

**PENGARUH KEMIRINGAN PIPA BERULIR-DALAM
TERHADAP KOEFISIEN PERPINDAHAN KALOR DUA FASA
AIR-UDARA PADA POLA ALIRAN GELEMBUNG**

ARIF WAHRUDIN

5315092557



Skripsi Ini Ditulis Sebagai Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Pendidikan

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA

2015

ABSTRAK

ARIF WAHRUDIN. Pengaruh Kemiringan Pipa Berulir-Dalam Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor Dua Fasa Air-Udara Pola Aliran Gelembung

Skripsi, Jakarta: Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, 2015.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh pemberian ulir di bagian dalam pipa pada aliran dua fasa pola aliran gelembung. Penelitian ini dilakukan dengan mengalirkan campuran udara dan air ke dalam pipa dengan debit udara 20 cm³/menit, 40 cm³/menit dan 60 cm³/menit dan debit air 2 LPM, 4 LPM dan 6 LPM dimana pipa tersebut mempunyai sudut kemiringan dari sudut 0⁰ hingga sudut 50⁰ dengan perubahan sudut 10⁰ dimulai dari horizontal.

Penelitian ini menggunakan metode eskperimen. Peneliti menggunakan pipa tembaga panjang 2.200mm dengan diameter dalam 14mm dan diameter luar 16mm. Pipa tersebut dipanaskan dengan nikelin berdiameter 0,8mm yang dibuat melingkari pipa sepanjang 2.000mm. Pada pipa tersebut dipasang 4 buah termokopel untuk membaca suhu yaitu *input* air, *output* air, *input* dinding pipa tembaga, dan *output* dinding pipa tembaga.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat pengaruh kemiringan pipa berulir-dalam terhadap koefisien perpindahan kalor. Penambahan debit udara menghasilkan gelembung yang jumlahnya lebih banyak dan menghasilkan peningkatan koefisien perpindahan kalor. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa debit air 6liter/menit menghasilkan koefisien perpindahan kalor terbesar pada sudut 0⁰.

Kata kunci : koefisien perpindahan kalor, dua fasa, pola aliran gelembung

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT berkat rahmat serta hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Kemiringan Pipa Berulir-Dalam Terhadap Perpindahan Kalor Dua Fasa Air-Udara Pada Pola Aliran Gelembung”**.

Dalam penulisan ini, penulis banyak mendapat bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bapak Drs. Riyadi, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta
2. Bapak Dr. Eng. Agung Premono, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta.
3. Bapak Ahmad Kholil, S.T., M.T. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta.
4. Bapak Drs. H. Supria Wiganda, M.Pd. selaku dosen pembimbing I
5. Bapak H. Wardoyo, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing II
6. Bapak Prof. Dr. Basuk Wibawa, M.M. selaku pembimbing akademik
7. Ayahanda, Ibunda, dan Segenap Keluarga tersayang, yang selalu memberi dukungan baik secara moral maupun material. Khusus untuk Ibundaku yang tak henti-hentinya memberikan doa dan kasih sayangnya.
8. Seluruh Dosen, Karyawan, dan Keluarga Besar Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta.
9. Pak Darwin yang telah banyak memberikan masukan untuk penyelesaian penelitian ini.
10. Pak Yoga yang telah meminjamkan alatnya.
11. Tim gelembung, Faisal Muhtar, Ahmad Agni, Oryza Sativa, Muhammad Lutfi dan Tarwan Hidayat, serta Panji Bagus yang telah rela meminjamkan kamernya selama berbulan-bulan.
12. Teman-teman teknik mesin angkatan 2009 serta seluruh pihak yang telah memberikan bantuan yang berguna bagi kelancaran penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tulisan ini masih banyak kekurangan, jauh dari sempurna dan besar harapan penulis semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca semua pada umumnya.

Jakarta, Januari 2015

Arif Wahrudin

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR GRAFIK.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Identifikasi Masalah.....	4
1.3. Pembatasan Masalah	5
1.4. Perumusan Masalah	5
1.5. Tujuan Experimental.....	5
1.6. Manfaat Experimental.....	6
BAB II KAJIAN TEORI	
2.1. Perpindahan Kalor.....	7
2.1.1. Konduksi	7
2.1.2. Konveksi	8
2.1.3. Radiasi.....	9
2.2. Pola Aliran Dua Fasa	10
2.2.1. Pola Aliran Pipa Vertikal	10
2.2.1. Pola Aliran Pipa Horisontal	12
2.3. Besarnya Kalor Yang Diserap Fluida	13
2.4. Konfigurasi Aliran	14
2.5. Koefisien Perpindahan Kalor	15
2.6. <i>Fluks</i> Kalor.....	15
2.7. Fraksi Hampa	16
2.7. Koefisien Perpindahan Kalor Dua Fasa	16
2.8. Kerangka Berfikir.....	18
2.9. Hipotesis.....	19

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Tujuan Penelitian	20
3.2. Tempat dan Waktu Penelitian	20
3.3. Metode Penelitian.....	21
3.4. Bahan dan Alat.....	23
3.5. Prosedur Penelitian.....	24
3.6. Rancangan Penelitian	26
3.6.1 Menghitung Daya Pemanas Listrik.....	26
3.7. Teknik Analisa Data	30

BAB IV HASIL PENELITIAN

4.1. Pengaruh Posisi Seksi Uji Terhadap Bentuk Gelembung Dengan Kondisi Debit Udara, Debit Air dan Posisi Sudut Tetap	31
4.2. Pengaruh Penambahan Debit Udara Terhadap Bentuk Gelembung Dengan Kondisi Posisi Seksi Uji, Debit Air Dan Posisi Sudut Tetap	33
4.3. Pengaruh Penambahan Debit Air Terhadap Bentuk Gelembung Dengan Kondisi Posisi Seksi Uji, Debit Udara Dan Posisi Sudut Tetap.....	34
4.4. Pengaruh Perubahan Posisi Sudut Terhadap Bentuk Gelembung Dengan Kodisi Seksi Uji, Debit Udara dan Debit Air Tetap	35
4.5. Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor	37
4.5.1. Sudut 0^0	37
4.5.2. Sudut 10^0	38
4.5.3. Sudut 20^0	39
4.5.4. Sudut 30^0	40
4.5.5. Sudut 40^0	41
4.5.6. Sudut 50^0	42
4.6. Pengaruh Perubahan Sudut Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor.....	43

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan	46
5.2. Saran.....	47

DAFTAR PUSTAKA	48
----------------------	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pola Aliran Pada Pipa Vertikal Keatas.....	11
Gambar 2.2 Pola Aliran Pada Pipa Horisontal.....	13
Gambar 3.1 Skema Seksi Uji	22
Gambar 3.2 Pipa Tembaga Yang Sudah Dililit Oleh Nikelin.....	27
Gambar 3.3 Seksi Uji Dilapisi Dengan Sabuk Asbes	28
Gambar 3.4 Seksi Uji Dilapisi Alumunium Foil Dan Nikelin Menyambung Dengan Kabel Listrik	28
Gambar 3.5 Buat Dudukan Termokopel	29
Gambar 3.6 Masukan Pegas <i>Stainless</i>	29
Gambar 3.7 Instalasi Seksi Uji.....	30
Gambar 4.1 Perubahan Bentuk gelembung Pada Spesimen Uji Bagian <i>Input</i> Dan <i>Output</i> Pada Posisi Sudut Seksi Uji 30^0 , Debit Air 6 Lpm Dan Debit Udara $40\text{ cm}^3/\text{menit}$ Yang Tetap.....	32
Gambar 4.2 Pengaruh Penambahan Debit Udara $20\text{ cm}^3/\text{menit}$, $40\text{ cm}^3/\text{menit}$ Dan $60\text{ cm}^3/\text{menit}$ Terhadap Bentuk Gelembung Pada Seksi Uji Bagian <i>Input</i> , Debit Air 2 Lpm Dan Posisi Sudut 30^0	33
Gambar 4.3 Pengaruh Penambahan Debit Air Dengan Perubahan 2 Lpm, 4 Lpm Dan 6 Lpm Terhadap Bentuk Gelembung Pada Seksi Uji Bagian <i>Input</i> , Debit Udara $40\text{ m}^3/\text{menit}$ Dan Posisi Sudut Tetap 20^0	34
Gambar 4.4 Pengaruh Perubahan Posisi Sudut Dengan Perubahan 0^0 , 10^0 , 20^0 , 30^0 , 40^0 Dan 50^0 Terhadap Bentuk Gelembung Pada Seksi Uji Bagian <i>Output</i> , Debit Udara $40\text{ cm}^3/\text{menit}$ Dan Debit Air 4 Lpm...	35

DAFTAR GRAFIK

Grafik 4.1 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 0^0	37
Grafik 4.2 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 10^0	38
Grafik 4.3 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 20^0	39
Grafik 4.4 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 30^0	40
Grafik 4.5 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 40^0	41
Grafik 4.6 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 50^0	42
Grafik 4.7 Pengaruh Sudut Kemiringan Pipa Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor Pada Debit Air 2 liter/menit	43
Grafik 4.8 Pengaruh Sudut Kemiringan Pipa Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor Pada Debit Air 4 liter/menit	44
Grafik 4.9 Pengaruh Sudut Kemiringan Pipa Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor Pada Debit Air 6 liter/menit	44

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Pengujian	49
Lampiran 2. Besarnya Kalor Yang Diserap Fluida.....	51
Lampiran 3. Koefisien Perpindahan Kalor (Htp).....	53
Lampiran 4. Fraksi Hampa.....	55
Lampiran 5. Pola Aliran Gelembung	57

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan Negara yang berkembang dan memiliki berbagai sumber daya alam yang sangat berlimpah. Namun belum bisa menggunakan secara optimal sumber-sumber energi yang ada. Oleh karena itu berbagai macam upaya telah dilakukan untuk memaksimalkan penggunaan berbagai sumber energi tersebut.

Penggunaan energi yang berlebihan pada suatu peralatan dan sikap manusia yang kurang ramah akan ketersediaan sumber energi menuntut untuk dicari terobosan-terobosan baru sebagai pengganti sumber energi terbarukan. Energi angin, energi air, gelombang air laut dan panas bumi merupakan beberapa contoh energi alternatif yang diharapkan mampu mengurangi ketergantungan penduduk dunia terhadap energi terbarukan yang pada suatu saat akan habis.

Salah satu cara untuk mengurangi ketergantungan ini dengan melakukan inovasi-inovasi baru dari peralatan penukar kalor sehingga diperoleh penukar kalor yang mempunyai efektivitas yang tinggi. Alat penukar kalor berfungsi untuk mengubah temperatur dan fasa suatu jenis fluida. Proses tersebut terjadi dengan memanfaatkan proses perindahan kalor dari fluida bersuhu tinggi menuju fluida bersuhu rendah. Contohnya adalah ekonomizer, yaitu alat penukar kalor yang berfungsi memanaskan aliran air sebelum masuk ke boiler menggunakan panas

dari gas buang. Sehingga energi kalor yang telah ada tidak terbuang percuma dan dapat digunakan kembali.

Inovasi-inovasi yang dilakukan terhadap perpindahan kalor dari penukar kalor bertujuan untuk mengatasi masalah seperti laju perpindahan kalor, faktor gesekan, karakteristik aliran fluida, luas permukaan perpindahan kalor, daya pompa, serta jenis material yang digunakan untuk memindahkan kalor pada penukar kalor.

Pada alat penukar kalor menggunakan aliran dua fasa pada aliran fluidanya. Aliran dua fasa yang merupakan bagian dari aliran multifasa sangat berbeda dengan aliran satu fasa. Pada aliran satu fasa, *pressure drop* dipengaruhi oleh *Reynolds number* yang merupakan fungsi dari viskositas, berat jenis fluida dan diameter pipa. Sedangkan aliran dua fasa mempunyai fenomena yang sangat kompleks dibanding pada aliran satu fasa diantaranya adalah interaksi antar fasa, pengaruh deformasi permukaan dan pergerakan antar fluidanya, pengaruh ketidakseimbangan fasa, perubahan pola aliran dan lain sebagainya.

Terdapat dua pola aliran fluida, yakni aliran laminar dan aliran turbulen. Aliran laminar yaitu fluida yang bergerak dalam lapisan-lapisan, atau lamina-lamina dengan satu lapisan meluncur secara lancar. Aliran turbulen yaitu dimana pergerakan dari partikel-partikel fluida sangat tidak menentu karena mengalami pencampuran serta putaran antar lapisan, yang mengakibatkan saling tukar momentum dari satu bagian fluida ke bagian fluida yang lain dalam skala yang besar.

Ishak, *et al* meneliti tentang pengaruh ketebalan *inner-helical fin* terhadap performa karakteristik pada *head exchanger* dengan ketebalan *inner-helical fin* 1mm, 2mm dan 3mm. Secara keseluruhan laju perpindahan kalor dan bilangan Nusselt mengalami peningkatan berturut-turut sebesar 148,023%, 152,164% dan 156,759% dari *plain tube* pada laju aliran volumetrik air panas yang sama 900 L/jam. Pada debit yang sama (900 L/jam) faktor gesekan juga mengalami peningkatan. Untuk *inner-helical fin* dengan ketebalan $t = 3\text{mm}$ faktor gesekan mengalami peningkatan rata-rata 63% dari *plain tube* tepatnya pada $f = 0,093$.¹

Ghajar dan Tang meneliti perpindahan kalor dua fasa air-udara dengan berbagai pola aliran pada pipa miring mulai dari posisi Horizontal, 2° , 5° , 7° menggunakan pipa stainless steel berdiameter 27,9 mm, perbandingan panjang dan diameter 95 dengan jumlah total data yang dihasilkan 763 data. Selanjutnya korelasi yang dihasilkan divalidasi dengan 6 korelasi yang dihasilkan beberapa peneliti sebelumnya dan disimpulkan bahwa korelasi yang dihasilkan akurasinya masuk akal ($\pm 30\%$) serta dapat diaplikasikan untuk beberapa pola aliran dan sudut kemiringan pipa (0° , 2° , 5° , 7°).²

Berbagai upaya sudah dilakukan untuk memprediksi dinamika fluida dan koefisien perpindahan kalor pada aliran dua fasa dengan beberapa bentuk pola aliran telah banyak dilakukan secara analitis maupun eksperimental, namun pada

¹ Ishak Usman, *et al*, "Pengaruh Ketebalan Inner-Helical Fin Terhadap Characteristic Of Performance Pada Head Exchanger", *Jurnal Rekayasa Mesin* Vol.1, No.3 (2010), h.108.

² Afshin.J.Ghajar dan Clement.C.Tang, "Validation of a General Heat Transfer Correlation For Non-Boiling Two Phase Flow Different Flow Patterns and Pipe Inclination Angles", *ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference*, Vol.2 (Januari, 2007), h.206.

aliran dua fasa dengan kedudukan pipa horisontal yang berkontur ulir di dalam belum begitu banyak literatur yang membahas. Selain itu, penelitian tentang perpindahan kalor ini nantinya juga sangat berguna dalam mata pelajaran konversi energi pada Sekolah Menengah Kejuruan Teknik Mesin. Fenomena dinamika fluida dan perpindahan kalor aliran dua fasa dengan posisi pipa horisontal yang berkontur ulir dalamnya menarik untuk diteliti.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, dapat diidentifikasi beberapa masalah, diantaranya :

1. Apakah ada pengaruh penggunaan pipa berkontur ulir di dalam terhadap perpindahan kalor dua fasa?
2. Bagaimanakah memprediksi besarnya pengaruh pipa berkontur ulir di dalam terhadap dinamika fluida dan perpindahan kalor dua fasa?
3. Bagaimanakah pengaruh pipa berkontur ulir di dalam terhadap dinamika fluida dan perpindahan kalor dua fasa?
4. Bagaimanakah karakteristik pola aliran gelembung terhadap dinamika fluida pada pipa yang dipanaskan?

1.3 Pembatasan Masalah

Karena luasnya cakupan materi dan keterbatasan waktu, dan kemampuan peneliti, maka peneliti merasa perlu membatasi penelitian ini. Pembatasan masalah dibatasi pada :

1. Penambahan kontur ulir dalam pipa terhadap koefisien perpindahan kalor dua fasa.
2. Kemiringan pipa yang diteliti 0^0 - 50^0 dengan perubahan setiap 10^0 .
3. Pola aliran yang digunakan pola aliran gelembung.
4. Debit udara yang digunakan 20cc/menit, 40cc/menit dan 60 cc/menit.
5. Debit air yang digunakan 2liter/menit, 4liter/menit dan 6liter/menit.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah dan identifikasi masalah dan pembatasan masalah diatas, maka penelitian ini dapat dirumuskan : “Bagaimana Pengaruh Kemiringan Pipa Berulir-Dalam Terhadap Perpindahan Kalor Dua Fasa Air-Udara Pada Pola Aliran Gelembung?”

1.5 Tujuan Eksperimental

1. Mencari tahu pengaruh kemiringan pipa berkontur ulir di dalam terhadap dinamika fluida dan perpindahan kalor.

2. Menambah wawasan penulis di bidang perpindahan kalor dan mekanika fluida.
3. Memenuhi salah satu syarat yang harus dipenuhi penulis agar bisa mendapatkan gelar sarjana.
4. Memberikan referensi pengembangan ilmu perpindahan kalor dan mekanika fluida

1.6 Manfaat Eksperimental

Hasil eksperimen ini diharapkan dapat menjadi sumbangan pemikiran bagi perkembangan ilmu pengetahuan serta dapat memberi informasi seluas-luasnya kepada masyarakat tentang perpindahan kalor dan dinamika fluida dua fasa pola aliran gelembung pada pipa berkontur ulir di dalam yang dipanaskan dengan variasi sudut kemiringan. Serta diharapkan bermanfaat dan dapat dijadikan referensi, petunjuk teknis dan desain dalam perancangan komponen-komponen sistem konversi energi khususnya *heat exchanger*, misalnya boiler, evaporator, dan kondensor.

BAB II

KAJIAN TEORI

2.1 Hakikat Perpindahan Panas

Perpindahan panas dapat didefinisikan perpindahan energi dari daerah bersuhu lebih tinggi ke daerah bersuhu lebih rendah diantara benda atau material.³

Perpindahan panas pada umumnya dibedakan menjadi tiga cara perpindahan panas yang berbeda : konduksi (*conduction*; juga dikenal dengan istilah hantaran), konveksi (*convection*; juga dikenal dengan istilah ilian), dan radiasi (*radiation*; juga dikenal dengan istilah pancaran)

2.1.1 Konduksi

Konduksi adalah proses panas mengalir dari daerah yang bersuhu lebih tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) yang bersinggungan secara langsung.⁴ Dalam aliran panas konduksi, perpindahan energi terjadi karena hubungan molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar.

Konduksi adalah satu-satunya mekanisme dimana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak tembus cahaya. Konduksi penting pula dalam fluida,

³ Frank Kreith, *Prinsip-Prinsip Perpindahan Panas*, terj. Arko Prijono, (Jakarta: Erlangga, 1997), h.4.

⁴ *Ibid.*

tetapi di dalam medium yang bukan padat biasanya tergabung dengan konveksi, dan dalam beberapa hal juga dengan radiasi.

Persamaan dasar untuk konduksi:

$$Q_{\text{kond}} = \frac{kA \Delta T}{L} \dots\dots\dots(2-1)^5$$

dimana : Q_{kond} = laju perpindahan panas (W)

k = konduktifitas termal (W /m°C.)

A = luas penampang (m²)

L = ketebalan (m²)

ΔT = perbedaaan suhu (°C)

2.1.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan energi yang dihubungkan dengan pergerakan fluida.⁶ Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat dan cairan atau gas.

Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya di atas suhu fluida sekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Pertama, panas akan mengalir dengan cara konduksi dari permukaan ke partikel-partikel fluida yang berbatasan. Energi yang berpindah dengan cara demikian akan menaikkan suhu dan energi dalam partikel-partikel fluida ini. Kemudian partikel-partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu rendah di

⁵ Peter J. Lunde, *Solar Thermal Engineering : Space Heating and Hot Water Systems*, (New York:John Wiley & Sons, 1980), h. 12.

⁶ Kreith Frank, *Op.Cit.*, h.5

dalam fluida di mana mereka akan bercampur dengan, dan memindahkan sebagian energinya kepada partikel-partikel fluida lainnya. Dalam hal ini alirannya adalah aliran fluida maupun energi.

Laju perpindahan panas dengan cara konveksi:

$$Q = hA \Delta T \dots\dots\dots(2-2)^7$$

di mana : Q = laju perpindahan panas (W)

h = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m²°C.)

A = luas penampang (m²)

ΔT = perbedaan suhu permukaan dan fluida (°C)

2.1.3 Radiasi

Radiasi adalah proses dimana panas mengalir dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang, bahkan bila terdapat ruang hampa di antara benda-benda tersebut.⁸

Energi radiasi bergerak dengan kecepatan cahaya (3×10^8 m/s) dan gejala-gejalanya menyerupai radiasi cahaya. Memang menurut teori elektromagnetik, radiasi cahaya dan radiasi termal hanya berbeda dalam panjang gelombang masing-masing.

⁷ Peter J. Lunde, *Op.Cit.*, h.14.

⁸ Kreith Frank, *Op.Cit.*, h.5.

Panas radiasi dipancarkan oleh suatu benda dalam bentuk *batch* (kumpulan) energi yang terbatas atau *quanta*. Untuk menghitung besarnya panas yang dipancarkan dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$q_r = e A \sigma (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots(2-3)^9$$

dimana : q_r = laju perpindahan panas dengan cara radiasi (watt)

e = emintansi permukaan kelabu

A = luas permukaan (m^2)

σ = konstanta dimensional ($0,174 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$)

T_1 = temperatur benda ($^\circ\text{C}$)

T_2 = temperatur benda yang mengelilinginya ($^\circ\text{C}$)

2.2 Pola Aliran Dua Fasa

2.2.1 Pola Aliran dalam Pipa Vertikal

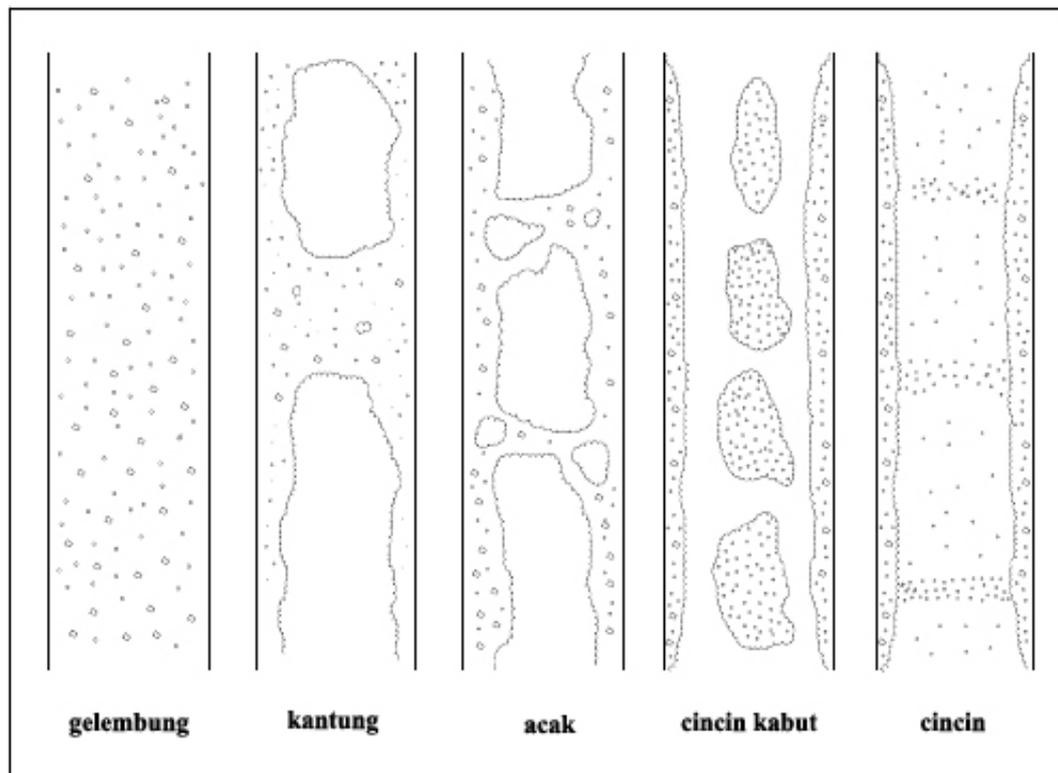
Untuk aliran keatas gas dan cair dalam pipa vertikal, fasa cair dan gais terdistribusi kedalam beberapa struktur aliran yang dapat diamati. Struktur aliran ini ditunjukkan dalam pola airan sebagai berikut¹⁰ :

- a. Aliran gelembung (*buble*), dimana gelembung diperkirakan memiliki ukuran yang seragam.

⁹ Frank Kreith, *Op.Cit.*, h.11.

¹⁰ Raldi Artono Koestoer dan Sasanti Proborini, *Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis* , (Jakarta: Pradya Paramita, 1994), h.29.

- b. Aliran kantung gas (*plug/slug*), dimana gas yang mengalir membentuk gelembung besar (kadang-kadang gelembung gas kecil terdistribusi di cairan).
- c. Aliran acak (*churn*), dimana terjadi gerakan osilasi sehingga cairan menjadi tidak stabil.
- d. Aliran cincin (*annular*), dimana sebagian fasa likuid berlaku sebagai film di dinding pipa dan sebagian lagi berupa tetesan yang terdistribusi dalam gas yang mengalir pada bagian tengah pipa.
- e. Aliran cincin kabut tetes likuid (*wispy annular*), dimana konsentrasi tetesan dalam gas bertambah dan akhirnya bergabung membentuk gumpalan.



Gambar 2.1 Pola Aliran Pada Pipa Vertikal Ke Atas¹¹

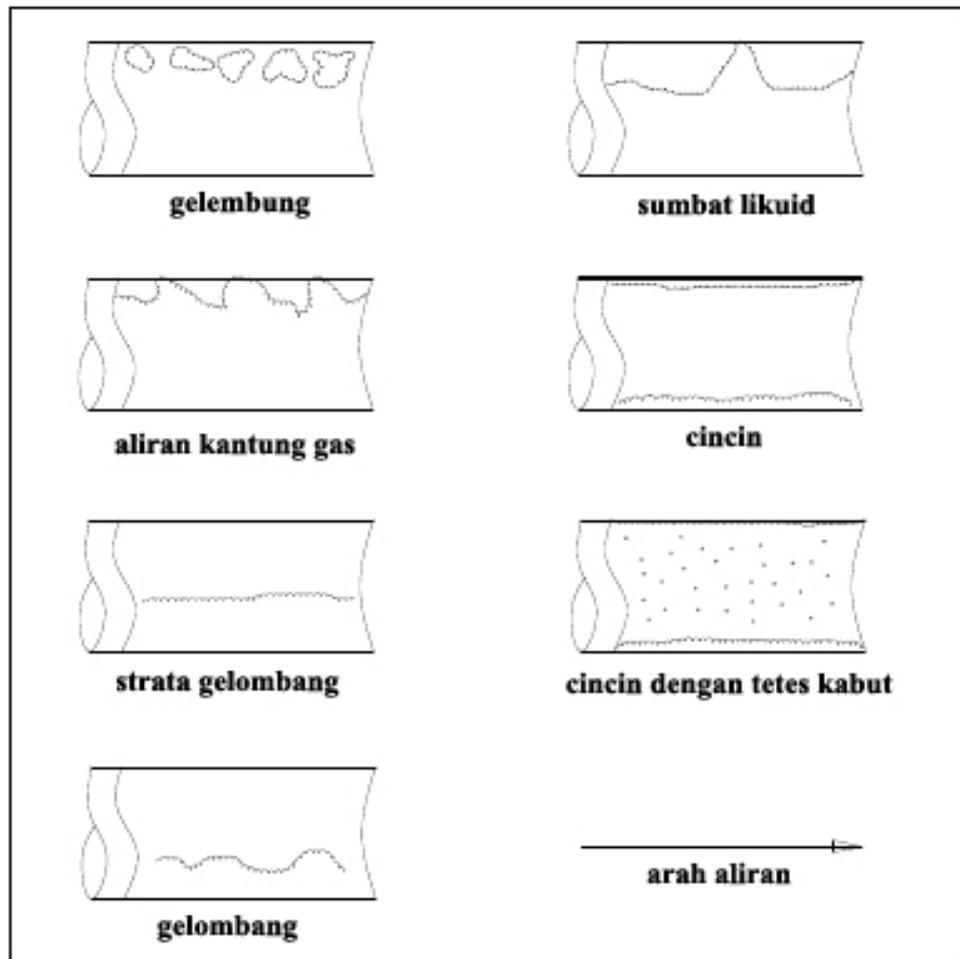
¹¹ Mahasiswa Pascasarjana DTM-FTUI, *Perpindahan Kalor Pendidihan dan Aliran Dua Fase*, (Depok:Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, 2012), h.3.

2.2.2 Pola Aliran dalam Pipa Horizontal

Pola aliran dua fasa pada pipa horizontal hampir sama dengan aliran pada pipa vertikal, hanya pada aliran horizontal dipengaruhi faktor gravitasi yang cenderung mendorong likuid ke dasar saluran dan gas ke bagian atas. Pola aliran gas dan likuid dalam pipa horizontal dikategorikan sebagai berikut¹² :

- a. Aliran gelembung (*bubble*), dimana gelembung gas cenderung untuk mengalir pada bagian atas pipa.
- b. Aliran kantung gas (*plug*), dimana gelembung gas kecil bergabung membentuk kantung gas.
- c. Aliran strata cincin (*stratified*), dimana permukaan sentuh likuid-gas sangat halus. Tetapi pola aliran seperti ini biasanya tidak terjadi, batas fasa hampir selalu bergelembung.
- d. Aliran strata gelombang (*stratified wavy*), dimana amplitude gelombang meningkat karena kenaikan kecepatan gas.
- e. Aliran sumbat likuid (*slug*), dimana amplitude gelombang sangat besar hingga menyentuh bagian atas pipa.
- f. Aliran cincin (*annular*), sama dengan pada bagian pipa vertikal hanya saja likuid film lebih tebal di dasar pipa daripada di bagian atas.

¹² Raldi Artono Koestoer dan Sasanti Proborini, *Op.Cit.*, h.32.



Gambar 2.2 Pola Aliran Pada Pipa Horizontal¹³

2.3 Besarnya Kalor yang Diserap Fluida

Pemanasan serta pendinginan fluida yang mengalir di dalam saluran tertutup merupakan satu di antara proses-proses perpindahan panas yang terpenting dalam perindustrian. Rancang bangun serta analisa semua jenis penukar panas memerlukan pengetahuan tentang koefisien perpindahan panas antara dinding saluran dan fluida yang mengalir di dalamnya.

¹³ Mahasiswa Pascasarjana DTM-FTUI, *Op.Cit.*,h.6.

Bila koefisien perpindahan panas untuk suatu geometri tertentu serta kondisi aliran yang ditetapkan telah diketahui, maka laju perpindahan panas pada beda suhu dapat dihitung dari persamaan:

$$Q = m c_p \Delta T_b \dots\dots\dots(2-4)^{14}$$

Dimana : Q = laju perpindahan panas ke fluida (Watt/m²)

m = laju aliran massa (kg/s)

c_p = panas jenis pada tekanan konstan (J/kg °C)

ΔT_b = beda suhu antara penampang-penampang yang bersangkutan (°C)

2.4 Konfigurasi Aliran

Pemisahan air dengan uap air dalam sebuah tabung panas atau dingin dapat dipresentasikan dalam berbagai bentuk dengan prediksi perhitungan penurunan tekanan dan koefisien perpindahan kalor dari dinding tabung ke fluida dua fasa atau sebaliknya.

Aliran cair-gas dapat menyusun berbagai konfigurasi geometris yang dikenal sebagai pola aliran. Parameter fisik yang penting dalam menentukan pola aliran adalah :

1. Tegangan permukaan, yang menjaga dinding saluran tetap basah dan cenderung untuk membuat tetes-tetes cairan dan gelembung gas kecil.

¹⁴ Kreith Frank, *Op.Cit.*, h.417.

2. Gravitasi yang cenderung mendorong cairan pada dasar cairan.

2.5 Koefisien Perpindahan Kalor

Koefisien perpindahan kalor sebenarnya merupakan fungsi dalam aliran fluidanya, sifat-sifat termal medium fluidanya, dan geometri sistemnya. Harga angka pada suatu permukaan pada umumnya tidak seragam, dan juga bergantung pada lokasi tempat mengukur suhu fluida. Secara eksperimental, koefisien perpindahan kalor dua fasa dapat ditentukan dari hukum Newton tentang pendinginan, yaitu:

$$h_{TP} = \frac{q''}{T_{tp} - T_{dp}} \dots\dots\dots(2-5)^{15}$$

Dengan : q'' = fluks kalor (W/m^2)

T_{tp} = suhu dinding luar pipa ($^{\circ}C$)

T_{dp} = suhu dalam sumbu pipa ($^{\circ}C$)

2.6 Fluks Kalor

Fluks kalor sebagai besarnya kalor yang diserap oleh fluida pada saat mengalir di sepanjang pipa uji, untuk menghitung kecepatan perpindahan kalor per satuan luas dalam arah normal kepada arah aliran kalor (*fluks* kalor) dengan persamaan:

¹⁵ Frank P. Incopera, *Introduction Heat Transfer*, Sixth Edition, (Indiana: John Wiley & Sons, 2011), h.497.

$$q'' = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots(2-6)^{16}$$

Dengan : Q = kalor yang diserap oleh fluida (Watt/m²)

A = luas permukaan dalam pipa (m²)

2.7 Fraksi hampa

Fraksi hampa dapat didefinisikan sebagai :¹⁷

1. Fraksi dari volume saluran yang ditempati oleh fasa gas.
2. Fraksi dari luas penampang saluran yang ditempati oleh fasa gas.

Di asumsikan bahwa kedua definisi diatas identik dan dinyatakan dengan α .

2.8 Koefisien Perpindahan Kalor Dua Fasa

Ghajar mengembangkan korelasi perpindahan kalor dua fasa aliran gas-cair dalam pipa tanpa pendidihan. Koefisien perpindahan kalor dua fasa merupakan penjumlahan perpindahan panas tiap fasa.

$$\begin{aligned} h_{TP} &= (1 - \alpha)h_L + \alpha h_G \\ &= (1 - \alpha)h_L \left[1 + \left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \left(\frac{h_G}{h_L} \right) \right] \dots\dots\dots(2-7)^{18} \end{aligned}$$

¹⁶ Frank P. Incopera , *Op.Cit.*,h.502

¹⁷ Raldi Artono Koestoer dan Sasanti Proborini, *Op.Cit.*, h.44.

¹⁸ Afshin.J.Ghajar dan Clement C Tang, "Advances in Void Fraction, Flow Pattern Maps and Non-Boiling Heat Transfer Two-Phase Flow in Pipes with Various Inclination", *Advances in Multiphase Flow and Heat Transfer*, Vol.1 (2009), h.14.

dengan :

α = fraksi hampa

h_G = koefisien perpindahan kalor satu fasa gas

h_L = koefisien perpindahan kalor satu fasa cair

Melalui analisis matematis, diperoleh korelasi umum perpindahan kalor dua fasa .

$$h_{TP} = (1-\alpha)h_L \left[1 + C \left\{ \left(\frac{x}{1-x} \right)^m \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right)^n \left(\frac{Pr_G}{Pr_L} \right)^p \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^q \right\} \right] \dots\dots\dots(2-8)^{19}$$

dengan :

$C = 0,27$		untuk aliran vertikal
$m = -0,04$		
$n = 1,21$		
$p = 0,66$		
$q = -0,72$		

$$\alpha = \frac{1}{\left[1 + K \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \right]} \dots\dots\dots(2-9)^{20}$$

$$K = \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_m}} \dots\dots\dots(2-10)^{21}$$

K = konduktivitas termal (Watt/m°C)

ρ_m = massa jenis campuran (kg/m³)

¹⁹ *Ibid.* h.15.

²⁰ Afshin.J.Ghajar dan Clement C Tang, “Void Fraction and Flow Patterns of Two-Phase in Upward and Downward Vertical and Horizontal Pipes”, *Advances in Multiphase Flow and Heat Transfer*, Vol.4 (2012), h.186.

²¹ *Ibid.* h.189.

$$\rho_m = \frac{1}{\left(\frac{1-x}{\rho_L}\right) + \left(\frac{x}{\rho_G}\right)} \dots\dots\dots(2-11)^{22}$$

ρ_L = massa jenis air (kg/m³)

ρ_G = massa jenis udara (kg/m³)

$$x = \frac{m_G}{m_G + m_L} \dots\dots\dots(2-12)^{23}$$

x = kualitas udara dalam aliran

2.9 Kerangka Berfikir

Dari teori yang telah di paparkan diatas, kontur ulir di dalam pipa akan menciptakan aliran turbulen pada fluida atau gelembung-gelembung udara di dalam pipa. Gelembung-gelembung udara dengan sendirinya akan mengikuti pola ulir yang berada di dalam pipa. Sehingga mempermudah atau mempercepat proses perpindahan kalor dari pipa.

Pada penelitian ini kemiringan pipa akan dibuat lebih bervariasi (0°- 50° dengan perubahan sudut 10°), dimana peneliti berharap akan menghasilkan koefisien perpindahan kalor yang dapat diaplikasikan untuk pola aliran gelembung dengan sudut kemiringan pipa 0°,10°,20°,30°,40° dan 50°.

²² *Ibid.*

²³ Afshin.J.Ghajar dan Clement C Tang, *Op.Cit.*, h.14.

2.9 Hipotesis

Hipotesis pada penelitian ini adalah jika debit air dan debit udara ditambahkan dengan variasi kemiringan pipa (0° - 50° perubahan sudut 10°) maka akan mempengaruhi koefisien perpindahan kalor dua fasa.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pipa horisontal berkontur ulir di dalam yang dipanaskan terhadap perpindahan kalor.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

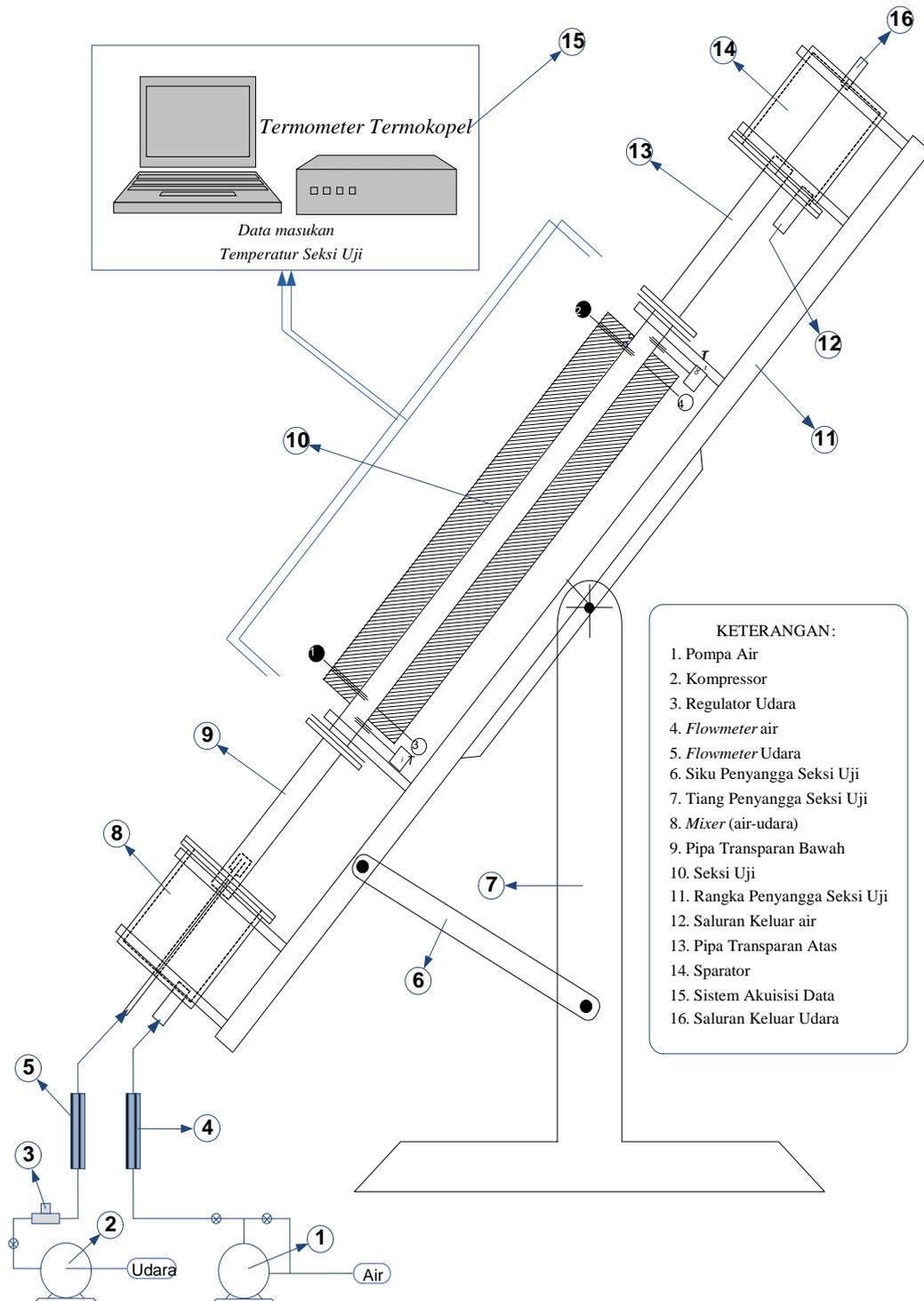
Penelitian ini dilakukan di laboratorium otomotif (konversi energi) Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta. Adapun waktu penelitian ini dimulai dari bulan Maret hingga Juni 2014.

No	Kegiatan	Bulan			
		Maret	April	Mei	Juni
I	Tahapan Persiapan				
1.	Mempersiapkan Bahan Penelitian				
2.	Membuat Instalasi Penelitian				
3.	Pengujian Instalasi Penelitian				
II	Tahapan Pelaksanaan Penelitian				
	Pengaruh pipa horizontal berkontur ulir di dalam terhadap perpindahan kalor dua fasa pada pola aliran gelembung				
III	Tahapan Pengolahan Hasil Penelitian				

	Pengolahan Data Hasil Penelitian				
IV	Tahapan Penyusunan Laporan Akhir Hasil Penelitian				
	Penyusunan Laporan Akhir				

3.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium. Peneliti merancang desain seksi pipa uji yang kemudian dibuat dalam bentuk nyata yang akan digunakan sebagai media penelitian. Setelah mendapatkan data dari berbagai variabel yang dibutuhkan pada pola aliran gelembung dengan menggunakan seksi pipa uji, data tersebut dianalisis hingga mendapatkan kesimpulan pengaruh kemiringan seksi uji terhadap perpindahan kalor dua fasa pada pola aliran gelembung.



Gambar 3.1 Skema Seksi Uji

3.4 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan merupakan air (H_2O) diambil dari kran yang berada dilaboratorium jurusan otomotif dan udara dari kompresor. Peralatan yang digunakan terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain :

1. Pompa air yang digunakan untuk memompa air memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Shimizu model PS – 128 bit

Max capacity = 10 – 18 liter/menit

Total head = 20 Meter

Output = 125 Watts

V / Hz / PH = 220 / 50 / 1

RPM = 2900

2. Pengukur tekanan udara (*air flow meter*) Dwyer dengan jenis bola glass untuk mengukur debit udara yang mengalir ke dalam seksi uji.
3. Kompresor, yang memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Puma PK50 – 160 Air Compressor

Tekanan udara maksimum = 8 kg/cm²

Debit maksimum = 751 Lpm

Motor Listrik = 5,5 Hp (1440 rpm)

V / Hz / PH = 220 / 50 / 3

4. Pengukur tekanan air (*water flow meter*) Konic untuk mengukur debit air yang mengalir dalam seksi uji.
5. SMC *air regulator* tipe AR 210 untuk mengatur debit udara.

6. Tabung *mixer* terbuat dari resin cor, untuk mencampur air dan udara sehingga diperoleh aliran gelembung.
7. Tabung separator yang terbuat dari resin cor , untuk memisahkan air dan udara keluar dari seksi uji.
8. Pipa akrilik / transparan berdiameter dalam 14 mm dan diameter luar 18 mm untuk mendeteksi pola aliran yang terjadi.
9. Pipa tembaga panjang 2.200 mm berdiameter dalam 14 mm dan diameter luar 16 mm sebagai pipa seksi uji yang dipanaskan.
10. Kawat nikelin berdiameter 0,8 mm sebagai pemanas listrik.
11. Cincin keramik sebagai dudukan kawat nikelin.
12. Sabuk asbes dan *glasswool* sebagai isolator panas.
13. *Aluminium foil* sebagai pembungkus pemanas agar panas tidak keluar ke udara bebas.
14. Termokopel tipe-k sebagai sensor suhu.
15. Tabung-U untuk mengukur besarnya penurunan tekanan.
16. Ampere meter untuk mengukur perubahan ampere listrik yang mengalir.
17. Krisbow Termometer tipe KW06-283 untuk mengukur temperatur suhu di dalam pipa yang dipanaskan.
18. Pegas *stainless* dengan *pitch* 45⁰, tebal 2,5 mm sebagai ulir di dalam pipa.

3.5 Prosedur Penelitian

Peneliti membuat skema seksi uji yang merupakan rancangan alat yang akan digunakan untuk penelitian. Udara dan air pada penelitian ini dapat tercampur hingga menjadi beberapa pola aliran sepenuhnya dihasilkan oleh

pembangkit gelembung airator aquarium yang dipasang pada *mixer*, diharapkan udara yang tercampur dengan air dapat menyebar merata dalam aliran.

Untuk mengamati bentuk dan distribusi udara dalam aliran, pada alat percobaan dipasang pipa akrilik pada *inlet* dan *outlet* seksi uji. Pipa tembaga yang digunakan sebagai seksi uji dipanaskan hanya sampai temperatur jenuh fluida, agar tidak terjadi pembentukan gelembung karena pemanasan yang akan mengganggu aliran gelembung yang sedang diteliti .

Temperatur aliran fluida diukur dengan dua sensor suhu dipasang ditengah-tengah aliran pada *inlet* dan *outlet* seksi uji dan dua sensor dipasang pada dinding luar pipa seksi uji pada *inlet* dan *outlet*. Kapasitas aliran tiap fasa dikontrol dengan kran dan regulator serta diukur dengan *airflowmeter*. Keseluruhan peralatan percobaan seperti terlihat pada gambar skema seksi uji di atas.

Untuk memeriksa bahwa peralatan bekerja dengan baik dan benar, terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan peralatan dengan percobaan aliran satu fasa dengan menggunakan air untuk memeriksa kebocoran peralatan. Air tersebut dialirkan menggunakan pompa air melalui lubang *inlet* hingga keluar di lubang *outlet*. Periksa apakah terdapat kebocoran atau tidak. Jika tidak, penelitian dapat dilanjutkan.

Percobaan dilakukan dengan cara mengalirkan air kedalam pipa percobaan dengan menggunakan pompa air. Udara dari kompresor dialirkan ke seksi uji melalui pembangkit gelembung. Kedua aliran tersebut diatur menggunakan *trotle*

valve dan regulator sampai terjadi aliran gelembung yang tetap dan konstan dalam pipa percobaan yang dapat di lihat pada pipa transparan atas, setelah itu pemanas listrik diaktifkan.

Bila telah tercapai kondisi yang stabil secara keseluruhan, yang ditandai dengan pembacaan temperatur termometer yang konstan. Selanjutnya mulai dilakukan pencatatan data-data kapasitas aliran fluida dan udara, temperatur udara dan air masuk dan keluar pipa seksi uji, temperatur fluida sepanjang seksi uji serta temperatur permukaan pipa seksi uji.

Variabel yang diukur dalam penelitian ini antara lain :

1. Debit air diukur menggunakan *flowmeter* air.
2. Debit udara diukur menggunakan *flowmeter* udara.
3. Suhu dinding luar *inlet* dan *outlet* pipa tembaga diukur dengan sensor suhu.
4. Suhu aliran fluida *inlet* dan *outlet* di dalam pipa tembaga diukur dengan sensor suhu.

3.6 Rancangan Penelitian

3.6.1 Menghitung Daya Pemanas Listrik

1. Peneliti menghitung hambatan total dari nikelin.

Diameter kawat = 0,8 mm

Hambatan (R) = 4 Ω /meter

Dengan panjang kawat nikelin 8,1 meter maka hambatan total yang didapatkan adalah sebesar :

$$R_{total} = 4 \Omega/\text{meter} \times 8,1 \text{ meter} = 32,4 \Omega$$

Setelah peneliti mengetahui hambatan total dari kawat nikelin, langkah selanjutnya adalah menghitung daya yang diperlukan oleh pemanas listrik dengan menggunakan rumus :

$$R = v^2 / P$$

Dimana : R = Hambatan (ohm)

v = Tegangan (volt)

P = Daya (watt)

$$\text{Daya} = \frac{220 * 220}{32,4\Omega} = 1494 \text{ watt}$$

Setelah peneliti mengetahui daya yang dibutuhkan langkah selanjutnya adalah merakit pemanas listrik, yakni melilitkan nikelin yang sudah di masukan cincin keramik ke pipa tembaga.

2. Peneliti melilitkan nikelin ke pipa tembaga dengan jarak yang teratur agar panas bisa merata ke seluruh bagian pipa tembaga.



Gambar 3.2 Pipa Tembaga Yang Sudah Dililit Oleh Nikelin

3. Setelah terlilit secara merata selanjutnya peneliti melapisi pipa tembaga dengan sabuk asbes agar panas yang dihasilkan tidak keluar dari *heater*.



Gambar 3.3 Seksi Uji Dilapisi Dengan Sabuk Asbes

4. Langkah berikutnya peneliti melapisi seksi uji dengan alumunium foil dan menyambungkan kawat nikelin dengan kabel listrik.



Gambar 3.4 Seksi Uji dilapisi dengan alumunium foil dan nikelin disambung dengan kabel listrik

5. Selanjutnya peneliti membuat dudukan termokopel sebagai sensor suhu untuk aliran fluida di dalam seksi uji.



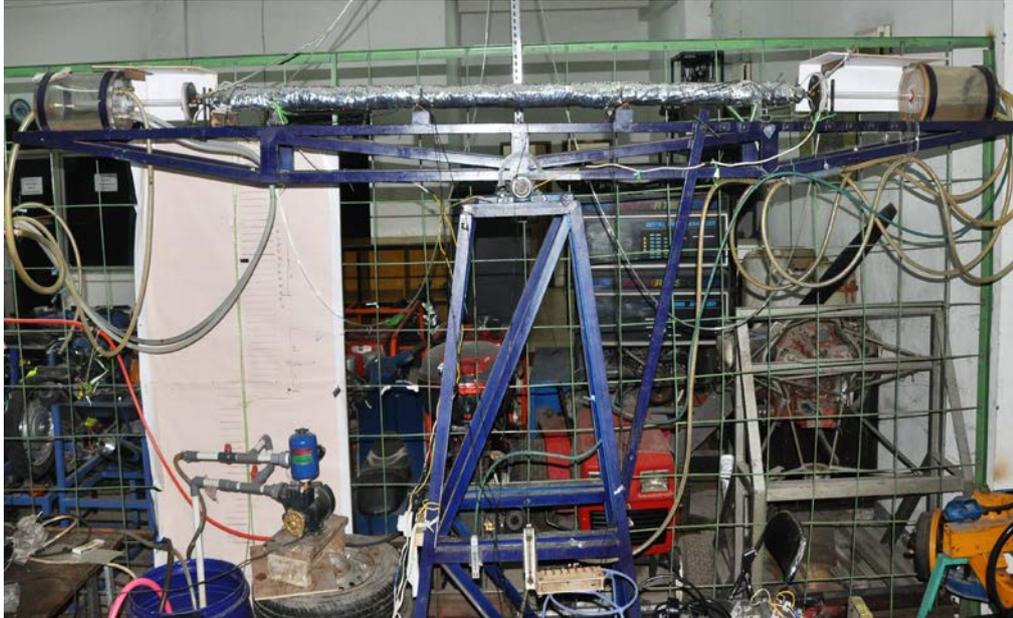
Gambar 3.5 Buat Dudukan Termokopel

6. Selanjutnya peneliti memasukan pegas *stainles* sebagai ulir ke dalam seksi uji.



Gambar 3.6 Masukan Pegas *Stainless*

7. Setelah perakitan pemanas selesai langkah selanjutnya yang peneliti lakukan adalah memasang seksi uji pada rangka penyangga seksi uji dan hubungkan semua sensor yang dibutuhkan.



Gambar 3.7 Instalasi Seksi Uji

3.7 Teknik Analisis Data

Metode yang digunakan adalah metode eksperimental laboratorium dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Mengukur suhu air keluaran pada pipa bagian keluar, mengukur air masuk, suhu dinding pipa bagian masuk dan keluar menggunakan Krisbow Termometer Termokopel KW06-283.
2. Mengambil foto gelembung pada pipa akrilik bagian masuk dan keluar.
3. Teknik analisis data dilakukan dengan mengambil data berdasarkan perbedaan debit air, debit udara dan variasi sudut.
4. Termokopel diletakan pada didalam pipa tembaga bagian masuk dan keluar, dinding pipa tembaga bagian masuk dan keluar.

BAB IV

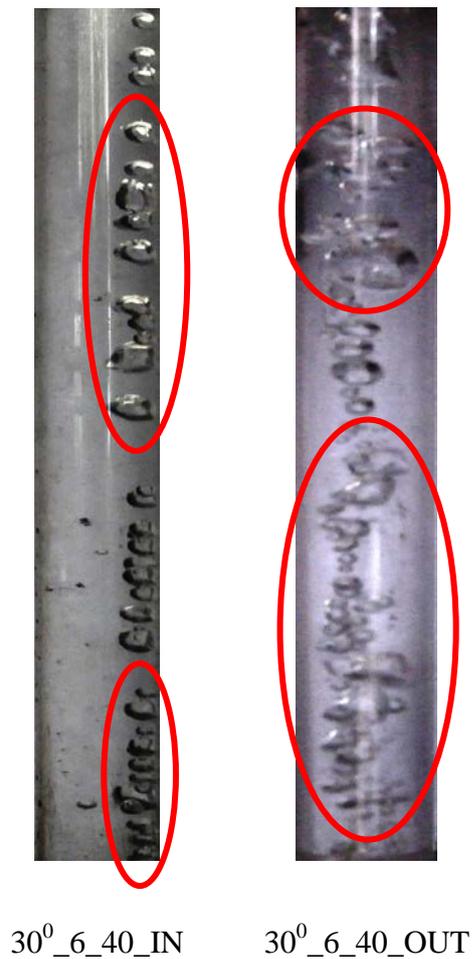
HASIL PENELITIAN

Penelitian eksperimental koefisien perpindahan kalor dua fasa (air – udara) pada pola aliran gelembung dengan sudut 0° - 50° , perubahan sudut 10° pada pipa miring yang di tambahkan ulir di dalam dan dipanaskan menghasilkan beberapa analisa sebagai berikut :

1. Pengaruh posisi seksi uji terhadap bentuk gelembung.
2. Pengaruh penambahan debit udara terhadap bentuk gelembung.
3. Pengaruh penambahan debit air terhadap bentuk gelembung.
4. Pengaruh perubahan sudut seksi uji terhadap bentuk gelembung.
5. Pengaruh perubahan sudut seksi uji terhadap koefisien perpindahan kalor.
6. Pengaruh debit udara dan debit air terhadap koefisien perpindahan kalor.

4.1 Pengaruh Posisi Seksi Uji Terhadap Bentuk Gelembung Dengan Kondisi Debit Udara, Debit Air dan Posisi Sudut Tetap.

Bentuk gelembung pada kondisi posisi sudut kemiringan pipa, debit air dan debit udara yang tetap, terjadi perubahan bentuk gelembung yang berbeda mulai dari bagian *input* (masukan) hingga menuju bagian *output* (keluaran). Pada bagian *input*, gelembung dengan ukuran hampir seragam serta jumlah dan jarak antar gelembung yang teratur.

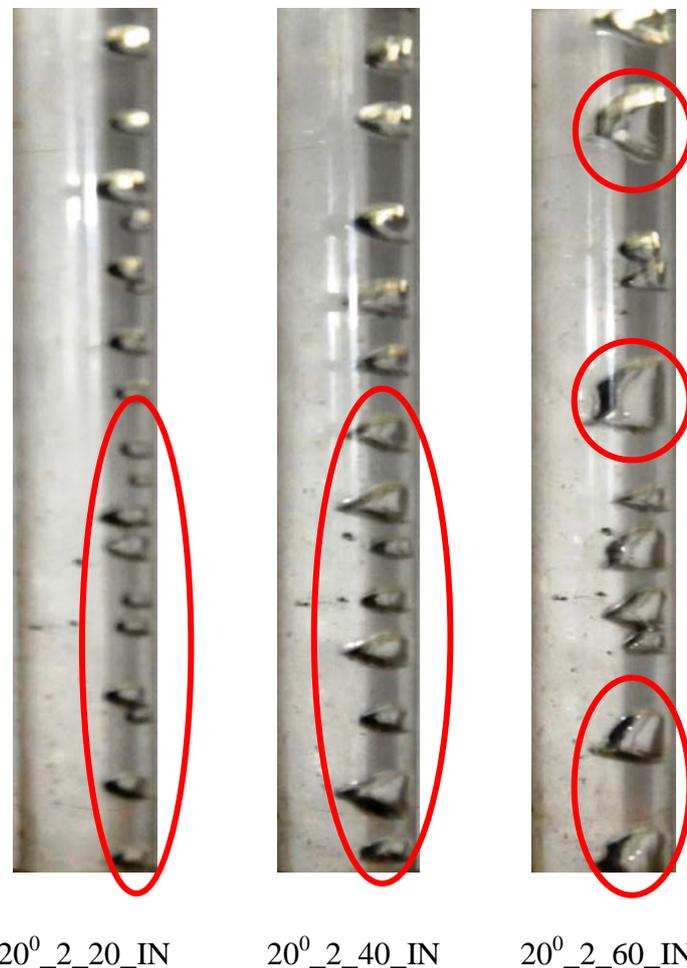


Gambar 4.1 Perubahan Bentuk Gelembung Pada Spesimen Uji Bagian *Input* Dan *Output* Pada Posisi Sudut Seksi Uji 30° , Debit Air 6 Lpm dan Debit Udara $40 \text{ cm}^3/\text{menit}$ Yang Tetap

Pada bagian *output*, gelembung yang terbentuk sudah tidak sama dengan bagian *input*. Gelembung sudah bergerak acak dengan ukuran yang tidak sama satu sama lain dan jarak yang tidak beraturan. Hal ini disebabkan gelembung yang telah melewati ulir didalam pipa sehingga terjadi pencampuran dan tabrakan antar gelembung. Serta posisi gelembung dibagian *output* banyak bergerak dibagian tengah seksi uji berbeda pada bagian *input* yang masih menempel pada bagian dinding seksi uji.

4.2 Pengaruh Penambahan Debit Udara Terhadap Bentuk Gelembung Dengan Kondisi Posisi Seksi Uji, Debit Air dan Posisi Sudut Tetap.

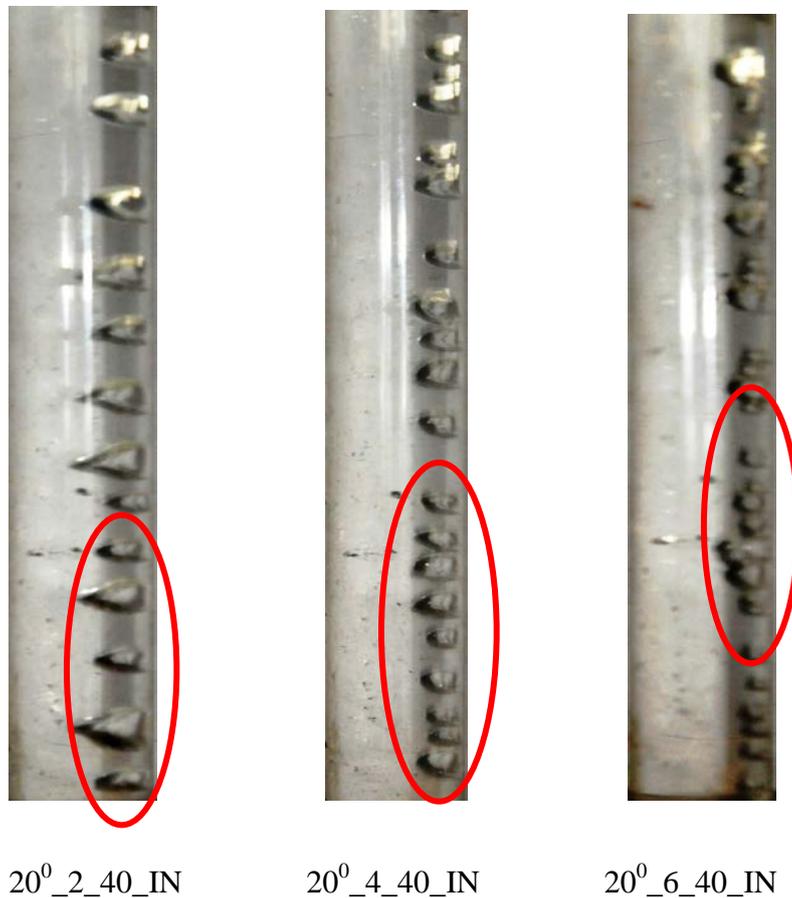
Pada sudut 20^0 dan penambahan debit udara secara bertahap pada debit air yang tetap terjadi perubahan bentuk gelembung. Hal ini terlihat pada perubahan bentuk gelembung dari debit udara $20 \text{ cm}^3/\text{menit}$ ke $40 \text{ cm}^3/\text{menit}$, dimana volume gelembung yang terbentuk lebih besar dengan jumlah yang hampir sama.



Gambar 4.2 Pengaruh Penambahan Debit Udara $20 \text{ cm}^3/\text{menit}$, $40 \text{ cm}^3/\text{menit}$ Dan $60 \text{ cm}^3/\text{menit}$ Terhadap Bentuk Gelembung Pada Seksi Uji Bagian *Input*, Debit air 2 Lpm dan Posisi Sudut 20^0

4.3 Pengaruh Penambahan Debit Air Terhadap Bentuk Gelembung Dengan Kondisi Posisi Spesimen Uji, Debit Udara dan Posisi Sudut Tetap.

Penambahan debit air pada kondisi debit udara dan posisi sudut yang tetap membuat bentuk gelembung yang tercipta semakin mengecil dan lebih berhimpitan. Hal ini terjadi disebabkan debit air yang meningkat pada penampang dan debit udara yang tetap, sehingga ruang hampa didalam pipa semakin terisi air.



Gambar 4.3 Pengaruh Penambahan Debit Air Dengan Perubahan 2 Lpm, 4 Lpm Dan 6 Lpm Terhadap Bentuk Gelembung Pada Seksi Uji Bagian *Input*, Debit Udara 40 m³/menit dan Posisi Sudut Tetap 20⁰

4.4 Pengaruh Perubahan Posisi Sudut Terhadap Bentuk Gelembung Dengan Kondisi Posisi Spesimen Uji, Debit Udara dan Debit Air Tetap



0°_4_20_Out 10°_4_40_Out 20°_4_20_Out 30°_4_20_Out 40°_4_20_Out 50°_4_40_Out

Gambar 4.4 Pengaruh Perubahan Posisi Sudut Dengan Perubahan 0°, 10°, 20°, 30°, 40° Dan 50° Terhadap Bentuk Gelembung Pada Seksi Uji Bagian *Output*, Debit Udara 20 cm³/menit dan Debit Air 4 Lpm

A. Sudut 0°

Gelembung pada bagian *output* di sudut 0° atau horizontal memiliki bentuk yang bulat dengan ukuran hampir serupa dan banyak yang bergerak

dibagian atas dinding seksi uji. Hal ini disebabkan di sudut 0^0 gaya gesek gelembung dengan dinding pipa yang masih besar ditambah dengan gaya grafitasi yang masih berpengaruh besar sehingga gelembung banyak yang bergerak dibagian atas dinding seksi uji.

B. Sudut 10^0 dan 20^0

Gelembung pada bagian *output* di sudut 10^0 dan 20^0 memiliki bentuk yang bulat dengan ukuran hampir serupa. Di sudut ini gelembung awalnya bergerak pada tengah-tengah seksi uji namun akhirnya bergerak ke bagian atas dinding seksi uji. Hal ini terjadi karena faktor kemiringan seksi uji dan gaya grafitasi yang menyebabkan gelembung yang awalnya bergerak di tengah-tengah seksi uji kembali ke bagian atas dinding seksi uji

C. Sudut 30^0 dan 40^0

Gelembung pada bagian *output* di sudut 30^0 dan 40^0 memiliki bentuk yang tidak bulat sempurna namun lebih pipih dibandingkan dengan bentuk gelembung di sudut 10^0 dan 20^0 . Di sudut ini gelembung sudah bergerak pada tengah-tengah seksi uji. Hal ini terjadi karena kemiringan seksi uji sudah berpengaruh besar sehingga setelah melewati ulir pergerakan gelembung tetap berada pada tengah-tengah seksi uji.

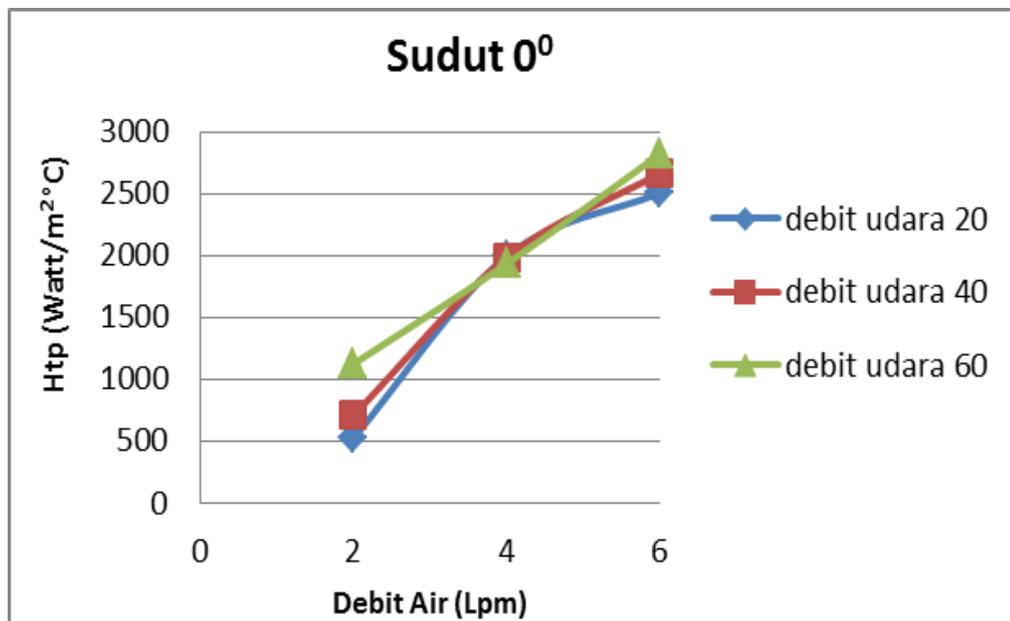
D. Sudut 50^0

Gelembung pada bagian *output* di sudut 50^0 sudah pecah menjadi gelembung-gelembung kecil dengan ukuran yang hampir serupa. Dan penyebaran

gelembung di sudut 50° ini sudah tersebar merata ke seluruh bagian seksi uji. Hal ini terjadi karena gaya grafitasi pada sudut ini tidak berpengaruh besar pada gelembung dan ulir didalam seksi uji yang menyebabkan tersebar meratanya gelembung ke seluruh bagian seksi uji.

4.5 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor

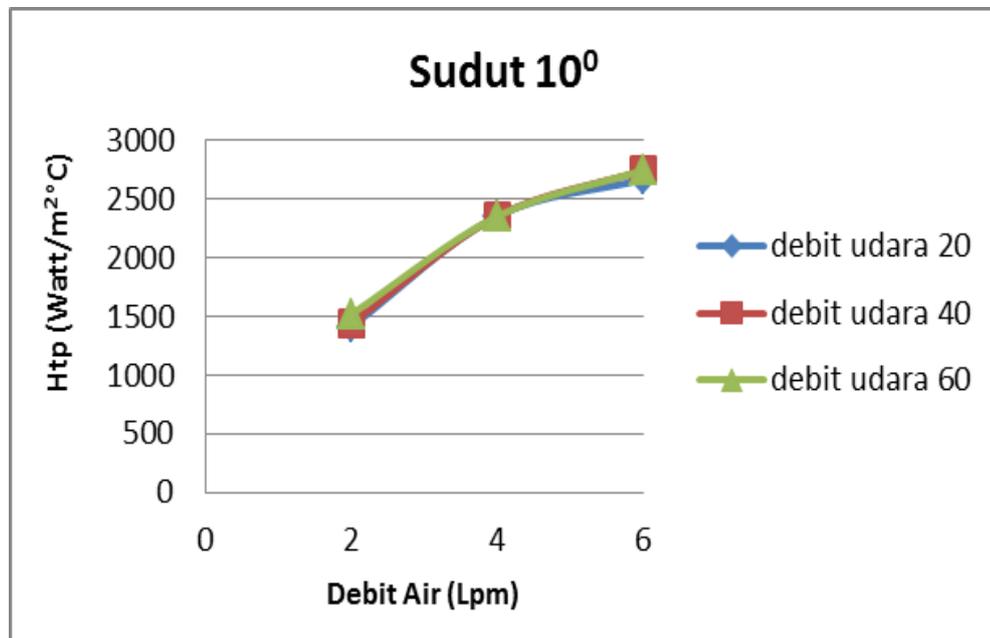
4.5.1 Sudut 0°



Grafik 4.1 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 0°

Berdasarkan grafik di atas hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan debit udara berpengaruh terhadap koefisien perpindahan kalor.

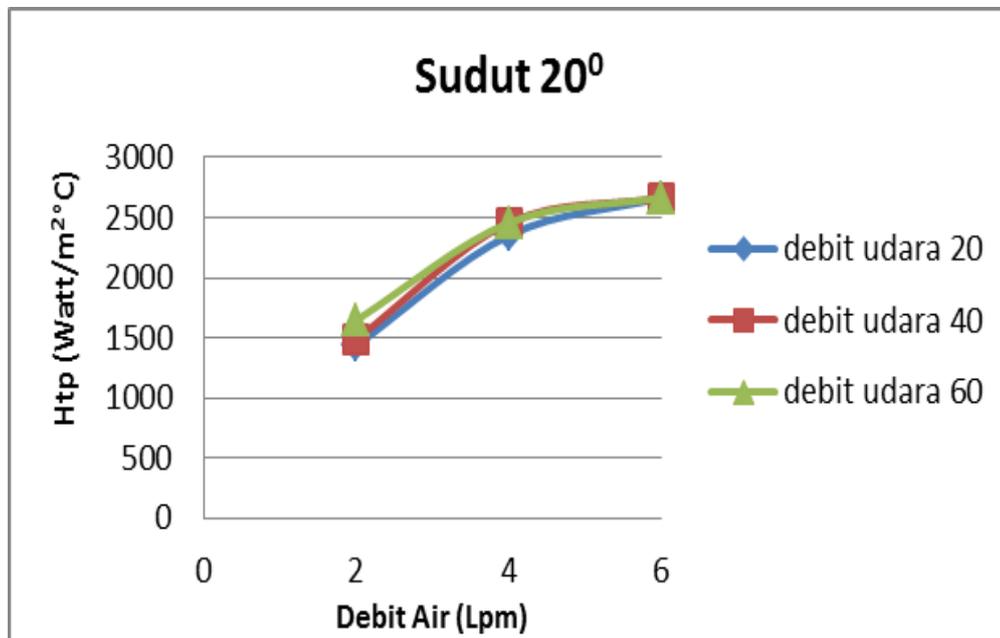
4.5.2 Sudut 10^0



Grafik 4.2 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 10^0

Berdasarkan grafik di atas hasil penelitian menunjukkan penambahan debit udara tidak berpengaruh banyak terhadap koefisien perpindahan kalor pada sudut 10^0 .

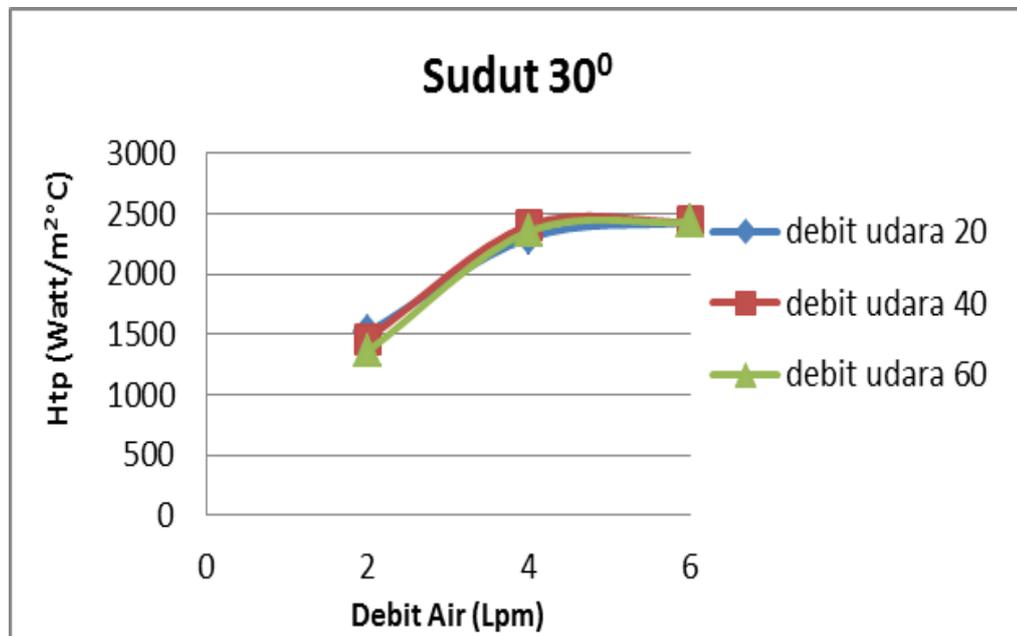
4.5.3 Sudut 20°



Grafik 4.3 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 20°

Berdasarkan grafik di atas hasil penelitian menunjukkan penambahan debit udara dari 20 cm³/menit ke 40 cm³/menit menghasilkan koefisien perpindahan kalor lebih besar disbanding penambahan debit udara dari 40 cm³/menit ke 60 cm³/menit.

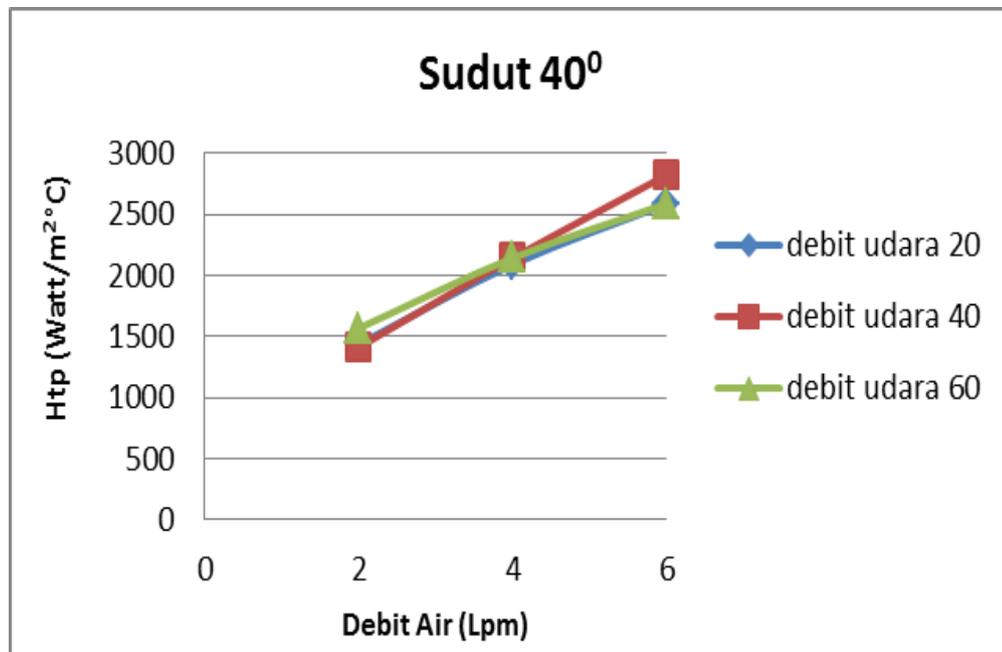
4.5.4 Sudut 30⁰



Grafik 4.4 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 30⁰

Berdasarkan grafik di atas hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan debit udara dari 40 cm³/menit ke 60 cm³/menit tidak menghasilkan peningkatan koefisien perpindahan kalor.

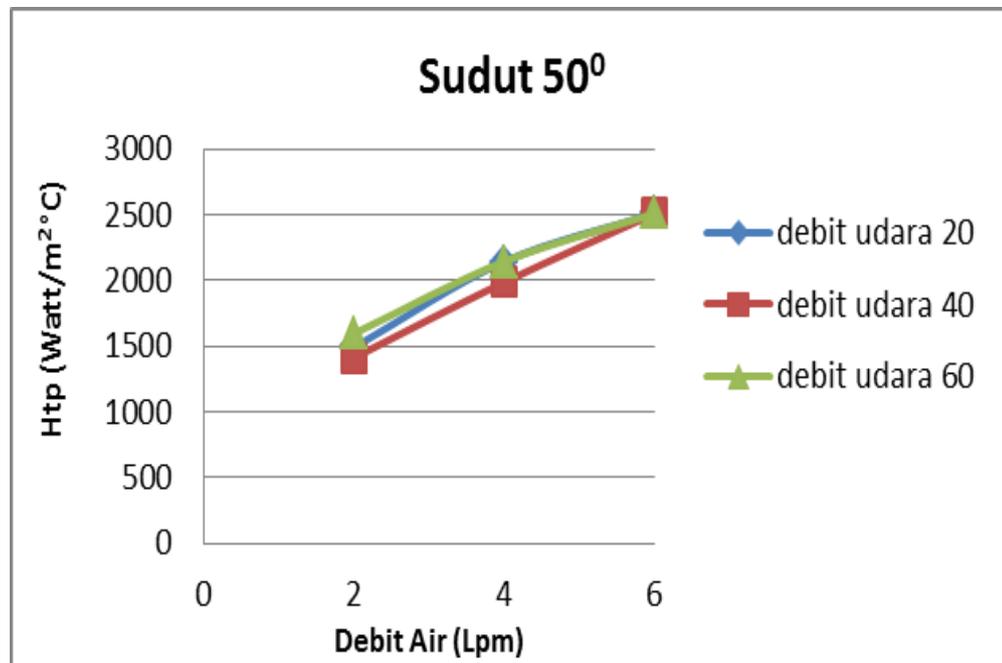
4.5.5 Sudut 40°



Grafik 4.5 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 40°

Berdasarkan grafik di atas hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan debit udara berbanding lurus dengan koefisien perpindahan kalor. Namun pada debit air 6 liter/menit debit udara $40 \text{ cm}^3/\text{menit}$ menghasilkan koefisien perpindahan kalor tertinggi.

4.5.6 Sudut 50°

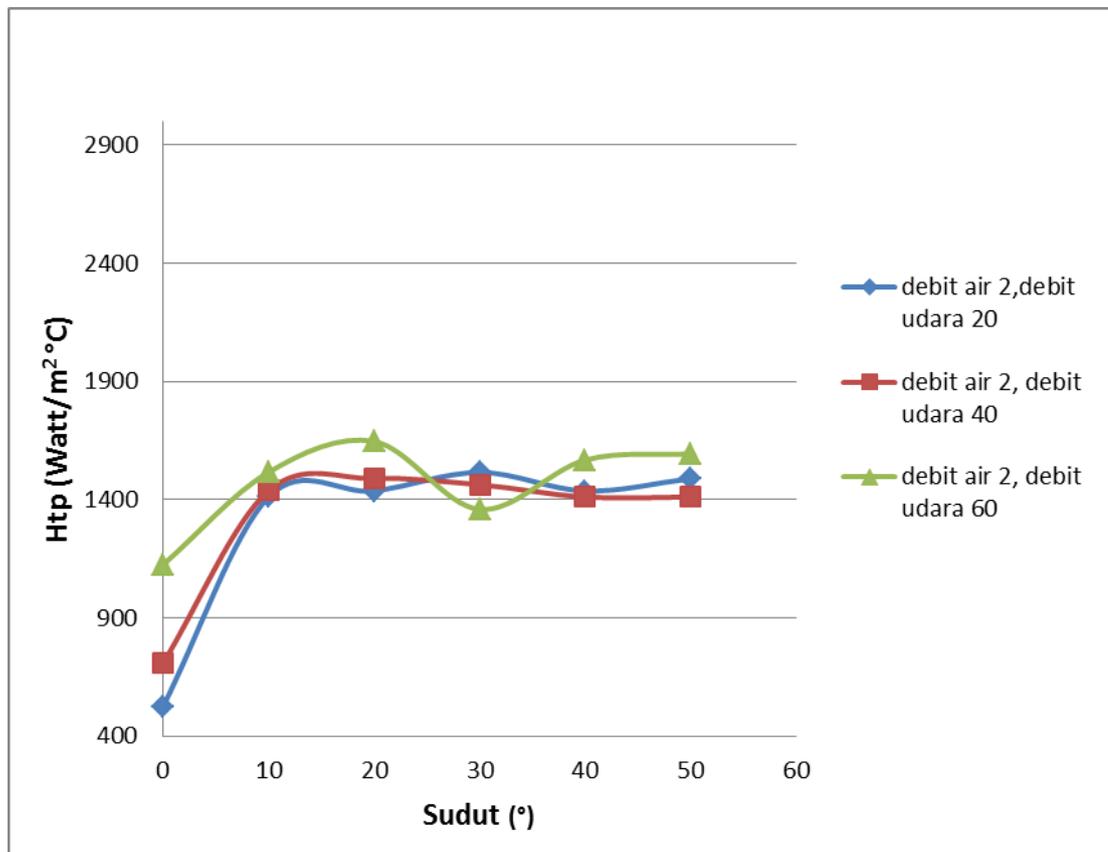


Grafik 4.6 Pengaruh Debit Udara Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor di Sudut 50°

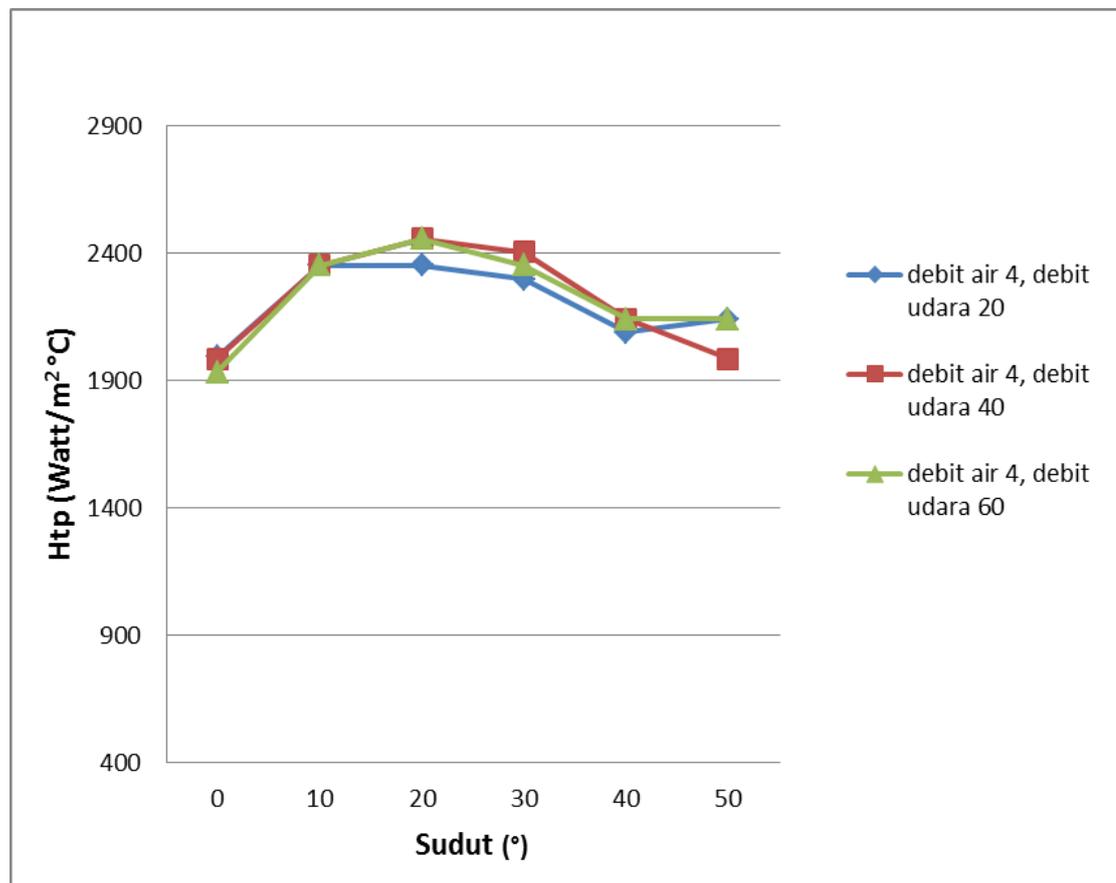
Berdasarkan grafik di atas hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan debit udara berbanding lurus dengan koefisien perpindahan kalor.

4.6 Pengaruh Perubahan Sudut Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor

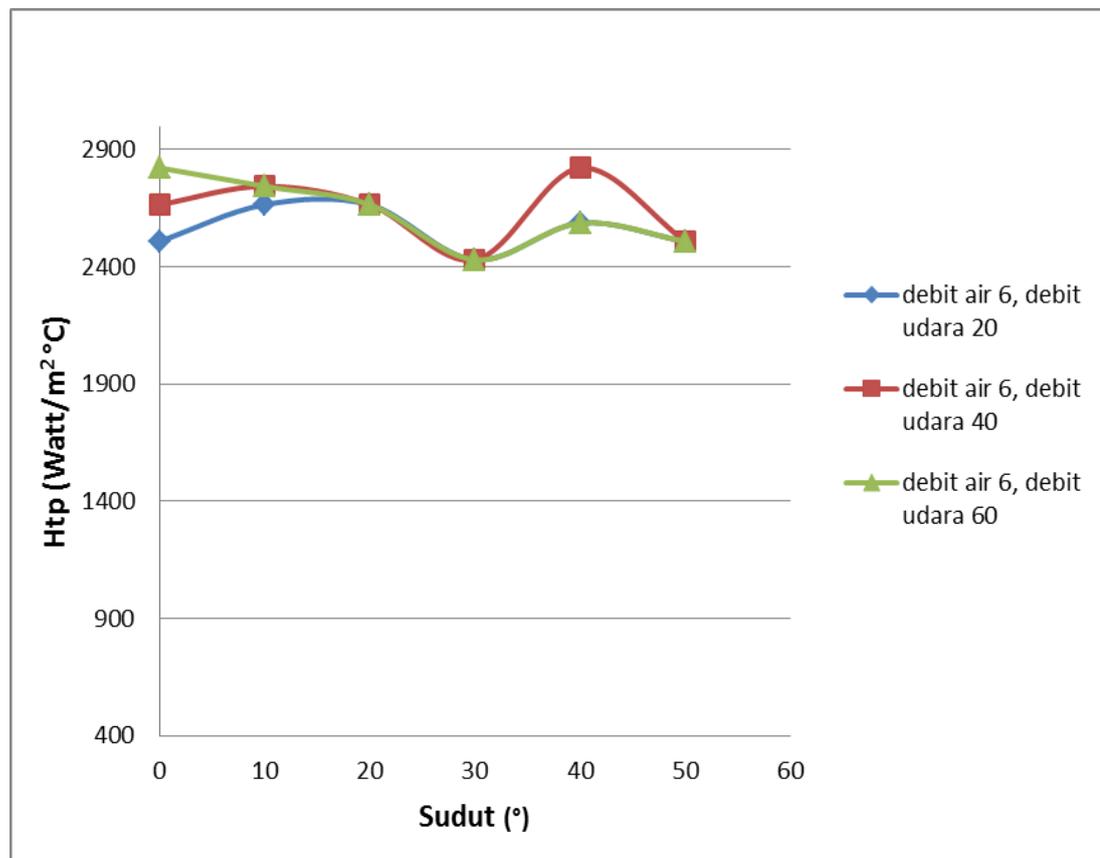
Perubahan sudut kemiringan seksi uji dengan sudut 0° , 10° , 20° , 30° , 40° dan 50° menghasilkan koefisien perpindahan kalor yang bervariasi seperti digambarkan pada grafik di bawah ini.



Grafik 4.7 Pengaruh Sudut Kemiringan Pipa Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor Pada Debit Air 2 liter/menit



Grafik 4.8 Pengaruh Sudut Kemiringan Pipa Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor Pada Debit Air 4 liter/menit



Grafik 4.9 Pengaruh Sudut Kemiringan Pipa Terhadap Koefisien Perpindahan Kalor Pada Debit Air 6 liter/menit

Berdasarkan grafik di atas, pengaruh kemiringan seksi uji menghasilkan koefisien perpindahan kalor yang bervariasi. seperti yang terlihat pada debit air 6 liter/menit menghasilkan koefisien perpindahan kalor tertinggi dibandingkan debit air lainnya. Dan pada debit air 4 liter/menit koefisien perpindahan kalor tertinggi ada pada sudut 20⁰ pada sudut 30⁰ dan seterusnya mengalami penurunan koefisien perpindahan kalor.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian eksperimen, analisa perhitungan dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, maka dapat di tarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Terdapat pengaruh kemiringan pipa berulir-dalam terhadap koefisien perpindahan kalor.
2. Penambahan debit udara menghasilkan gelembung yang jumlahnya lebih banyak dengan ukuran yang lebih besar.
3. Penambahan debit air menghasilkan gelembung yang lebih sedikit jumlahnya dengan ukuran yang mengecil.
4. Kemiringan pipa menghasilkan gelembung dengan posisi dan bentuk yang bervariasi karena semakin besar sudut semakin kecil gaya gravitasi yang mempengaruhi gelembung sehingga bentuk gelembungnya menjadi lebih pipih.
5. Penambahan debit udara pada debit air yang tetap menghasilkan peningkatan koefisien perpindahan kalor.
6. Semakin acak posisi gelembung, perpindahan kalor yang terjadi akan semakin baik. Hal ini karena perpindahan kalor dari dinding pipa ke gelembung lalu menuju ke air akan semakin cepat.

7. Semakin pipih bentuk gelembung yang terbentuk, perpindahan kalor yang terjadi semakin baik. Hal ini karena luas penampang gelembung yang semakin besar sehingga proses perpindahan kalor menjadi lebih cepat.
8. Debit air 6liter/menit pada sudut 0° menghasilkan koefisien perpindahan kalor yang terbesar dibandingkan debit air yang lain.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian ini peneliti memiliki saran untuk mereka yang ingin melakukan penelitian lebih lanjut. Berikut saran tersebut :

1. Gunakan *airflowmeter* dengan debit lebih tinggi untuk menghasilkan gelembung yang terbentuk lebih bervariasi.
2. Perhatikan kerapatan sambungan antara pipa akrilik dan pipa tembaga agar tidak terjadi kebocoran.
3. Gunakan kawat nikelin berdiameter lebih besar untuk ketahanan pemanas yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Artono, Raldi K., Sasanti Proborini. *Aliran Dua Fase dan Fluks Kalor Kritis*. Jakarta : Salemba Teknik, 1994.
- Ghajar, Afsin J., Clement C. Tang. "Advances in Void Fraction Flow Pattern Maps and Non-Boiling Heat Transfer Two-Phases Flow in Pipes with Various Inclination," *Advance in Multiphase Flow and Heat Transfer*, Vol.1 (2009), hal. 1-52.
- Ghajar, Afsin J., Clement C. Tang. "Validation of a General Heat Transfer Correlation For Non-Boiling Two Phase Flow with Different Flow Patterns and Pipe Inclination Angles," *ASME-JSME Thermal Engineering Summer Heat Transfer Conference*, Vol.2 (Januari, 2007), hal. 205-218.
- Ghajar, Afsin J., Clement C. Tang. "Void Fraction and Flow Patterns of Two-Phase in Upward and Downward Vertical and Horizontal Pipes," *Advance in Multiphase Flow and Heat Transfer*, Vol.4 (2012), hal. 175-201.
- Incopera, Frank P. *Introduction to Heat Transfer*. Indiana: John Wiley & Sons, 2011.
- Kreith, Frank. *Prinsip-prinsip Perpindahan Panas*, terj Arko Prijono. Jakarta: Penerbit Erlangga, 1997.
- Lunde, Peter J. *Solar Thermal Engineering : Space Heating and Hot Water Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- Mahasiswa Pascasarjana Departemen Teknik Mesin FTUI. *Perpindahan Kalor Pendidihan dan Aliran Dua Fase*. Depok: Departemen Teknik Mesin-Fakultas Teknik Universitas Indonesia. 2012.
- Usman, Ishak. "Pengaruh Ketebalan Inner-Helical Fin Terhadap Characteristic of Perfoemance Pada Head Exchanger," *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol.1 (2010), hal 108-114.

Lampiran 1 Data Hasil Pengujian

Kemiringan Pipa	Debit Air (LPM)	Debit Udara (cc/min)	Air Masuk (°C)	Air Keluar (°C)	Dinding Pipa Masuk (°C)	Dinding Pipa Keluar (°C)
Sudut 0°	2	20	29	35,667	43,333	121
	2	40	29	38	44,667	121,333
	2	60	29	43,333	50,667	121,333
	4	20	29	41,333	47,667	112,333
	4	40	29	41,667	52,333	108,667
	4	60	29	41,333	52	107
	6	20	29	39,667	49	110,333
	6	40	29	40,333	50	110,667
	6	60	29	41	51,667	112,667
sudut 10°	2	20	29	47	51,667	102
	2	40	29	47,333	53,667	102,333
	2	60	29	48	54,667	101
	4	20	29	44	55	98,667
	4	40	29	44	53	99
	4	60	29	44	54,667	99,667
	6	20	29	40,333	50,333	129,333
	6	40	29	40,667	49	129
	6	60	29	40,667	50,667	128
Sudut 20°	2	20	29	47,333	55	113,333
	2	40	29	48	51,333	114
	2	60	29	50	52,667	114,333
	4	20	29	44	52	102
	4	40	29	44,667	49,333	98
	4	60	29	44,667	50,667	98
	6	20	29	40,333	51,333	112,667
	6	40	29	40,333	52,667	112,667
	6	60	29	40,333	53,667	110,667

Sudut 30°	2	20	28,667	48	52	98,667
	2	40	28,667	47,333	53	97,333
	2	60	28,667	46	50	109,333
	4	20	28,667	43,333	47,333	133,667
	4	40	28,667	44	48,333	133
	4	60	28,667	43,667	47,333	131,333
	6	20	28,667	39	47,667	125,333
	6	40	28,667	39	47,333	125,667
	6	60	28,667	39	48	125
Sudut 40°	2	20	28,667	47	48	135,333
	2	40	28,667	46,667	46,667	136
	2	60	28,667	48,667	49	137
	4	20	28,667	42	48	135,333
	4	40	28,667	42,333	46,333	134,333
	4	60	28,667	42,333	48	135,333
	6	20	28,667	39,667	53	134
	6	40	28,667	40,667	50	134
	6	60	28,667	39,667	48,333	137
Sudut 50°	2	20	29	48	46,667	148
	2	40	29	47	45,667	149
	2	60	29	49,333	48,333	147
	4	20	29	42,667	44	144
	4	40	29	41,667	49	144
	4	60	29	42,667	48	144
	6	20	29	39,667	46	143
	6	40	29	39,667	49	142
	6	60	29	39,667	44	145

Lampiran 2

Besarnya Kalor Yang Diserap Fluida

Kemiringan Pipa	Debit Air (LPM)	Debit Udara (cc/min)	Massa air (kg/s)	Massa udara (kg/s)	Kalo Yang Diserap (Q)
Sudut 0°	2	20	0,3333	0,000004	932.5929205
	2	40	0,3333	0,000008	1259.151505
	2	60	0,3333	0,000012	2005.555939
	4	20	0,6667	0,000004	3450.386795
	4	40	0,6667	0,000008	3543.85309
	4	60	0,6667	0,000012	3450.800817
	6	20	0,1	0,000004	4476.087946
	6	40	0,1	0,000008	4756.033688
	6	60	0,1	0,000012	5036.001771
sudut 10°	2	20	0,3333	0,000004	2518.000885
	2	40	0,3333	0,000008	2564.93825
	2	60	0,3333	0,000012	2705.268476
	4	20	0,6667	0,000004	4196.416372
	4	40	0,6667	0,000008	4196.669142
	4	60	0,6667	0,000012	4196.919912
	6	20	0,1	0,000004	4755.843442
	6	40	0,1	0,000008	4895.917012
	6	60	0,1	0,000012	4896.112833
Sudut 20°	2	20	0,3333	0,000004	2564.630531
	2	40	0,3333	0,000008	2658.208732
	2	60	0,3333	0,000012	2938.372655
	4	20	0,6667	0,000004	4196.416372
	4	40	0,6667	0,000008	4383.186726
	4	60	0,6667	0,000012	4383.449686
	6	20	0,1	0,000004	4755.843442
	6	40	0,1	0,000008	4756.033668
	6	60	0,1	0,000012	4756.723895

Sudut 30°	2	20	0,3333	0,000004	2704.519469
	2	40	0,3333	0,000008	2611.573491
	2	60	0,3333	0,000012	2425.323461
	4	20	0,6667	0,000004	4103.162675
	4	40	0,6667	0,000008	4289.927434
	4	60	0,6667	0,000012	4196.919912
	6	20	0,1	0,000004	4336.210197
	6	40	0,1	0,000008	4336.383639
	6	60	0,1	0,000012	4336.55708
Sudut 40°	2	20	0,3333	0,000004	2564.630531
	2	40	0,3333	0,000008	2518.303009
	2	60	0,3333	0,000012	2798.450148
	4	20	0,6667	0,000004	3730.147887
	4	40	0,6667	0,000008	3823.630974
	4	60	0,6667	0,000012	3823.860364
	6	20	0,1	0,000004	4615.965694
	6	40	0,1	0,000008	5035.800355
	6	60	0,1	0,000012	4616.33956
Sudut 50°	2	20	0,3333	0,000004	2657.889823
	2	40	0,3333	0,000008	2518.303009
	2	60	0,3333	0,000012	2845.090984
	4	20	0,6667	0,000004	3823.401589
	4	40	0,6667	0,000008	3543.853098
	4	60	0,6667	0,000012	3843.860369
	6	20	0,1	0,000004	4476.087946
	6	40	0,1	0,000008	4476.266982
	6	60	0,1	0,000012	4476.446018

Lampiran 3

Koefisien Perpindahan Kalor (Htp)

Kemiringan Pipa	Debit Air (LPM)	Debit Udara (cc/min)	Kalor Yang Diserap (J/s)	Fluks Kalor (q")	Htp (Watt/m ² °C)
Sudut 0°	2	20	932.5929205	1059.764682	522.6231062
	2	40	1259.151505	1430.853882	705.6258484
	2	60	2005.555939	2279.04084	1123.90932
	4	20	3450.386795	3920.894085	1933.589485
	4	40	3443.853098	4027.105793	1985.967457
	4	60	3450.800817	3921.364564	1933.821502
	6	20	4476.087946	5086.463575	2508.390247
	6	40	4756.033668	5404.583714	2665.27124
	6	60	5036.001771	5722.729285	2822.164774
sudut 10°	2	20	2518.000885	2861.364642	1411.082387
	2	40	2564.93825	2914.702557	1437.385978
	2	60	2705.168476	3074.055087	1515.97071
	4	20	4196.416372	4768.654969	2351.662887
	4	40	4196.668192	4768.941071	2351.803978
	4	60	4196.919915	4769.227173	2351.945069
	6	20	4755.843442	5404.367548	2665.164637
	6	40	4895.907012	5563.542054	2743.66157
	6	60	4896.112883	5563.764583	2743.771308
Sudut 20°	2	20	2564.630531	2914.352877	1437.213542
	2	40	2658.208873	3020.691741	1489.654568
	2	60	2838.372655	3339.059835	1646.56784
	4	20	4196.416372	4768.654969	2351.662887
	4	40	4383.186726	4980.894007	2456.328599
	4	60	4383.449686	4981.192825	2456.475961
	6	20	4755.843442	5404.367548	2665.164637
	6	40	4756.033668	5404.583714	2665.27124
	6	60	4756.223895	5404.79988	2665.377842

Sudut 30°	2	20	2704.519469	3073.317579	1515.607008
	2	40	2611.573491	2967.697149	1463.520278
	2	60	2425.323461	2756.049388	1359.146154
	4	20	4103.162675	4662.684858	2299.403712
	4	40	4289.927434	4874.917539	2404.066289
	4	60	4198.919912	4769.227173	2351.945069
	6	20	4336.210197	4927.511588	2430.003051
	6	40	4336.383639	4927.7086	2430.100248
	6	60	4336.55708	4927.905773	2430.197444
Sudut 40°	2	20	2564.630531	2914.352877	1437.213542
	2	40	2518.303009	2861.707965	1411.251696
	2	60	2798.450148	3180.056986	1568.245562
	4	20	3730.147887	4238.804417	2090.36701
	4	40	3823.630974	4345.035198	2142.754736
	4	60	3823.860364	4345.295869	2148.883285
	6	20	4615.965694	5245.415561	2586.777442
	6	40	5035.800355	5722.500403	2822.051901
	6	60	4616.334056	5245.835178	2586.984376
Sudut 50°	2	20	2657.889823	3020.329345	1489.475853
	2	40	2518.303009	2861.707965	1411.251696
	2	60	2845.090984	3233.057936	1594.38298
	4	20	3823.401584	4344.774527	2142.626186
	4	40	3543.853098	4027.105793	1985.967804
	4	60	3823.860364	4345.295869	2142.883205
	6	20	4476.087946	5086.463575	2508.390247
	6	40	4476.266982	5086.667025	2508.490578
	6	60	4476.446018	5086.870475	2508.59091

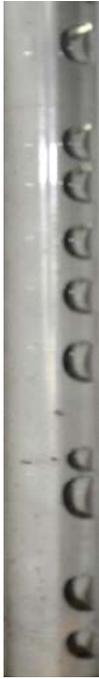
Lampiran 4

Fraksi Hampa (α)

Kemiringan Pipa	Debit Air (LPM)	Debit Udara (cc/min)	Kualitas uap (x)	Massa jenis campuran (ρ_m)	Konduktivitas termal (k)	Fraksi hampa (α)
Sudut 0°	2	20	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	2	40	0.000239942	828.6653763	1.09467466	0.154478975
	2	60	0.00035987	765.3574852	1.139049132	0.208470992
	4	20	5.99964E-05	946.0863907	1.024493546	0.046533551
	4	40	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	4	60	0.000179965	864.4229427	1.071794395	0.122770247
	6	20	3.99984E-05	961.223211	1.016394942	0.031754249
	6	40	7.99936E-05	931.419471	1.03252831	0.060650447
	6	60	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
sudut 10°	2	20	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	2	40	0.000239942	828.6653763	1.09467466	0.154478975
	2	60	0.00035987	765.3574852	1.139049132	0.208470992
	4	20	5.99964E-05	946.0863907	1.024493546	0.046533551
	4	40	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	4	60	0.000179965	864.4229427	1.071794395	0.122770247
	6	20	3.99984E-05	961.223211	1.016394942	0.031754249
	6	40	7.99936E-05	931.419471	1.03252831	0.060650447
	6	60	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
Sudut 20°	2	20	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	2	40	0.000239942	828.6653763	1.09467466	0.154478975
	2	60	0.00035987	765.3574852	1.139049132	0.208470992
	4	20	5.99964E-05	946.0863907	1.024493546	0.046533551
	4	40	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	4	60	0.000179965	864.4229427	1.071794395	0.122770247
	6	20	3.99984E-05	961.223211	1.016394942	0.031754249
	6	40	7.99936E-05	931.419471	1.03252831	0.060650447
	6	60	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675

Sudut 30°	2	20	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	2	40	0.000239942	828.6653763	1.09467466	0.154478975
	2	60	0.00035987	765.3574852	1.139049132	0.208470992
	4	20	5.99964E-05	946.0863907	1.024493546	0.046533551
	4	40	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	4	60	0.000179965	864.4229427	1.071794395	0.122770247
	6	20	3.99984E-05	961.223211	1.016394942	0.031754249
	6	40	7.99936E-05	931.419471	1.03252831	0.060650447
	6	60	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
Sudut 40°	2	20	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	2	40	0.000239942	828.6653763	1.09467466	0.154478975
	2	60	0.00035987	765.3574852	1.139049132	0.208470992
	4	20	5.99964E-05	946.0863907	1.024493546	0.046533551
	4	40	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	4	60	0.000179965	864.4229427	1.071794395	0.122770247
	6	20	3.99984E-05	961.223211	1.016394942	0.031754249
	6	40	7.99936E-05	931.419471	1.03252831	0.060650447
	6	60	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
Sudut 50°	2	20	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	2	40	0.000239942	828.6653763	1.09467466	0.154478975
	2	60	0.00035987	765.3574852	1.139049132	0.208470992
	4	20	5.99964E-05	946.0863907	1.024493546	0.046533551
	4	40	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675
	4	60	0.000179965	864.4229427	1.071794395	0.122770247
	6	20	3.99984E-05	961.223211	1.016394942	0.031754249
	6	40	7.99936E-05	931.419471	1.03252831	0.060650447
	6	60	0.000119986	903.4104976	1.04841218	0.08707675

Lampiran 5 Pola Aliran Gelembung

Sudut 0° 

2-20-in



2-20-out



2-40-in



2-40-out



2-60-in



2-60-out



4-20-in



4-20-out



4-40-in



4-40-out



4-60-in



4-60-out



6-20-in



6-20-out



6-40-in



6-40-out

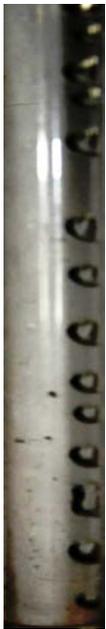


6-60-in



6-60-out

Sudut 10°



2-20-in



2-20-out



2-40-in



2-40-out



2-60-in



2-60-out



4-20-in



4-20-out



4-40-in



4-40-out



4-60-in



4-60-out



6-20-in



6-20-out



6-40-in



6-40-out



6-60-in



6-60-out

Sudut 20⁰



2-20-in



2-20-out



2-40-in



2-40-out



2-60-in



2-60-out



4-20-in



4-20-out



4-40-in



4-40-out



4-60-in



4-60-out



6-20-in



6-20-out



6-40-in



6-40-out



6-60-in



6-60-out

Sudut 30°



2-20-in



2-20-out



2-40-in



2-40-out



2-60-in



2-60-out



4-20-in



4-20-out



4-40-in



4-40-out



4-60-in



4-60-out



6-20-in



6-20-out



6-40-in



6-40-out



6-60-in



6-60-out

Sudut 40⁰

2-20-in



2-20-out



2-40-in



2-40-out



2-60-in



2-60-out



4-20-in



4-20-out



4-40-in



4-40-out



4-60-in



4-60-out



6-20-in



6-20-out



6-40-in



6-40-out



6-60-in



6-60-out

Sudut 50°



2-20-in



2-20-out



2-40-in



2-40-out



2-60-in



2-60-out



4-20-in



4-20-out



4-40-in



4-40-out



4-60-in



4-60-out



6-20-in



6-20-out



6-40-in



6-40-out



6-60-in



6-60-out

RIWAYAT HIDUP PENELITI



Arif Wahrudin. Tepatnya tanggal 5 Maret 1991 dilahirkan di Jakarta. Anak pertama dari dua bersaudara dari Bapak (Alm) Warudin dan Ibu Riyanti. Bertempat tinggal di jalan Karyawan 2 No.66 Rt. 02 Rw. 05, Karang Tengah, Tangerang. Arif adalah panggilan peneliti, menempuh pendidikan di TK Annurmaniyah, SD Negeri 05 pagi Srengseng, SMA Negeri 85 Jakarta dan melanjutkan studi ke Universitas Negeri Jakarta, fakultas teknik, jurusan teknik mesin. Semasa sekolah peneliti pernah mengikuti beberapa kegiatan ekstra kurikulier, pramuka, PMR (Palang Merah Remaja), basket dan futsal. Semasa kuliah peneliti pernah mengajar di bimbel sebagai guru privat, mengajar anak TK, SD, dan SMP.