



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENURUNAN TEKANAN PADA EVAPORASI ALIRAN DUA  
FASA DI KANAL MINI HORIZONTAL UNTUK R-290 DAN  
R-600A DENGAN *SEPARATED FLOW MODEL***

SKRIPSI

FIKRI GANDARA  
0906604804

FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 2011



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENURUNAN TEKANAN PADA EVAPORASI ALIRAN DUA  
FASA DI KANAL MINI HORIZONTAL UNTUK R-290 DAN  
R-600A DENGAN *SEPARATED FLOW MODEL***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

FIKRI GANDARA  
09 06 60 4804

FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
DESEMBER 2011

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Fikri Gandara

NPM : 0906604804

Tanda tangan :  .....

Tanggal : 30 Desember 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Fikri Gandara

NPM : 09 06 60 4804

Program Studi : Sarjana Teknik Mesin

Judul Skripsi : Penurunan Tekanan pada Evaporasi Aliran Dua Fasa  
di Kanal Mini Horizontal untuk R-290 dan R-600a  
dengan *Separated Flow Model*

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Agus S. Pamitran ST., M.Eng.

(.....)

Penguji : Ir. Imansyah Ibnu Hakim, M.Eng.

(.....)

Penguji : Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer

(.....)

Penguji : Prof. Dr-Ing. Ir. Nandy Putra

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Desember 2011

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT dimana atas berkat dan rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan sebagai salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dalam proses penulisan skripsi ini, penulis telah banyak dibantu oleh berbagai pihak, antara lain:

- 1) Orang tua dan keluarga yang telah memberikan bantuan moril maupun material.
- 2) Dr. Agus S. Pamitran ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran dalam memberikan pedoman kepada penulis selama penyusunan skripsi ini.
- 3) Prasetio Nugroho, Nico Muhammad Afriandi, Febrianto Adhi dan Hedriawan Anandaputra Soemantri selaku teman sekelompok yang telah bekerja sama dengan penulis selama penyusunan skripsi ini.
- 4) Dr.-Ing. Ir. Nasruddin M.Eng., beserta teman-teman di laboratorium Pendingin yaitu Arnas, Julian, Dimas, Iswanto, Juniver, Maulana, dsb. yang telah membantu selama proses penulisan skripsi ini.
- 5) Teman-teman teknik mesin ekstensi angkatan 2009 yang telah membantu dan menyemangati penulis.

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

---

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

Nama : Fikri Gandara

NPM : 09 06 604804

Program Studi: Sarjana Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

### **PENURUNAN TEKANAN PADA EVAPORASI ALIRAN DUA FASA DI KANAL MINI HORIZONTAL UNTUK R-290 DAN R-600A DENGAN *SEPARATED FLOW MODEL***

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Desember 2011

Yang menyatakan



(Fikri Gandara)

## ABSTRAK

Nama : Fikri Gandara  
Program Studi : Sarjana Teknik Mesin  
Judul : Penurunan Tekanan pada Evaporasi Aliran Dua Fasa di Kanal  
Mini Horizontal untuk R-290 dan R-600a dengan *Separated  
Flow Model*

Penelitian ini membahas penurunan tekanan melalui *separated flow model* yang terjadi pada aliran evaporasi dua fasa pada kanal mini horizontal dengan menggunakan R-290 dan R-600a. Kondisi pengujian yang dilakukan dengan variasi parameter fluks massa dan fluks kalor di kanal mini horizontal dengan diameter dalam 3 mm, diameter luar 5 mm dan panjang 1 m. Penurunan tekanan yang didapat dari eksperimen akan dibandingkan dengan penurunan tekanan secara teoritis dengan *separated flow model* melalui pendekatan Lockhart-Martinelli (1944) dengan bilangan C prediksi Chisolm (1968) serta pendekatan Friedel (1979) menggunakan bantuan program matlab. Hasil pengujian yang dilakukan menghasilkan nilai penurunan tekanan secara eksperimen yang lebih besar dibandingkan nilai penurunan tekanan secara teoritis dengan *separated flow model*.

Kata kunci:

Penurunan tekanan, R-290, R-600a, kanal mini, aliran evaporasi dua fasa, *separated flow model*.

## ABSTRACT

Name : Fikri Gandara  
Study Program : Bachelor of Mechanical Engineering  
Title : Pressure Drop of Two-Phase Flow Boiling in Horizontal Mini Channel for R-290 and R-600a with Separated Flow Model

This study examine the pressure drop with separated flow model for two-phase flow boiling in horizontal mini channel using refrigerant R-290 and R-600a. The examine condition use a variation of mass flux and heat flux in horizontal mini channel with inside diameter 3 mm, outside diameter 5 mm and length 1 m. The experiment value of pressure drop will be compared with Lockhart-Martinelli correlation (1944) with C number from Chisolm's prediction (1968) and Friedel correlation (1979) with the help of matlab software. A Result from this examine is obtained the experiment value of pressure drop is greater than the theoretical value of pressure drop with separated flow model.

**Keywords:**

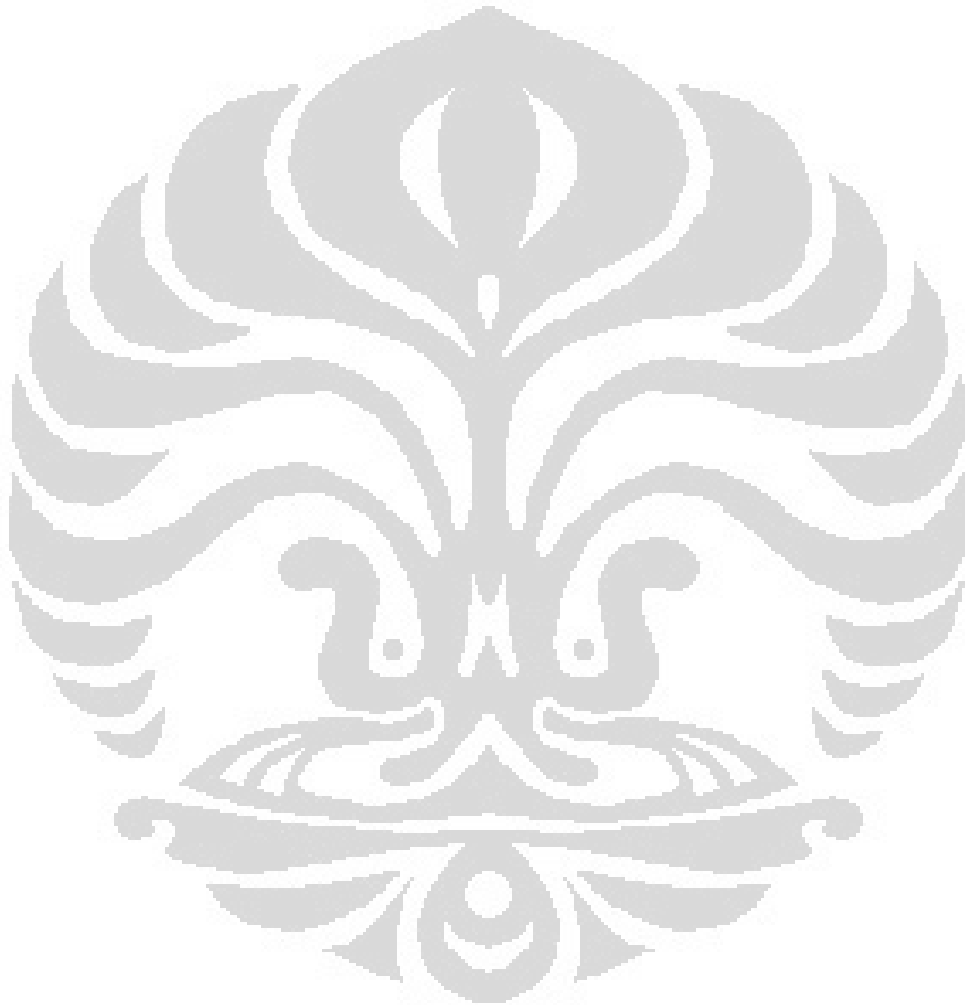
Pressure drop, R-290, R-600a, mini channel, two-phase flow boiling, separated flow model.



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR SIMBOL .....	xiii
 BAB 1 PENDAHULUAN.....	 1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Pembatasan Penelitian .....	4
1.5. Sistematika Penulisan.....	4
 BAB 2 DASAR TEORI .....	 6
2.1. Konveksi.....	6
2.2. Perpindahan Kalor Didih .....	7
2.3. Model Aliran Dua Fasa.....	9
2.4. Pola Aliran Dua Fasa Pada Pipa Horizontal .....	10
2.5. Pipa Kanal Mini .....	12
2.6. Kondisi Aliran <i>Subcooled</i> .....	13
2.7. Kondisi Aliran Dua Fasa .....	13
2.8. Penurunan Tekanan .....	18
2.9. Deviasi.....	23
 BAB 3 PERANGKAT DAN ASPEK PENGUJIAN.....	 24
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	24
3.2. Skematik Alat Pengujian .....	25
3.3. Komponen Alat Pengujian.....	25
3.4. Prinsip Kerja Alat Pengujian .....	32
3.5. Karakteristik Refrigeran .....	32
3.6. Skematik Pengolahan Data .....	34
 BAB 4 HASIL DAN ANALISA .....	 35
4.1. Pengolahan Data Penurunan Tekanan Gesekan dan Properti pada R-290 .....	35
4.2. Pengaruh Penurunan Tekanan Akibat Percepatan pada R-290.....	40
4.3. Pengolahan Data Penurunan Tekanan Gesekan dan Properti pada R-600a .....	41

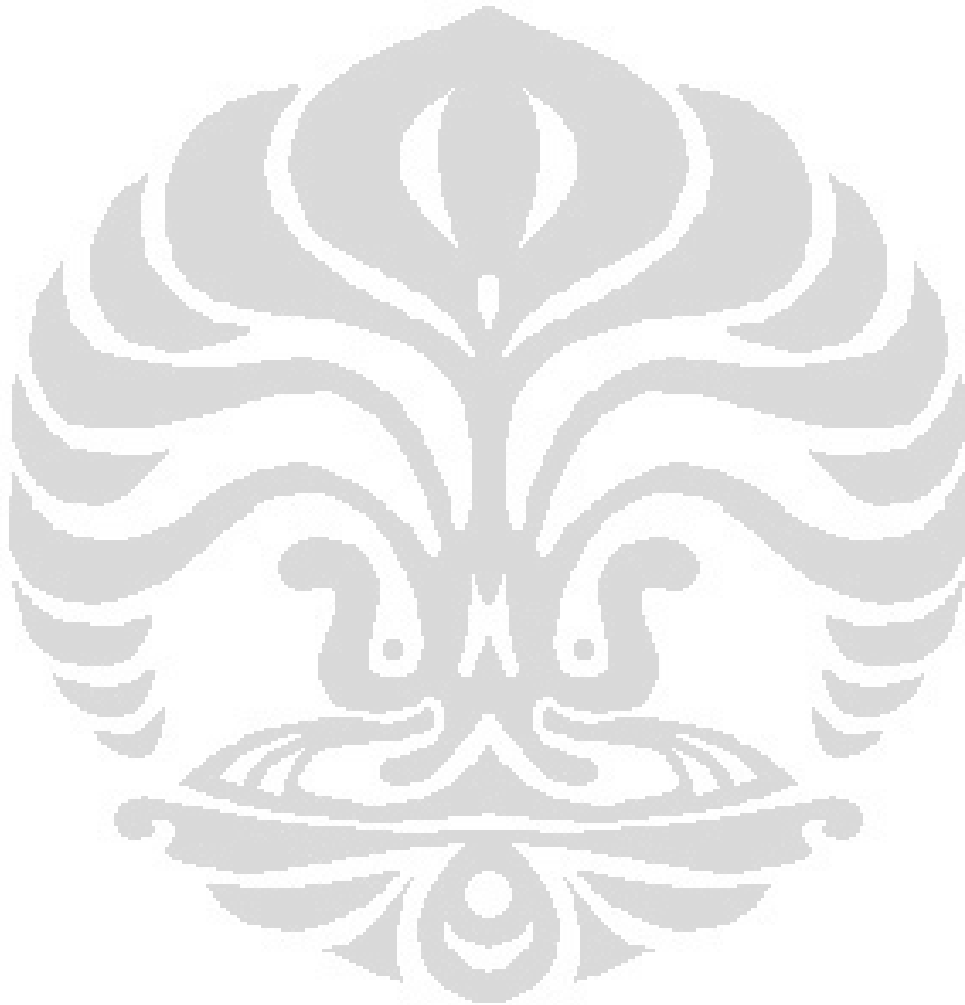
4.4. Pengaruh Penurunan Tekanan Akibat Percepatan pada R-600a.....	46
4.5. Analisa Penurunan Tekanan Akibat Gesekan pada R-290 .....	47
4.6. Analisa Penurunan Tekanan Akibat Gesekan pada R-600a .....	48
BAB 5 KESIMPULAN.....	50
DAFTAR PUSTAKA .....	51
LAMPIRAN	



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perpindahan Kalor Konveksi Paksa dan Konveksi Alamliah .....	6
Gambar 2.2 Profil Perpindahan Kalor Konveksi dari Blok Panas ke Udara ..	7
Gambar 2.3 Proses Evaporasi dan Pendidihan .....	8
Gambar 2.4 (a). <i>Pool Boiling</i> (b). <i>Flow Boiling</i> .....	8
Gambar 2.5 (a). <i>Subcooled Boiling</i> (b). <i>Saturated Boiling</i> .....	9
Gambar 2.6 Pola Aliran Dua Fasa pada Pipa Horizontal Berdasarkan Collier et. al.(1994) .....	11
Gambar 2.7 Pola Aliran Dua Fasa pada Proses Evaporasi di Pipa Horizontal Menurut Collier et.al.(1994) .....	12
Gambar 2.8 Diagram p-h untuk Propana (R-290) dari <i>Software</i> Refprop .....	14
Gambar 2.9 Diagram p-h untuk Isobutana (R-600a ) dari <i>Software</i> Refprop .	14
Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Penelitian .....	24
Gambar 3.2 Skematik Alat Pengujian Aliran Dua Fasa Sistem Putaran Terbuka .....	25
Gambar 3.3 <i>Condensing Unit</i> Berdaya 3 PK .....	26
Gambar 3.4 <i>Test Section</i> .....	26
Gambar 3.5 <i>Pressure Transmitter</i> dan <i>Pressure Gauge</i> .....	27
Gambar 3.6 Pipa Tembaga Berukuran 3/8 inch dan 1/4 inch .....	27
Gambar 3.7 <i>Check Valve</i> .....	28
Gambar 3.8 Termokopel pada <i>Test Section</i> .....	28
Gambar 3.9 <i>Sight Glass</i> .....	29
Gambar 3.10 <i>Needle Valve</i> .....	29
Gambar 3.11 <i>Variable Transformer</i> .....	29
Gambar 3.12 Timbangan Digital .....	30
Gambar 3.13 Sabuk Pemanas yang Dipasangkan pada Tabung Refrigeran ...	30
Gambar 3.14 <i>Power Supply</i> untuk <i>pressure transmitter</i> .....	31
Gambar 3.15 Modul Termokopel dan <i>Pressure Transmitter</i> .....	31
Gambar 4.1 Grafik Korelasi Penurunan Tekanan Gesek R-290 pada Kondisi Satu .....	36
Gambar 4.2 Grafik Korelasi Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-290 pada Kondisi Satu .....	37
Gambar 4.3 Grafik Korelasi Penurunan Tekanan Gesek R-290 pada Kondisi Dua .....	38
Gambar 4.4 Grafik Korelasi Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-290 pada Kondisi Dua .....	39
Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Penurunan Tekanan Akibat Percepatan untuk R-290 pada Semua Kondisi Percobaan .....	40
Gambar 4.6 Grafik Korelasi Penurunan Tekanan Gesek R-600a pada Kondisi Satu .....	42
Gambar 4.7 Grafik Korelasi Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-600a pada Kondisi Satu .....	43
Gambar 4.8 Grafik Korelasi Penurunan Tekanan Gesek R-600a pada Kondisi Dua .....	44

Gambar 4.9 Grafik Korelasi Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-600a pada Kondisi Dua .....	45
Gambar 4.10 Grafik Pengaruh Penurunan Tekanan Akibat Percepatan untuk R-600a pada Semua Kondisi Percobaan.....	46



## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Klasifikasi Ukuran Diameter Kanal Menurut Kandiklar et al. ....	2
Tabel 2.1 Tabel Bilangan Chisolm .....	21
Tabel 3.1 Properti Propana (R-290).....	32
Tabel 3.2 Properti Isobutana (R-600a).....	33
Tabel 4.1 Kondisi Satu Pengujian R-290.....	35
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Penurunan Tekanan R-290 pada Kondisi Satu	36
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Densitas, Viskositas dan Faktor Gesek Fasa Cair R-290 pada Kondisi Satu .....	36
Tabel 4.4 Kondisi Dua Pengujian R-290 .....	37
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Penurunan Tekanan R-290 pada Kondisi Dua	38
Tabel 4.6. Hasil Perhitungan Densitas, Viskositas dan Faktor Gesek Fasa Cair R-290 pada Kondisi Dua.....	39
Tabel 4.7 Kondisi Satu Pengujian R-600a.....	41
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Penurunan Tekanan R-600a pada Kondisi Satu .....	41
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-600a pada Kondisi Satu .....	42
Tabel 4.10 Kondisi Dua Pengujian R-600a.....	43
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Penurunan Tekanan R-600a pada Kondisi Dua .....	44
Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-600a pada Kondisi Dua.....	44
Tabel 4.13 <i>Mean</i> Deviasi Penurunan Tekanan Akibat Gesekan Pada R-290	47
Tabel 4.14 <i>Mean</i> Deviasi Penurunan Tekanan Akibat Gesekan Pada R-600a .....	48

## DAFTAR SIMBOL

$A$	luas penampang kanal ( $\text{m}^2$ )
$A_f$	luas penampang fasa liquid ( $\text{m}^2$ )
$A_g$	luas penampang fasa gas ( $\text{m}^2$ )
$AD$	<i>average</i> deviasi (%)
$C$	bilangan Chisholm
$D$	diameter dalam pipa (m)
$\left(\frac{dp}{dz}\right)$	gradien tekanan ( $\text{Pa/ m}$ )
$\left(\frac{dp}{dz} a\right)$	gradien tekanan percepatan ( $\text{Pa/ m}$ )
$\left(\frac{dp}{dz} F\right)$	gradien tekanan friksi ( $\text{Pa/ m}$ )
$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f$	gradien tekanan friksi untuk aliran yang ditinjau fasa liquidnya ( $\text{Pa/ m}$ )
$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{fo}$	gradien tekanan friksi untuk aliran liquid saja ( $\text{Pa/ m}$ )
$f$	<i>friction factor</i>
$f_f$	<i>friction factor</i> ditinjau fasa liquidnya
$f_g$	<i>friction factor</i> ditinjau fasa gasnya
$f_{fo}$	<i>friction factor</i> fasa liquid saja
$f_{go}$	<i>friction factor</i> fasa gas saja
$Fr$	bilangan Froude
$G$	<i>mass flux</i> ( $\text{kg/ m}^2 \cdot \text{s}$ )
$g$	gravitasi ( $\text{m/ s}^2$ )
$h_f$	entalpi saturasi liquid ( $\text{kJ/ kg}$ )
$h_{fg}$	selisih antara entalpi gas dan fluida ( $\text{kJ/ kg}$ )
$h_{fi}$	entalpi fluida pada temperatur masuk ( $\text{kJ/ kg}$ )
$h_g$	entalpi saturasi uap ( $\text{kJ/ kg}$ )
$L$	panjang pipa (m)
$W_f$	massa liquid (kg)
$W_g$	massa uap (kg)
$MD$	<i>mean</i> deviasi (%)
$P$	daya listrik yang diberikan (Watt)
$Re$	bilangan Reynolds
$Re_f$	bilangan Reynolds fasa liquid
$Re_g$	bilangan Reynolds fasa gas
$u$	kecepatan ( $\text{m/ s}$ )
$v_f$	volume spesifik liquid ( $\text{m}^3/ \text{kg}$ )
$v_g$	volume spesifik gas ( $\text{m}^3/ \text{kg}$ )
$w$	laju aliran ( $\text{kg/ s}$ )
$w_f$	laju aliran fasa liquid ( $\text{kg/ s}$ )
$w_g$	laju aliran fasa gas ( $\text{kg/ s}$ )
$We$	bilangan Weber

$X$	parameter Martinelli
$x$	kualitas massa uap
$x_{out}$	kualitas massa uap pada posisi <i>outlet</i>
$x_z$	kualitas massa uap pada posisi $z$
$z$	posisi yang ingin diketahui sifatnya (m)
$z_{sc}$	jarak <i>subcooled</i> (m)

### Huruf Yunani

$\alpha$	<i>void fraction</i>
$\Delta$	perubahan dalam jumlah
$\theta$	sudut kemiringan pipa terhadap bidang horizontal (°)
$\mu$	viskositas dinamik (Pa. s)
$\mu_f$	viskositas dinamik fasa liquid (Pa. s)
$\mu_g$	viskositas dinamik fasa gas (Pa. s)
$\mu_w$	viskositas air pada 1 atm. dan 20 °C (N. s/ m <sup>2</sup> )
$\rho_A$	massa jenis udara pada 1 atm. dan 20 °C (kg/ m <sup>3</sup> )
$\rho_f$	massa jenis liquid (kg/ m <sup>3</sup> )
$\rho_g$	massa jenis gas (kg/ m <sup>3</sup> )
$\rho_w$	massa jenis air pada 1 atm. dan 20 °C (kg/ m <sup>3</sup> )
$\bar{\rho}$	massa jenis dua fasa (kg/m <sup>3</sup> )
$\sigma$	tegangan permukaan (N/ m)
$\phi_f^2$	<i>two- phase frictional multiplier</i> untuk aliran yang ditinjau fasa liquidnya
$\phi_g^2$	<i>two- phase frictional multiplier</i> untuk aliran yang ditinjau fasa gasnya

## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1. Latar Belakang**

Refrigeran merupakan komponen penting dalam sistem refrigerasi, dengan peranannya sebagai fluida kerja maka fungsi utama dari refrigeran adalah sebagai pemberi efek pendinginan terhadap suatu benda atau ruangan. Prinsip dasar dari pendinginannya adalah dengan penyerapan panas dari benda atau ruangan oleh refrigeran.

Aspek penting dalam pemanfaatan refrigeran dalam sistem refrigerasi saat ini adalah mengenai isu lingkungan terutama isu tentang penipisan lapisan ozon. Efek dari penipisan ozon tersebut adalah meningkatnya suhu rata-rata atmosfer di bumi dan terjadinya kenaikan permukaan laut. Oleh karena itu penggunaan refrigeran yang ramah lingkungan menjadi aspek penting dalam perancangan sistem refrigerasi.

Refrigeran yang pertama kali banyak digunakan adalah R-11 (trichlorofluoromethane), tetapi refrigeran ini mempunyai sifat yang dapat merusak ozon. Zat klorin yang terbuang ke lingkungan akan menuju lapisan ozon dan bereaksi sehingga ozon tersebut menjadi terpecah. Hal tersebut membuat ozon menipis dan suhu di bumi menjadi naik karena sinar ultraviolet langsung menuju atmosfer bumi tanpa perlindungan dari lapisan ozon. Akibat hal tersebut maka terbentuklah protokol Montreal yang mengontrol tentang pencegahan kerusakan ozon yang parameter kerusakannya adalah ODP (*Ozone Depletion Potential*). ODP ini adalah nilai perbandingan potensi perusakan ozon suatu zat dibanding dengan R-11 yang ditetapkan sebagai dasar dengan nilai 1. Akibat dari protokol Montreal tersebut maka penggunaan refrigeran beralih ke R-22 (chlorodifluoromethane). Tetapi seiring dengan perkembangan zaman, kesadaran akan isu lingkungan pun turut berkembang, maka terbentuklah protokol Kyoto yang mengontrol tentang pemanasan global yang parameter kerusakannya adalah GWP (*Global Warming Potential*). GWP adalah nilai kontribusi suatu zat terhadap pemanasan global dibanding dengan karbon dioksida yang bernilai GWP



1.0. nilai GWP untuk R-22 adalah 1810. Akibat dari protokol Kyoto tersebut maka penggunaan refrigeran beralih ke refrigeran yang mempunyai unsur karbonnya salah satunya yaitu propana (R-290) dan. Nilai GWP untuk R-290 lebih kecil dari 3. Keterbatasan dari R-290 tersebut adalah nilai tekanan kerjanya yang lebih tinggi dari R-22, hal tersebut dapat dilihat dari nilai titik didih normalnya, untuk R-22 ( $-40,81^{\circ}\text{C}$ ) dan R-290 ( $-42,11^{\circ}\text{C}$ ).

Penelitian tentang karakteristik kerja dari refrigeran semakin berkembang dengan ditemukannya refrigeran dari unsur karbon tetapi mempunyai tekanan kerja yang lebih kecil dari propane yaitu isobutana (2-methylpropane) atau R-600a yang nilai titik didih normalnya adalah  $-11,75^{\circ}\text{C}$ .

Refrigeran propana (R-290) dan isobutana (R-600a) tersebut sekarang ini banyak diproduksi dan diperjualbelikan secara massal. Khusus untuk propana (R-290) dan isobutana (R-600a) yang diperjualbelikan di Indonesia, produksinya sebagian besar dilakukan oleh perusahaan BUMN (Badan Usaha Milik Negara) yang bergerak di bidang pengolahan bahan tambang milik pemerintah yaitu PT. Pertamina (persero). Perusahaan tersebut memberi nama refrigeran propana dengan merk dagang MC-22 dan isobutana dengan MC-600.

Aspek penting lainnya selain refrigeran yang berfungsi sebagai fluida kerja adalah komponen pipa yang fungsinya sebagai pendistribusi aliran refrigeran dalam sistem refrigerasi. Parameter dalam pipa yang mutlak sebagai acuan dalam perancangan sistem refrigerasi adalah bahan dan ukurannya (diameter). Untuk parameter bahan pipa, semakin besar nilai konduktivitas termal dari pipa maka pertukaran panas yang terjadi semakin besar pula. Sedangkan untuk parameter ukuran pipa, penggunaan pipa dengan ukuran kanal yang lebih kecil memiliki keuntungan tersendiri dibanding pipa kanal konvensional, antara lain pertukaran panas yang lebih tinggi karena luas kontak per volume fluida yang lebih besar dan pembuatan alat pertukaran panas yang lebih kecil dan kompak. Karakteristik terakhir tersebut akan memungkinkan dibuatnya sistem refrigerasi berukuran kecil yang makin banyak untuk diproduksi.

Tabel 1.1 Klasifikasi Ukuran Diameter Kanal Menurut Kandiklar et al. (2006)

Klasifikasi kanal	Ukuran diameter (D)
-------------------	---------------------

Kanal konvensional	$>3 \text{ mm}$
Kanal mini	$3 \text{ mm} \geq D > 200 \text{ }\mu\text{m}$
Kanal mikro	$200 \text{ }\mu\text{m} \geq D > 10 \text{ }\mu\text{m}$
Kanal mikro transisi	$10 \text{ }\mu\text{m} \geq D > 1 \text{ }\mu\text{m}$
Kanal nano transisi	$1 \text{ }\mu\text{m} \geq D > 0.1 \text{ }\mu\text{m}$
Kanal nano	$0.1 \text{ }\mu\text{m} \geq D$

Fenomena penting untuk aliran refrigeran pada pipa adalah terjadinya penurunan tekanan (*pressure drop*). Penurunan tekanan ini disebabkan oleh gesekan, perbedaan ketinggian ataupun karena perubahan energi kinetik fluida (terjadinya percepatan). Dalam perencanaan sebuah sistem yang bersangkutan dengan aliran refrigeran dalam pipa, penurunan tekanan ini menjadi faktor penting karena terjadinya perbedaan tekanan akan merubah karakteristik refrigeran tersebut.

### 1.2. Perumusan Masalah

Pada penelitian kami membandingkan penurunan tekanan yang terjadi dan membandingkannya dengan prediksi penurunan yang didapat dari hasil kalkulasi. Sistem refrigerasi yang menjadi obyek penelitian kami mempunyai spesifikasi dengan pipa kanal mini berdiameter dalam 3 mm, diameter luar 5 mm, dan panjang 1 m. bahannya terbuat dari stainless steel SS316. Pada pipa tersebut dipasang pemanas listrik dengan cara dililitkan sepanjang pipa tersebut (1m) sebagai beban pemanasan. Kemudian pipa tersebut dialiri dengan refrigeran propane dan isobutane. Dari nilai tekanan inlet dan tekanan outlet pada pipa tersebut maka didapat penurunan tekanan.

### 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

- a). Membandingkan nilai penurunan tekanan akibat gesekan yang didapat dari eksperimen dengan nilai penurunan tekanan secara teoritis melalui *separated flow model* dan mencari korelasi antara keduanya.
- b). Menganalisa penurunan tekanan yang terjadi pada aliran dua fasa dengan refrigeran propana(R-290) dan isobutana(R-600a) di kanal mini horizontal.

#### 1.4. Pembatasan Penelitian

Pada penelitian aliran dua fasa propana dan isobutana ini digunakan pipa kanal mini horizontal berdiameter dalam 3 mm, berdiameter luar 5 mm dan panjang 1 m.

Aliran propana (R-290) yang memasuki *test section* memiliki karakteristik:

- a).Fluks massa  $51,470 \text{ kg/m}^2.\text{s}$  dan  $155,597 \text{ kg/m}^2.\text{s}$
- b).Daya dari pemanas lisrik per satuan luas permukaan pipa (fluks kalor)  $5 \text{ kWatt/m}^2$

Aliran isobutana (R-600a) yang memasuki *test section* memiliki karakteristik:

- a). Fluks massa  $141,543 \text{ kg/m}^2.\text{s}$  dan  $169,851 \text{ kg/m}^2.\text{s}$
- b).Daya dari pemanas listrik per satuan luas permukaan pipa (fluks kalor)  $3 \text{ kWatt/m}^2$  dan  $4 \text{ kWatt/m}^2$

#### 1.5. Sistematika Penulisan

Laporan tugas akhir ini mengikuti sistematika penulisan sebagai berikut :

##### BAB 1 PENDAHULUAN

Bagian ini berisikan latar belakang perumusan masalah tugas akhir, tujuan penelitian, pembatasan masalah, dan sistematika penelitian.

##### BAB 2 DASAR TEORI

Bagian ini berisikan dasar-dasar teori dari eksperimen yang dilakukan, yang meliputi :dasar konveksi, pendidihan pada aliran dua fasa, penurunan tekanan pada aliran dalam pipa dan deviasi perbandingan antara penurunan tekanan ekperimen dengan kalkulasi (*separated flow model*). Dasar teori tersebut diambil dari berbagai sumber yang mendukung penelitian ini

##### BAB 3 PERANGKAT DAN ASPEK PENGUJIAN

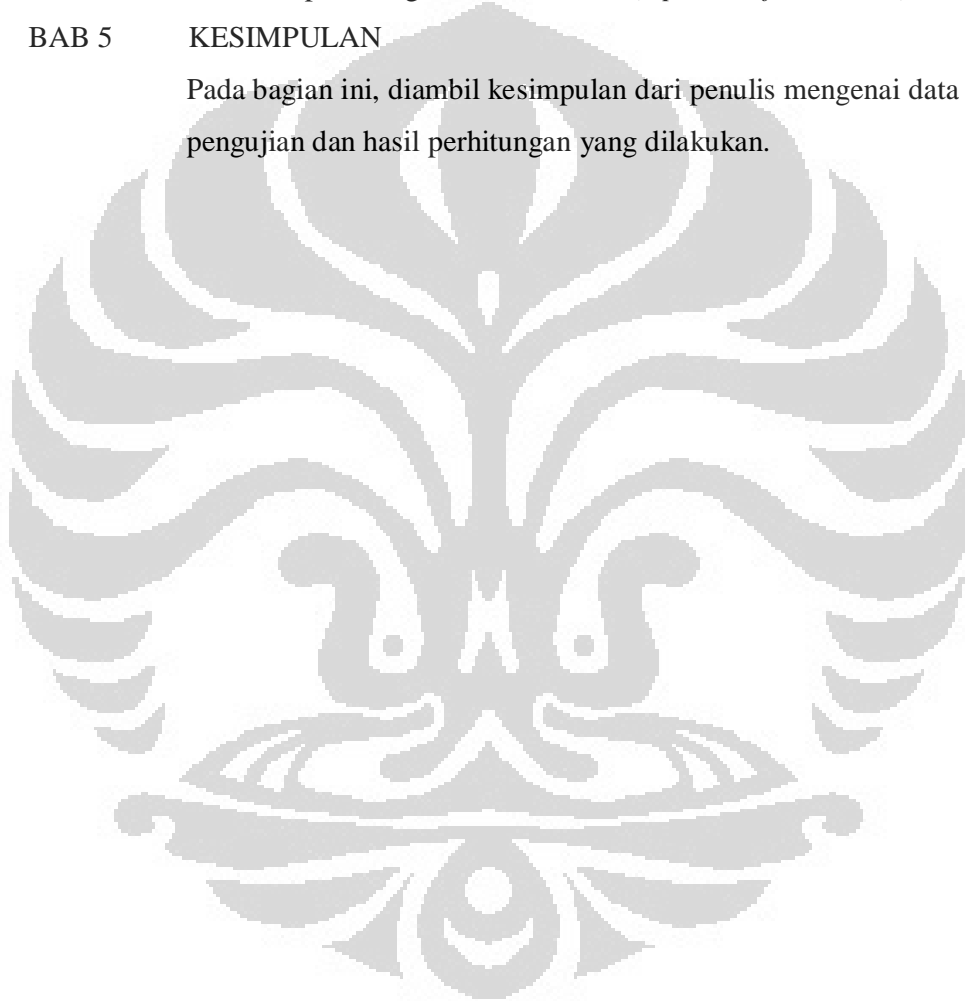
Bagian ini berisikan diagram alir proses penelitian, proses pemilihan komponen alat pengujian, karakteristik refrigeran, kondisi pengujian yang akan dilakukan juga langkah-langkah pengambilan data pengujian.

#### BAB 4 HASIL DAN ANALISA

Data hasil pengujian dikompilasi dan dianalisa di bab ini, beserta hasil dari perhitungan secara teoritis (*separated flow model*)

#### BAB 5 KESIMPULAN

Pada bagian ini, diambil kesimpulan dari penulis mengenai data hasil pengujian dan hasil perhitungan yang dilakukan.

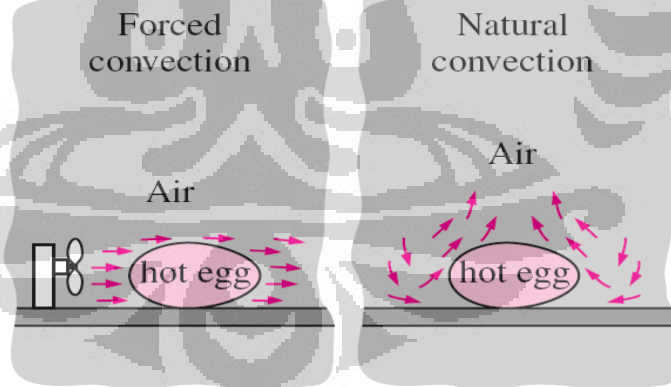


## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1. Konveksi

Konveksi ialah perpindahan kalor yang terjadi antara permukaan zat padat yang berbatasan dengan fluida yang bergerak. Konveksi terjadi karena adanya perbedaan massa jenis akibat adanya perbedaan temperatur pada fluida. Fluida yang memiliki temperatur tinggi memiliki massa jenis yang lebih kecil daripada fluida yang memiliki temperatur lebih rendah, sehingga fluida dengan temperatur tinggi akan naik dan fluida yang memiliki temperatur lebih rendah akan turun mengisi ruang yang ditinggalkan oleh fluida dengan temperatur tinggi tadi. Proses terjadinya perpindahan kalor konveksi tersebut disebut sebagai konveksi alami (*natural convection*) sedangkan jika fluida dipaksa mengalir pada suatu permukaan panas oleh suatu alat, maka konveksi tersebut disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*). Berikut di bawah ini merupakan ilustrasi dari konveksi alami dan konveksi paksa:

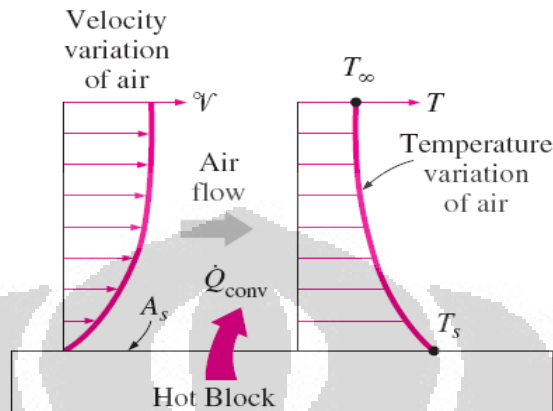


Gambar 2.1 Perpindahan Kalor Konveksi Paksa dan Konveksi Alami

(Yunus A. Cengel, 2003)

Perpindahan kalor yang terjadi secara konveksi merupakan kombinasi dari konduksi dan kecepatan aliran fluida. Semakin besar kecepatan fluida maka

semakin besar pula perpindahan kalor konveksi yang terjadi, seperti yang di ilustrasikan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Profil Perpindahan Kalor Konveksi dari Blok Panas ke Udara  
(Yunus A. Cengel, 2003)

Kalor pertama kali dipindahkan dari blok panas ke lapisan udara secara konduksi, selanjutnya kalor dibawa oleh udara menjauhi permukaan blok panas secara konveksi. Besarnya laju perpindahan kalor konveksi yang terjadi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

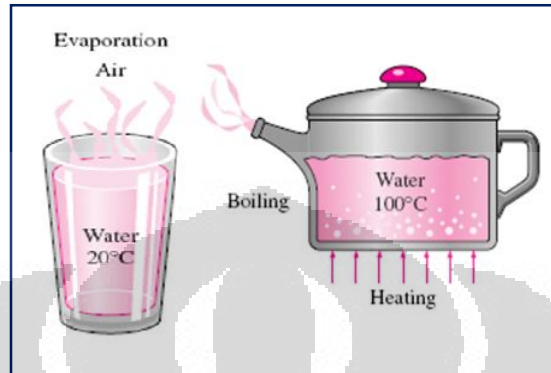
$$Q = hA(T_w - T_{\infty}) \quad (2.1)$$

Koefisien perpindahan kalor konveksi bukanlah karakteristik fluida, akan tetapi merupakan parameter yang ditentukan dengan percobaan yang nilainya tergantung dari faktor yang mempengaruhi proses konveksi seperti geometri permukaan, aliran/gerakan fluida, karakteristik dari fluida, dan perbedaan temperatur.

## 2.2. Perpindahan Kalor Didih

Pendidihan merupakan proses perubahan fasa dari cair ke gas karena temperatur cairnya melebihi temperatur saturasinya pada tekanan tertentu. Lain halnya dengan proses evaporasi, terjadinya perubahan fasa dari cair ke gas

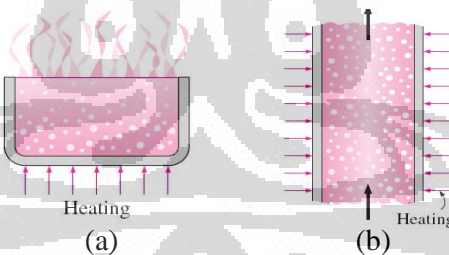
dikarenakan tekanan uapnya berada di bawah tekanan saturasi cairnya pada temperatur tertentu. Fenomena evaporasi dan pendidihan diilustrasikan pada gambar berikut:



Gambar 2.3 Proses Evaporasi dan Pendidihan

(Yunus A. Cengel, 2003)

Pendidihan dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu *pool boiling* dan *flow boiling*. Pendidihan dikatakan sebagai *pool boiling* jika selama proses pendidihan kondisi fluida cairnya tidak mengalir/diam, sedangkan pendidihan dikatakan *flow boiling* jika selama proses pendidihan kondisi fluida cairnya mengalir, seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.6.

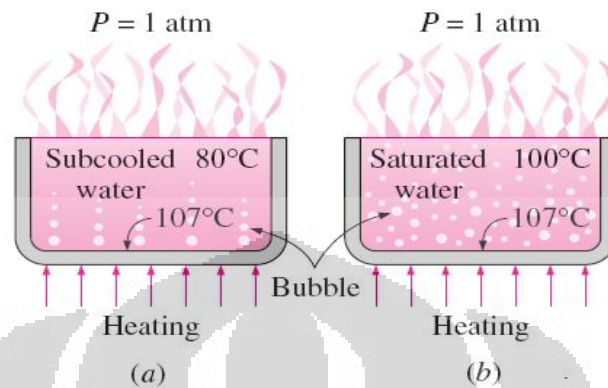


Gambar 2.4(a) *Pool Boiling*, (b) *Flow Boiling*

(Yunus A. Cengel, 2003)

Pendidihan juga dapat diklasifikasikan lagi menjadi *subcooled boiling* dan *saturated boiling*. *Subcooled boiling* adalah pendidihan yang terjadi ketika bulk temperatur dari fluida cairnya masih berada di bawah temperatur saturasinya sedangkan pendidihan dikatakan *saturated boiling* jika bulk temperatur dari fluida

cairnya berada pada temperatur saturasinya. Fenomena tersebut diilustrasikan oleh gambar berikut:



Gambar 2.5(a) *Subcooled Boiling*, (b) *Saturated Boiling*  
(Yunus A. Cengel, 2003)

### 2.3. Model Aliran Dua Fasa

Aliran dua fasa adalah aliran fluida yang terdiri dari fasa cair dan fasa gas yang biasanya terjadi pada proses evaporasi atau kondensasi. Pada proses evaporasi untuk jenis *internal flow* (pada pipa) tidak ada permukaan bebas bagi gelembung uap untuk meloloskan diri ke udara bebas. Sehingga gelembung uap tersebut akan terseret mengikuti arus aliran cairannya. Aliran inilah yang selanjutnya disebut dengan “aliran dua fasa” (*two phase flow*) yaitu fasa cair dan gas yang akan mengalir bersamaan dalam pipa. Pola aliran akan terus berubah seiring bertambahnya gelembung uap dalam pipa sehingga akan terbentuk beberapa pola aliran yang berbeda.

Untuk menganalisa sebuah aliran dua fasa, terdapat tiga model aliran yang dapat digunakan:

- Model aliran homogen. Pada model ini, aliran diasumsikan sebagai satu fasa saja dengan properti yang didapat dari gabungan dan besarnya kontribusi masing-masing fasa.
- Model aliran terpisah. Pada model ini, masing-masing fasa diasumsikan terpisah dan masing-masing memiliki properti tersendiri. Karakteristik



masing-masing fasa harus tersedia, terutama tentang luas area masing-masing fasa dan interaksi gesekan antar fasa maupun dengan dinding pipa.

- c) Model pola aliran. Pada model yang lebih kompleks ini, pola aliran kedua fasa tersebut di klasifikasi kan dalam salah satu dari tiga atau empat geometri aliran yang umumnya ditemukan pada aliran dua fasa di dalam pipa. Tiap klasifikasi geometri tersebut memiliki persamaan dasar tersendiri yang harus diselesaikan terpisah. Untuk menggunakan model aliran ini diperlukan pengetahuan kapan tiap klasifikasi geometri dapat diterapkan dan transisi dari tiap pola ke pola lainnya.

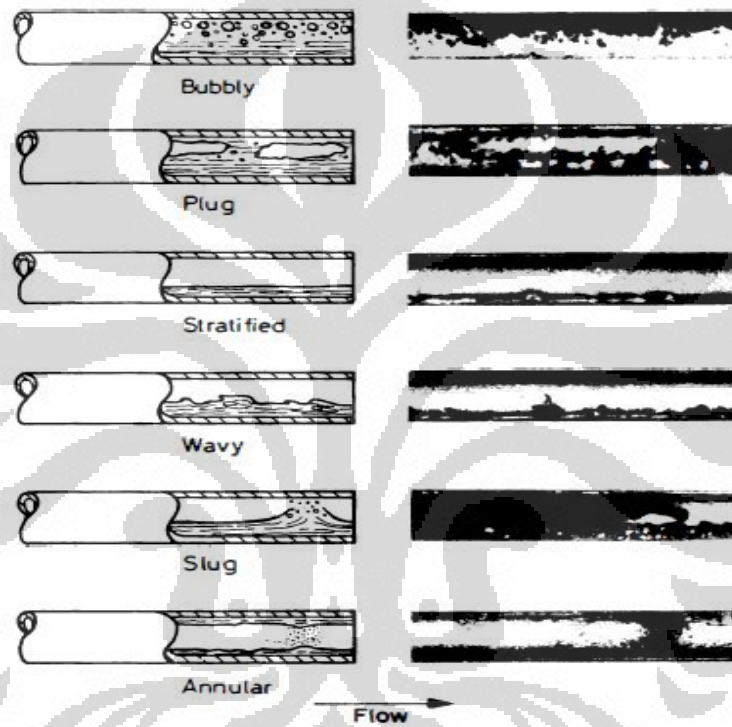
#### **2.4. Pola Aliran Dua Fasa Pada Pipa Horizontal**

Pada aliran dua fasa di pipa horizontal, pengamatan pola aliran menjadi rumit karena adanya ketidak simetrisan antara kedua fasa yang dikarenakan oleh pengaruh gravitasi. Pola-pola aliran yang terjadi secara umum adalah sebagai berikut:

- a) *Bubbly flow*. Pada aliran ini, terdapat gelembung-gelembung gas yang umumnya bergerak di bagian atas aliran.
- b) *Plug flow*. Pada aliran ini, semakin banyak gelembung-gelembung yang terjadi dan bergabung membentuk kumpulan gelembung besar dan juga umumnya terjadi pada sebelah atas aliran.
- c) *Stratified flow*. Pola aliran ini hanya terjadi pada aliran cair dan gas berkecepatan rendah. Kedua fasa mengalir terpisah dengan batas yang relatif halus.
- d) *Wavy flow*. Dengan kecepatan gas yang meningkat, lapisan batas semakin terganggu oleh gelombang yang bergerak searah dengan arah aliran.
- e) *Slug flow*. Semakin bertambahnya kecepatan gas akan mengakibatkan gelombang pada lapisan batas menjadi daerah berbusa yang akan bergerak sepanjang kanal pipa.
- f) *Annular flow*. Pada kecepatan gas yang lebih tinggi akan menghasilkan terjadinya inti gas dengan lapisan film cair di sekeliling dinding dalam

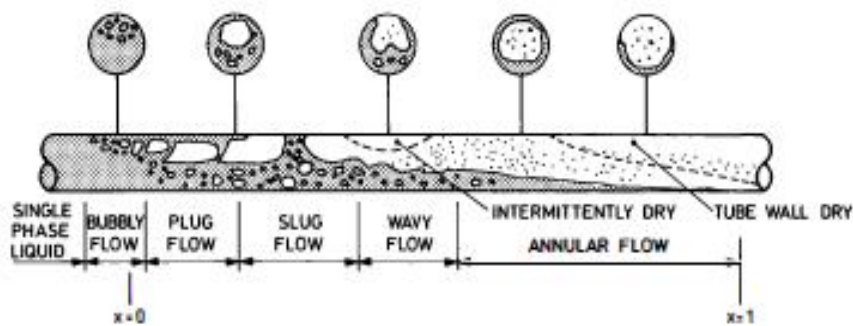
pipa. Lapisan film cair bisa tidak sama diameternya sepanjang pipa dan akan lebih tebal di sebelah bawah aliran.

Pada aliran *slug* dan *wavy* dapat terjadinya kondisi pengeringan dan pembasahan terulang pada bagian atas pipa serta terjadinya *dryout* pada bagian akhir pipa panjang untuk aliran annular. Kondisi tersebut patut diperhatikan pada pengamatan perpindahan panas.



Gambar 2.6 Pola Aliran Dua Fasa pada Pipa Horizontal Berdasarkan Collier et. al.(1994)

Gambar diatas menggambarkan pola-pola aliran pada aliran dua fasa berdasarkan Collier *et.al.* (1994). Pada sebuah proses evaporasi aliran dua fasa di pipa horizontal, pola aliran yang umum terjadi menurut Collier *et. Al*(1994) adalah seperti pada Gambar dibawah.



Gambar 2.7 Pola Aliran Dua Fasa pada Proses Evaporasi di Pipa Horizontal Menurut Collier et.al.(1994)

Gambar di atas dapat dilihat bahwa untuk aliran evaporasi dua fasa terdapat tahapan-tahapan perubahan pola aliran yang umumnya terjadi dengan urutan yang tetap. Patut diperhatikan adanya kondisi pengeringan terputus (*intermittent drying*) dan pengeringan total (*dryout*) yang semakin dominan dengan bertambahnya panjang pipa. Kondisi pengeringan ini diusahakan dihindari agar tidak terjadi *burn out* yang dapat merusak komponen tersebut.

## 2.5. Pipa Kanal Mini

Pada penelitian ini, dipergunakan pipa kanal mini dengan ukuran diameter dalam 3mm. Pemilihan ukuran diameter ini memiliki beberapa keuntungan, antara lain:

- Rasio kontak antara permukaan fluida dengan volume fluida yang lebih besar dibanding dengan pipa kanal konvensional.
- Pembuatan alat penukar kalor yang lebih kompak karena ukuran pipa yang kecil.

Pada pipa kanal mini tersebut akan ditempelkan pemanas listrik sebagai beban pemanasan sehingga terjadi perpindahan kalor dari luar pipa menuju fluida refrigeran di dalam pipa tersebut.

## 2.6. Kondisi Aliran *Subcooled*

Pada aliran evaporasi, bila fluida memasuki pipa dalam kondisi sepenuhnya cair, dapat terjadi kondisi dimana aliran akan masih tetap dalam kondisi cair sampai fluida mencapai kondisi saturasi dan mulai muncul fasa uap. Kondisi sepenuhnya cair ini dinamakan kondisi *subcooled*. Panjang kondisi *subcooled* yang terjadi dapat ditentukan dari persamaan berikut :

$$z_{sc} = \left( \frac{h_f - h_{fi}}{\Delta h} \right) L \quad (2.2)$$

Dengan :

$$\Delta h = \frac{p}{w} \quad (2.3)$$

$z_{sc}$  = panjang kondisi subcooled (m)

$L$  = panjang pipa (m)

$h_f$  = entalpi fluida (kJ/kg)

$h_{fi}$  = entalpi fluida pada masukan pipa (kJ/kg)

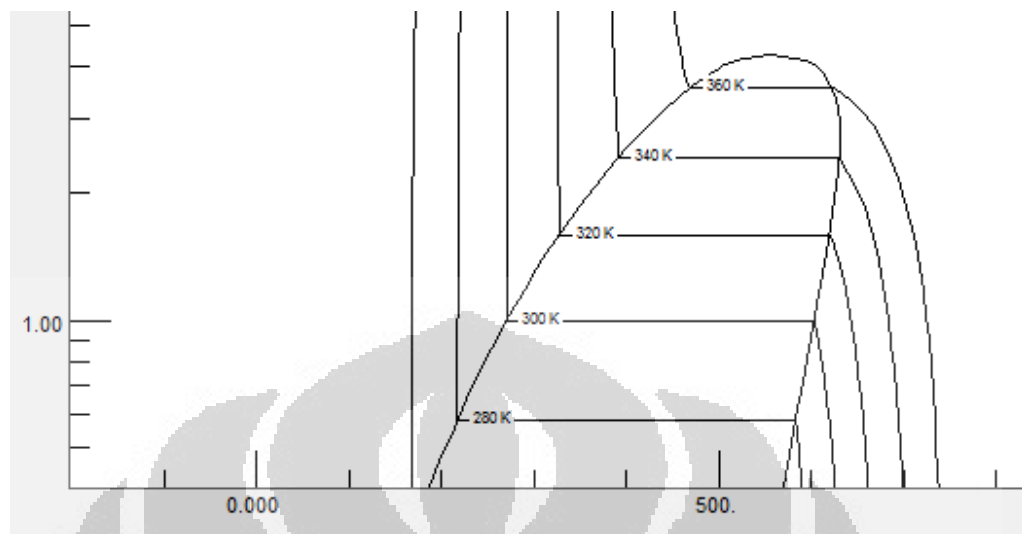
$\Delta h$  = perubahan entalpi (kJ/kg)

$p$  = daya yang masuk ke fluida (W)

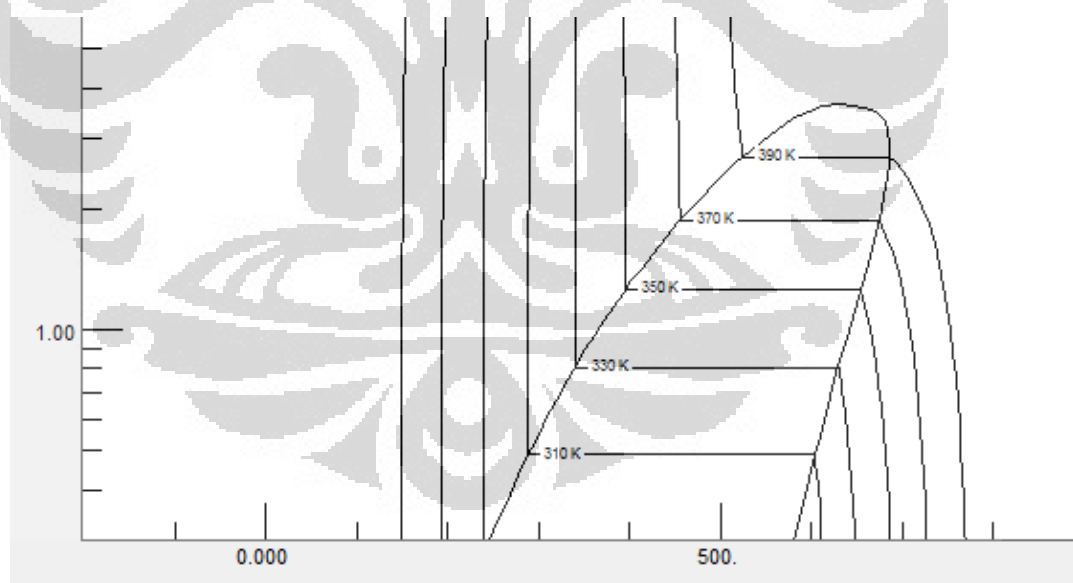
$w$  = laju massa (kg/s)

## 2.7. Kondisi Aliran Dua Fasa

Pada pendidihan aliran dua fasa, akan terjadi fasa gas dan cair pada saat bersamaan di dalam kanal pipa. Kondisi ini terjadi pada garis saturasi dari suatu zat dan kondisi ini ditentukan dari perbandingan antara massa fasa cair dengan massa fasa uap, yang disebut dengan nilai kualitas massa uap. Untuk menentukan properti fasa cair dan uap yang terjadi di kanal pipa, diperlukan nilai kualitas massa uap ( $x$ ) pada kondisi aliran yang terjadi pada garis saturasi tersebut.



Gambar 2.8 Diagram p-h untuk Propana (R-290) dari *Software* Refprop



Gambar 2.9 Diagram p-h untuk Isobutana (R-600a) dari *Software* Refprop

Secara termodinamik;

$$x = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} = \frac{h - h_f}{h_{fg}} \quad (2.4)$$

Secara hidrodinamik;

$$x = \frac{W_g}{W_g + W_f} \quad (2.5)$$

Dimana:

$x$  = kualitas massa uap

$h$  = entalpi pada titik yang di perhitungkan (J/kg)

$h_f$  = entalpi saturasi fasa cair (J/kg)

$h_g$  = entalpi saturasi fasa uap (J/kg)

$W_f$  = massa cair (kg)

$W_g$  = massa uap (kg)

Untuk mendapatkan nilai  $x$  sepanjang aliran dua fasa, diperlukan nilai  $x$  yang terjadi pada keluaran pipa yang dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$x_o = \frac{\Delta h + h_{fi} - h_f}{h_{fg}} \quad (2.6)$$

Untuk mendapatkan nilai  $x$  sepanjang aliran dua fasa, dapat diperoleh dari persamaan berikut :

$$x_z = x_o \left( \frac{z - z_{sc}}{L - z_{sc}} \right) \quad (2.7)$$

Dimana:

$x_o$  = kualitas massa uap pada keluaran pipa

$h_{fg}$  = perbedaan nilai entalpi uap dan cair (kJ/kg)

$x_z$  = kualitas massa uap yang dicari

$z$  = posisi dari  $x_z$  (m)

Pada kondisi dimana terjadinya fasa cair dan uap secara bersamaan, nilai perbandingan luas penampang fasa gas dibandingkan dengan luas penampang keseluruhan disebut dengan istilah fraksi uap (*void fraction*). Nilai fraksi uap ( $\alpha$ ) ini dapat diperoleh dari persamaan :

$$\alpha = \frac{A_g}{A_g + A_f} = \frac{A_g}{A} \quad (2.8)$$

dan

$$(1 - \alpha) = \frac{A_f}{A_g + A_f} = \frac{A_f}{A} \quad (2.9)$$

Dimana,

$\alpha$  = fraksi uap

$A$  = luas penampang kanal (m<sup>2</sup>)

$A_f$  = luas penampang fasa cair (m<sup>2</sup>)

$A_g$  = luas penampang fasa uap (m<sup>2</sup>)

Pada penelitian ini, nilai fraksi uap akan diperoleh sebagai fungsi dari nilai kualitas massa uap,  $x$ , dengan menggunakan persamaan percobaan Steiner (1993):

$$\alpha = x v_g \left[ \frac{(1 + 0.12 (1 - x))(x v_g + (1 - x) v_f)}{+ \frac{1.18}{G} (1 - x) v_f^{0.5} \left[ g \sigma \left( \frac{1}{v_f} - \frac{1}{v_g} \right) \right]^{0.25}} \right]^{-1} \quad (2.10)$$

Dimana,

$\alpha$  = fraksi uap

$x$  = kualitas massa uap

$v_g$  = spesifik volume fasa uap ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

$v_f$  = spesifik volume fasa cair ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $\text{m/s}^2$ )

$\sigma$  = tegangan permukaan ( $\text{N/m}$ )

Dan untuk menentukan tipe laju masing-masing fasa cair dan uap yang terjadi dapat ditentukan dari nilai bilangan Reynolds:

$$Re = \frac{GD}{\mu} \quad (2.11)$$

$$Re_f = \frac{GD(1-x)}{\mu_f} \quad (2.12)$$

$$Re_g = \frac{GDx}{\mu_g} \quad (2.13)$$

Dari nilai bilangan Reynolds tersebut dapat diperoleh nilai koefisien gesek ( $f$ ) dari persamaan Blasius :

$$f = \begin{cases} \frac{16}{Re}, & \text{untuk } Re < 2300 \\ \frac{0.079}{Re^{0.25}}, & \text{untuk } Re > 3000 \\ \text{interpolasi untuk } 2300 \leq Re \leq 3000 \end{cases} \quad (2.14)$$

Persamaan interpolasi untuk kondisi  $2300 \leq Re \leq 3000$  adalah sebagai berikut :

$$\frac{(f - f_{2300})}{(f_{3000} - f_{2300})} = \frac{(Re - 2300)}{(3000 - 2300)}$$

$$(f - f_{2300}) = \frac{(Re - 2300)}{700} (f_{3000} - f_{2300})$$

$$\left(f - \frac{16}{2300}\right) = \frac{(Re - 2300)}{700} \left(\frac{0.079}{3000} - \frac{16}{2300}\right)$$



$$\begin{aligned}
 (f - 0.0069) &= \frac{(Re - 2300)}{700} (0.01067 - 0.0069) \\
 (f - 0.0069) &= (Re - 2300)(5.3 \times 10^{-6}) \\
 f &= 0.0069 + [(Re - 2300)(5.3 \times 10^{-6})] \quad (2.15)
 \end{aligned}$$

Dimana,

$G$  = fluks massa ( $\text{kg/ m}^2.\text{s}$ )

$D$  = diameter (m)

$\mu$  = viskositas dinamik ( $\text{kg/ m.s}$ )

$\mu_f$  = viskositas dinamik fasa cair ( $\text{kg/ m.s}$ )

$\mu_g$  = viskositas dinamik fasa uap ( $\text{kg/ m.s}$ )

$Re$  = bilangan Reynolds

$Re_f$  = bilangan Reynolds fasa cair

$Re_g$  = bilangan Reynolds fasa uap

$f$  = koefisien gesek

## 2.8. Penurunan Tekanan

Pada sebuah aliran fluida di dalam pipa, akan terjadi penurunan tekanan antara tempat masuk fluida dan tempat keluar fluida di pipa tersebut. Penurunan tekanan ini dikarenakan adanya hambatan aliran yang disebabkan oleh gesekan, perubahan kecepatan fluida, dan beda ketinggian. Persamaan total gradien penurunan tekanan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\left( \frac{dp}{dz} \right) = \left( \frac{dp}{dz} F \right) + \left( \frac{dp}{dz} a \right) + \left( \frac{dp}{dz} z \right) \quad (2.16)$$

Untuk aliran pada pipa horizontal dimana tidak adanya perbedaan ketinggian antara tempat masuk dan keluar fluida, maka persamaan (2.15) akan menjadi:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \left(\frac{dp}{dz} F\right) + \left(\frac{dp}{dz} a\right) \quad (2.17)$$

$\left(\frac{dp}{dz}\right)$  = total gradien penurunan tekanan / penurunan tekanan eksperimen (Pa)

$\left(\frac{dp}{dz} F\right)$  = gradien penurunan tekanan akibat gesekan (Pa)

$\left(\frac{dp}{dz} a\right)$  = gradien penurunan tekanan akibat percepatan (Pa)

$\left(\frac{dp}{dz} z\right)$  = gradien penurunan tekanan akibat beda ketinggian (Pa)

Besarnya total gradien penurunan tekanan diperoleh dari:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \frac{P_{inlet} - P_{outlet}}{\text{panjang pipa}} \quad (2.18)$$

Besarnya gradien penurunan akibat percepatan fluida dapat diperoleh dari :

$$\left(\frac{dp}{dz} a\right) = G^2 \frac{d}{dz} \left[ \frac{x^2 v_g}{\alpha} + \frac{(1-x)^2 v_f}{(1-\alpha)} \right] \quad (2.19)$$

Dengan :

$G$  = fluks massa(kg/ m<sup>2</sup>.s)

$v_g$  = spesifik volume fasa uap (m<sup>3</sup>/kg)

$v_f$  = spesifik volume fasa cair (m<sup>3</sup>/kg)

$x$  = kualitas massa uap

$\alpha$  = void fraction

Untuk mendapatkan nilai penurunan tekanan akibat gesekan pada aliran dua fasa, dapat diperoleh tergantung dari model aliran yang dipakai sesuai dengan subbab 2.3 diatas. Pada penelitian yang dilakukan kami adalah dengan menggunakan model aliran terpisah.

Asumsi yang dipakai pada model aliran terpisah adalah:

- Tiap fasa mengalir dengan kecepatan yang konstan tapi tidak perlu sama.
- Terjadinya kesetimbangan termodinamik antara fasa cair dan gas.
- Digunakannya korelasi empiris untuk menggambarkan hubungan antara faktor pengali gesekan dua fasa ( $\phi^2$ ) dan fraksi uap ( $x$ ) dengan variabel independen dari aliran tersebut.

Pada model aliran ini, penurunan tekanan gesekan dapat diperoleh dari penurunan tekanan gesekan yang terjadi bila tiap fasa dari aliran dua fasa tersebut mengalir sendiri di dalam pipa dan dikalikan dengan faktor koreksi *frictional multiplier* untuk fasa tersebut, yang dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{TP} = \left(\frac{dp}{dz}F\right)_f \phi_f^2 = \left(\frac{dp}{dz}F\right)_g \phi_g^2 \quad (2.20)$$

$\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{TP}$  = gradien penurunan tekanan gesekan dua fasa (Pa)

$\left(\frac{dp}{dz}F\right)_f$  = gradien penurunan tekanan gesekan fasa cair saja (Pa)

$\left(\frac{dp}{dz}F\right)_g$  = gradien penurunan tekanan gesekan fasa gas saja (Pa)

$\phi_f^2$  = faktor pengali gesekan fasa cair

$\phi_g^2$  = faktor pengali gesekan fasa gas

Dari percobaan Lockhart-Martinelli (1949), didapatkan suatu korelasi yang menggambarkan hubungan antara antara  $\left(\frac{dp}{dz}F\right)_f$  dan  $\left(\frac{dp}{dz}F\right)_g$  dengan faktor pengali gesekan mereka masing-masing ( $\phi_f^2$  dan  $\phi_g^2$ ) yang disebut dengan parameter Martinelli,  $X$ , yaitu :

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_g} \quad (2.21)$$

Dimana

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f = \frac{2f_f G^2 (1-x) v_f}{D} \quad (2.22)$$

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_g = \frac{2f_g G^2 x v_g}{D} \quad (2.23)$$

Sehingga persamaan (2.15) menjadi

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_g} = \frac{\frac{2f_f G^2 (1-x)^2 v_f}{D}}{\frac{2f_g G^2 x^2 v_g}{D}} \quad (2.24)$$

$$X^2 = \frac{f_f}{f_g} \frac{(1-x)^2 v_f}{x^2 v_g}$$

Dan

$$\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (2.25)$$

$$\phi_g^2 = 1 + CX + X^2 \quad (2.26)$$

Dimana nilai C dapat diperoleh dari table dibawah yang merupakan rekomendasi dari Chisholm (1968) Tabel 2.1 Nilai C dilihat dari jenis aliran fasa.

Tabel 2.1 Bilangan Chisolm

Re fasa cair ( $Re_f$ )	Re fasa gas ( $Re_g$ )	Nilai C
$Re < 2300$	$Re < 2300$	5
$Re > 3000$	$Re < 2300$	10
$Re < 2300$	$Re > 3000$	12

Re > 3000	Re > 3000	20
Untuk dimana nilai Re salah satu atau kedua fasa terletak pada $2300 \leq Re \leq 3000$		interpolasi

Korelasi lain yang direkomendasikan untuk aliran dua fasa adalah korelasi Friedel (1979), persamaannya dapat dilihat dibawah:

$$\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{TP} = \left(\frac{dp}{dz}F\right)_{fo} \phi_{fo}^2 = \left(\frac{2f_o G^2 v_f}{D}\right) \phi_{fo}^2 \quad (2.27)$$

$$\phi_{fo}^2 = A_1 + \frac{3,24 \cdot A_2 \cdot A_3}{Fr^{0,045} \cdot We^{0,035}} \quad (2.28)$$

$$A_1 = (1-x)^2 + x^2 \cdot \left(\frac{\rho_f f_{go}}{\rho_g f_{fo}}\right) \quad (2.29)$$

$$A_2 = x^{0,78} + (1-x)^{0,224} \quad (2.30)$$

$$A_3 = \left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{0,91} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f}\right)^{0,19} \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_f}\right)^{0,7} \quad (2.31)$$

$$Fr = \frac{G^2}{g \cdot D \cdot \bar{\rho}} \quad (2.32)$$

$$We = \frac{G^2 \cdot D}{\bar{\rho} \cdot \sigma} \quad (2.33)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{v_f + x \cdot v_{fg}} \quad (2.34)$$

Adapun untuk bilangan Chisolm yang didapat dari hasil eksperimen dapat menggunakan persamaan di bawah ini:

$$\phi_{f(\text{exp})}^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{exp}}{\left(\frac{dp}{dz}F\right)_f} = \frac{\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{exp}}{\frac{2f_f G^2 (1-x)v_f}{D}} \quad (2.35)$$

$$C_{(exp)} = \left( \phi_{f(exp)}^2 - 1 + \frac{1}{X^2} \right) \cdot X \quad (2.36)$$

## 2.9. Deviasi

Pada penelitian ini, nilai gradien penurunan tekanan gesek dua fasa yang didapatkan dari hasil pengukuran  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}$  dengan menggunakan persamaan (2.17) dan akan dibandingkan dengan nilai gradien penurunan tekanan gesek dua fasa yang didapatkan dari hasil perhitungan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{cal}$  atau  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{TP}$  berdasarkan persamaan (2.20).

Untuk pembandingan ini akan digunakan teori *mean* deviasi dan *average* deviasi menggunakan persamaan berikut :

$$MD = \frac{1}{n} \sum_1^n \left| \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{cal} - \left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}} \times 100 \right| \quad (2.37)$$

$$AD = \frac{1}{n} \sum_1^n \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{cal} - \left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}} \times 100 \quad (2.38)$$

Dimana:

MD = *mean* deviasi

AD = *average* deviasi

n = jumlah data

$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{cal}$  = gradien penurun tekanan gesek hasil perhitungan (Pa)

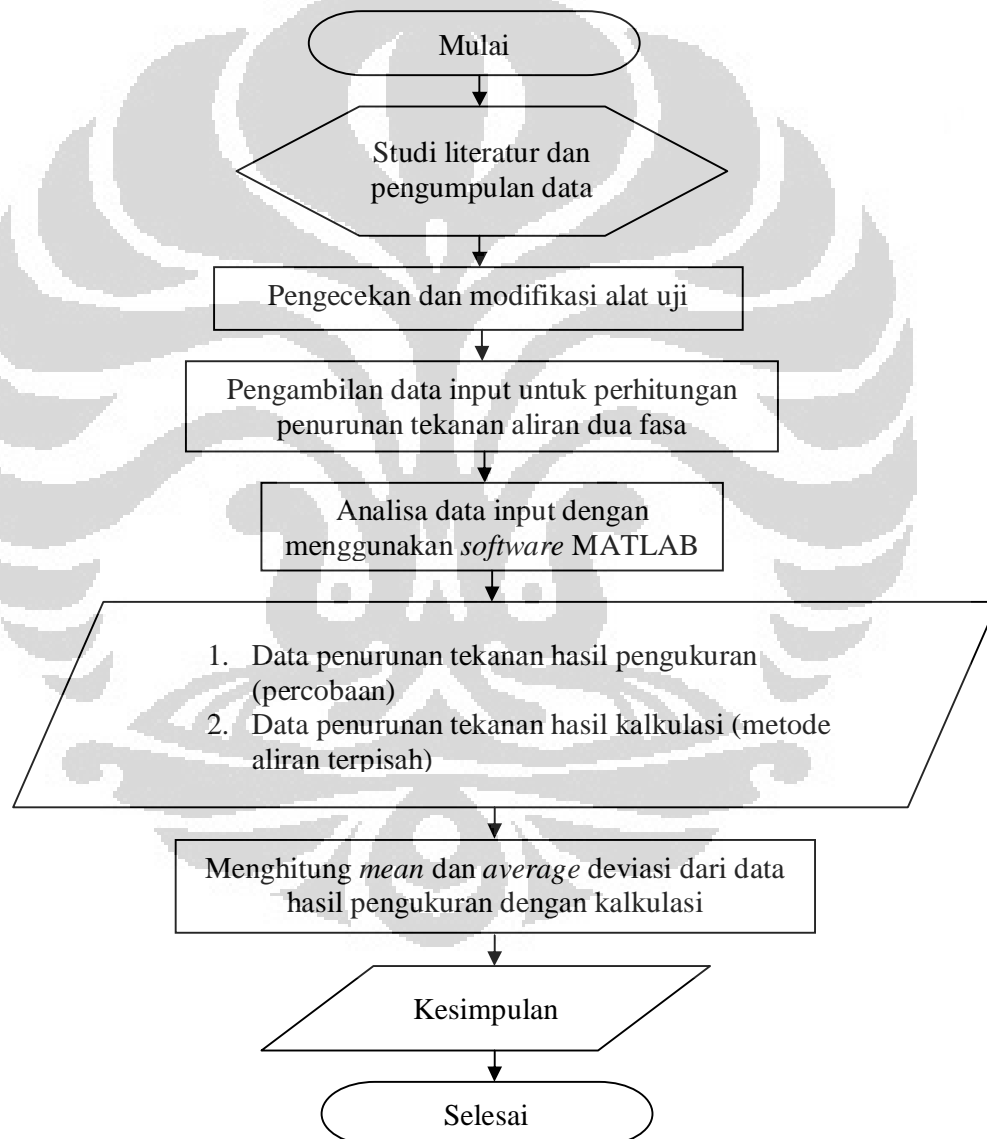
$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}$  = gradien penurun tekanan gesek hasil pengukuran (Pa)

## BAB 3

### PERANGKAT DAN ASPEK PENGUJIAN

#### 3.1. Diagram Alir Penelitian

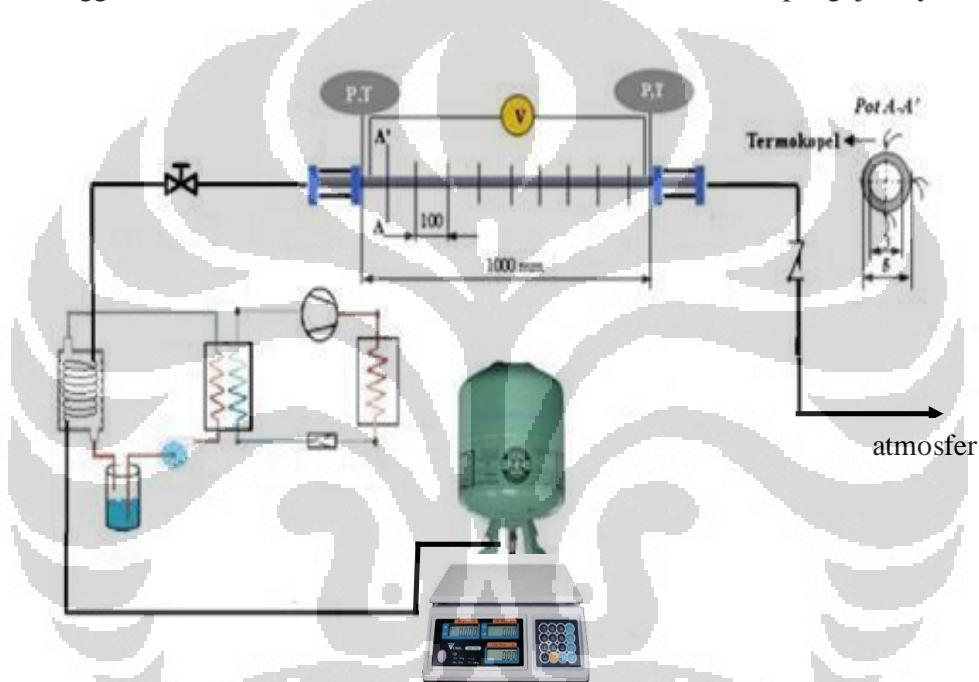
Penelitian penurunan tekanan untuk refrigeran propane dan isobutana pada pipa kanal mini horizontal dilakukan melalui beberapa prosedur seperti yang terlihat pada diagram alir di bawah ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Penelitian

### 3.2. Skematik Alat Pengujian

Perangkat pengujian yang di pakai pada penelitian ini adalah sistem refrigerasi putaran terbuka (*open-loop*) menggunakan refrigeran propana dan isobutana sebagai fluida kerjanya. Pada bagian pengetesan berupa pipa kanal mini horizontal sepanjang 1 meter yang terbuat dari stainless steel 316, dan dipasang termokopel dengan interval jarak 0.1 m sebagai sensor temperatur dan pengambilan data menggunakan data akuisisi dari National Instrument menggunakan software LabView. Berikut dibawah skema alat pengujiannya.



Gambar 3.2 Skematik Alat Pengujian Aliran Dua Fasa Sistem Putaran Terbuka

### 3.3. Komponen Alat Pengujian

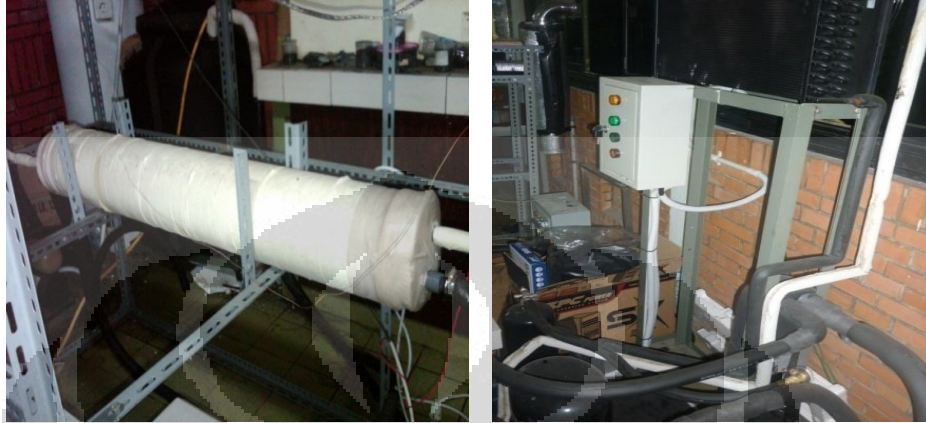
Komponen alat pengujian merupakan komponen dalam sistem refrigerasi pada umumnya dan disesuaikan dengan kondisi pengujian yang dilakukan. Berikut adalah komponen pengujian aliran dua fasa.

#### 1. Condensing Unit

*Condensing unit* berfungsi untuk merubah fasa dari refrigeran yang keluar dari tabung, refrigeran propana dan isobutana yang keluar dari tabungnya berfasa gas, sehingga harus dirubah fasanya menjadi cair oleh *condensing unit* yang



mempunyai daya 3 pk melalui proses perpindahan kalor. Perubahan fasa gas ke cair tersebut dibutuhkan dalam proses penelitian aliran dua fasa pada *test section*.



Gambar 3.3 *Condensing Unit* Berdaya 3 PK

## 2. *Test Section*

*Test section* dengan material *stainless steel* 316 (SS 316) dengan diameter dalam 3 mm , diameter luar 5 mm dan panjang 1 m serta diberikan isolator agar pada proses penelitian tidak terjadi penyerapan dan pelepasan kalor ke atau dari lingkungan, atau lebih sering dinamakan proses adiabatik ( $q=0$ ).



Gambar 3.4 *Test Section*

## 3. *Pressure Gage* dan *Pressure Transmitter*

*Pressure gauge* dan *pressure transmitter* berfungsi untuk mengetahui besarnya tekanan yang terjadi ketika refrigeran masuk dan keluar dari *test section*. Oleh karena itu, pada alat uji di bagian inlet dipasang 1 buah *pressure gauge* dan 1

buah *pressure transmitter* serta pada bagian outlet dipasang 1 buah *pressure gauge* dan 1 buah *pressure transmitter*.

Fungsi *pressure transmitter* pada alat uji ini sebagai pengukur tekanan dengan akurasi tinggi yang dihubungkan ke modul tekanan dan diolah oleh software LabView di computer. Dengan akurasi tinggi tersebut nilai dari penurunan tekanan dapat dideteksi dengan mudah. Range nilai tekanan untuk *pressure trasnsitter* tersebut antar 0 sampai 40 bar. Sedangkan fungsi *pressure gauge* pada alat uji adalah sebagai cadangan atau pengganti apabila terjadi error pada *pressure transmitter*, fungsi lainnya adalah sebagai pembanding secara kasar nilai tekanan yang terbaca di *pressure transmitter*.



Gambar 3.5 *Pressure Transmitter* dan *Pressure Gauge*

#### 4. Pipa Tembaga

Pipa tembaga pada alat pengujian terdiri dari pipa tembaga berukuran 3/8 inch dan 1/4 inch.



Gambar 3.6 Pipa Tembaga Berukuran 3/8 inch dan 1/4 inch

#### 5. Check Valve

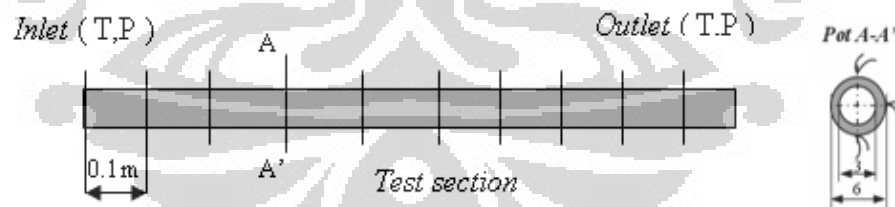
*Check valve* digunakan dengan pertimbangan agar aliran yang terjadi searah atau tidak terjadi aliran balik.



Gambar 3.7 Check Valve

#### 6. Termokopel

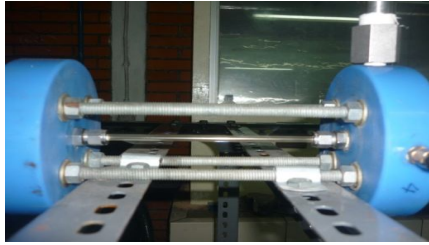
Termokopel untuk mengukur temperatur permukaan luar disepanjang *test section*. Termokopel yang dipakai pada alat uji adalah termokopel tipe-K dan dipasang pada bagian atas, bawah, sisi kiri dan kanan *test section* pada 9 titik disepanjang *test section* dengan jarak antar titik 0.1 m, seperti yang diilustrasikan pada gambar di bawah. Pemasangan termokopel hanya pada tiga sisi ini karena diasumsikan temperatur yang terjadi pada dinding samping kiri dan kanan tidak berbeda jauh, oleh karena itu pada sisi samping hanya dipasang satu termokopel saja.



Gambar 3.8 Termokopel pada Test Section

#### 7. Sight Glass

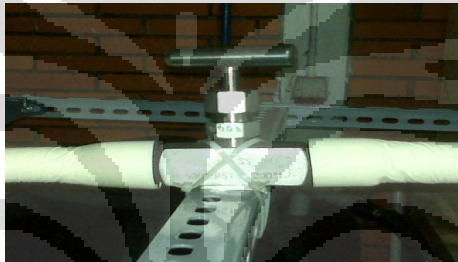
*Sight glass* digunakan untuk dapat melihat secara visual aliran refrigeran yang terjadi pada sisi masukan dan keluaran dari *test section*.



Gambar 3.9 *Sight Glass*

#### 8. *Needle Valve*

*Needle valve* berfungsi untuk mengatur besar kecilnya aliran refrigeran yang akan masuk ke *test section*.



Gambar 3.10 *Needle Valve*

#### 9. *Variable Transformer*

*Variable transformer* berfungsi untuk memberikan energi panas pada *heater* yang dililitkan secara merata pada *test section*. Alat ini mampu memberikan daya sampai dengan 1100 watt dan besar kecilnya daya dapat dikontrol dengan mengatur besarnya tegangan ataupun arus listriknya.



Gambar 3.11 *Variable Transformer*

#### 10. Timbangan Digital

Timbangan digital berfungsi untuk melihat pengurangan massa terhadap satuan waktu dengan tingkat kepresisian yang cukup tinggi (3 angka dibelakang koma). Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui laju aliran massa yang terjadi.



Gambar 3.12 Timbangan Digital

#### 11. Sabuk Pemanas

Sabuk pemanas dipasang pada tabung dan berfungsi untuk menaikkan temperatur tabung dengan tujuan tekanan di dalam tabung meningkat. Apabila tekanan refrigeran meningkat maka refrigeran di dalam tabung akan mudah mengalir.

Sabuk pemanas



Gambar 3.13 Sabuk Pemanas yang Dipasangkan pada Tabung Refrigeran



### 12. *Power Supply* untuk *pressure transmitter*

Nilai tekanan yang terbaca oleh sensor pada *pressure transmitter* kemudian dikonversikan menjadi energi listrik agar dapat terbaca nilainya oleh komputer. Proses pengkonversian tersebut membutuhkan tegangan listrik yang cukup, maka diperlukan *power supply*, dengan besarnya tegangan yang dibutuhkan *pressure transmitter* sebesar 24 volt



Gambar 3.14 *Power Supply*

### 13. Modul Termokopel dan *Pressure Transmitter*

Modul termokopel dan *pressure transmitter* merupakan alat untuk merubah masukan dari kabel termokopel dan *pressure transmitter* yang berupa arus listrik menjadi satuan temperatur dan tekanan yang ditampilkan pada monitor komputer dengan bantuan software LabView.



Gambar 3.15 Modul Termokopel dan *Pressure Transmitter*

### 3.4. Prinsip Kerja Alat Pengujian

Seperti yang terlihat pada gambar 3.2, sistem sirkulasi yang digunakan pada perangkat alat pengujian aliran dua fasa adalah sistem sirkulasi terbuka (*open-loop*). Refrigeran disirkulasikan dari tabung yang diletakan secara terbalik dan dipanaskan oleh sabuk pemanas, dua hal tersebut dapat membantu mengalirkan refrigeran dari tabung.

Setelah keluar dari tabung, refrigeran dialirkan menuju perangkat *condensing unit* 3 pk yang kemudian menurunkan temperatur dan merubah fasa refrigeran menjadi fasa cair. Setelah itu, refrigeran berfasa cair tersebut menuju *test section* yang telah dipanaskan oleh *heater* yang berupa kawat nikelin yang dililitan secara merata pada *test section*, tetapi diatur terlebih dahulu besar alirannya oleh *needle valve*.

Untuk mengetahui fasa refrigeran yang terjadi sebelum dan setelah melewati *test section* dipasang *sight glass*. Sedangkan untuk mengetahui tekanan masuk dan keluar *test section* dipasang *pressure gauge* pada bagian masuk dan keluar *test section* dan untuk mengetahui temperatur dinding luar *test section* dipasang termokopel pada tiga sisi yaitu sisi bagian atas, samping dan bawah di sepanjang pipa *test section* dengan interval jarak 0.1 m.

Setelah keluar dari *test section*, refrigeran akan mengalir melewati *check valve* yang berfungsi untuk mencegah terjadinya aliran balik yang dapat mengganggu terhadap proses sirkulasi, kemudian refrigeran dibuang ke atmosfer.

### 3.5. Karakteristik Refrigeran

#### 1. Karakteristik refrigeran propana (R-290)

Tabel 3.1 Properti Propana (R-290)

Massa molar	44,096 kg/kmol
Titik lebur	-187,62 °C
Titik didih	-42,11 °C
Berat jenis	2,0105 kg/m <sup>3</sup> , gas (0°C, 101.325 kPa)

	580,88 kg/m <sup>3</sup> , cair pada titik didih.
Titik kritis	96,74 °C 42,512 bar
Konduktivitas thermal	0.01565 W/m.K, gas (0°C, 101.325 kPa) 0.12918 W/m.K, cair pada titik didih

## 2. Karakteristik refrigeran isobutana (R-600a)

Tabel 3.2. Properti Isobutana (R-600a)

Massa molar	58,122 kg/kmol
Titik lebur	-159,42 °C
Titik didih	-11,75 °C
Berat jenis	2,6887 kg/m <sup>3</sup> , gas (0°C, 101.325 kPa) 593,82 kg/m <sup>3</sup> , cair pada titik didih.
Titik kritis	134,66 °C 36,29 bar
Konduktivitas thermal	0,014343 W/m.K, gas (0°C, 101.325 kPa) 0,10329 W/m.K, cair pada titik didih



### 3.6. Skematik Pengolahan Data

Pengolahan data pengukuran digunakan untuk menghitung penurunan tekanan dengan menggunakan software Matlab 2009a, sedangkan properti properti fisika dan kimia yang berfungsi sebagai pendukung analisa data menggunakan software Refprop 2007.

Tahapan proses perhitungan dalam Matlab adalah sebagai berikut:

- a) Memasukan data-data dari hasil pengukuran. Dari pengurangan antara tekanan yang memasuki *test section* (Pinlet) dan tekanan yang keluar dari *test section* (Poutlet), kemudian dibagi dengan panjang pipa maka akan didapat nilai gradien penurunan tekanan pengukuran  $\left(\frac{dp}{dz}\right)$  sesuai dengan persamaan (2.18)
- b) Mencari panjang kondisi *subcooled* (kondisi dimana refrigeran mulai berubah fasa dari cair ke gas, yang terukur dari titik inlet) dengan menggunakan persamaan (2.2) dan kualitas massa uap pada keluaran *test section* dengan persamaan (2.6). Kemudian dicari kualitas massa uap pada tiap titik interval dengan persamaan (2.7)
- c) Mencari nilai fraksi uap, bilangan Reynold dan koefisien gesek dengan menggunakan persamaan (2.10) sampai (2.15).
- d) Mencari gradien penurunan tekanan akselerasi pada tiap titik dengan persamaan (2.19), kemudian disubstitusi ke persamaan (2.17) untuk mendapatkan nilai gradien penurunan tekanan gesek secara pengukuran.
- e) Dari tahap c) di atas maka bisa didapatkan nilai gradien penurunan tekanan gesek kalkulasi (perhitungan) dengan bilangan C menurut prediksi Chisolm menggunakan korelasi Lockhart-Martinelli pada persamaan (2.20) sampai (2.26) serta menggunakan korelasi Friedel pada persamaan (2.27) sampai (2.34).
- f) Dari nilai yang didapatkan pada tahap d) dan e) tersebut maka bisa dicari mean deviasi dan average deviasi berdasarkan persamaan (2.37) dan (2.38).

## BAB 4

### HASIL DAN ANALISA

Untuk menghitung besarnya nilai penurunan tekanan aliran dua fasa R-290 dan R-600a di kanal mini horizontal, maka dilakukan pengujian langsung pada alat uji. Data hasil pengujian akan digunakan sebagai data input dalam melakukan perhitungan.

Berikut ini merupakan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian langsung dengan beberapa kondisi pengujian.

#### 4.1. Pengolahan Data Penurunan Tekanan Gesekan dan Properti pada R-290

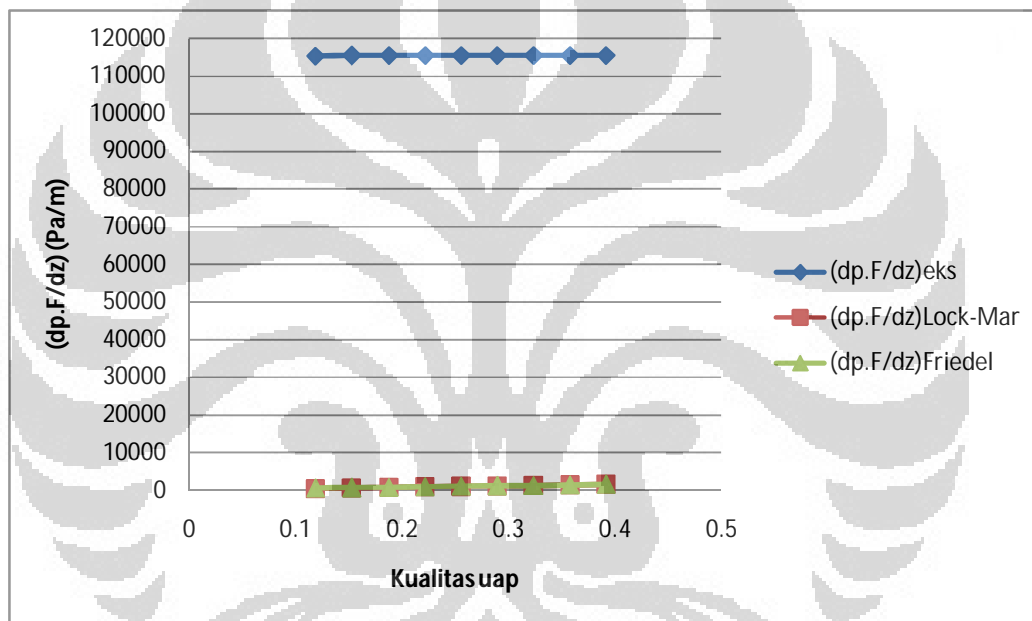
1. Kondisi fluks massa ( $G$ )  $51,470 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  dan fluks kalor ( $q/A$ )  $5 \text{ kWatt/m}^2$

Tabel 4.1 Kondisi Satu Pengujian R-290

Parameter	Nilai
Diameter dalam (Din)	3 (mm)
Diameter Luar (Dout)	5 (mm)
Konduktivitas Termal (k)	13,4 (w/m.K)
Panjang (L)	1000 (mm)
Laju Massa (w)	$3,638 \times 10^{-4}$ (kg/s)
Daya (q)	47,1 (Watt)
Tegangan Listrik (V)	39 (Volt)
Arus listrik (I)	1,21 (Ampere)
Tekanan Inlet (Pin)	417,2 (kPa)
Tekanan Outlet (Pout)	301,65 (kPa)
Temperatur masuk (Tin)	8,766 ( $^{\circ}\text{C}$ )

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Penurunan Tekanan R-290 pada Kondisi Satu

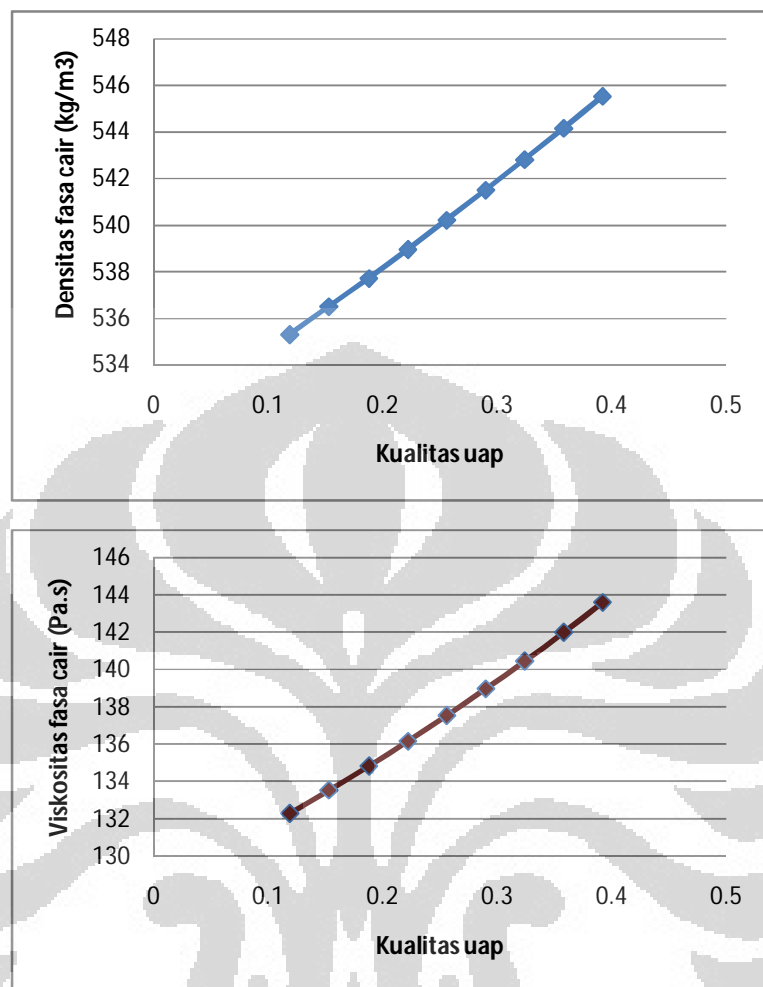
Posisi (m)	Fraksi uap	(dp.F/dz) eksperimen (Pa/m)	(dp.F/dz) Lockhart-Martinelli (Pa/m)	(dp.F/dz) Friedel (Pa/m)	dp.a/dz (Pa/m)
0.1	0.119	115359.7703	283.2871	555.8304	190.2297
0.2	0.153	115430.6802	616.9215	670.4544	119.3198
0.3	0.188	115452.2894	737.9046	786.2443	97.7106
0.4	0.222	115461.2682	860.3199	905.1298	88.7318
0.5	0.256	115464.9465	984.7121	1028.5748	85.0535
0.6	0.29	115465.7596	1111.5527	1157.8184	84.2404
0.7	0.324	115464.7394	1241.2795	1293.9975	85.2606
0.8	0.358	115462.3882	1374.3214	1438.2188	87.6118
0.9	0.392	115458.9690	1511.1145	1591.6066	91.0310



Gambar 4.1 Grafik Korelasi Penurunan Tekanan Gesek R-290 pada Kondisi Satu

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-290 pada Kondisi Satu

Posisi (m)	Fraksi uap	Densitas fasa cair (kg/m <sup>3</sup> )	Viskositas fasa cair (Pa.s)
0.1	0.119	535.3114	132.2756
0.2	0.153	536.5050	133.5218
0.3	0.188	537.7200	134.8095
0.4	0.222	538.9576	136.1414
0.5	0.256	540.2193	137.5203
0.6	0.29	541.5062	138.9497
0.7	0.324	542.8200	140.4331
0.8	0.358	544.1624	141.9746
0.9	0.392	545.5351	143.5786



Gambar 4.2 Grafik Korelasi Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-290 pada Kondisi Satu

2. Kondisi fluks massa ( $G$ )  $155,597 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  dan fluks kalor ( $q/A$ )  $5 \text{ kWatt/m}^2$

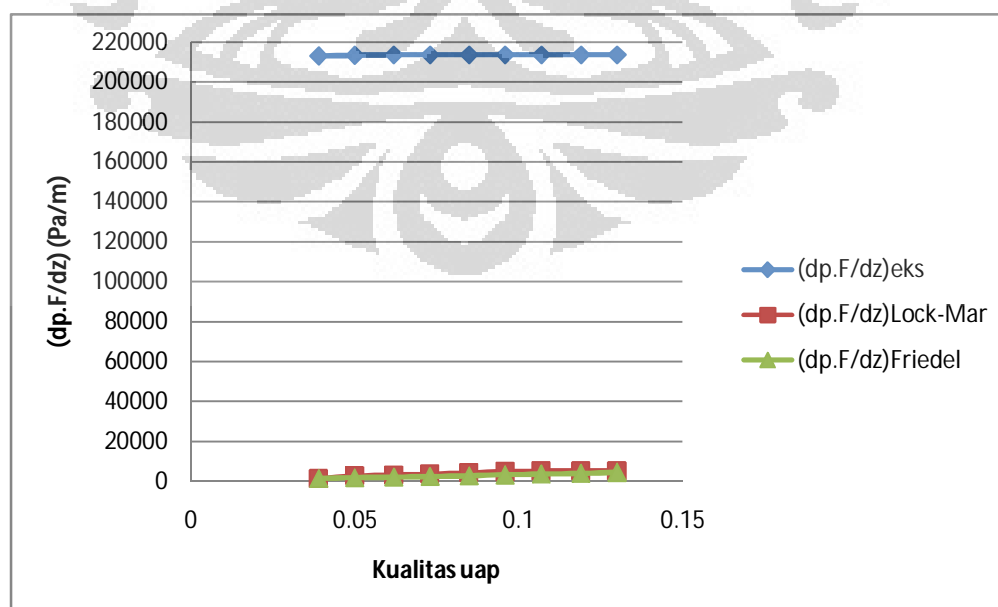
Tabel 4.4 Kondisi Dua Pengujian R-290

Parameter	Nilai
Diameter dalam (Din)	3 (mm)
Diameter Luar (Dout)	5 (mm)
Konduktivitas Termal (k)	13,4 (w/m.K)

Panjang (L)	1000 (mm)
Laju Massa (w)	$1,100 \times 10^{-3}$ (kg/s)
Daya (q)	47,1 (Watt)
Tegangan Listrik (V)	39 (Volt)
Arus listrik (I)	1,21 (Ampere)
Tekanan Inlet (Pin)	479,6 (kPa)
Tekanan Outlet (Pout)	265,6 (kPa)
Temperatur masuk (Tin)	4,428 ( $^{\circ}$ C)

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Penurunan Tekanan R-290 pada Kondisi Dua

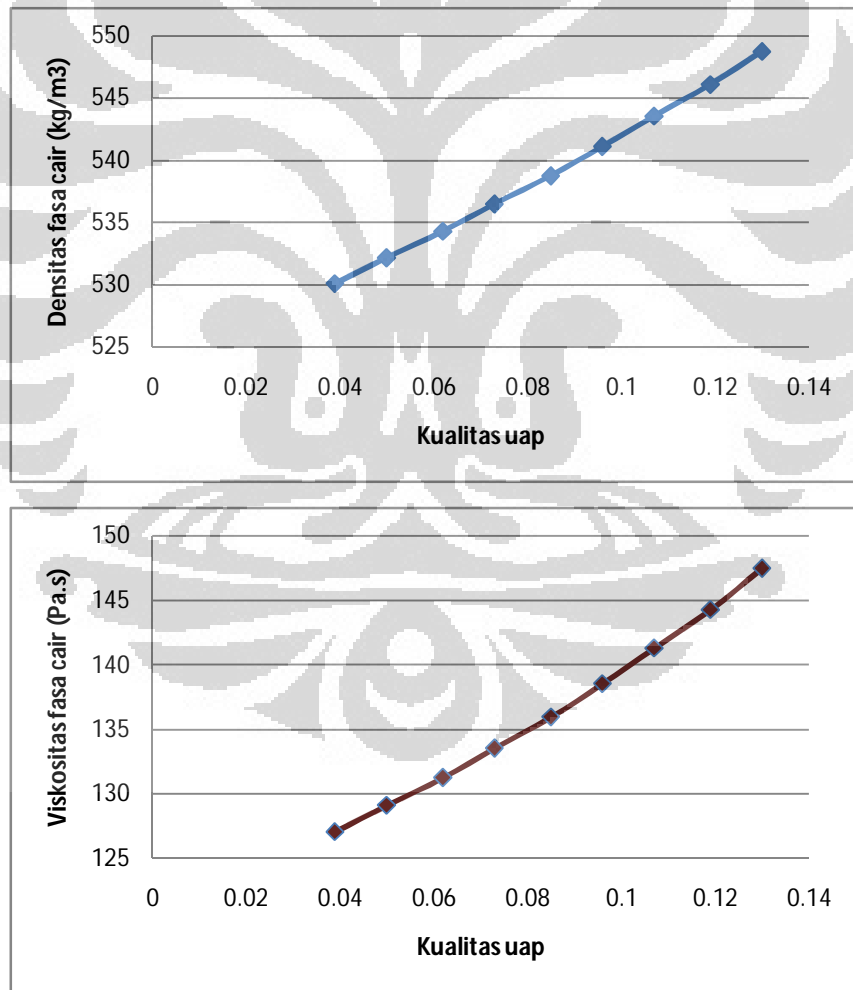
Posisi (m)	Fraksi uap	(dp.F/dz) eksperimen (Pa/m)	(dp.F/dz) Lockhart-Martinelli (Pa/m)	(dp.F/dz) Friedel (Pa/m)	dp.a/dz (Pa/m)
0.1	0.039	213016.9924	1198.5098	1534.2005	983.0076
0.2	0.05	213427.2783	2579.8450	1833.1211	572.7217
0.3	0.062	213561.9554	3073.5098	2137.8040	438.0446
0.4	0.073	213627.3411	3577.6684	2454.4748	372.6589
0.5	0.085	213664.6256	4096.8255	2788.6769	335.3744
0.6	0.096	213687.4603	4635.6527	3145.9949	312.5397
0.7	0.107	213701.6071	4985.8333	3532.5581	298.3929
0.8	0.119	213709.8439	5113.9888	3955.5078	290.1561
0.9	0.13	213713.5890	5201.0320	4423.5370	286.4110



Gambar 4.3 Grafik Korelasi Penurunan Tekanan Gesek R-290 pada Kondisi Dua

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-290 pada Kondisi Dua

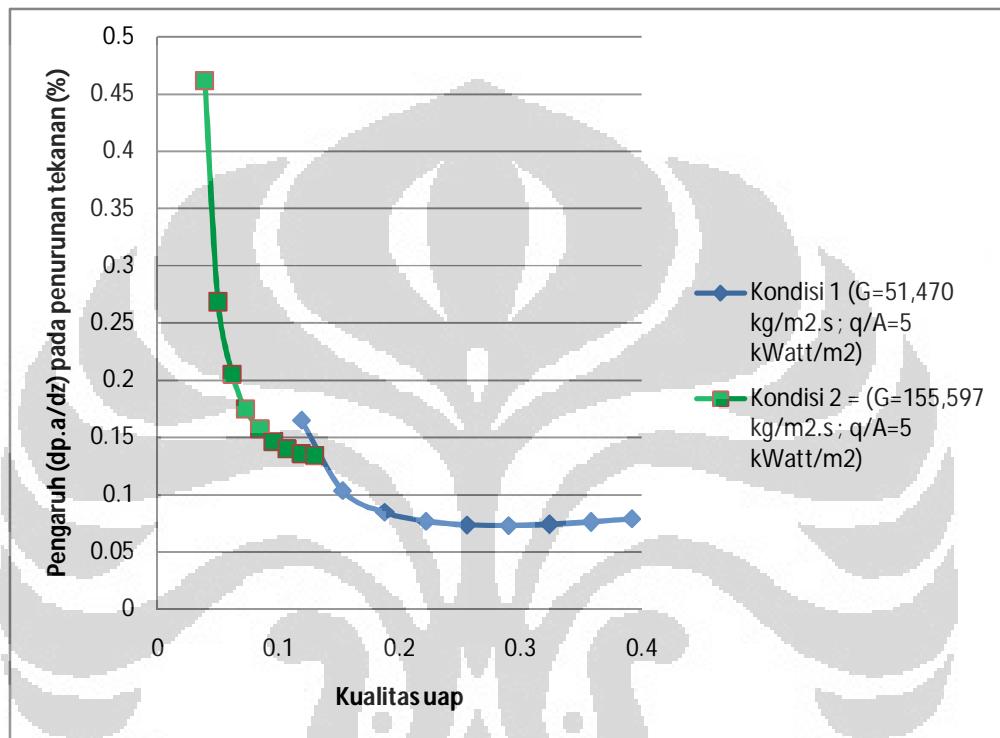
Posisi (m)	Fraksi uap	Densitas fasa cair (kg/m <sup>3</sup> )	Viskositas fasa cair (Pa.s)
0.1	0.039	530.1258	127.0665
0.2	0.05	532.1922	129.1031
0.3	0.062	534.3197	131.2538
0.4	0.073	536.5143	133.5317
0.5	0.085	538.7827	135.9519
0.6	0.096	541.1326	138.5324
0.7	0.107	543.5733	141.2948
0.8	0.119	546.1154	144.2652
0.9	0.13	548.7721	147.4757



Gambar 4.4 Grafik Korelasi Densitas dan Viskositas Cair R-290 pada Kondisi Dua

#### 4.2. Pengaruh Penurunan Tekanan Akibat Percepatan pada R-290

Selain dari penurunan tekanan akibat gesekan, pengaruh lainnya yang menyebabkan penurunan tekanan adalah faktor percepatan. Berikut dibawah persentase penurunan tekanan akibat percepatan dengan penurunan tekanan akibat gesekan dari eksperimen R-290.



Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Penurunan Tekanan Akibat Percepatan untuk R-290 pada Semua Kondisi Percobaan

Dilihat dari gambar diatas, persentase pengaruh penurunan tekanan akibat percepatan relatif kecil pada analisa penurunan tekanan aliran dua fasa R-290. Untuk kondisi 1 dan 2 yang nilai fluks kalornya sama, pengaruh penurunan tekanan akibat percepatan menjadi lebih berkurang seiring dengan naiknya kualitas uap pada aliran, dari kedua kondisi tersebut pengaruh paling kecil terjadi pada kondisi 1 karena nilai fluks massanya lebih kecil dari kondisi 2.

### 4.3. Pengolahan Data Penurunan Tekanan Gesekan dan Properti pada R-600a

1. Kondisi fluks massa ( $G$ )  $141,543 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  dan fluks kalor ( $q/A$ )  $4 \text{ kWatt/m}^2$

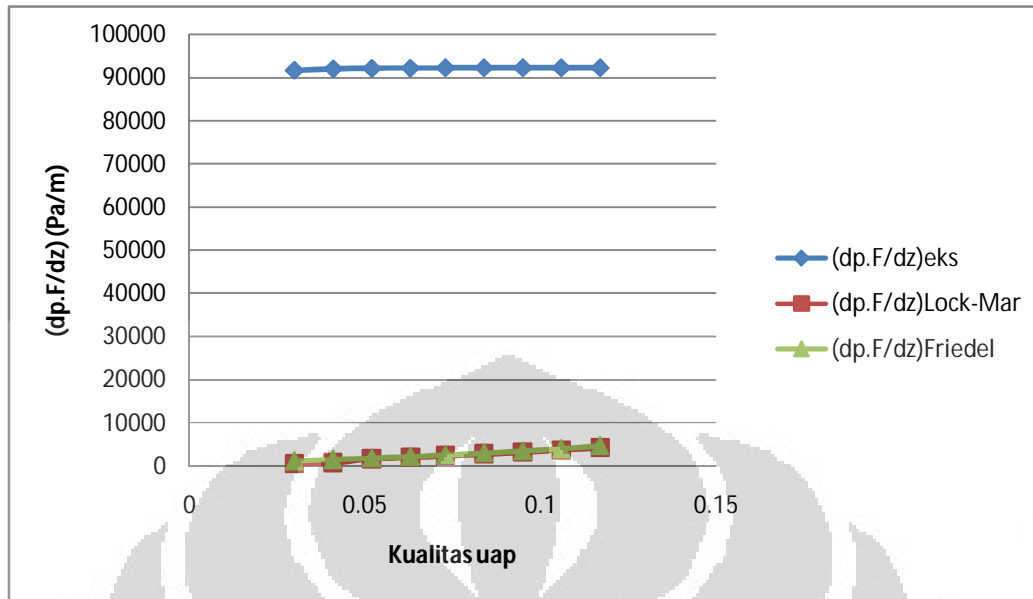
Tabel 4.7 Kondisi Satu Pengujian R-600a

Parameter	Nilai
Diameter dalam (Din)	3 (mm)
Diameter Luar (Dout)	5 (mm)
Konduktivitas Termal (k)	13,4 (w/m.K)
Panjang (L)	1000 (mm)
Laju Massa (w)	$1 \times 10^{-3}$ (kg/s)
Daya (q)	37,7 (Watt)
Tegangan Listrik (V)	24 (Volt)
Arus listrik (I)	1,57 (Ampere)
Tekanan Inlet (Pin)	190,3 (kPa)
Tekanan Outlet (Pout)	97,7 (kPa)
Temperatur masuk (Tin)	8,463 ( $^{\circ}\text{C}$ )

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Penurunan Tekanan R-600a pada Kondisi Satu

Posisi (m)	Fraksi uap	(dp.F/dz) eksperimen (Pa/m)	(dp.F/dz) Lockhart-Martinelli (Pa/m)	(dp.F/dz) Friedel (Pa/m)	dp.a/dz (Pa/m)
0.1	0.03	91648.0232	477.4703	1202.3528	951.9768
0.2	0.041	92021.5826	762.0503	1518.5410	578.4174
0.3	0.052	92146.0384	1657.1491	1848.9481	453.9616
0.4	0.063	92207.2095	2001.1260	2203.0159	392.7905
0.5	0.073	92242.1580	2370.0578	2589.5981	357.8420
0.6	0.084	92263.1133	2769.5087	3018.2911	336.8867
0.7	0.095	92275.1617	3206.1684	3500.4412	324.8383
0.8	0.106	92280.6510	3688.3992	4050.2347	319.3490
0.9	0.117	92280.6324	4226.9852	4686.1505	319.3676

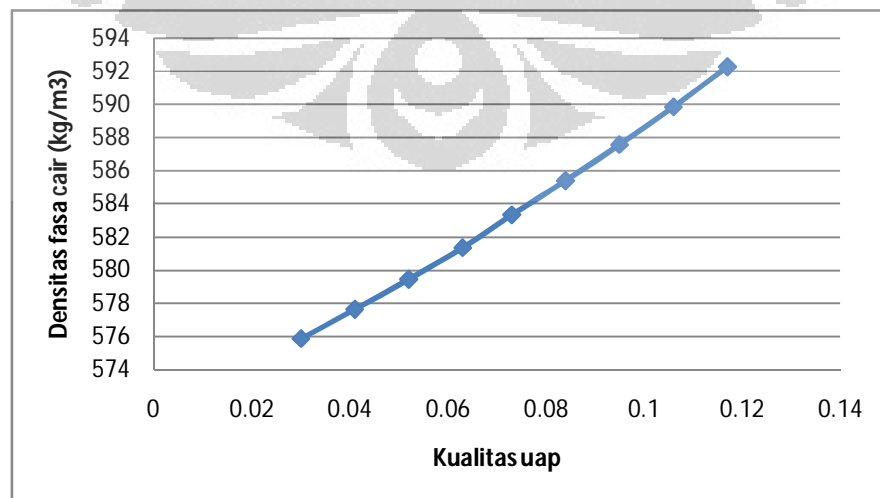


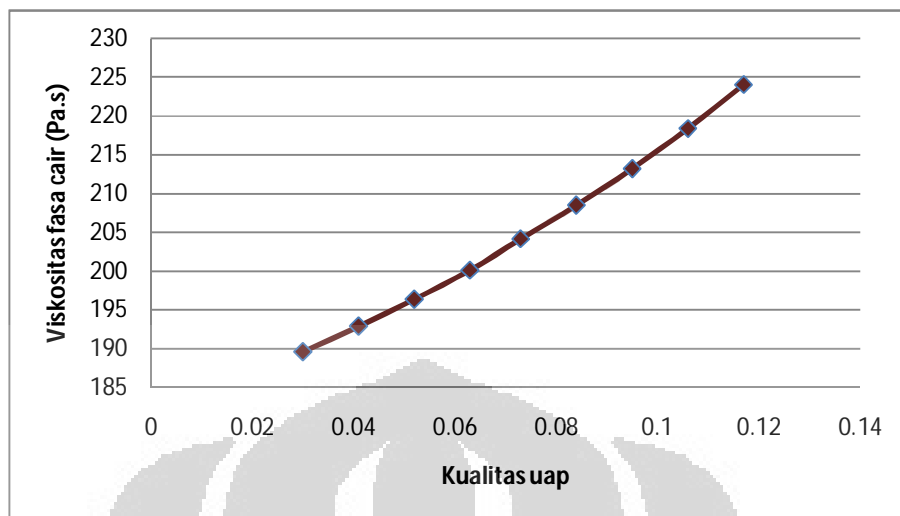


4.6 Grafik Korelasi Penurunan Tekanan Gesek R-600a pada Kondisi Satu

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-600a pada Kondisi Satu

Posisi (m)	Fraksi uap	Densitas fasa cair (kg/m <sup>3</sup> )	Viskositas fasa cair (Pa.s)
0.1	0.03	575.8493	189.5747
0.2	0.041	577.6132	192.8510
0.3	0.052	579.4426	196.3464
0.4	0.063	581.3441	200.0893
0.5	0.073	583.3259	204.1138
0.6	0.084	585.3973	208.4614
0.7	0.095	587.5698	213.1828
0.8	0.106	589.8570	218.3415
0.9	0.117	592.2760	224.0179





Gambar 4.7 Grafik Korelasi Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-600a pada Kondisi Satu

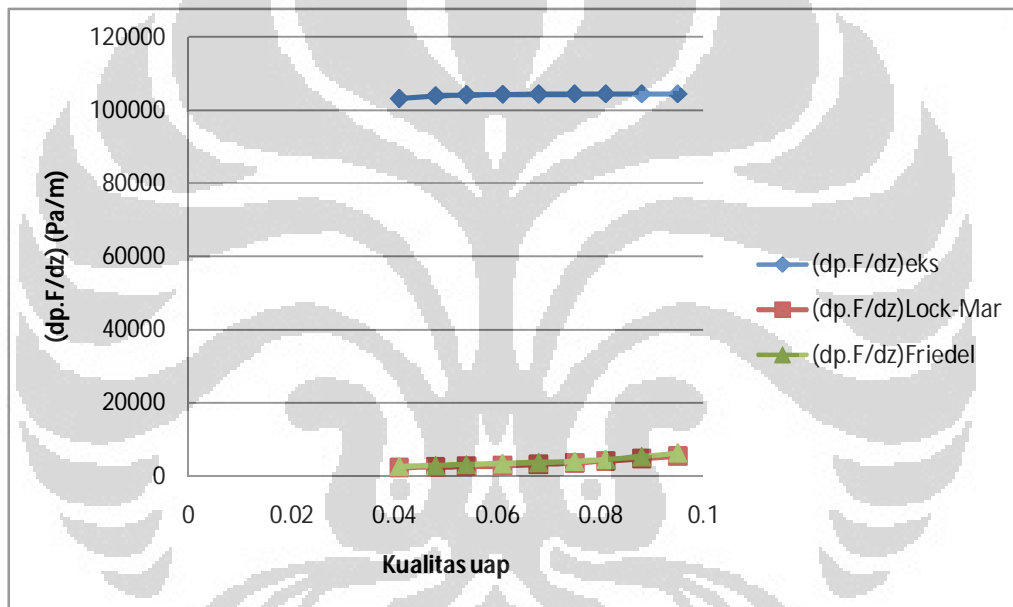
2. Kondisi fluks massa ( $G$ )  $169,851 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  dan fluks kalor ( $q/A$ )  $3 \text{ kWatt/m}^2$

Tabel 4.10 Kondisi Dua Pengujian R-600a

Parameter	Nilai
Diameter dalam (Din)	3 (mm)
Diameter Luar (Dout)	5 (mm)
Konduktivitas Termal (k)	13,4 (w/m.K)
Panjang (L)	1000 (mm)
Laju Massa (w)	$1,2 \times 10^{-3}$ (kg/s)
Daya (q)	28,27 (Watt)
Tegangan Listrik (V)	20 (Volt)
Arus listrik (I)	1,4 (Ampere)
Tekanan Inlet (Pin)	174,8 (kPa)
Tekanan Outlet (Pout)	70 (kPa)
Temperatur masuk (Tin)	8,273 ( $^{\circ}\text{C}$ )

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan Penurunan Tekanan R-600a pada Kondisi Dua

Posisi (m)	Fraksi uap	(dp.F/dz) eksperimen (Pa/m)	(dp.F/dz) Lockhart-Martinelli (Pa/m)	(dp.F/dz) Friedel (Pa/m)	dp.a/dz (Pa/m)
0.1	0.041	103053.5020	2279.0395	2574.2380	1746.4980
0.2	0.048	103817.4590	2441.1706	2844.3367	982.5410
0.3	0.054	104068.8976	2572.8306	3111.8616	731.1024
0.4	0.061	104191.3986	2738.4847	3379.8365	608.6014
0.5	0.068	104261.4640	3137.9402	3651.1343	538.5360
0.6	0.075	104304.3345	3586.7689	3928.7347	495.6655
0.7	0.081	104330.4927	4098.2886	4537.8319	469.5073
0.8	0.088	104344.7222	4691.1564	5307.0304	455.2778
0.9	0.095	104349.0148	5392.5470	6263.6822	450.9852

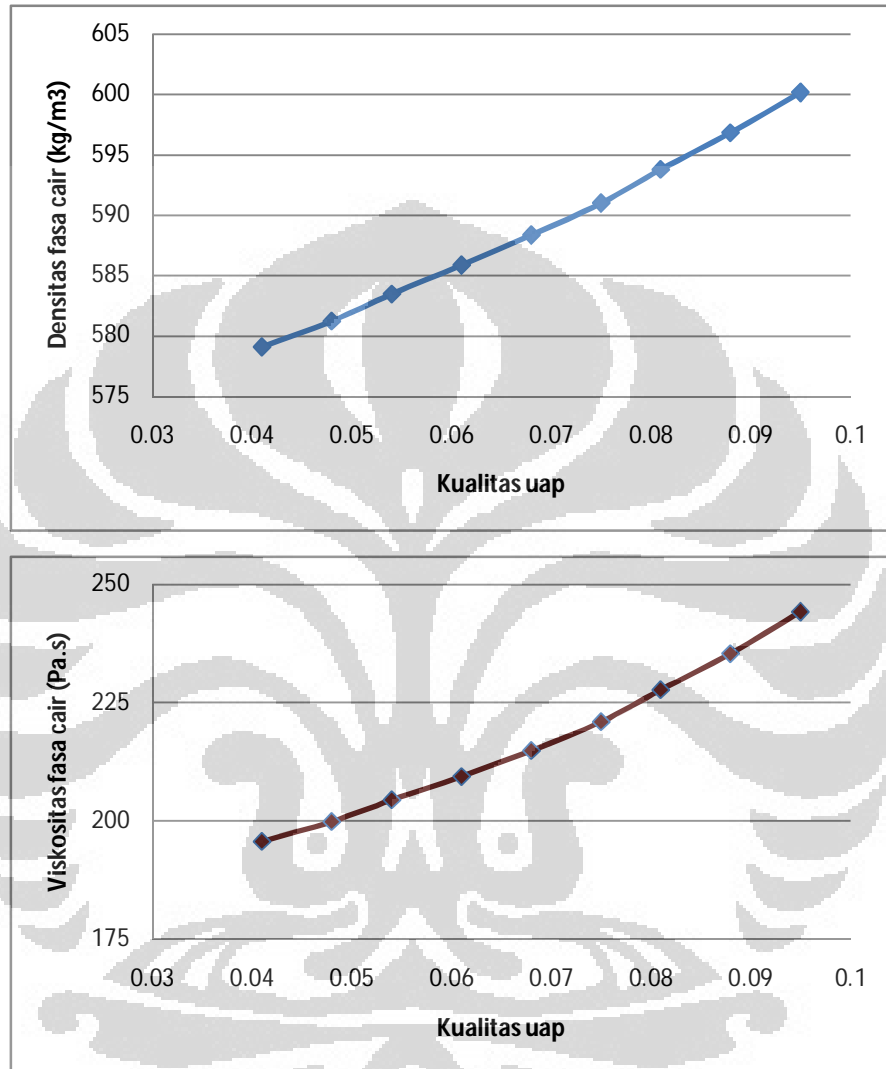


Gambar 4.8 Grafik Korelasi Penurunan Tekanan Gesek R-600a pada Kondisi Dua

Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-600a pada Kondisi Dua

Posisi (m)	Fraksi uap	Densitas fasa cair (kg/m <sup>3</sup> )	Viskositas fasa cair (Pa.s)
0.1	0.041	579.0816	195.6485
0.2	0.048	581.2228	199.8470
0.3	0.054	583.4661	204.4034
0.4	0.061	585.8252	209.3779
0.5	0.068	588.3170	214.8466
0.6	0.075	590.9627	220.9074
0.7	0.081	593.7891	227.6893

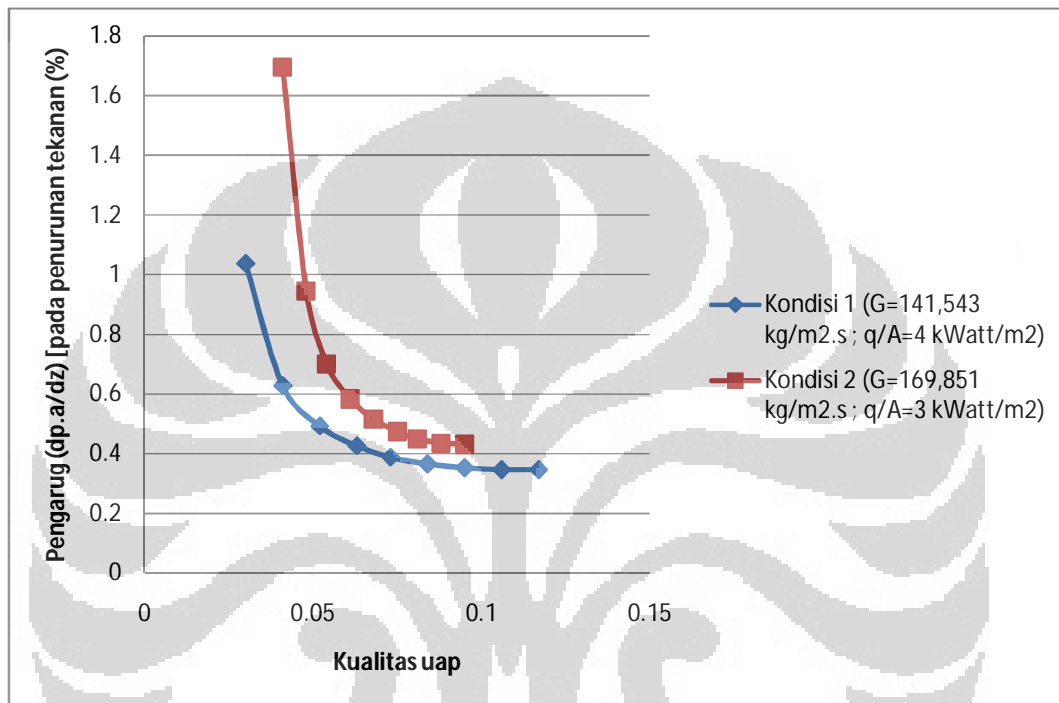
0.8	0.088	596.8311	235.3669
0.9	0.095	600.1357	244.1837



Gambar 4.9 Grafik Korelasi Densitas dan Viskositas Fasa Cair R-600a pada Kondisi Dua

#### 4.4. Pengaruh Penurunan Tekanan Akibat Percepatan pada R-600a

Selain dari penurunan tekanan akibat gesekan, pengaruh lainnya yang menyebabkan penurunan tekanan adalah faktor percepatan. Berikut dibawah persentase penurunan tekanan akibat percepatan dengan penurunan tekanan akibat gesekan dari eksperimen R600a.



Gambar 4.10 Grafik Pengaruh Penurunan Tekanan Akibat Percepatan untuk R-600a pada Semua Kondisi Percobaan

Dilihat dari gambar diatas, persentase pengaruh penurunan tekanan akibat percepatan relatif kecil pada analisa penurunan tekanan aliran dua fasa R-600a. Pengaruh penurunan tekanan akibat percepatan menjadi lebih berkurang seiring dengan naiknya kualitas uap pada aliran. Pengaruh penurunan tekanan akibat percepatan terkecil terjadi pada kondisi 1 yang mana kondisi 1 mempunyai nilai fluks kalor lebih besar dan fluks massa yang lebih kecil dibandingkan kondisi 2. Jadi pengaruh paling dominan terhadap besarnya penurunan tekanan akibat percepatan untuk R-600a adalah parameter fluks massa, semakin kecil fluks massa maka semakin kecil pula pengaruh penurunan tekanan akibat percepatan walaupun fluks kalornya diperbesar.

#### 4.5. Analisa Penurunan Tekanan Akibat Gesekan pada R-290

Analisa penurunan tekanan akibat gesekan pada R-290 dilakukan ketika kondisi fluks kalor yang sama dan fluks massa yang berbeda, yaitu kondisi satu dengan kondisi dua. Dengan acuan tersebut, maka dapat ditentukan pengaruh fluks massa pada pengujian dengan fluks kalor yang sama serta pengaruhnya terhadap penurunan tekanan akibat gesekan. Hal lain untuk menganalisa penurunan tekanan akibat gesekan adalah dengan melihat properti densitas dan viskositas fasa cair dari R-290

Penentuan nilai *mean* deviasi dari berbagai kondisi pengujian R-290 dilihat dari perbandingan penurunan tekanan akibat gesekan hasil kalkulasi (korelasi Lockhart-Martinelli dan Friedel) dengan hasil pengukuran (eksperimen), dapat dilihat dari gambar (4.1) dan (4.3).

Tabel 4.13 *Mean* Deviasi Penurunan Tekanan Akibat Gesekan pada R-290

Refrigeran Propana	Kondisi 1	Kondisi 2
Korelasi Lockhart-Martinelli dengan eksperimen	99,161 %	98,208 %
Korelasi Friedel dengan eksperimen	99,093 %	98,658 %

Dengan melihat perbandingan *mean* deviasi yang cukup besar dari kondisi 1 dan kondisi 2, bahwa korelasi Lockhart-Martinelli dan Friedel hasilnya kurang memuaskan pada eksperimen di kanal mini. Hal tersebut disebabkan eksperimen Lockhart-Martinelli dan Friedel dilakukan pada kanal konvensional.

Parameter lain untuk analisa penurunan tekanan akibat gesekan adalah pengaruh densitas dan viskositas. Dengan meningkatnya kualitas uap, maka fasa cair dari R-290 semakin berkurang dan membuat nilai viskositas fasa cairnya semakin tinggi, begitu pula dengan densitas fasa cairnya yang semakin tinggi. Fenomena tersebut dapat dilihat pada gambar (4.2) dan (4.4). Dengan mengacu pada persamaan (2.20) dan (2.27), ketika nilai kualitas uap rendah, pengaruh densitas fasa cair yang paling dominan terhadap penurunan tekanan akibat

gesekan, sedangkan ketika nilai kualitas uap tinggi, pengaruh viskositas fasa cair yang paling dominan terhadap penurunan tekanan akibat gesekan.

#### 4.6. Analisa Penurunan Tekanan Akibat Gesekan pada R-600a

Analisa penurunan tekanan akibat gesekan pada R-600a dilakukan ketika kondisi fluks massa yang berbeda serta fluks kalor berbeda pula tetapi dengan kondisi fluks massa semakin besar dan fluks kalor yang semakin kecil. Dengan acuan tersebut, maka dapat ditentukan pengaruh fluks massa dan fluks kalor yang nilainya berbanding terbalik serta pengaruhnya terhadap penurunan tekanan akibat gesekan. Hal lain untuk menganalisa penurunan tekanan akibat gesekan adalah dengan melihat properti densitas dan viskositas fasa cair dari R-600a.

Penentuan nilai *mean* deviasi dari berbagai kondisi pengujian R-600a dilihat dari perbandingan penurunan tekanan akibat gesekan hasil kalkulasi (korelasi Lockhart-Martinelli dan Friedel) dengan hasil pengukuran (eksperimen), dapat dilihat dari gambar (4.6) dan (4.8).

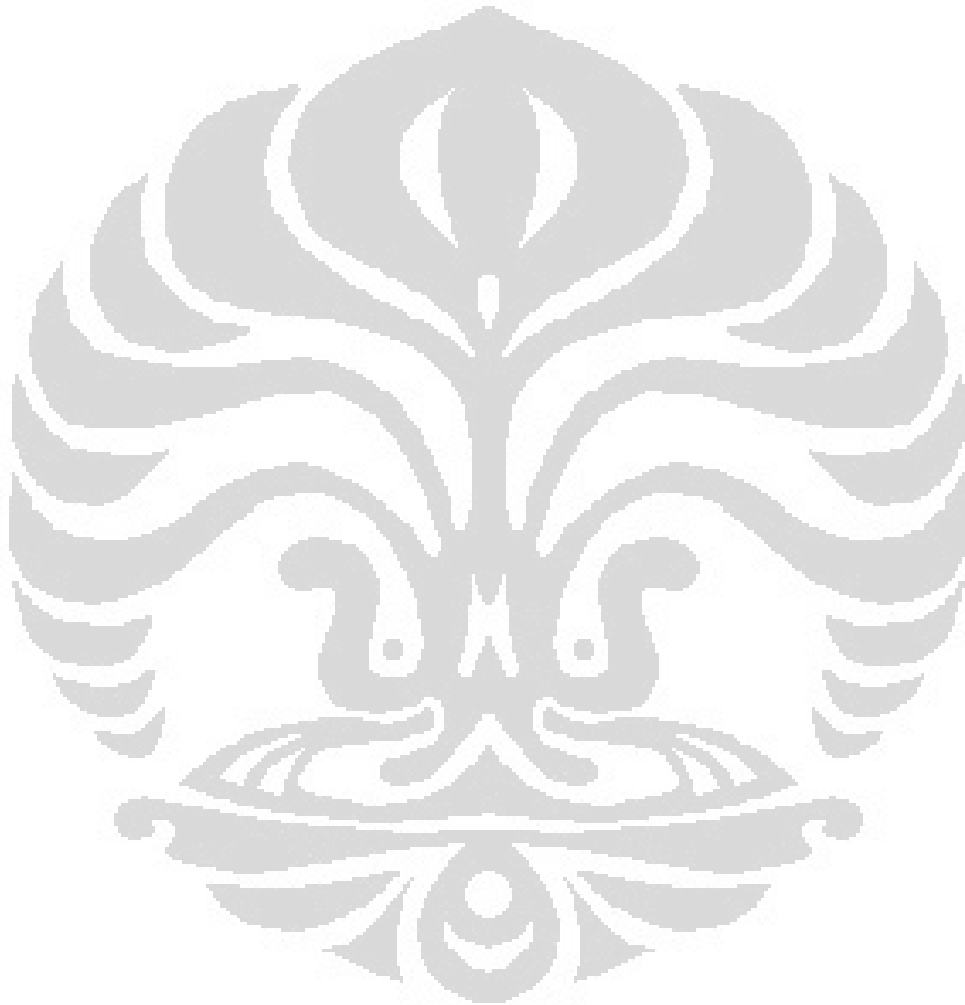
Tabel 4.14 *Mean* Deviasi Penurunan Tekanan Akibat Gesekan pada R-600a

Refrigeran Isobutana	Kondisi 1	Kondisi 2
Korelasi Lockhart-Martinelli dengan eksperimen	97,451 %	96,700 %
Korelasi Friedel dengan eksperimen	97,034 %	96,202 %

Dengan melihat perbandingan *mean* deviasi yang cukup besar dari kondisi 1 dan kondisi 2, bahwa korelasi Lockhart-Martinelli dan Friedel hasilnya kurang memuaskan pada eksperimen di kanal mini. Hal tersebut disebabkan eksperimen Lockhart-Martinelli dan Friedel dilakukan pada kanal konvensional.

Hal kedua yang menjadi bahan analisa penurunan tekanan akibat gesekan adalah pengaruh densitas dan viskositas. Dengan meningkatnya kualitas uap, maka fasa cair dari R-600a semakin berkurang dan membuat nilai viskositas fasa cairnya semakin tinggi, begitu pula dengan densitas fasa cairnya yang semakin tinggi. Fenomena tersebut dapat dilihat pada gambar (4.7) dan (4.9). Dengan

mengacu pada persamaan (2.20) dan (2.27), ketika nilai kualitas uap rendah, pengaruh densitas fasa cair yang paling dominan terhadap penurunan tekanan akibat gesekan, sedangkan ketika nilai kualitas uap tinggi, pengaruh viskositas fasa cair yang paling dominan terhadap penurunan tekanan akibat gesekan.





## BAB 5

### KESIMPULAN

Penelitian aliran evaporasi dua fasa yang dilakukan menggunakan refrigeran propana (R-290) dengan fluks kalor  $5 \text{ kWatt/m}^2$  serta fluks massa  $51,470 \text{ kg/m}^2.\text{s}$  dan  $155,597 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ . Kemudian menggunakan refrigeran isobutana (R-600a) dengan variasi fluks kalor  $3 \text{ kWatt/m}^2$  dan  $4 \text{ kWatt/m}^2$  serta fluks massa  $141,543 \text{ kg/m}^2.\text{s}$  dan  $169,851 \text{ kg/m}^2.\text{s}$ . Aspek pengujian lainnya adalah menggunakan pipa kanal mini horizontal berdiameter dalam 3 mm, diameter luar 5 mm dan panjang 1 m. Berdasarkan data yang diperoleh dari pengujian dan dianalisa dengan menggunakan *separated flow model*, maka dapat ditarik kesimpulan yaitu sebagai berikut:

1. Penggunaan korelasi Lockhart-Martinelli (1944) dengan konstanta Chisolm (1968) dan korelasi Friedel (1979) masih belum mencapai hasil yang memuaskan untuk aliran evaporasi dua fasa pada kanal mini.
2. Pengaruh penurunan tekanan akibat percepatan relatif kecil untuk analisa aliran dua fasa pada kanal mini.
3. Pengaruh properti densitas dan viskositas sangat penting pada analisa aliran dua fasa, karena dengan naiknya nilai kualitas uap refrigeran maka nilai densitas dan viskositas fasa cair semakin besar dan mempengaruhi penurunan tekanan akibat gesekan.

## DAFTAR PUSTAKA

Munson, B.R., Young, B.F., Okiishi, T.H. (2002). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (4th ed.). United States of America: John Wiley & Sons.

G. Collier, John dan R. Thome, John. (1994). *Convective Boiling and Condensation* (3rd ed.). United Kingdom: Oxford University Press.

Incropera, F.P., DeWitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6th ed.). United States of America: John Wiley & Sons.

Holman, J.P. (1986). *Heat Transfer* (6th ed.). United States of America: McGraw-Hill Book Company.

Kandiklar, S., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King, M. R. (2006). *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*. India: Elsevier.

Kwang-Il Choi, A.S. Pamitran, Jong-Taek Oh, Kiyoshi Saito, "Pressure Drop and Heat Transfer during Two-phase Flow Vaporization of Propane in Horizontal Smooth Minichannels", *International Journal of Refrigeration*, 2009;32(5);pp.837-845.

Lockhart, R. W., Martinelli, R. C. (1949). *Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes*. Chem. Eng. Prog. 45, 39-48.

Steiner, D. (1993). *Heat Transfer to Boiling Saturated Liquids*. Düsseldorf, Germany.

## LAMPIRAN

### Kode Program Matlab

---

```
clearall
clc

fluid='propane' atau 'isobutan';
Di=0.003; % meter
Pdaya=input('Daya (Watt)= '); % Watt
W=input('Mass flow (kg/s)= '); % kg/s
G=W/(0.25*pi*(Di^2)); % kg/m2.s
Tin=input('Temperature inlet (K)= '); % Kelvin
Pin=input('Tekanan inlet (kPa)= '); % kPa
Pout=input('Tekanan outlet (kPa)= '); % kPa
L=1; % meter
pDropexp=1000*((Pin-Pout)/L);
fprintf('\n');
fprintf('Gradien penurunan tekanan = %.3g Pa/m\n',pDropexp);

%properti di tiap titik percobaan
z=0.1:0.1:0.9;
Pz=1:9;
for n=1:9;
Pz(n)=(z(n)*(Pout-Pin))+Pin;

Tsatt(n)=refpropm('T','P',Pz(n),'Q',0,fluid);

MiuF(n)=refpropm('V','P',Pz(n),'Q',0,fluid);
MiuG(n)=refpropm('V','P',Pz(n),'Q',1,fluid);
kF(n)=refpropm('L','P',Pz(n),'Q',0,fluid);
Cpf(n)=refpropm('C','P',Pz(n),'Q',0,fluid);

iFttk(n)=refpropm('H','P',Pz(n),'Q', 0,fluid);
iGttk(n)=refpropm('H','P',Pz(n),'Q', 1,fluid);
iFGttk(n)=iGttk(n)-iFttk(n);
rhof(n)=refpropm('D','P',Pz(n),'Q', 0,fluid);
rhog(n)=refpropm('D','P',Pz(n),'Q', 1,fluid);

PrndltF(n)=(MiuF(n)*Cpf(n))/kF(n);

end

%panjang subcooled
iFin=refpropm('H','T',Tin,'Q',0,fluid);
iF=refpropm('H','P', Pin,'Q', 0,fluid);
iG=refpropm('H','P', Pin,'Q', 1,fluid);
iFG=iG-iF;

iDelta=Pdaya/W;
Zsc=L*(iF-iFin)/iDelta;
xKel=(iDelta+iFin-iF)/iFG;
```

```

if xKel > 1;
xOut=1
elseif xKel<0
xOut=0
else xOut=xKel
end

z=0.1:0.1:0.9;
xZ=1:9;
for n=1:9;
if z(n)<Zsc;
xZ(n)=-1;
fprintf(' Pada z= %.3f m, masih kondisi subcooled.\n',z(n))
else
xZ(n)=xOut*((z(n)-Zsc)/(L-Zsc));

end
ReF(n)=G*Di*(1-xZ(n))/MiuF(n);
ReG(n)=G*Di*xZ(n)/MiuG(n);
ReFO(n)=G*Di/MiuF(n);
ReGO(n)=G*Di/MiuG(n);

Miurata(n)=(xZ(n)*MiuG(n))+(1-xZ(n))*MiuF(n);
ReTP(n)=G*Di/Miurata(n);

cHi(n)=Chisolm(ReF(n),ReG(n));

fF(n)=Friction(ReF(n));
fG(n)=Friction(ReG(n));
fFO(n)=Friction(ReFO(n));
fGO(n)=Friction(ReGO(n));

sTension(n)=refpropm('I', 'P',Pz(n),'Q',xZ(n),fluid);
vF(n)=1/refpropm('D','P',Pz(n),'Q',0,fluid);
vG(n)=1/refpropm('D','P',Pz(n),'Q',1,fluid);
rhodata(n)=1/(vF(n)+(xZ(n)*(vG(n)-vF(n))));

xMarti(n)=((fF(n)/fG(n))*((1-xZ(n))/xZ(n))^2*(vF(n)/vG(n)))^0.5;

MFf(n)=1+(cHi(n)/xMarti(n))+(1/xMarti(n)^2);
MFg(n)=1+(cHi(n)*xMarti(n))+xMarti(n)^2;

Fr(n)=G^2/(9.81*Di*(rhodata(n)^2));
We(n)=((G^2)*Di)/(rhodata(n)*sTension(n));

Asatu(n)=((1-
xZ(n))^2)+((xZ(n)^2)*(rhof(n)*fGO(n))/(rhog(n)*fFO(n)));
Adua(n)=(xZ(n)^0.78)*((1-xZ(n))^0.224);
Atiga(n)=((rhof(n)/rhog(n))^0.91)*((MiuG(n)/MiuF(n))^0.19)*((1-
(MiuG(n)/MiuF(n)))^0.7);

MFfo(n)=Asatu(n)+((3.24*Adua(n)*Atiga(n))/((Fr(n)^0.045)*(We(n)^0.
035)));
end

```

```

for n=1:9
if z(1)==Zsc;
void(n)=0;
else
void(n)=(xZ(n)/rhog(n))/(((1+(0.12*(1-xZ(n))))...
*(xZ(n)/rhog(n))+(1-xZ(n))/rhof(n)))...
+1.18*(1-xZ(n))/(G*rhof(n)^0.5)*...
(9.81*sTension(n)*((rhof(n)-rhog(n))))^0.25);
end
end

pDropATP=1:9;
for n=1:9;
pDropATP(n)=(G^2)*(((xZ(n)^2/rhog(n)/void(n))+((1-
xZ(n))^2/(1-void(n))/rhof(n))))/z(n);

pDropFTPcal(n)=(2*fF(n)*(G^2)*((1-
xZ(n))^2*(vF(n)))/Di)*MFf(n);
pDropFTPcalFr(n)=(2*fFO(n)*(G^2)*vF(n))/Di)*MFfO(n);

pDropFTPexp(n)=(1000*(Pin-Pout)/L)-pDropATP(n);

MFTPexp(n)=pDropFTPexp(n)/(2*fF(n)*(G^2)*((1-xZ(n))^2)*vF(n)/Di);
CExp(n)=(MFTPexp(n)-1-(1/(xMarti(n)^2)))*xMarti(n);

% MFTPcal = MFf
end

% deviasi
for n=1:9
mean(n)=abs((pDropFTPcal(n)-pDropFTPexp(n))/pDropFTPexp(n)*100);
meanAve(n)=(pDropFTPcal(n)-pDropFTPexp(n))/pDropFTPexp(n)*100;
meanFr(n)=abs((pDropFTPcalFr(n)-
pDropFTPexp(n))/pDropFTPexp(n)*100);
meanAveFr(n)=(pDropFTPcalFr(n)-pDropFTPexp(n))/pDropFTPexp(n)*100;

end
meanDev=sum(mean)/n;
meanDevAve=sum(meanAve)/n;
meanDevFr=sum(meanFr)/n;
meanDevAveFr=sum(meanAveFr)/n;

for n=1:9
meanC(n)=abs((cHi(n)-CExp(n))/CExp(n)*100);
meanAveC(n)=(cHi(n)-CExp(n))/CExp(n)*100;
end
meanDevC=sum(meanC)/n;
meanDevAveC=sum(meanAveC)/n;

% output

```

LAMPIRAN  
Kode Program Matlab  
(Lanjutan)

```
fprintf('\nposisi      x      dp/dz A\t      dp/dz F exp      dp/dz  
F cal\n');  
for n=1:9  
    fprintf('%.3fm\t %.3f\t %.3f Pa \t %.3f Pa\t %.3f  
Pa\n',z(n),xZ(n),pDropATP(n),pDropFTPexp(n),pDropFTPcal(n));  
end  
  
fprintf('\nNilai Mean Deviasi = %.3f %%\n',meanDev);  
fprintf('\nNilai Average Deviasi = %.3f %%\n',meanDevAve);  
  
=====  
function value=Friction(re)  
% mencari nilai friction dari Reynold's number  
% friction(re)  
if re < 2300  
    value=16/re;  
elseif re > 3000  
    value=0.079/(re^0.25);  
else  
    value=((re-2300)/700)*0.0037+0.0069;  
end  
  
=====  
function value=Chisolm(reF,reG)  
  
if reF > 3000 && reG > 3000  
    value=20;  
elseif reF < 2300 && reG > 3000  
    value=12;  
elseif reF > 3000 && reG < 2300  
    value=10;  
elseif reF < 2300 && reG < 2300  
    value=5;  
elseif (reF > 3000) && (2300 <= reG <= 3000)  
    value=((reG-2300)/700)*10+10;  
elseif (2300 <= reF <= 3000) && (reG > 3000)  
    value=((reF-2300)/700)*8+12;  
elseif (reF < 2300) && (2300 <= reG <= 3000)  
    value=((reG-2300)/700)*7+5;  
elseif (2300 <= reF <= 3000) && (reG < 2300)  
    value=((reF-2300)/700)*5+5;  
else  
    value=((reF-2300)/700)*7.5+((reG-2300)/700)*7.5+5;  
end  
  
=====  
function value=CheckNum(num)  
  
% untuk mengecek nilai error karena membagi dengan nol  
if isnan(num)||isinf(num)  
    value=0;  
else  
    value=num;  
end
```