dimensi *channel* yang dilalui oleh fluida dalam ukuran yang kecil. Kebutuhan akan dimensi saluran yang kecil untuk aplikasi perpindahan kalor menurut Kandlikar *et al.* [12] disebabkan oleh tiga alasan utama, yaitu:

- a. Peningkatan nilai perpindahan kalor,
- b. Meningkatnya disipasi fluks kalor pada *microelectronic devices*,
- c. Munculnya alat-alat berskala mikro yang membutuhkan pendinginan.

Persamaan (2.1) memperlihatkan hubungan antara koefisien perpindahan kalor (h), konduktivitas termal (k), bilangan Nusselt (Nu), dan diameter hidrolis dari saluran (D_h). Persamaan tersebut menunjukkan akan terjadi peningkatan nilai h yang signifikan apabila ukuran saluran diperkecil.

$$h = Nu \frac{k}{D_h} \quad (2.1)$$

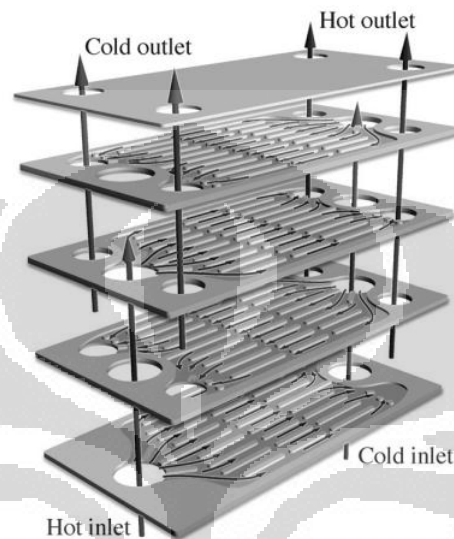
Efek ukuran diameter hidrolis terhadap perpindahan kalor ditunjukkan oleh **Gambar 2.1**. Grafik pada gambar tersebut memperlihatkan dua fluida, yaitu air dan udara, yang diujikan pada ukuran diameter hidrolis yang berbeda-beda. Dapat dilihat bahwa ukuran diameter hidrolis yang semakin mengecil membuat koefisien perpindahan kalor menjadi semakin bertambah.



Gambar 2.1 Variasi koefisien perpindahan kalor terhadap ukuran saluran pada aliran laminar berkembang penuh dari fluida udara dan air [12].

Kee *et al.* [13] mendesain, memproduksi, dan mengevaluasi *microchannel heat exchanger* (MCHE) berbahan keramik alumina dengan kandungan 94%. Material keramik memiliki banyak keuntungan dibandingkan dengan bahan logam, salah satunya adalah dapat beroperasi pada temperatur yang sangat tinggi. Proses pabrikasi PLIS (Pressure Laminated Integrated Structure) digunakan untuk

membuat MCHE ini. Pada MCHE ini terdapat 10 saluran mikro dengan tinggi 500 mikrometer dengan lebar 2.8 mm. Hasil yang didapat melalui penelitian ini menunjukkan bahwa nilai efektivitas alat penukar kalor dapat mencapai nilai 70%. **Gambar 2.2** di bawah ini memperlihatkan desain rancangan MCHE yang diujikan.



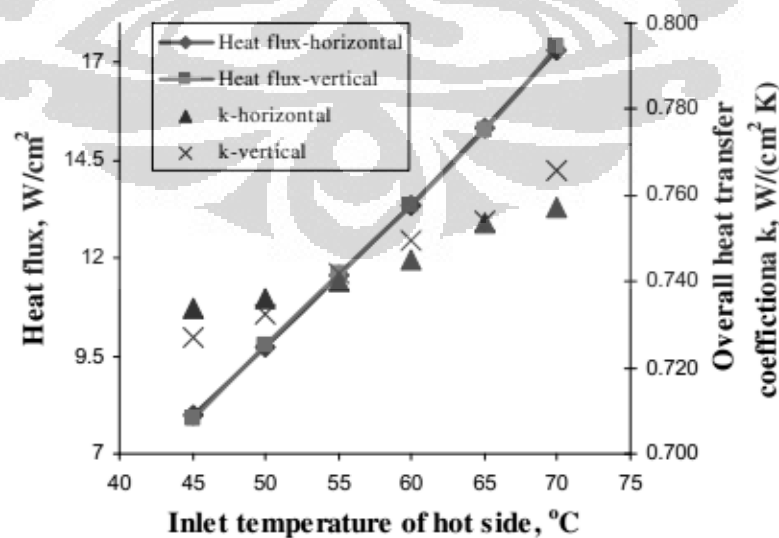
Gambar 2. 2 MCHE berbahan dasar keramik yang diujikan oleh Kee *et al.* [13].

Kang dan Tseng [14] menguji *micro cross-flow heat exchanger* dengan menggunakan air sebagai fluida kerjanya. Proses produksi yang digunakan untuk memproduksi MCHE ini adalah dengan MEMS, yaitu Micro-Electro Mechanical System. Pada MCHE ini terdapat 26 lapisan dimana pada setiap lapisan terdapat 125 saluran dengan tinggi 200 μm dan lebar 40 μm . Hasil pengujian menunjukkan laju perpindahan kalor dan *pressure drop* sangat bergantung pada temperatur rata-rata dari sisi panas dan dingin. Pada tingkat efektivitas yang sama, temperatur rata-rata yang tinggi menghasilkan laju perpindahan kalor yang besar, namun laju perpindahan kalor dan *pressure drop* menurun seiring menurunnya tingkat efektivitas. Dari dua material yang digunakan sebagai material dasar alat, yaitu tembaga dan silikon, ditemukan bahwa pengaruh material sangat kecil pada *microchannel heat exchanger* akibat tebal fin yang sangat kecil, sehingga membuat resistansi termalnya pun juga sangat kecil.

Kou *et al.* [15] melakukan simulasi pengujian dengan mengatur lebar dan tinggi saluran untuk mendapatkan kinerja termal yang optimal dari *microchannel*

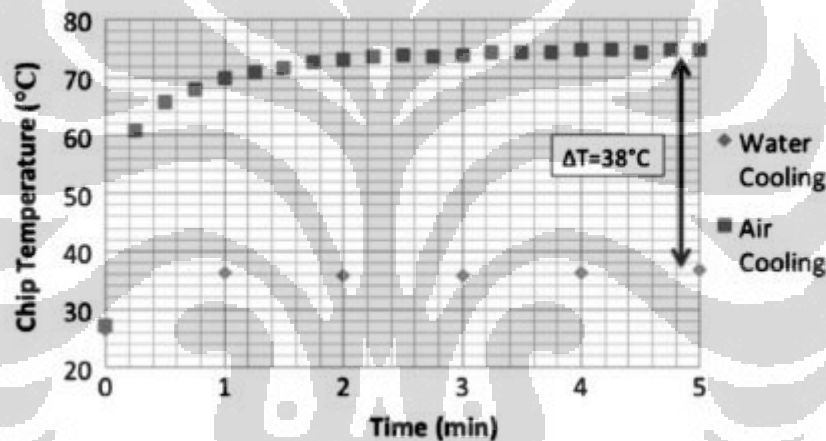
heat sink (MCHS). Tidak berbeda jauh dengan MCHE, pada MCHS sumber panas bukan merupakan aliran fluida panas, tetapi berupa alat yang menghasilkan panas. Jadi, hanya terdapat satu aliran fluida pada MCHS. Lebar saluran yang diujikan berkisar dari 20 μm hingga 180 μm , sedangkan tinggi saluran yang diujikan adalah 400, 600, 800, dan 1000 μm . Hasil pengujian maupun perhitungan menunjukkan bahwa semakin besar luas area aliran, semakin besar daya aliran, dan semakin pendek ketebalan material akan menghasilkan resistansi termal yang rendah. Pengujian tinggi saluran dengan lebar saluran yang konstan menunjukkan bahwa semakin kecil tinggi saluran, resistansi termal yang dihasilkan semakin rendah, sedangkan untuk pengujian lebar saluran dengan tinggi saluran yang konstan menunjukkan bahwa semakin kecil lebar saluran, resistansi termal yang dihasilkan semakin tinggi.

Dang *et al.* [16] melakukan simulasi dan pengujian untuk mempelajari karakteristik aliran fluida dan perpindahan kalor pada *microchannel heat exchanger* dengan saluran berbentuk persegi. Pada MCHE ini terdapat 10 saluran mikro dengan tinggi saluran 300 μm dan lebar 500 μm . Dari hasil pengujian didapat nilai fluks kalor sebesar 17.4 W/cm^2 dari fluida kerja air bertemperatur masuk pada sisi panas 70°C dengan laju aliran massa 0.2503 g/s dan pada sisi dingin 21.5°C dengan laju aliran massa 0.2906 g/s seperti yang terlihat pada **Gambar 2.3** di bawah ini.



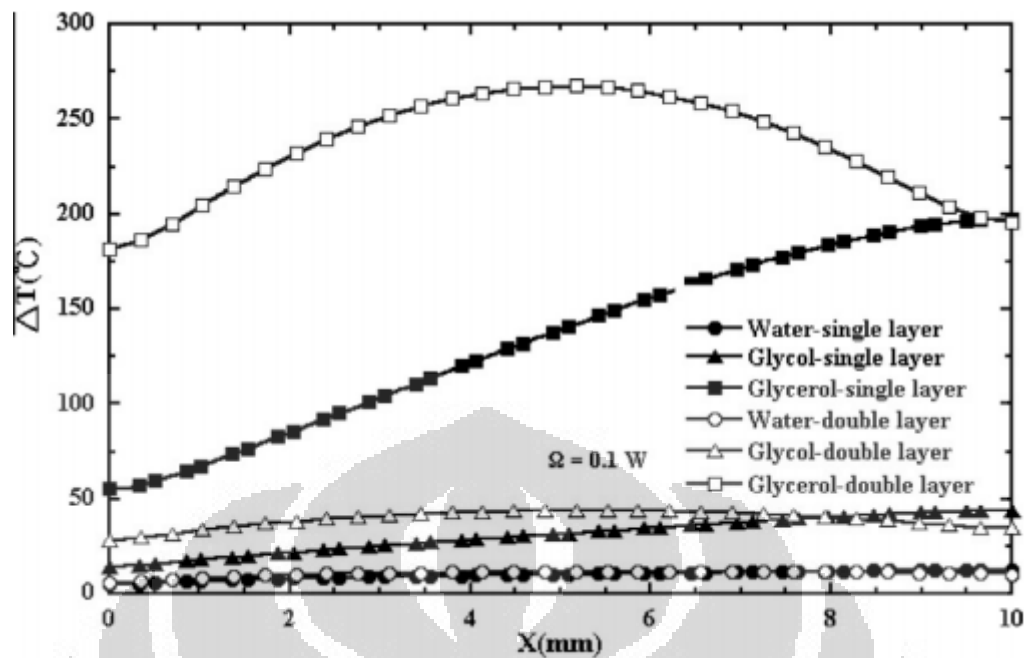
Gambar 2.3 Grafik hasil pengujian yang dilakukan oleh Dang *et al.* [16].

Koyuncuoglu *et al.* [17] mendesain, membubrikasi, dan menguji *microchannel heat sink* sebagai pendinginan *chip*. MCHS ini dibuat dengan menggunakan teknologi *micromachining*. Saluran yang diujikan mempunyai tinggi 20 μm dan 50 μm dan lebar 100 μm dan 200 μm . Saluran yang diujikan terdiri dari *single*, *multi channel*, dan *10-channel*. Dari hasil pengujian didapat bahwa fluks kalor sebesar 50 W/cm^2 berhasil diserap dari seluruh permukaan *chip*. **Gambar 2.4** memperlihatkan pengujian pengaplikasian MCHS sebagai pendinginan *chip*. Hasil pengujian ini kemudian dibandingkan dengan pengujian dengan pendinginan udara. Setelah pengujian selama 5 menit, pendinginan menggunakan MCHS dapat menurunkan temperatur sebesar 38°C lebih rendah bila dibandingkan dengan menggunakan pendinginan udara biasa.



Gambar 2.4 Grafik perbandingan temperatur *chip* antara pendinginan udaradengan MCHS.

Hung *et al.* [18] menguji dan menganalisis karakteristik MCHS *double-layered*. Tujuan pengujian ini untuk membandingannya dengan MCHS *single-layered* yang diujikan oleh Tuckerman dan Pease [8]. **Gambar 2.5** di bawah ini memperlihatkan variasi distribusi temperatur di dalam saluran dengan menggunakan tiga jenis fluida kerja yang berbeda pada MCHS *single-layered* dan *double-layered*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan karakteristik dimensi yang sama, MCHS *double-layered* memiliki kinerja termal yang lebih baik sebesar 6.3% daripada MCHS *single-layered*.



Gambar 2. 5 Perbandingan temperatur antar MCHS *single-layered* dan *double-layered*.

2.3 KLASIFIKASI SALURAN

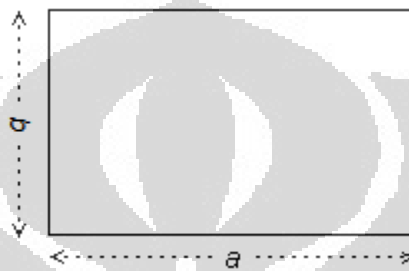
Kandlikar *et al.* [12] membagi-bagi tipe saluran (*channel*) berdasarkan ukuran diameter hidroliknya (D_h). Seperti yang terlihat pada **Tabel 2.1**, ukuran saluran mikro berada pada 10 hingga 200 mikrometer. Untuk bentuk persegi, ukuran saluran yang terkecil (panjang sisi yang lebih pendek) dapat digunakan sebagai parameter pengklasifikasian saluran.

Tabel 2. 1 Klasifikasi saluran fluida

| | |
|------------------------------------|--|
| <i>Conventional Channels:</i> | $D_h > 3 \text{ mm}$ |
| <i>Minichannels:</i> | $200 \mu\text{m} \leq D_h \leq 3 \text{ mm}$ |
| <i>Microchannels:</i> | $10 \mu\text{m} \leq D_h \leq 200 \mu\text{m}$ |
| <i>Transitional Channels:</i> | $0.1 \mu\text{m} \leq D_h \leq 10 \mu\text{m}$ |
| <i>Transitional Microchannels:</i> | $1 \mu\text{m} \leq D_h \leq 10 \mu\text{m}$ |
| <i>Transitional Nanochannels:</i> | $0.1 \mu\text{m} \leq D_h \leq 1 \mu\text{m}$ |
| <i>Molecular Nanochannels:</i> | $D_h \leq 0.1 \mu\text{m}$ |

Diameter hidrolis dapat dihitung sebagai empat kali luas area dibagi dengan panjang keliling saluran [19]. Untuk bentuk saluran berupa lingkaran, diameter hidrolisnya adalah diameter lingkaran itu sendiri, sedangkan untuk bentuk persegi diameter hidrolisnya dapat diukur melalui persamaan (2.2) berdasarkan **Gambar 2.6**.

$$D_h = \frac{4ab}{2(a+b)} \quad (2.2)$$



Gambar 2. 6 Bentuk saluran persegi.

Klasifikasi yang dilakukan oleh Kandlikar *et al.* bukanlah acuan mutlak untuk menentukan dimensi saluran *microchannel*. Ada beberapa peneliti yang tidak mengikuti klasifikasi yang disusun oleh Kandlikar. Kee *et al.* [13] membuat *microchannel heat exchanger* dimana terdapat 10 saluran dengan tinggi *channel* sebesar 500 μm dan lebar 2.8 mm. Diameter hidrolis yang didapat dari tinggi dan lebar MCHE tersebut adalah 0.848 mm. MCHE yang diujikan oleh Dang *et al.* [16] mempunyai 10 saluran mikro dengan tinggi *channel* sebesar 300 μm dan lebar 500 μm .

2.4 NANO FLUIDA

Bertahun-tahun yang lalu, ide untuk meningkatkan konduktivitas termal dengan mensuspensikan partikel solid pada fluida telah diteliti. Sayangnya jenis fluida tersebut tidak dapat digunakan sebagai media penghantar kalor karena alasan sedimentasi, erosi, pengotoran, dan peningkatan *pressure drop*.

Pada tahun 1995, Choi memperkenalkan istilah nano fluida sebagai media perpindahan kalor yang dapat meningkatkan konduktivitas termal fluida dasar [9].

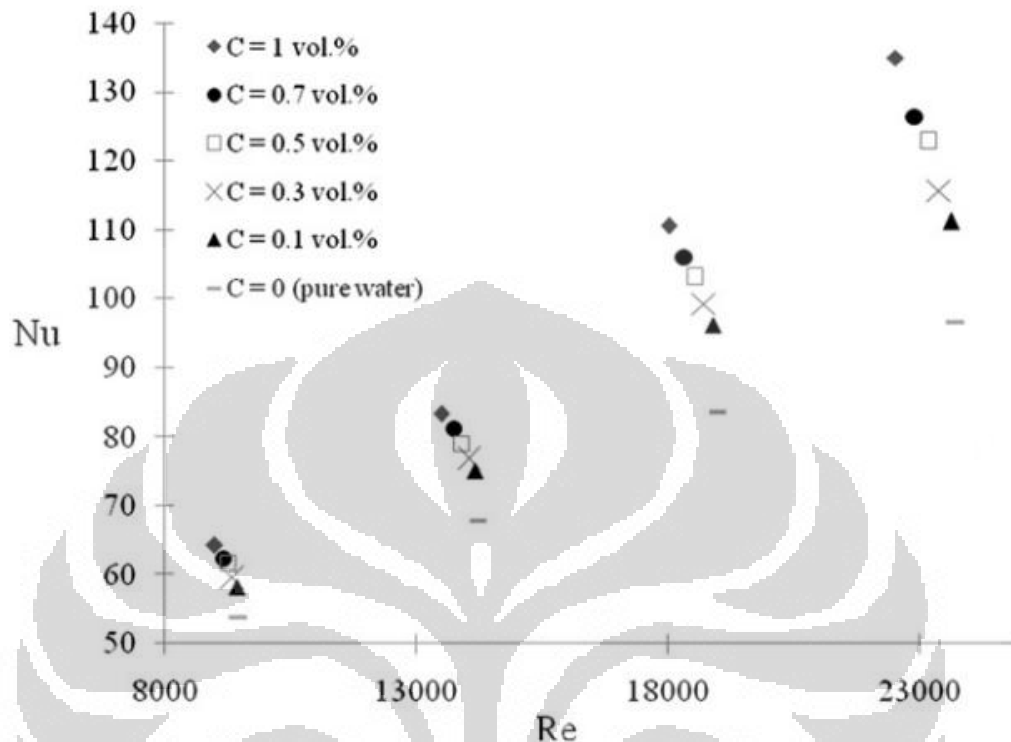
Penelitian lain yang dilakukan oleh Nguyen *et al.* [20] terhadap penggunaan nano fluida, campuran partikel nano Al_2O_3 dengan air, untuk pendinginan mikroprosesor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien perpindahan kalor meningkat sebesar 40% dibandingkan dengan fluida dasar.

2.3.1 Nano Fluida pada Alat Penukar Kalor Konvensional

Farajollahi *et al.* [21] melakukan pengujian secara eksperimen terhadap karakteristik perpindahan kalor dari nano fluida Al_2O_3 -air dan TiO_2 -air pada *shell and tube heat exchanger*. Konsentrasi nano fluida yang digunakan untuk Al_2O_3 -air adalah 0.3%, 0.5%, 0.75%, 1%, dan 2%, sedangkan untuk TiO_2 -air adalah 0.15%, 0.3%, 0.5%, dan 0.75%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan partikel nano ke dalam fluida dasar meningkatkan kinerja perpindahan kalor dan menghasilkan koefisien perpindahan kalor yang lebih besar dibandingkan dengan fluida dasarnya. Kedua nano fluida mempunyai nilai konsentrasi volume optimal yang berbeda untuk menghasilkan karakteristik perpindahan kalor paling maksimal. Partikel nano dengan diameter paling kecil (partikel TiO_2) mempunyai nilai konsentrasi volume optimal yang rendah. Jadi, nilai perpindahan kalor yang optimal pada nano fluida TiO_2 -air terjadi pada konsentrasi volume partikel nano yang rendah, sedangkan Al_2O_3 -air pada konsentrasi volume partikel nano yang tinggi.

Peyghambarzadeh *et al.* [22] melakukan pengujian untuk membandingkan penggunaan nano fluida dengan air murni sebagai fluida kerja pada radiator kendaraan bermotor. Lima konsentrasi volume yang berbeda dari nano fluida Al_2O_3 -air, yaitu 0.1% hingga 1% akan diujikan. Hasil pengujian seperti yang terlihat pada **Gambar 2.7** menunjukkan bahwa penambahan partikel nano Al_2O_3 ke dalam air dapat meningkatkan kinerja perpindahan kalor pada radiator kendaraan bermotor. Khususnya pada konsentrasi volume 1%, kinerja perpindahan kalor meningkat sebesar 45% dibandingkan dengan air murni. Hasil lain dari pengujian juga menunjukkan bahwa meningkatkan debit aliran dari fluida kerja juga meningkatkan koefisien perpindahan kalor baik pada air murni

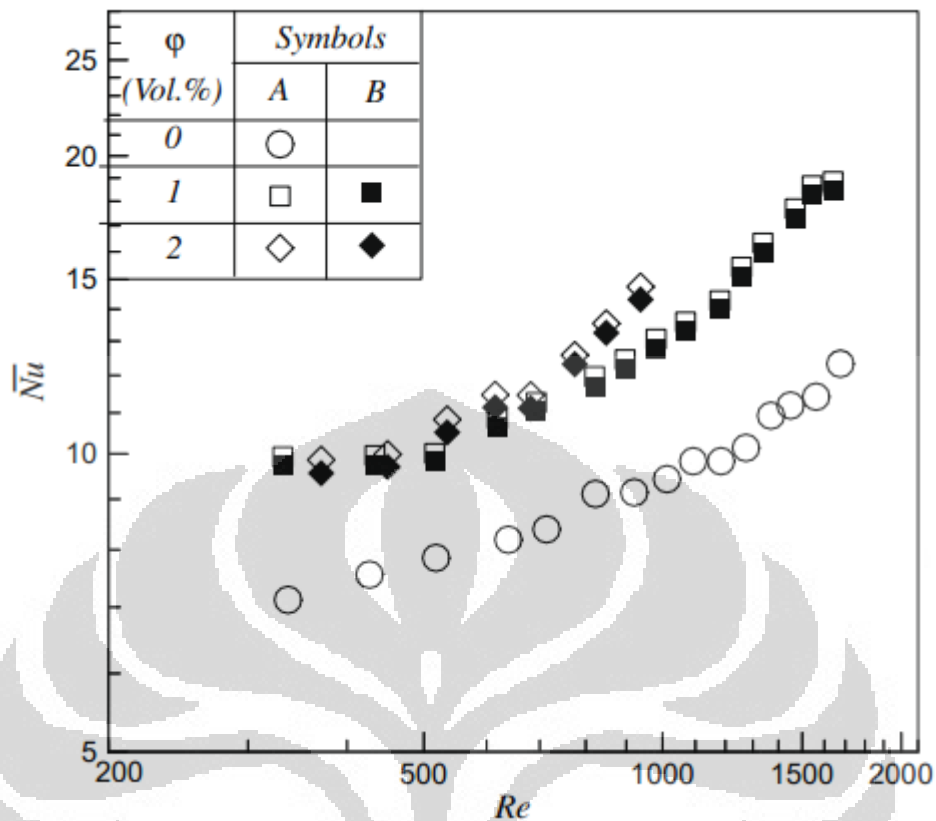
maupun nano fluida. Sementara itu variasi temperatur masuk fluida ke dalam radiator hanya meningkatkan kinerja perpindahan kalor cukup sedikit.



Gambar 2.7 Peningkatan kinerja termal pada radiator kendaraan dengan menggunakan nano fluida sebagai fluida kerjanya [22].

2.3.2 Nano Fluida pada *Microchannel Heat Exchanger*

Ho *et al.* [23] melakukan pengujian melalui eksperimen untuk menginvestigasi kinerja pendinginan secara konveksi paksa pada *microchannel heat sink* berbahan dasar tembaga dengan menggunakan nano fluida Al_2O_3 -air sebagai cairan pendinginnya. MCHS ini terdiri dari 25 saluran persegi dengan panjang saluran 50 mm, lebar 283 μm , dan 800 μm . Fluida kerja yang digunakan adalah air dan nano fluida Al_2O_3 -air 1% dan 2%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa koefisien perpindahan kalor nano fluida Al_2O_3 -air 1% jauh lebih baik daripada air murni. Pada *flow rate* yang paling besar dalam pengujian, rata-rata koefisien perpindahan kalor meningkat sebesar 70% dibandingkan dengan air murni. **Gambar 2.8** di bawah ini memperlihatkan peningkatan kinerja perpindahan kalor MCHS yang menggunakan nano fluida sebagai fluida kerjanya.



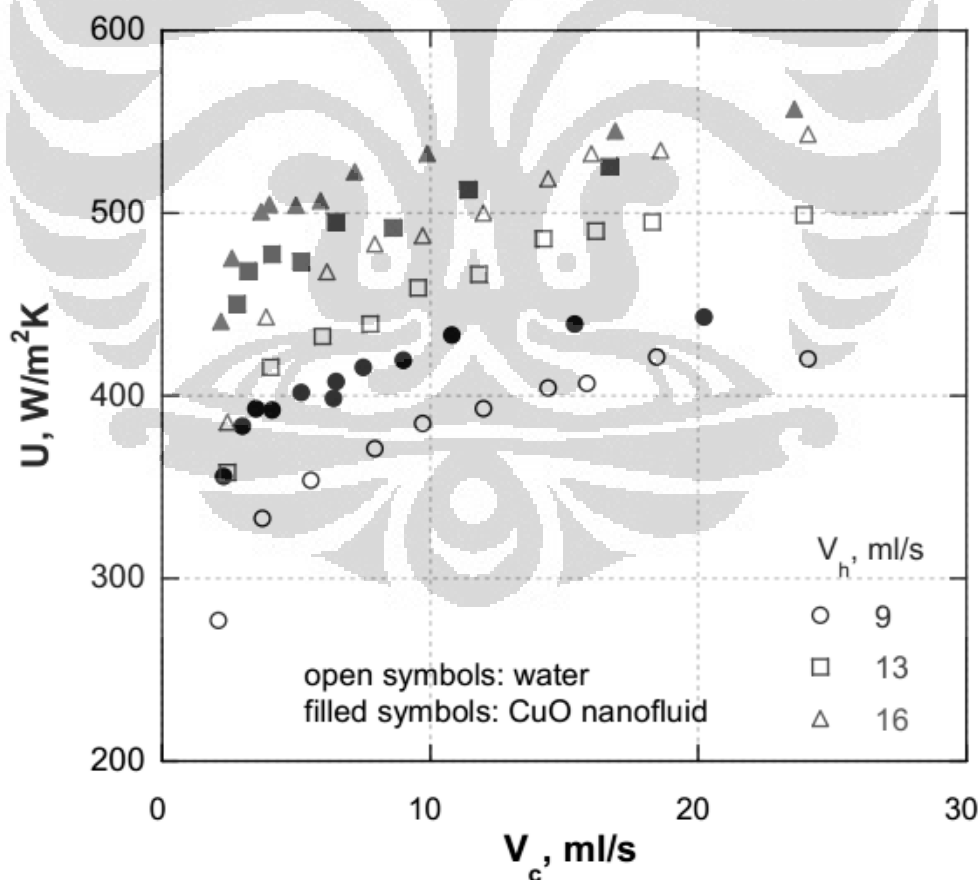
Gambar 2. 8 Perbandingan kinerja perpindahan kalor pada MCHS yang menggunakan air dan nano fluida sebagai fluida kerjanya [23].

Hung dan Yan [24] melakukan analisis *three-dimensional* terhadap efek penggunaan nano fluida dan memvariasikan parameter geometrik pada resistansi termal MCHS *double-layered*. Parameter geometrik yang diatur antara lain adalah jumlah saluran, rasio lebar saluran, rasio lebar dan tinggi saluran, dan daya pemompaan. Nano fluida yang digunakan dalam pengujian adalah Al_2O_3 , CuO , dan TiO_2 dengan konsentrasi 1% hingga 5%. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nano fluida Al_2O_3 -air dengan konsentrasi 1% meningkatkan kinerja termal rata-rata sebesar 26% dibandingkan dengan air murni.

Mohammed *et al.* [25] melakukan analisis numerik untuk mengetahui efek penggunaan nano fluida pada bilangan Reynolds yang berbeda terhadap karakteristik perpindahan kalor dan aliran fluida pada MCHE dengan saluran berbentuk persegi. Nano fluida yang digunakan dalam analisis adalah Al_2O_3 , SiO_2 , Ag (perak), dan TiO_2 dengan konsentrasi volume 2%, 5%, dan 10% dan menggunakan air sebagai fluida dasarnya. Hasil analisis menunjukkan bahwa

Al_2O_3 menghasilkan koefisien perpindahan kalor yang paling baik diikuti oleh TiO_2 , SiO_2 , air, dan Ag.

Pantzali *et al.* [26] melakukan eksperimen dan analisis numerik terhadap penggunaan nano fluida pada miniatur *plate heat exchanger* (PHE). Nano fluida yang digunakan adalah CuO-air dengan konsentrasi 2%, 4%, dan 8%. Hasil pengujian secara umum menunjukkan bahwa penggunaan nano fluida dapat mengurangi *flow rate* hingga 4 kali lebih rendah dibandingkan menggunakan air murni dan juga menurunkan *pressure drop* hingga 6 kali lebih rendah. Oleh karena itu, penggunaan nano fluida tidak hanya menyerap energi yang sama dengan menggunakan *flow rate* yang lebih rendah, tetapi juga mengurangi daya pemompaan. **Gambar 2.9** membandingkan perpindahan kalor keseluruhan alat penukar kalor dengan menggunakan fluida kerja air dan CuO pada variasi *flow rate* fluida dingin dan fluida panas yang berbeda-beda.



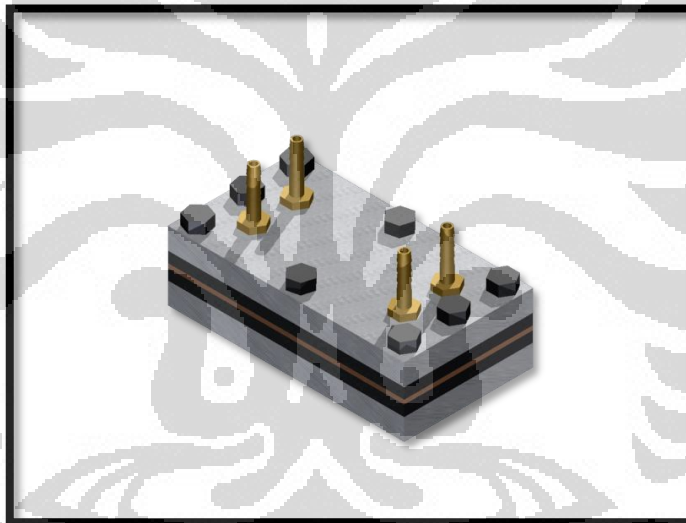
Gambar 2.9 Perbandingan koefisien perpindahan kalor keseluruhan antara air dan nano fluida CuO pada miniatur *plate heat exchanger* [26].

BAB III

PERANCANGAN ALAT *MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER*

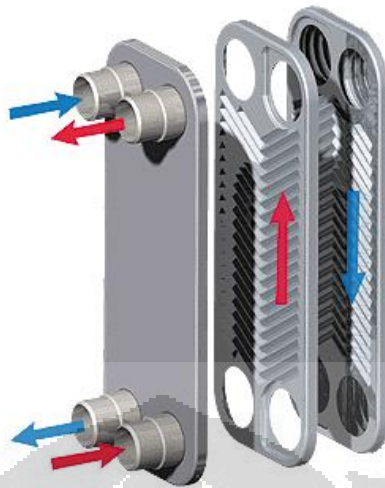
3.1 KONSEP RANCANGAN

Pada penelitian kali ini konstruksi alat *microchannel heat exchanger* yang dibuat peneliti menggabungkan konsep kerja dari *microchannel* dan *plate heat exchanger*. *Plate heat exchanger* merupakan salah satu jenis alat penukar kalor yang menggunakan pelat dengan ketebalan tertentu sebagai dinding pemisah antara fluida panas dan dinginnya. **Gambar 3.1** memperlihatkan konsep gambar tiga dimensi dari MCHE yang digunakan dalam pengujian.



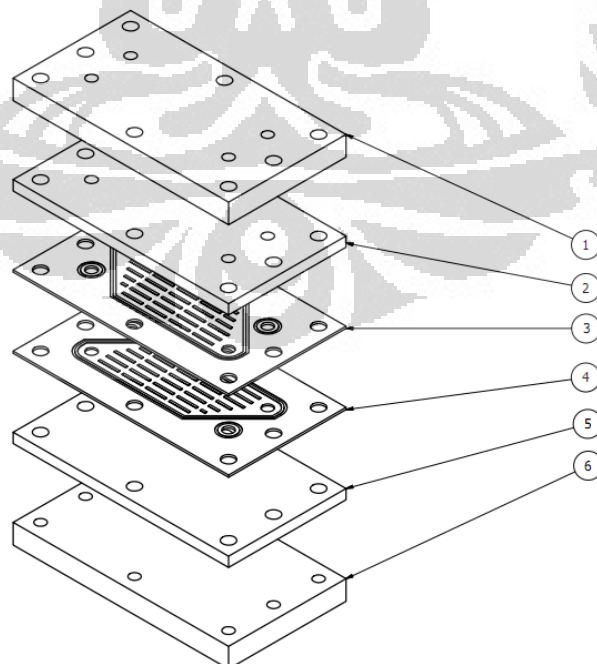
Gambar 3.1 Gambar 3D *microchannel heat exchanger*.

Pada *plate heat exchanger* yang terdiri dari beberapa pelat, setiap pelat dilewati salah satu aliran fluida panas atau dingin. Aliran fluida panas atau dingin menempati setiap pelat secara bergantian. Contoh: jika ada 4 buah pelat, maka aliran fluidanya secara berurutan adalah panas-dingin-panas-dingin. **Gambar 3.2** memperlihatkan ilustrasi aliran fluida panas dan dingin yang menempati lapisan pelat yang berbeda-beda. Untuk mencegah agar aliran fluida panas dan dingin tidak bercampur, karet *sealant* (gasket) dipasangkan pada setiap pelat.



Gambar 3. 2 Konsep *plate heat exchanger* yang dijadikan inspirasi.

Alat *microchannel heat exchanger* yang digunakan dalam pengujian ini terdiri dari enam komponen utama. Setiap komponen tersebut memiliki fungsi tersendiri dan saling menunjang satu dan lainnya. Enam komponen utama tersebut sesuai urutan dari atas ke bawah seperti yang terlihat pada **Gambar 3.3**, yaitu: *top side*, *top side isolator*, *hot side* (sisi panas), *cold side* (sisi dingin), *isolator end side*, dan *end side*.



Gambar 3. 3 Susunan bagian-bagian *microchannel heat exchanger*.

Tabel 3. 1 Keterangan gambar susunan bagian-bagian MCHE.

| No. | Keterangan |
|-----|---------------------|
| 1 | <i>Top side</i> |
| 2 | <i>POM top side</i> |
| 3 | <i>Hot side</i> |
| 4 | <i>Cold side</i> |
| 5 | <i>POM end side</i> |
| 6 | <i>End side</i> |

Top side dan *end side* pada konstruksi alat ini berfungsi sebagai bagian terluar dan juga pengikat bagian isolator polyoxymethylene (POM), *hot side*, dan *cold side* yang berada diantaranya. Jenis material yang digunakan adalah pelat aluminium dengan ketebalan 10 mm. **Gambar 3.4** memperlihatkan bagian *top side* di sebelah atas dan *end side* di sebelah bawahnya. Seperti yang terlihat pada gambar, pada bagian *top side* juga terdapat empat saluran yang dilalui fluida, yaitu saluran masuk dan keluar baik untuk sisi panas dan sisi dingin.

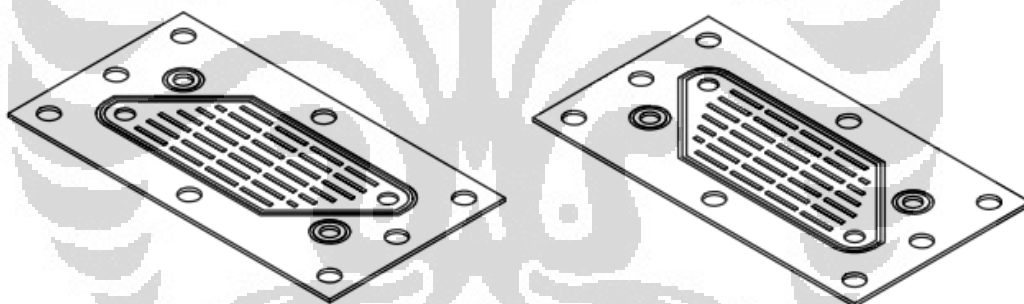
**Gambar 3. 4** Bagian *top side* dan *end side*.

Pada bagian isolator *polyoxymethylene* (POM) yang terdiri dari isolator *top side* dan isolator *end side* ini berguna sebagai isolator agar tidak ada kalor yang keluar menuju lingkungan. Jadi, pertukaran kalor hanya terjadi pada *hot side* dan *cold side* aja. Pemilihan material POM sebagai isolator didasarkan oleh nilai konduktivitas termal yang rendah, yaitu 0.22-0.44 W/m.K dan ketersediaan

material di pasaran. **Gambar 3.5** di bawah ini memperlihatkan isolator POM untuk bagian *end side*. Untuk bagian *top side* tidak jauh berbeda, hanya saja terdapat empat saluran untuk fluida masuk dan keluar.



Gambar 3.5 Polyoxymethylene sebagai isolator.



Gambar 3.6 Bagian *hot side* dan *end side* sebagai tempat fluida mengalir.

Pada bagian *hot side* ini akan mengalir fluida dengan temperatur tinggi dan *cold side* dengan fluida yang mempunyai temperatur lebih rendah. **Gambar 3.6** di atas ini memperlihatkan bagian *hot side* dan *cold side*. Kedua bagian ini memiliki bentuk yang berlawanan yang berfungsi untuk pemisahan aliran fluida panas dan fluida dingin. Saluran untuk aliran fluida dengan dibuat dengan kedalaman 0,2 mm. Dari hasil pengukuran yang dilakukan di Laboratorium Metrologi Departemen Teknik Mesin UI, kedalaman saluran rata-rata terukur sebesar 0.205 mm (hasil pengukuran terlampir di bagian Lampiran). Pada bagian ini terdapat sub saluran yang berjumlah delapan buah dengan lebar 3 mm. Sub saluran ini

berfungsi untuk membuat aliran fluida mengalir merata di segala tempat dan untuk membuat aliran menjadi lebih bersifat turbulen.

Material yang digunakan pada kedua bagian ini adalah pelat tembaga dengan tebal 1,5 mm. Material tembaga dipilih karena material ini memiliki konduktivitas termal yang paling baik di antara logam yang biasa digunakan sebagai material pelat. Nilai konduktivitas termal tembaga adalah sebesar 400 W/m.K. **Gambar 3.7** di bawah ini memperlihatkan bagian *hot side* dan *cold side* yang berbahan dasar pelat tembaga.



Gambar 3.7 Bagian *hot side* atau *end side* yang terbuat dari pelat tembaga.

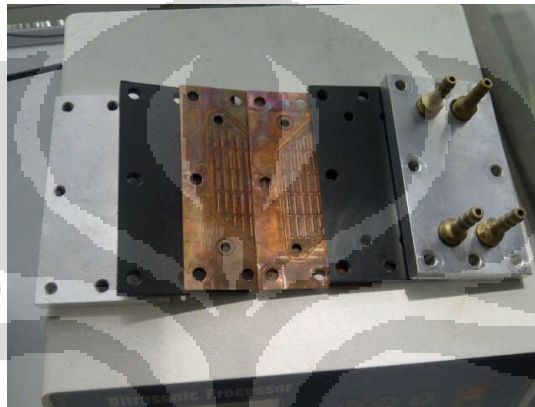
3.2 PEMBUATAN ALAT

Proses pembuatan alat ini dibagi menjadi dua tahap, yaitu perancangan dan produksi. Karena keterbatasan alat, proses produksi dilakukan oleh pihak luar. Semua bagian dibuat dengan menggunakan mesin produksi yang terdapat di sana. Semua material yang dibutuhkan dalam proses produksi disediakan oleh pihak luar.

Pada proses perancangan, pembuatan desain dilakukan dengan menggunakan *software* Autodesk Inventor 2011. Setelah semua bagian dibuat, baru dipindahkan ke gambar kerja untuk dikirim ke pihak luar untuk dikerjakan.

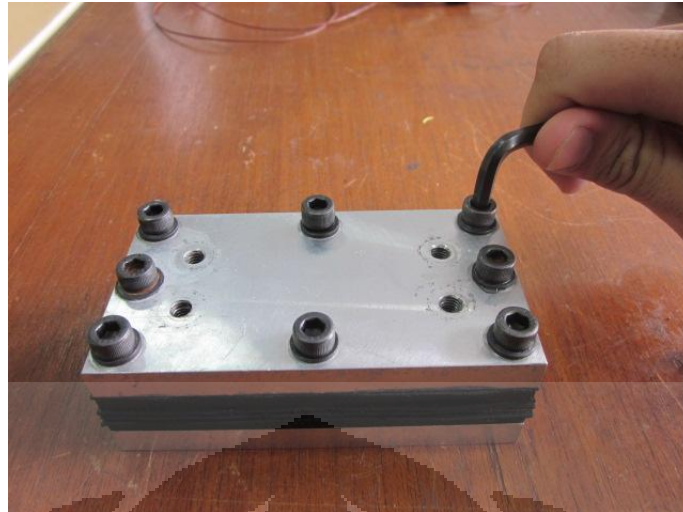
3.3 PROSES PERAKITAN ALAT

Alat *microchannel heat exchanger* ini terdiri dari enam bagian yang berbeda. Agar dapat berfungsi seperti yang diharapkan, proses perakitan yang tepat perlu dilakukan. Berikut akan dijelaskan langkah-langkah perakitan alat hingga menjadi *microchannel heat exchanger* yang digunakan untuk melakukan pengujian.



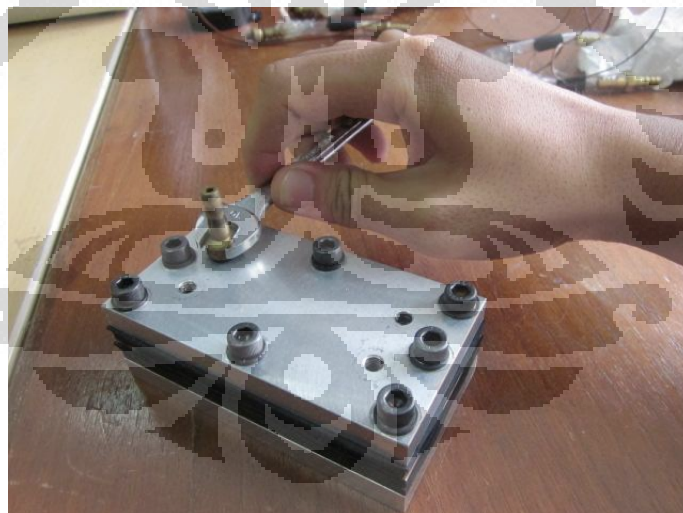
Gambar 3. 8 Susunan bagian-bagian dari *microchannel heat exchanger*.

Pertama-tama, persiapkan *top side*, *end side*, POM, *hot side*, dan *cold side* yang merupakan bagian-bagian dari *microchannel heat exchanger*. Pasangkan *rubber seal* di daerah *hot side* dan juga *cold side* yang bertujuan agar fluida kerja tidak keluar dari daerah kerja dan tidak bercampur antara sisi panas dan sisi dingin. Kemudian susun bagian-bagian *microchannel heat exchanger* secara berurutan seperti yang tergambar pada **Gambar 3.2** dan **Gambar 3.8**. Lalu pasang baut M6 di sekeliling alat. Lakukan proses pengencangan baut seperti yang terlihat pada **Gambar 3.9** secara menyilang agar distribusi kekuatan pengencangan merata di setiap sisi. Hal ini bertujuan agar alat tertutup rapat secara sempurna sehingga tidak terjadi kebocoran.



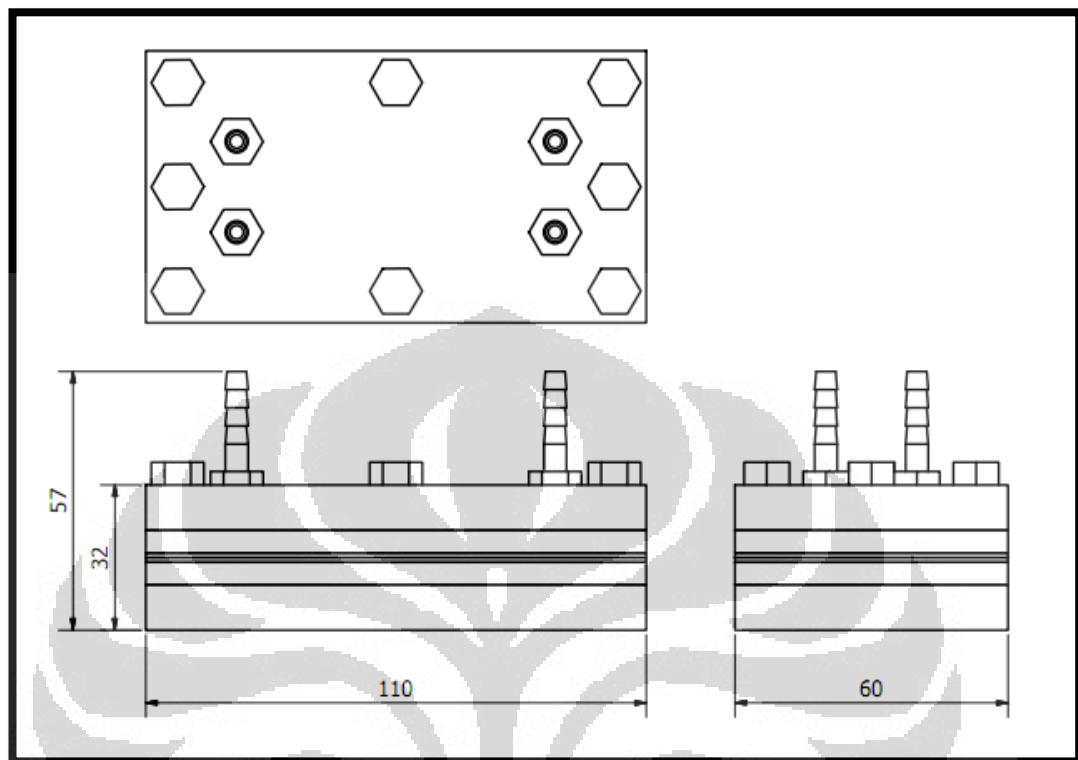
Gambar 3. 9 Proses pengencangan baut dengan menggunakan kunci L heksagonal.

Setelah semua lapisan terikat cukup kuat, langkah selanjutnya adalah memasang *fitting* selang pada bagian saluran masuk dan saluran keluar sebagai tempat masuknya fluida kerja. *Fitting* selang ini dikencangkan dengan menggunakan kunci pas ukuran 10 seperti terlihat pada **Gambar 3.10**.



Gambar 3. 10 Proses pengencangan *fitting* selang dengan menggunakan kunci pas ukuran 10.

3.4 SPESIFIKASI TEKNIS



Gambar 3. 11 Dimensi *microchannel heat exchanger*.

| | | |
|--------------------------|---|------------------------|
| Dimensi MCHE | : | 110 mm x 60 mm x 57 mm |
| Jumlah saluran | : | 8 |
| Tinggi dan lebar saluran | : | 0.205 mm dan 3 mm |
| Diameter hidrolis | : | 384 μ m |

Material

1. *Top side* : aluminium
2. *Isolator (top side)* : polyoximethylene
3. *Hot side* : tembaga
4. *Cold side* : tembaga
5. *Isolator (end side)* : polyoximethylene
6. *End side* : aluminium
7. *Baut* : baja
8. *Fitting* : kuningan

BAB IV

PENGUJIAN ALAT *MICROCHANNEL HEAT EXCHANGER*

4.1 TUJUAN PENGUJIAN

Pengujian *microchannel heat exchanger* bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari alat penukar kalor MCHE ini dengan menggunakan pompa peristaltik sebagai penyalur air dan *circulating thermostatic bath* sebagai sumber air panas dan dinginnya. Pengujian dilakukan untuk mengetahui temperatur masukan dan keluaran pada sisi panas dan dingin *microchannel heat exchanger* dengan menggunakan fluida kerja air dan nano fluida. Konfigurasi aliran yang digunakan adalah *counter flow*, yaitu arah aliran fluida dingin dan fluida panas saling berlawanan. Selain mengukur temperatur tersebut, pengukuran terhadap *pressure drop* yang terjadi pada *microchannel heat exchanger* juga dilakukan dengan menggunakan *differential pressure transmitter*.

4.2 INSTALASI PENGUJIAN

Sebelum melakukan pengukuran temperatur pada MCHE, perlu dilakukan persiapan peralatan pengujian agar data yang didapat tidak menyimpang jauh dari yang seharusnya. Yang pertama perlu dilakukan adalah menempatkan termokopel pada tempat yang tepat. Termokopel yang digunakan adalah termokopel tipe K dengan material pembentuk Kromel (Nikel-Kromium) dan Alumel (Nikel-Aluminium). Untuk mengukur temperatur masuk dan keluar fluida dari MCHE dengan tepat, termokopel harus diletakkan pada aliran fluida di dalam selang sedekat mungkin dengan lubang *fitting* selang. Total ada empat titik pengukuran temperatur, yaitu saluran masuk sisi panas, saluran keluar sisi panas, saluran masuk sisi dingin, dan saluran keluar sisi dingin. Ujung termokopel yang lain kemudian disambungkan pada DAQ NI-9211 dengan *chasis* NI cDAQ-9172. Modul data akuisisi akan dibaca oleh *software* LabVIEW 8.5 yang dikeluarkan National Instruments.

Tabel 4. 1 Spesifikasi modul data akuisisi NI 9211.

| | |
|--|---------------------------------|
| Tipe pengukuran | Temperatur, termokopel, voltase |
| Jumlah <i>channel</i> | 4 |
| Jangkauan pengukuran temperatur | -40 hingga 70°C |
| Jangkauan pengukuran tegangan | ±80 mV |

Langkah berikutnya setelah penempatan termokopel adalah menghubungkan MCHE dengan pompa peristaltik dan *circulating thermostatic bath* (CTB) dengan menggunakan selang. Pompa peristaltik yang digunakan pada pengujian adalah tipe FPU500 OMEGAFLEX Peristaltic Pump produksi Omega. Selang yang dipasang pada MCHE harus mengikuti aturan seperti yang terlihat pada **Gambar 4.2** agar konfigurasi alirannya adalah *counter-flow*. Pompa peristaltik adalah jenis pompa *positive displacement pump* yang bekerja dengan menekan selang untuk memindahkan fluida. Gaya tekan pada selang mendorong fluida untuk maju dan menciptakan keadaan vakum di daerah belakangnya, sehingga fluida mengalir ke daerah ini untuk kemudian dipompa maju lagi. Untuk pengondisian temperatur air yang masuk ke saluran masuk digunakan dua unit, satu untuk sisi panas dan satu untuk sisi dingin. Kedua CTB tersebut sama-sama bermerk Huber namun memiliki spesifikasi teknik yang berbeda.

Tabel 4. 2 Spesifikasi pompa peristaltik FPU500 OMEGAFLEX Peristaltic Pump.

| | |
|--|---|
| Kecepatan putaran | 10 s/d 600 RPM |
| Diameter dalam selang yang dibutuhkan | 1/32" s/d 5/16" (1 s/d 8 mm) |
| Tebal selang | 1/16" (1.5 mm) |
| Material selang | Vinyl, Viton, Tygon, Silicone, Santoprene, and Norprene |
| Tingkat kekerasan selang (durometer) | ≤ 68 |
| Temperatur kerja fluida | -50°F s/d 300°F (-46°C s/d 149°C) |

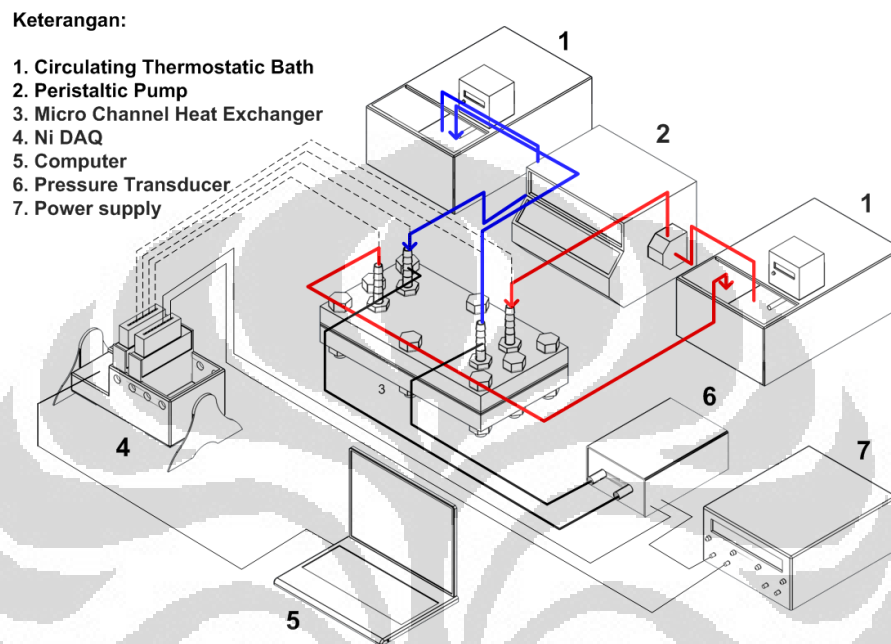
Urutan pemasangan selang untuk saluran masuk adalah dari CTB, pompa peristaltik, dan MCHE, sedangkan untuk saluran keluar, selang tidak perlu dipasangkan ke pompa melainkan langsung dihubungkan ke CTB kembali. Agar temperatur air tetap terjaga dari CTB hingga ke saluran masuk MCHE, digunakan *thermaflex* untuk menyelubungi selang. Penggunaan *thermaflex* cukup pada selang untuk saluran masuk saja, baik untuk sisi panas dan dingin. Bahan *thermaflex* dipilih karena memiliki nilai konduktivitas termal yang sangat kecil, yaitu 0.034 W/m.K pada 0°C.

Tabel 4. 3 Spesifikasi CTB yang digunakan dalam pengujian.

| Penggunaan | Fluida panas | Fluida dingin |
|---------------------------|-------------------|---------------------|
| Tipe | CC1-K12-NR | K12-cc-NR |
| Temperatur operasi | -20 s/d 200°C | |
| Daya pendinginan | 0.2 kW (pada 0°C) | 0.25 kW (pada 20°C) |
| Daya pemanasan | 1 kW | 2 kW |

Setelah semua komponen pengujian terpasang dengan baik, langkah selanjutnya adalah mengaktifkan *power* pada CTB, pompa peristaltik, serta modul data akuisisi dan menjalankan alat untuk pengambilan data. Yang pertama dilakukan adalah mengatur CTB, baik untuk sisi panas dan dingin, pada temperatur saluran masuk yang diinginkan. Kemudian aktifkan pompa peristaltik sesuai dengan *flow rate* awal yang diinginkan untuk mengalirkan fluida dari CTB menuju MCHE. Ketika aliran fluida sudah stabil, bacaan temperatur pada *software* LabVIEW 8.5 akan menunjukkan empat titik pengukuran temperatur. Yang perlu mendapat perhatian khusus adalah titik pengukuran temperatur pada saluran masuk sisi panas dan sisi dingin. Pada bagian ini temperatur fluida yang dialirkan sudah tidak sama seperti yang diatur oleh CTB akibat hilang atau masuknya panas dari lingkungan pada selang dan gesekan *roller* pompa peristaltik pada selang. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengaturan ulang temperatur pada CTB. Jika temperatur pada bagian saluran masuk lebih rendah dari yang seharusnya, pengaturan temperatur pada CTB harus dinaikkan. Begitu juga sebaliknya, jika temperatur pada bagian saluran masuk lebih tinggi, temperatur

pada CTB harus diturunkan. Target yang harus dicapai agar pengambilan data temperatur akurat adalah temperatur pada bagian saluran masuk harus *steady* selama mungkin. **Gambar 4.1** di bawah ini memperlihatkan skematik pengujian yang telah dijelaskan sebelumnya.



Gambar 4.1 Skema pengujian alat *microchannel heat exchanger*.

4.3 VARIASI PENGUJIAN

Pada pengujian untuk melakukan pengukuran temperatur pada MCHE ini, variasi pengujian, seperti yang tertera pada **Tabel 4.1**, dilakukan pada fluida kerja yang digunakan pada sisi dingin, temperatur saluran masuk sisi dingin, dan *flow rate* yang masuk ke dalam saluran MCHE. Untuk temperatur saluran masuk sisi panas yang digunakan untuk semua jenis fluida kerja pendingin adalah 50°C, sedangkan temperatur saluran masuk sisi dingin diatur pada 25°C. Pada saat pengujian dengan menggunakan nano fluida, fluida kerja yang digunakan pada sisi panas adalah air.

Tabel 4. 4 Variasi pengujian alat MCHE

| Fluida Kerja Pendingin | Flow Rate (ml/menit) |
|--|-----------------------------|
| Air, nano fluida Al ₂ O ₃ -air konsentrasi volume 1%, 3%, dan 5% | 100 |
| | 150 |
| | 200 |
| | 250 |
| | 300 |

Sulitnya untuk menyamakan jumlah laju aliran pada sisi dingin dan sisi panas pada MCHE akibat instalasi selang pada pompa peristaltik membuat variasi *flow rate* yang tertera pada tabel di atas diujikan hanya untuk sisi dingin. Untuk sisi panas akan ada perbedaan dengan range dari 75% hingga 90%. Oleh karena itu, setiap melakukan pengukuran temperatur pada *flow rate* tertentu pada sisi dingin, jumlah *flow rate* pada sisi panas harus diukur kembali.

4.4 PEMBUATAN NANO FLUIDA

Pencampuran antara partikel nano dengan fluida dasar untuk dapat menghasilkan nano fluida yang tepat harus dilakukan dengan cara yang benar agar tidak terjadi sedimentasi partikel nano pada fluida dasar. Dalam pengujian ini, peneliti menggunakan *ultrasonic processor* yang dibuat oleh E-ChromTech untuk mendispersikan partikel nano di dalam fluida dasar. Lama pengoperasian alat dalam pengujian ini untuk menghasilkan nano fluida Al₂O₃-air 1%, 3%, dan 5% adalah 1 jam. **Gambar 4.2** memperlihatkan alat ultrasonic processor saat sedang mendispersikan partikel nano Al₂O₃ yang akan digunakan dalam pengujian.



Gambar 4. 2 *Ultrasonic processor* sebagai alat bantu pembuatan nano fluida.

4.5 PENGUKURAN SIFAT FISIKA NANO FLUIDA

Sifat fisika nano fluida, seperti konduktivitas termal dan viskositas dinamik sangat diperlukan untuk mendapatkan hasil perhitungan yang akurat. Nilai-nilai ini belum banyak dipublikasikan di sumber-sumber literatur, oleh karena itu peneliti melakukan pengukuran sendiri untuk mendapatkan nilai-nilai tersebut. Semua pengukuran dilakukan pada temperatur kamar atau sekitar $\pm 25^{\circ}\text{C}$.

Pengukuran konduktivitas termal dilakukan dengan menggunakan *thermal conductivity meter* KD2 yang dibuat oleh Therm Test Inc. Pengukuran dilakukan dengan cara mencelupkan seluruh *probe* dari *thermal conductivity meter* ke dalam fluida yang dijaga pada temperatur $\pm 25^{\circ}\text{C}$. Kemudian tekan tombol untuk mengukur konduktivitas termal. Tunggu kurang lebih 1,5 menit hingga layar menampilkan hasil pengukuran.

Pengukuran viskositas dinamik dilakukan dengan menggunakan metode bola jatuh. Alat yang digunakan adalah Falling Ball Viscometer yang dibuat oleh Haake. Pertama-tama, fluida kerja yang ingin diukur viskositasnya dimasukkan ke dalam tabung pengukuran hingga penuh. Kemudian masukkan bola ke dalam tabung. Jenis bola yang digunakan tergantung dari jenis fluida yang akan diukur. Untuk pengukuran viskositas yang rendah, bola yang digunakan dibuat dari bahan

polymer. Pengukuran dilakukan dengan memutar tabung hingga ke keadaan tegak kembali untuk membuat bola jatuh di dalam tabung. Lama waktu bola jatuh pada jarak yang telah ditentukan kemudian dicatat dan dirata-ratakan. Lama waktu ini kemudian dibandingkan dengan lama waktu bola jatuh pada air aquades dan nilai viskositasnya untuk mendapatkan nilai viskositas fluida kerja yang telah diukur.

Tabel 4.5 memperlihatkan nilai konduktivitas termal dan viskositas dinamik dari fluida kerja yang diujikan, yaitu air, Al₂O₃-air 1%, Al₂O₃-air 3%, dan Al₂O₃-air 5%.

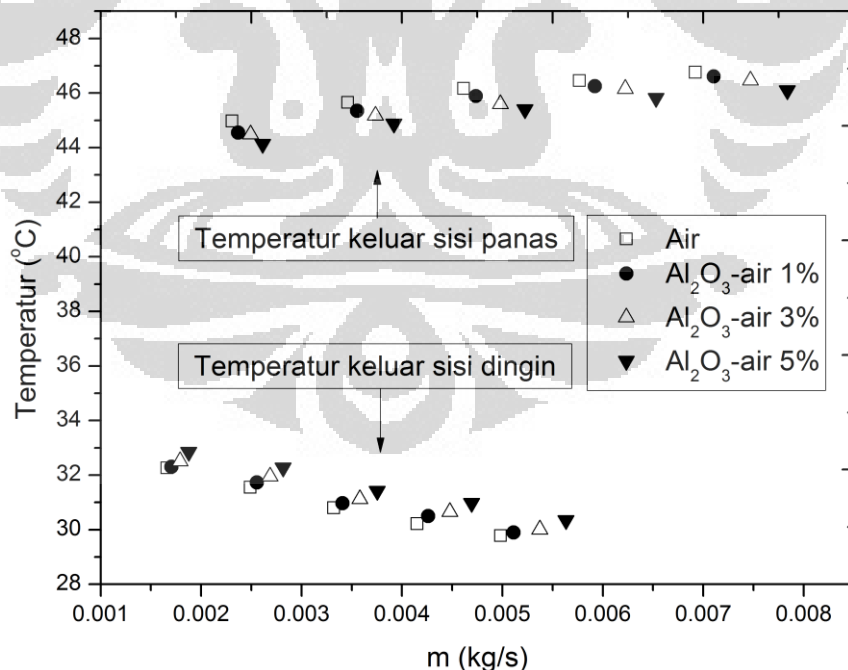
Tabel 4.5 Nilai konduktivitas termal dan viskositas dinamik fluida kerja yang digunakan dalam pengujian

| Fluida Kerja pada Sisi Dingin | Konduktivitas Termal k (W/m.K) | Viskositas Dinamik μ (N/m²s) |
|--|---|---|
| Air aquades | 0.52 | 0.001 |
| Al ₂ O ₃ -air 1% | 0.54 | 0.001141 |
| Al ₂ O ₃ -air 3% | 0.56 | 0.001171 |
| Al ₂ O ₃ -air 5% | 0.57 | 0.001197 |

BAB V HASIL DAN ANALISIS

5.1 ANALISIS DATA TEMPERATUR KELUAR PADA SISI PANAS DAN DINGIN

Pengujian pengambilan data temperatur pada MCHE menghasilkan keluaran data temperatur masuk dan keluar baik pada sisi panas dan sisi dingin. Dalam pengujian, temperatur masuk pada sisi panas dan sisi dingin dijaga pada temperatur $\pm 50^\circ\text{C}$ dan $\pm 25^\circ\text{C}$. Grafik pada **Gambar 5.1** pada bagian atas memperlihatkan temperatur air yang keluar pada sisi panas. Dapat dilihat pada grafik bahwa penambahan partikel nano aluminium oksida pada air sebagai fluida dasar pada sisi dingin dapat menurunkan temperatur keluar air pada sisi panas. Penurunan temperatur tersebut berlaku pada beberapa variasi laju aliran massa yang diujikan. Semakin meningkatnya laju aliran massa perbedaan temperatur antara saluran masuk dan keluar semakin kecil.



Gambar 5. 1 Temperatur keluar fluida kerja pada sisi panas dan dingin.

Grafik temperatur keluar beberapa fluida kerja yang diujikan pada sisi dingin diperlihatkan pada **Gambar 5.1** bagian bawah. Berbeda dengan temperatur keluar pada sisi panas, grafik ini memperlihatkan temperatur keluar fluida kerja, yaitu air dan nano fluida Al_2O_3 -air konsentrasi 1%, 3%, dan 5%, sebagai fluida pendinginan. Hal yang sama juga berlaku akibat peningkatan laju aliran massa fluida pendinginan, yaitu perbedaan temperatur antara saluran masuk dan keluar pada sisi dingin semakin kecil.

Kedua grafik sama-sama memperlihatkan bahwa fluida kerja nano fluida Al_2O_3 -air pada konsentrasi 5% dapat menghasilkan perbedaan temperatur yang tinggi antara saluran masuk dan keluar baik pada sisi panas dan sisi dingin.

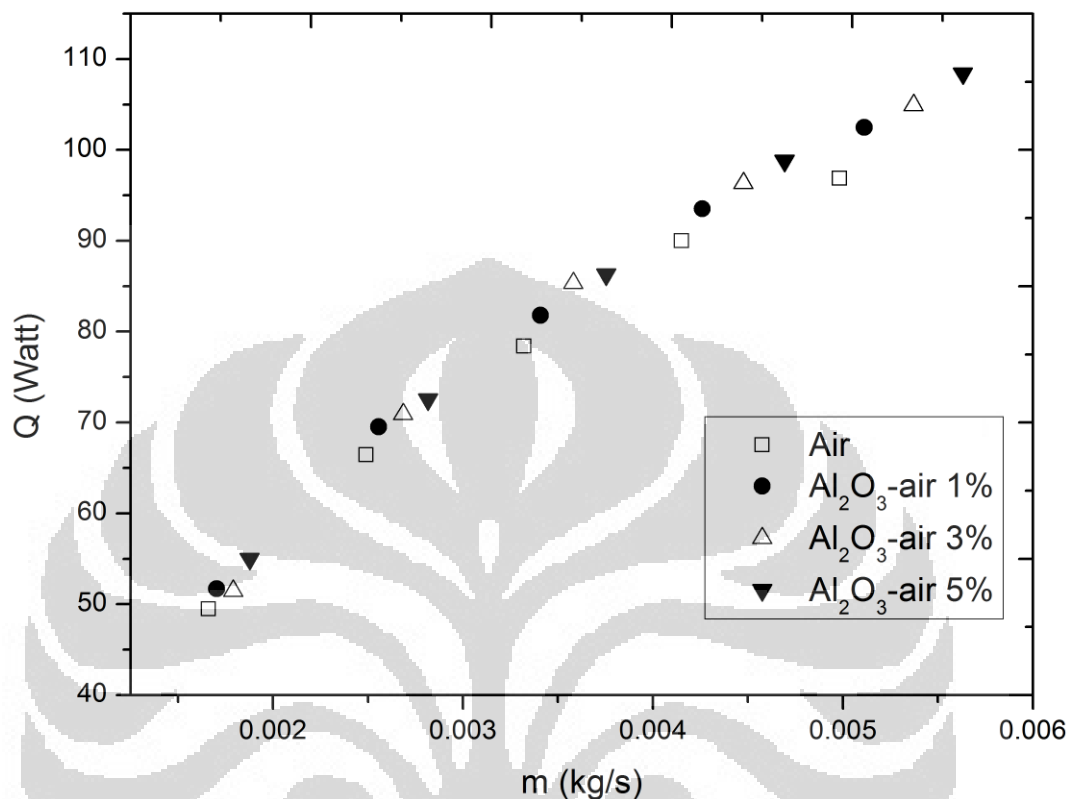
5.2 ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN MASSA TERHADAP KALOR YANG DISERAP OLEH FLUIDA PENDINGIN

Grafik pada **Gambar 5.2** memperlihatkan hubungan variasi laju aliran massa terhadap kalor yang diserap pada sisi dingin. Perhitungan kalor pada sisi dingin dapat dilihat pada persamaan (5.1), di mana Q_c adalah kalor yang diserap oleh fluida kerja pendingin pada sisi dingin, \dot{m}_c adalah laju aliran massa fluida kerja pendingin, Cp_c adalah kapasitas kalor dari fluida kerja pendingin, $T_{c,i}$ adalah temperatur masuk fluida kerja pendingin, $T_{c,o}$ adalah temperatur keluar fluida kerja pendingin.

$$Q_c = \dot{m}_c Cp_c (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (5.1)$$

Grafik ini memperlihatkan bahwa seiring meningkatnya laju aliran massa fluida kerja pendingin, maka kalor yang dapat diserap oleh fluida pendingin dari sisi panas semakin meningkat. Penambahan partikel nano aluminium oksida pada air sebagai fluida dasar juga meningkatkan penyerapan panas tersebut. Konsentrasi partikel nano pada fluida kerja juga memperlihatkan karakteristik penyerapan kalor walaupun tidak terlalu signifikan. Persentase peningkatan

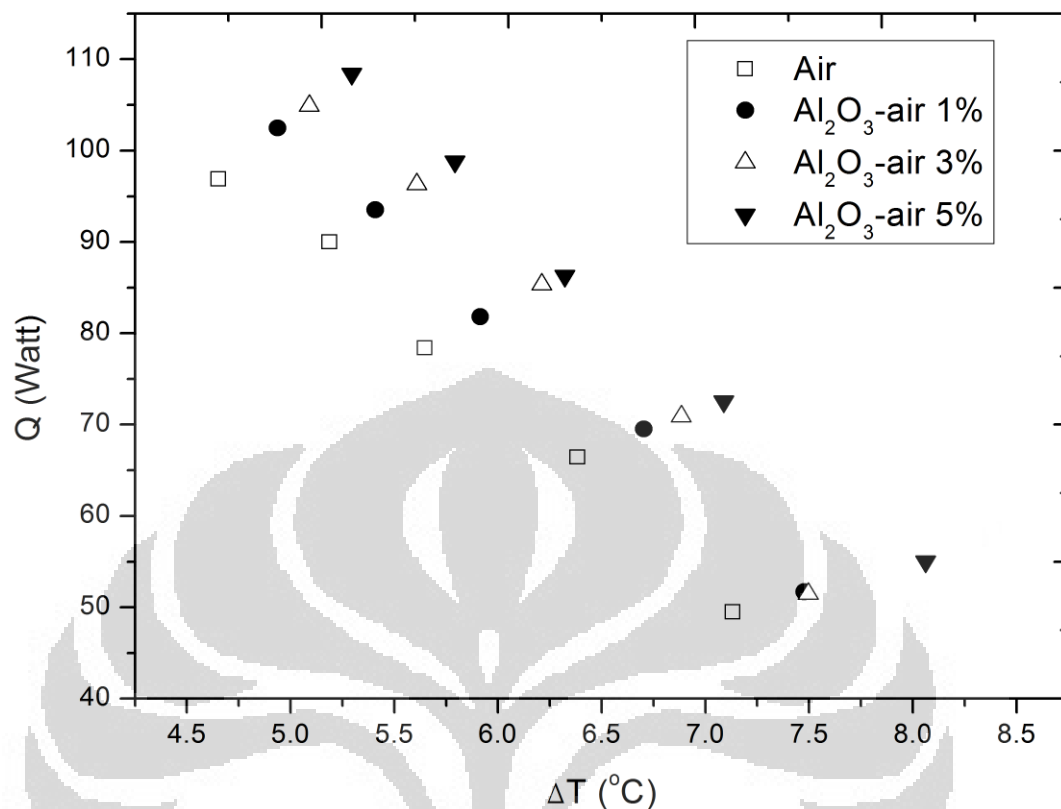
penyerapan kalor pada nano fluida Al_2O_3 -air 1%, 3%, dan 5% dibandingkan air berturut-turut adalah 4%, 7%, dan 9%.



Gambar 5.2 Pengaruh laju aliran massa terhadap kalor yang diserap pada sisi dingin.

5.3 ANALISIS KALOR YANG DISERAP OLEH FLUIDA PENDINGIN TERHADAP PERUBAHAN TEMPERATUR

Kalor yang diserap pada sisi dingin juga dipengaruhi oleh perbedaan temperatur masuk dan keluar fluida kerja pada sisi dingin. **Gambar 5.3** memperlihatkan hubungan tersebut. Peningkatan perbedaan temperatur fluida kerja pada saluran masuk dan keluar di MCHE tidak menyebabkan peningkatan kalor yang diserap pada sisi dingin. Penyerapan kalor yang besar pada sisi dingin terjadi pada perbedaan temperatur yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh laju aliran massa seperti yang diperlihatkan pada persamaan (5.1) sangatlah dominan karena peningkatan laju aliran massa membuat fluida kerja cepat meninggalkan alat penukar kalor, sehingga perbedaan temperatur antara saluran masuk dan keluar semakin berkurang.



Gambar 5.3 Kalor yang diserap pada sisi dingin sebagai fungsi dari perbedaan temperatur.

5.4 ANALISIS KOEFISIEN PERPINDAHAN KALOR KESELURUHAN PADA MCHE

Koefisien perpindahan kalor keseluruhan (U) merupakan parameter penting dalam analisis alat penukar kalor. Nilai ini menunjukkan total koefisien perpindahan kalor pada fluida panas, fluida dingin, serta hambatan termal dan faktor pergerakan yang terjadi pada suatu alat penukar kalor [27]. Persamaan (5.2) memperlihatkan hubungan tersebut, di mana A adalah luas area perpindahan kalor antara fluida panas dan dingin, h adalah koefisien perpindahan kalor pada fluida dingin dan panas, R''_f adalah faktor pergerakan, dan R_w adalah hambatan termal pada dinding yang memisahkan fluida panas dan dingin. Dalam pengujian ini, faktor pergerakan dianggap tidak ada karena masih belum ditemukannya data faktor pergerakan nano fluida pada alat penukar kalor.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_c A} + \frac{R''_{f,c}}{A} + R_w + \frac{R''_{f,h}}{A} + \frac{1}{h_h A} \quad (5.2)$$

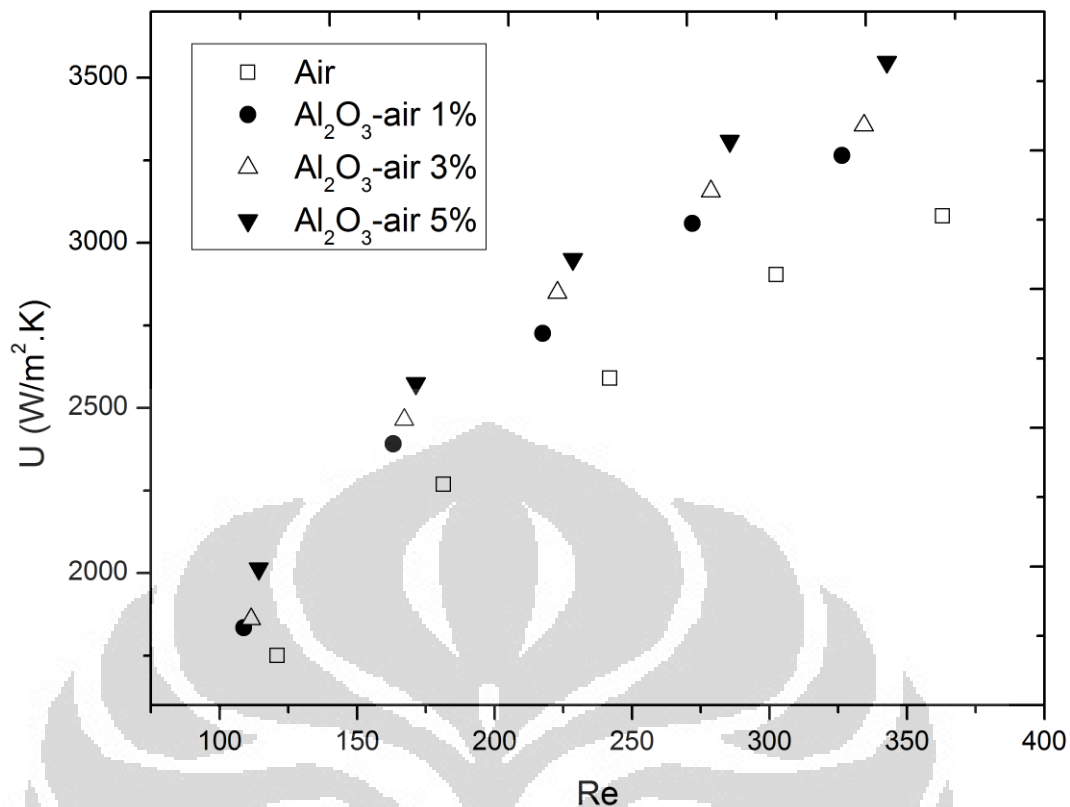
Dalam pengujian nilai U tidak didapat melalui persamaan (5.2), namun dari persamaan (5.3) yang melibatkan ΔT_m , yaitu *logarithmic mean temperature difference* (LMTD), atau logaritmik temperatur rata-rata pada sisi panas dan sisi dingin.

$$Q = UA \cdot \Delta T_m \quad (5.3)$$

Nilai ΔT_m untuk konfigurasi alat penukar kalor *counter flow* dan *parallel flow* berbeda. MCHE yang digunakan dalam pengujian berkonfigurasi *counter flow*. Persamaan (5.4) dapat digunakan untuk mendapatkan nilai ΔT_m .

$$\Delta T_m = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \frac{(T_{h,i} - T_{c,o})}{T_{h,o} - T_{c,i}}} \quad (5.4)$$

Grafik pada **Gambar 5.4** memperlihatkan nilai koefisien perpindahan kalor keseluruhan setiap fluida kerja dengan variasi bilangan Reynolds yang berbeda. Grafik menunjukkan bahwa penggunaan nano fluida pada MCHE sebagai fluida kerja dapat meningkatkan nilai koefisien perpindahan kalor keseluruhan alat penukar kalor. Konsentrasi partikel nano Al_2O_3 pada fluida dasar air juga mempengaruhi nilai koefisien perpindahan kalor keseluruhan. Peningkatan nilai koefisien perpindahan kalor yang terjadi pada nano fluida Al_2O_3 -air 1%, 3%, dan 5% secara berurutan adalah 5%, 8%, dan 13%.



Gambar 5.4 Koefisien perpindahan kalor keseluruhan untuk setiap fluida kerja.

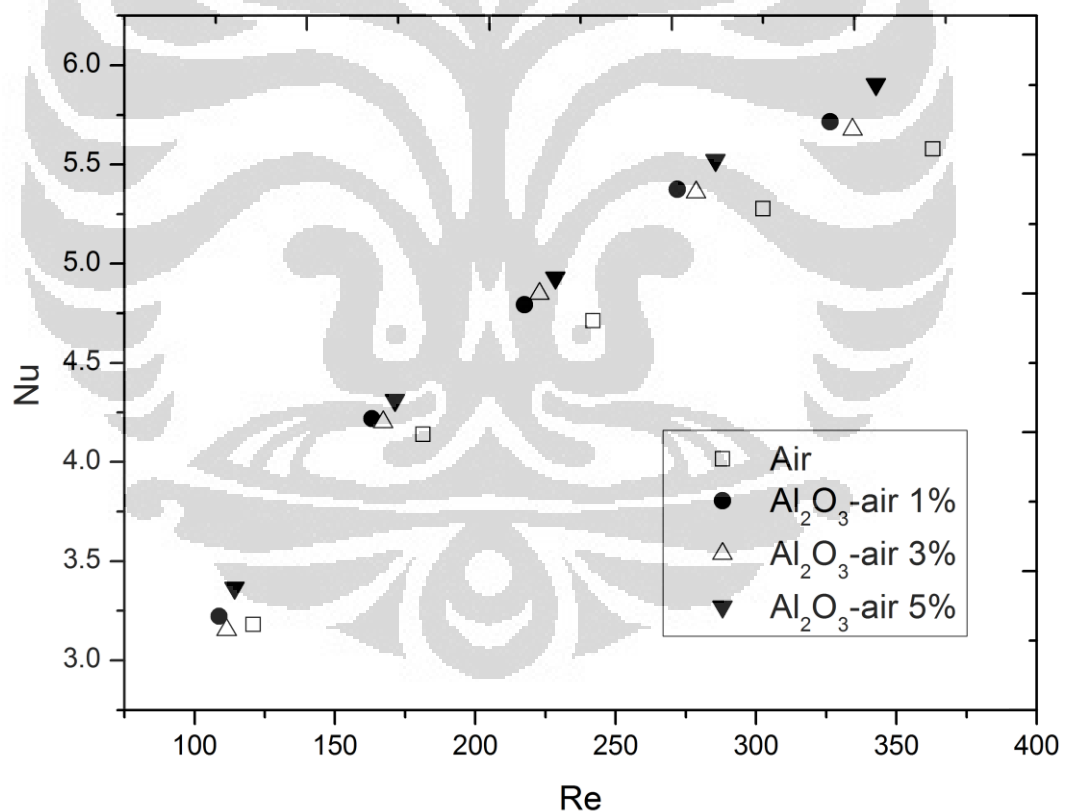
5.5 ANALISIS PENGARUH KONSENTRASI PARTIKEL NANO PADA FLUIDA KERJA TERHADAP BILANGAN NUSSOLT

Bilangan Nusselt merupakan bilangan non dimensional yang menunjukkan perbandingan koefisien perpindahan kalor secara konveksi dengan koefisien perpindahan kalor secara konduksi pada suatu aliran. Persamaan (5.5) memperlihatkan hubungan tersebut. Bilangan Nusselt yang relatif lebih besar mendandakan bahwa konveksi sebagai metode perpindahan kalor lebih dominan dibandingkan konduksinya [28].

$$Nu = \frac{h}{k} D_h \quad (5.5)$$

Gambar 5.5 menunjukkan pengaruh konsentrasi partikel nano pada fluida kerja yang diujikan terhadap bilangan Nusselt yang dihasilkan. Dibandingkan dengan air, nano fluida Al₂O₃-air pada semua konsentrasi memiliki bilangan

Nusselt yang lebih besar, meskipun bilangan Reynolds yang dihasilkan lebih rendah dari air akibat viskositas dan massa jenis pada nano fluida lebih besar dibandingkan dengan air. **Tabel 4.5** memperlihatkan viskositas dinamik dari beberapa fluida kerja yang diujikan. Bilangan Nusselt yang dihasilkan untuk nano fluida Al_2O_3 -air pada konsentrasi 1% dan 3% memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Pada variasi pengujian awal dan akhir bilangan Nusselt Al_2O_3 -air konsentrasi 1% melebihi bilangan Nusselt Al_2O_3 -air konsentrasi 3%. Hal ini bisa saja disebabkan beberapa faktor dari pengujian, yaitu pengukuran konduktivitas termal nano fluida, kurang akurat dalam kalibrasi pompa peristaltik sebelum pengujian maupun saat pengambilan data temperatur. Dari hasil pengujian nano fluida Al_2O_3 -air konsentrasi 5% memiliki bilangan Nusselt yang paling tinggi di setiap variasi debit aliran yang diujikan.



Gambar 5. 5 Bilangan Nusselt fluida kerja pada variasi bilangan Reynolds yang berbeda.

5.6 ANALISIS NILAI *EFFECTIVENESS* DAN NTU PADA MCHE

Effectiveness (ε) merupakan ukuran kinerja dari suatu alat penukar kalor. *Effectiveness* didefinisikan sebagai rasio antara perpindahan kalor yang terjadi secara aktual dari fluida panas ke fluida dingin dengan perpindahan kalor yang mungkin terjadi (Q_{max}) [11]. Persamaan (5.6) memperlihatkan hubungan ini.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (5.6)$$

Dalam perhitungan, persamaan yang digunakan untuk mendapat nilai *effectiveness* pada pengujian MCHE diperlihatkan pada persamaan (5.7). C_{min} merupakan nilai kapasitas panas spesifik yang paling rendah antara fluida panas dan dingin. Dalam pengujian ini, nilai C_{min} terdapat pada fluida panas. ΔT_{max} merupakan perbedaan temperatur yang mungkin terjadi pada alat penukar kalor. Untuk semua kasus, nilai ΔT_{max} adalah selisih antara temperatur masuk pada sisi panas ($T_{h,i}$) dan temperatur masuk pada sisi dingin ($T_{c,i}$).

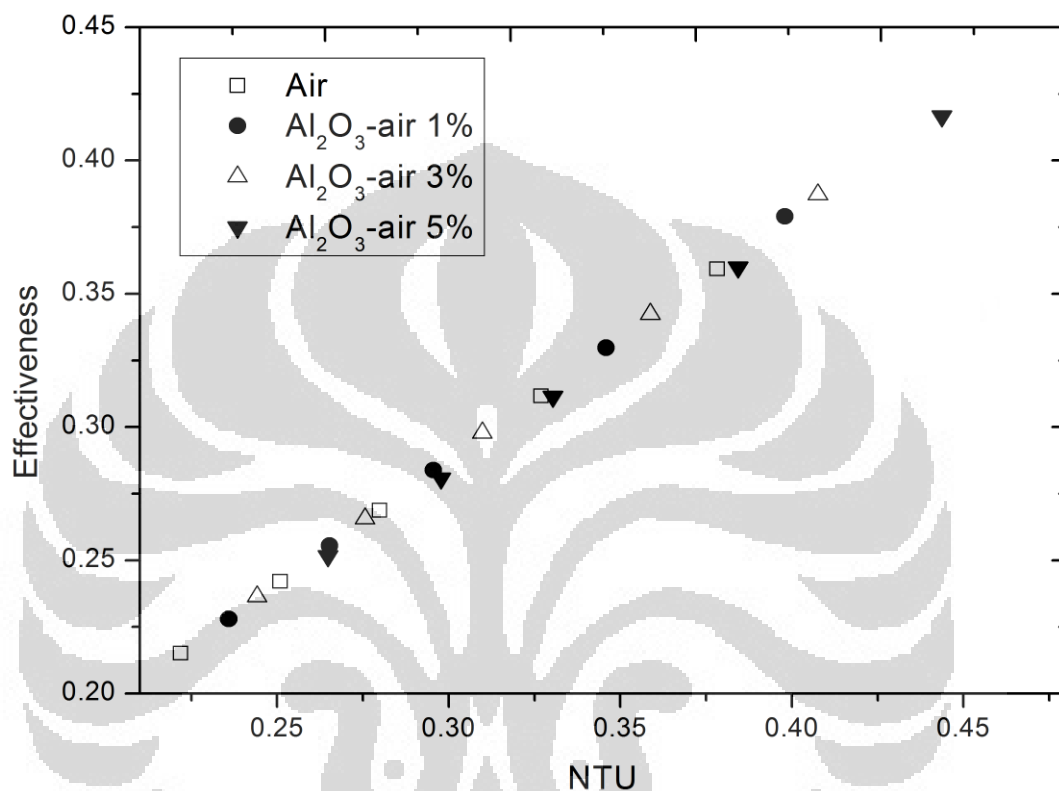
$$\varepsilon = \frac{UA}{C_{min}} \frac{\Delta T_m}{\Delta T_{max}} \quad (5.7)$$

NTU (*number of transfer unit*) merupakan bilangan non dimensional yang memperlihatkan *heat transfer size* atau *thermal size* dari suatu alat penukar kalor [11]. Dengan menggunakan nilai NTU, ukuran alat penukar kalor dapat diukur melalui luas area permukaan perpindahan kalor (A) dan koefisien perpindahan kalor keseluruhan (U). Persamaan (5.8) memperlihatkan hubungan NTU dengan UA dan C_{min} .

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (5.8)$$

Gambar 5.6 memperlihatkan grafik hubungan antara *effectiveness* dengan NTU. Pada nilai NTU yang rendah, nilai *effectiveness* dari MCHE juga rendah. Dengan meningkatnya nilai NTU, nilai *effectiveness* juga ikut meningkat.

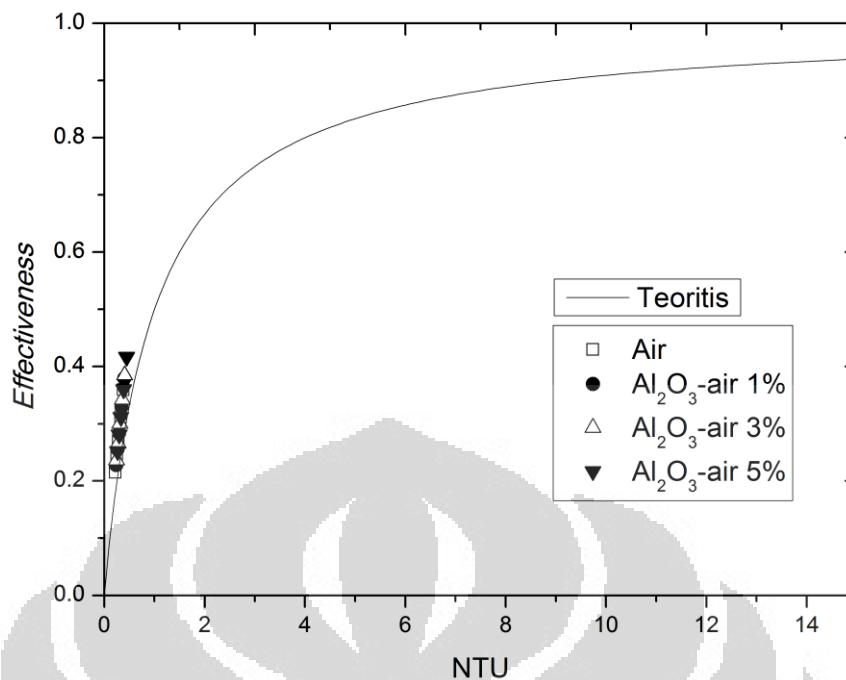
Penambahan partikel nano pada fluida dasar air dapat meningkatkan nilai *effectiveness* air dari 36% menjadi 42% pada konsentrasi Al_2O_3 -air 5% dan debit aliran pengujian tertinggi. Artinya dalam pengujian MCHE ini, kalor yang dapat diserap baru 42% dari total kalor maksimum yang dapat diserap.



Gambar 5.6 Nilai *effectiveness* dan NTU pada MCHE.

Dari pengujian, nilai *effectiveness* yang didapat tidak melebihi 50% dapat disebabkan karena parameter pengujian yang terbatas. Dapat diperkirakan bahwa dengan meningkatkan debit aliran pengujian yang lebih tinggi dapat meningkatkan nilai *effectiveness* menjadi lebih tinggi mendekati 100%. **Gambar 5.7** memperlihatkan prediksi *effectiveness* dan NTU yang mungkin terjadi jika debit aliran ditingkatkan. Prediksi tersebut didapat dengan menggunakan persamaan (5.9), di mana C_r merupakan perbandingan antara C_{min} dan C_{max} .

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1+C_r)]}{1 - C_r \cdot \exp[-NTU(1+C_r)]} \quad (5.9)$$



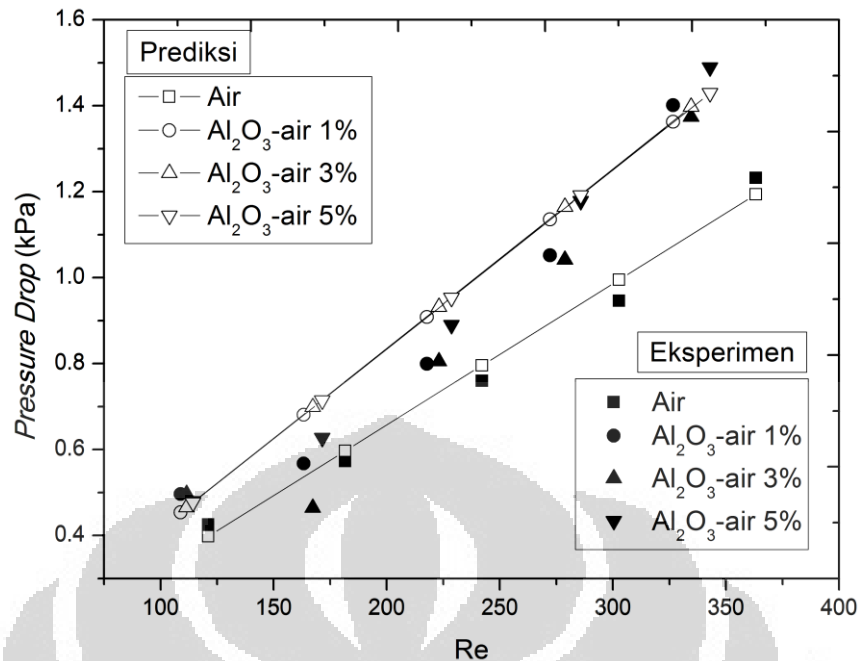
Gambar 5. 7 Prediksi *effectiveness* yang terjadi pada MCHE.

5.7 ANALISIS *PRESSURE DROP* PADA MCHE

Salah satu kekurangan yang dimiliki oleh *microchannel heat exchanger* adalah *pressure drop* yang terjadi antara saluran masuk dan saluran keluar cukup besar. *Pressure drop* yang tinggi akan mengakibatkan kerugian pemompaan, sehingga besar perpindahan kalor yang terjadi tidak optimum. Persamaan (5.10) dan (5.11) memperlihatkan bahwa *pressure drop* dipengaruhi oleh jenis fluida, kecepatan aliran, dan geometri dari saluran. Bilangan Poiseuille (Po) merupakan bilangan yang menunjukkan geometri dari bentuk saluran fluida. Kakac *et al.* [29] membagi-bagi beberapa bentuk saluran dengan bilangan Poiseuille-nya. Bilangan Poiseuille untuk tipe saluran *flat-channel* adalah 24.

$$\Delta p = \frac{2f\rho v^2 L}{D_h} \quad (5.10)$$

$$f = \frac{Po}{Re} \quad (5.11)$$



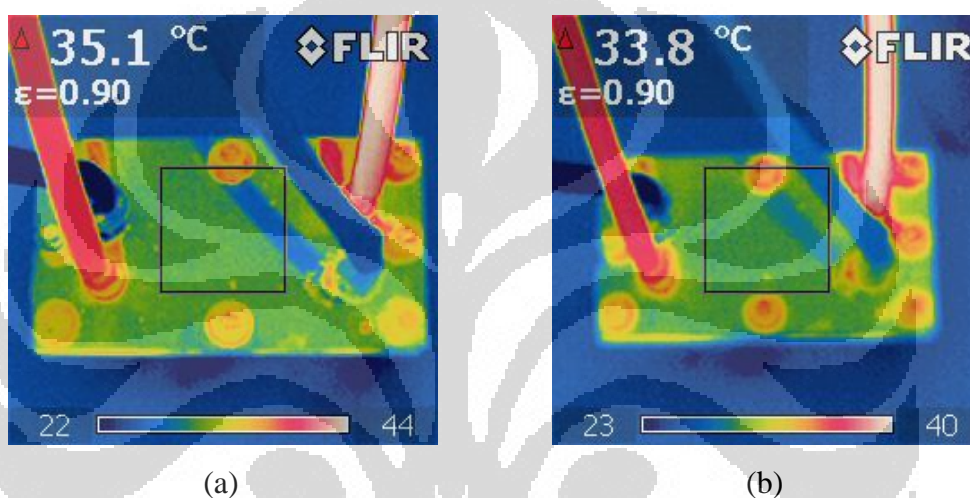
Gambar 5.8 Perbandingan antara hasil eksperimen dan prediksi *pressure drop* yang terjadi dengan menggunakan fluida kerja air dan nano fluida.

Gambar 5.8 memperlihatkan grafik yang membandingkan hasil *pressure drop* yang terjadi antara hasil dari pengujian dan hasil perhitungan dengan menggunakan fluida kerja air dan nano fluida serta variasi debit aliran pengujian. Dari hasil pengujian didapat bahwa penambahan partikel nano ke dalam fluida dasar dapat meningkatkan *pressure drop* yang terjadi. *Pressure drop* yang tertinggi dihasilkan oleh nano fluida Al₂O₃-air 5% dengan besar 1.5 kPa pada debit aliran pengujian yang tertinggi. Hasil pengujian dan hasil perhitungan menunjukkan hasil yang sedikit berbeda dengan persentase kesalahan masing-masing untuk air dan nano fluida Al₂O₃-air 1%, 3%, dan 5% adalah 3%, 5%, 11%, dan 3%.

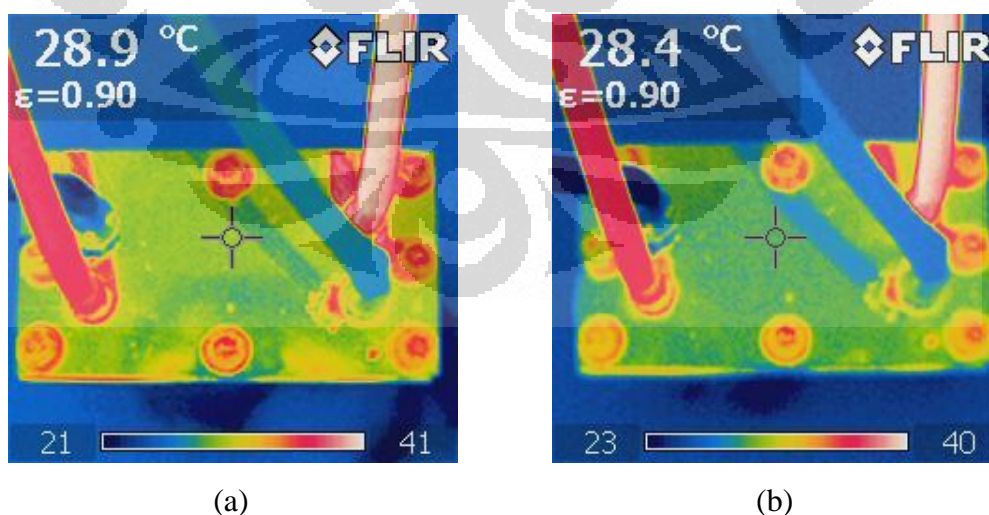
5.8 ANALISIS PERBANDINGAN TEMPERATUR PERMUKAAN LUAR MCHE

Selain pengambilan data temperatur yang diukur di dalam aliran fluida baik pada saluran masuk dan saluran keluar MCHE, peneliti juga melakukan pengambilan data temperatur dengan menggunakan *thermal imaging camera* yang

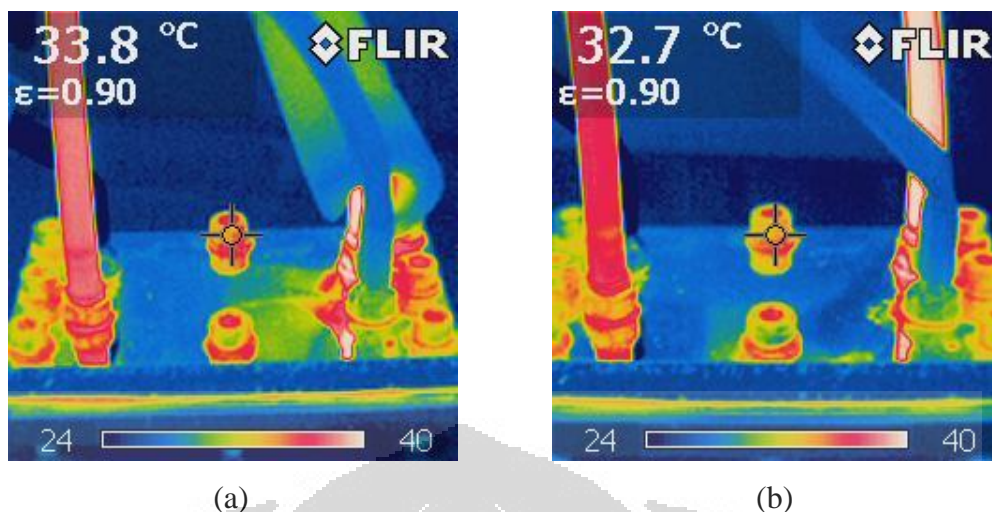
dibual oleh Flir. Dalam pengujian ini, hanya dua jenis fluida kerja yang digunakan, yaitu air (a) dan nano fluida Al_2O_3 -air 5% (b). Debit aliran yang digunakan untuk kedua jenis fluida kerja hanya satu variasi, yaitu pada 300 ml/menit. Bagian POM sebagai isolator juga dilepas agar kalor yang lepas ke lingkungan lebih mudah terbaca oleh kamera inframerah ini. Pengambilan gambar dilakukan pada empat bagian, yaitu luasan tertentu di bagian permukaan atas (**Gambar 5.9**), satu titik pada bagian permukaan atas (**Gambar 5.10**), bagian baut pengikat MCHE (**Gambar 5.11**), dan pelat tembaga yang digunakan sebagai tempat fluida kerja mengalir (**Gambar 5.12**).



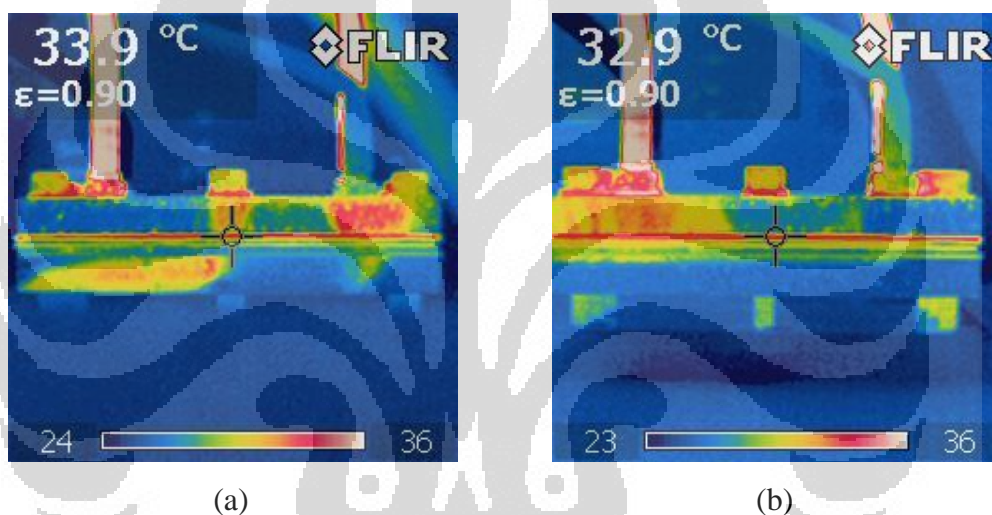
Gambar 5. 9 *Thermal imaging* pada sisi bagian atas MCHE.



Gambar 5. 10 *Thermal imaging* pada titik tertentu di bagian atas MCHE.



Gambar 5. 11 *Thermal imaging* pada baut pengikat MCHE.



Gambar 5. 12 *Thermal imaging* pada bagian pelat tembaga tempat fluida kerja mengalir.

Dari keempat gambar-gambar di atas, dapat dilihat bahwa temperatur permukaan luar MCHE yang dialiri fluida kerja nano fluida lebih rendah dibandingkan dengan MCHE yang dialiri air biasa. Hal ini menunjukkan bahwa nano fluida dapat menyerap kalor dari fluida panas lebih baik, sehingga kalor yang lepas ke lingkungan lebih sedikit. Rata-rata penurunan temperatur yang terjadi di permukaan luar MCHE adalah sebesar 1°C.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 KESIMPULAN

Perancangan dan pengujian *microchannel heat exchanger* dengan menggunakan fluida kerja air dan nano fluida Al_2O_3 -air konsentrasi 1%, 3%, dan 5% telah dilakukan. Nano fluida sebagai fluida kerja pendinginan pengganti fluida konvensional telah terbukti memiliki kinerja yang lebih baik daripada fluida dasarnya. Dari hasil pengujian, nano fluida Al_2O_3 -air dengan konsentrasi 5% memiliki sifat termal yang paling baik dibandingkan dengan air dan nano fluida Al_2O_3 -air dengan konsentrasi di bawahnya meskipun nilai *effectiveness* yang dicapai baru sekitar 42%. Dalam hal penyerapan kalor, nano fluida Al_2O_3 -air 5% dapat menyerap kalor 9% lebih baik dibandingkan air biasa. Lalu, koefisien perpindahan keseluruhan MCHE saat menggunakan nano fluida Al_2O_3 -air 5% dapat meningkat hingga 13%. Beberapa parameter di atas cukup untuk memperlihatkan bahwa nano fluida sangat berpotensi untuk digunakan sebagai fluida kerja untuk alat penukar kalor maupun pendinginan elektronik di masa yang akan datang.

6.2 SARAN

Pada pengujian MCHE ini, nilai *effectiveness* yang didapat masih cukup rendah, yaitu sekitar 42%, artinya kalor yang dapat diserap belum mencapai kalor maksimum yang mungkin diserap. Untuk dapat mencapai nilai *effectiveness* yang lebih tinggi, debit aliran pengujian dapat lebih ditingkatkan. Hal ini juga didasari karena bilangan Reynolds yang didapat dari hasil pengujian tidak melebihi angka 400, artinya aliran masih bersifat laminar. Efek turbulensi yang ingin dicapai agar perpindahan kalor semakin meningkat belum didapatkan dalam pengujian ini.

Agar dapat diaplikasikan pada pendinginan elektronik, sistem *microchannel* ini dapat digunakan sebagai media pelepas panas pada sistem pendinginan termoelektrik maupun *heat pipe*. Penelitian tentang penggabungan sistem *microchannel* dengan termoelektrik dan *heat pipe* sebagai sistem pendinginan CPU perlu dilakukan untuk mengetahui bagaimana kinerjanya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marshall Brain. (2008) How Stuff Works. [Online].
<http://computer.howstuffworks.com/microprocessor.htm>
- [2] E.R. Berndt, E.R. Dulberger, and N.J. Rappaport, "Price and Quality of Desktop and Mobile Personal Computer: A Quarter Century of History," Juli 2000.
- [3] Nandy Putra, Yanuar, and Ferdiansyah N. Iskandar, "Application of nanofluids to heat pipe liquid-block and the thermoelectric cooling of electronic equipment," *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011.
- [4] Jackson Braz Marcinichen and John Richard Thome Jonathan Albert Olivier, "On-Chip Two-Phase Cooling of Datacenters: Cooling System and Energy Recovery Evaluation," *Applied Thermal Engineering*, 2011.
- [5] Hsiang-Sheng Huang and *et al.*, "Thermoelectric water-cooling device applied to electronic equipment," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, pp. 140-146, September 2009.
- [6] H. Y. Zhang, D. Pinjala, T.N. Wong, K.C. Toh, and Y.K. Yoshi, "Single-Phase Liquid Cooled Microchannel Heat Sink for Electronic Packages," *Applied Thermal Engineering*, Juli 2005.
- [7] Seok Pil Jang and Stephen U.S. Choi, "Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Nanofluids," *Applied Thermal Engineering*, Mei 2006.
- [8] D.B. Tuckerman and R.F.W. Pease, "High-Performance Heat Sinking for VLSI".
- [9] U.S. Choi, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," *Development and Applications of Non-Newtonian Glows*, 1995.
- [10] Y. Xuan and Q.Li, "Heat Transfer Enhancement of Nanofluids," *International Journal Heat Fluid Flow*, 2000.
- [11] Ramesh K. Shah and Dusan P. Sekulic, *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. New Jersey, Amerika Serikat: John Wiley and Sons, Inc, 2003.
- [12] S. Kandlikar, S. Garimella, D.Li, S. Colin, and M.R. King, *Fluid Flow in Minichannels and Microchannels.*: Elsevier, 2006.
- [13] Robert J. Kee *et al.*, "The Design, Fabrication, and Evaluation of a Ceramic

- Counter-Flow Microchannel Heat Exchanger," *Applied Thermal Engineering*, 2011.
- [14] S.W. Kang and S.C. Tseng, "Analysis of Effectiveness and Pressure Drop in Micro Cross-Flow Heat Exchanger," *Applied Thermal Engineering*, 2006.
- [15] H.S. Kou, J.J. Lee, and C.W. Chen, "Optimum Thermal Performance of Microchannel Heat Sink by Adjusting Channel Width and Height," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2007.
- [16] Thanhtrung Dang, Jyh-tong Teng, and Jiann-cherng Chu, "A Study on the Simulation and Experiment of a Microchannel Counter-Flow Heat Exchanger," *Applied Thermal Engineering*, 2010.
- [17] Aziz Koyuncuoglu, Rahim Jafari, Tuba Okutucu-Ozyurt, and Haluk Kulah, "Heat Transfer and Pressure Drop Experiments on CMOS Compatible Microchannel Heat Sinks for Monolithic Chip Cooling Applications," *International Journal of Thermal Sciences*, 2012.
- [18] Tu-Chieh Hung, Wei-Mon Yan, and Wei-Ping Li, "Analysis of Heat Transfer Characteristics of Double-Layered Microchannel Heat Sink," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012.
- [19] Native Dynamics. (2010) Knowledge Base. [Online].
<http://knowledgebase.nativedynamics.com.au/getArticle?article=010002&topic=2>
- [20] C.T. Nguyen, G. Roy, C. Gauthier, and N. Galanis, "Heat Transfer Enhancement Using Al₂O₃-Water Nanofluid for an Electronic Liquid Cooling System," *Applied Thermal Engineering*, 2007.
- [21] B. Farajollahi, S.Gh. Etemad, and M. Hojjat, "Heat Transfer of Nanofluids in a Shell and Tube Heat Exchanger," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009.
- [22] S.M. Peyghambarzadeh, S.H. Hashemabadi, M. Seifi Jamnani, and S.M. Hoseini, "Improving the Cooling Performance of Automobile Radiator with Al₂O₃-water Nanofluid," *Applied Thermal Engineering*, 2011.
- [23] C.J. Ho, L.C. Wei, and Z.W. Li, "An Experimental Investigation of Forced Convective Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Al₂O₃-water

- Nanofluid," *Applied Thermal Engineering*, 2009.
- [24] Tu-Chieh Hung and Wei-Mon Yan, "Enhancement of Thermal Performance in Double-Layered Microchannel Heat Sink with Nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012.
- [25] H.A. Mohammed, G. Bhaskaran, N.H. Shuaib, and H.I. Abu-Mulaweh, "Influence of Nanofluids on Parallel Flow Square Microchannel Heat Exchanger Performance," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2010.
- [26] M.N. Pantzali, A.G. Kanaris, K.D. Antoniadis, A.A. Mouza, and S.V. Paras, "Effect of Nano Fluids on the Performance of Miniature Plate Heat Exchanger with Modulated Surface," *International Journal of Heat and Fluids Flow*, 2009.
- [27] Frank D. Incropera and David P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed.: John Wiley & Sons.
- [28] Frank M. White. (2012) John Hopkins University Web Site. [Online].
<http://www.jhu.edu/virtlab/heat/nusselt/nusselt.htm>
- [29] S. Kakac, R. K. Shah, and W. Aung, *Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer.*, 1987.

LAMPIRAN

