



**UNIVERSITAS INDONESIA**

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

**SKRIPSI**

**NICO MUHAMMAD AFRIANDI  
0906605012**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JANUARI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

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

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik**

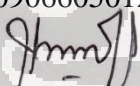
**NICO MUHAMMAD AFRIANDI  
0906605012**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JANUARI 2012**

**Universitas Indonesia**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Nico Muhammad Afriandi  
NPM : 0906605012  
Tanda Tangan :   
Tanggal : 9 Januari 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

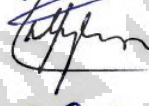
Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Nico Muhammad Afriandi  
NPM : 0906 605 012  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Penurunan Tekanan pada Evaporasi Aliran Dua Fasa di Kanal Mini Horizontal untuk R-290 dan R-600a dengan *Homogeneous* Model

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Departemen 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 Nandy Setiadi Djaja Putra (  )

Ditetapkan di : Fakultas Teknik Universitas Indonesia - Depok

Tanggal : 9 Januari 2012

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

---

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

Nama : Nico Muhammad Afriandi  
NPM : 0906 605 012  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

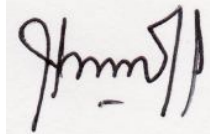
**Penurunan Tekanan pada Evaporasi Aliran Dua Fasa di Kanal Mini Horizontal untuk R-290 dan R-600a dengan *Homogeneous Model***

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 : Januari 2012

Yang menyatakan



( Nico Muhammad Afriandi )

**Universitas Indonesia**

## KATA PENGANTAR

Syukur *Alhamdulillah* saya panjatkan kepada ALLAH SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Jurusan Teknik Mesin di Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dalam menyelesaikan penulisan skripsi ini saya tentu mendapat banyak kesulitan, sehingga pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu penyelesaian skripsi ini dari awal hingga akhir, yaitu :

1. Dr. Agus Sunjarianto Pamitran, ST. M.Eng sebagai Dosen Pembimbing yang selalu menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Para Dosen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah memberikan ilmu pengetahuannya kepada saya yang sangat membantu dalam penulisan skripsi ini.
3. Ibu, Bapak, Adikku Rizky Febriana dan Nur Ramadhan, yang tersayang Ida Fitriana serta keluarga saya yang telah memberikan doa dan dukungan moral maupun materil.
4. Sahabat-sahabat saya, Prasetyo Nugroho, Febrianto Adhi, Fikri Gandara yang sudah bersama-sama untuk meraih mimpi serta teman-teman ekstensi jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia angkatan tahun 2009 yang selalu memberikan semangat kepada saya untuk menyelesaikan skripsi ini.
5. Pihak-pihak yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini.

Akhir kata, semoga Tuhan Yang Maha Esa membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu Pengetahuan.

Depok, Januari 2012

Penulis

**Universitas Indonesia**

## ABSTRAK

Nama : Nico Muhammad Afriandi  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : Penurunan Tekanan pada Evaporasi Aliran Dua Fasa  
di Kanal Mini Horizontal untuk R-290 dan R-600a dengan  
*Homogeneous* Model

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan karakteristik penurunan tekanan pada aliran evaporasi dua fasa dengan refrigeran propana (R-290) dan isobutana (R-600a) di kanal mini horizontal. Kondisi pengujian menggunakan berbagai variasi pengujian yaitu fluks kalor ( $q$ ), fluks massa ( $G$ ) dan nilai temperatur saturasi dengan menggunakan *test section* yang terbuat dari pipa *stainless steel* berdiameter dalam 3 (mm) dengan panjang 1 (m). Refrigeran yang mengalir dipanaskan secara merata di sepanjang pipa *test section*. Pada kondisi fluks kalor ( $q$ ) yang sama, semakin besar nilai fluks massa ( $G$ ), maka kualitas massa uap ( $x$ ) yang terjadi akan lebih kecil di setiap titik percobaan dan penurunan tekanan akibat faktor gesek akan semakin besar. Pada kondisi kualitas uap ( $x$ ) rendah, penurunan tekanan karena adanya faktor gesek, lebih dominan disebabkan oleh perubahan nilai densitas rata-rata fluida ( $\bar{\rho}$ ) dibandingkan dengan perubahan viskositas rata-ratanya ( $\bar{\mu}$ ). Penggunaan kanal mini mengakibatkan nilai deviasi rata-rata terhadap teori model aliran *homogeneous*, korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Chisholm-Baroczy (1968) menjadi sangat besar.

Kata kunci :  
Aliran Dua Fasa, Penurunan Tekanan, Kanal Mini, R-290, R-600a

## ABSTRACT

*Name* : Nico Muhammad Afriandi  
*Study Program* : Mechanical Engineering  
*Title* : Pressure Drop of Two-Phase Flow Boiling in Horizontal Mini Channel for R-290 and R-600a with Homogeneous Model

*The purpose of this experiment is to obtain the pressure drop characteristic of two-phase boiling flow in horizontal mini channel for Propane (R-290) and Isobutane (R-600a). The experimental condition used various number of experiment variation which consist of heat flux ( $q$ ), mass flux ( $G$ ) and saturation temperature using a test section which is made from stainless steel with 3 (mm) inner diameter and 1 (meter) length. The refrigerant is being heated along side in the mini channel. On a same heat flux ( $q$ ) condition, the higher mass flux ( $G$ ) obtained, mass quality of vapor ( $x$ ) will be much lower on each point of experiment and the pressure drop will be even higher due to friction factor. In low mass quality of vapor ( $x$ ), the pressure drop which caused by the friction factor dominantly affected by changes of average fluid density value ( $\bar{\rho}$ ) and changes of its average viscosity ( $\bar{\mu}$ ). The use of a mini channel resulted in an average deviation value of the theory of homogeneous flow model, Martinelli-Nelson correlation (1948) and Chisholm-Baroczy (1968) becomes very large.*

*Keywords :*  
*Two-Phase Flow, Pressure Drop, Mini Channel, R-290, R-600a*



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
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.....	2
1.3 Tujuan Penelitian .....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Aliran Dua Fasa .....	4
2.2 Pola Aliran Dua Fasa di Pipa Horizontal.....	5
2.3 Pipa Kanal Mini .....	6
2.4 Penurunan Tekanan ( $\Delta P$ ) .....	7
2.4.1 Gradien Penurunan Tekanan Akibat Percepatan Aliran.....	8
2.4.2 Penurunan Tekanan Akibat Gesekan dengan Aliran Homogeneous .....	11

2.4.2.1 Faktor Gesek Alirannya di Anggap Mengalir Sebagai Fasa Cair Saja.....	12
2.4.2.2 Faktor Gesek Alirannya di Anggap Mengalir sebagai Dua fasa.....	14
2.4 Deviasi.....	16
BAB 3 PERANGKAT DAN ASPEK PENELITIAN .....	17
3.1 Skematik Alat Uji.....	17
3.2 Bagian-Bagian Alat Uji.....	18
3.3 Prinsip Kerja Alat Uji.....	23
3.4 Kondisi Pengujian .....	23
BAB 4 HASIL DAN ANALISA.....	25
4.1 Penurunan Tekanan dengan Metode “ <i>Homogeneous</i> ” Berdasarkan Data Hasil Percobaan.....	25
4.2 Hasil Pengolahan Data untuk Refrigeran Propana (R-290).....	26
4.3 Hasil Pengolahan Data untuk Refrigeran Isobutana (R-600).....	33
4.4 Deviasi Nilai Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Refrigeran Propana (R-290).....	37
4.5 Deviasi Nilai Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Refrigeran Isobutana (R-600a).....	39
BAB 5. KESIMPULAN.....	42
DAFTAR PUSTAKA .....	43
LAMPIRAN	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pola Aliran pada Aliran Horizontal.....	5
Gambar 2.2	Pola Aliran Dua Fasa pada Proses Evaporasi di Pipa Horizontal Menurut Collier et.al.(1994).....	6
Gambar 2.3	Diagram p-h Untuk Propana (R-290).....	9
Gambar 2.4	Diagram p-h Untuk Isobutana (R-600a).....	9
Gambar 3.1	Skematik Alat Uji.....	17
Gambar 3.2	<i>Condensing Unit</i> .....	18
Gambar 3.3	<i>Test Section</i> .....	18
Gambar 3.4	<i>Pressure Transmitter</i> .....	19
Gambar 3.5	<i>Pressure Gauge</i> .....	19
Gambar 3.6	<i>Needle Valve</i> .....	20
Gambar 3.7	<i>Check Valve</i> .....	20
Gambar 3.8	<i>Sight Glass</i> .....	20
Gambar 3.9	<i>Thermocouple</i> .....	21
Gambar 3.10	<i>Module Thermocouple</i> .....	21
Gambar 3.11	Timbangan <i>Digital</i> .....	21
Gambar 3.12	Sabuk Pemanas yang Terpasang pada Tabung Refrigeran.....	22
Gambar 3.13	<i>Variable Transformer</i> .....	22
Gambar 3.14	Pipa Tembaga .....	23
Gambar 4.1	Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Propana dengan $G = 155.597 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ $q = 5 \text{ kWatt/m}^2$ .....	27
Gambar 4.2	Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Propana dengan $G = 242.195 \text{ kg/m}^2$ $q = 8 \text{ kWatt/m}^2$ .....	28
Gambar 4.3	Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Propana dengan $G = 51.47 \text{ kg/m}^2$ $q = 5 \text{ kWatt/m}^2$ .....	30

Gambar 4.4	Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Propana dengan $G=90.073 \text{ kg/m}^2$ $q=8 \text{ kWatt/m}^2$ .....	31
Gambar 4.5	Grafik Penurunan Densitas Rata-Rata Propana pada Masing-Masing Kondisi Pengujian.....	32
Gambar 4.6	Grafik Penurunan Viskositas Rata-Rata Propana pada Masing-Masing Kondisi Pengujian.....	33
Gambar 4.7	Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Isobutana dengan $G=169.851 \text{ kg/m}^2$ $q=3 \text{ kWatt/m}^2$ .....	34
Gambar 4.8	Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Isobutana dengan $G=141.543 \text{ kg/m}^2$ $q=4 \text{ kWatt/m}^2$ .....	35
Gambar 4.9	Grafik Penurunan Densitas Rata-Rata Isobutana pada Masing-Masing Kondisi Pengujian.....	36
Gambar 4.10	Grafik Penurunan Viskositas Rata-Rata Isobutana pada Masing-Masing Kondisi Pengujian.....	37
Gambar 4.11	Grafik Perbandingan Deviasi Rata-Rata R-290 untuk $q=5 \text{ kWatt/m}^2$ Terhadap Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek Secara <i>Homogeneous</i> Model.....	38
Gambar 4.12	Grafik Perbandingan Deviasi Rata-Rata R-290 untuk $q=8 \text{ kWatt/m}^2$ Terhadap Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek Secara <i>Homogeneous</i> Model.....	39
Gambar 4.13	Grafik Perbandingan Deviasi Rata-Rata R-600a untuk $G=169.851 \text{ kg/m}^2$ $q=3 \text{ kWatt/m}^2$ Terhadap Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek Secara <i>Homogeneous</i> Model.....	40
Gambar 4.14	Grafik Perbandingan Deviasi Rata-Rata R-600a untuk $G=141.543 \text{ kg/m}^2$ $q=4 \text{ kWatt/m}^2$ Terhadap Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek Secara <i>Homogeneous</i> Model.....	40

## DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Perbandingan Dampak Refrigeran Terhadap Lingkungan .....	1
Tabel 4.1	Parameter Percobaan Propana pada Kondisi 1.....	26
Tabel 4.2	Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Propana pada Kondisi 1.....	26
Tabel 4.3	Parameter Percobaan Propana pada Kondisi 2 .....	27
Tabel 4.4	Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Propana pada Kondisi 2.....	28
Tabel 4.5	Parameter Percobaan Propana pada Kondisi 3 .....	29
Tabel 4.6	Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Propana pada Kondisi 3.....	29
Tabel 4.7	Parameter Percobaan Propana pada Kondisi 4 .....	30
Tabel 4.8	Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Propana pada Kondisi 4.....	31
Tabel 4.9	Parameter Percobaan Isobutana Pada Kondisi 1 .....	33
Tabel 4.10	Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Isobutana pada Kondisi 1.....	33
Tabel 4.11	Parameter Percobaan Isobutana pada Kondisi 2 .....	34
Tabel 4.12	Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Isobutana pada Kondisi 2.....	35

## DAFTAR SIMBOL

$A$	luas penampang kanal ( $m^2$ )
$A_f$	luas penampang fasa liquid ( $m^2$ )
$A_g$	luas penampang fasa gas ( $m^2$ )
$AD$	<i>average</i> deviasi (%)
$C$	bilangan Chisholm
$D$	diameter dalam pipa (m)
$\left(\frac{dp}{dz}\right)$	gradien tekanan (Pa/m)
$\left(\frac{dp}{dz} a\right)$	gradien tekanan percepatan (Pa/m)
$\left(\frac{dp}{dz} F\right)$	gradien tekanan friksi (Pa/m)
$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f$	gradien tekanan friksi untuk aliran yang ditinjau fasa liquidnya (Pa/m)
$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{fo}$	gradien tekanan friksi untuk aliran liquid saja (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
$G$	<i>mass flux</i> ( $kg/m^2.s$ )
$g$	gravitasi ( $m/s^2$ )
$h_f$	entalpi saturasi liquid (kJ/kg)
$h_{fg}$	selisih antara entalpi gas dan fluida (kJ/kg)
$h_{fi}$	entalpi fluida pada temperatur masuk (kJ/kg)
$h_g$	entalpi saturasi uap (kJ/kg)
$L$	panjang pipa (m)
$m_{liquid}$	massa liquid (kg)
$m_{vapor}$	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 (m/s)
$v_f$	volume spesifik liquid ( $m^3/kg$ )
$v_g$	volume spesifik gas ( $m^3/kg$ )
$w$	laju aliran (kg/s)
$w_f$	laju aliran fasa liquid (kg/s)
$w_g$	laju aliran fasa gas (kg/s)
$X$	parameter Martinelli

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

CFC (Chloro-Fluoro-Carbon) memegang peranan penting dalam sistem refrigerasi sejak ditemukan pada tahun 1930. Hal ini dikarenakan CFC memiliki properti fisika dan termal yang baik sebagai refrigeran, stabil, tidak mudah terbakar, tidak beracun dan kompatibel terhadap sebagian besar bahan komponen dalam sistem refrigerasi. Akan tetapi, setelah masyarakat mengetahui hipotesa bahwa CFC termasuk *Ozone Depleting Substance* (ODS), yaitu zat yang dapat menyebabkan kerusakan ozon, masyarakat mulai mencoba melakukan penghentian pemakaian ODS dan dituangkan ke dalam beberapa konvensi, seperti *Vienna Convention* pada bulan Maret 1985, *Montreal Protocol* pada bulan September 1987 dan beberapa amandemen lainnya. Pemerintah Indonesia telah meratifikasinya melalui Keppres RI No. 23 tahun 1992.

R-134a sebagai salah satu alternatif memiliki beberapa properti yang baik, tidak beracun, tidak mudah terbakar dan relatif stabil. Tetapi R-134a juga memiliki kelemahan di antaranya, tidak bisa dijadikan pengganti R-12 secara langsung tanpa melakukan modifikasi sistem refrigerasi (*drop in substitute*), relatif mahal, dan masih memiliki potensi sebagai zat yang dapat menyebabkan efek pemanasan global karena memiliki *Global Warming Potential* (GWP) yang signifikan. Selain itu R-134a sangat bergantung kepada pelumas sintetik yang sering menyebabkan masalah dengan sifatnya yang higroskopis.

Tabel 1.1 Perbandingan Dampak Refrigeran Terhadap Lingkungan

Refrigeran	Formula	Usia aktif (tahun)	ODP	GWP
CFC-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	120	1	4000
HCFC-22	CHClF <sub>2</sub>	13.3	0.055	1700
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	14.6	0	1300
Hidrokarbon	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	< 1	0	-

Sumber : <http://indonesiasejahtera.wordpress.com>

Alternatif lain yang ditawarkan adalah refrigeran hidrokarbon. Sebenarnya hidrokarbon sebagai refrigeran sudah dikenal masyarakat sejak 1920 di awal teknologi refrigerasi bersama fluida kerja natural lainnya seperti ammonia, dan karbon dioksida. Hidrokarbon yang sering dipakai sebagai refrigeran adalah propana (R-290), isobutana (R-600a), dan n-butana (R-600). Campuran yang sering digunakan di antaranya R-290/R-600a, R-290/R-600 atau kombinasi dari ketiganya R-290/R-600/R-600a.

Oleh karena itu, saat ini banyak penelitian mengenai refrigeran yang dilakukan untuk mencari refrigeran alternatif yang lebih ramah lingkungan. Penelitian aliran dua fasa untuk beberapa refrigeran pada pipa ukuran mini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari refrigeran. Penelitian tersebut dilakukan untuk mencari refrigeran alternatif ramah lingkungan dan juga menjadi dasar dalam merancang alat-alat refrigerasi yang lebih kompak, karena dalam proses pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, penelitian tidak terbatas pada upaya untuk menemukan teknologi baru, tetapi termasuk juga upaya untuk merekayasa teknologi yang telah ada dengan tujuan agar penggunaan refrigeran menjadi lebih efektif dan efisien.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Penelitian ini kami lakukan untuk memperoleh perbandingan penurunan tekanan pada evaporasi aliran dua fasa di kanal mini horizontal hasil percobaan terhadap penurunan tekanan pada evaporasi aliran dua fasa pada kanal mini horizontal dengan model *homogeneous* untuk beberapa kondisi menggunakan refrigeran R-290 (Propana) dan R-600a (Isobutana). 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

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu:



- a. Untuk mendapatkan karakteristik penurunan tekanan untuk aliran evaporasi aliran dua fasa di kanal mini horizontal dengan refrigeran R-290 dan R-600a menggunakan teori model aliran *Homogeneous*.
- b. Dengan penerapan aliran refrigeran pada kanal mini, diharapkan penggunaan material dan energi dapat lebih efisien.
- c. Untuk mendorong penggunaan refrigeran alami yang lebih ramah terhadap lingkungan.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Pada penelitian aliran dua fasa yang menggunakan refrigeran R-290 dan R-600a ini menggunakan pipa kanal mini berdiameter dalam 3 mm dan panjang 1 meter. Metode yang dilakukan untuk menentukan nilai penurunan tekanan adalah dengan menggunakan model aliran *homogeneous*.

#### **1.5 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari :

##### **Bab 1 Pendahuluan**

Bab ini berisi Latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan dari penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

##### **Bab 2 Tinjauan Pustaka**

Bab ini berisi tentang teori-teori atau hal-hal yang menjadi pendukung dalam studi yang dilakukan.

##### **Bab 3 Perangkat dan Aspek Pengujian**

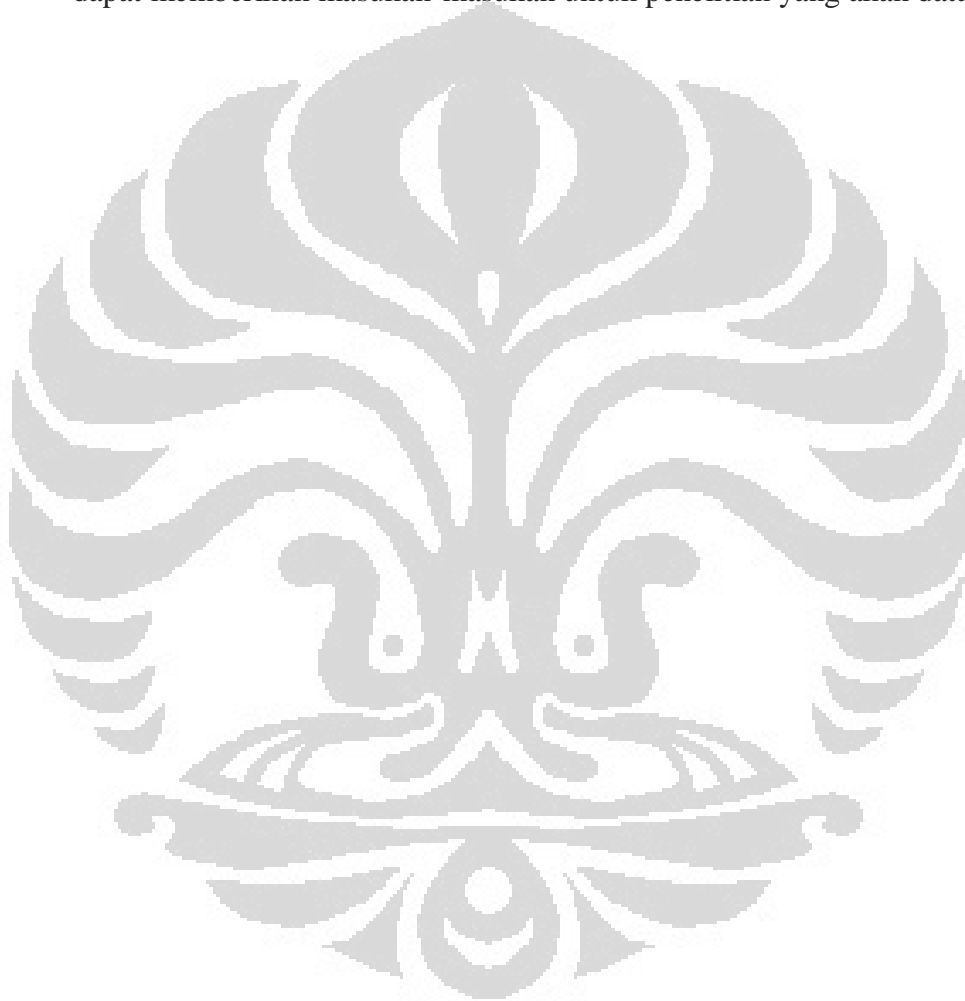
Bagian ini berisikan proses pemilihan komponen alat uji, perancangan serta instalasinya. Kondisi pengujian yang akan dilakukan juga disertakan dalam bagian ini.

#### Bab 4 Hasil Dan Analisa

Pada bab ini data-data yang didapat dari hasil pengujian diolah menggunakan *software* MatLab dan membentuknya menjadi grafik agar dapat di analisa.

#### Bab 5 Kesimpulan

Kesimpulan diambil berdasarkan analisa yang didapat pada bab 4 sehingga dapat memberikan masukan-masukan untuk penelitian yang akan datang.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Aliran Dua Fasa

Aliran dua fasa merupakan aliran dimana fluida kerjanya memiliki dua jenis fasa yang berbeda akibat dari adanya penambahan kalor dari lingkungan ke fluida kerja yang digunakan, penambahan kalor ini akibat dari proses pendidihan secara konveksi dari lingkungan ke fluida kerja.

Metode yang digunakan untuk menganalisa aliran dua fasa merupakan pengembangan dari metode penelitian satu fasa yang sudah ada. Caranya selalu dengan menurunkan persamaan dasar yang berhubungan dengan konservasi massa, momentum dan energi. Dalam mencari persamaan-persamaan tersebut biasanya dilakukan pendekatan-pendekatan penyederhanaan. Beberapa pendekatan yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut :

a. Metode Aliran “*Homogeneous*”

Pendekatan dengan metode ini merupakan yang paling sederhana. Pada pendekatan ini aliran di asumsikan sebagai aliran satu fasa saja dengan properti yang didapat dari gabungan dan besarnya kontribusi masing-masing fasa. Salah satu asumsi untuk metode *homogeneous* ini adalah kecepatan aliran antara fasa cair dan fase gas dianggap sama.

b. Metode Aliran “*Separated*” atau Terpisah

Pendekatan dengan metode ini, masing-masing fasa diasumsikan secara terpisah dan memiliki properti sendiri-sendiri. Karakteristik masing-masing fasa harus tersedia. Terutama luas area masing-masing fasa dan interaksi gesekan antar fasa maupun gesekan antara fluida dengan dinding kanal. Kecepatan aliran kedua fasa dianggap konstan tetapi tidak sama.

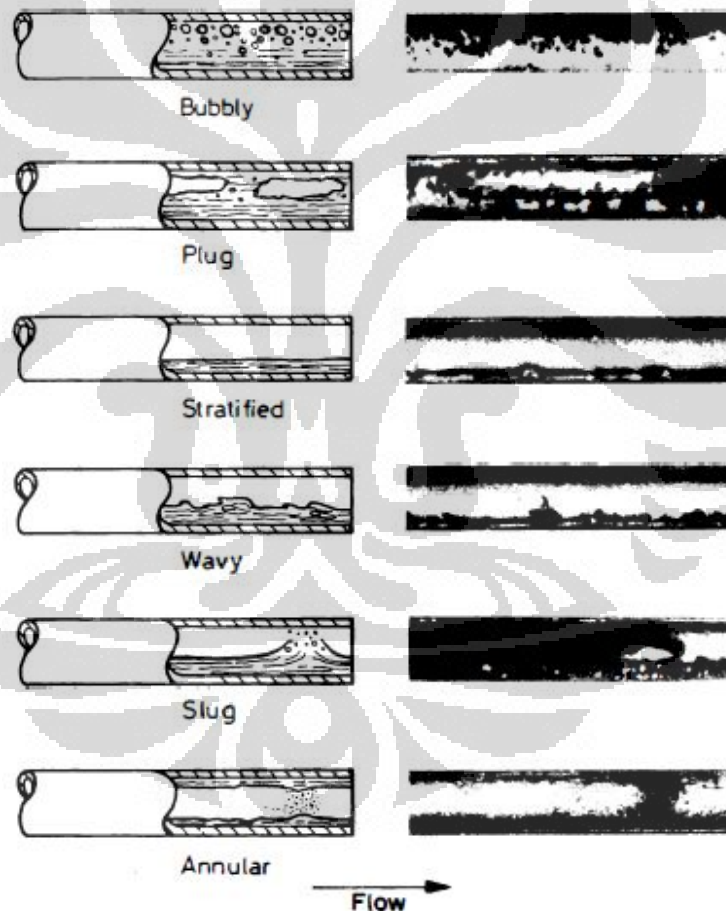
c. Model Aliran “*Flow Pattern*”

Pendekatan ini lebih rumit (canggih). Aliran dua fasa disusun dalam 1 dari 3 atau 4 bentuk geometri yang pasti. Geometri ini didasarkan pada berbagai konfigurasi atau pola aliran yang ditemukan ketika fasa gas dan fasa cair mengalir bersama

dalam kanal. Untuk dapat menggunakan model ini, maka perlu diketahui kapan masing- masing persamaan boleh digunakan dan harus dapat memprediksi transisi dari satu pola ke pola lainnya.

## 2.2 Pola Aliran Dua Fasa di Pipa Horizontal

Pada aliran dua fasa di pipa horizontal, pengamatan pola aliran menjadi rumit karena adanya ketidaksimetrisan antara dua fasa yang dikarenakan oleh pengaruh gravitasi. Pola aliran yang terbentuk secara umum yang dapat diterima adalah yang diberikan oleh John G. Collier (1994) seperti gambar berikut :

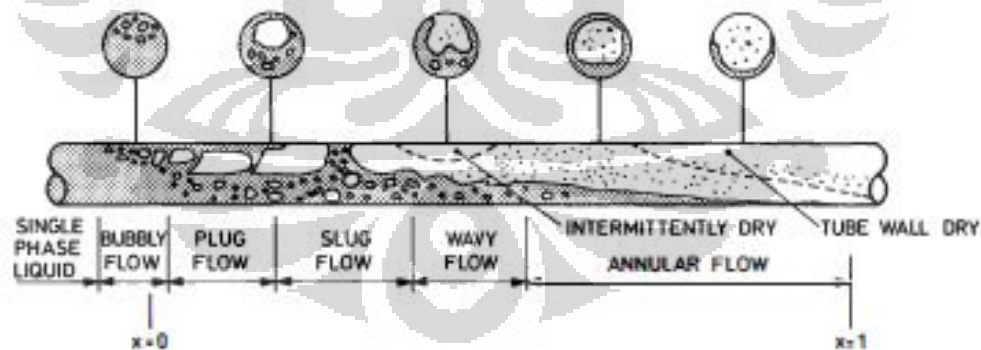


Gambar 2.1 Pola Aliran pada Aliran Horizontal (John G. Collier - 1994)

- 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.

Pola aliran yang umum terjadi pada sebuah proses evaporasi aliran dua fasa di pipa horizontal, terlihat seperti gambar berikut :



Gambar 2.2 Pola Aliran Dua Fasa pada Proses Evaporasi di Pipa Horizontal Menurut Collier et.al.(1994)

### 2.3 Pipa Kanal Mini

Berdasarkan diameternya, pipa dapat diklasifikasikan menjadi beberapa macam, yaitu:

- a. Pipa konvensional, yaitu pipa dengan  $ID > 3 \text{ mm}$ .
- b. Pipa mini, yaitu pipa dengan  $200 \text{ }\mu\text{m} < ID \leq 3 \text{ mm}$ .
- c. Pipa mikro, yaitu pipa dengan  $10 \text{ }\mu\text{m} \leq ID \leq 200 \text{ }\mu\text{m}$ .
- d. Pipa mikro transisi, yaitu pipa dengan  $1 \text{ }\mu\text{m} \leq ID \leq 10 \text{ }\mu\text{m}$ .
- e. Pipa nano transisi, yaitu pipa dengan  $0.1 \text{ }\mu\text{m} \leq ID \leq 1 \text{ }\mu\text{m}$ .
- f. Pipa nano, yaitu pipa dengan  $ID \leq 0.1 \text{ }\mu\text{m}$ .

Pada pipa dengan ukuran diameter yang kecil memiliki keuntungan dalam Rasio kontak antara permukaan pipa dengan volume fluida, hal tersebut tentunya akan lebih besar dibanding dengan pipa kanal konvensional. Selain itu, pembuatan alat penukar kalor lebih kompak karena ukuran pipa yang kecil. Pada pipa kanal mini ini akan dipasangkan pemanas listrik sebagai beban pemanasan, sehingga terjadi perpindahan kalor dari luar kanal menuju refrigeran yang berada di dalam kanal tersebut.

#### 2.4 Penurunan Tekanan ( $\Delta P$ )

Proses terjadinya penurunan tekanan ini dikarenakan adanya hambatan aliran yang disebabkan oleh gesekan, perubahan percepatan fluida dan perbedaan ketinggian. Persamaan total gradien penurunan tekanan dapat ditulis dengan persamaan berikut ini :

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \left(\frac{dp}{dz} F\right) + \left(\frac{dp}{dz} a\right) + \left(\frac{dp}{dz} z\right) \quad (2.1)$$

Dikarenakan pada pipa aliran horizontal perbedaan ketinggian dianggap tidak ada, maka persamaan (2.1) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \left(\frac{dp}{dz} F\right) + \left(\frac{dp}{dz} a\right) \quad (2.2)$$

Dimana :

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \text{Total Gradien Penurunan Tekanan (Pa/m)}$$

$\left(\frac{dp}{dz} F\right) = \text{Gradien penurunan tekanan akibat gesekan (Pa/m)}$

$\left(\frac{dp}{dz} a\right) = \text{Gradien penurunan tekanan akibat percepatan aliran (Pa/m)}$

$\left(\frac{dp}{dz} z\right) = \text{Gradien penurunan tekanan akibat beda ketinggian (Pa/m)}$

#### 2.4.1 Gradien Penurunan Tekanan Akibat Percepatan Aliran

Besar nilai gradien penurunan tekanan akibat adanya percepatan aliran dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\left(\frac{dp}{dz} a\right) = \left[ G^2 \frac{d}{dz} \left( \frac{x^2 v_g}{\alpha} + \frac{(1-x)^2 v_f}{(1-\alpha)} \right) \right] \quad (2.3)$$

Dengan keterangan sebagai berikut :

$G = \text{Fluks Massa} \left( \frac{kg}{m^2 s} \right)$

$v_g = \text{Spesifik Volume Fasa Gas} \left( \frac{m^3}{kg} \right)$

$v_f = \text{Spesifik Volume Fasa Cair} \left( \frac{m^3}{kg} \right)$

$\alpha = \text{Void Fraction}$

$x = \text{Kualitas massa uap}$

Selama proses penguapan, sebagian zat berwujud cair dan sebagian lain berwujud gas. Kondisi ini disebut campuran cair jenuh dan uap jenuh. Untuk menganalisa kondisi campuran tersebut dengan tepat, maka perlu diketahui bagian fasa cair dan bagian fasa gas dari campuran tersebut. Sifat ini disebut kualitas massa uap ( $x$ ). Secara hidrodinamik dapat didefinisikan sebagai rasio massa uap terhadap massa total campuran.

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{total}} = \frac{m_g}{m_f + m_g} \quad (2.4)$$

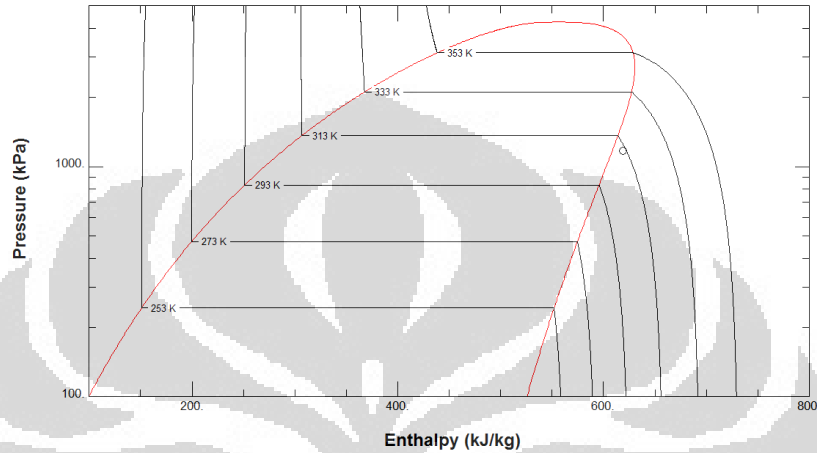
$$m_{total} = m_{liquid} + m_{vapor} = m_f + m_g \quad (2.5)$$

Keterangan:

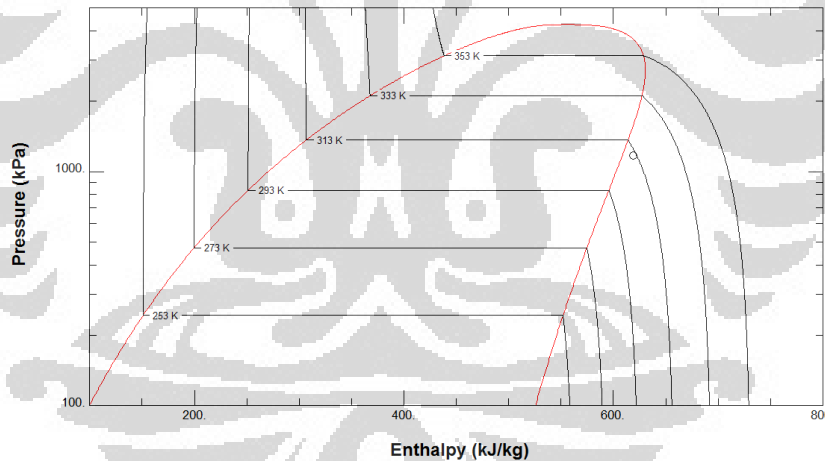
$x$  : Kualitas massa uap

$m_{liquid} (m_f)$  : massa cair (kg)

$m_{vapor} (m_g)$  : massa gas (kg)



Gambar 2.3 Diagram p-h untuk propan (R-290) berdasarkan program Refprop



Gambar 2.4 Diagram p-h untuk Isobutan (R-600a) berdasarkan program Refprop

Secara Termodinamik nilai kualitas massa uap dapat ditentukan dengan :

$$x = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} \quad (2.6)$$

$x$  : Kualitas massa uap

$h$  : enthalpi pada titik yang di perhitungkan  $\left(\frac{J}{kg}\right)$



$h_f$  : enthalpi saturasi fasa cair  $\left( \frac{J}{kg} \right)$

$h_g$  : enthalpi saturasi fasa gas  $\left( \frac{J}{kg} \right)$

Pada aliran dua fasa, untuk mencari nilai kualitas massa uap pada interval jarak tertentu di sepanjang pipa ( $x_z$ ), maka harus diketahui posisi dimana kondisi saturasi mulai terjadi. Karena kondisi cair pada titik *inlet* belum tentu dalam kondisi saturasi. Untuk mengetahui posisi terjadinya saturasi, maka dapat diketahui dengan terlebih dahulu mencari panjang posisi cair dalam kondisi *subcooled* ( $Z_{sc}$ ), yaitu kondisi dimana fluida masih dalam kondisi sepenuhnya cair.

$$\frac{z_{sc}}{L} = \frac{h_f - h_{fi}}{\Delta h}$$
$$z_{sc} = \left( \frac{h_f - h_{fi}}{\Delta h} \right) L \quad (2.7)$$

$$\Delta h = \frac{P}{\dot{m}} \quad (2.8)$$

Dimana,

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

$P$  = daya listrik yang diberikan (Watt)

$\dot{m}$  = laju massa (kg/s)

$(Z_{sc})$  = jarak *subcooled* (m)

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

$h_{fi}$  = entalpi fluida pada temperatur masuk (kJ/ kg)

$L$  = panjang pipa (m)

Sebelum mencari nilai kualitas uap sepanjang aliran dua fasa ( $x_z$ ), maka perlu diketahui terlebih dahulu nilai ( $x_{out}$ ), yaitu nilai kualitas massa uap pada titik *outlet* pipa.

$$x_{out} = \frac{\Delta h + h_{fi} - h_f}{h_{fg}} \quad (2.9)$$

Dimana :

$x_{out}$  = kualitas massa uap pada posisi *outlet*

$h_{fg}$  = selisih antara entalpi fasa gas dan fasa cair (kJ/ kg)

Setelah mengetahui nilai ( $z_{sc}$ ) dan nilai kualitas uap pada titik *outlet* ( $x_{out}$ ), maka dapat dicari nilai kualitas massa uap ( $x_z$ ) pada setiap titik di sepanjang pipa (*test section*).

$$x_z = x_{out} \left( \frac{z - z_{sc}}{L - z_{sc}} \right) \quad (2.10)$$

Dimana,

$x_z$  = kualitas massa uap pada posisi  $z$

$z$  = posisi yang ingin diketahui sifatnya (m)

Selain dipengaruhi oleh kualitas dari massa uap, gradien penurunan tekanan yang diakibatkan oleh adanya percepatan aliran juga dipengaruhi oleh besar atau kecilnya nilai fraksi uap (*void fraction*). Nilai fraksi uap ( $\alpha$ ) merupakan perbandingan luas penampang fasa gas ( $A_g$ ) dengan luas penampang keseluruhan dari aliran dua fasa ini ( $A$ ).

$$\alpha = \frac{A_g}{A_g + A_f} = \frac{A_g}{A} \quad (2.11)$$

$$(1 - \alpha) = \frac{A_f}{A_g + A_f} = \frac{A_f}{A} \quad (2.12)$$

Berdasarkan data yang dihasilkan dari percobaan, besar nilai fraksi uap juga dapat diperoleh dari percobaan Steiner (1993), dimana nilai fraksi uap merupakan fungsi dari nilai kualitas massa uapnya. Persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\alpha = x v_g \left[ \frac{(1 + 0.12 (1 - x)) (x v_g + (1 - x) v_f)}{+ \frac{1.18}{G} (1 - x) v_f^{0.5} \left[ g \sigma \left( \frac{1}{v_f} + \frac{1}{v_g} \right) \right]^{0.25}} \right]^{-1} \quad (2.13)$$

Dimana,

$\alpha$  = fraksi uap

- $x$  = kualitas massa uap
- $v_g$  = spesifik volume fasa uap ( $m^3/kg$ )
- $v_f$  = spesifik volume fasa cair ( $m^3/kg$ )
- $g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
- $\sigma$  = tegangan permukaan ( $N/m$ )

## 2.4.2 Penurunan Tekanan Akibat Gesekan dengan Aliran *Homogeneous*

Besarnya nilai penurunan tekanan yang diakibatkan oleh adanya gesekan pada aliran dua fasa, dapat diperoleh berdasarkan dari model aliran yang digunakan. Pada penelitian ini, yang digunakan adalah model aliran *homogeneous* dimana diasumsikan bahawa :

- a. Fasa cair dan fasa gas memiliki laju aliran yang sama.
- b. Terjadi kesetimbangan termodinamik antara fasa cair dan fasa gas.
- c. Digunakan faktor gesek satu fasa yang sesuai untuk aliran dua fasa.

Untuk menggunakan pendekatan model *homogeneous*, perlu diterapkan aturan sesuai definisi dimana penentuan faktor gesek satu fasa ( $f_f$ ) yang keseluruhannya cair digunakan untuk faktor gesek dua fasa ( $f_{TP}$ ).

### 2.4.2.1 Faktor Gesek Alirannya di Anggap Mengalir Sebagai Fasa Cair Saja

Menurut persamaan Fanning, persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right) = \left(\frac{dp}{dz} F\right)_{fo} \phi_{fo}^2$$

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right) = \frac{2f_{fo} G^2 v_f}{D_{in}} \phi_{fo}^2 \quad (2.14)$$

Dimana, Faktor pengali gesekan ( $\phi_{fo}^2$ )

$$\phi_{fo}^2 = \left[1 + x \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right)\right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_{fg}}{\mu_g}\right)\right]^{-1/4} \quad (2.15)$$

Sehingga persamaan (2.14) dapat dituliskan menjadi :

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right) = \frac{2f_{fo} G^2 v_f}{D_{in}} \left[1 + x \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right)\right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_{fg}}{\mu_g}\right)\right]^{-1/4} \quad (2.16)$$

$\left(\frac{dp}{dz}F\right)$  = Gradien penurunan tekanan gesek dua fasa (Pa/m)

$\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{fo}$  = Gradien penurunan tekanan gesek untuk fasa cair (Pa/m)

$f_{fo}$  = Faktor gesek untuk aliran keseluruhan memiliki fasa cair

$\phi_{fo}^2$  = Faktor pengali gesekan

$v_{fg}$  = Perbedaan spesifik volume fasa gas dan fasa cair  $\left(\frac{m^3}{kg}\right)$

$\mu_{fg}$  = Perbedaan viskositas fasa uap dan cair (Pa · s)

### **Martinelli-Nelson (1948)**

Korelasi Lockhart-Martinelli berhubungan dengan proses aliran adiabatik pada campuran fasa cair dan gas yang bertekanan rendah. Hal tersebut merupakan persamaan umum yang mungkin untuk aliran tunggal atau campuran air-uap saja. Persamaan *Martinelli-Nelson* (1948) ini merupakan pengembangan dari persamaan Lockhart-Martinelli berdasarkan data yang digunakan untuk aliran pendidihan dalam tabung. Dimana parameter  $X_{tt}$  didapat berdasarkan persamaan

$$X_{tt} = \left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_f}{\mu_g}\right)^{0.125} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.875} \quad (2.17)$$

Dengan menganggap bahwa aliran yang terjadi akan selalu menjadi *turbulen-turbulen*, Hubungan faktor gesekan menurut Martinelli-Nelson (1948) dapat dituliskan seperti persamaan berikut :

$$\phi_{fo}^2 = \left[1 + \frac{20}{X_{tt}} + \frac{1}{X_{tt}^2}\right] (1-x)^{1.75} \quad (2.18)$$

Dimana :

$X_{tt}$  = Martinelli Parameter

### **Chisholm-Baroczy (1968)**

Untuk permukaan pipa yang halus, Chisholm memodifikasi korelasi dari Lockhart-Martinelli (1949).

$$\phi_{fo}^2 = 1 + (\Gamma^2 - 1) \{Bx^{(2-n)/2} (1-x)^{(2-n)/2} + x^{(2-n)}\} \quad (2.19)$$

Besarnya Baroczy Koefisien dalam persamaan tersebut dapat ditentukan dengan

$$B = \frac{C\Gamma - 2^{n-2} + 2}{\Gamma^2 - 1} \quad (2.20)$$

Untuk pipa dengan permukaan halus  $n = 0.25$

$$\Gamma = \left( \frac{\sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_g}}}{\sqrt{\frac{\mu_g}{\mu_f}}} \right)^{n/2} \quad (2.21)$$

Dimana :

$B$  = Koefisien Baroczy

$\Gamma$  = Koefisien untuk pipa dengan permukaan halus menurut Chisholm

$\phi_{fo}^2$  = Faktor Pengali Penurunan Tekanan Akibat Gesekan Chisholm-Baroczy (1968)

#### 2.4.2.2 Faktor Gesek Alirannya di Anggap Mengalir sebagai Dua Fasa

Persamaan yang dapat digunakan adalah sebagai berikut :

$$\left( \frac{dp}{dz} F \right) = \frac{2f_{TP}G^2\bar{v}}{D_{in}} = \frac{2f_{TP}G^2}{D_{in}\bar{\rho}} \quad (2.22)$$

Untuk menentukan faktor gesek pada aliran dua fasa ( $f_{TP}$ ), maka perlu ditentukan nilai viskositas rata-rata ( $\bar{\mu}$ ) pada aliran tersebut. Besar nilai viskositas rata-rata ( $\bar{\mu}$ ) dapat dicari berdasarkan beberapa studi sebelumnya yang sudah ada :

a. Mc. Adam et al. (1942)

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{(1-x)}{\mu_f} \quad (2.23)$$

b. Chicchitti et al. (1960)

$$\bar{\mu} = \bar{\rho} [xv_g\mu_g + (1-x)v_f\mu_f] \quad (2.24)$$

c. Dukler et al. (1964)

$$\bar{\mu} = x\mu_g + (1-x)\mu_f \quad (2.25)$$

Dimana :

$x$  = Kualitas massa uap

$\bar{\mu}$  = viskositas rata-rata fasa cair dan fasa gas (Pa.s)

$v_g$  = volume spesifik fasa gas ( $m^3/kg$ )

$v_f$  = volume spesifik fasa gas ( $m^3/kg$ )

$\mu_g$  = viskositas fasa uap (Pa.s)

$\mu_f$  = viskositas fasa cair (Pa.s)

$\bar{\rho}$  = densitas rata-rata ( $kg/m^3$ )

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \frac{x}{\rho_g} + \frac{(1-x)}{\rho_f} \quad (2.26)$$

Berdasarkan nilai viskositas rata-rata ( $\bar{\mu}$ ) yang digunakan maka dapat ditentukan besarnya nilai *Reynolds* berdasarkan persamaan berikut :

$$Re = \frac{GD}{\bar{\mu}} \quad (2.27)$$

$$Re_f = \frac{GD(1-x)}{\mu_f} \quad (2.28)$$

$$Re_g = \frac{GDx}{\mu_g} \quad (2.29)$$

Dari nilai *Reynolds* yang di dapat, maka dapat diketahui nilai faktor gesek aliran dua fasa ( $f_{TP}$ ).

$$f_{TP} = \begin{cases} \frac{16}{Re}, & \text{untuk } Re < 2300 \\ 0.079 \\ Re^{0.25}, & \text{untuk } Re > 3000 \\ \text{interpolasi untuk } 2300 \leq Re \leq 3000 \end{cases} \quad (2.30)$$

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

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

$$\left(f - \frac{16}{2300}\right) = \frac{(Re - 2300)}{700} \left(\frac{0.079}{3000^{0.25}} - \frac{16}{2300}\right)$$

$$(f - 0.0069) = \frac{(Re - 2300)}{700} (0.01067 - 0.0069)$$

$$(f - 0.0069) = (Re - 2300)(5.3 \times 10^{-6})$$

$$f = 0.0069 + [(Re - 2300)(5.3 \times 10^{-6})] \quad (2.31)$$

Dimana,

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

D = diameter (m)

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

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

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

Re = bilangan Reynolds

Re<sub>f</sub> = bilangan Reynolds fasa cair

Re<sub>g</sub> = bilangan Reynolds fasa uap

f = nilai hambatan gesek

## 2.5 Deviasi

Untuk membandingkan antara nilai gradien penurunan tekanan akibat faktor gesekan secara perhitungan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{cal}$  dengan nilai penurunan tekanan akibat gesekan hasil percobaan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{pcb}$  dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$MD = \frac{1}{n} \sum_1^n \left| \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{cal} - \left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}} \times 100 \right| \quad (2.32)$$

$$AD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{cal} - \left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}} \times 100 \quad (2.33)$$

Dimana,

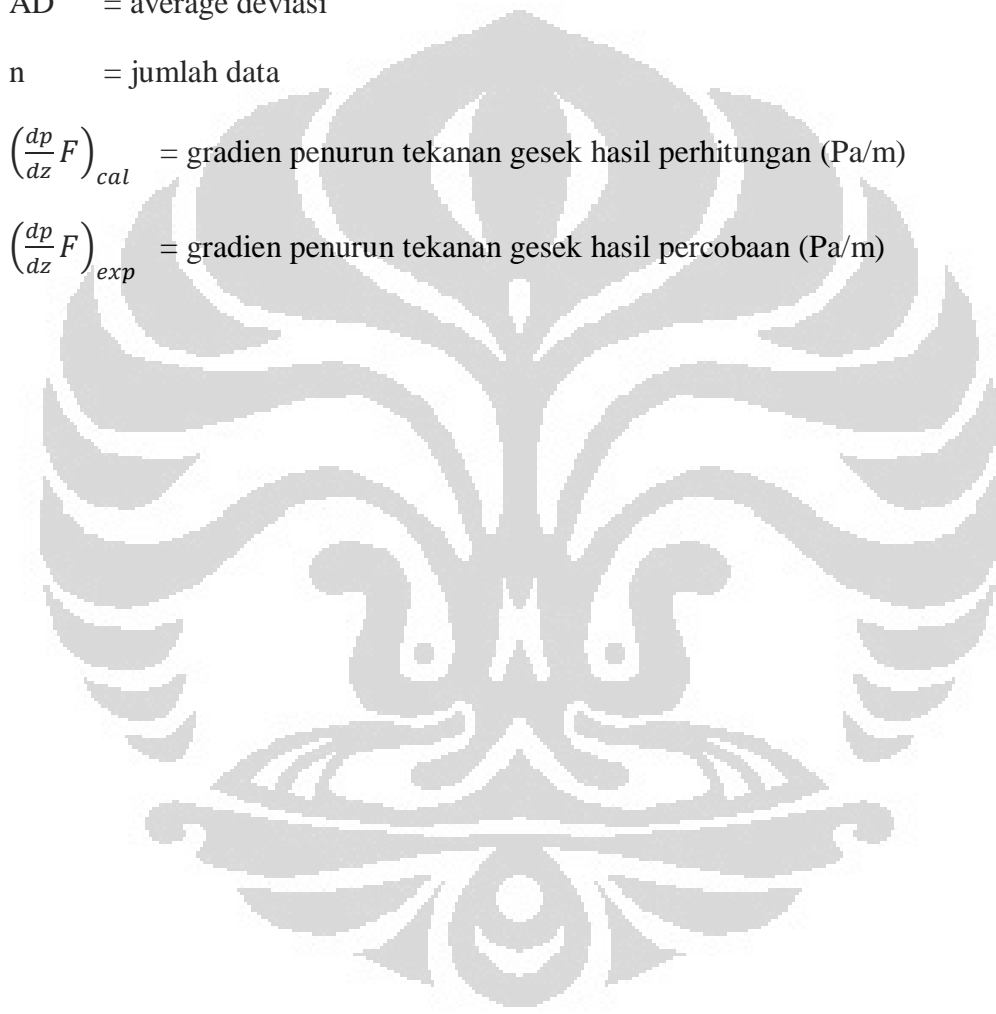
MD = mean deviasi

AD = average deviasi

n = jumlah data

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

$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}$  = gradien penurunan tekanan gesek hasil percobaan (Pa/m)

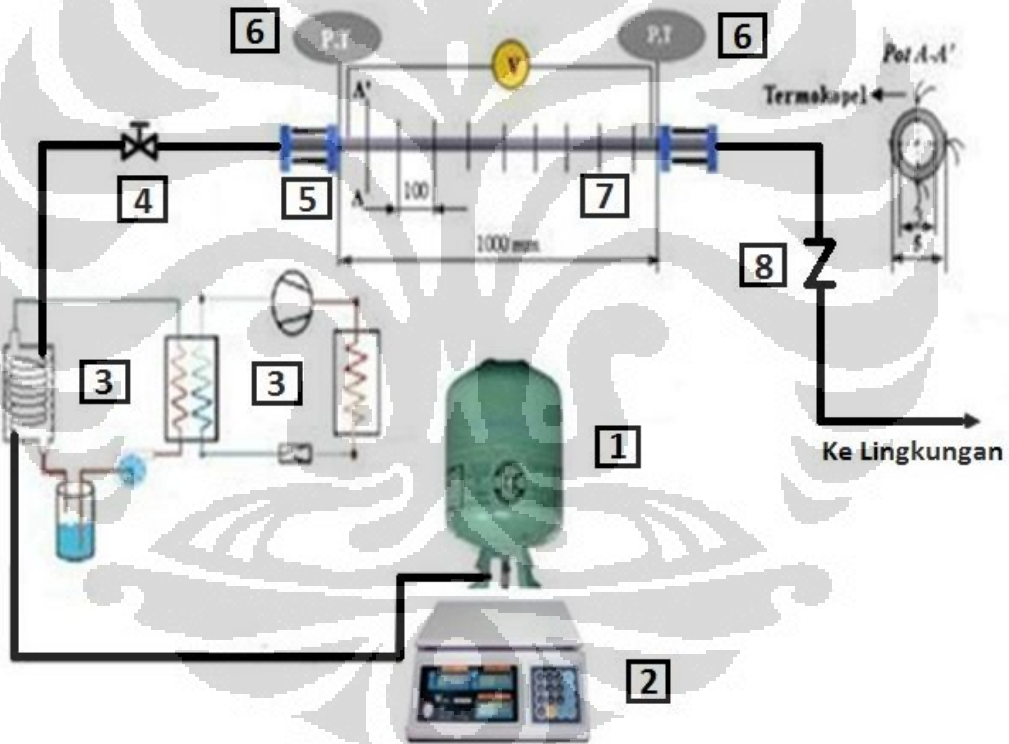




## BAB 3 PERANGKAT DAN ASPEK PENELITIAN

### 3.1 Skematik Alat Uji

Data yang didapat berasal dari alat uji yang sudah ada dengan sedikit modifikasi dari percobaan sebelumnya. Refrigeran yang digunakan pada penelitian ini adalah Propana (R-290) dan Isobutana (R-600a). Data-data yang diperoleh pada penelitian ini akan dianalisa untuk mendapatkan nilai penurunan tekanannya dan dibandingkan dengan perhitungan secara teorinya. Secara skematis, alat uji yang digunakan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.1 Skematik Alat Uji

Keterangan :

- |                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| 1. Tabung Refrigeran | 5. Sight Glass          |
| 2. Timbangan Digital | 6. Pressure Transmitter |
| 3. Condensing Unit   | 7. Test Section         |
| 4. Needle Valve      | 8. Check Valve          |

### 3.2 Bagian-Bagian Alat Uji

Pada pengujian ini, komponen-komponen dipilih disesuaikan dengan kondisi dan tujuan penelitian yang akan dilakukan. Berikut ini komponen-komponen alat yang digunakan dalam pengambilan data penelitian.

**3.2.1 *Condensing Unit Kapasitas 3 PK***, berfungsi sebagai tempat menurunkan temperatur refrigeran sebelum masuk ke dalam *test section* sehingga fluida yang masuk ke *test section* akan berada pada fasa cair.



Gambar 3.2 *Condensing Unit*

**3.2.2 *Test Section***, merupakan daerah pengambilan data yang terbuat dari *Stainless Steel 316 (SS 316)* berukuran 3 (mm) untuk diameter dalam dan diameter luar sebesar 5 (mm) dengan panjang 1 (m). Pada bagian ini dipasangkan *thermocouple* untuk pengambilan data temperatur. Pada bagian inilah panas diberikan saat fluida mulai mengalir, oleh karenanya di *test section* ini berikan insulasi agar panas yang ada tidak terbuang.



Gambar.3.3 *Test Section*

**3.2.3 Pressure Transmitter**, Alat ini digunakan untuk mendapatkan data tekanan pada saat sebelum fluida masuk dan keluar *test section*. Untuk mendapatkan nilai penurunan tekanan saat pengambilan data, alat ini akan dihubungkan ke *module thermocouple* agar bisa dilihat nilainya.



Gambar 3.4 *Pressure Transmitter*

**3.2.4 Pressure Gauge**, alat ini berfungsi sebagai pendukung dari *pressure transmitter* bila mana *pressure transmitter* tidak dapat melakukan pembacaan tekanan yang terjadi (*error*).



Gambar 3.5 *Pressure Gauge*

**3.2.5 Needle Valve**, alat ini berfungsi untuk mengatur aliran refrigeran yang masuk ke dalam *test section*.



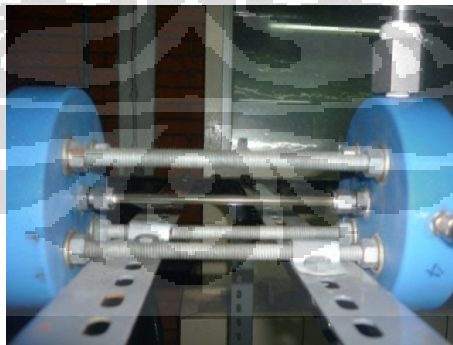
Gambar 3.6 Needle Valve

**3.2.6 Check Valve**, pemasangan alat ini bertujuan agar aliran yang terjadi searah sehingga tidak terjadi aliran balik.



Gambar 3.7 Check Valve

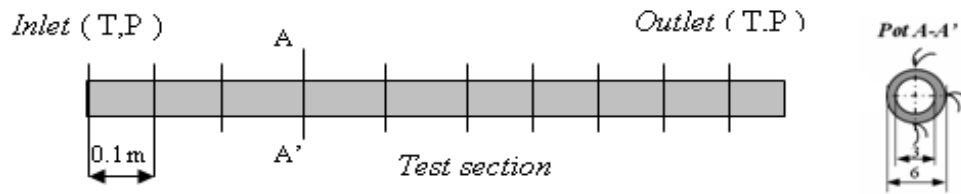
**3.2.7 Sight Glass**, bagian ini berfungsi untuk memantau aliran yang masuk dan keluar ke *test section* secara visual.



Gambar. 3.8 Sight Glass

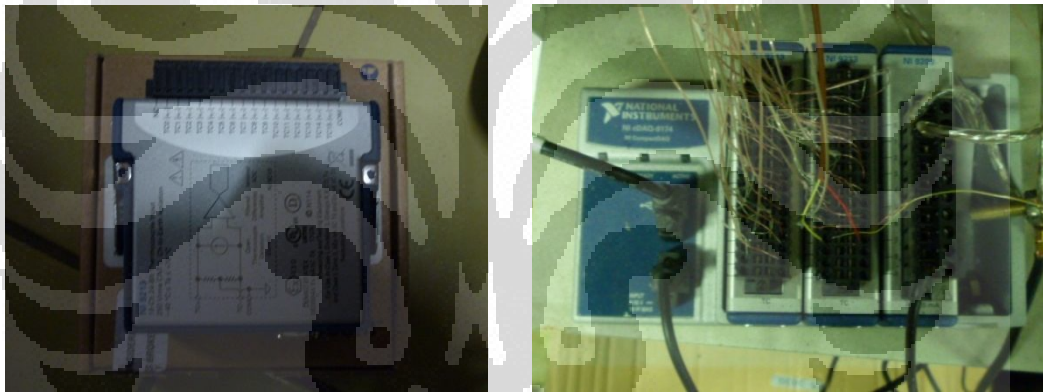
**3.2.8 Thermocouple**, tipe yang digunakan pada *thermocouple* ini adalah tipe-K. fungsinya adalah untuk mengukur temperatur di sepanjang *test section* dengan cara menghubungkannya ke *module thermocouple* sehingga data temperatur dapat terbaca.

*thermocouple* ini dipasangkan pada bagian atas, samping dan bawah *test section* dengan jarak masing-masing *thermocouple* 0.1 meter.



Gambar 3.9 *Thermocouple*

**3.2.9 Module Thermocouple**, merupakan alat untuk mengkonversi atau merubah nilai tegangan yang dihasilkan *thermokopel* sehingga menjadi nilai temperature dan tekanan yang dapat langsung digunakan hasilnya. Pembacaan nilai tersebut dibantu dengan menggunakan *software* LabView.



Gambar 3.10 *Module Thermocouple*

**3.2.10 Timbangan Digital**, alat ini berfungsi sebagai sarana informasi perubahan massa refrigeran terhadap satuan waktu, sehingga dari timbangan ini dapat diketahui nilai laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) refrigeran.



Gambar 3.11 *Timbangan Digital*

**3.2.11 Sabuk Pemanas**, alat ini berfungsi untuk menaikkan temperatur refrigeran yang ada di dalam tabung, dengan asumsi bahwa semakin tinggi nilai temperatur refrigeran yang ada di dalam tabung maka tekanan refrigeran yang ada di dalamnya juga akan meningkat. Sehingga refrigeran dapat dengan mudah mengalir karena adanya perbedaan tekanan di luar tabung. Alat ini juga dilengkapi dengan pengatur panas, sehingga panas yang dihasilkan masih tetap dalam kondisi yang aman.



Gambar 3.12 Sabuk Pemanas yang Terpasang pada Tabung Refrigeran

**3.2.12 Variable Transformer**, bagian ini merupakan perangkat untuk menghasilkan fluks kalor pada *heater* yang memanaskan *test section*. Daya yang keluar dapat diatur sedemikian rupa dengan cara mengatur tegangannya sesuai dengan nilai fluks kalor yang diinginkan.



Gambar 3.13 Variable Transformer

**3.2.13 Pipa Tembaga**, alat ini merupakan penghubung antar komponen. Ukuran yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipa tembaga berdiameter 3/8 inch dan 1/4 inch.



Gambar 3.14 Pipa Tembaga Diameter 3/8 Inch dan 1/4 Inch

### 3.3 Prinsip Kerja Alat Uji

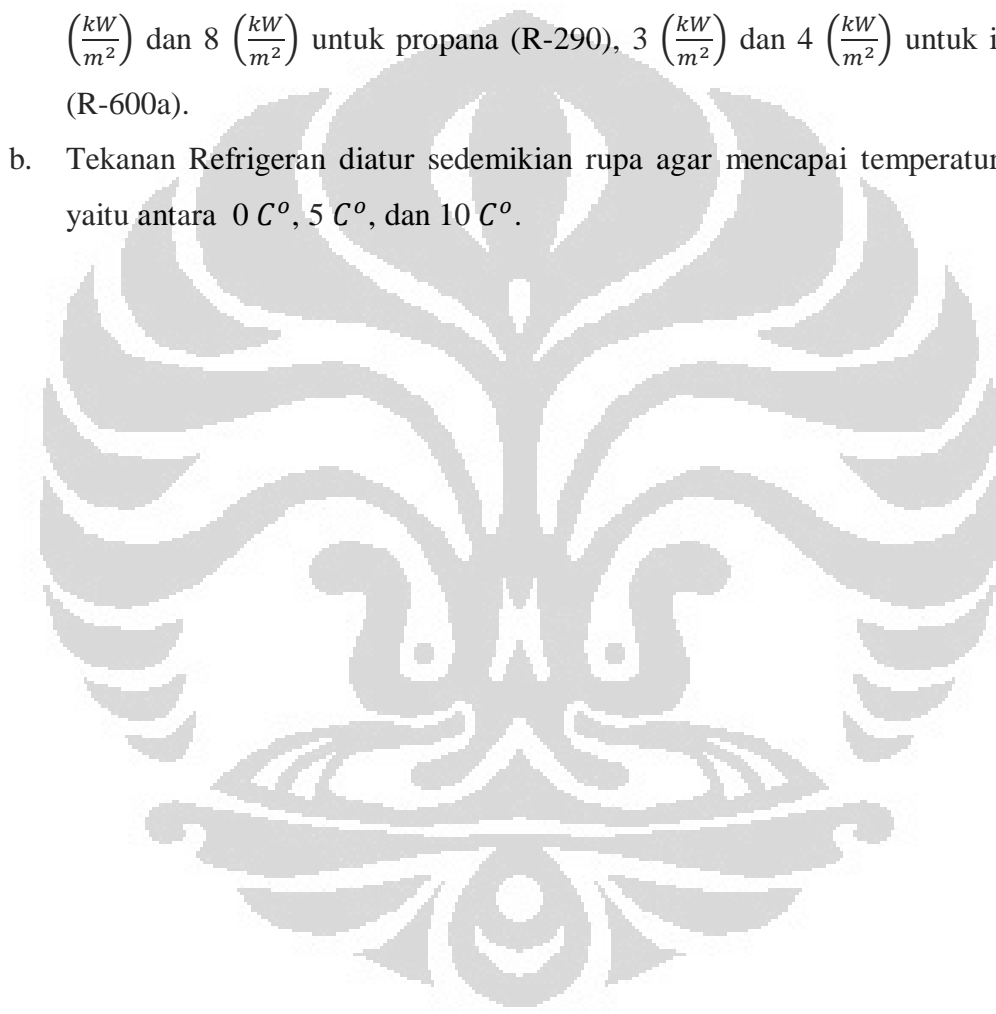
Proses yang pertama dilakukan adalah dengan mengalirkan cairan *glycol* yang ada di bak penampungan dengan bantuan *condensing unit*. *Glycol* yang mengalir disirkulasi hingga mencapai suhu yang dianggap mampu untuk merubah fasa gas refrigeran menjadi fasa cair secara keseluruhan sebelum memasuki *test section*. Refrigeran yang berada di dalam tabung dipanaskan sehingga tekanannya meningkat dan mampu untuk mengalir karena adanya beda tekanan di dalam tabung dan diluar tabung.

Banyak atau sedikitnya aliran diatur dengan *needle valve* yang terpasang sebelum *test section*. Setelah refrigeran memasuki *test section* dan dianggap sudah mengalir dalam keadaan *steady* maka *test section* diberikan kalor yang bersumber pada *variable transformer* yang sudah disiapkan. Sesaat setelah kalor diberikan itulah data penelitian mulai diambil menggunakan *module thermocouple* dengan bantuan *software LabView* yang mengkonversi tegangan yang dihasilkan *pressure transmitter* sebagai pengukur tekanan pada sisi masuk-keluar *test section* dan *thermocouple* sebagai pengukur temperatur disisi masuk-keluar *test section* dan di sepanjang *test section* itu sendiri. Refrigeran yang mengalir langsung dibuang ke udara bebas agar dapat dilihat seberapa besar penurunan tekanannya. Massa refrigeran yang terbuang itulah yang menjadi dasar untuk menentukan besarnya nilai laju aliran massa ( $\dot{m}$ ) refrigeran.

### 3.4 Kondisi Pengujian

Percobaan pada alat uji dilakukan untuk mengetahui nilai penurunan tekanan yang terjadi pada aliran dua fasa yang melalui pipa kanal mini horizontal dengan menggunakan refrigeran propana (R-290) dan isobutana (R-600a) menggunakan kondisi penelitian sebagai berikut :

- a. Fluks Kalor diberikan secara merata di sepanjang *test section* dengan variasi  $5 \left(\frac{kW}{m^2}\right)$  dan  $8 \left(\frac{kW}{m^2}\right)$  untuk propana (R-290),  $3 \left(\frac{kW}{m^2}\right)$  dan  $4 \left(\frac{kW}{m^2}\right)$  untuk isobutana (R-600a).
- b. Tekanan Refrigeran diatur sedemikian rupa agar mencapai temperatur saturasi yaitu antara  $0\text{ }C^{\circ}$ ,  $5\text{ }C^{\circ}$ , dan  $10\text{ }C^{\circ}$ .





## BAB 4

### HASIL DAN ANALISA

Pada proses analisa ini, data yang digunakan merupakan hasil dari penelitian dengan media Propana (R-290) dan Isobutana (R-600a). Pengolahan data hasil percobaan ini dibantu dengan menggunakan *software* MatLab 7.8 – R2009A.

#### 4.1 Penurunan Tekanan dengan Metode “Homogeneous” Berdasarkan Data Hasil Percobaan

Untuk dapat digunakan dalam program simulasi MatLab, data dari hasil percobaan yang diperlukan diantaranya :

a. Tekanan Fluida pada Pipa Masukan ( $P_{inlet}$ )

Besar nilai tekanan *inlet* ini didapat dari hasil pemasangan *Pressure transmitter* yang di letakkan sebelum *test section*.

b. Tekanan Fluida pada Pipa Keluaran ( $P_{outlet}$ )

Besar nilai tekanan *inlet* ini didapat dari hasil pemasangan *Pressure transmitter* yang di letakkan setelah *test section*.

c. Temperatur Masuk ( $T_{inlet}$ )

Data temperature didapat dari pemasangan *thermocouple* pada *flange* sebelum *test section*. Hasil pembacaan *thermocouple* sudah dalam satuan *Celcius*.

d. Laju Aliran Rata-Rata / *Flow Rate* ( $\frac{kg}{s}$ )

Laju aliran yang didapat merupakan hasil dari pengalihan Fluks massa yang ditentukan terlebih dahulu saat akan melakukan pengambilan data dengan Luas penampang dari *test section*.

$$\dot{m} \left( \frac{kg}{s} \right) = G \left( \frac{kg}{m^2s} \right) \times A_{in} (m^2)$$

e. Daya (Watt)

Dengan menggunakan transformer, maka daya yang digunakan sebagai beban pemanasan pada pipa dapat diatur sesuai dengan kondisi pengujian yang diinginkan.

## 4.2 Hasil Pengolahan Data untuk Refrigeran Propana (R-290)

Proses percobaan dilakukan dengan 4 kondisi berbeda, dengan parameter nilai *mass fluks* ( $G$ ) berbeda-beda, kondisi 1 - kondisi 3 dan kondisi 2 – kondisi 4 menggunakan nilai *heat fluks* ( $q$ ) yang sama masing-masing  $5 \left( kWatt/m^2 \right)$  dan  $8 \left( kWatt/m^2 \right)$ .

### 4.2.1 Kondisi 1

Berikut data yang digunakan dalam percobaan pertama.

Tabel 4.1 Parameter Percobaan Propana pada Kondisi 1

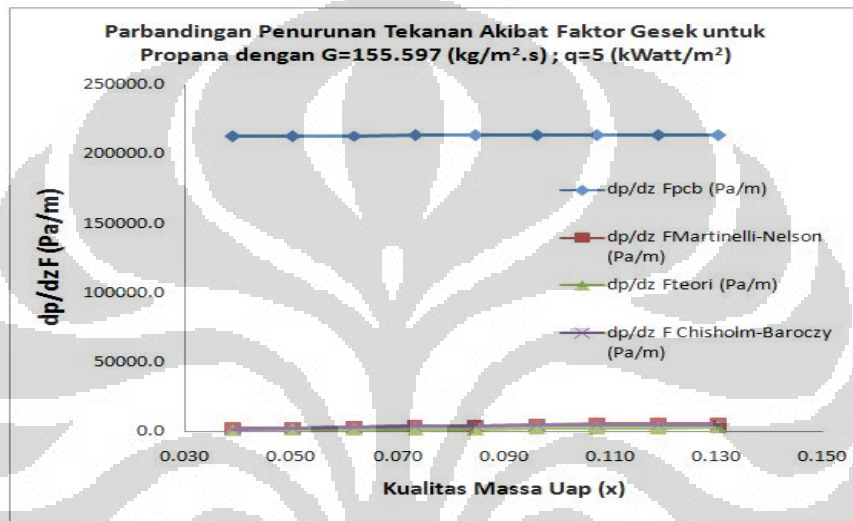
Refrigeran : Propana (R-290)			
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Dia.inlet (mm)	3	Arus (Ampere)	1.21
Dia.out (mm)	5	P inlet (kPa)	479.6
Konduktivitas Termal (k) ( W/m-K)	13.4	P outlet (kPa)	265.6
Panjang kanal (mm)	1000	T inlet (°C)	4.578
Laju Massa ( $\dot{m}$ ) (kg/s)	0.0011	G (kg/m <sup>2</sup> ·s)	155.597
Daya (Watt)	47.1	q/A (kWatt/m <sup>2</sup> )	5
Tegangan (Volt)	39		

Dari parameter-parameter terdapat di Tabel 4.1, dengan bantuan *software MatLab* maka didapat hasil perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Propana pada Kondisi 1

X (Kualitas Massa Uap)	dp/dz A (Pa/m)	dp/dz Fpcb (Pa/m)	dp/dz FMartinelli-Nelson (Pa/m)	dp/dz Fteori (Pa/m)	dp/dz F Chisholm-Baroczy (Pa/m)
0.039	983.008	213016.992	2112.679	1048.431	1186.905
0.050	572.722	213427.278	2613.341	1213.876	2453.003
0.062	438.045	213561.955	3122.860	1394.040	2988.573
0.073	372.659	213627.341	3646.277	1590.446	3536.215
0.085	335.374	213664.626	4188.371	1805.575	4100.835
0.096	312.540	213687.460	4754.159	2042.722	4687.536
0.107	298.393	213701.607	5191.206	2306.096	5003.810
0.119	290.156	213709.844	5467.755	2601.063	5006.879
0.130	286.411	213713.589	5713.250	2934.538	4951.291

Secara grafik perbandingan antara gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek perhitungan  $\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{teori}$  dan gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek percobaan  $\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{pcb}$  terlihat pada gambar 4.1 selain itu, perbandingan juga dilakukan terhadap korelasi lain yaitu korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Korelasi Chisholm-Baroczy (1968).



Gambar 4.1 Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Propana dengan  $G = 155.597 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;  $q = 5 \text{ kWatt/m}^2$

#### 4.2.2 Kondisi 2

Berikut data yang digunakan dalam percobaan kedua.

Tabel 4.3 Parameter Percobaan Propana pada Kondisi 2

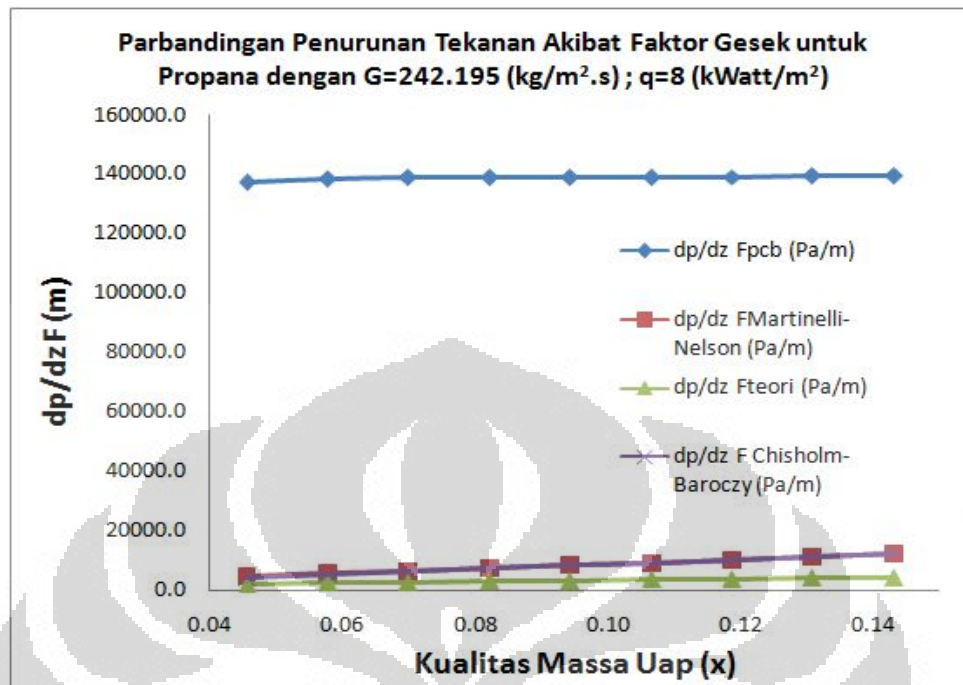
Refrigeran : Propana (R-290)			
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Dia.inlet (mm)	3	Arus (Ampere)	1.125
Dia.out (mm)	5	P inlet (kPa)	620
Konduktivitas Termal (k) ( W/m·K)	13.4	P outlet (kPa)	480
Panjang kanal (mm)	1000	T inlet (°C)	13.893
Laju Massa ( $\dot{m}$ ) (kg/s)	0.001712	G (kg/m <sup>2</sup> ·s)	242.195
Daya (Watt)	75.36	q/A (kWatt/m <sup>2</sup> )	8
Tegangan (Volt)	67		

Dari parameter-parameter yang terdapat di Tabel 4.3 dengan bantuan *software MatLab* maka didapat hasil perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Propana pada Kondisi 2

Posisi (m)	X (Kualitas Massa Uap)	dp/dz A (Pa/m)	dp/dz $F_{pcb}$ (Pa/m)	dp/dz $F_{Martinelli-Nelson}$ (Pa/m)	dp/dz $F_{teori}$ (Pa/m)	dp/dz $F_{Chisholm-Baroczy}$ (Pa/m)
0.100	0.046	2409.866	137590.134	4600.184	2064.781	2409.866
0.200	0.058	1371.136	138628.864	5535.004	2310.099	1371.136
0.300	0.070	1025.313	138974.687	6459.901	2565.373	1025.313
0.400	0.082	853.196	139146.804	7380.110	2829.969	853.196
0.500	0.094	750.965	139249.035	8299.563	3104.126	750.965
0.600	0.107	684.033	139315.967	9221.472	3388.481	684.033
0.700	0.119	637.595	139362.405	10148.631	3683.901	637.595
0.800	0.131	604.269	139395.731	11083.607	3991.409	604.269
0.900	0.143	579.975	139420.025	12028.860	4312.162	579.975

Secara grafik perbandingan antara gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek perhitungan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{teori}$  dan gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek percobaan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{pcb}$  terlihat pada gambar 4.2 selain itu, perbandingan juga dilakukan terhadap korelasi lain yaitu korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Korelasi Chisholm-Baroczy (1968).



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Propana dengan  $G=242.195 \text{ kg/m}^2.s$ ;  $q=8 \text{ kWatt/m}^2$

#### 4.2.3 Kondisi 3

Berikut data yang digunakan dalam percobaan Ketiga.

Tabel 4.5 Parameter Percobaan Propana pada Kondisi 3

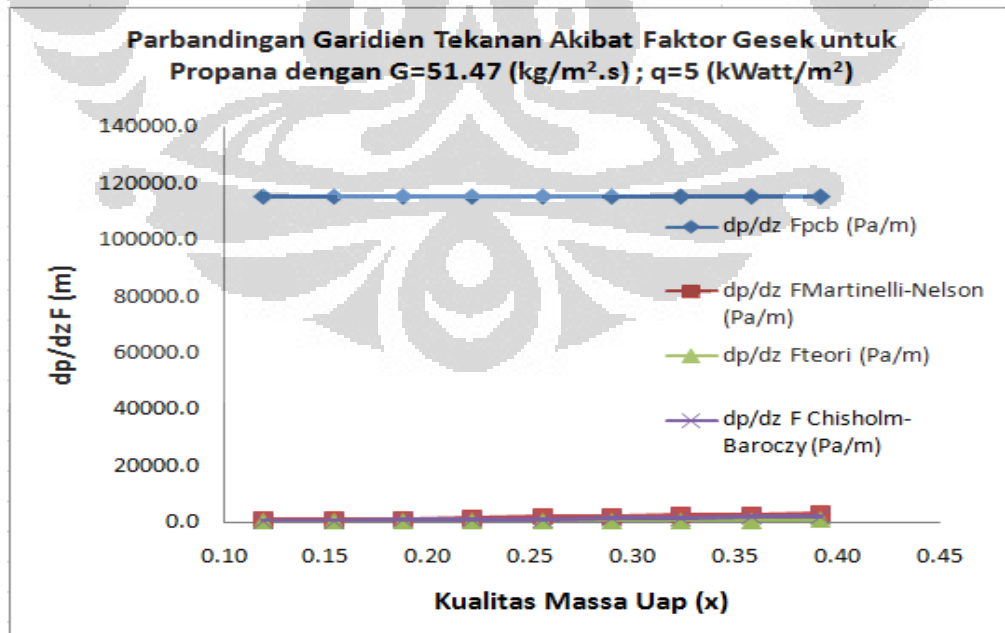
Refrigeran : Propana (R-290)			
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Dia.inlet (mm)	3	Arus (Ampere)	1.21
Dia.out (mm)	5	P inlet (kPa)	417.2
Konduktivitas Termal (k) ( W/m.K)	13.4	P outlet (kPa)	301.65
Panjang kanal (mm)	1000	T inlet (°C)	8.916
Laju Massa ( $\dot{m}$ ) (kg/s)	0.0003638	G (kg/m <sup>2</sup> .s)	51.47
Daya (Watt)	47.1	q/A (kWatt/m <sup>2</sup> )	5
Tegangan (Volt)	39		

Dari parameter-parameter yang terdapat di Tabel 4.5 dengan bantuan *software MatLab* maka didapat hasil perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Propana pada Kondisi 3

Posisi (m)	X (Kualitas Massa Uap)	dp/dz A (Pa/m)	dp/dz F <sub>pcb</sub> (Pa/m)	dp/dz F <sub>Martinelli-Nelson</sub> (Pa/m)	dp/dz F <sub>teori</sub> (Pa/m)	dp/dz F <sub>Chisholm-Baroczy</sub> (Pa/m)
0.100	0.119	190.230	115359.770	850.383	300.679	339.734
0.200	0.153	119.320	115430.680	1088.003	361.489	689.296
0.300	0.188	97.711	115452.289	1339.471	423.308	860.747
0.400	0.222	88.732	115461.268	1607.973	486.694	1046.095
0.500	0.256	85.053	115464.947	1896.884	552.136	1248.137
0.600	0.290	84.240	115465.760	2210.009	620.095	1470.107
0.700	0.324	85.261	115464.739	2551.801	691.027	1715.858
0.800	0.358	87.612	115462.388	2927.593	765.407	1990.084
0.900	0.392	91.031	115458.969	3343.906	843.741	2298.590

Secara grafik perbandingan antara gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek perhitungan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{teori}$  dan gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek percobaan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{pcb}$  terlihat pada gambar 4.3 selain itu, perbandingan juga dilakukan terhadap korelasi lain yaitu korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Korelasi Chisholm-Baroczy (1968).



Gambar 4.3 Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Propana dengan  $G = 51.47 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;  $q=5 \text{ kWatt/m}^2$

#### 4.2.4 Kondisi 4

Berikut data yang digunakan dalam percobaan Keempat.

Tabel 4.7 Parameter Percobaan Propana pada Kondisi 4

Refrigeran : Propana (R-290)			
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Dia.inlet (mm)	3	Arus (Ampere)	1.125
Dia.out (mm)	5	P inlet (kPa)	321.6
Konduktivitas Termal (k) ( W/m.K)	13.4	P outlet (kPa)	222.5
Panjang kanal (mm)	1000	Tin (°C)	-11.597
Laju Massa (m) (kg/s)	0.0006366	G (kg/m <sup>2</sup> .s)	90.073
Daya (Watt)	75.36	q/A (kWatt/m <sup>2</sup> )	8
Tegangan (Volt)	67		

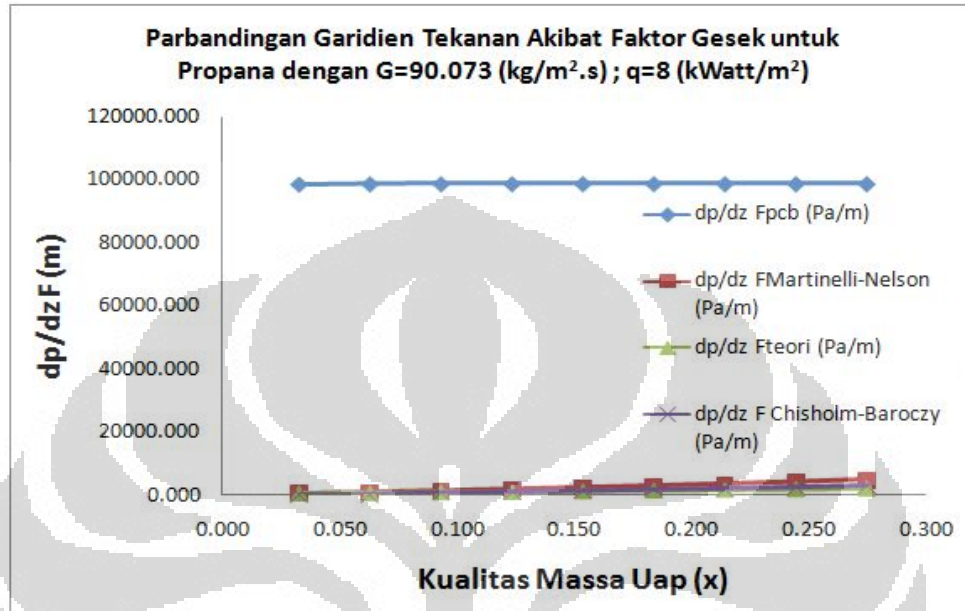
Dari parameter-parameter yang terdapat di Tabel 4.7 dengan bantuan *software MatLab* maka didapat hasil perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Propana pada Kondisi 4

Posisi (m)	X (Kualitas Massa Uap)	dp/dz A (Pa/m)	dp/dz F <sub>pcb</sub> (Pa/m)	dp/dz F <sub>Martinelli-Nelson</sub> (Pa/m)	dp/dz F <sub>teori</sub> (Pa/m)	dp/dz F <sub>Chisholm-Baroczy</sub> (Pa/m)
0.100	0.033	324.055	98775.945	607.181	472.179	148.302
0.200	0.063	237.677	98862.323	1050.671	683.934	336.333
0.300	0.093	209.065	98890.935	1503.751	892.815	918.210
0.400	0.123	197.039	98902.961	1977.934	1103.063	1232.787
0.500	0.154	193.094	98906.906	2481.045	1317.933	1570.736
0.600	0.184	194.273	98905.727	3020.185	1540.012	1937.543
0.700	0.214	199.266	98900.734	3602.745	1771.591	2339.145
0.800	0.245	207.421	98892.579	4236.989	2014.889	2782.354
0.900	0.275	218.410	98881.590	4932.535	2272.204	3275.254

Secara grafik perbandingan antara gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek perhitungan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{teori}$  dan gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek percobaan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{pcb}$  terlihat pada gambar 4.4 selain itu, perbandingan juga dilakukan

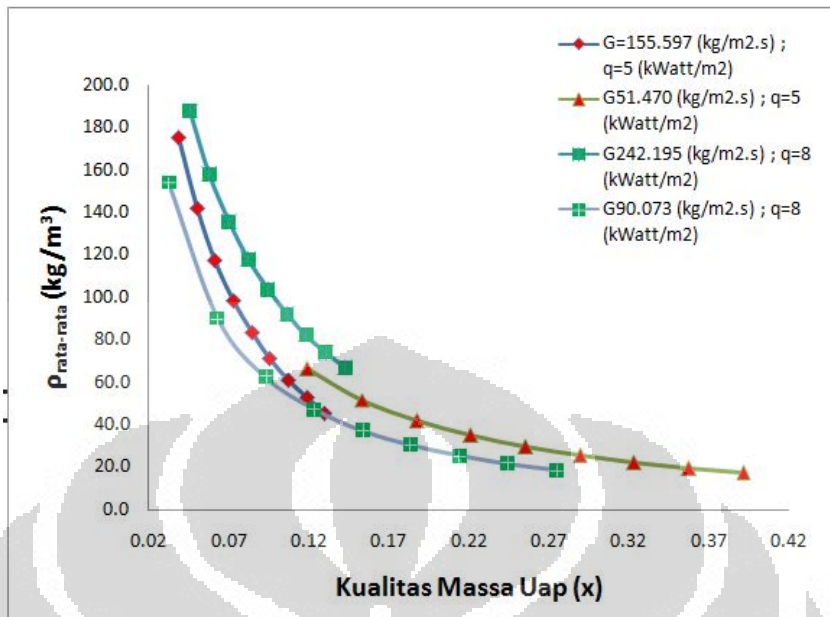
terhadap korelasi lain yaitu korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Korelasi Chisholm-Baroczy (1968).



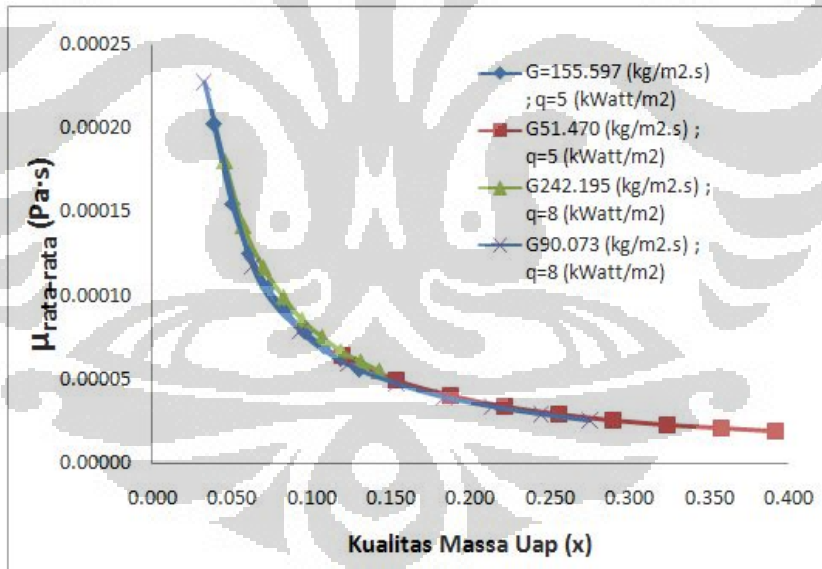
Gambar 4.4 Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Propana dengan  $G=90.073 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;  $q=8 \text{ kWatt/m}^2$

Dari semua kondisi pengujian untuk refrigeran propana (R-290), penurunan tekanan akibat faktor gesek yang terjadi masih di dominasi oleh fasa cairnya. Sehingga, nilai penurunan tekanan akibat faktor gesek ( $\frac{dp}{dz} F$ ) mengalami kenaikan terhadap kualitas massa uapnya ( $x$ ). Hal tersebut dapat dilihat dari nilai *density* rata-rata ( $\bar{\rho}$ ) dan *viskositas* rata-ratanya ( $\bar{\mu}$ ) disetiap kondisi percobaan, semakin kecil nilai *density* rata-ratanya ( $\bar{\rho}$ ) maka penuruna tekanan akibat gesekan akan semakin besar dan semakin kecil nilai viskositas rata-ratanya ( $\bar{\mu}$ ) maka nilai faktor geseknya ( $f_{TP}$ ) akan semakin kecil pula sehingga penurunannya juga semakin kecil ( $\frac{dp}{dz} F$ ).





Gambar 4.5 Grafik Penurunan Nilai Densitas Rata-Rata ( $\bar{\rho}$ ) Propana pada Masing-Masing Kondisi Pengujian



Gambar 4.6 Grafik Penurunan Nilai Viskositas Rata-Rata ( $\bar{\mu}$ ) Propana pada Masing-Masing Kondisi Pengujian

### 4.3 Hasil Pengolahan Data untuk Refrigeran Isobutana (R-600a)

Proses percobaan dilakukan dengan 2 kondisi berbeda, kondisi yang di ujikan adalah dengan menaikkan nilai *heat fluks* ( $q$ ) disetiap kondisi dan menurunkan nilai nilai *mass fluks* ( $G$ ) secara bertahap.

#### 4.3.1 Kondisi 1

Berikut data yang digunakan dalam percobaan pertama.

Tabel 4.9 Parameter Percobaan Isobutana pada Kondisi 1

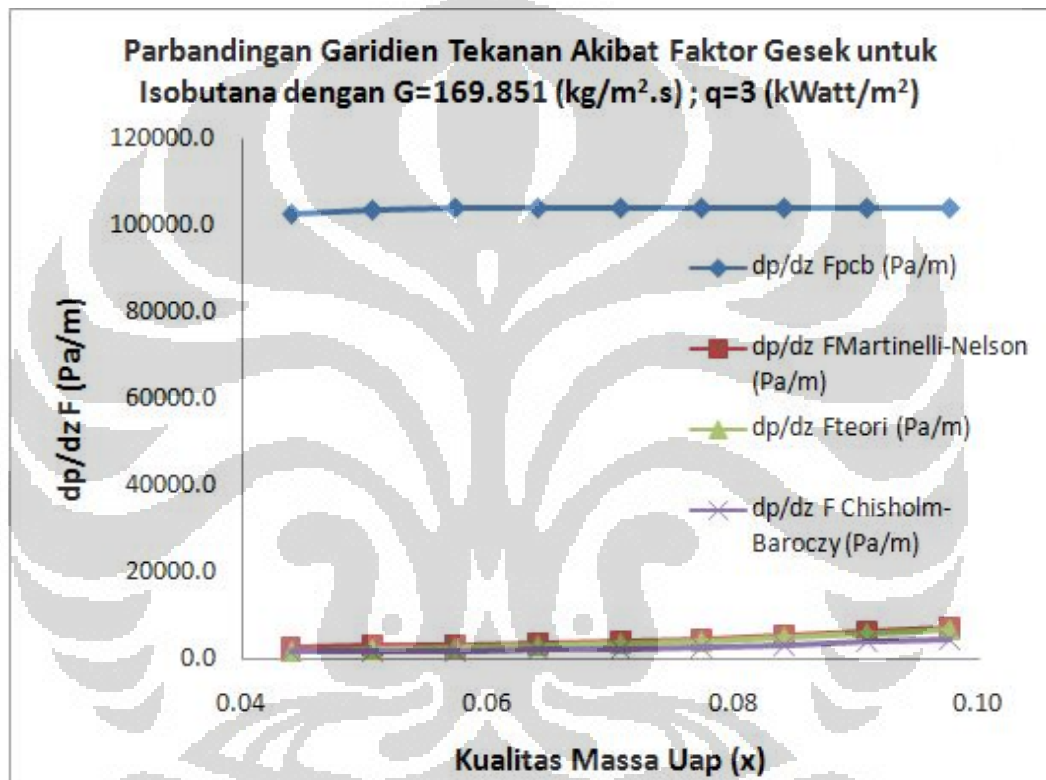
Refrigeran : Isobutana (R-600a)			
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Dia.inlet (mm)	3	Arus (Ampere)	1.4
Dia.out (mm)	5	P inlet (kPa)	174.8
Konduktivitas Termal (k) ( W/m·K)	13.4	P outlet (kPa)	70
Panjang kanal (mm)	1000	Tin (°C)	8.873
Laju Massa ( $\dot{m}$ ) (kg/s)	0.0012	G (kg/m <sup>2</sup> ·s)	169.851
Daya (Watt)	28.27	q/A (kWatt/m <sup>2</sup> )	3
Tegangan (Volt)	20		

Dari parameter-parameter yang terdapat di Tabel 4.9 dengan bantuan *software MatLab* maka didapat hasil perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Isobutana pada Kondisi 1

Posisi (m)	X (Kualitas Massa Uap)	dp/dz A (Pa/m)	dp/dz Fpcb (Pa/m)	dp/dz F Martinelli-Nelson (Pa/m)	dp/dz Fteori (Pa/m)	dp/dz F Chisholm-Baroczy (Pa/m)
0.100	0.044	1818.593	102981.407	2786.403	2013.864	1878.079
0.200	0.051	1018.215	103781.785	3040.119	2355.899	1966.719
0.300	0.057	754.867	104045.133	3271.047	2739.021	2018.540
0.400	0.064	626.616	104173.384	3579.172	3173.154	2138.607
0.500	0.071	553.300	104246.700	4132.732	3671.409	2491.073
0.600	0.078	508.468	104291.532	4765.380	4251.568	2895.270
0.700	0.084	481.132	104318.868	5499.111	4938.458	3365.878
0.800	0.091	466.275	104333.725	6365.060	5767.931	3923.772
0.900	0.098	461.802	104338.198	7409.049	6793.880	4599.840

Secara grafik perbandingan antara gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek perhitungan  $\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{teori}$  dan gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek percobaan  $\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{pcb}$  terlihat pada gambar 4.7 selain itu, perbandingan juga dilakukan terhadap korelasi korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Korelasi Chisholm-Baroczy (1968).



Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Isobutana dengan  $G=169.851 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ ;  $q=3 \text{ kWatt/m}^2$

#### 4.3.2 Kondisi 2

Berikut data yang digunakan dalam percobaan pertama.

Tabel 4.11 Parameter Percobaan Isobutana pada Kondisi 2

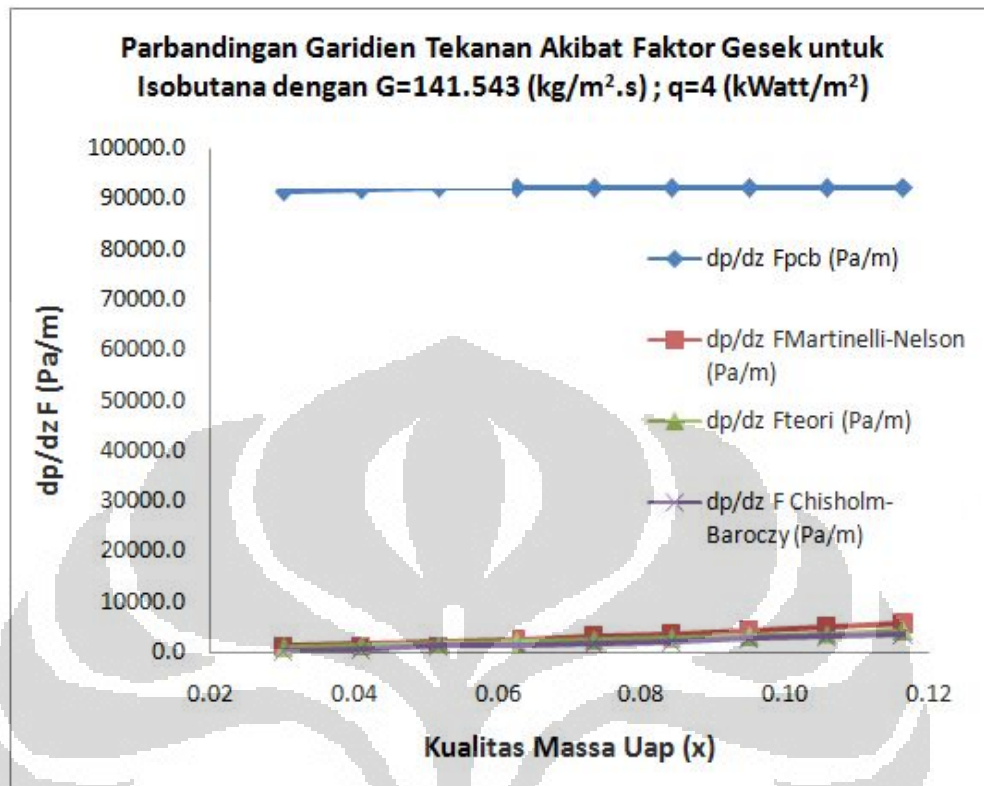
Refrigeran : Isobutana (R-600a)			
Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
Dia.inlet (mm)	3	Arus (Ampere)	1.57
Dia.out (mm)	5	P inlet (kPa)	190.3
Konduktivitas Termal (k) ( W/m·K)	13.4	P outlet (kPa)	97.7
Panjang kanal (mm)	1000	Tin (°C)	8.613
Laju Massa ( $\dot{m}$ ) (kg/s)	0.001	G (kg/m <sup>2</sup> ·s)	141.543
Daya (Watt)	37.7	q/A (kWatt/m <sup>2</sup> )	4
Tegangan (Volt)	24		

Dari parameter-parameter yang terdapat di Tabel 4.11 dengan bantuan *software MatLab* maka didapat hasil perhitungan sebagai berikut :

Tabel 4.12 Hasil Perhitungan MatLab untuk Percobaan Isobutana pada Kondisi 2

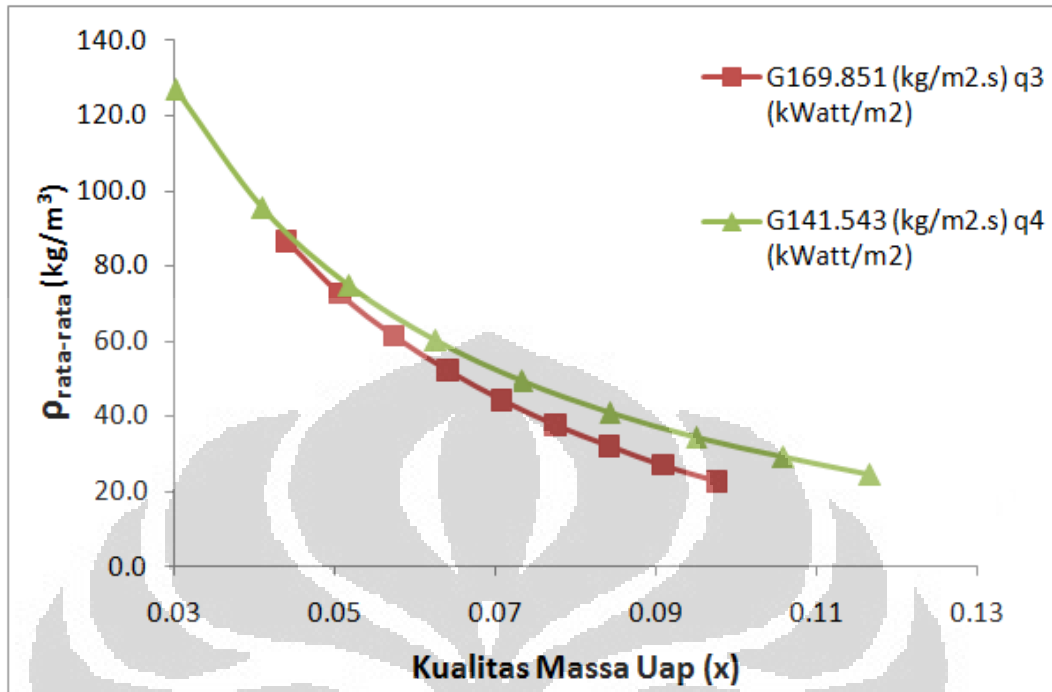
Posisi (m)	X (Kualitas Massa Uap)	dp/dz A (Pa/m)	dp/dz Fpcb (Pa/m)	dp/dz FMartinelli-Nelson (Pa/m)	dp/dz Fteori (Pa/m)	dp/dz F Chisholm-Baroczy (Pa/m)
0.100	0.030	951.977	91648.023	1298.723	1043.633	317.677
0.200	0.041	578.417	92021.583	1717.067	1342.376	602.141
0.300	0.052	453.962	92146.038	2163.266	1660.717	1265.800
0.400	0.063	392.791	92207.209	2644.994	2004.355	1573.804
0.500	0.073	357.842	92242.158	3170.505	2379.739	1911.356
0.600	0.084	336.887	92263.113	3749.439	2794.569	2285.057
0.700	0.095	324.838	92275.162	4393.617	3258.396	2703.065
0.800	0.106	319.349	92280.651	5118.029	3783.457	3175.796
0.900	0.117	319.368	92280.632	5942.241	4385.887	3716.930

Secara grafik perbandingan antara gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek perhitungan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{teori}$  dan gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek percobaan  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{pcb}$  terlihat pada gambar 4.8 selain itu, perbandingan juga dilakukan terhadap korelasi yaitu korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Korelasi Chisholm-Baroczy (1968).

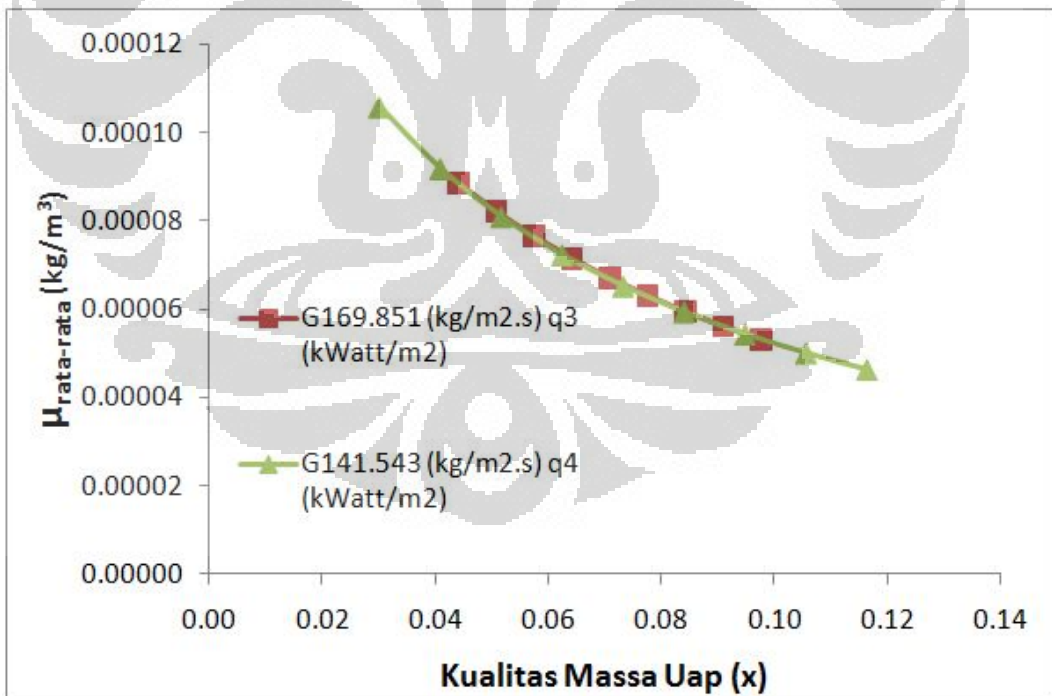


Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Gradien Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Isobutana dengan  $G=141.543 \text{ kg/m}^2.s$ ;  $q=4 \text{ kWatt/m}^2$

Sama seperti pengujian untuk refrigeran R-290, Gradien penurunan tekanan yang diakibatkan faktor gesek  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)$  untuk isobutana (R-600a) juga mengalami peningkatan karena adanya kenaikan kualitas massa uap ( $x$ ) di setiap posisi pengambilan data. Dari hasil percobaan refrigeran isobutana (R-600a) penurunan tekanan akibat faktor gesek yang terjadi juga masih di dominasi oleh fasa cairnya. Hal tersebut juga dilihat dari nilai *density* rata-rata ( $\bar{\rho}$ ) dan viskositas rata-ratanya ( $\bar{\mu}$ ) disetiap kondisi percobaan, semakin kecil nilai *density* rata-ratanya ( $\bar{\rho}$ ) maka penuruna tekanan akibat gesekan akan semakin besar dan semakin kecil nilai viskositas rata-ratanya ( $\bar{\mu}$ ) maka nilai faktor geseknya ( $f_{TP}$ ) akan semakin kecil pula sehingga penurunan tekanannya juga semakin kecil  $\left(\frac{dp}{dz} F\right)$ .



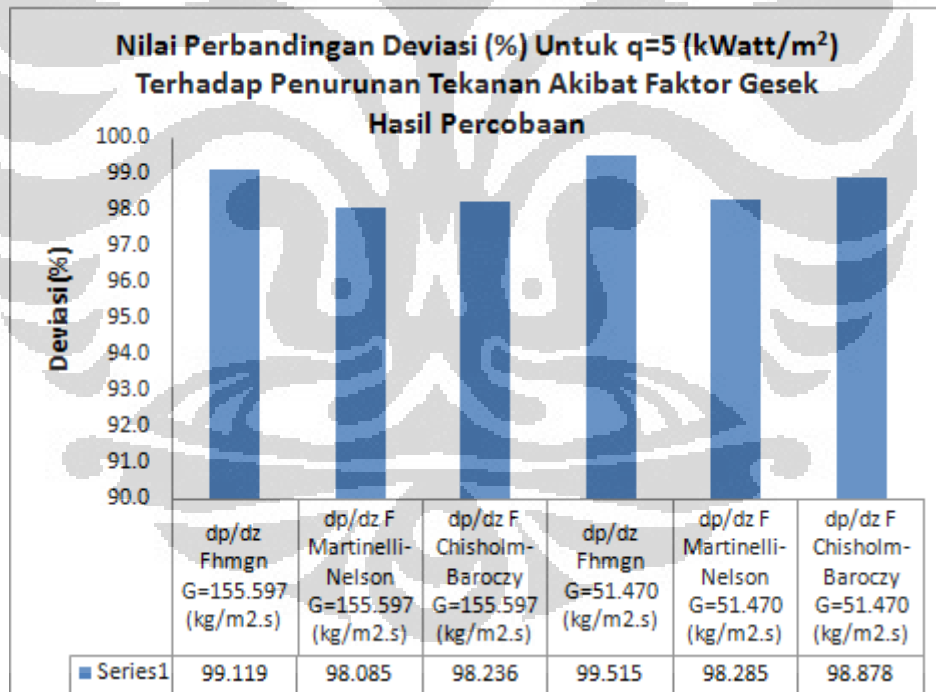
Gambar 4.9 Grafik Penurunan Nilai Densitas Rata-Rata ( $\rho$ ) Isobutana pada Masing-Masing Kondisi Pengujian



Gambar 4.10 Grafik Penurunan Nilai Viskositas Rata-Rata ( $\mu$ ) Isobutana pada Masing-Masing Kondisi Pengujian

#### 4.4 Deviasi Nilai Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Refrigeran Propana (R-290)

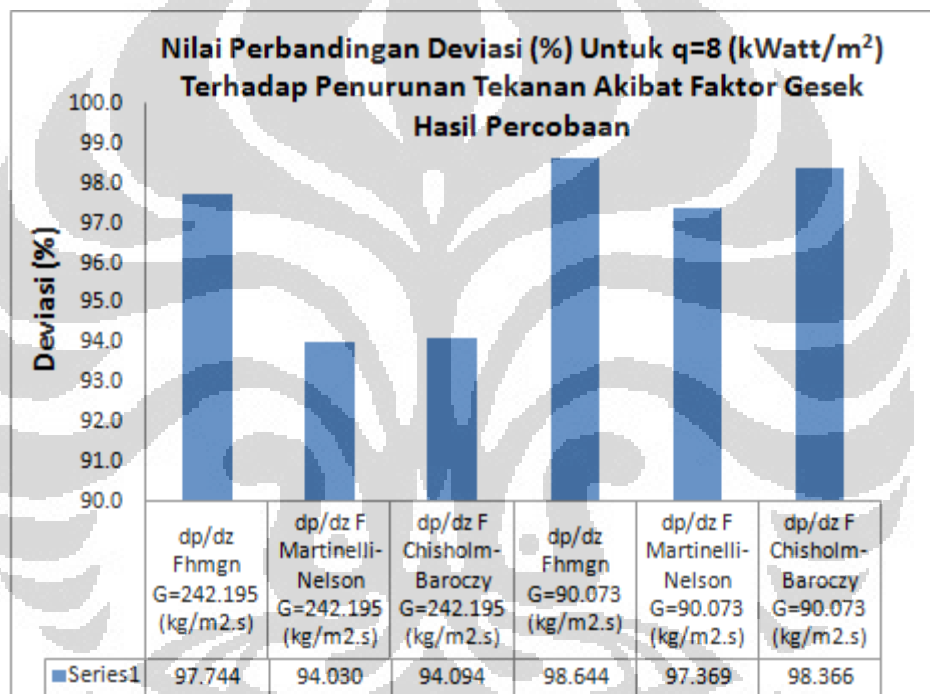
Deviasi nilai penurunan tekanan akibat faktor gesek secara teori untuk propana akan dibandingkan dengan perhitungan secara teoritis, korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Korelasi Chisholm-Baroczy (1968). Parameter yang digunakan dalam perbandingan ini adalah nilai *heat fluks* ( $q$ ) dengan besar yang sama pada tiap kondisi pengambilan data. Yaitu perbandingan antara kondisi 1 dan kondisi 3 dimana *heat fluks* ( $q$ ) yang digunakan adalah sebesar  $5 \text{ kWatt/m}^2$  dan  $8 \text{ kWatt/m}^2$  untuk kondisi 2 dan kondisi 4. Nilai deviasi gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek pada kanal mini horizontal untuk refrigeran propana (R-290) antara hasil percobaan dengan persamaan teori secara homogenus model untuk *heat fluks* ( $q$ ) sebesar  $5 \text{ kWatt/m}^2$  dapat dilihat pada diagram batang berikut ini :



Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Deviasi (%) R-290 untuk  $q=5 \text{ kWatt/m}^2$  Terhadap Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek Secara *Homogeneous* Model

Dari gambar 4.11 terlihat bahwa nilai penyebaran (Deviasi) rata-rata untuk perbandingan terhadap penurunan tekanan akibat faktor gesek model aliran *homogeneous* dengan menggunakan refrigeran propana (R-290), korelasi terhadap

Martinelli-Nelson (1948) memiliki nilai deviasi rata-rata yang terkecil dibandingkan dengan metode *homogeneous* dan korelasi Chisholm-Baroczy (1968), pada masing masing kondisi dengan *mass fluks* ( $G$ ) yang berbeda-beda yaitu 98.085 % untuk *mass fluks* 155.597 ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) dan 98.285 % untuk *mass fluks* 51.470 ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) dengan *heat fluks* ( $q$ ) sebesar 5  $\text{kWatt/m}^2$ . Sedangkan nilai deviasi gradien penurunan tekanan akibat faktor gesek pada kanal mini horizontal untuk refrigeran propana (R-290) antara hasil percobaan dengan persamaan teori secara *homogeneous* model untuk *heat fluks* ( $q$ ) sebesar 8  $\text{kWatt/m}^2$  dapat dilihat pada gambar 4.12 barikut ini :



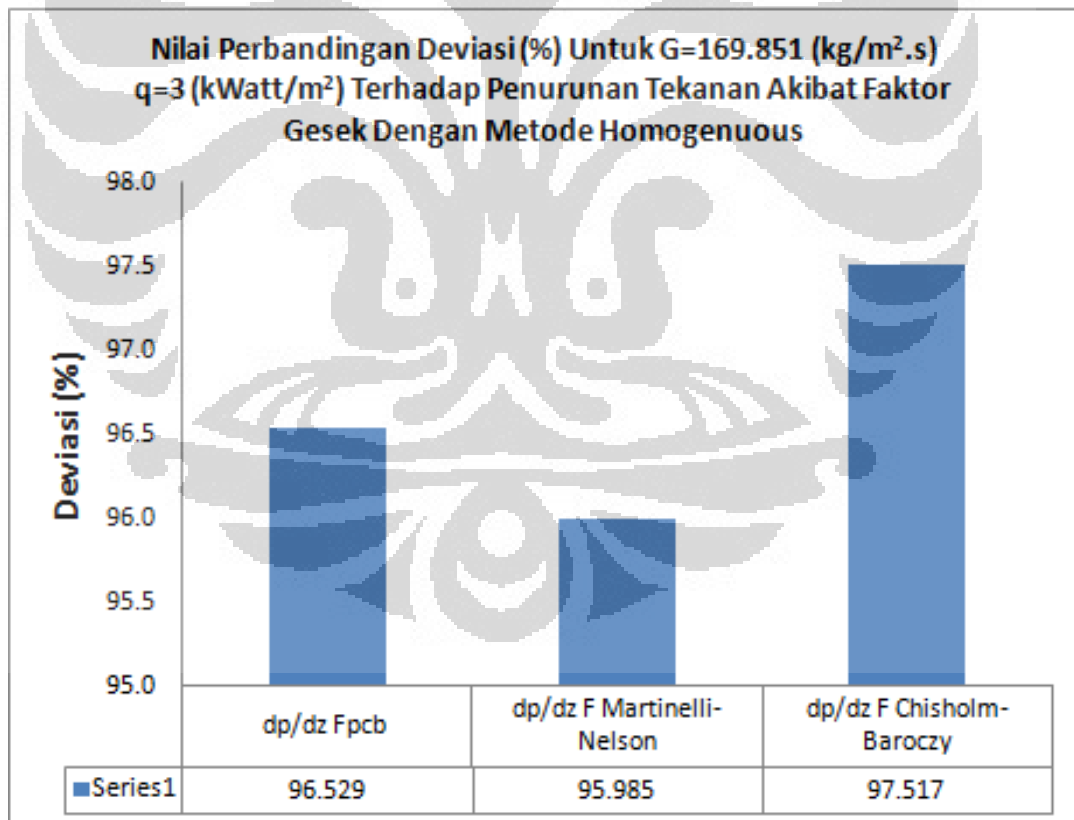
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Deviasi (%) R-290 untuk  $q=8$   $\text{kWatt/m}^2$  Terhadap Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek Secara *Homogeneous* Model

Untuk kondisi *heat fluks* sebesar 8 ( $\text{kWatt/m}^2$ ) korelasi terhadap Martinelli-Nelson (1948) masih menjadi yang terendah dibandingkan nilai deviasi rata-rata penurunan tekanan akibat gesekan metode *homogeneous* dan korelasi Chisholm-Baroczy (1968) terhadap penurunan tekanan akibat faktor gesek model aliran *homogeneous* yaitu 94.030 % untuk *mass fluks* 242.195 ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) dan 97.369 % untuk *mass fluks* 90.073 ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ).

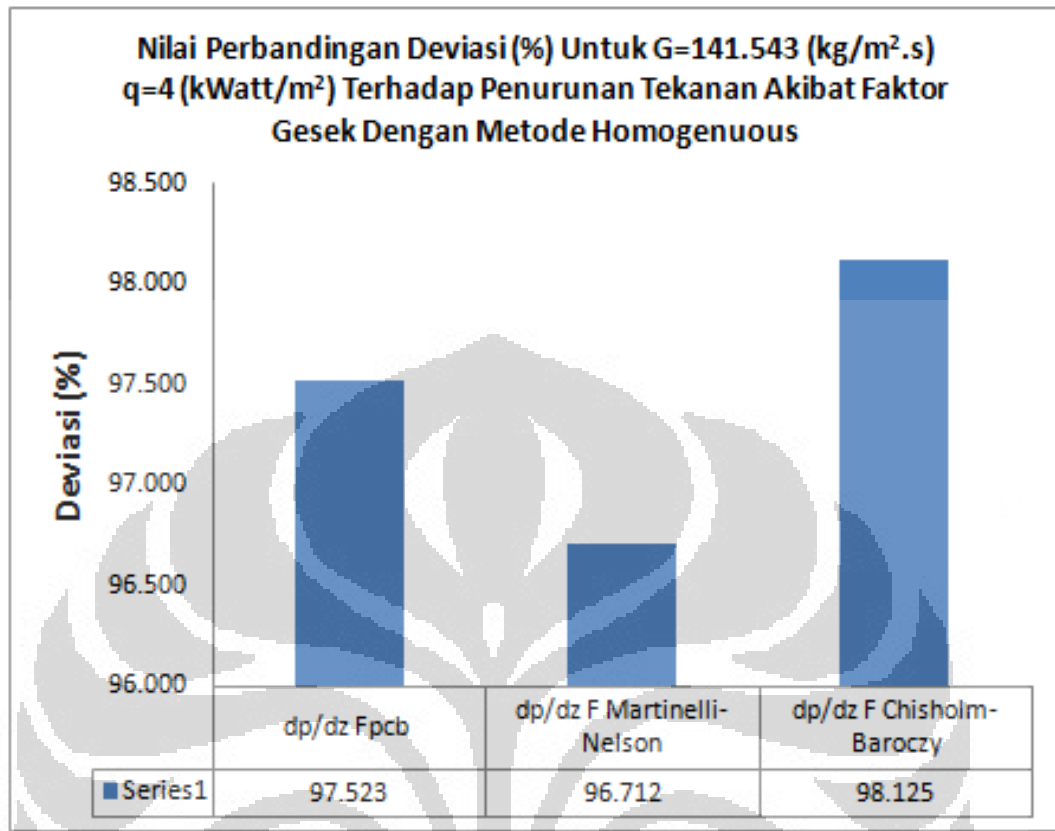


#### 4.5 Deviasi Nilai Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek untuk Refrigeran Isobutana (R-600a).

Untuk refrigeran isobutana (R-600a) percobaan dilakukan dengan 2 kondisi yang berbeda, dimana kondisi yang dibuat adalah dengan menurunkan nilai *mass fluks* ( $G$ ) dan menambahkan nilai *heat fluks* ( $q$ ). Hasil dari perbandingan nilai deviasi rata-rata menggunakan refrigeran isobutana (R-600a) adalah bahwa korelasi Martinelli-Nelson (1948) selalu memiliki nilai yang paling kecil terhadap penurunan tekanan akibat faktor gesek model aliran *homogeneous* dibandingkan dengan data hasil percobaan maupun korelasi dari Chisholm-Baroczy (1968) pada tiap kondisi percobaan. Perbandingan besar nilai deviasi rata-rata terhadap penurunan tekanan akibat faktor gesek menggunakan metoda aliran *homogeneous* tersebut dapat dilihat pada gambar 4.13 dan gambar 4.14 berikut ini



Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Deviasi (%) R-600a untuk  $G=169.851$  ( $\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$ );  $q=3$   $\text{kWatt}/\text{m}^2$  Terhadap Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek Secara *homogeneous* Model



Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Deviasi (%) R-600a untuk  $G=141.543 \text{ (kg/m}^2 \cdot \text{s)}$ ;  $q=4 \text{ kWatt/m}^2$  Terhadap Penurunan Tekanan Akibat Faktor Gesek Secara *Homogeneous* Model

Dari semua Kondisi pengujian penurunan tekanan akibat faktor gesek pada evaporasi kanal mini horizontal menggunakan refrigeran isobutana (R-600a) perbandingan terhadap korelasi Martinelli-Nelson (1948) menjadi yang terkecil yaitu 95.985% dan 96.712% masing-masing untuk *mass fluks*  $169.851 \text{ (kg/m}^2 \cdot \text{s)}$  dan  $141.543 \text{ (kg/m}^2 \cdot \text{s)}$ . Penggunaan kanal mini mengakibatkan nilai deviasi rata-rata terhadap teori model aliran *homogeneous*, korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Chisholm-Baroczy (1968) menjadi sangat besar.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Dari percobaan yang dihasilkan dalam menentukan nilai penurunan tekanan pada aliran evaporasi aliran dua fasa di kanal mini horizontal dengan diameter dalam 3 (mm) menggunakan refrigeran propana (R-290) dan isobutana (R-600a) didapatkan beberapa hasil sebagai berikut :

1. Pada kondisi *heat flux*( $q$ ) yang sama, semakin besar nilai *mass flux* ( $G$ ), kualitas massa uap ( $x$ ) yang terjadi akan lebih kecil di setiap titik percobaan dan penurunan tekanan akibat faktor gesek akan semakin besar.
2. Penurunan tekanan pada evaporasi aliran dua fasa di kanal mini horizontal menggunakan model *homogeneous* ( $\frac{dp}{dz}$ ) lebih besar diakibatkan oleh penurunan tekanan akibat faktor gesek ( $\frac{dp}{dz} F$ ) dibandingkan penurunan tekanan akibat adanya perubahan percepatan aliran fluida ( $\frac{dp}{dz} a$ ). Nilai persentase rata-rata penurunan tekanan akibat adanya percepatan aliran rata-rata adalah 0.7% untuk refrigeran propana (R-290) dan 2.8% untuk isobutana (R-600a).
3. Pada kondisi kualitas uap ( $x$ ) rendah, penurunan tekanan karena adanya faktor gesek, lebih dominan disebabkan oleh perubahan nilai densitas rata-rata fluida ( $\bar{\rho}$ ) dibandingkan dengan perubahan viskositas rata-ratanya ( $\bar{\mu}$ ).
4. Penggunaan kanal mini mengakibatkan nilai deviasi rata-rata terhadap teori model aliran *homogeneous*, korelasi Martinelli-Nelson (1948) dan Chisholm-Baroczy (1968) menjadi sangat besar. Semakin kecil nilai densitas rata-rata pada aliran dua fasa maka penurunan tekanan akibat faktor gesek juga akan semakin besar.

## DAFTAR PUSTAKA

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

Ghiaasiaan, M.S., (2008). *Two-Phase Flow, Boiling and Condensation* Georgia Institute of Technology.

A.S. Pamitran, Kwang-II Choi, Jong-Taek Oh, Hoo-Kyu Oh. (2009). *Pressure drop and heat transfer during two-phase flow vaporization of propane in horizontal smooth minichannels. International Journal of Refrigeration, 32, 837-845.*

A.S. Pamitran, Kwang-II Choi, Jong-Taek Oh, Hoo-Kyu Oh. (2008). *Two-phase pressure drop of R-410A in horizontal smooth mini channels. International Journal of Refrigeration. 31, 119-129*

Fox, Robert W., McDonald, Alan T. & Pritchard, Philip J. (2003). *Introduction to Fluid Mechanics* (6th ed.). United States of America: John Wiley & Sons.

Quiben, Jesus Moreno and R. Thome, John. (2007). *Flow Pattern Based Two-Phase Frictional Pressure Drop Model for Horizontal Tube. International Journal of Heat and Flow. 28, 1060-1072*

## LAMPIRAN

### Kode Program Matlab

---

```
clear all
clc

fluid='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;

    Tsat(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);

    Miurata(n)=1/((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));
    fTP(n)=0.079*((G*Di)/Miurata(n))^-0.25);

    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);
    vFG(n)=(vF(n)+vG(n))/2;

    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;
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;
    Rhorata(n)=1/((xZ(n)/rhog(n))+((1-xZ(n))/rhof(n)));

    xT(n)=(rhog(n)/rhof(n))^0.5*((MiuF(n)/MiuG(n))^0.125)*(((1-xZ(n))/xZ(n))^0.875);

    Tao(n)=(rhof(n)/rhog(n))^0.5*((MiuG(n)/MiuF(n))^(0.25/2));

    B(n)=((cHi(n)*Tao(n))-(2^(0.25-2))+2)/(Tao(n)^2-1);

    ChiBar(n)=(1+(Tao(n)^2-1))*(B(n)*((xZ(n)^((2-0.25)*0.5)))*
    ((1-xZ(n))^((2-0.25)*0.5))+xZ(n)^(2-0.25));

    MN(n)=(1+(20/xT(n))+1/(xT(n))^2)*((1-xZ(n))^1.75);

    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*fTP(n)*(G^2))/(Rhorata(n)*Di);

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

    pDropMN(n)=(2*fF(n)*(G^2))/(rhof(n)*Di)*MN(n);

    pDropCB(n)=(2*fF(n)*(G^2))/(rhof(n)*Di)*ChiBar(n);

    MFTPcal(n)=(1+(xZ(n)*(vG(n)-vF(n))/vF(n)))*((1+(xZ(n)*(MiuG(n)-
    MiuF(n))/MiuG(n)))^(-0.25));
    MFTPexp(n)=pDropFTPexp(n)/(2*fF(n)*(G^2)*vF(n)/Di);
    CExp(n)=(MFTPexp(n)-1-(1/(xMarti(n)^2)))*xMarti(n);

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;
    meanMN(n)=abs((pDropMN(n)-pDropFTPexp(n))/pDropFTPexp(n)*100);
    meanCB(n)=abs((pDropCB(n)-pDropFTPexp(n))/pDropFTPexp(n)*100);

end
meanDev=sum(mean)/n;
meanDevAve=sum(meanAve)/n;

```

```

% output
fprintf('\nposisi      x      dp/dz A\t      dp/dz F exp      dp/dz F
cal\n');
for n=1:9
    fprintf('%0.3fm\t %0.3f\t %0.3f Pa \t %0.3f Pa\t %0.3f
Pa\n',z(n),xZ(n),pDropATP(n),pDropFTPexp(n),pDropFTPCal(n));
end

fprintf('\nNilai Mean Deviasi = %0.3f %%\n',meanDev);
fprintf('\nNilai Average Deviasi = %0.3f %%\n',meanDevAve);

```

---

```

%FRICTION

```

```

function value=friction(re)
% mencari nilai friction dari Reynold's number
% friction(re)
if re == 0
    value=0;
elseif re < 2300
    value=16/re;
elseif re > 3000
    value=0.079/(re^0.25);
else
    value=((re-2300)/(3000-2300)*((0.079/(3000^0.25))-
(16/2300))+16/2300);
end

```

---

```

%CHISOLM

```

```

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
```

