



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENURUNAN TEKANAN UNTUK ALIRAN EVAPORASI DUA
FASA PADA KANAL MINI HORIZONTAL DENGAN
REFRIGERAN R-290**

SKRIPSI

MUHAMAD HANAN THOMAS
08 06 36 8742

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
DESEMBER 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENURUNAN TEKANAN UNTUK ALIRAN EVAPORASI DUA
FASA PADA KANAL MINI HORIZONTAL DENGAN
REFRIGERAN R-290**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

MUHAMAD HANAN THOMAS
08 06 36 8742

FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
DESEMBER 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Muhamad Hanan Thomas
NPM : 08 06 36 8742
Tanda tangan :
Tanggal : 28 Desember 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Muhamad Hanan Thomas
NPM : 08 06 36 8742
Program Studi : Sarjana Teknik Mesin
Judul Skripsi : Penurunan Tekanan Untuk Aliran Evaporasi Dua Fasa Pada Kanal Mini Horizontal Dengan Refrigeran R-290

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 Mesin, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Agus S. Pamitran ST., M.Eng. (.....)
Penguji : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih M.T. (.....)
Penguji : Dr. -Ing. Ir. Nasruddin M.Eng. (.....)
Penguji : Ardiyansyah S.T., M.Eng. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2010

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) Kisna Dewangga, Giant Hermawan dan Muhamad Afandi selaku teman sekelompok yang telah bekerja sama dengan penulis selama penyusunan skripsi ini
- 4) Dr. –Ing. Ir. Nasruddin M.Eng., Yulianto dan teman-teman lab. Pendingin, Kuncoro, Gangka, Luthfi, Arnas, Luky, M. Iqbar dan M. Taufik yang telah membantu selama proses penulisan skripsi ini
- 5) Teman-teman teknik mesin ekstensi 2008 yang telah membantu dan menyemangati penulis

Atas bantuan pihak-pihak yang telah disebutkan di atas maupun yang tidak, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.

Depok, 28 Desember 2010

Muhamad Hanan Thomas

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Muhamad Hanan Thomas

NPM : 08 06 36 8742

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 UNTUK ALIRAN EVAPORASI DUA FASA PADA KANAL MINI HORIZONTAL DENGAN REFRIGERAN R-290

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 : 28 Desember 2010

Yang menyatakan

(Muhamad Hanan Thomas)

ABSTRAK

Nama : Muhamad Hanan Thomas
Program Studi : Sarjana Teknik Mesin
Judul : Penurunan Tekanan Untuk Aliran Evaporasi Dua Fasa Pada
Kanal Mini Horizontal Dengan Refrigeran R-290

Dalam penelitian ini akan dibahas tentang penurunan tekanan yang terjadi pada aliran evaporasi dua fasa pada kanal mini horizontal dengan menggunakan refrigeran alternatif R-290. Pada penelitian ini akan dicari nilai prediksi penurunan tekanan secara teoritis yang didapatkan melalui pendekatan Lockhart-Martinelli dan Chisolm dengan bantuan program Matlab. Program Fluent juga digunakan untuk mendapatkan prediksi penurunan tekanan aliran evaporasi dua fasa berdasarkan simulasi CFD. Hasil dari prediksi tersebut kemudian akan dibandingkan dengan nilai penurunan tekanan dari hasil pengukuran menggunakan alat uji refrigerasi dengan sistem pemutaran tertutup untuk mendapatkan nilai deviasi untuk masing-masing pendekatan teoritis dan dari hasil simulasi CFD.

Kata kunci:

Penurunan tekanan, R-290, kanal mini, aliran evaporasi dua fasa, Matlab, Fluent, CFD.

ABSTRACT

Name : Muhamad Hanan Thomas
Study Program : Bachelor of Mechanical Engineering
Title : Two-phase Flow Boiling Pressure Drop of Horizontal Mini Channel with R-290

This study will examine the pressure drop for two phase flow boiling in horizontal mini channel using refrigerant R-290. This study will look into obtaining theoretical pressure drop prediction using Lockhart-Martinelli and Chisolm correlations with the help of Matlab software. The Fluent software will also be used to obtain the two phase flow boiling pressure drop prediction using CFD simulation. These prediction results will then be compared to the pressure drop from experiment data using closed loop refrigeration system experiment apparatus to obtain the deviation values for each theoretical correlations and from the CFD simulation.

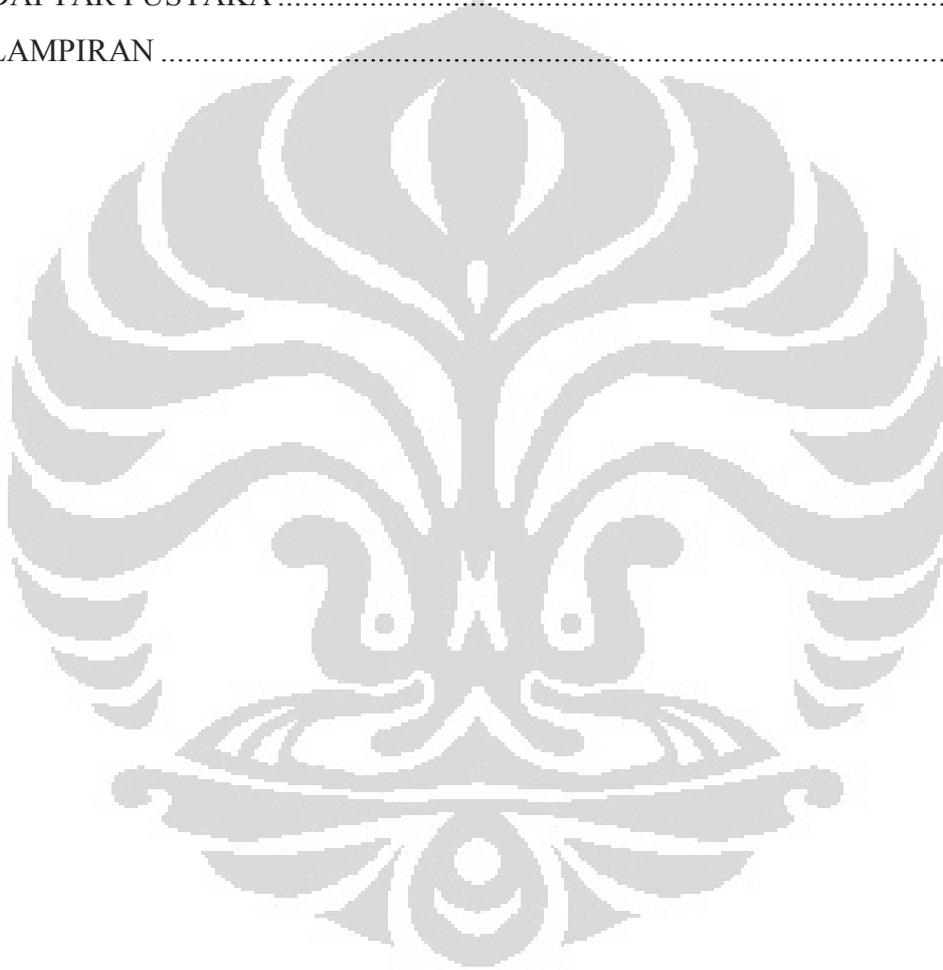
Keywords:

Pressure drop, R-290, mini channel, two phase flow evaporation, Matlab, Fluent, CFD.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
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 METODOLOGI PENELITIAN	4
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	5
BAB 2 DASAR TEORI	6
2.1 MODEL ANALISA ALIRAN DUA FASA	6
2.2 POLA ALIRAN DUA FASA PADA PIPA HORIZONTAL	6
2.3 PIPA KANAL MINI	9
2.4 KONDISI ALIRAN SUBCOOLED	9
2.5 KONDISI ALIRAN DUA FASA	10
2.6 PENURUNAN TEKANAN	15
2.7 DEVIASI	20
BAB 3 PERANGKAT DAN ASPEK PENGUJIAN	22
3.1 SISTEM ALAT PENGUJIAN DAN KOMPONEN	22
3.2 PERHITUNGAN DALAM MATLAB	26
3.3 PROGRAM SIMULASI FLUENT	27
3.3.1 Persiapan geometri pipa	28
3.3.2 Pengaturan simulasi dalam Fluent	29

BAB 4 ANALISA SIMULASI DAN PERHITUNGAN.....	32
4.1 PENURUNAN TEKANAN DARI DATA PENGUKURAN	32
4.2 GRADIEN PENURUNAN TEKANAN.....	33
4.2.1 Kasus 1 dan 2	34
4.2.2 Kasus 3 dan 4	37
4.3 HASIL DARI SIMULASI FLUENT.....	40
BAB 5 KESIMPULAN.....	43
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	46

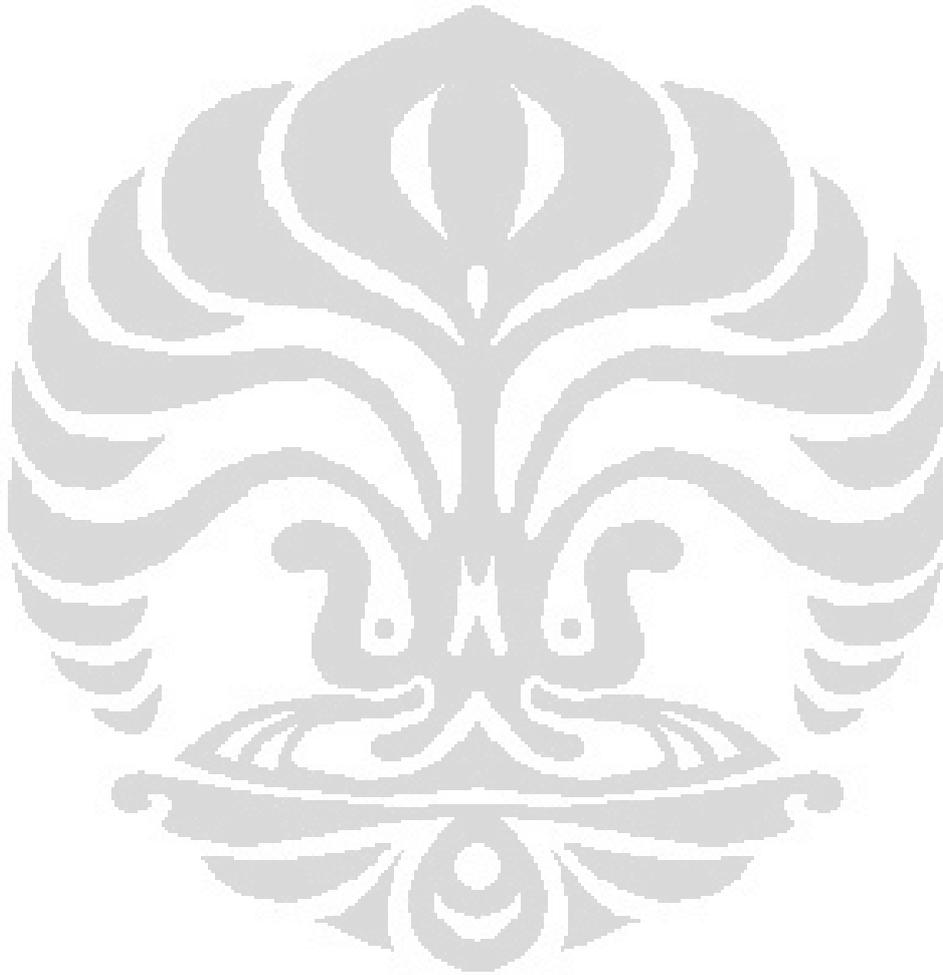


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1	Pola aliran dua fasa pada pipa horizontal berdasarkan Collier et. al.(1994).....	8
Gambar 2-2	Pola aliran dua fasa pada proses evaporasi di pipa horizontal menurut Collier et.al.(1994)	8
Gambar 2-3	Diagram p-h untuk R-290 dari software Refprop.....	11
Gambar 3-1	Skema alat pengujian	22
Gambar 3-2	Pipa test section.....	23
Gambar 3-3	Peletakan termokopel pada pipa	25
Gambar 3-4	Geometri pipa di Pro/E.....	28
Gambar 3-5	Meshing pada geometri pipa.....	29
Gambar 3-6	Pengubahan skala geometri pipa.....	30
Gambar 3-7	Pengaturan solver Fluent	31
Gambar 4-1	Keluaran Matlab untuk a) kasus 1 dan b) kasus 2	34
Gambar 4-2	Perbandingan gradien penurunan tekanan gesek pada a)kasus 1 dan b) kasus 2	35
Gambar 4-3	Grafik mean deviasi penurunan tekanan gesek terhadap kualitas untuk kasus 1 dan 2.....	36
Gambar 4-4	Grafik perbandingan nilai C pengukuran dan perhitungan terhadap kualitas	36
Gambar 4-5	Keluaran Matlab untuk a) kasus 3 dan b) kasus 4	37
Gambar 4-6	Perbandingan gradien penurunan tekanan gesek pada a)kasus 3 dan b) kasus 4	38
Gambar 4-7	Grafik mean deviasi penurunan tekanan gesek terhadap kualitas untuk kasus 3 dan 4.....	39
Gambar 4-8	Grafik perbandingan nilai C pengukuran dan perhitungan terhadap kualitas	39
Gambar 4-9	Grafik total penurunan tekanan dari Fluent untuk kasus 1.....	40
Gambar 4-10	Grafik total penurunan tekanan dari Fluent untuk kasus 2.....	40
Gambar 4-11	Grafik total penurunan tekanan dari Fluent untuk kasus 3.....	41
Gambar 4-12	Grafik total penurunan tekanan dari Fluent untuk kasus 4.....	41
Gambar 5-1	Deviasi hasil prediksi Fluent terhadap pengukuran	44

DAFTAR TABEL

Tabel 1-1 Klasifikasi ukuran diameter kanal menurut Kandiklar et. al. (2006).....	2
Tabel 2-1 Nilai C dilihat dari jenis aliran fasa	20
Tabel 3-1 Karakteristik R-290.....	26
Tabel 4-1 Data pengukuran	32
Tabel 4-2 Perbandingan penurunan tekanan prediksi Fluent dan pengukuran	42
Tabel 5-1 Mean deviasi dan Ave deviasi hasil perhitungan terhadap pengukuran	43



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Proses pendinginan adalah suatu proses dimana terjadinya penyerapan panas dari suatu benda ke sebuah fluida kerja/refrigeran. Proses ini telah menjadi hal yang penting pada kehidupan sehari-hari, mulai dari pendinginan bahan makanan agar tidak cepat rusak, pengkondisian udara (AC) untuk kenyamanan sampai pendinginan pada mesin dan alat elektronik agar tetap berfungsi dengan baik.

Salah satu komponen penting dalam proses pendinginan adalah penggunaan refrigeran sebagai fluida kerjanya. Refrigeran yang banyak digunakan pertama kalinya adalah R-11 (trichlorofluoromethane) karena memiliki titik didih tinggi sehingga dapat dipergunakan pada sistem bertekanan rendah. Akan tetapi R-11 ini ternyata memiliki sifat merusak lapisan ozon yang berperan penting untuk perlindungan dari bahaya sinar ultraviolet matahari. Perusakan ini terjadi karena R-11 yang terbuang ke lingkungan akan naik menuju lapisan ozon dan molekul Cl (chlorine) yang terkandung akan bereaksi dan memecah molekul ozon. Semenjak diberlakukannya Protokol Montreal tentang pengontrolan zat perusak ozon, negara-negara di dunia mulai menghentikan penggunaan R-11 dan beralih menggunakan R-22 yang mempunyai nilai ODP (*Ozone Depletion Potential*) lebih rendah. Nilai ODP ini adalah nilai perbandingan potensi perusakan ozon suatu zat dibanding dengan R-11 yang ditetapkan sebagai dasar dengan nilai 1. R-22 memiliki nilai ODP 0.055 yang berarti berpotensi merusak ozon lebih kecil dari R-11.

Akan tetapi, dengan semakin meningkatnya kesadaran atas perlindungan lingkungan dari pemanasan global dan pemberlakuan Protokol Kyoto tentang pemanasan global, penggunaan R-22 sebagai refrigeran mulai ditinggalkan. Hal ini dilakukan karena R-22 memiliki nilai GWP (Global Warming Potential) 1810 yang merupakan nilai kontribusi suatu zat terhadap pemanasan global dibanding dengan karbon dioksida yang bernilai GWP 1.0 .

Sebagai penggantinya dibutuhkan refrigeran alternatif yang lebih aman untuk lingkungan tetapi dengan performa yang cukup baik untuk digunakan pada sistem pendingin, salah satunya adalah R-290 (Propana). R-290 yang memiliki struktur molekul C_3H_8 merupakan alternatif untuk pengganti R-22 yang aman untuk lingkungan karena memiliki nilai ODP 0.0 dan GWP < 3 . Salah satu keterbatasan dalam pemakaian R-290 sebagai refrigeran adalah diperlukannya tekanan yang lebih tinggi dibanding pemakaian R-22 dalam di sistem pendingin yang disebabkan oleh rendahnya temperatur didih R-290 ($-42.1^\circ C$).

Dalam sistem pendinginan, medium pipa yang dialirkan oleh refrigeran berperan penting pada proses pertukaran kalor yang terjadi. Pada perkembangan sistem pendingin, terjadi kecenderungan semakin banyak dipakainya pipa dengan ukuran diameter kanal yang lebih kecil dari ukuran konvensional. Klasifikasi ukuran diameter kanal menurut Kandiklar *et al.* (2006) dapat dilihat pada Tabel 1-1.

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	$0.1 \text{ } \mu\text{m} \geq D$

Penggunaan pipa dengan ukuran kanal yang lebih kecil ini 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 pendingin untuk mesin dan alat elektronik berukuran kecil yang makin banyak di produksi.

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

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Pada penelitian ini kami merancang suatu sistem pendingin dengan menggunakan pipa kanal mini berdiameter dalam 3 mm dan panjang 1 m yang terbuat dari stainless steel SS316 dan mengalirkan refrigeran R-290 didalamnya. Pada pipa tersebut dipasang pemanas listrik sebagai beban pemanasan. Aliran R-290 dijaga temperatur, tekanan dan laju lairannya pada saat memasuki pipa sebagai variabel kontrolnya.

Dari nilai tekanan pada masukan dan keluaran pipa, akan didapatkan nilai penurunan tekanan yang terjadi, yang kemudian akan dibandingkan dengan prediksi penurunan tekanan yang didapatkan dari kalkulasi.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan :

- a) Menganalisa penurunan tekanan yang terjadi pada aliran dua fasa R-290 pada pipa kanal mini.
- b) Membandingkan nilai penurunan tekanan yang didapat dari eksperimen dengan nilai penurunan tekanan secara teoritis melalui pendekatan Martinelli dan mencari korelasi antara keduanya.

1.4 PEMBATASAN PENELITIAN

Pada penelitian aliran dua fasa R-290 ini digunakan pipa kanal mini berdiameter dalam 3 mm dan panjang 1 m, serta aliran R-290 saat memasuki pipa memiliki karakteristik sebagai berikut :

- a) Laju aliran dari $50 \sim 600 \text{ kg/m}^2\text{s}$ dengan interval $50 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- b) Temperatur dari $-5^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$ dengan interval 5°C
- c) Daya dari pemanas listrik pada pipa dari $5 \text{ kW} \sim 40 \text{ kW}$ dengan interval 5 kW

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur
Studi literatur merupakan proses pengumpulan informasi baik dari buku, jurnal maupun internet.
2. Pemilihan dan pengadaan alat uji
Pada proses ini komponen-komponen alat uji di pilih dan di rancang sesuai dengan kebutuhan kondisi eksperimen yang diperlukan.
3. Kalibrasi dan instalasi alat uji
Komponen-komponen yang telah di peroleh di kalibrasi terlebih dahulu untuk memastikan bahwa mereka bekerja dengan baik dan sesuai dengan kebutuhan eksperimen dan kemudian di instalasi sesuai dengan rancangan yang sudah disetujui.
4. Pengambilan data eksperimen
Data-data yang diperoleh dari sensor yang tersedia di ambil dan dicatat beserta kondisi aliran refrigeran yang terjadi.
5. Perumusan teoritis
Pada proses ini rumusan-rumusan penurunan tekanan secara teoritis di pilah dari berbagai sumber dan di masukkan ke dalam MATLAB sebagai alat bantu perhitungan.
6. Analisa data

Hasil dari perhitungan secara teoritis dibandingkan dengan data eksperimen dan dianalisa untuk diambil kesimpulan.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Laporan tugas akhir ini mengikuti sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

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

BAB 2 DASAR TEORI

Bagian ini berisikan dasar-dasar teori dari eksperimen yang dilakukan, yang meliputi : pendidihan pada aliran dua fasa, pertukaran panas secara konveksi dan konduksi, penurunan tekanan pada aliran dalam pipa. Dasar teori tersebut diambil dari berbagai sumber yang mendukung penelitian ini.

BAB 3 PERANGKAT DAN ASPEK PENGUJIAN

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

BAB 4 SIMULASI DAN PERHITUNGAN

Data hasil pengujian dikompilasi dan di analisa di bab ini, beserta hasil dari perhitungan secara teoritis dan simulasi pendukungnya.

BAB 5 KESIMPULAN

Pada bagian ini, diambil kesimpulan dari data hasil pengujian dan hasil dari perbandingan yang dilakukan pada Bab 4.

BAB 2

DASAR TEORI

2.1 MODEL ANALISA ALIRAN DUA FASA

Pada proses pendidihan secara konveksi, terjadi perpindahan kalor dari lingkungan ke fluida kerja yang digunakan. Fluida kerja yang mengalami penambahan kalor tersebut dapat tetap dalam fasa fluid atau mengalami perubahan fasa menjadi vapor. Kondisi dimana terjadinya kedua fasa tersebut pada saat bersamaan disebut dengan pendidihan dua fasa. Untuk menganalisa sebuah aliran dua fasa, terdapat tiga model aliran yang dapat digunakan:

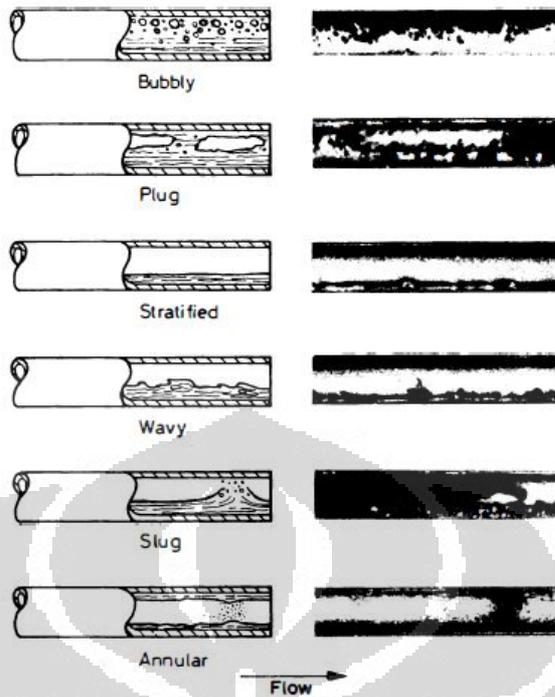
- a) Model aliran 'homogenis'. Pada model ini, aliran diasumsi sebagai satu fasa saja dengan properti yang didapat dari gabungan dan besarnya kontribusi masing-masing fasa.
- b) Model aliran 'terpisah'. Pada model ini, masing-masing fasa diasumsi terpisah dan masing-masing memiliki properti tersendiri. 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.

2.2 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:

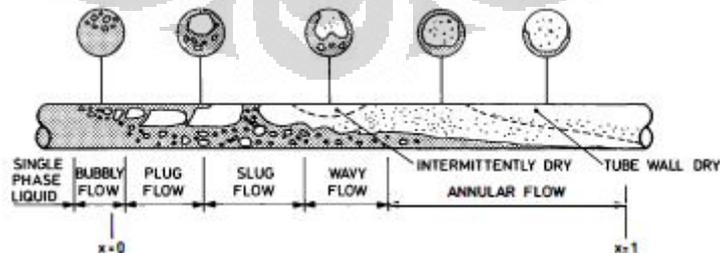
- a) *Bubbly flow*. Pada aliran ini, terdapat gelembung-gelembung gas yang umumnya bergerak di bagian atas aliran.
- b) *Plug flow*. Pada aliran ini, semakin banyak gelembung-gelembung yang terjadi dan bergabung membentuk kumpulan gelembung besar dan juga umumnya terjadi pada sebelah atas aliran.
- c) *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 2-1 Pola aliran dua fasa pada pipa horizontal berdasarkan Collier *et. al.* (1994)

Gambar 2-1 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 2-2 dibawah.



Gambar 2-2 Pola aliran dua fasa pada proses evaporasi di pipa horizontal menurut Collier *et. al.* (1994)

Dari Gambar 2-2 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 (*intermitten 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.

2.3 PIPA KANAL MINI

Pada penelitian ini, dipergunakan pipa kanal mini dengan ukuran diameter dalam $\phi = 3\text{mm}$. 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.

2.4 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 :

$$z_{sc} = \left(\frac{h_f - h_{fi}}{\Delta h} \right) L \quad (2.1)$$

Dengan :

$$\Delta h = \frac{p}{\dot{m}} \quad (2.2)$$

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)

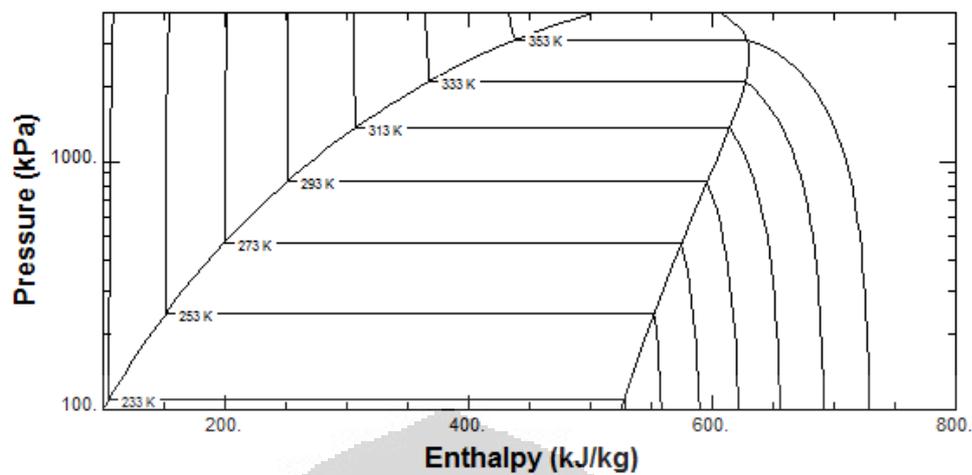
Δh = perubahan entalpi (kJ/kg)

p = daya yang masuk ke fluida (W)

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

2.5 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 2-3 Diagram p-h untuk R-290 dari software Refprop

Secara termodinamik;

$$x = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} = \frac{h - h_f}{h_{fg}} \quad (2.3)$$

Secara hidrodinamik;

$$x = \frac{w_g}{w_g + w_f} \quad (2.4)$$

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 :

$$x_o = \frac{\Delta h + h_{fi} - h_f}{h_{fg}} \quad (2.5)$$

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

$$x_z = x_o \left(\frac{z - z_{sc}}{L - z_{sc}} \right) \quad (2.6)$$

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 (α) ini dapat diperoleh dari persamaan :

$$\alpha = \frac{A_g}{A_g + A_f} = \frac{A_g}{A} \quad (2.7)$$

dan

$$(1 - \alpha) = \frac{A_f}{A_g + A_f} = \frac{A_f}{A} \quad (2.8)$$

Dimana,

α = fraksi uap

A = luas penampang kanal (m^2)

A_f = luas penampang fasa cair (m^2)

A_g = luas penampang fasa uap (m^2)

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

$$\alpha = x v_g \left[\frac{(1 + 0.12 (1 - x)) (x v_g + (1 - x) v_f)}{+ \frac{1.18}{G} (1 - x) v_f^{0.5} \left[g \sigma \left(\frac{1}{v_f} + \frac{1}{v_g} \right) \right]^{0.25}} \right]^{-1} \quad (2.9)$$

Dimana,

α = 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)

σ = tegangan permukaan (N/m)

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

$$R_e = \frac{GD}{\mu} \quad (2.10)$$

$$R_{ef} = \frac{GD (1 - x)}{\mu_f} \quad (2.11)$$

$$R_{eg} = \frac{GDx}{\mu_g} \quad (2.12)$$

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

$$f = \begin{cases} \frac{16}{Re}, & \text{untuk } Re < 2300 \\ 0.079 \\ \frac{Re^{0.25}}{3000}, & \text{untuk } Re > 3000 \\ \text{interpolasi untuk } 2300 \leq Re \leq 3000 \end{cases} \quad (2.13)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{(f - f_{2300})}{(f_{3000} - f_{2300})} &= \frac{(Re - 2300)}{(3000 - 2300)} \\ (f - f_{2300}) &= \frac{(Re - 2300)}{700} (f_{3000} - f_{2300}) \\ \left(f - \frac{16}{2300}\right) &= \frac{(Re - 2300)}{700} \left(\frac{0.079}{3000^{0.25}} - \frac{16}{2300}\right) \\ (f - 0.0069) &= \frac{(Re - 2300)}{700} (0.01067 - 0.0069) \\ (f - 0.0069) &= (Re - 2300)(5.3 \times 10^{-6}) \\ f &= 0.0069 + [(Re - 2300)(5.3 \times 10^{-6})] \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dimana,

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

D = diameter (m)

μ = viskositas dinamik ($\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$)

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

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

Re = bilangan Reynolds

Re_f = bilangan Reynolds fasa cair

Re_g = bilangan Reynolds fasa uap

f = nilai hambatan gesek

2.6 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:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right) = \left(\frac{dp}{dz} F\right) + \left(\frac{dp}{dz} a\right) + \left(\frac{dp}{dz} z\right) \quad (2.15)$$

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

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

$\left(\frac{dp}{dz}\right)$ = total gradien penurunan tekanan (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 gradien penurunan akibat percepatan fluida dapat diperoleh dari :

$$\left(\frac{dp}{dz} a\right) = G^2 \frac{d}{dz} \left[\frac{x^2 v_g}{\alpha} + \frac{(1-x)^2 v_f}{(1-\alpha)} \right] \quad (2.17)$$

Dengan :

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

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

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

x = kualitas massa uap

α = void fraction

Untuk mendapatkan nilai penurunan tekanan akibat gesekan pada aliran dua fasa, dapat diperoleh tergantung dari model aliran yang dipakai sesuai dengan subbab 2.1 diatas.

Model aliran 'homogenis'

Pada model aliran ini aliran dua fasa di anggap sebagai hanya aliran fasa cair yang memiliki properti dari nilai rata-rata antara fasa cair dan gas. Beberapa asumsi yang dipakai pada model aliran ini adalah:

- Fasa cair dan gas memiliki kecepatan yang sama.
- Terjadinya kesetimbangan termodinamik antara fasa cair dan gas.
- Digunakannya faktor gesek satu fasa yang sesuai untuk aliran dua fasa.

Pada model aliran ini, properti pada dua fasa didapatkan dari nilai rata-rata properti fasa cair dan uapnya. Untuk mendapatkan nilai hambatan gesek, f_{TP} , diperlukan nilai viskositas rata-rata yang dapat diperoleh dari beberapa persamaan yang ditawarkan dari beberapa studi sebelumnya :

a) McAdams et al. (1942)

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{(1-x)}{\mu_f} \quad (2.18)$$

b) Cicchitti et al. (1960)

$$\bar{\mu} = x\mu_g + (1-x)\mu_f \quad (2.19)$$

c) Dukler et al. (1964)

$$\bar{\mu} = \bar{\rho}[xv_g\mu_g + (1-x)v_f\mu_f] \quad (2.20)$$

Dimana :

$\bar{\mu}$ = viskositas rata-rata (Pa.s)

μ_g = viskositas fasa uap (Pa.s)

μ_f = viskositas fasa cair (Pa.s)

$\bar{\rho}$ = densitas rata-rata (kg/m³)

Dan nilai f_{TP} dapat diperoleh dari persamaan (2.13).

Besarnya gradien penurunan tekanan gesekan dapat di peroleh dari persamaan Fanning untuk aliran dua fasa yang dianggap mengalir sebagai fasa cair saja:

$$\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{fo} = \frac{2f_{TP}G^2v_f}{D} \quad (2.21)$$

dikalikan dengan faktor pengali gesekan, ϕ_{fo}^2 :

$$\phi_{fo}^2 = \left[1 + x \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right)\right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_{fg}}{\mu_f}\right)\right]^{-1/4} \quad (2.22)$$

Sehingga penurunan tekanan dua fasa akibat gesekan menjadi

$$\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{TP} = \left(\frac{dp}{dz}F\right)_{fo} \phi_{fo}^2$$
$$\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{TP} = \frac{2f_{TP}G^2v_f}{D} \left[1 + x \left(\frac{v_{fg}}{v_f}\right)\right] \left[1 + x \left(\frac{\mu_{fg}}{\mu_f}\right)\right]^{-1/4} \quad (2.23)$$

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

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

f_{TP} = hambatan gesek untuk dua fasa

ϕ_{fo}^2 = faktor pengali gesekan

v_{fg} = perbedaan spesifik volume fasa uap dan cair (m^3/kg)

μ_{fg} = perbedaan viskositas fasa uap dan cair (Pa.s)

Model aliran ‘terpisah’

Pada model aliran ini, tiap aliran fasa cair dan gas dianggap sebagai kesatuan tersendiri. Untuk kondisi paling sederhananya, tiap fasa dianggap mengalir dengan kecepatan rata-rata. Untuk kasus dimana kecepatan rata-rata kedua fasa adalah sama, maka kasus ini menjadi model aliran ‘homogenis’.

Asumsi yang dipakai pada model aliran ini, 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 (ϕ^2) dan fraksi uap (α) 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:

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{TP} = \left(\frac{dp}{dz} F\right)_f \phi_f^2 = \left(\frac{dp}{dz} F\right)_g \phi_g^2 \quad (2.24)$$

$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{TP}$ = 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)

ϕ_f^2 = faktor pengali gesekan fasa cair

ϕ_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 (ϕ_f^2 dan ϕ_g^2) yang disebut dengan parameter Martinelli, X , yaitu :

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_g} \quad (2.25)$$

Dimana

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_f = \frac{2f_f G^2 (1-x)v_f}{D} \quad (2.26)$$

$$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_g = \frac{2f_g G^2 x v_g}{D} \quad (2.27)$$

Sehingga persamaan (2.15) menjadi

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

$$X^2 = \frac{f_f (1-x)^2 v_f}{f_g x^2 v_g} \quad (2.28)$$

Dan

$$\phi_f^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (2.29)$$

$$\phi_g^2 = 1 + CX + X^2 \quad (2.30)$$

Dimana nilai C dapat diperoleh dari Tabel 2-1 berikut yang merupakan rekomendasi dari Chisholm (1968) :

Tabel 2-1 Nilai C dilihat dari jenis aliran fasa

Re fasa cair	Re fasa gas	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

2.7 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 (2.16) dan akan dibandingkan dengan nilai gradien penurunan tekanan gesek dua fasa yang didapatkan dari hasil perhitungan $\left(\frac{dp}{dz}F\right)_{pht}$ berdasarkan persamaan (2.24).

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

$$MD = \frac{1}{n} \sum_1^n \left| \frac{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{pht} - \left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}}{\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}} \times 100 \right| \quad (2.31)$$

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

Dimana:

MD = mean deviasi

AD = average deviasi

n = jumlah data

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

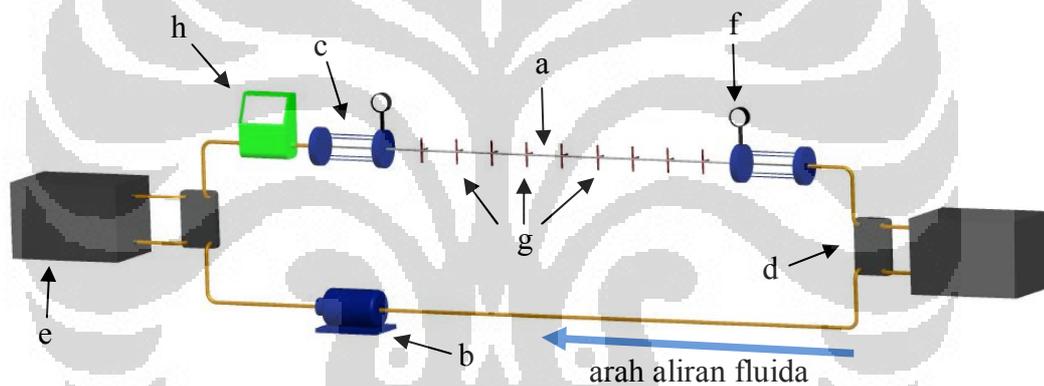
$\left(\frac{dp}{dz} F\right)_{exp}$ = gradien penurunan tekanan gesek hasil pengukuran (Pa)

BAB 3

PERANGKAT DAN ASPEK PENGUJIAN

3.1 SISTEM ALAT PENGUJIAN DAN KOMPONEN

Perangkat pengujian yang di pakai pada penelitian ini adalah sistem refrigerasi putaran tertutup (*closed-loop*) menggunakan R-290 sebagai fluida kerjanya. Pada bagian pengetesan yang berupa pipa kanal mini terbuat dari stainless steel 316, dan dipasang termokopel dengan interval jarak 0.1 m sebagai sensor dan pengambilan data menggunakan data akuisisi dari National Instrument menggunakan program LabView.



Gambar 3-1 Skema alat pengujian

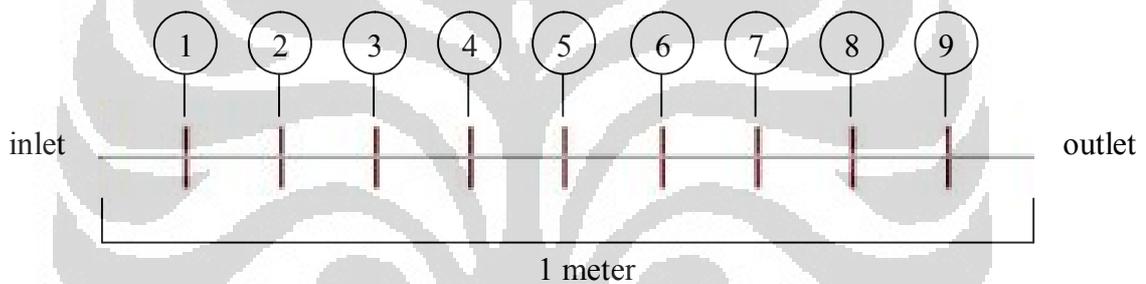
Daftar komponen alat pengujian berdasarkan skema pada Gambar 3-1 adalah sebagai berikut:

- a) Test section
- b) Pompa refrigerant
- c) Sight glass
- d) Plate Heat Exchanger
- e) Condensing unit
- f) Pressure gauge

- g) Thermocouple
- h) Flowmeter

Test section

Pipa kanal mini yang digunakan berdiameter dalam 3 mm dan diameter luar 5 mm, terbuat dari stainless steel 316. Pada pipa ini dipasang pemanas listrik dengan pengatur daya sehingga daya kalor yang diberikan ke refrigeran dapat diatur dengan nilai dari 5 kW ~ 40 kW dengan interval 5 kW. Pipa stainless steel 316 ini memiliki nilai penghantar konduktifitas termal sebesar 13.4 W/m.K.



Gambar 3-2 Pipa test section

Pompa refrigeran

Dari kondisi penelitian seperti ditulis pada BAB 1 subbab 1.4, laju fluida yang dibutuhkan berkisar dari 50 ~ 600 kg/m²s, dengan temperatur kerja serendah -5°C. Temperatur kerja yang dibutuhkan tepatnya akan lebih rendah dari -5°C mengingat bahwa refrigeran masih harus melewati flowmeter, sight glass dan pipa penyambung sebelum memasuki pipa kanal mini.

Sight glass

Sight glass diletakkan sebelum dan sesudah test section agar kondisi fasa aliran refrigeran dapat diperhatikan dan dicatat.

Plate heat exchanger (PHE)

Dua unit PHE digunakan untuk mengatur pengkondisian R-290 yang akan dialirkan. Satu unit diletakkan pada keluaran pompa untuk mengatur kondisi R-290 sebelum memasuki test section agar dapat diatur temperaturnya dan diusahakan seluruhnya berada pada fasa cair saat memasuki pipa kanal mini. Satu unit lainnya diletakkan sebelum masuk kembali ke pompa untuk mengubah R-290 yang keluar dari test section, yang akan mengandung fasa uap, berubah seluruhnya menjadi fasa cair agar tidak merusak pompa.

Kondensing unit

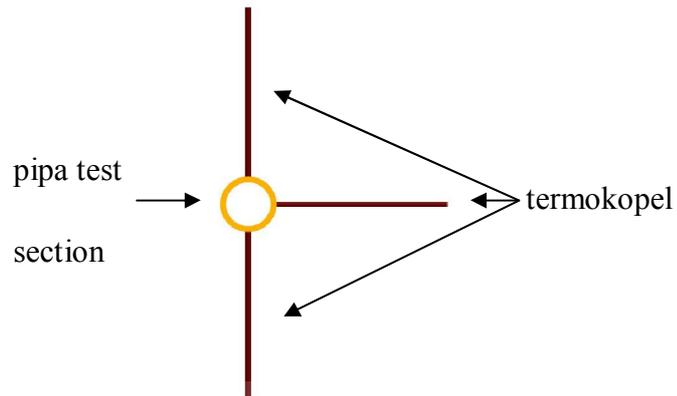
Dua buah kondensing unit digunakan pada kedua PHE untuk mengatur kondisi aliran R-290 sebelum dan sesudah mengalir dalam pipa.

Pressure gauge

Dua buah pressure gauge diletakkan sebelum dan sesudah test section. Dari kondisi penelitian, tekanan R-290 yang diperlukan berkisar antara 406.04 kPa (tekanan saturasi untuk -5°C) sampai 636.6 kPa (tekanan saturasi untuk 10°C).

Thermocouple

Untuk penelitian ini, digunakan termokopel tipe P sejumlah 27 unit. Tiap tiga unit termokopel ditempatkan pada test section pada posisi 10 ~ 90 cm dari awal pipa dengan interval 10 cm dan dengan peletakan seperti pada gambar berikut :



Gambar 3-3 Peletakan termokopel pada pipa

Tiap termokopel disambungkan ke data akuisisi dari National Instrument dan data akan di catat di komputer melalui program LabView.

Flowmeter

Satu unit flowmeter digunakan untuk mendata laju aliran fluida yang memasuki pipa test section. Laju aliran yang diperlukan berkisar dari $50 \sim 600 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$.

Pipa koneksi

Untuk hubungan antar komponen, digunakan pipa tembaga dengan ukuran diameter 3/8 inci. Seluruh pipa tembaga di lapiasi dengan insulator termaflex untuk mengurangi terjadinya pelepasan kalor ke lingkungan yang tidak diinginkan.

Refrigeran R-290

Pada penelitian ini, refrigeran yang digunakan adalah R-290 yang memiliki karakteristik seperti berikut :

Tabel 3-1 Karakteristik R-290

Formula molekul	C_3H_8
Massa molar	44.1 g/mol
Berat jenis	2.0098 kg/m ³ , gas (0°C, 101.325 kPa) 581.2 kg/m ³ , cair pada titik didih.
Titik lebur	-187°C (85 K)
Titik didih	-42.1°C (231 K)
Titik kritis	96.672 °C (369.522 K), 42.4924 bar
Kapasitas kalor	98.36 J/mol.K, cair 73.60 J/mol.K, gas
Konduktivitas thermal	0.01565 W/m.K, gas (0°C, 101.325 kPa) 0.12918 W/m.K, cair pada titik didih

3.2 PERHITUNGAN DALAM MATLAB

Untuk mengolah data dari pengukuran untuk menghitung gradien penurunan tekanan, penulis menggunakan program Matlab 2010b v7.11. Program Matlab adalah program kalkulasi matematis yang menggunakan data dalam bentuk matriks. Matlab dapat pula membuat gambar plot dari data-data matriks.

Pada penelitian ini program Matlab akan digunakan untuk mencari karakteristik aliran fluida dua fasa pada tiap titik interval seperti digambarkan pada Gambar 3-2

dengan mencari properti fluida baik fasa cair maupun uap dari program Refprop secara langsung dari dalam program Matlab itu sendiri.

Tahapan proses perhitungan dalam Matlab adalah sebagai berikut:

- a) Memasukan data-data dari hasil pengukuran. Dari pengurangan antara P inlet dan P outlet dan kemudian dibagi dengan panjang pipa maka akan didapat nilai gradien penurunan tekanan pengukuran $\left(\frac{dp}{dz}\right)$. Untuk nilai data-data selengkapnya akan di berikan pada bab berikutnya.
- b) Mencari panjang kondisi subcooled dengan menggunakan persamaan (2.1) dan kualitas massa uap pada keluaran dengan persamaan (2.5). Kemudian dicari kualitas massa uap pada tiap titik interval dengan persamaan (2.6)
- c) Mencari properti fluida dua fasa pada tiap titik dengan memanggil fungsi dari program Refprop. Dari properti fluida dua fasa tersebut maka akan didapatkan nilai fraksi uap, bilangan Reynold dan hambatan gesek dengan menggunakan persamaan (2.9) sampai (2.14).
- d) Mencari gradien penurunan tekanan akselerasi pada tiap titik dengan persamaan (2.17) yang kemudian di substitusi ke dalam persamaan (2.16) untuk mendapatkan nilai gradien penurunan tekanan gesek secara pengukuran.
- e) Dari tahap c) di atas maka bisa didapatkan nilai gradien penurunan tekanan gesek secara perhitungan dengan menggunakan persamaan (2.24) sampai dengan (2.30)
- f) Dari nilai yang didapatkan pada tahap d) dan e) tersebut maka bisa dicari mean deviasi dan average deviasi berdasarkan persamaan (2.31) dan (2.32).
- g) Dari nilai yang didapatkan dari tahap d) diatas dapat diolah lebih lanjut untuk mendapatkan nilai C pengukuran.

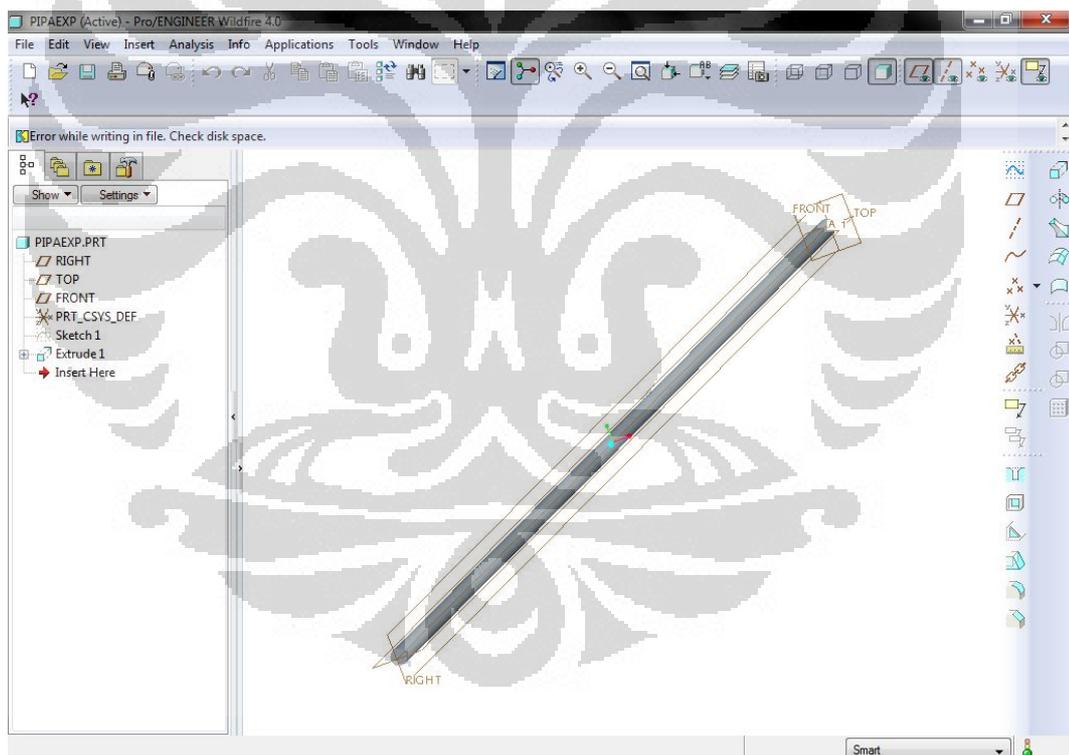
3.3 PROGRAM SIMULASI FLUENT

Untuk simulasi aliran fluida dalam pipa kanal mini digunakan program Fluent v6.3.26 dari ANSYS dengan bantuan program Pro/E Wildfire v4 dan Gambit

v2.4.6 untuk pembuatan geometri pipa dan Refprop v8 untuk mendapatkan properti dari R-290. Karena keterbatasan waktu dan rumitnya dalam mensimulasikan aliran dua fasa dalam Fluent, maka penulis menggunakan model aliran ‘homogenus’ dimana aliran dua fasa dianggap sebagai satu aliran fasa fluida yang memiliki nilai karakteristik rata-rata dari fasa fluida dan fasa gasnya sesuai dengan BAB 2 subbab 2.6.

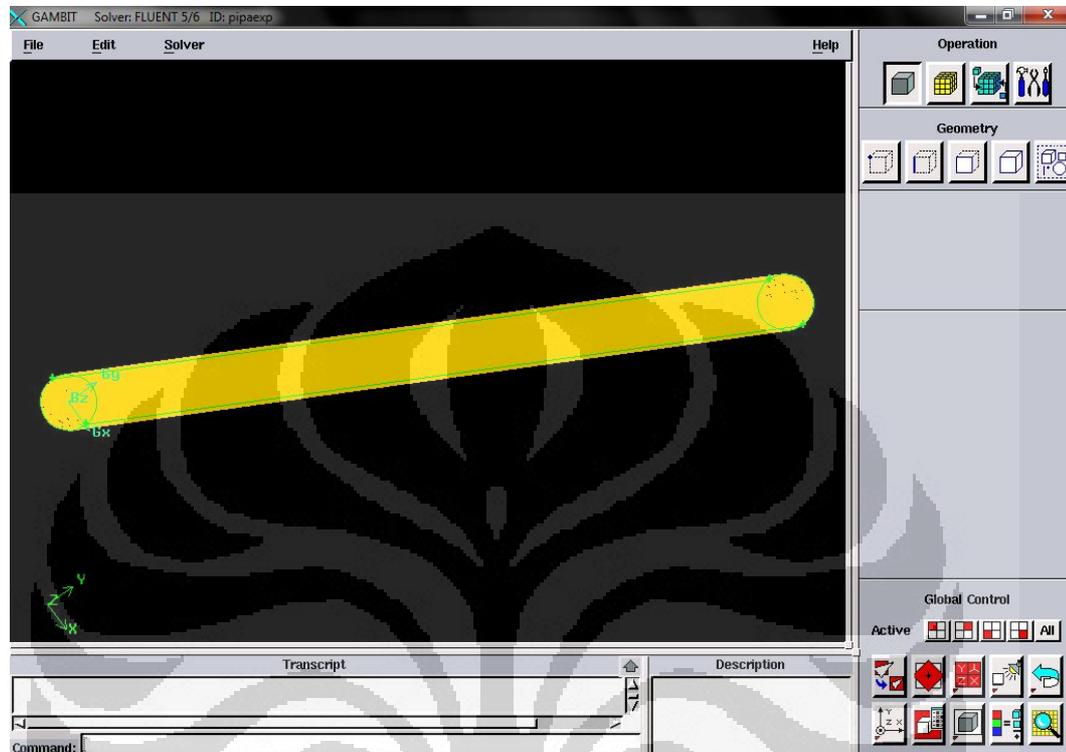
3.3.1 Persiapan geometri pipa

Langkah pertama adalah pembuatan geometri pipa di dalam Pro/E. Patut diperhatikan bahwa pembuatan geometri hanya memperhatikan daerah yang akan di alirkan oleh fluida, termasuk dengan dinding pipa tersebut.



Gambar 3-4 Geometri pipa di Pro/E

File geometri pipa kemudian di simpan dalam format ACIS agar dapat dibuka di Gambit untuk diproses lebih lanjut. Dengan program Gambit, geometri pipa akan di isi dengan *mesh* agar bisa di proses oleh program Fluent.



Gambar 3-5 Meshing pada geometri pipa

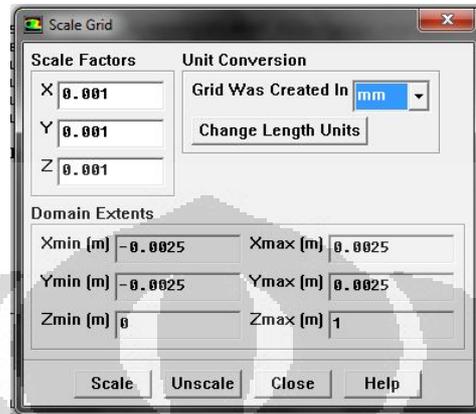
Mesh ini adalah unit terkecil yang dapat dibentuk oleh program Gambit dan nantinya di dalam Fluent akan diberlakukan persamaan kesetimbangan energi dan momentum sehingga di dapat karakteristik fluida di titik tersebut dan secara keseluruhan.

3.3.2 Pengaturan simulasi dalam Fluent

Fluent dijalankan dengan setting 3-dimensi *double precision* karena kecilnya ukuran geometri pipa yang dipakai. Setelah file meshing dari Gambit dibuka dalam Fluent, pengaturan untuk memulai iterasi perhitungan adalah sebagai berikut :

a) Grid →Scale...

Ubah ukuran skala menjadi mm.



Gambar 3-6 Pengubahan skala geometri pipa

b) Define→Materials...

Definisi material yang akan dipakai adalah R-290 dalam kondisi cair dan uap serta pipa stainless steel 316.

c) Define→Model→Solver...

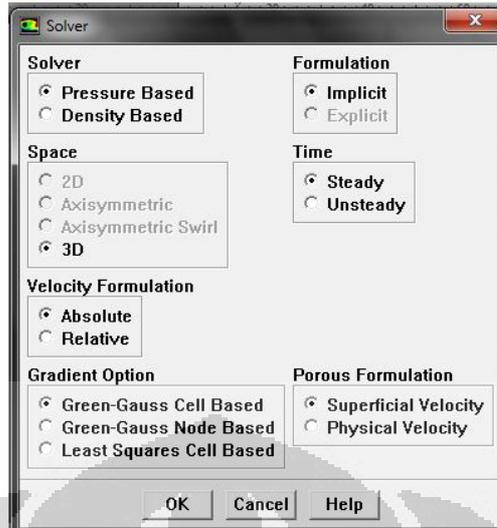
Pengaturan yang dipilih adalah Pressure Based

Define→Model→Multiphase... →Off

Define→Model→Energy→gunakan 'energy equation'

Define→Model→Viscous

Pilih model viskositas 'k-epsilon'→Realizable→Standard wall functions



Gambar 3-7 Pengaturan solver Fluent

- d) Define→Boundary Conditions...
- Fluid→pilih 'propane-liquid'
- Inlet→masukan nilai kecepatan masuk fluida dan temperatur sesuai Tabel 4-1
- Wall→gunakan material 'ss316' dengan nilai fluks kalor sesuai Tabel 4-1 dan ketebalan dinding pipa 0.001
- e) Solve→Initialize→Initialize...
- Pilih 'inlet' pada kolom 'Compute from' dan klik 'Init'
- Solve→Iterate...
- Masukan 1000 untuk banyaknya langkah iterasi dan klik 'Iterate' untuk memulai perhitungan.

BAB 4

ANALISA SIMULASI DAN PERHITUNGAN

Pada proses analisa ini, data pengukuran yang digunakan berdasarkan data-data yang sudah ada dan simulasi yang dilakukan menggunakan software MatLab 2010b v7.11. Untuk simulasi pola aliran dua fasanya, menggunakan software Fluent v6.3.26 dengan dibantu program Pro/E Wildfire v4 dan Gambit v2.4.6 dalam membentuk geometri pipa untuk digunakan dalam program Fluent tersebut/

Pada bab ini, dikarenakan alat pengujian yang diperlukan belum selesai dibuat, maka penulis menggunakan data percobaan yang sudah ada dari jurnal “*Pressure drop and heat transfer during two-phase flow vaporization of propane in horizontal smooth minichannels*” oleh Choi *et al.* (2008) dan tertulis pada Tabel 4-1 dibawah.

Tabel 4-1 Data pengukuran

Parameter	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
Fluks Massa (G)	96.6 kg/m ² .s	58.94 kg/m ² .s	101.38 kg/m ² .s	148.54 kg/m ² .s
Fluks pemanas	20.5 kW/m ²	20.5 kW/m ²	30.3 kW/m ²	30.3 kW/m ²
Temp inlet	9.7 °C	9.8972 °C	9.6678 °C	8.5919 °C
Tekanan inlet	530 kPa	542 kPa	535 kPa	530 kPa
Tekanan outlet	525.85 kPa	537.82 kPa	525.19 kPa	511.93 kPa

4.1 PENURUNAN TEKANAN DARI DATA PENGUKURAN

Untuk dapat dipakai dalam program simulasi MatLab dan Fluent, data pengukuran yang diperlukan adalah sebagai berikut:

- 1) Tekanan fluida pada masukan pipa (P inlet)

Dari pressure gauge yang dipasang pada sight glass sebelum test section, didapat nilai tekanan gauge fluida yang memasuki pipa tersebut. Karena nilai yang didapat adalah nilai gauge, maka perlu ditambahkan dengan nilai tekanan atmosfer (101.325 kPa) untuk kemudian dibandingkan

dengan software Refprop untuk mendapatkan karakteristik fluida pada masukan.

2) Tekanan fluida pada keluaran pipa (P outlet)

Data tekanan didapatkan dari pressure gauge yang diletakkan pada sight glass setelah keluaran pipa.

3) Temperatur fluida pada masukan pipa (T inlet)

Data temperatur ini didapatkan dengan memasang termokopel pada masukan pipa. Temperatur yang nantinya akan digunakan dirubah dulu ke satuan Kelvin, bila sebelumnya dalam satuan lainnya.

4) Laju aliran fluida (flow rate)

Data ini diperoleh dari alat pengukur Flowmeter yang dipasang antara keluaran pompa dan sebelum masukan pipa. Pada umumnya satuan yang digunakan pada Flowmeter adalah dalam g/menit, sedangkan dalam perhitungan Matlab dan simulasi Fluent, yg dipakai adalah fluks massa , G, yang memiliki satuan $\text{kg.m}^2.\text{s}$.

5) Daya listrik untuk pemanasan pipa (P)

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

4.2 GRADIEN PENURUNAN TEKANAN

Dalam perhitungan untuk memprediksi penurunan tekanan aliran dua fasa dalam Matlab, penulis menggunakan pendekatan model aliran ‘terpisah’ sesuai dengan yang tertulis di BAB 2 subbab 2.6 dengan korelasi Lockhart- Martinelli menggunakan nilai konstanta Chisolm. Tahapan penghitungan yang dilakukan adalah sesuai dengan yang telah di tuliskan pada BAB 3 subbab 3.2 dan isi program selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1. Dari Tabel 4-1 keempat kasus tersebut dapat dikelompokkan menjadi 2 dimana parameter kontrol yang membedakan adalah nilai dari fluks massa, yaitu kasus 1 dan 2 serta kasus 3 dan 4. Adapun hasil yang didapatkan dari Matlab adalah sebagai berikut:

4.2.1 Kasus 1 dan 2

Hasil dari keluaran Matlab untuk kasus 1 dan 2 dapat dilihat pada gambar dibawah :

posisi	x	dp/dz A	dp/dz F exp	dp/dz F cal
0.100m	0.079	1028.288 Pa	3121.712 Pa	681.337 Pa
0.200m	0.157	1268.470 Pa	2881.530 Pa	1133.463 Pa
0.300m	0.236	1408.311 Pa	2741.689 Pa	1579.591 Pa
0.400m	0.314	1479.597 Pa	2670.403 Pa	1996.959 Pa
0.500m	0.393	1502.195 Pa	2647.805 Pa	2386.179 Pa
0.600m	0.472	1489.170 Pa	2660.830 Pa	2744.912 Pa
0.700m	0.550	1449.468 Pa	2700.532 Pa	3068.435 Pa
0.800m	0.629	1389.423 Pa	2760.577 Pa	3349.169 Pa
0.900m	0.708	1313.646 Pa	2836.354 Pa	3575.087 Pa

Nilai Mean Deviasi = 31.164 %
Nilai Average Deviasi = -16.908 %

a) kasus 1

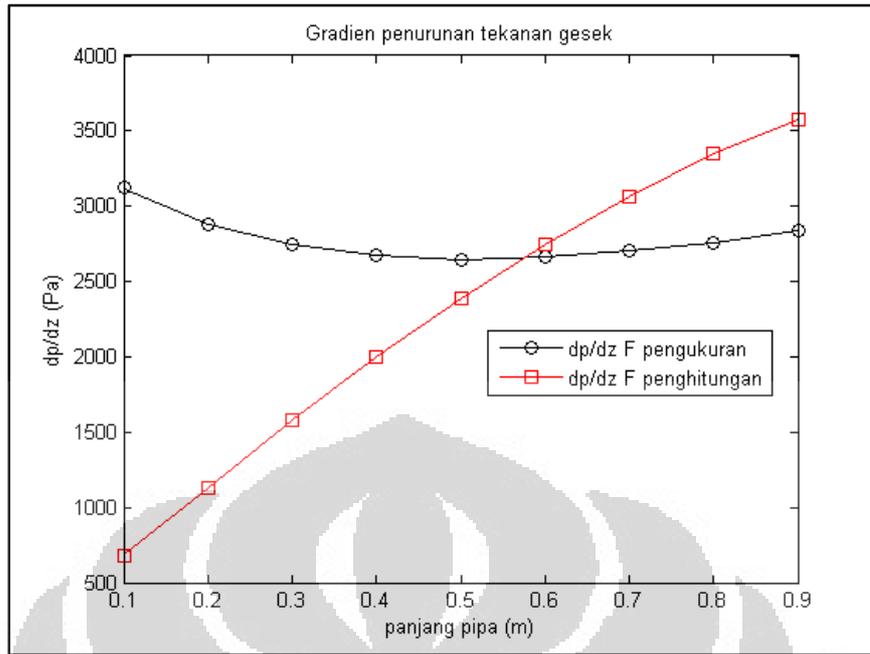
posisi	x	dp/dz A	dp/dz F exp	dp/dz F cal
0.100m	0.126	472.089 Pa	3707.911 Pa	413.419 Pa
0.200m	0.255	579.698 Pa	3600.302 Pa	828.480 Pa
0.300m	0.384	633.888 Pa	3546.112 Pa	1135.633 Pa
0.400m	0.514	653.963 Pa	3526.037 Pa	1395.005 Pa
0.500m	0.643	651.023 Pa	3528.977 Pa	1595.042 Pa
0.600m	0.772	631.908 Pa	3548.092 Pa	1709.507 Pa
0.700m	0.902	617.044 Pa	3562.956 Pa	1665.850 Pa

Nilai Mean Deviasi = 64.874 %
Nilai Average Deviasi = -64.874 %

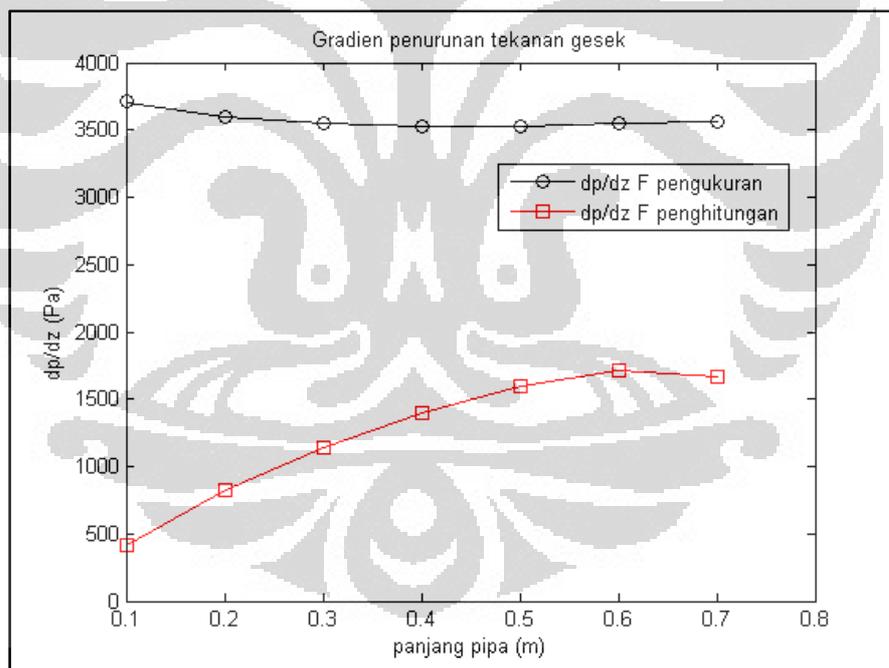
b) kasus 2

Gambar 4-1 Keluaran Matlab untuk a) kasus 1 dan b) kasus 2

Perbandingan antara nilai gradien penurunan tekanan gesek pengukuran dan perhitungan sepanjang aliran dua fasa dapat dilihat pada gambar dibawah :



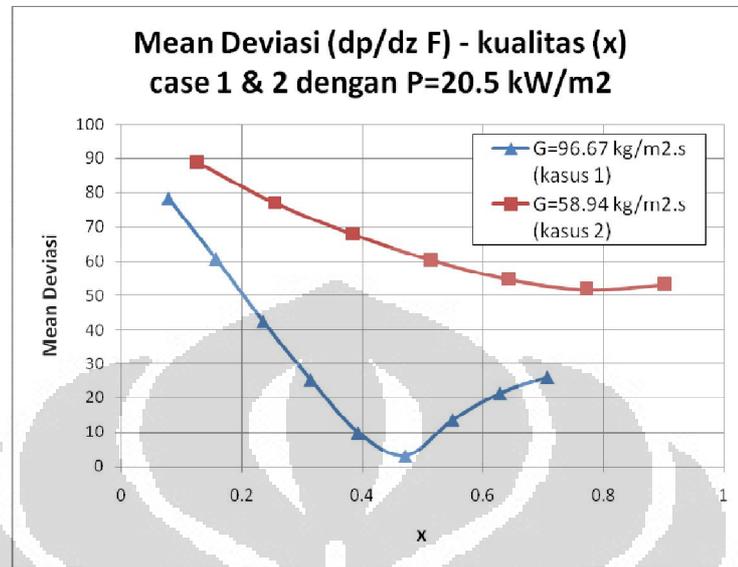
a) kasus 1



b) kasus 2

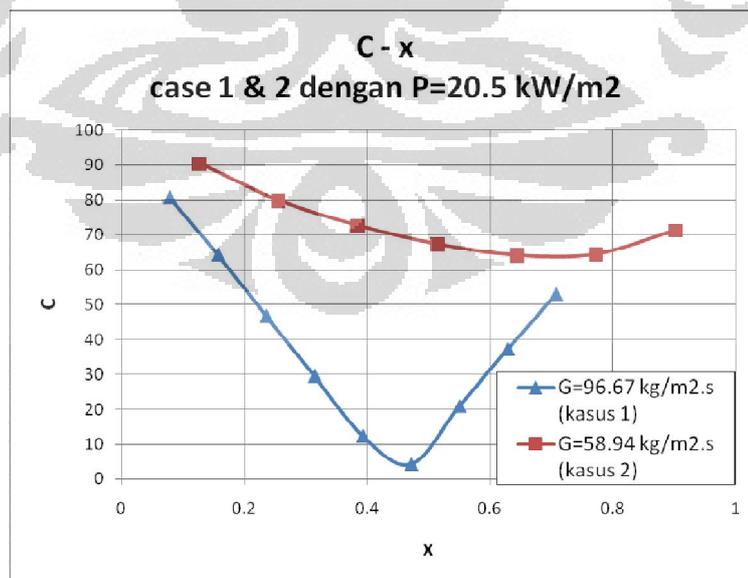
Gambar 4-2 Perbandingan gradien penurunan tekanan gesek pada a)kasus 1 dan b) kasus 2

Perbandingan antara mean deviasi gradien penurunan tekanan secara pengukuran dan perhitungan terhadap nilai kualitas dapat dilihat dari grafik berikut:



Gambar 4-3 Grafik mean deviasi penurunan tekanan gesek terhadap kualitas untuk kasus 1 dan 2

Dan nilai Chisolm dari hasil pengukuran dan perhitungan dapat dibandingkan terhadap nilai kualitas sepanjang aliran dua fasa seperti pada Gambar 4-4 dibawah:



Gambar 4-4 Grafik perbandingan nilai C pengukuran dan perhitungan terhadap kualitas

4.2.2 Kasus 3 dan 4

Hasil dari keluaran Matlab untuk kasus 3 dan 4 dapat dilihat pada gambar dibawah:

posisi	x	dp/dz A	dp/dz F exp	dp/dz F cal
0.100m	0.108	1383.838 Pa	8426.162 Pa	1011.199 Pa
0.200m	0.219	1690.400 Pa	8119.600 Pa	1582.669 Pa
0.300m	0.330	1839.152 Pa	7970.848 Pa	2211.764 Pa
0.400m	0.440	1890.027 Pa	7919.973 Pa	2782.105 Pa
0.500m	0.551	1876.460 Pa	7933.540 Pa	3283.900 Pa
0.600m	0.661	1818.594 Pa	7991.406 Pa	3696.039 Pa
0.700m	0.772	1729.291 Pa	8080.709 Pa	3977.209 Pa
0.800m	0.883	1617.150 Pa	8192.850 Pa	4028.613 Pa
0.900m	0.993	1677.583 Pa	8132.417 Pa	3263.747 Pa
Nilai Mean Deviasi = 64.385 %				
Nilai Average Deviasi = -64.385 %				

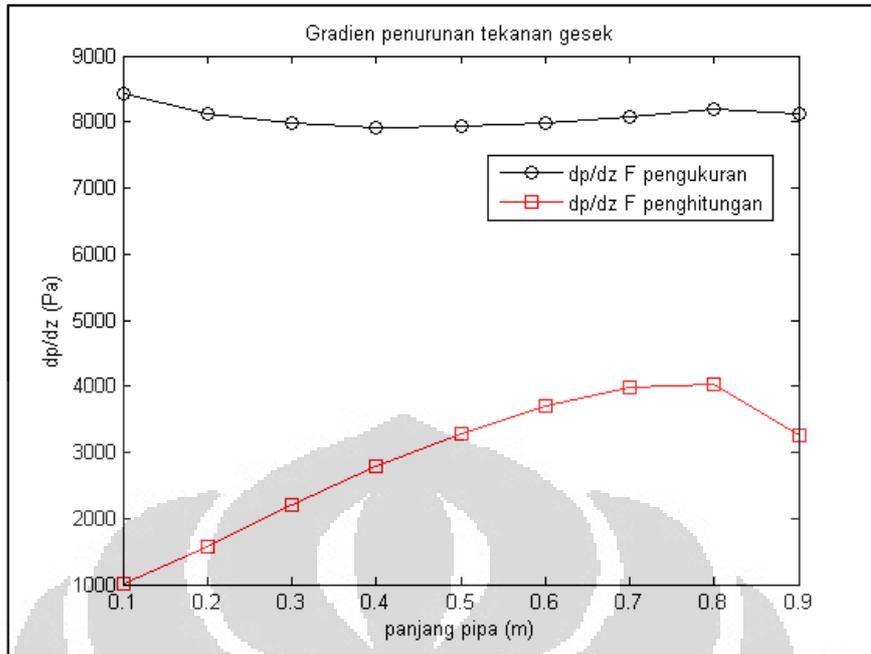
a) kasus 3

posisi	x	dp/dz A	dp/dz F exp	dp/dz F cal
0.100m	0.067	2447.959 Pa	15622.041 Pa	2528.995 Pa
0.200m	0.143	3074.588 Pa	14995.412 Pa	4395.405 Pa
0.300m	0.218	3435.138 Pa	14634.862 Pa	5917.876 Pa
0.400m	0.294	3619.547 Pa	14450.453 Pa	5858.877 Pa
0.500m	0.369	3682.049 Pa	14387.951 Pa	5121.435 Pa
0.600m	0.444	3657.313 Pa	14412.687 Pa	4971.290 Pa
0.700m	0.520	3568.544 Pa	14501.456 Pa	5635.726 Pa
0.800m	0.595	3431.856 Pa	14638.144 Pa	6244.199 Pa
0.900m	0.671	3258.790 Pa	14811.210 Pa	6780.403 Pa
Nilai Mean Deviasi = 64.015 %				
Nilai Average Deviasi = -64.015 %				

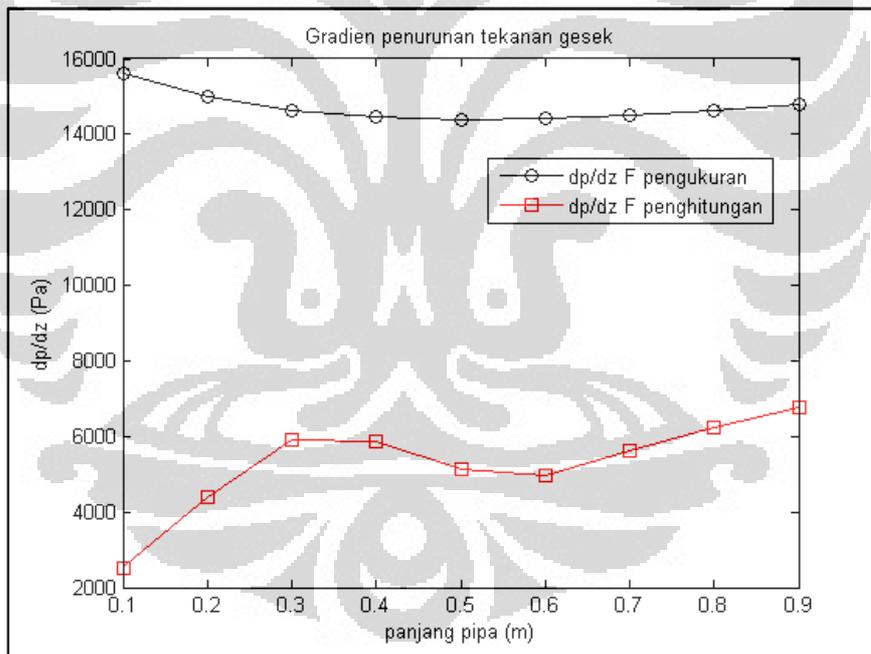
b) kasus 4

Gambar 4-5 Keluaran Matlab untuk a) kasus 3 dan b) kasus 4

Perbandingan antara nilai gradien penurunan tekanan gesek pengukuran dan perhitungan sepanjang aliran dua fasa dapat dilihat pada gambar dibawah :



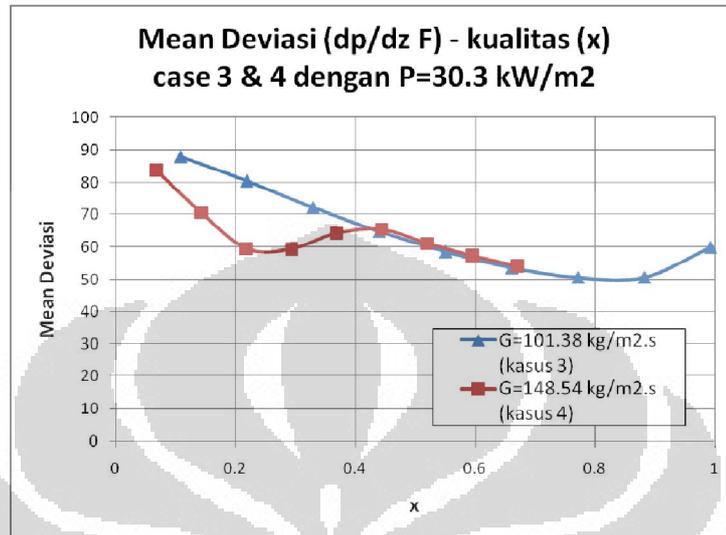
a) kasus 3



b) kasus 4

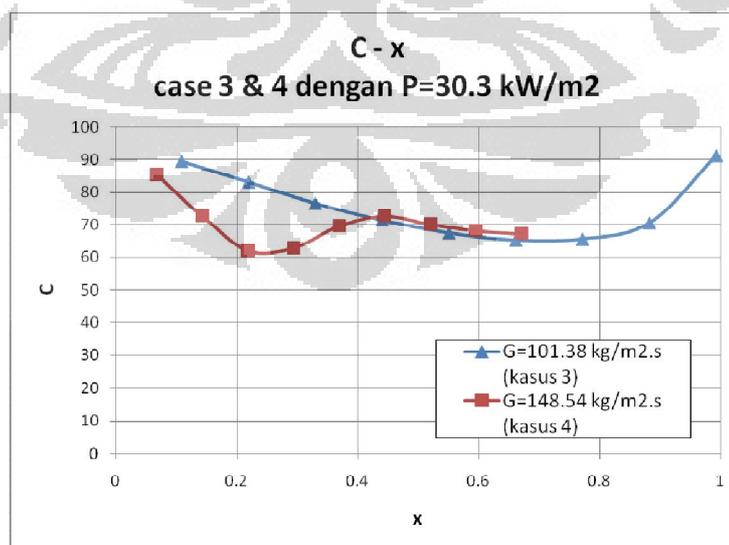
Gambar 4-6 Perbandingan gradien penurunan tekanan gesek pada a)kasus 3 dan b) kasus 4

Dan untuk perbandingan antara mean deviasi gradien penurunan tekanan secara pengukuran dan perhitungan terhadap nilai kualitas dapat dilihat dari grafik berikut:



Gambar 4-7 Grafik mean deviasi penurunan tekanan gesek terhadap kualitas untuk kasus 3 dan 4

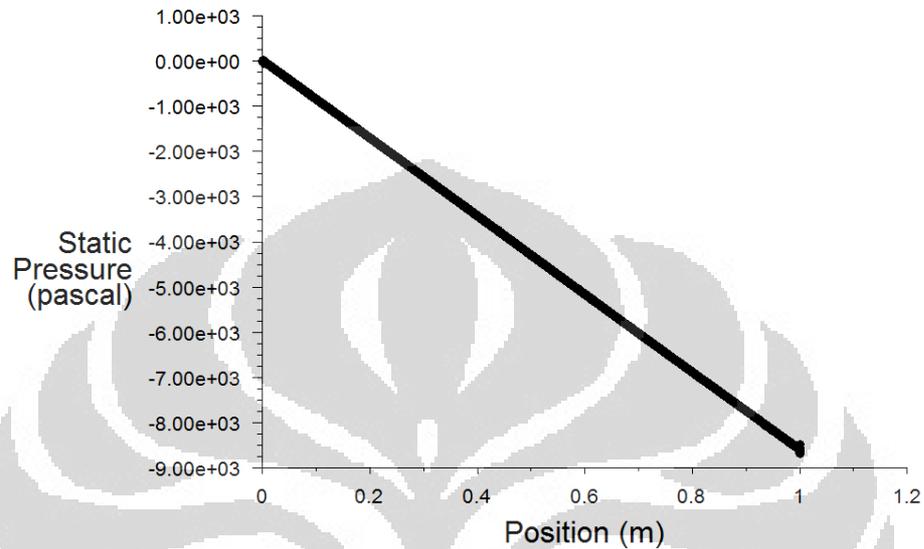
Dan nilai Chisolm dari hasil pengukuran dan perhitungan dapat dibandingkan terhadap nilai kualitas sepanjang aliran dua fasa seperti pada Gambar 4-4 dibawah:



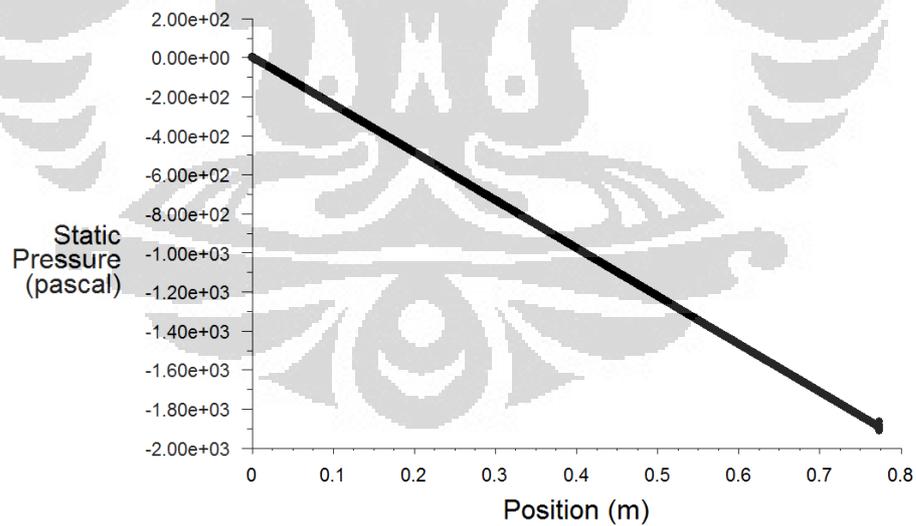
Gambar 4-8 Grafik perbandingan nilai C pengukuran dan perhitungan terhadap kualitas

4.3 HASIL DARI SIMULASI FLUENT

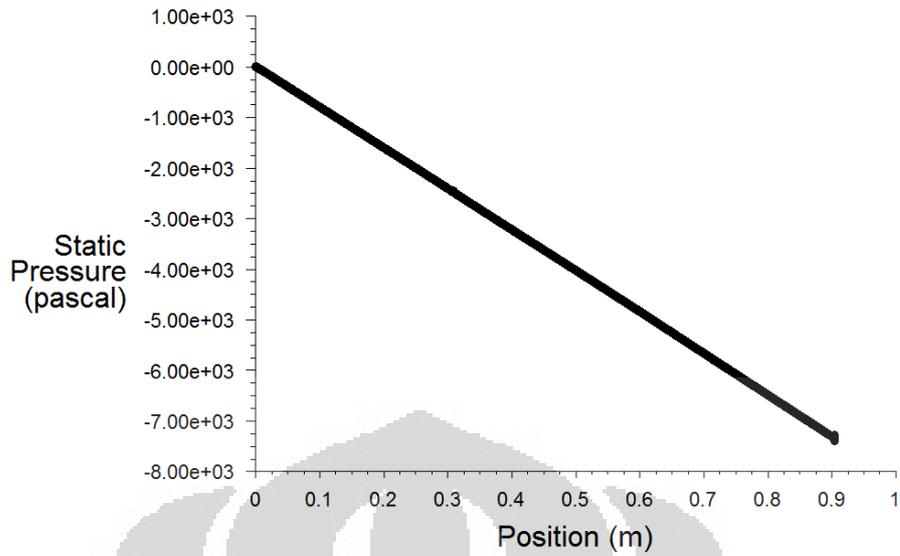
Dari hasil simulasi menggunakan program Fluent menggunakan pengaturan seperti yang dituliskan pada subbab 3.3.2 didapatkan grafik total penurunan tekanan sebagai berikut:



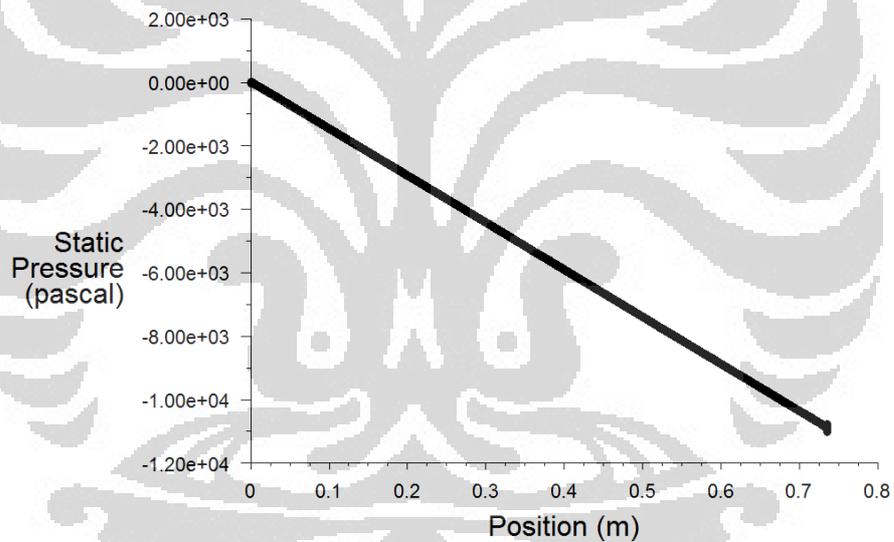
Gambar 4-9 Grafik total penurunan tekanan dari Fluent untuk kasus 1



Gambar 4-10 Grafik total penurunan tekanan dari Fluent untuk kasus 2



Gambar 4-11 Grafik total penurunan tekanan dari Fluent untuk kasus 3

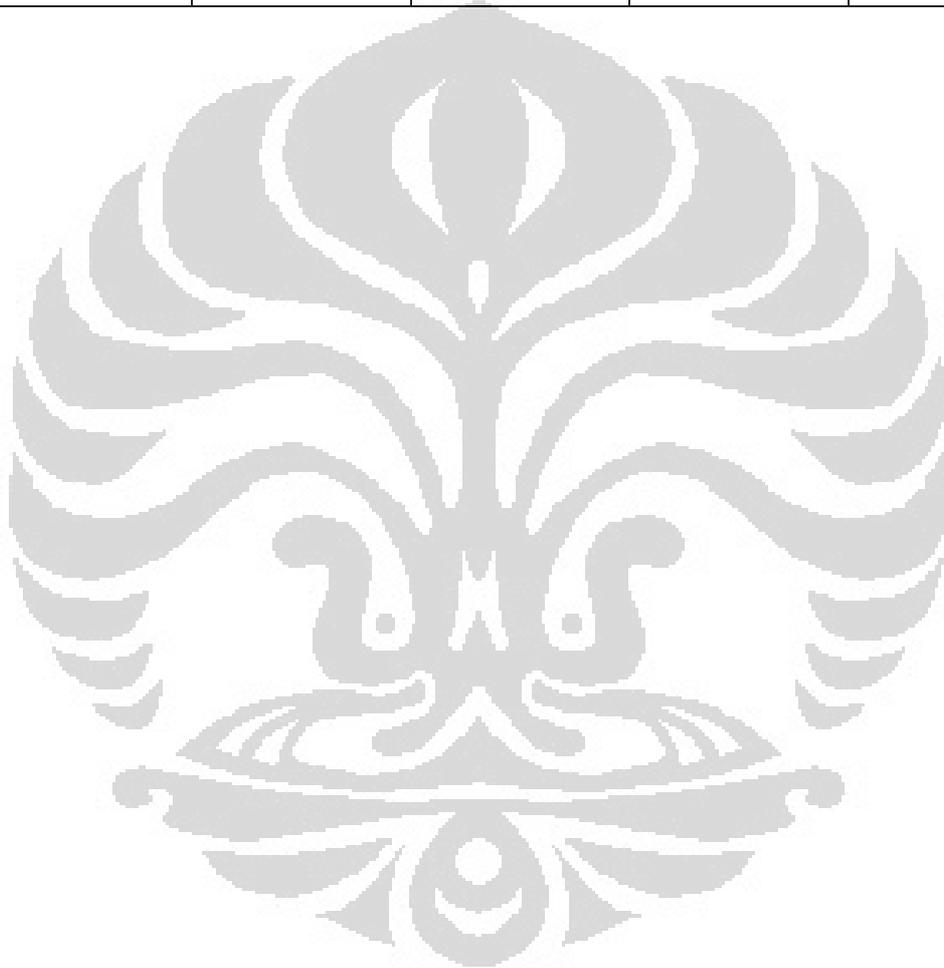


Gambar 4-12 Grafik total penurunan tekanan dari Fluent untuk kasus 4

Patut diperhatikan bahwa pengaturan simulasi Fluent ini menggunakan model aliran ‘homogenis’ yang mengasumsikan aliran dua fasa sebagai fasa fluida yang memiliki karakteristik rata-rata dari kedua fasa tersebut. Hal ini disebabkan karena keterbatasan dalam pengoperasian program Fluent untuk pengaturan dengan aliran dua fasa. Dari hasil simulasi diatas, didapatkan nilai prediksi total penurunan tekanan seperti yang tertulis pada Tabel 4-2 dibawah :

Tabel 4-2 Perbandingan penurunan tekanan prediksi Fluent dan pengukuran

Parameter	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
Prediksi Fluent	8.602 kPa	1.898 kPa	7.353 kPa	10.915 kPa
Hasil pengukuran	4.15 kPa	4.18 kPa	9.81 kPa	18.07 kPa
Deviasi	107.28 %	54.59 %	25.04 %	39.59 %



BAB 5

KESIMPULAN

Dari hasil analisa perbandingan gradien penurunan tekanan gesek secara pengukuran dan perhitungan, terdapat perbedaan dari nilai yang didapatkan. Dari Gambar 4-1 dan Gambar 4-5 didapatkan hasil dari mean deviasi serta average deviasi nilai hasil perhitungan terhadap pengukuran sebagai berikut :

Tabel 5-1 Mean deviasi dan Ave deviasi hasil perhitungan terhadap pengukuran

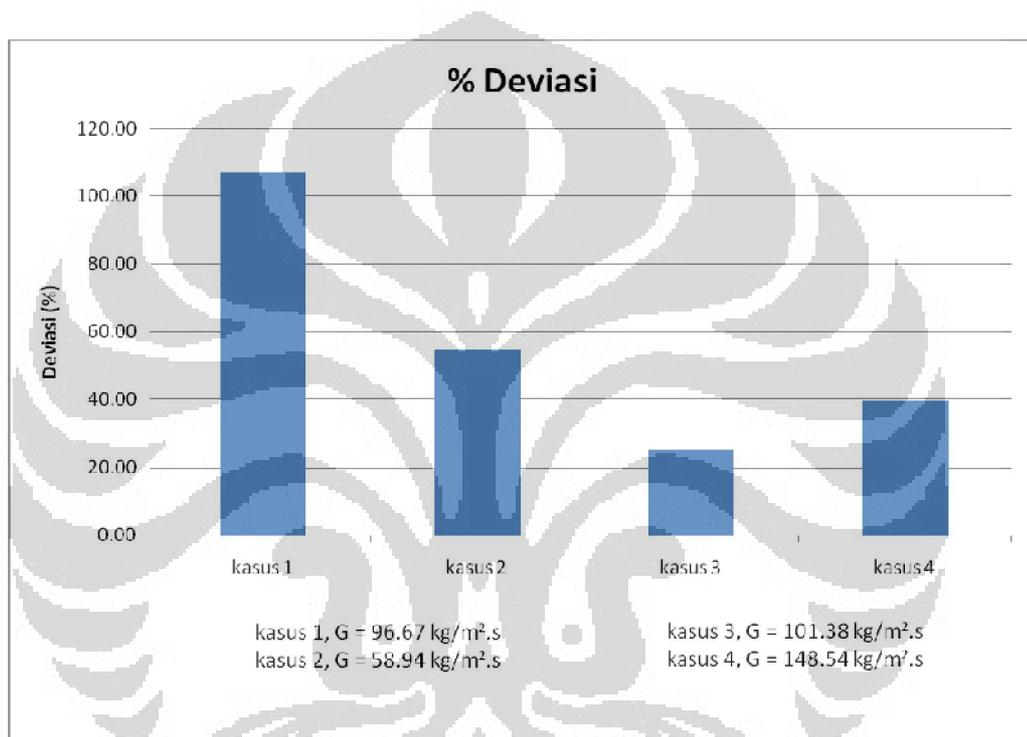
	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3	Kasus 4
Mean Deviasi	31.164 %	64.874 %	64.385 %	64.015 %
Ave Deviasi	-16.908 %	-64.874 %	- 64.385 %	- 64.015 %

Dari Tabel 5-1 diatas dapat dilihat bahwa pendekatan secara teoritis menggunakan korelasi Lockhart-Martinelli serta konstanta Chisolm masih belum mencapai hasil yang memuaskan untuk aliran evaporasi dua fasa pada pipa kanal mini.

Nilai prediksi gradien penurunan tekanan yang didapatkan dengan menggunakan konstanta Chisolm berdasarkan Tabel 2-1 dapat dikaji ulang untuk mendapatkan nilai Chisolm yang lebih fleksibel untuk berbagai jenis aliran fasa cair dan uapnya.

Untuk penelitian selanjutnya dapat diajukan penggunaan korelasi lainnya seperti korelasi Thom atau korelasi Baroczy untuk dilihat perbandingan nilai prediksinya dengan nilai dari hasil pengukuran.

Untuk nilai prediksi total penurunan tekanan dari simulasi Fluent seperti yang tertulis pada Tabel 4-2, pada penelitian ini dapat dilihat bahwa nilai deviasi masih berkisar dari 107.28 % sampai 25.04 %. Penggunaan Fluent untuk memprediksi penurunan tekanan terlihat memiliki deviasi lebih kecil pada fluks massa, G , yang lebih kecil dengan parameter lain yang sama seperti terlihat pada Gambar 5-1 dibawah ini :



Gambar 5-1 Deviasi hasil prediksi Fluent terhadap pengukuran

Dikarenakan program Fluent menggunakan berbagai macam formula kontinuitas dan kesetimbangan energi dan massa dalam menjalankan simulasinya, diperlukan penelitian yang terfokus untuk mencari dan mengaplikasikan parameter-parameter yang sesuai untuk setiap kondisi pengujian. Terutama untuk penelitian tentang aliran dua fasa, diperlukan proses penelitian yang sangat teliti untuk mendapatkan hasil simulasi yang mendekati hasil pengukuran dari alat uji.

DAFTAR PUSTAKA

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (1994). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (2nd ed.). United States of America: McGraw-Hill.

Chisolm, D. (1967). *A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow*. Int. J. Heat Mass Transfer 10, 1767-1778.

Fox, Robert W., McDonald, Alan T. & Pritchard, Philip J. (2003). *Introduction to Fluid Mechanics* (6th 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.

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

Kwang-II 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.

Fluent 6.3 Tutorial Guide. (2006). Lebanon, New Hampshire: Fluent Inc.

LAMPIRAN

Kode Program Matlab

```
clear all
clc

% Program untuk menghitung gradien penurunan tekanan pada aliran dua fasa
jenisFluid='propane';
diaIn=0.003; % meter
qPower=input('Daya pemanas (W)= '); % Watt
flowRate=input('Flow rate (g/min)= '); % g/min
flowRate=flowRate/1000/60; % kg/s
massFlow=flowRate/(pi*diaIn^2/4); % kg/m2-s
tIn=input('Temperatur pada inlet (C)= '); % Celcius
pIn=input('Tekanan pada inlet (kPa)= '); % kPa
pOut=input('Tekanan pada outlet (kPa)= '); % kPa
panjangPipa=1; % meter

tIn=tIn+273.15; % Kelvin
pIn=pIn+101.325; % kPa
pOut=pOut+101.325; %kPa
pDropexp=(pIn-pOut)/panjangPipa*1000; %Pa
fprintf('\n');
fprintf('Gradien penurunan tekanan = %.3g Pa/m\n',pDropexp);

% Subcooled
enthalpyFluid=refpropm('H','T', tIn,'P', pIn,jenisFluid);

enthalpyFSat=refpropm('H','P', pIn,'Q', 0,jenisFluid);
enthalpyGSat=refpropm('H','P', pIn,'Q', 1,jenisFluid);
enthalpyFG=enthalpyGSat-enthalpyFSat;

deltaH=qPower/flowRate;
panjangSC=(enthalpyFSat-enthalpyFluid)/deltaH*panjangPipa;
qualityOut=(deltaH+enthalpyFluid-enthalpyFSat)/enthalpyFG;

fprintf('Panjang kondisi Subcooled = %.3g m\n',panjangSC);

if qualityOut > 1 && panjangSC < 0
    zX1=panjangSC+(1/qualityOut)*(panjangPipa-panjangSC);
    zTP=0:0.1:zX1;
    if zTP(size(zTP,2))<zX1
        zTP(size(zTP,2)+1)=zX1;
    else
    end
    fprintf('Kualitas = 1 pada panjang %.3g m\n',zX1);
```

```
elseif qualityOut > 1 && panjangSC > 0
    zX1=panjangSC+(1/qualityOut)*(panjangPipa-panjangSC);
    if mod(panjangSC,0.1)==0
        zTP=panjangSC:0.1:zX1;
    else
        zTP=(0.1*ceil(panjangSC/0.1)):0.1:zX1;
    end
    if zTP(size(zTP,2)<zX1
        zTP(size(zTP,2)+1)=zX1;
    else
    end
    fprintf('Kualitas = 1 pada panjang %.3g m\n',zX1);

elseif qualityOut < 1 && panjangSC < 0
    zTP=0:0.1:1;
    fprintf('Kualitas pada outlet pipa = %.3g \n',qualityOut);

elseif qualityOut < 1 && panjangSC > 0
    if mod(panjangSC,0.1)==0
        zTP=panjangSC:0.1:1;
    else
        zTP=(0.1*ceil(panjangSC/0.1)):0.1:1;
    end
    fprintf('Kualitas pada outlet pipa = %.3g \n',qualityOut);

end

pPipa=zeros(size(zTP));
qualityZ=zeros(size(zTP));
for n=1:size(zTP,2)
    pPipa(n)=interp1([0 1],[pIn pOut], zTP(n));
    qualityZ(n)=qualityOut*(zTP(n)-panjangSC)/(panjangPipa-...;
        panjangSC);

end

%two phase section

for n=1:size(zTP,2)
    sTension(n)=refpropm('I', 'P',pPipa(n),'Q',qualityZ(n),jenisFluid);

    densityF(n)=refpropm('D', 'P',pPipa(n),'Q',0,jenisFluid);
    densityV(n)=refpropm('D', 'P',pPipa(n),'Q',1,jenisFluid);
    specVolF(n)=1/densityF(n);
    specVolV(n)=1/densityV(n);

    if zTP(1)==panjangSC
        void(n)=0;
    end
end
```

LAMPIRAN
Kode Program Matlab
(Lanjutan)

```

else
    void(n)=(qualityZ(n)/densityV(n))/((1+(0.12*(1-qualityZ(n))))...
        *((qualityZ(n)/densityV(n)+(1-qualityZ(n))/densityF(n))...
        +1.18*(1-qualityZ(n))/(massFlow*densityF(n)^0.5)*...
        (9.81*sTension(n)*((densityF(n)-densityV(n)))^0.25);
end

miuF(n)=refpropm('V','P',pPipa(n),'Q',0,jenisFluid);
miuV(n)=refpropm('V','P',pPipa(n),'Q',1,jenisFluid);
reF(n)=massFlow*diaIn*(1-qualityZ(n))/miuF(n);
reV(n)=massFlow*diaIn*qualityZ(n)/miuV(n);
fF(n)=friction(reF(n));
fV(n)=friction(reV(n));
xMart(n)=sqrt((fF(n)/fV(n))*((1-
qualityZ(n))/qualityZ(n))^2*(specVolF(n)/specVolV(n)));
c(n)=consC(reF(n),reV(n));
fricMulti(n)=(1+c(n)/xMart(n)+1/(xMart(n)^2));
end

for n=1:size(zTP,2)-1

    pDropATP(n)=massFlow^2*((qualityZ(n+1)^2/densityV(n+1)/void(n+1))...
        +(checkNum((1-qualityZ(n+1))^2/(1-void(n+1))/densityF(n+1))))...
        -(checkNum(qualityZ(n)^2/densityV(n)/void(n)))...
        +((1-qualityZ(n))^2/(1-void(n))/densityF(n))/(zTP(n+1)-zTP(n));

    pDropFTPcal(n)=(2*fF(n))*((1-qualityZ(n))^2)*(massFlow^2)*specVolF(n)/diaIn...
        *fricMulti(n);

    pDropFTPexp(n)=(pDropexp)-pDropATP(n);

    fricMultiexp(n)=pDropFTPexp(n)/(2*fF(n))*((1-
qualityZ(n))^2)*(massFlow^2)*specVolF(n)/diaIn;
    cExp(n)=(fricMultiexp(n)-1-(1/(xMart(n)^2))*xMart(n);

end

% plot
figure(1);
plot(zTP(1:size(zTP,2)-1),pDropFTPexp,'-ko',...
    zTP(1:size(zTP,2)-1),pDropFTPcal,'-rs');
legend('dp/dz F pengukuran','dp/dz F penghitungan','Location','Best');
xlabel('panjang pipa (m)');
ylabel('dp/dz (Pa)');
title('Gradien penurunan tekanan gesek');

figure(2);

```

LAMPIRAN
Kode Program Matlab
(Lanjutan)

```
plot(zTP(1:size(zTP,2)-1),fricMultiexp,'-ko',...
     zTP(1:size(zTP,2)-1),fricMulti(1:size(fricMulti,2)-1),'-rs');
legend('Fric Multi pengukuran','Fric Multi penghitungan','Location','Best');
xlabel('panjang pipa (m)');
ylabel('\phi^{2}');
title('Frictional Multiplier');

figure(3);
plot(zTP(1:size(zTP,2)-1),cExp,'-ko',...
     zTP(1:size(zTP,2)-1),c(1:size(c,2)-1),'-rs');
legend('C pengukuran','C penghitungan','Location','Best');
xlabel('panjang pipa (m)');
ylabel('C');
title('Nilai C (Chisolm)');

% deviasi
for n=1:size(zTP,2)-1
    mean(n)=abs((pDropFTPcal(n)-pDropFTPexp(n))/pDropFTPexp(n)*100);
    meanAve(n)=(pDropFTPcal(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:size(zTP,2)-1
    fprintf('%0.3fm\t      %0.3f\t      %0.3f      Pa      \t      %0.3f      Pa\t      %0.3f
Pa\n',zTP(n),qualityZ(n),pDropATP(n),pDropFTPexp(n),pDropFTPcal(n));
end

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



---


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


---


```

```
function value=consC(reF,reG)

% mencari nilai Chisolm
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 >=2300 && reF <= 3000
    if reG > 3000
        value=12+(8*(reF-2300)/700);
    elseif reG < 2300
        value=5+(5*(reF-2300)/700);
    else
        value=((5+(15*(reG-2300)/700))+(5+(15*(reF-2300)/700)))/2;
    end
elseif reG >=2300 && reG <= 3000
    if reF > 3000
        value=10+(10*(reG-2300)/700);
    elseif reF < 2300
        value=5+(7*(reG-2300)/700);
    else
        value=5+(15*((reF+reG/2)-2300)/700);
    end
end



---


function value=CheckNum(num)

% untuk mengecek nilai error karena membagi dengan nol
if isnan(num)||isinf(num)
    value=0;
else
    value=num;
end
```