



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA PENGARUH PENAMBAHAN *COMPRESSIVE*
STRESS PADA *SEAL BOTTLE VALVE* TERHADAP LAJU
KEBOCORAN TABUNG GAS LPG**

SKRIPSI

**I NYM GUNI RIDHANTA
0806315774**

**FAKULTAS TEKNIK
TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISA PENGARUH PENAMBAHAN *COMPRESSIVE*
STRESS PADA *SEAL BOTTLE VALVE* TERHADAP LAJU
KEBOCORAN TABUNG GAS LPG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**I NYM GUNI RIDHANTA
0806315774**

**FAKULTAS TEKNIK
TEKNIK MESIN
DEPOK
JANUARI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : I Nym Guni Ridhanta

NPM : 0806315774

Tanda Tangan :



Tanggal : 2 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : I Nym Guni Ridhanta
NPM : 0806315774
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : Analisa Pengaruh Penambahan *Compressive Stress*
Pada *Seal Bottle Valve* Terhadap Laju Kebocoran
Tabung Gas LPG

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing (

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng

Penguji 2 : Prof. Ir. Yulianto Sulistyono Nugroho M.Sc., Ph.D (

Penguji 3 : Dr. Ir. Adi Surjasatyo M.Eng

Ditetapkan di : Departemen Teknik Mesin FTUI, Depok
Tanggal : 2 Januari 2012



KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Ida Shang Hyang Widhi Wasa atas berkat dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan sebaik-baiknya. Skripsi dengan judul “Analisa Pengaruh Penambahan *Compressive Stress* Pada *Seal Bottle Valve* Terhadap Laju Kebocoran Tabung Gas LPG” ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis berterima kasih atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan oleh berbagai pihak. Secara khusus, penulis mengucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada :

1. Prof. Dr. Ir. I Made Kartika Dhiputra, Dipl.-Ing atas bimbingan dan ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
2. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng selaku ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
3. Prof. Dr. Ir. Bambang Sugiarto, M.Eng selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Indonesia yang memberikan masukan dan kritik yang membangun.
4. Orang tua tercinta atas semua dukungan doa dan kasih sayang serta segala hal yang telah diberikan.
5. Ibu Rini Tampi, Mba Myrtha dan seluruh officer Astro Kasih Sampoerna Foundation yang sangat mendukung pencapaian saya dari awal kuliah hingga dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Dea Adreani, Pak Satya, Sofrida Rosita, Nur Halimah, Fajardo, Gani, Ferdi, Dwi Wicaksono, Risky Taufik sebagai teman yang banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Mesin angkatan 2008 atas semua kerjasamanya.
8. Semua staf dan karyawan di Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia atas segala bantuannya.
9. Serta berbagai pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu untuk segala kontribusinya.

Harapan penulis skripsi ini dapat bermanfaat secara keilmuan bagi setiap orang yang membacanya. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan oleh penulis demi tercapainya hasil yang lebih baik.

Depok, 2012



Penulis



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : I Nym Guni Ridhanta
NPM : 0806315774
Program Studi : Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : “Analisis Pengaruh Penambahan Compressive Stress Pada Seal Terhadap Laju Kebocoran Tabung Gas LPG” 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 : 4 Januari 2012

Yang menyatakan



(I Nym Guni Ridhanta)

ABSTRAK

Nama : I Nym Guni Ridhanta
Program Studi : Teknik Mesin
Judul : Analisa Pengaruh Penambahan *Compressive Stress* Pada *Seal Bottle Valve* Terhadap Laju Kebocoran Tabung Gas LPG

Kebocoran sistem LPG memang tidak dapat dihindarkan dalam penggunaannya sebagai bahan bakar rumah tangga mengingat kebocoran pada sistem ini salah satunya disebabkan oleh aliran difusi. Kebocoran akibat aliran difusi pada tabung LPG 3kg sebagian besar disebabkan oleh aliran difusi laminar yang diketahui melalui perbandingan *compressive stress* dengan *gasket seating stress* yang bernilai kurang dari 1 dengan karakteristik berupa persamaan eksponensial. Penambahan *compressive stress* terbukti memperkecil aliran difusi yang menyebabkan pengurangan tingkat kebocoran mencapai 33.18% untuk *seal* NBR dan 36.43% untuk *seal* Vulkanis. Pengurangan laju kebocoran akibat penambahan *compressive stress* sangat dipengaruhi oleh material penyusun seal yang direpresentasikan melalui nilai A_L dan n_L .

Analisa numerik memperlihatkan bahwa *von mises stress* yang diterima oleh *seal* masih dibawah nilai *yield strength* dari material jenis karet dengan nilai *Factor of Safety (FOS)* mencapai 7.08 yang menegaskan bahwa defleksi yang terjadi pada *seal* berada pada daerah elastisnya dengan nilai maksimum sebesar 0.326 mm. Selain itu analisa numerik juga memperlihatkan bahwa aliran difusi yang terjadi pada *seal* membentuk gradasi konsentrasi sesuai kedekatan dengan permukaan kontak difusinya.

Kata kunci : Kebocoran, LPG, karet perapat, *compressive stress*, aliran difusi, aliran laminar, aliran molekular, von mises

ABSTRACT

Name : I Nym Guni Ridhanta
Major of Study : Mechanical Engineering
Title : The Effect of Additional Compressive Stress on the Seal of
Bottle Valve to Reduce the Leakage Rates of LPG Supply
System

The Leak of LPG system can not be avoided in its uses as domestic fuel which considering it is one of the result from difussion flow. The leak because of difussion flow in 3 kg LPG tube is mostly caused by Laminar difussion flow known by comparing compressive stress with gasket seating stress which value less than 1 with characteristic in exponensial equations. Augmentation of Compressive stress is proved in minimizing difussion flow which cause subtraction in leak until 33.18% to seal NBR and 36.43 to seal vulkanis. Minimizing leak caused by increasing compressive stress is very affected by seal material composed represented by A_L and n_L .

Numerical Analysis founded that von mises stress received by seal is still under yield strength from rubber material with Factor of Safety (FOS) achieve at 7.08, this condition affirm that deflection happened in Seal in its elastic area with maximum value about 1.326 mm. Beside that, numerical analysis display that difussion flow is happened in seal creating gradiation concetration based on the imminent of diffusion contact.

Keywords : Leakage rate, LPG, seal, compressive stress, diffusion flow, laminar flow, molekular flow, von mises

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Ruang Lingkup Masalah.....	3
1.5 Hipotesis.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Komposisi Gas Bumi.....	5
2.2 Karakteristik Gas LPG.....	5
2.3 Sistem Bahan Bakar LPG.....	7
2.3.1 Tabung.....	7
2.3.2 Regulator.....	10

2.3.3 Karet Perapat (Rubber-seal).....	10
2.3.4 Katup Tabung.....	12
2.4 Fenomena Perpindahan (<i>Transport Phenomena</i>).....	13
2.4.1 Peristiwa Perpindahan.....	13
2.4.2 Perpindahan Molekular dan Konvektif.....	14
2.4.2.1 Perpindahan Molekular.....	14
2.4.2.1.1 Hukum Viskositas Newton.....	14
2.4.2.1.2 Hukum Difusi Pertama Fick.....	15
2.4.2.2 Perpindahan Konvektif.....	18
2.5 Konsep Regangan.....	19
2.6 Konsep Von Mises.....	19
2.7 <i>Computational Fluid Dynamic</i>	19
2.8 <i>Finite Element Analysis</i>	23
3. METODELOGI PENELITIAN.....	25
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	25
3.1.1 Kajian Eksperimental.....	26
3.1.1.1 Alat –Alat Eksperimen.....	27
3.1.1.2 Setup Penelitian.....	29
3.1.1.3 Metode Kalkulasi.....	31
3.1.2 Pengolahan Statistik.....	33
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Laju Kebocoran Terhadap Waktu.....	34
4.1.1 Ekstrapolasi (Forecasting) Data.....	36
4.1.1.1 <i>Forecasting Data Seal NBR</i>	37
4.1.1.2 <i>Forecasting Data Seal Vulkanis</i>	39
4.1.2 Grafik Δm terhadap Waktu Hasil <i>Forecasting</i>	42

4.1.3 Menentukan Persamaan Laju Kebocoran (<i>Leakage Rates</i>).....	45
4.1.3.1 Persamaan Laju Kebocoran (<i>Leakage Rates</i>) NBR.....	46
4.1.3.2 Persamaan Laju Kebocoran Seal Vulkanis.....	48
4.1.3.3 Komparasi Persamaan <i>Leakage Seal</i> NBR dan Vulkanis...	51
4.1.4 Pengaruh Perbedaan Tekanan Terhadap Leakage.....	51
4.1.5 Laju Kebocoran Terhadap <i>Compressive Stress</i>	61
4.2 Analisa Numerikal.....	62
4.2.1 Analisis Pembebanan Material.....	62
4.2.1.1 Analisis Von Mises Stress Karet Perapat LPG.....	65
4.2.1.2 Analisis Defleksi Karet Perapat LPG.....	67
4.2.2 Analisis Perpindahan Melalui Media Berpori.....	68
5. KESIMPULAN.....	72
SARAN.....	73
DAFTAR PUSTAKA.....	74
LAMPIRAN.....	76

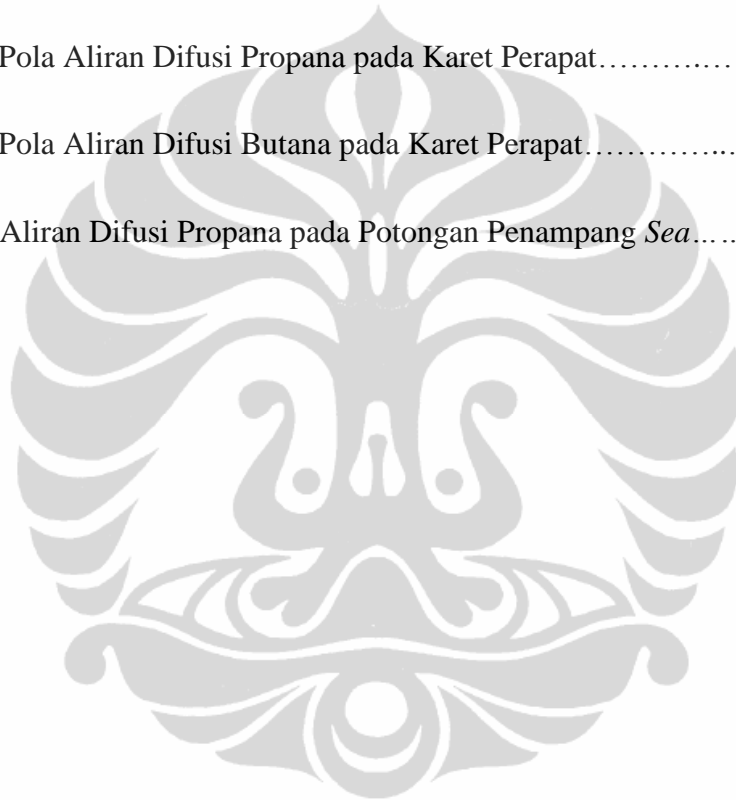
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi Gas Bumi Berdasarkan Fraksi Mol.....	5
Tabel 2.2	Syarat Mutu Seal LPG.....	11
Tabel 2.3	Besaran Beberapa Parameter Fenomena Perpindahan.....	18
Tabel 2.4	Tiga Besaran yang Umum untuk Perpindahan Konvektif.....	19
Tabel 4.1	Hasil Pengambilan Data <i>Seal</i> NBR.....	34
Tabel 4.2	Hasil Pengambilan Data <i>Seal</i> Vulkanis.....	35
Tabel 4.3	Hasil <i>Forecasting</i> Data <i>Seal</i> NBR.....	39
Tabel 4.4	Hasil <i>Forecasting</i> Data <i>Seal</i> Vulkanis.....	41
Tabel 4.5	Hasil Kalkulasi Gaya Penekanan untuk Variasi Putaran.....	42
Tabel 4.6	Pengolahan data Kalkulasi Laju Kebocoran <i>Seal</i> NBR.....	46
Tabel 4.7	Pengolahan data Kalkulasi Laju Kebocoran <i>Seal</i> Vulkanis.....	48
Tabel 4.8	Perbedaan Tekanan Terhadap Leakage <i>Seal</i> NBR.....	53
Tabel 4.9	Perbedaan Tekanan Terhadap Leakage <i>Seal</i> Vulkanis.....	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Badan Tabung LPG Konstruksi 2 dan 3 Bagian.....	8
Gambar 2.2	Penampang Melintang Regulator LPG.....	10
Gambar 2.3	Potongan Seal LPG.....	11
Gambar 2.4	Peletakan Katup Tabung LPG.....	12
Gambar 2.5	Potongan Penampang Katup Tabung LPG.....	13
Gambar 2.6	Tegangan-tegangan Oktahedral.....	21
Gambar 2.7	Program COMSOL.....	23
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian.....	26
Gambar 3.2	Pressure Lutron Meter PS-9302.....	27
Gambar 3.3	Timbangan D-Scale A102.....	28
Gambar 3.4	Penekan Regulator.....	28
Gambar 3.5	Konektor Penghubung Tabung dan <i>Pressure Meter</i>	29
Gambar 3.6	<i>Setup</i> Penelitian.....	29
Gambar 3.7	Regulator yang Dibentuk untuk penghubung ke tangki LPG..	30
Gambar 4.1	Grafik Δm Terhadap Waktu <i>Seal</i> NBR.....	43
Gambar 4.2	Grafik Δm Terhadap Waktu <i>Seal</i> vulkanis.....	43
Gambar 4.3	Viskositas dinamik 60% propane dan 40% vs T.....	45
Gambar 4.4	Grafik $\ln L$ vs $\ln (\sigma/\sigma_0)$ untuk seal NBR.....	47
Gambar 4.5	Grafik $\ln L$ vs $\ln (\sigma/\sigma_0)$ untuk <i>seal</i> vulkanis.....	50
Gambar 4.6	Grafik Kebocoran Terhadap Beda Tekanan Seal NBR.....	55-56
Gambar 4.7	Grafik Kebocoran Terhadap Beda Tekanan Seal Vulkanis...	59-60

Gambar 4.8 Grafik Laju Kebocoran Terhadap <i>Compressive Stress</i>	61
Gambar 4.9 Geometri Seal Pada Simulasi.....	63
Gambar 4.10 Propertise Rubber dalam Simulasi.....	64
Gambar 4.11 Meshing Karet Perapat dalam Simulasi FEM.....	65
Gambar 4.12 Hasil Von Mises Stress dari FEM.....	66
Gambar 4.13 Hasil Defleksi Seal dari simulasi FEM.....	67
Gambar 4.14 Pola Aliran Difusi Propana pada Karet Perapat.....	69
Gambar 4.15 Pola Aliran Difusi Butana pada Karet Perapat.....	69
Gambar 4.16 Aliran Difusi Propana pada Potongan Penampang <i>Sea</i>	71

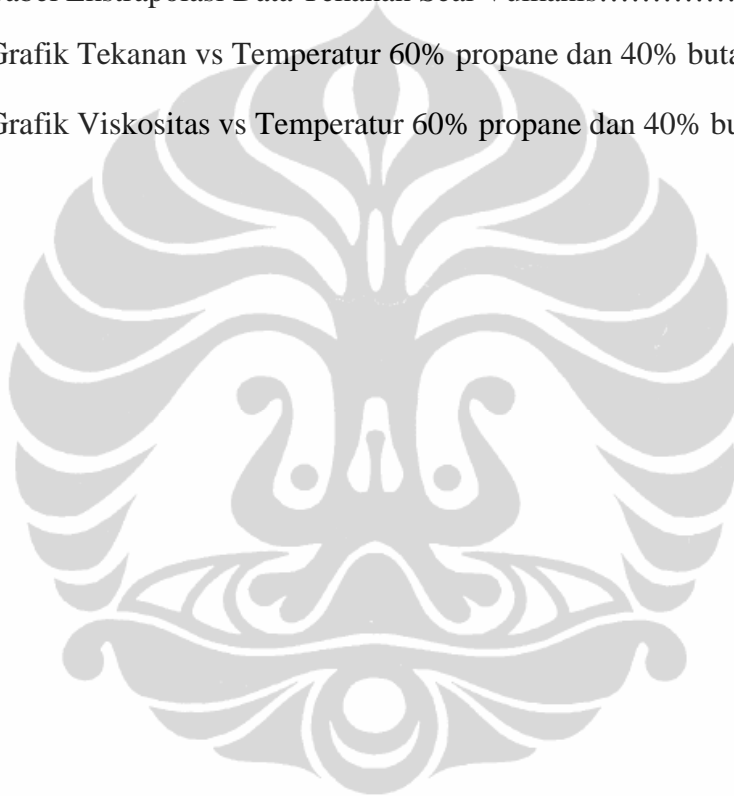


DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
L	Kebocoran	Pa m ³ /s
T	Temperatur	K
P	Tekanan	Bar
K	Koefisien Reaksi	cm/mol s
k	Konstanta Pegas	N/m ²
F	Gaya	N
σ	Tegangan	Pa
σ_0	Gasket Seating Stress	Pa
l	Panjang lubang kapiler	mm
M	Masa molekular	
R	Tetapan gas ideal	J/kg K
u	energi distorsi	J
E	modulus elastisitas	N/m ²
ν	poisson ratio	
k	jumlah pori	
V	volume	m ³
m	massa	kg

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1: Tabel Ekstrapolasi Data Massa Seal NBR.....	76
Lampiran 2: Tabel Ekstrapolasi Data Massa Seal Vulkanis.....	80
Lampiran 3: Tabel Ekstrapolasi Data Tekanan Seal NBR.....	84
Lampiran 4: Tabel Ekstrapolasi Data Tekanan Seal Vulkanis.....	88
Lampiran 5: Grafik Tekanan vs Temperatur 60% propane dan 40% butane.....	89
Lampiran 5: Grafik Viskositas vs Temperatur 60% propane dan 40% butane...	90



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia sangat berkaitan dengan bahan bakar gas sebagai penunjang utama kebutuhan rumah tangga. Hal ini berkaitan dengan keputusan pemerintah mencanangkan program konversi minyak tanah menjadi bahan bakar gas LPG yang didasarkan pada aspek penghematan subsidi minyak tanah, aspek dampak lingkungan, dan mengatasi masalah penyalahgunaan subsidi minyak tanah yang dilakukan oleh kalangan industri dan masyarakat mampu^[1]. LPG dengan harga yang relative lebih murah per kalorinya tidak hanya memberikan penghematan anggaran negara sebesar 25 triliun per tahunnya namun juga emisi pembakaran yang lebih rendah dibandingkan minyak tanah serta lebih ramah lingkungan^[1].

Dalam proses pengkonversian minyak tanah menjadi LPG ini terdapat banyak kecelakaan berupa meledaknya tabung LPG ketika digunakan oleh masyarakat. Kecelakaan yang sering terjadi adalah bermula dari adanya kebocoran gas (*leakage*) pada sistem saluran bahan bakar gas yang kemudian dapat mengakibatkan adanya sambaran nyala api (*flame flash back*) yang sangat potensial mengakibatkan kebakaran dan bahkan diikuti ledakan apabila terjadi fenomena sumbatan uap bahan bakar (*liquid-vapor lock*) baik pada saluran maupun pada tanki bahan bakar gas LPG^[2]. Selama 10 tahun terakhir telah terjadi lebih dari 800 kebakaran setiap tahun atau sekitar 2 hingga 3 kali kebakaran per hari, dengan korban meninggal mencapai 27 jiwa dan kerugian langsung mencapai nilai Rp 250 miliar setiap tahunnya. Lebih dari 45 persen kebakaran terjadi di bangunan permukiman, dan lebih dari 25 persen terjadi di bangunan umum, seperti pasar tradisional, usaha kecil dan menengah, dan industri manufaktur dimana salah satu penyebab utamanya adalah ledakan LPG selain karena hubungan arus pendek^[3].

Kebocoran gas LPG dapat disebabkan oleh adanya kebocoran pada rangkaian saluran gas dari tabung LPG menuju kompor mulai dari katup yang didalamnya dilengkapi dengan karet perapat (*rubber seal*), regulator, selang dan instalasi penunjang lainnya. Hal yang menjadi fokus perhatian adalah performa berbagai macam rubber seal di pasaran dalam mengatasi kebocoran (*leakage*). Karet perapat sering

kali menjadi permasalahan bagi para pengguna gas LPG dimana merupakan sumber utama penyebab kebocoran gas LPG^[3]. Berbagai upaya dilakukan untuk meningkatkan performa dari karet perapat ini misalnya dengan pemilihan material dan penambahan gaya penekan di atas regulator dengan berbagai macam konstruksi yang banyak di jual di masyarakat. Penekan ini tidak memiliki standar pemakaian yang jelas terutama dari besarnya gaya yang harus diberi untuk mendapatkan hasil pengurangan kebocoran yang optimal.

Penambahan gaya penekan ini menjadi *trend* untuk meningkatkan performa dari karet perapat namun tidak ada penelitian terkait pengaruh penambahan tekanan ini terhadap karakteristik laju kebocoran gas pada tabung gas LPG. Harapannya dengan mengetahui karakteristik hubungan antara kedua parameter ini maka dapat dibuat suatu mekanisme yang optimal dalam pembuatan konstruksi penekan pada regulator.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam penelitian ini difokuskan pada pengaruh penambahan *compressive stress* pada karet perapat (*rubber seal*) terhadap karakteristik laju kebocoran (*leakage*) dengan menggunakan model aliran laminar Hagen-Poiseuille dan model aliran molekular Knudsen. Selain itu penelitian ini juga menggunakan 2 varian *seal* yang banyak terdapat di pasaran dengan properties material yang berbeda untuk dapat mengetahui karakteristik performa dari masing-masing seal terhadap penambahan *compressive stress* ini.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui perbedaan karakteristik kebocoran untuk *seal* NBR dan *seal* vulkanis yang banyak terdapat di masyarakat
2. Untuk mengetahui pengaruh penambahan *compressive stress* terhadap penurunan laju kebocoran gas LPG.
3. Untuk mengetahui perbedaan respon (karakteristik) jenis *seal* yang berbeda terkait penambahan *compressive stress* terhadap laju kebocoran gas LPG.

4. Untuk melihat hubungan antara laju kebocoran dengan tekanan dalam tabung LPG.
5. Untuk mengetahui pembebanan statik yang diterima oleh seal saat beroperasi.
6. Melihat pola difusi dari gas LPG kedalam karet perapat (*seal*).

1.4 Ruang Lingkup Masalah

Dalam penelitian ini diambil batasan masalah berdasarkan kondisi sebagai berikut:

1. Gas LPG memiliki komposisi 60% propane dan 40% butane
2. Tekanan atmosfer dianggap tetap sebesar 1 bar
3. Karet perapat (*seal*) dianggap sebagai benda berpori yang homogen
4. Dilakukan hanya satu pendekatan untuk setiap fenomena kebocoran (*leakage*) yaitu antara *laminar flow* atau *molecular flow*
5. Lebar efektif *seal* dianggap sebagai selisih antara diameter luar dan diameter dalam mengingat bentuk *seal* yang tidak silinder sempurna.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Menjelaskan mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup permasalahan, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan studi literatur secara umum dan secara khusus mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Berisikan diagram alir penelitian, alat yang digunakan dalam penelitian, dan prosedur penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Menampilkan hasil pengolahan data baik secara eksperimen maupun numerical dan mengkaitkannya dengan dasar teori guna memahami fenomena yang terjadi

BAB 5 KESIMPULAN

Berisikan mengenai kesimpulan yang diperoleh dalam penelitian.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komposisi Gas Bumi

Gas bumi merupakan proses alami hidrokarbon yang terjadi dalam kondisi tekanan dan temperatur atmosfer berupa fase gas yang diperoleh dari proses penambangan minyak dan gas bumi yang terdiri dari unsure metana, etana, dan senawa hidrokarbon yang lebih tinggi serta gas-gas lain, diantaranya adalah nitrogen, dengan komposisi seperti terlihat pada tabel berikut^[4]

komponen	fraksi mol
Metana	0.8978
Etana	0.0465
Propana	0.0209
Butana	0.0082
Pentana	0.0052
karbondioksida	0.0199
Nitrogen	0.0015

Tabel 2.1 Komposisi Gas Bumi Berdasarkan Fraksi Mol

Dengan jumlah gas bumi yang cukup melimpah di Indonesia, maka gas bumi merupakan salah satu sumber energi yang bermanfaat dan potensial. Menurut data statistik persediaan cadangan gas bumi Indonesia pada tahun 2006, terdapat cadangan gas bumi sebesar 187,09 (TSCF), meliputi 93,95 TSCF cadangan terbukti dan 93,14 TSCF cadangan potensial^[5]. Propana dan butana merupakan gas utama penyusun LPG memiliki presentase yang cukup besar di dalam kandungan gas bumi.

2.2 Karakteristik LPG (*Liquefied Petroleum Gasses*)

ELPIJI merupakan merek dagang dari LPG atau *Liquefied Petroleum Gasses*. Merupakan campuran dari berbagai *hydrocarbon*, sebagai hasil penyulingan minyak mentah berbentuk gas. Dengan menambah tekanan atau menurunkan suhunya

membuat menjadi cairan. Inilah yang kita kenal dengan bahan bakar gas cair. Elpiji merupakan senyawa *hydrocarbon* yang dikenal sebagai Butana (C_4H_{10}), Propana (C_3H_8), Isobutana atau campuran antara Butana dengan Propana. Tekanan uap ELPIJI sebesar 4 - 9 kg/cm² dan nilai kalori: + 21.000 BTU/lb^[6]. Secara umum sifat ELPIJI adalah sebagai berikut^[6] :

- a. Berat jenis gas ELPIJI lebih besar dari udara, yaitu :
 - o Butana mempunyai berat jenis dua kali berat jenis udara.
 - o Propana mempunyai berat jenis satu setengah kali berat udara.
- b. Tidak mempunyai sifat pelumasan terhadap metal.
- c. Merupakan *solvent* yang baik terhadap karet, sehingga perlu diperhatikan terhadap kemasan atau tabung yang dipakai.
- d. Tidak berwarna baik berupa cairan maupun dalam bentuk gas.
- e. Tidak berbau. Sehingga untuk keamanan, ELPIJI komersial perlu ditambah zat odor, yaitu *ethyl mercaptane* yang berbau menyengat seperti petai.
- f. Tidak mengandung racun.
- g. Bila menguap di udara bebas akan membentuk lapisan karena kondensasi sehingga adanya aliran gas.
- h. Setiap kilo gram ELPIJI cair dapat berubah menjadi kurang lebih 500 liter gas ELPIJI.
- i. LPG menghambur di udara secara perlahan sehingga sukar mengetahuinya secara dini.
- j. Tekanan gas LPG cukup besar, sehingga bila terjadi kebocoran LPG akan membentuk gas secara cepat, memuai dan sangat mudah terbakar.

Jenis produk yang ditawarkan PERTAMINA agar dimanfaatkan oleh konsumen adalah jenis ELPIJI campuran antara Propana dan Butana. Ciri-cirinya adalah :

1. Berbentuk cair.
2. Mempunyai daya pemanasan yang tinggi karena mempunyai nilai kalori yang relatif lebih tinggi per-satuan beratnya dibanding bahan bakar lain untuk kegunaan yang sama.

3. Tingkat polusi udara dari gas buang rendah dan tidak meninggalkan residu apabila menguap.
4. Bersih, tidak beracun, tidak berwarna, mudah dan aman dalam pengangkutan dan penyimpanannya.
5. Tidak menyebabkan pengkaratan pada besi dan tabung kemasan.

Jenis ELPIJI yang ada dipasaran adalah :

- a. Bahan bakar untuk kebutuhan rumah tangga, industri dan komersial yaitu bahan bakar ELPIJI campuran yang disebut ELPIJI CAMPURAN.
- b. Bahan bakar ELPIJI untuk kebutuhan khusus dan komersial yaitu bahan bakar ELPIJI PROPANA.
- c. Bahan bakar ELPIJI untuk kebutuhan komersial yaitu ELPIJI BUTANA.

2.3 Sistem Bahan Bakar LPG

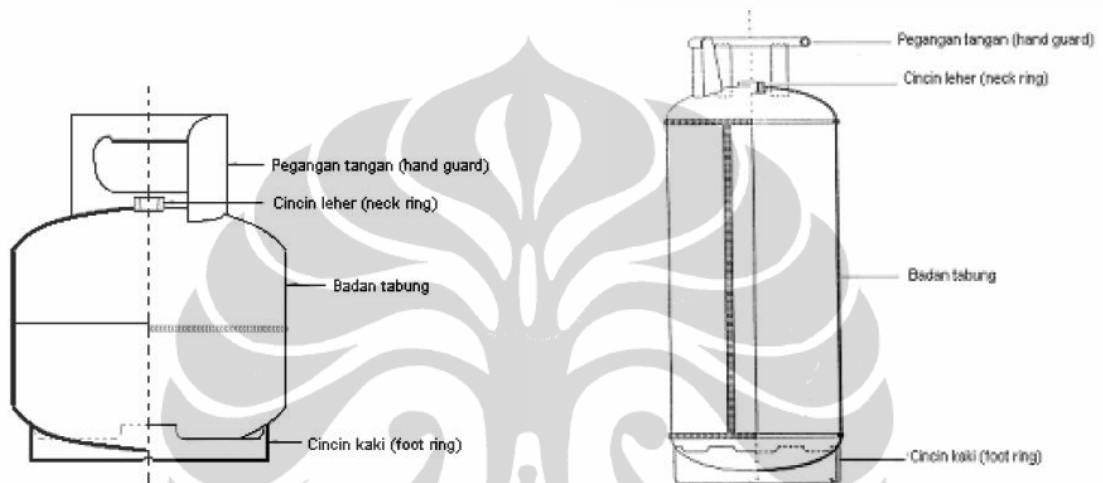
LPG (Liquid Petroleum Gas) merupakan bahan bakar gas yang banyak digunakan dalam masyarakat untuk proses pembakaran di rumah tangga. Sistem bahan bakar LPG ini memiliki beberapa bagian utama seperti tabung LPG, regulator, karet perapat (*rubber-seal*), katup tabung, selang, dan kompor. Dalam penelitian ini difokuskan hanya sampai konstruksi sekitar tabung yaitu meliputi tabung LPG, karet perapat (*rubber-seal*), regulator, dan katup tabung (*bottle valve*).

2.3.1 Tabung LPG

Tabung baja LPG adalah tabung yang dibuat dari plat baja karbon canai panas, digunakan untuk menyimpan gas LPG (liquid petroleum gas) dengan kapasitas pengisian antara 3 kg (7.3 liter) sampai dengan 50 kg (108 liter) dan memiliki tekanan rancang bangun minimum 18.6 kg/cm^2 ^[7]. Tabung baja LPG diklasifikasikan menjadi 2 bagian yaitu konstruksi 2 bagian (two piece) dengan kapasitas penyimpanan sebesar 3 kg sampai dengan maksimal 15 kg dan konstruksi 3 bagian (three piece) dengan kapasitas diatas 15 kg sampai dengan maksimal 50 kg^[7].

Konstruksi tabung LPG terdiri dari beberapa bagian yaitu^[7]

- Badan tabung terdiri dari bagian atas dan bawah (top dan bottom) untuk konstruksi 2 (dua) bagian dan untuk konstruksi 3 (tiga) bagian terdiri dari bagian atas, tengah dan bawah
- Cincin leher (neck ring)
- Pegangan tangan (hand guard)
- Cincin kaki (foot ring)



Gambar 2.1 Badan Tabung LPG Untuk Konstruksi 2 Bagian (Kiri) dan Konstruksi 3 Bagian (Kanan)

Penentuan tebal minimum badan tabung dibedakan menjadi 2 bagian yaitu :

1. Tabung konstruksi 2 (dua) bagian

Tebal dinding tabung diperoleh dari perhitungan berdasarkan rumus sebagai berikut

$$t = 2.5 \left(\frac{D_i}{R_m} \right)^{1/2} \quad (2.1)$$

dan

$$t = \frac{P_h \times D_o}{2f + P_h} \quad (2.2)$$

$$t_{\text{minimum}} = t + CA \quad (2.3)$$

dengan :

t adalah tebal minimum badan tabung (mm), diambil nilai terbesar hasil perhitungan dari kedua rumus.

D_i adalah diameter dalam tabung (mm)

D_o adalah diameter dalam tabung (mm)

P_h adalah tekanan uji (MPa)

f adalah tegangan maksimal yang dibolehkan (permissible stress) diambil 90% dari nilai yield strength material tabung yang digunakan, bila nilai f dari yield strength lebih besar dari 60% nilai *tensile strength* (R_m), maka nilai f yang dipergunakan adalah 60% R_m

R_m adalah kuat tarik minimum (MPa)

CA adalah *corrosion allowance* sebesar 0.01 mm pertahun dengan perhitungan pakai 5 tahun

2. Tabung konstruksi 3 (tiga) bagian

Tebal dinding tabung diperoleh dari perhitungan berdasarkan rumus sebagai berikut

$$t = 2.5 \left(\frac{D_i}{R_m} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

dan

$$t = \frac{P_h \times D_o}{2f\eta + P_h} \quad (2.5)$$

$$t_{\text{minimum}} = t + CA \quad (2.6)$$

dengan :

t adalah tebal minimum badan tabung (mm), diambil nilai terbesar hasil perhitungan dari kedua rumus.

t_m adalah tebal minimum perhitungan

D_i adalah diameter dalam tabung (mm)

D_o adalah diameter dalam tabung (mm)

P_h adalah tekanan uji (MPa)

f adalah tegangan maksimal yang dibolehkan (permissible stress) diambil 90% dari nilai yield strength material tabung yang digunakan, bila nilai f dari yield strength lebih besar dari 60% nilai *tensile strength* (R_m), maka nilai f yang dipergunakan adalah 60% R_m

η adalah efisiensi sambungan las dengan nilai 0.9 berdasarkan hasil radiografi secara sampling

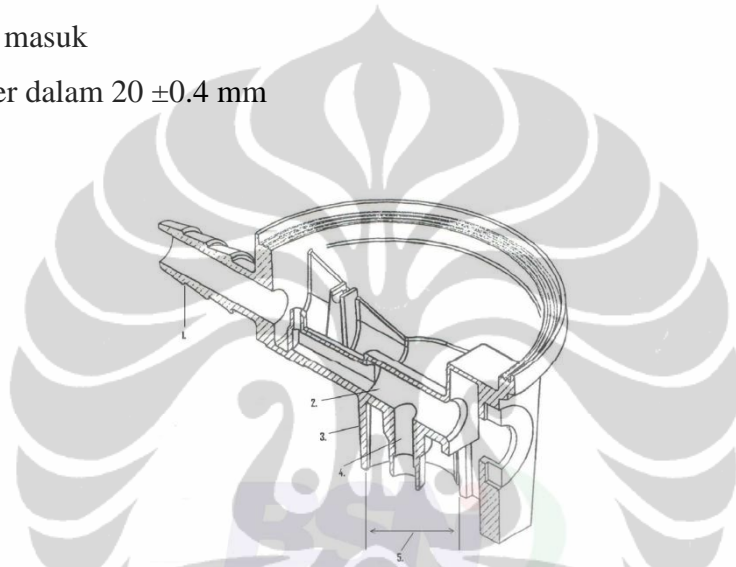
R_m adalah kuat tarik minimum (MPa)

CA adalah *corrosion allowance* sebesar 0.01 mm pertahun dengan perhitungan pakai 5 tahun

2.3.2 Regulator

Regulator berfungsi untuk mengatur tekanan yang keluar dari tabung gas LPG. Adapun konstruksi dari regulator ini terdiri dari 5 komponen utama yaitu

1. Saluran keluar
2. Ruang kunci pemutar
3. Penyambung katup tabung baja
4. Saluran masuk
5. Diameter dalam $20 \pm 0.4 \text{ mm}$

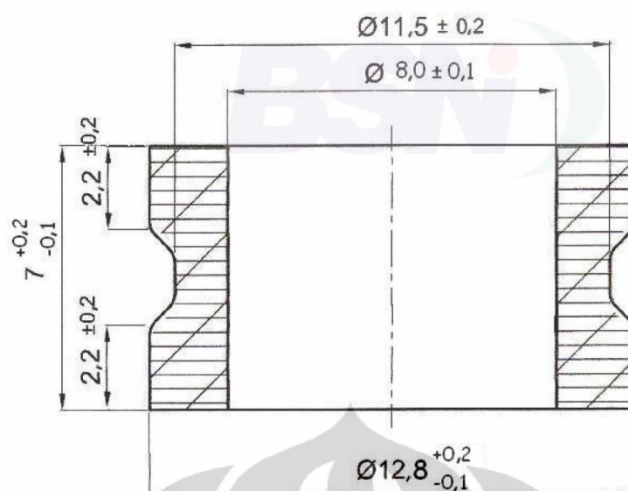


Gambar 2.2 Penampang Melintang Regulator LPG

Regulator gas LPG termasuk dalam katagori regulator tekanan rendah. Pada saat pemakain regulator ini tidak boleh bergetar dan tidak mengeluarkan bunyi saat pemasangan. Tekanan masuk dari regulator ini berkisar pada nilai 0.7 MPa dengan tekanan kelaaur minimal mencapai 2.8 kPa dengan toleransi $\pm 0.47 \text{ kPa}$ ^[8].

2.3.3 Karet Perapat (*Rubber-seal*)

Karet perapat (rubber-seal) adalah karet yang digunakan sebagai kelengkapan untuk perapat (seal) pada katup tabung LPG pada saat regulator dipasang yang berfungsi untuk mencegah terjadinya kebocoran gas pada waktu pengisian atau penggunaan tabung LPG serta memperkuat kedudukan regulator. Dimensi yang standar untuk karet perapat ini ditunjukkan oleh gambar^[9]



Gambar 2.3 Potongan Seal LPG

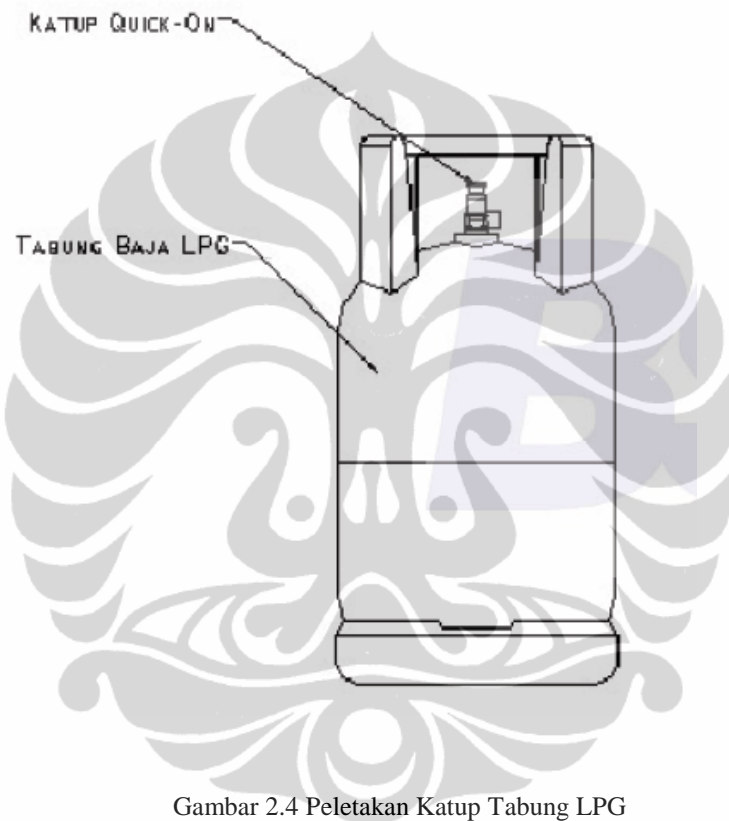
Berikut syarat mutu yang harus dimiliki oleh karet perapat dalam keadaan operasinya ditunjukkan oleh tabel berikut^[9]

Tabel 2.2 Syarat Mutu Seal LPG

No.	Uraian	Satuan	Syarat mutu
1.	Kekerasan (<i>hardness</i>)	Shore-A IRHD	60 ± 5 60 ± 5
2.	Kuat tarik (<i>tensile strength</i>), minimal	MPa	10
3.	Perpanjangan putus (<i>elongation at break</i>), minimal	%	300
4.	Pampatan tetap (<i>compression set</i>), maksimal , untuk 72 jam (3 hari) pada (27 ± 2) °C 72 jam (3 hari) pada (-5 ± 2) °C	% %	10 25
5.	Pengusangan pada temperatur (70 ± 2) °C, selama 168 jam (7 hari), perubahan nilai setelah pengusangan (<i>heat ageing</i>), - kekerasan (<i>hardness</i>) - kuat tarik (<i>tensile strength</i>) - perpanjangan putus (<i>elongation at break</i>)	Shore-A IRHD % %	± 10 ± 5 ± 15 +10, -25
6.	<i>Stress relaxation</i> , maksimal 168 jam (7 hari) pada (27 ± 2) °C	%	13
7.	Perubahan volume dalam <i>liquid B</i> (<i>n</i> -pentana) setelah 168 jam (7 hari) pada (27 ± 2) °C, maksimal	%	+35
8.	Perubahan volume dalam <i>liquid B</i> (<i>n</i> -pentana) setelah 96 jam (4 hari) dikeringkan pada (70 ± 2) °C, maksimal	%	-12
9.	Ketahanan terhadap ozon (50±5) pphm, (40±2) °C, (55±10)%RH, (20±2)% perpanjangan, <i>pre-tension</i> <i>time</i> 72 jam, <i>exposure time</i> 48 jam	-	Tidak tampak ada retakan, tanpa pembesaran

2.3.4 Katup Tabung

Katup tabung LPG adalah katup yang dipasang pada tabung yang berfungsi sebagai penyalur dan pengaman gas LPG. Katup tabung LPG termasuk dalam jenis katup *quick on* yaitu katup yang membuka dan menutup secara otomatis dan dilengkapi dengan 1 atau 2 katup kendali (*spindle*).

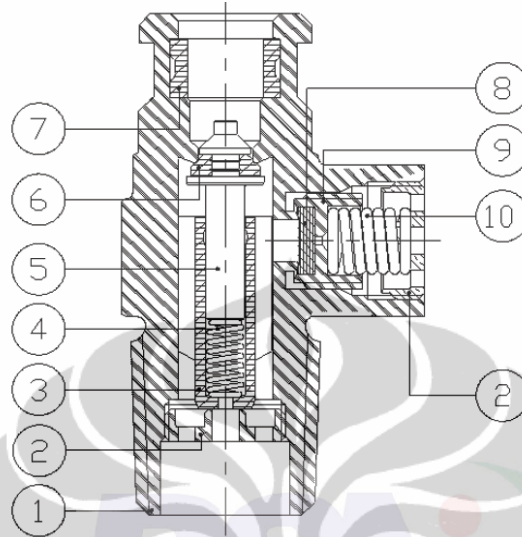


Gambar 2.4 Peletakan Katup Tabung LPG

Berikut ini beberapa komponen penting dalam katup tabung LPG 3 kg:

1. Badan katup
2. Penahan /pengatur pegas
3. Plastic pengarah
4. Pegas katup kendali
5. Katup kendali
6. Karet katup kendali
7. Karet seal
8. Karet pad

9. Piston pengaman (relieve valve piston)
10. Pegas pengaman



Gambar 2.5 Potongan Penampang Katup Tabung LPG

Dalam katup inilah diletakkan karet perapat guna memaksimalkan sambungan antara katup dan regulator. Setiap katup tabung baja LPG harus memiliki satu katup pengaman bertipe pegas dan dirancang kedap gas. Katup pengaman mulai membuka pada tekanan 2.59 MPa (375 Psi) toleransi 10% dan menutup penuh pada tekanan tidak kurang dari 1.77 MPa (257 Psi)^[10].

2.4 Fenomena Perpindahan (Transport Phenomena)

2.4.1 Peristiwa Perpindahan

Pengertian tentang peristiwa perpindahan diperlukan untuk mengatasi masalah yang berhubungan dengan aliran fluida, perpindahan massa, perpindahan panas, termodinamika, dan reaksi-reaksi kimia. Terdapat dua langkah dalam penerjemahan masalah menjadi sebuah bentuk matematis, yaitu persepsi dan formulasi. Kesulitan-kesulitan yang dihadapi dari langkah-langkah tersebut dapat diatasi apabila konsep dasar teknik dapat dimengerti.

Konsep dasar untuk dapat menyelesaikan masalah teknis antara lain: konservasi massa, momentum, energi dan spesi-spesi kimia. Keempat besaran ini adalah besaran terkonservasi, yaitu besaran yang dapat diubah tanpa mempengaruhi jumlah total dari besaran tersebut. Besaran terkonservasi dapat dijelaskan pada persamaan laju inventori, umumnya dituliskan dalam bentuk persamaan:

$$\text{Laju Masukan} - \text{Laju Keluaran} + \text{Laju Pembentukan} = \text{Laju Akumulasi} \quad (2.7)$$

Laju pada persamaan diatas dapat berupa laju konsentrasi, laju massa, laju energi, dan lain sebagainya.

2.4.2 Perpindahan Molekular dan Konvektif

Fluks total dari sebuah besaran tertentu merupakan jumlah dari fluks molekular dan fluks konvektif. Fluks molekular adalah fluks yang dihasilkan dari gradien potensial atau *driving forces*. Fluks molekular dinyatakan dalam bentuk persamaan konstitutif dari perpindahan momentum, energi, dan massa. Momentum, energi, dan massa juga dapat mengalami perpindahan oleh pergerakan fluida ruah yang menghasilkan fluks, disebut fluks konvektif. Pada bagian ini akan dibahas mengenai fluks molekular dan fluks konvektif dalam peristiwa perpindahan momentum dan massa.

2.4.2.1 Perpindahan Molekular

Persamaan konstitutif mengidentifikasi karakteristik dari sifat perpindahan satu besaran. Misalnya, jika terdapat gradien momentum, maka viskositas didefinisikan oleh persamaan konstitutif yang disebut Hukum Viskositas Newton. Jika terdapat gradien konsentrasi, maka koefisien difusi didefinisikan oleh Hukum Difusi Fick Pertama. Viskositas dan koefisien difusi disebut sifat perpindahan (*transport properties*).

2.4.2.1.1 Hukum Viskositas Newton

Apabila terdapat perbedaan kecepatan akibat sebuah gaya yang bekerja pada fluida tertentu, maka pada sistem tersebut terjadi fluks momentum. Hasil eksperimen

menunjukkan bahwa gaya yang diperlukan untuk menjaga kelangsungan fluks momentum proporsional dengan gradien kecepatan:

$$\underbrace{\frac{F}{A}}_{\text{Momentum Flux}} = \underbrace{\mu}_{\text{Transport Property}} \underbrace{\frac{V}{Y}}_{\text{Gradien Kecepatan}} \quad (2.7)$$

Konstanta μ merupakan viskositas. Persamaan 2.7 merupakan persamaan tingkat makroskopik. Bentuk mikroskopik dari persamaan diatas adalah:

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} = -\mu \dot{\gamma}_{yx} \quad (2.8)$$

Persamaan 2.3 dikenal sebagai hukum viskositas Newton, dan setiap fluida yang mengikuti hukum di atas disebut fluida Newtonian. Bentuk $\dot{\gamma}_{yx}$ merupakan laju regangan atau laju deformasi. Sedangkan bentuk τ_{yx} disebut *shear stress*. Kedua konstanta ini mempunyai dua buah subskrip, yaitu x yang menunjukkan arah dari gaya yang bekerja dan y yang menunjukkan arah normal dari permukaan tempat gaya bekerja. Jadi, besaran τ_{yx} dapat diinterpretasikan sebagai fluks dari momentum-x pada arah y. Pada satuan SI, τ_{yx} diekspresikan dalam N/m^2 (Pa) dan gradien kecepatan dalam (m/s)/m. Sehingga diperoleh satuan untuk viskositas dalam satuan SI:

$$\mu = \frac{N/m^2}{(m/s)/m} = Pa \cdot s = \frac{kg}{m \cdot s} \quad (2.9)$$

Umumnya, data-data viskositas disediakan dalam sistem satuan cgs, yaitu g/(cm s) yang disebut poise (P) atau centipoise (1cP = 0,01 P).

2.4.2.1.2 Hukum Difusi Pertama Fick

Apabila pada suatu sistem terdapat perbedaan konsentrasi, maka akan terjadi fluks perpindahan massa dari daerah dengan konsentrasi tinggi menuju daerah

dengan konsentrasi yang lebih rendah. Hasil eksperimen mengindikasikan bahwa fluks massa sebuah zat A proporsional dengan gradien konsentrasi:

$$\underbrace{\frac{\dot{m}_A}{A}}_{\text{Fluks Massa A}} = \underbrace{D_{AB}}_{\text{Transport Property}} \underbrace{\frac{\rho_{A0}}{Y}}_{\text{Gradien Konsentrasi}} \quad (2.10)$$

dimana konstanta D_{AB} disebut sebagai difusivitas molekular biner (atau koefisien difusi) dari spesi A di dalam spesi B. Bentuk mikroskopik dari persamaan 2.10 disebut hukum difusi pertama Fick:

$$j_{Ay} = -D_{AB} \rho \frac{d\omega_A}{dy} \quad (2.11)$$

dimana J_{Ay} merepresentasikan fluks molekular massa dari spesi A pada arah y, dan w_A menunjukkan fraksi massa spesi A. Jika densitas total, ρ konstan, maka bentuk dw_A/dy dapat diganti dengan $d\rho_A/dy$ dan menghasilkan

$$j_{Ay} = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (2.12)$$

Dalam perhitungan perpindahan massa, konsentrasi sebuah spesi lebih sering ditunjukkan dalam bentuk konsentrasi molar dibandingkan satuan massa. Dalam bentuk konsentrasi molar, Hukum Difusi Pertama Fick dinyatakan dalam bentuk:

$$J^*_{Ay} = -D_{AB} c \frac{dx_A}{dy} \quad (2.13)$$

dimana J^*_{Ay} merepresentasikan nilai fluks molekular spesi A pada arah y dan x_A menunjukkan fraksi mol dari spesi A. Jika konsentrasi total molar A, c , bernilai konstan, maka bentuk $c(dx_A/dy)$ dapat digantikan dengan dc_A/dy , menjadi

$$J^*_{Ay} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dy} \quad (2.14)$$

Koefisien difusi D_{AB} mempunyai dimensi m^2/s dalam satuan SI. Hukum Viskositas Newton dan Hukum Difusi Pertama Fick umumnya dikembangkan dalam bentuk persamaan:

$$\text{Molecular flux} = \text{Transport Property} \times \text{Gradient of Driving Force} \quad (2.15)$$

Meskipun persamaan konstitutif memiliki bentuk yang sama, *transport properties* (μ dan D_{AB}) memiliki satuan yang berbeda. Persamaan-persamaan ini diekspresikan dalam bentuk:

$$\tau_{yx} = - \frac{\mu}{\rho} \frac{d}{dy} (\rho v_x) \quad (2.16)$$

pada keadaan densitas konstan dan $\rho v_x = \text{momentum/volume}$

$$J_{Ay} = - D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (2.17)$$

pada keadaan densitas konstan dan $\rho_A = \text{massa A /volume}$

Bentuk μ/ρ pada persamaan 2.11 disebut sebagai difusivitas momentum atau viskositas kinematik (ν). Viskositas kinematik dan koefisien difusi memiliki satuan sama, yaitu m^2/s . Sehingga persamaan 2.11 dan 2.12 dapat diekspresikan dalam bentuk umum:

$$\text{Molecular flux} = \text{Diffusivity} \times \text{Gradient of Quantity/Volume} \quad (2.18)$$

Bentuk besaran untuk persamaan diatas dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.3 Besaran Beberapa Parameter Fenomena Perpindahan

	Momentum	Mass	Mole
Molecular flux	τ_{yx}	j_{A_v}	$J_{A_v}^*$
Transport property	μ	\mathcal{D}_{AB}	\mathcal{D}_{AB}
Gradient of driving force	$\frac{dv_x}{dy}$	$\frac{d\rho_A}{dy}$	$\frac{dc_A}{dy}$
Diffusivity	ν	\mathcal{D}_{AB}	\mathcal{D}_{AB}
Quantity/Volume	ρv_x	ρ_A	c_A
Gradient of Quantity/Volume	$\frac{d(\rho v_x)}{dy}$	$\frac{d\rho_A}{dy}$	$\frac{dc_A}{dy}$

2.4.2.2 Perpindahan Konvektif

Fluks konvektif suatu besaran diekspresikan dalam bentuk :

$$\text{Convective Flux} = \frac{\text{Quantity}}{\text{Volume}} \times \text{Characteristic Velocity} \quad (2.19)$$

Untuk sistem satu fasa dan campuran dari dua atau lebih komponen, definisi dari dari characteristic velocity adalah:

$$v_{ch} = \sum_i^n \beta_i v_i \quad (2.20)$$

dimana β adalah faktor berat dan v adalah kecepatan dari komponen.

Tiga besaran kecepatan karakteristik yang umum digunakan dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 2.4 Tiga Besaran yang Umum Digunakan untuk Perpindahan Konvektif

Characteristic Velocity	Weighting Factor	Formulation
Mass average	Mass fraction (ω_i)	$v = \sum_i \omega_i v_i$
Molar average	Mole fraction (x_i)	$v^* = \sum_i x_i v_i$
Volume average	Volume fraction ($c_i \bar{V}_i$)	$v^{\blacksquare} = \sum_i c_i \bar{V}_i v_i$

Pernyataan \tilde{V} merupakan molar volum parsial komponen. Kecepatan molar rata-rata sama dengan kecepatan volum rata-rata saat konsentrasi molar total (c) bernilai konstan. Begitu juga dengan kecepatan massa rata-rata sama dengan kecepatan volum saat densitas bernilai konstan. Umumnya pada kasus-kasus tertentu, untuk mempermudah persoalan, nilai konsentrasi molar total dan massa jenis diasumsikan bernilai konstan.

2.5 Konsep Regangan

Jika pada sebuah benda yang dapat dideformasi (*deformable body*) dikenakan gaya (*force*), maka akan terjadi deformasi, yaitu perubahan bentuk (*shape*) dan ukuran (*size*). Jika diperhatikan, maka partikel-partikel di dalam benda tersebut akan mengalami perpindahan (*displacement*) dari posisi mula-mula ke posisi baru. Perpindahan tersebut dapat dianggap sebagai suatu vektor yang mengukur perpindahan posisi dari partikel atau titik tersebut. Pengukurannya melibatkan perubahan, baik panjang (*length*) maupun sudut (*angle*). Konsep regangan diperlukan untuk menggambarkan deformasi dengan perubahan panjang segmen garis dan sudut antar segmen garis tersebut^[11].

2.6. Konsep Von Mises Stress

Pada tahun 1913 Von Mises mengajukan pendapatnya bahwa luluh pada sistem tegangan yang kompleks akan terjadi pada saat deviator kedua (J2) dari invariant tegangannya melewati suatu nilai kritis tertentu^[12]. Persamaan ini adalah

persamaan matematis yang ternyata konsisten dengan fakta empiris. Hasil percobaan menunjukkan bahwa material yang bersifat anisotropis, kriteria luluh tidak tergantung pada sumbu atau orientasi bidang, atau dengan kata lain merupakan suatu fungsi invarian dari tegangan.

Hencky (1924) memberikan tafsir persamaan matematis yang telah diajukan oleh Von Mises tersebut ^[12]. Hencky mengajukan pendapatnya bahwa luluh akan terjadi pada saat energi distorsi atau energi regangan geser dari material mencapai suatu nilai kritis tertentu. Secara sederhana dapat dikatakan bahwa energi distorsi adalah bagian dari energi regangan total per unit volume yang terlibat di dalam perubahan bentuk. Bagian lain adalah bagian yang berhubungan dengan perubahan volume.

$$u = \frac{1}{2} \sigma \epsilon$$

$$u = \frac{1}{2} \sigma_1 \epsilon_1 + \frac{1}{2} \sigma_2 \epsilon_2 + \frac{1}{2} \sigma_3 \epsilon_3$$

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_2)] \quad (2.21)$$

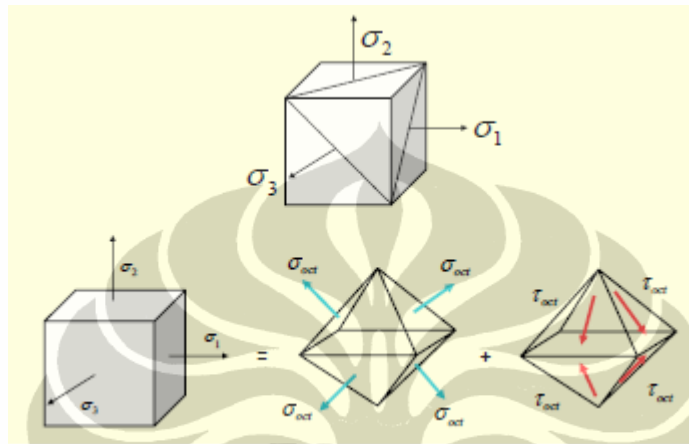
Persamaan 2.21 menunjukkan energy regangan per unit volume dengan E adalah modulus elastisitas, σ adalah *stress*, dan ν adalah poisson ratio. Energi terdistorsi sebagai bagian dari energy regangan total ditunjukkan oleh persamaan 2.22

$$ud = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.22)$$

Dapat dilihat bahwa Hencky telah berhasil menguraikan persamaan umum energy regangan tersebut menjadi dua bagian, yaitu satu bagian yang berhubungan dengan perubahan bentuk dan bagian lain yang berhubungan dengan perubahan volume.

Dengan asumsi bahwa fenomena luluh hanya berhubungan dengan perubahan bentuk dan tidak ada kaitannya dengan perubahan volume, maka persamaan energy distorsi dapat digunakan untuk kriteria luluh. Jadi, Hencky dapat menjelaskan dengan lebih baik fenomena fisik yang terjadi dari persamaan matematis yang

sebelumnya telah diajukan oleh Von Mises. Lebih jauh lagi, kriteria ini juga merepresentasikan nilai kritis dari tegangan geser oktahedral, yaitu tegangan geser pada bidang-bidang oktahedral yang membentuk sudut-sudut yang sama dengan bidang-bidang atau sumbu-sumbu utama, sebagaimana dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.6 Tegangan-tegangan Oktahedral

2.7 Computational Fluid Dynamics (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) adalah sebuah analisa dari suatu sistem meliputi aliran fluida, transfer energi, pembakaran serta reaksi kimia yang menggunakan simulasi yang berbasis komputasi (Coker, 2001). CFD mengandung tiga elemen penting, yaitu yaitu *pre-procesor*, *solver* dan *post-procesor*. *Pre-procesor* terdiri dari pemasukan sebuah masalah dalam program CFD menggunakan format yang sesuai. Beberapa langkah dalam *pre-procesor* meliputi:

- Menentukan geometri sistem yang akan disimulasikan.
- Menentukan *grid*.
- Menentukan fenomena-fenomena fisik dan kimia yang terjadi di dalam sistem yang dibuat geometrinya.
- Menentukan sifat fisik dan kimia fluida yang digunakan dalam simulasi.
- Menentukan kondisi batas yang tepat

Keakuratan dari CFD sangat bergantung pada jumlah sel pada grid. Semakin banyak jumlah sel yang dibuat semakin akurat perhitungan yang dilakukan oleh

CFD. Namun dengan tingginya jumlah sel, maka spesifikasi komputer yang digunakan juga lebih tinggi.

Elemen kedua yaitu *solver*, atau penyelesaian masalah (perhitungan). Ada tiga metode numerik yang digunakan oleh CFD, yaitu metode *finite different*, metode elemen hingga, dan metode spektral. Dalam melakukan perhitungan, ketiga metode ini mengikuti langkah-langkah berikut :

- Pendekatan dari aliran-aliran yang tidak diketahui secara sederhana.
- Diskritisasi atau pemotongan-pemotongan menjadi beberapa elemen yang setiap elemennya memiliki persamaan.
- Solusi dari persamaan aljabar

Elemen ketiga adalah *post-procesor*, yaitu untuk melihat berbagai macam solusi yang telah dihitung pada tahap *solver*. Solusi ini dapat berupa beberapa bentuk meliputi: gambar vektor, gambar permukaan 2D maupun 3D. Penggunaan CFD yang tepat adalah ketika penggunaannya mengerti fenomena fisik dan kimia yang terjadi pada model tersebut. Teknik modelling yang baik diperlukan dalam menentukan asumsi-asumsi sehingga kompleksitas masalah menjadi sederhana. Pengetahuan tentang algoritma solusi numeris yang cukup juga diperlukan. Konsep matematika untuk menentukan kesuksesan algoritma meliputi konvergensi, konsistensi dan stabilitas.

Salah satu perangkat lunak yang berbasis *computational fluid dynamics* adalah COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics adalah perangkat lunak yang dapat menganalisis dan menyelesaikan berbagai aplikasi fisika dan teknik, terutama yang berfenomena ganda, yang dikenal sebagai multiphysics. COMSOL dapat dijalankan dalam berbagai sistem operasi (Windows, Mac, Linux, Unix). Tampilan awal COMSOL terlihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Program COMSOL

COMSOL Multiphysics juga dapat memasukkan sistem persamaan diferensial parsial ganda. Ada beberapa alasan yang mendasari penggunaan COMSOL dalam penelitian ini, yaitu: program ini merupakan program *user friendly* yang membuat penggunaanya mudah dalam memasukkan modelnya sendiri dan parameter-parameter koefisien lainnya, kondisi batas, kondisi awal dan hubungannya dengan fenomena fisika lain. Kedua, program ini dibuat berdasarkan MATLAB, sehingga seluruh kegunaan pemrograman yang diperlukan untuk menyusun model bertingkat kesulitan tinggi tersedia. Ketiga, program ini berdasar pada gambar geometri dan fenomena-fenomena yang terjadi pada model tersebut.

2.7 Finite Element Analysis

Finite Element banyak digunakan untuk menyelesaikan permasalahan kompleks seperti rekayasa struktur, *steady state*, *heat transfer*, *fluid flow*, dan *electrical potential problem*. Konsep Dasar metode Finite element, diantaranya :

- Menjadikan elemen-elemen *diskrit* untuk memperoleh simpangan-simpangan dan gaya-gaya anggota dari suatu struktur.
- Menggunakan elemen-elemen kontinum untuk memperoleh solusi pendekatan terhadap permasalahan-permasalahan perpindahan panas, mekanika fluida dan mekanika solid.

Dua karakteristik yang membedakan metode finite element dengan metoda numerik yang lain yaitu :

- Metoda ini menggunakan formulasi integral untuk menghasilkan sistem persamaan aljabar.
- Metoda ini menggunakan fungsi-fungsi kontinu untuk pendekatan parameter-parameter yang belum diketahui.

Lima langkah untuk menyelesaikan permasalahan fisik dengan metode finite element yaitu^[13] :

1. Permasalahan fisik dibuat elemen-elemen kecil. Elemen-elemen tersebut ditandai dengan nomor elemen dan nomor titik nodal, termasuk juga harga-harga koordinat.
2. Menentukan persamaan pendekatannya, linear atau kuadratik. Persamaan-persamaan tersebut harus ditulis dalam bentuk harga-harga nodal yang belum diketahui. Ini berlaku untuk setiap elemen, artinya setiap elemen harus didefinisikan sifatnya dalam bentuk persamaan.
3. Membentuk sistem persamaan diatas dengan metoda Galerkin, Varisional, Formulasi energi potensial, Collocation, Subdomain. Khusus untuk formulasi energi potensial, energi potensial dari sistem ditulis dalam bentuk simpangan nodal dan kemudian diminimalkan. Dimana akan diberikan satu persamaan setiap simpangan yang belum diketahui.
4. Penyelesaian persamaan – persamaan.
5. Hitung besaran yang dicari. Besaran bisa berupa komponen-komponen tegangan, aliran panas atau kecepatan fluida

BAB 3

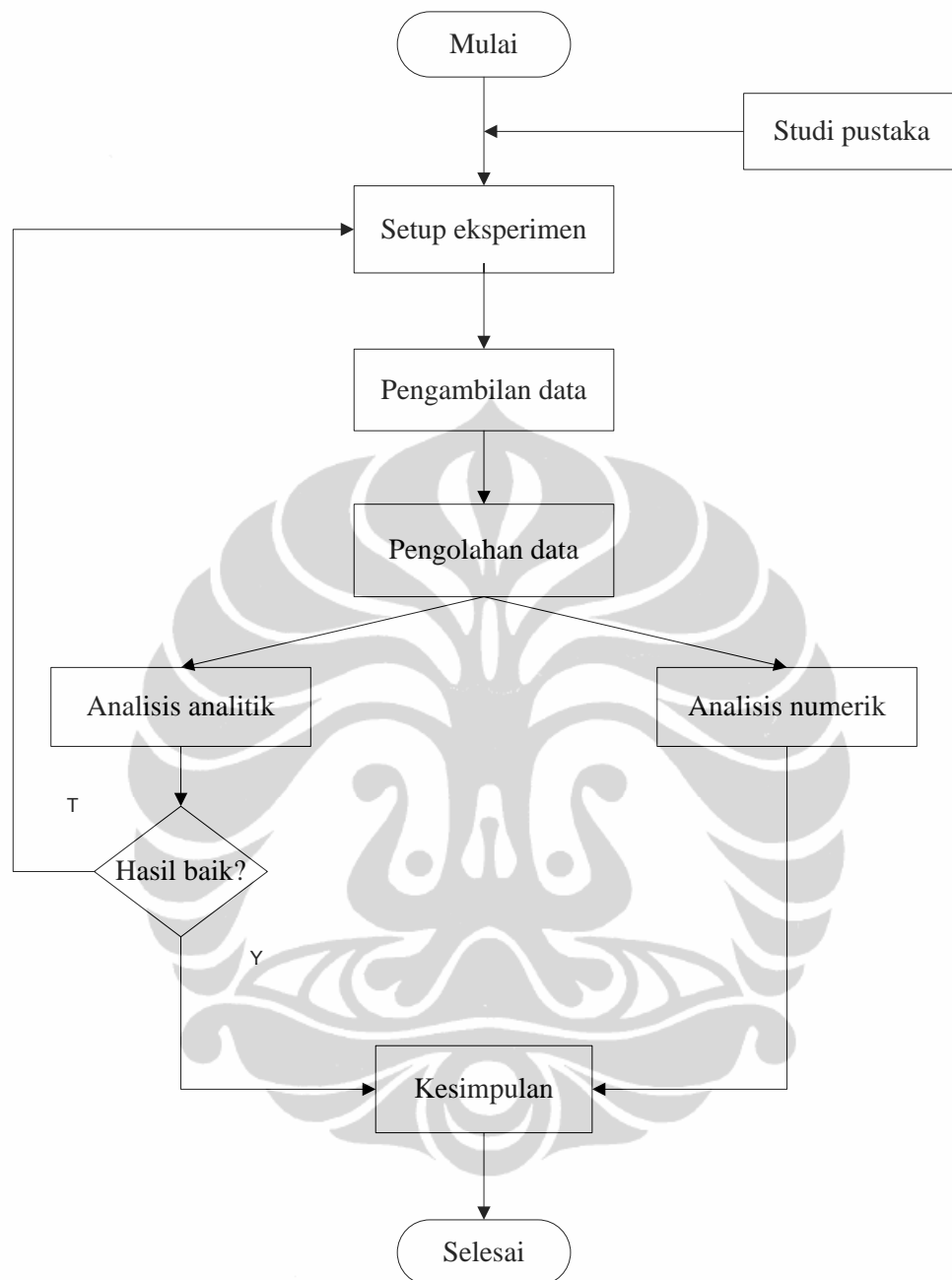
METODELOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh penambahan *compressive stress* pada karet perapat terhadap laju kebocoran gas pada tabung gas LPG. Penelitian ini dilakukan di lab termodinamika dan pembakaran Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang juga di danai oleh hibah RKBK UI. Penelitian ini dilakukan 2 pendekatan yaitu pendekatan kajian eksperimental dan kajian pendekatan numerik.

Penelitian menggunakan pendekatan komputasi numerik berbasis metode volume terbatas (FVM) untuk menganalisa performa aerodinamika dan fenomena aliran fluida disekitar model uji. Untuk *grid generation* dan *solver* serta *postprocessing* digunakan COMSOL 4.1 Untuk menentukan perubahan geometri akibat pembebanan pada karet perapat digunakan komputasi numeric *Finite Element Analysis (FEM)* dengan menggunakan software Solid Works 9.

Nilai parameter-parameter kajian ini kemudian disajikan dalam bentuk grafik, diagram, dan formulasi dalam bab berikutnya sehingga memudahkan dalam melihat hubungan antar parameter. Gambaran menyeluruh mengenai penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada diagram alir berikut.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1.1 Kajian Eksperimental

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan 2 jenis contoh karet perapat (*seal*) yang umum digunakan di masyarakat yaitu jenis NBR dan vulkanis. Masing-masing karet perapat ini dilakukan pengambilan data setiap 5 menit selama 150 menit untuk masing-masing tingkat penekanan yaitu 0 putaran, 0.25 putaran, 0.5 putaran, 0.75

putaran, dah 1 putaran. Dalam eksperimen ini suhu dianggap konstan dan komposisi dari setiap tabung LPG juga dianggap tetap yaitu 60% propane dan 40% butane.

3.1.1.1 Alat-Alat Eksperimen

Untuk dapat melihat nilai besaran-besaran yang akan diamati digunakan alat-alat dengan spesifikasi yang sesuai terutama untuk tingkat ketelitian sehingga dalam waktu 150 menit didapat perbedaan nilai besaran yang terukur. Adapun alat-alat yang digunakan dalam eksperimen ini adalah

- Pressure Meter PS-9302



Gambar 3.2 Pressure Lutron Meter PS-9302

Pressure meter yang berukuran 180 x 72 x 32 mm ini memiliki maksimal pengukuran sebesar 20 bar dengan ketelitian 0.02 bar. Pengukuran tekanan dalam eksperimen ini berkisar di angka 5-7 bar sehingga masih dalam kapabilitas alat ini.

- Mass Counter

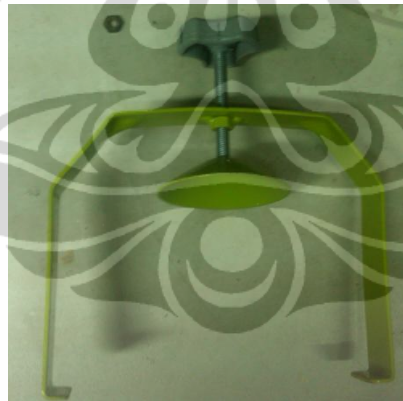
Timbangan digital yang berukuran 210 x 250 mm ini memiliki maksimal pengukuran sebesar 15 kg dengan ketelitian sebesar 0.5 gram. Spesifikasi ini cukup baik digunakan untuk pengukuran dalam eksperimen ini dengan rata-rata pengukuran berat sebesar 6 kg.



Gambar 3.3 Timbangan D-Scale A102

- Penekan Regulator

Merupakan *bracket* yang berfungsi untuk memberikan tekanan ekstra bagi regulator selain karena gaya berat. Terdapat berbagai macam jenis penekan yang ada di pasaran, namun yang paling sering dijumpai adalah jenis penekan ulir seperti yang digunakan pada eksperimen ini. Prinsipnya ketika ulir diputar maka penekan akan bergerak ke bawah sebanding dengan besarnya putaran ulir.



Gambar 3.4 Penekan Regulator

- Konektor

Konektor ini terdiri dari regulator LPG yang dibelah agar tidak merubah tekanan keluaran dari tabung, selang standar SNI, sambungan ke pressure meter dan fitting penguat di setiap sambungan. Konstruksi ini menghubungkan antara pressure meter dengan tabung gas LPG dimana sangat rentan kebocoran yang harus diperhatikan dalam setiap pengambilan data.



Gambar 3.5 Konektor Penghubung Tabung dan *Pressure Meter*

3.1.1.2 Setup Penelitian



Gambar 3.6 *Setup* Penelitian

Penelitian ini menggunakan setup seperti pada gambar 3.6 dimana tabung gas LPG 3kg dihubungkan dengan *pressure meter* melalui rangkaian konektor yang dijaga kerapatannya untuk menghindari adanya kebocoran. Untuk mengeluarkan gas dari tabung digunakan regulator LPG yang fungsi pengaturannya dihilangkan dengan dibelah seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7



Gambar 3.7 Regulator yang Dibentuk untuk penghubung ke tangki LPG

Ketinggian dari konektor tekanan harus dibuat konstan untuk setiap percobaan untuk menghindari adanya pengaruh potensial yang berbeda untuk setiap percobaan.

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam percobaan ini adalah:

1. Tabung LPG 3 kg diletakan di atas timbangan (*mass counter*) dengan posisi menghadap ke depan untuk memudahkan pemasangan penekan regulator.
2. Tabung gas LPG dihubungkan ke pressure meter menggunakan konektor yang sudah dengan posisi yang tetap untuk setiap percobaan untuk variasi *seal* dan besar penekanan.
3. Pengujian kebocoran untuk setiap sambungan baik dari LPG ke konektor maupun dari konektor ke pressure meter dengan menggunakan air sabun. Jika terjadi kebocoran maka instalasi dilepas dan diberikan pengencangan pada sambungan yang bocor. Pengecekan ini dilakukan setiap memulai percobaan untuk variasi seal dan tingkat putaran penekanan.
4. Penekan regulator dipasang tepat diatas tabung LPG dengan posisi yang simetris untuk medapatkan persebaran gaya yang merata.
5. Timbangan dan pressure meter diaktifkan kemudian tunggu sampai nilai yang ditunjukkan oleh kedua alat ini stabil. Stabil yang dimaksud adalah besaran yang ditunjukkan tidak menunjukkan peningkatan.
6. Data diambil selama 150 menit dengan selang watu pengambilan data setiap 5 menit. Terdapat 5 kali pengambilan data untuk masing-masing *seal* dengan tingkat putaran penekan sebesar 0, 0.25, 0.5, 0.75, dan 1.

3.1.1.3 Metode Kalkulasi

Data hasil eksperimen selanjutnya diolah dengan mengguankan dasar-dasar teori ilmu alam untuk dapat melihat karakteristik kebocoran dan hubungannya dengan variable lain seperti waktu, tekanan dan penambahan compressive stress. Adapun langkah-langkah dalam kalkulasi ini adalah sebagai berikut:

1. Curve fitting dilakukan pada data percobaan untuk menemukan persamaan guna melakukan *forecasting* untuk *range* waktu sampai 720 menit. Dalam curve fitting ini parameter statistik seperti adjustment R-Square, Chi-square, dan error harus dikontrol untuk mendapatkan hasil yang akurat.
2. Menentukan persamaan kebocoran (*leakage*) untuk masing-masing seal. Kebocoran meruapakan fenomena yang tidak dapat dihindarkan dari penggunaan gas LPG mengingat tekanan dan konsentrasi yang sangat berbeda dari sisi dalam dan luar tabung. Fenomena kebocoran ini secara matematis dapat dituliskan dengan persamaan

$$q_L = \frac{\Delta(p.V)}{\Delta t} \quad (3.1)$$

dengan p adalah tekanan absolute (Pa) , q_L adalah laju kebocoran (Pa m³/s), V adalah volume (m³) dan t adalah waktu (s).

Rubber-seal LPG merupakan salah satu *non-metalic seal* yang dapat diasumsikan sebagai media berpori yang aliran gas melalui media ini dpat dilakukan dengan pendekatan *molecular* dan *convective flow*^[14]. Berikut persamaan yang digunakan dalam model penelitian ini:

- *Hagen-Poiseuille flow theory*

Menurut Hagen-Poiseuille flow theory, persamaan aliran laminar melalui media berpori dengan formulasi

$$L_L = \sum_{i=1}^k \frac{\pi r_i^4}{16\eta c l_m} (p_1^2 - p_2^2) \quad (3.2)$$

dimana L_L adalah *flow rate* aliran ($\text{Pa m}^3/\text{s}$), k adalah jumlah pori, c merupakan koefisien bending kapiler, p_1 dan p_2 adalah tekanan pada sisi masuk dan sisi keluar (Pa), η adalah viskositas dinamik (Ns/m^2), l_m adalah panjang rata-rata lubang kapiler (m), dan r adalah radius dari kapiler (m). Aliran laminar ini merupakan aliran melewati pori dimana tumbukan hanya terjadi pada molekul dengan dinding pori sedangkan tumbukan antar molekul dianggap tidak ada mengingat kecepatan dari molekul yang lebih rendah daripada aliran viskos dan diameter pori yang lebih besar.

- Knudsen law

Formulasi untuk aliran molekular adalah sebagai berikut

$$L_M = \sum_{i=1}^k \frac{4r_i^3}{3cl_m} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} (p_1 - p_2) \quad (3.3)$$

dimana L_m adalah *flow rate* aliran ($\text{Pa m}^3/\text{s}$), k adalah jumlah pori, c merupakan koefisien bending kapiler, p_1 dan p_2 adalah tekanan pada sisi masuk dan sisi keluar (Pa), l_m adalah panjang rata-rata lubang kapiler (m), R adalah tetapan gas (J/kg K), M adalah massa molekular dan r adalah radius dari kapiler (m). Aliran molekular ini merupakan aliran melewati pori dimana terjadi tumbukan antar molekul dan molekul dengan dinding sehingga menyerupai aliran viskos.

- Total Leakage

Dalam penelitian ini kita menggunakan kedua jenis aliran baik *molecular flow* maupun *laminar flow* tergantung dari besarnya perbandingan antara *stress* yang diberikan pada seal dengan *gasket seating stress*. *Gasket seating stress* (σ_o) merupakan tegangan maksimum yang dialami oleh seal pada saat instalasi gas LPG digunakan. Apabila nilai perbandingan $\sigma/\sigma_o < 1$ maka sebagian besar aliran yang terjadi adalah aliran laminar dan apabila nilai $\sigma/\sigma_o > 1$ maka aliran yang terjadi

adalah aliran molekular^[14]. Total kebocoran yang merupakan gabungan antara kebocoran akibat aliran laminar dan molekular dirumuskan sebagai berikut

$$L = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\pi r_i^4}{8\eta c l_m} P_m + \frac{4r_i^3}{3cl_m} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \right) (p_1 - p_2) \quad (3.4)$$

Dengan adanya penambahan compressive stress pada seal LPG menyebabkan adanya perubahan propertis dari pori baik dari jumlah pori maupun radius pori. *Compressive stress* memiliki pengaruh ke kedua parameter ini dengan persamaan

$$k = f_1(\sigma^{-m}), \quad r_i = f_2(\sigma^{-n}) \quad (3.5)$$

dengan memperhatikan penambahan *compressive stress* maka persamaan laju kebocoran total menjadi^[15]

$$L = \left[A_L \frac{1}{\eta} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-n_L} P_m + A_M \sqrt{\frac{T}{M}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-n_M} \right] \frac{(p_1 - p_2)}{l} \quad (3.6)$$

3.1.1.4 Metode Numerik

Metode numerik yang digunakan adalah *Finite Element Analysis* menggunakan Software Solid Works 9 dan analisis aliran melalui media berpori dengan menggunakan software COMSOL 4.1. Finite Element Analysis digunakan untuk mengetahui respon dari konstruksi karet perapat saat dipasang pada *bottle valve* dan dibebani oleh beban statik. Analisis ini diharapkan memberikan gambaran mengenai dampak atau respon dari karet perapat terhadap beban ini dan dapat mengestimasi apakah konstruksi karet perapat ini layak dioperasikan pada konstruksi suplai bahan bakar LPG. Analisis aliran melalui media berpori dilakukan untuk mengetahui secara visual karakteristik aliran melalui pori yang terjadi pada karet perapat saat beroperasi.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam menentukan pengaruh penambahan *compressive stress* pada karet perapat (seal) terhadap laju kebocoran (*leakage*) tabung gas LPG, digunakan 2 jenis seal yaitu NBR dan karet vulkanis. Selain kajian eksperimental, digunakan pula analisis numerik sebagai komparator untuk memastikan perubahan karakteristik *leakage* yang disebabkan dengan penambahan *compressive stress*.

4.1 Laju Kebocoran Terhadap Waktu

Berikut tabel hasil eksperimen yang difokuskan pada pengurangan massa tabung terhadap waktu dengan variasi gaya yang direpresentasikan melalui besaran putaran penekan dari penekan regulator yang dilakukan dari putaran 0, 0.25, 0.5, 0.75, sampai pada 1 putaran penuh.

Tabel 4.1 Hasil Pengambilan Data Seal NBR

t (menit)	penekanan (rotasi)									
	0		0.25		0.5		0.75		1	
	m (gr)	P (bar)	m(gr)	P(bar)	m (gr)	P (bar)	m (gr)	P (bar)	m (gr)	P (bar)
0	8437	6.05	8469	6.06	8466	6.02	8,773	5.94	8771	5.9
5	8437	6.05	8469	6.06	8466	6.02	8,773	5.94	8771	5.9
10	8437	6.05	8469	6.06	8466	6.02	8,773	5.94	8771	5.9
15	8437	6.04	8469	6.06	8466	6.02	8,773	5.94	8771	5.9
20	8437	6.04	8469	6.06	8466	6.02	8,773	5.94	8770	5.9
25	8436	6.04	8468	6.06	8465	6.02	8,772	5.94	8770	5.9
30	8436	6.03	8468	6.06	8465	6.02	8,772	5.92	8770	5.9
35	8436	6.03	8468	6.06	8465	6.02	8,772	5.92	8770	5.9
40	8436	6.03	8468	6.06	8465	6.02	8,772	5.92	8770	5.9
45	8436	6.03	8468	6.06	8465	6.02	8,772	5.92	8769	5.9
50	8436	6.03	8468	6.06	8464	6.02	8,771	5.92	8769	5.88
55	8435	6.03	8467	6.06	8464	6.02	8,771	5.92	8769	5.88
60	8435	6.03	8467	6.06	8464	6	8,771	5.92	8769	5.88
65	8435	6.02	8467	6.06	8464	6	8,771	5.92	8769	5.88
70	8435	6.02	8467	6.06	8464	6	8,771	5.92	8769	5.88
75	8435	6.02	8467	6.06	8464	6	8,771	5.92	8769	5.88

80	8435	6.02	8467	6.06	8464	6	8,771	5.92	8768	5.88
85	8434	6.02	8466	6.06	8463	6	8,770	5.92	8768	5.88
90	8434	6.02	8466	6.06	8463	6	8,770	5.92	8768	5.88
95	8434	6.02	8466	6.04	8463	6	8,770	5.92	8768	5.88
100	8434	6.02	8466	6.04	8463	6	8,770	5.92	8768	5.88
105	8434	6.01	8466	6.04	8463	6	8,770	5.92	8768	5.88
110	8434	6.01	8466	6.04	8463	6	8,770	5.92	8768	5.88
115	8433	6.01	8466	6.04	8463	6	8,770	5.92	8767	5.86
120	8433	6.01	8466	6.04	8463	6	8,770	5.9	8767	5.86
125	8433	6.01	8465	6.04	8462	6	8,770	5.9	8767	5.86
130	8433	6	8465	6.04	8462	5.98	8,769	5.9	8767	5.86
135	8433	6	8465	6.04	8462	5.98	8,769	5.9	8767	5.86
140	8433	6	8465	6.04	8462	5.98	8,769	5.9	8767	5.86
145	8433	6	8465	6.04	8462	5.98	8769	5.9	8767	5.86
150	8433	6	8465	6.04	8462	5.98	8769	5.9	8767	5.86

Tabel 4.2 Hasil Pengambilan Data Seal Vulkanis

t (menit)	penekanan (rotasi)									
	0		0.25		0.5		0.75		1	
	m (gr)	P (bar)	m(gr)	P(bar)	m (gr)	P (bar)	m (gr)	P (bar)	m (gr)	P (bar)
0	8552	6.16	8540	6.1	8410	5.94	8,400	5.9	8460	6.04
5	8552	6.16	8540	6.1	8410	5.94	8,400	5.9	8460	6.04
10	8551	6.16	8540	6.1	8410	5.94	8,400	5.9	8460	6.04
15	8551	6.16	8539	6.1	8410	5.94	8,400	5.9	8460	6.04
20	8551	6.16	8539	6.1	8409	5.94	8,399	5.9	8459	6.04
25	8550	6.16	8539	6.1	8409	5.94	8,399	5.9	8459	6.04
30	8550	6.16	8538	6.1	8409	5.94	8,399	5.9	8459	6.02
35	8550	6.16	8538	6.1	8409	5.94	8,399	5.9	8459	6.02
40	8549	6.16	8538	6.1	8408	5.94	8,398	5.9	8458	6.02
45	8549	6.16	8538	6.1	8408	5.94	8,398	5.88	8458	6.02
50	8549	6.16	8537	6.1	8408	5.94	8,398	5.88	8458	6.02
55	8549	6.14	8537	6.1	8408	5.94	8,398	5.88	8458	6.02
60	8548	6.14	8537	6.1	8408	5.94	8,398	5.88	8458	6.02
65	8548	6.14	8536	6.1	8407	5.94	8,397	5.88	8457	6.02
70	8548	6.14	8536	6.1	8407	5.94	8,397	5.88	8457	6.02
75	8548	6.14	8536	6.08	8407	5.94	8,397	5.88	8457	6
80	8547	6.14	8536	6.08	8407	5.94	8,397	5.88	8457	6
85	8547	6.14	8535	6.08	8407	5.92	8,397	5.88	8457	6
90	8547	6.14	8535	6.08	8406	5.92	8,397	5.88	8457	6

95	8547	6.14	8535	6.08	8406	5.92	8,396	5.88	8457	6
100	8546	6.14	8535	6.08	8406	5.92	8,396	5.88	8456	6
105	8546	6.14	8535	6.08	8406	5.92	8,396	5.88	8456	6
110	8546	6.14	8534	6.08	8406	5.92	8,396	5.88	8456	6
115	8546	6.14	8534	6.08	8406	5.92	8,396	5.86	8456	6
120	8546	6.12	8534	6.08	8405	5.92	8,396	5.86	8456	6
125	8545	6.12	8534	6.08	8405	5.92	8,395	5.86	8456	6
130	8545	6.12	8534	6.08	8405	5.9	8,395	5.86	8456	6
135	8545	6.12	8533	6.08	8405	5.9	8,395	5.86	8455	6
140	8545	6.12	8533	6.08	8405	5.9	8,395	5.86	8455	6
145	8545	6.12	8533	6.08	8405	5.9	8,395	5.86	8455	5.98
150	8545	6.12	8533	6.08	8404	5.9	8,395	5.86	8455	5.98

4.1.1 Ekstrapolasi (*Forecasting*) Data

Untuk memudahkan dalam melihat adanya laju kebocoran yang direpresentasikan dari pengurangan massa maka dilakukan *forecasting* sampai 720 menit dengan menggunakan metode *curve fitting*. *Forecasting* ini dilakukan didasarkan pada literatur yang menyatakan bahwa karakteristik kebocoran pada tabung bertekanan mengikuti persamaan eksponensial 3.6, sehingga persamaan eksponensial menjadi pertimbangan utama dalam melakukan *curve fitting* dengan parameter kelayakan *curve fitting* yang baik misalnya dengan memperhatikan nilai *adjustment R-Square* dan *reduced Chi-Square*. *Leakage* seperti yang dijelaskan pada persamaan 3.1 memiliki hubungan sebagai berikut

$$q_L = \frac{\Delta(p \cdot V)}{\Delta t}$$

dan diketahui pula untuk persamaan gas ideal bahwa

$$pV = n R T \quad (4.1)$$

dengan p adalah tekanan absolute (Pa) , q_L adalah laju kebocoran (Pa m³/s), V adalah volume (m³), t adalah waktu (s), R adalah tetapan gas ideal (J/Kg K), T adalah suhu absolute (K), dan n adalah mol (mol). Kedua persamaan ini

menunjukkan bahwa nilai q_L sebanding dengan nilai n (mol) meningkat parameter R dan T untuk penelitian ini dianggap konstan, sehingga sangat logis apabila persamaan laju kebocoran dan laju perubahan massa menunjukkan keserupaan yaitu berbentuk eksponensial. Hal ini yang menjadi salah satu pertimbangan dalam pemilihan persamaan eksponensial dalam melakukan *forecasting* untuk data massa terhadap waktu.

4.1.1.1 Forecasting Data Seal NBR

Berikut hasil persamaan eksponensial massa terhadap waktu dari berbagai variasi penekanan gaya untuk seal NBR dengan menggunakan perangkat lunak OriginPro 8 untuk mendapatkan hasil yang akurat.

$$\text{Persamaan untuk 0 rotasi yaitu } y = 8424.54 + 12.77e^{-0.00305t} \quad (4.2)$$

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.08984
Residual Sum of Squares	2.5156
Adj. R-Square	0.95711
Fit Status	Succeeded(100)

$$\text{Persamaan untuk 0.25 rotasi yaitu } y = 8457.31 + 11.96e^{-0.00313t} \quad (4.3)$$

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.08421
Residual Sum of Squares	2.35795
Adj. R-Square	0.95605
Fit Status	Succeeded(100)

$$\text{Persamaan untuk 0.5 rotasi yaitu } y = 8456.81 + 9.45e^{-0.00421t} \quad (4.4)$$

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.08526
Residual Sum of Squares	2.38733
Adj. R-Square	0.95448
Fit Status	Succeeded(100)

Persamaan untuk 0.75 rotasi yaitu $y = 8764.85 + 8.42e^{-0.00479t}$ (4.5)

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.08922
Residual Sum of Squares	2.49812
Adj. R-Square	0.94996
Fit Status	Succeeded(100)

Persamaan untuk 1 rotasi yaitu $y = 8763.47 + 7.74e^{-0.00573t}$ (4.6)

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.0833
Residual Sum of Squares	2.33231
Adj. R-Square	0.95599
Fit Status	Succeeded(100)

Dari kelima persamaan eksponensial untuk *seal* NBR terlihat *curve fitting* yang dilakukan sudah baik. Hal ini terlihat dari nilai *Adj R-Square* dan *Reduced Chi-Square* yang menunjukkan nilai yang baik dimana rata-rata nilai *Adj R-Square* yang mendekati 1 menunjukkan perubahan variable bebas (dalam hal ini adalah waktu) mengakibatkan perubahan yang signifikan terhadap variable terikat (dalam hal ini adalah massa) dan nilai *reduced Chi-square* yang kecil menunjukkan deviasi yang kecil antara data aktual dan data prediksi dari persamaan eksponensial yang dipilih. Hasil *forecasting* data *seal* NBR dapat dilihat pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil *Forecasting* Data Seal NBR

t (menit)	Δ massa(gr)				
	0 putaran	0.25 putaran	0.5 putaran	0.75 putaran	1 putaran
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	1.10	1.06	1.10	1.10	1.19
60	2.10	2.02	2.07	2.05	2.19
90	3.02	2.89	2.92	2.88	3.03
120	3.86	3.69	3.67	3.60	3.74
150	4.62	4.41	4.34	4.22	4.34
180	5.31	5.07	4.92	4.75	4.84
210	5.95	5.67	5.44	5.22	5.27
240	6.53	6.22	5.89	5.62	5.62
270	7.06	6.72	6.29	5.97	5.92
300	7.54	7.17	6.64	6.27	6.18
330	7.98	7.58	6.95	6.53	6.39
360	8.38	7.96	7.23	6.76	6.57
390	8.75	8.30	7.47	6.95	6.72
420	9.09	8.61	7.68	7.12	6.85
450	9.39	8.90	7.87	7.27	6.95
480	9.67	9.15	8.03	7.40	7.04
510	9.92	9.39	8.18	7.51	7.12
540	10.16	9.60	8.31	7.61	7.18
570	10.37	9.80	8.42	7.69	7.24
600	10.56	9.98	8.52	7.76	7.28
630	10.74	10.14	8.61	7.82	7.32
660	10.90	10.28	8.69	7.88	7.35
690	11.05	10.42	8.75	7.92	7.38

4.1.1.2 Forecasting Data Seal Vulkanis

Berikut hasil persamaan eksponensial massa terhadap waktu dari berbagai variasi penekanan gaya untuk seal NBR dengan menggunakan perangkat lunak OriginPro 8 untuk mendapatkan hasil yang akurat

Persamaan untuk 0 rotasi yaitu $y = 8539.68 + 12.39e^{-0.0068t}$ (4.7)

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.09134
Residual Sum of Squares	2.5576
Adj. R-Square	0.96431
Fit Status	Succeeded(100)

Persamaan untuk 0.25 rotasi yaitu $y = 8525.1 + 15.17 e^{-0.0049 t}$ (4.8)

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.08694
Residual Sum of Squares	2.43446
Adj. R-Square	0.98308
Fit Status	Succeeded(100)

Persamaan untuk 0.5 rotasi yaitu $y = 8395.39 + 14.87e^{-0.0031t}$ (4.9)

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.09155
Residual Sum of Squares	2.56327
Adj. R-Square	0.97124
Fit Status	Succeeded(100)

Persamaan untuk 0.75 rotasi yaitu $y = 8389.4 + 11.22e^{-0.0049t}$ (4.10)

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.08455
Residual Sum of Squares	2.36737
Adj. R-Square	0.97031
Fit Status	Succeeded(100)

$$\text{Persamaan untuk 1 rotasi yaitu } y = 8450.33 + 9.90^{-0.00498t} \quad (4.11)$$

	B
Number of Points	31
Degrees of Freedom	28
Reduced Chi-Sqr	0.09134
Residual Sum of Squares	2.5576
Adj. R-Square	0.96431
Fit Status	Succeeded(100)

Hal yang serupa juga terjadi pada seal vulkanis, dimana terlihat nilai reduced chi square, residual sum of squares dan adj R square menunjukkan nilai yang baik untuk sebuah proses *curve fitting*.

Tabel 4.4 Hasil *Forecasting Data Seal Vulkanis*

t (menit)	Δ massa(gr)				
	0 putaran	0.25 putaran	0.5 putaran	0.75 putaran	1 putaran
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	2.49	1.87	1.38	1.38	1.34
60	4.56	3.51	2.64	2.59	2.49
90	6.29	4.93	3.77	3.65	3.49
120	7.73	6.18	4.80	4.57	4.35
150	8.93	7.27	5.73	5.38	5.08
180	9.93	8.23	6.57	6.09	5.72
210	10.77	9.06	7.33	6.70	6.26
240	11.46	9.79	8.02	7.24	6.74
270	12.04	10.43	8.65	7.71	7.14
300	12.52	10.98	9.21	8.13	7.49
330	12.92	11.47	9.72	8.48	7.79
360	13.26	11.89	10.19	8.80	8.05
390	13.54	12.27	10.61	9.07	8.27
420	13.77	12.59	10.99	9.31	8.47
450	13.96	12.87	11.33	9.52	8.63
480	14.12	13.12	11.64	9.71	8.77
510	14.26	13.34	11.93	9.87	8.90
540	14.37	13.53	12.18	10.01	9.00
570	14.46	13.69	12.41	10.13	9.09
600	14.54	13.84	12.62	10.24	9.17

630	14.61	13.96	12.81	10.33	9.24
660	14.66	14.08	12.99	10.41	9.30
690	14.71	14.17	13.14	10.48	9.35

4.1.2 Grafik Δm terhadap Waktu Hasil *Forecasting*

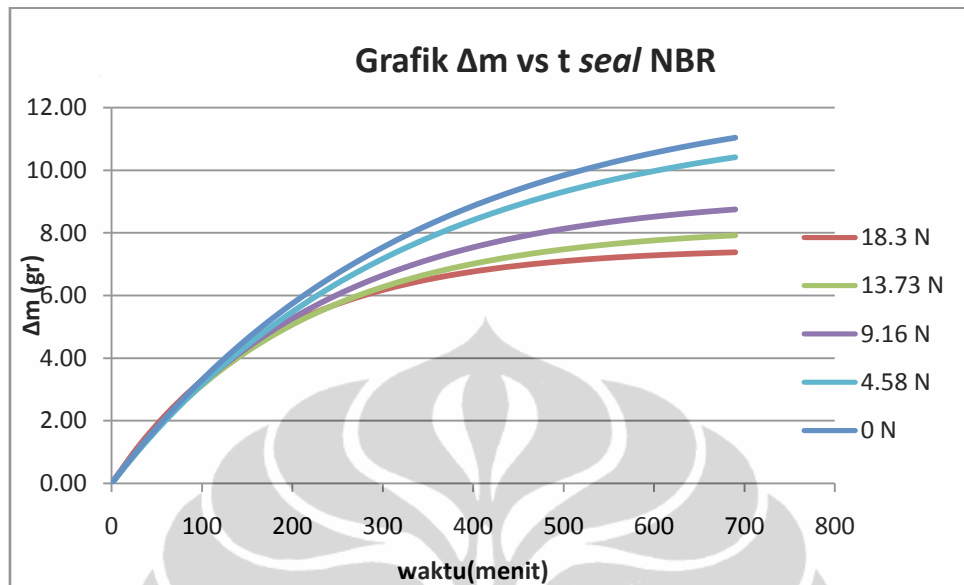
Dari hasil *forecasting* data pada bab sebelumnya didapat hasil data pengurangan massa terhadap waktu dalam kurun waktu sampai 690 menit dengan variasi putaran dari 0, 0.25, 0.5, 0.75 dan 1. Putaran ini merepresentasikan besarnya gaya yang diberikan pada bagian atas regulator ketika penekan jenis ulir diputar dimana semakin besar putaranya semakin besar pula gaya yang diberikan pada regulator. Dengan mengetahui koefisien elastisitas dari *seal* dan besarnya penurunan jarak saat diputar maka akan didapat besarnya gaya yang diberikan pada *seal*. Nilai koefisien elastisitas dari material *seal* NBR dan Vulkanis adalah 15012.25 N/m^2 dan 10035.55 N/m^2 yang didapat dari hasil pengetesan langsung.

Tabel 4.5 Hasil Kalkulasi Gaya Penekanan untuk Variasi Putaran

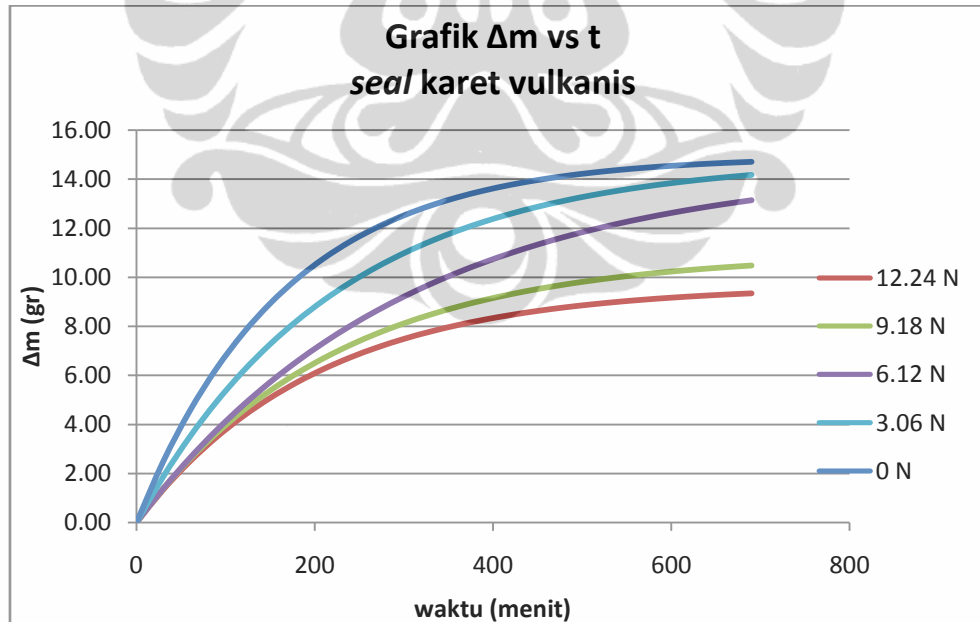
Rotasi	Jarak putaran (mm)	Gaya tekan (N)	
		NBR	Vulkanis
0	0	0.00	0.00
0.25	0.305	4.58	3.06
0.5	0.61	9.16	6.12
0.75	0.915	13.74	9.18
1	1.22	18.31	12.24

Dari hasil kalkulasi gaya terlihat gaya yang diberikan pada kedua seal berbeda dimana *seal* NBR secara umum mendapat gaya yang lebih besar dibandingkan dengan *seal* Vulkanis. Hal ini disebabkan nilai dari koefisien elastisitas dari *seal* NBR lebih besar sehingga dengan penurunan jarak akibat putaran (nilainya sama untuk kedua *seal*) maka tentu *seal* dengan koefisien elastisitas yang lebih besar akan menghasilkan gaya yang lebih besar.

Berikut grafik yang dibentuk berdasarkan hasil *forecasting* pada bab 4.1.1:



Gambar 4.1 Grafik Δm Terhadap Waktu Seal NBR



Gambar 4.2 Grafik Δm Terhadap Waktu Seal vulkanis

Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan besarnya kebocoran massa dalam tiap satu satuan waktu untuk berbagai variasi tingkat penekanan mulai dari 0 rotasi sampai

pada 1 rotasi penuh. Kedua grafik menunjukkan bahwa adanya karakteristik yang berbeda ditunjukkan oleh masing-masing tingkat penekanan, dimana terlihat adanya kecenderungan penurunan jumlah pengurangan massa (Δm) seiring dengan meningkatnya rotasi. Menurut GU Boqin, CHEN Ye dan ZHU Dasheng dalam penelitiannya berjudul *Prediction of Leakage Rates Through Sealing Connections with Nonmetallic Gaskets* dinyatakan bahwa dengan penambahan *compressive stress* pada *seal* dengan bahan non metal akan mengakibatkan pengurangan jumlah dan besar radius dari pori (*leakage path*) dari *seal*. Berkurangnya laju kebocoran akibat penambahan *compressive stress* mengakibatkan penurunan jumlah mol gas yang keluar dengan karakteristik yang serupa dengan kebocoran seperti pembahasan pada bagian *forecasting data*. Gambar 4.1 untuk rotasi 0.5 dan 0.25 memiliki perbedaan *local gradient* yang cukup jauh untuk waktu 400 sampai 720 menit kemungkinan disebabkan oleh adanya kalibrasi yang kurang tepat saat penggantian tabung. Kalibrasi yang dimaksud adalah menyesuaikan tekanan saat percobaan terutama ketika ada pergantian tabung seperti yang terjadi antara percobaan 0.25 dan 0.5 rotasi. Tekanan memiliki pengaruh yang besar dalam menentukan laju kebocoran seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 3.6, sehingga dalam proses percobaannya diperlukan penetapan tekanan mula-mula yang sama untuk masing-masing tingkat penekanan.

Hal yang serupa terlihat pada grafik untuk seal vulkanis dimana pengurangan massa (Δm) juga mengikuti pola seperti pada seal NBR dimana pengurangan massa sebanding dengan peningkatan tekanan yang diberikan pada seal. Hal yang perlu dicermati adalah adanya perbedaan pola yang ditunjukkan pada menit 0 sampai 300 untuk kedua seal, dimana untuk seal NBR tidak terlalu banyak perbedaan laju kebocoran untuk variasi tingkat penekanan dibandingkan dengan seal vulkanis. Hal ini kemungkinan diakibatkan oleh respon yang diberikan oleh kedua seal berbeda ketika diberikan *compressive stress*. Sampai saat tulisan ini ditulis properties dari kedua jenis *seal* masih belum bisa diketahui secara jelas misalnya dari *yield strength*, *elasticity*, koefisien difusivitas, radius pori dan sebagainya. Kecenderungan besar ke arah nilai elastisitas dari kedua *seal*

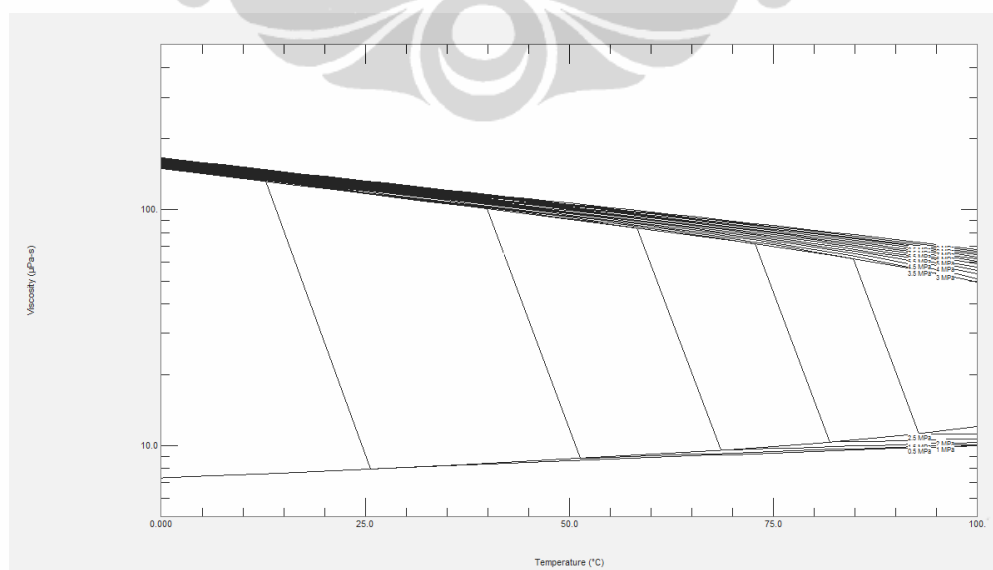
ini yang mempengaruhi dampak penambahan *compressive stress* terhadap perubahan dari radius dan jumlah pori dari material.

Dengan penambahan *compressive stress* pada kedua grafik menunjukkan bahwa terjadi pengurangan laju kebocoran. Pengurangan yang terjadi pada penelitian ini dapat mencapai 36.43% untuk *seal* Vulkanis dan 33.18% untuk *seal* NBR.

4.1.3 Menentukan Persamaan Laju Kebocoran (*Leakage Rates*)

Dalam menentukan persamaan laju kebocoran terlebih dahulu harus diketahui parameter fisik berupa temperature, massa molekular, dan viskositas dinamik dari aliran gas LPG. LPG (60% propane dan 40% butana) memiliki besaran fisis sebagai berikut:

- Temperature = 297.15 K
- Massa molekular = $0.6 \times$ massa molekular propane + $0.4 \times$ massa molekular butana = 49.7
- Viskositas dinamik = 0.000005 Pa m/s yang didapatkan dari tabel hasil olahan *software refprop* yang ditunjukkan pada gambar 4.3



Gambar 4.3 Viskositas dinamik 60% propane dan 40% butan terhadap suhu

4.1.3.1 Persamaan Laju Kebocoran (Leakage Rates) seal NBR

$$\begin{aligned} \text{Lebar efektif (l)} &= d_{\text{out}} - d_{\text{in}} \\ &= 11.08 \text{ mm} - 8.6 \text{ mm} \\ &= 2.48 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Gasket seating stress} = 1.85 \text{ MPa}$$

$$k = 15012.25 \text{ N/m}^2$$

dari properties di atas maka didapat hasil beberapa besaran untuk berbagai variasi penekanan dengan x sebagai defleksi dari seal NBR sebagai berikut

Tabel 4.6 Tabel Pengolahan data Kalkulasi Laju Kebocoran Seal NBR

Rotasi	L (Pa m ³ /s)	σ/σ_0	ln L	ln (σ/σ_0)	pm (bar)	p1-p2/l (bar/m)	x (mm)	F (N)	σ (N/m ²)
0	0.00081		-7.11		3.51	2025.88	0	0	0
0.25	0.00077	0.065	-7.17	-2.73	3.51	2030.69	0.30	4.57	119508.6
0.5	0.00064	0.129	-7.34	-2.04	3.50	2017.95	0.61	9.15	239017.2
0.75	0.00058	0.194	-7.44	-1.64	3.45	1979.44	0.915	13.73	358525.8
1	0.00054	0.258	-7.51	-1.35	3.42	1954.47	1.22	18.31	478034.4
rata-rata					3.48	2001.69			

$$L = \left[A_L \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-nL} P_m + A_m \sqrt{\frac{T}{M}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-nm} \right] \frac{P_1 - P_2}{l} \quad (4.12)$$

$$\text{Dimana } p_m = (p_1 + p_2)/2 \quad (4.13)$$

Akibat nilai $\sigma < \sigma_0$ maka aliran kebocoran dapat diasumsikan sebagai aliran laminar dengan menghilangkan komponen laju aliran keboran yang berasal dari aliran molecular. Persamaan diatas menjadi

$$L = \left[A_L \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-nL} P_m \right] \frac{P_1 - P_2}{l} \quad (4.14)$$

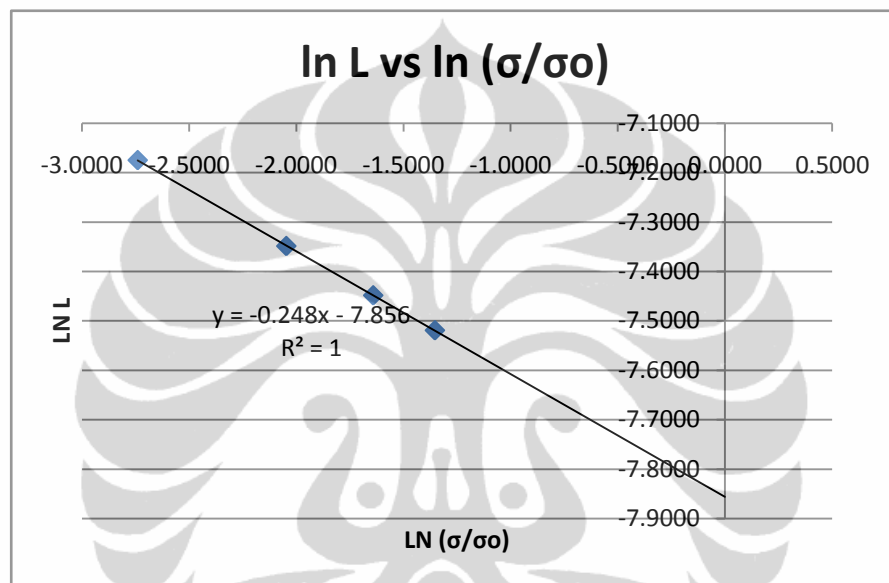
Dengan melinearkan persamaan diatas menjadi persamaan dengan bentuk

$$y = ax + b$$

$$\ln L = \ln \left(\left[A_L \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-nL} P_m \right] \frac{P_1 - P_2}{l} \right)$$

$$\ln L = -nL \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) + \ln \left(\frac{A_L \cdot P_m}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l} \right) \quad (4.15)$$

Konstanta A_L dan $-nL$ didapat dengan memploting grafik $\ln L$ vs $\ln (\sigma/\sigma_0)$ yang didapat dari tabel 4.5.



Gambar 4.4 Grafik $\ln L$ vs $\ln (\sigma/\sigma_0)$ untuk seal NBR

$$\ln L = y$$

$$-nL \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) + \ln \left(\frac{A_L \cdot P_m}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l} \right) = -0.248 x - 7.856$$

$$-0.248 = -nL$$

$$nL = 0.248$$

$$-7.856 = \ln \left(\frac{A_L \cdot P_m}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l} \right)$$

$$3.8 \times 10^{-4} = \frac{A_L \cdot P_m}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l}$$

$$3.8 \times 10^{-4} = \frac{A_L \cdot 3.482 \times 10^5}{0.00022} \cdot 2001.691 \times 10^5$$

$$A_L = 1.19 \times 10^{-21}$$

Persamaan analitik laju kebocoran (*leakage*) untuk seal NBR adalah

$$L = \left[1.19 \times 10^{-21} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-0.248} P_m \right] \frac{P_1 - P_2}{l} \quad (4.16)$$

4.1.3.2 Persamaan Laju Kebocoran (Leakage Rates) Seal Vulkanis

Lebar efektif (l) = $d_{out} - d_{in}$

$$= 10.9 \text{ mm} - 8.52 \text{ mm}$$

$$= 2.38 \text{ mm}$$

Gasket seating stress = 1.85 MPa

$$k = 10035.55 \text{ N/m}^2$$

dari properties di atas maka didapat hasil beberapa besaran untuk berbagai variasi penekanan dengan x sebagai defleksi dari *seal* vulkanis sebagai berikut

Tabel 4.7 Pengolahan data Kalkulasi Laju Kebocoran *Seal* Vulkanis

Rotasi	L (Pa m ³ /s)	σ/σ_0	In L	ln (σ/σ_0)	pm (bar)	p1-p2/l (bar/m)	X (mm)	F (N)	σ (N/m ²)
0	0.00108	0	-6.83	0	3.55	2147.03	0	0	0
0.25	0.00104	0.04	-6.86	-3.08	3.55	2143.68	0.30	3.06	84361.67
0.5	0.00097	0.09	-6.94	-2.39	3.42	2037.42	0.61	6.12	168723.3
0.75	0.00077	0.14	-7.17	-1.98	3.40	2020.12	0.91	9.18	253085
1	0.00069	0.18	-7.28	-1.70	3.47	2079.70	1.22	12.24	337446.7
rata-rata					3.48	2085.59			

$$L = \left[A_L \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-nL} P_m + A_m \sqrt{\frac{T}{M}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-nm} \right] \frac{P_1 - P_2}{l}$$

Dimana $p_m = (p_1 + p_2)/2$

Akibat nilai $\sigma < \sigma_0$ maka aliran kebocoran dapat diasumsikan sebagai aliran laminar dengan menghilangkan komponen laju aliran keboran yang berasal dari aliran molecular. Persamaan diatas menjadi

$$L = \left[A_L \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-nL} P_m \right] \frac{P_1 - P_2}{l}$$

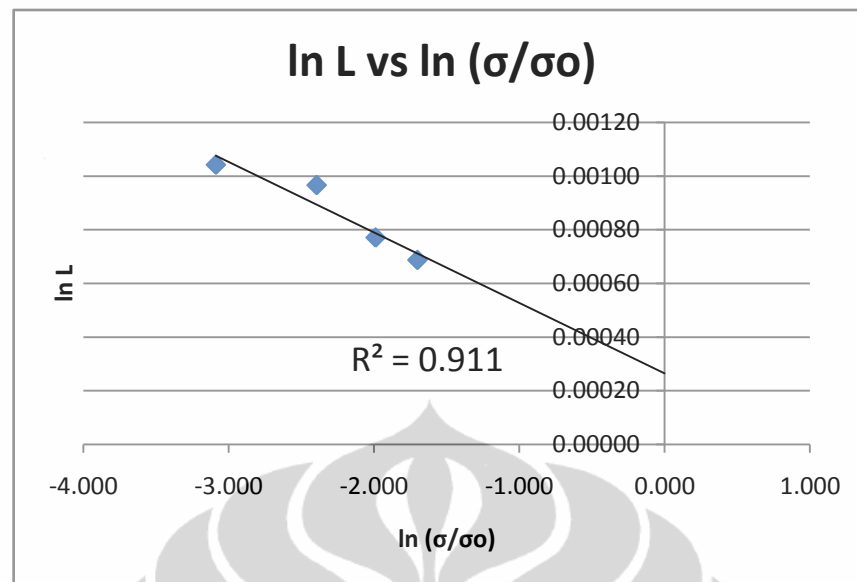
Dengan melinearkan persamaan diatas menjadi persamaan dengan bentuk

$$y = ax + b$$

$$\ln L = \ln \left(\left[A_L \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-nL} P_m \right] \frac{P_1 - P_2}{l} \right)$$

$$\ln L = -nL \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) + \ln \left(\frac{A_L \cdot P_m}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l} \right)$$

Konstanta A_L dan $-nL$ didapat dengan memploting grafik $\ln L$ vs $\ln (\sigma/\sigma_0)$ yang didapat dari tabel 4.6



Gambar 4.5 Grafik ln L vs ln (σ/σ₀) untuk seal vulkanis

Persamaan garisnya $y = -0.305x - 7.763$

$$\ln L = y$$

$$-nL \ln \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right) + \ln \left(\frac{A_L \cdot P_m}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l} \right) = -0.305x - 7.763$$

$$-0.305 = -nL$$

$$nL = 0.305$$

$$-7.763 = \ln \left(\frac{A_L \cdot P_m}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l} \right)$$

$$4.25 \times 10^{-4} = \frac{A_L \cdot P_m}{\mu} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l}$$

$$4.25 \times 10^{-4} = \frac{A_L \cdot 3.482 \times 10^5}{0.00022} \cdot 2.085.59 \times 10^5$$

$$A_L = 1.28 \times 10^{-21}$$

Persamaan analitik laju kebocoran (*leakage*) untuk seal vulkanis adalah

$$L = \left[1.28 \times 10^{-21} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-0.305} P_m \right] \frac{P_1 - P_2}{l} \quad (4.17)$$

4.1.3.3 Komparasi Persamaan *Leakage Seal* NBR dan Vulkanis

Persamaan *leakage* untuk kedua *seal* dalam penelitian ini tentu saja memiliki kesalahan baik yang berasal dari *error* saat percobaan maupun metode pendekatan yang digunakan. Kebocoran pada dasarnya merupakan kombinasi aliran laminar dan molekular yang melewati pori secara difusi yang dipengaruhi oleh propertis dari material seperti radius pori, dan jumlah pori. Penentuan persamaan ini hanya menggunakan jenis aliran laminar dan mengabaikan aliran molekular yang didasarkan pada penelitian GU Boqin, CHEN Ye dan ZHU Dasheng dalam penelitiannya berjudul *Prediction of Leakage Rates Through Sealing Connections with Nonmetcallic Gakets*^[14] yang menyatakan bahwa ketika besarnya penambahan *compressive stress* lebih besar dari *gasket seating stress* dari *non metallic gasket* maka mayoritas aliran difusi adalah aliran laminar. Pengabaian ini tentunya akan mengakibatkan persamaan ini memiliki *error* yang lebih besar.

Hal yang perlu dicermati adalah nilai A_L dan nL dari kedua persamaan yang menunjukkan karakteristik laju kebocoran, dimana semakin besar nilai A_L dan nL semakin besar pula laju kebocoran dalam kasus dimana *compressive stress* lebih kecil dari *gasket seating stress*.

4.1.4 Pengaruh Perbedaan Tekanan Terhadap Leakage

Hasil eksperimen memperlihatkan bahwa pengaruh beda tekanan terhadap laju kebocoran dapat didekati dengan persamaan garis lurus dengan nilai R-square diatas 0.9. Hal yang janggal terlihat dari grafik leakage terhadap Δp , dimana *compressive stress* yang diberikan pada percobaan ini tidak lebih besar dari *gasket*

*seating stress*nya sehingga ketika digunakan asumsi sebagian besar aliran difusi adalah laminar maka hubungan antara kedua parameter ini tidaklah linear. Hal ini berdasarkan 3.6

$$L = \left[A_L \frac{1}{\eta} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-n_L} p_m + A_M \sqrt{\frac{T}{M}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-n_M} \right] \frac{(p_1 - p_2)}{l}$$

Persamaan ini menyatakan jika diasumsikan bahwa aliran laminar maka leakage akan memiliki hubungan linear bukan dengan Δp namun dengan $(p_1^2 - p_2^2)$. Kecenderungan linear ini salah satunya diakibatkan kurangnya ketelitian *pressure meter* dalam menampilkan perubahan tekanan dengan ketelitian 0.02 bar mengingat dalam 150 menit terjadi pengurangan tekanan paling besar hanya 0.04 bar atau 2 kali nilai ketelitian. Secara umum dapat dikatakan bahwa laju kebocoran akan meningkat dengan meningkatnya perbedaan tekanan antara sisi masuk dan sisi keluar dari tabung gas LPG yang memenuhi hukum *transport phenomena* dimana dengan tekanan yang semakin besar mengakibatkan adanya transfer energy yang semakin besar baik baik yang terdistribusi menjadi energi dalam maupun energi kinetik yang dapat memperbesar laju aliran difusi.

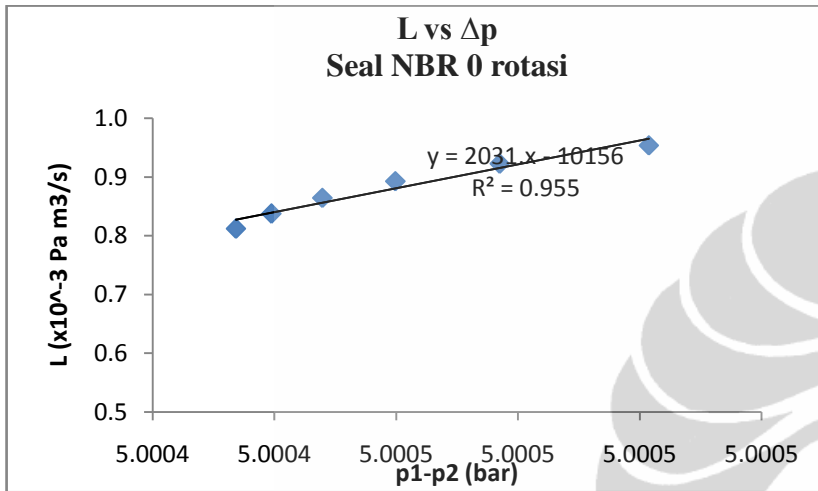
Gradien yang ditunjukkan oleh persamaan grafik *leakage* terhadap Δp secara umum menurun sesuai dengan peningkatan rotasi (gaya penekan) meskipun pada beberapa grafik menunjukan hal yang sebaliknya. Secara teoritis seharusnya semua grafik menunjukan hal tersebut yakni penurunan gradien seiring semakin besarnya *compressive stress* mengingat dalam persamaan kebocoran total perbedaan tekanan $(p_1 - p_2)$ untuk aliran laminar atau $(p_1^2 - p_2^2)$ untuk aliran molekular memiliki hubungan linear dengan gradien positif terhadap *leakage*. Ketelitian alat *pressure meter* menjadi faktor yang paling kuat yang kemungkinan menyebabkan hasil ini.

Tabel 4.8 Perbedaan Tekanan Terhadap Leakage Seal NBR

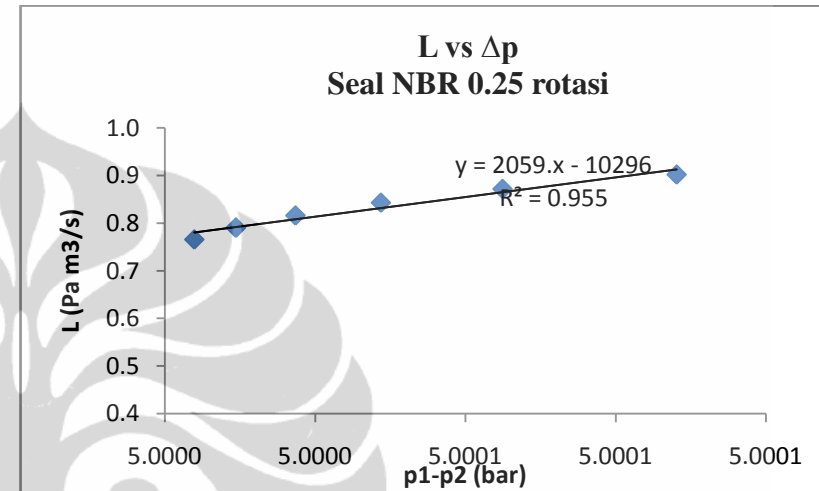
t (menit)	0 rotasi		0.25 rotasi		0.5 rotasi		0.75 rotasi		1 rotasi	
	L (Pa m ³ /s)	p1-p2 (bar)	L (Pa m ³ /s)	p1-p2 (bar)	L (Pa m ³ /s)	p1-p2 (bar)	L (Pa m ³ /s)	p1-p2 (bar)	L (Pa m ³ /s)	p1-p2 (bar)
0										
30	0.00186	5.0358	0.0017846	5.0335	0.00186	5.0274	0.00186	5.0274	0.00201	4.8266
60	0.00178	5.0252	0.0017046	5.0234	0.00175	5.0185	0.00174	4.8744	0.00185	4.8186
90	0.00170	5.0177	0.0016294	5.0164	0.00165	5.0123	0.00162	5.0123	0.00171	4.8131
120	0.00163	5.0125	0.0015587	5.0115	0.00155	5.0079	0.00152	5.0079	0.00158	4.8092
150	0.00156	5.0089	0.0014921	5.0080	0.00147	5.0049	0.00143	5.0049	0.00147	4.8065
180	0.00150	5.0063	0.0014294	5.0056	0.00139	5.0028	0.00134	5.0028	0.00136	4.8046
210	0.00144	5.0046	0.0013703	5.0039	0.00131	5.0013	0.00126	4.8591	0.00127	4.8033
240	0.00138	5.0033	0.0013146	5.0028	0.00124	5.0002	0.00119	4.8582	0.00119	4.8024
270	0.00133	5.0025	0.0012621	5.0019	0.00118	4.9995	0.00112	4.8575	0.00111	4.8017
300	0.00128	5.0018	0.0012126	5.0014	0.00112	5.0014	0.00106	4.8571	0.00104	4.8013
330	0.00123	5.0014	0.0011658	5.0010	0.00107	4.9986	0.00100	4.8567	0.00098	4.8009
360	0.00118	5.0011	0.0011215	5.0007	0.00102	4.9984	0.00095	4.8565	0.00093	4.8007
390	0.00114	5.0009	0.0010798	5.0005	0.00097	4.9982	0.00090	4.8564	0.00087	4.8006
420	0.00110	5.0008	0.0010402	5.0003	0.00093	4.9981	0.00086	4.8563	0.00083	4.8005
450	0.00106	5.0007	0.0010028	5.0002	0.00089	4.9980	0.00082	4.8562	0.00078	4.8004
480	0.00102	5.0006	0.0009674	5.0002	0.00085	4.9979	0.00078	4.8561	0.00074	4.8003
510	0.00099	5.0005	0.0009339	5.0001	0.00081	4.9979	0.00075	4.8561	0.00071	4.8003
540	0.00095	5.0005	0.0009021	5.0001	0.00078	4.9979	0.00071	4.8561	0.00067	4.8003
570	0.00092	5.0005	0.000872	5.0001	0.00075	4.9978	0.00068	4.8560	0.00064	4.8002
600	0.00089	5.0005	0.0008433	5.0000	0.00072	4.9978	0.00066	4.8560	0.00062	4.8002

630	0.00086	5.0004	0.0008162	5.0000	0.00069	4.9978	0.00063	4.8560	0.00059	4.8002
660	0.00084	5.0004	0.0007904	5.0000	0.00067	4.9978	0.00061	4.8560	0.00057	4.8002
690	0.00081	5.0004	0.0007658	5.0000	0.00064	4.9978	0.00058	4.8560	0.00054	4.8002

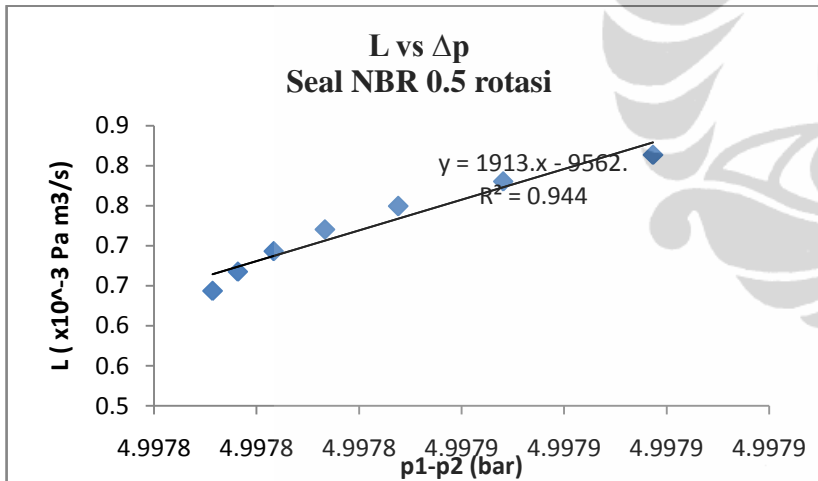




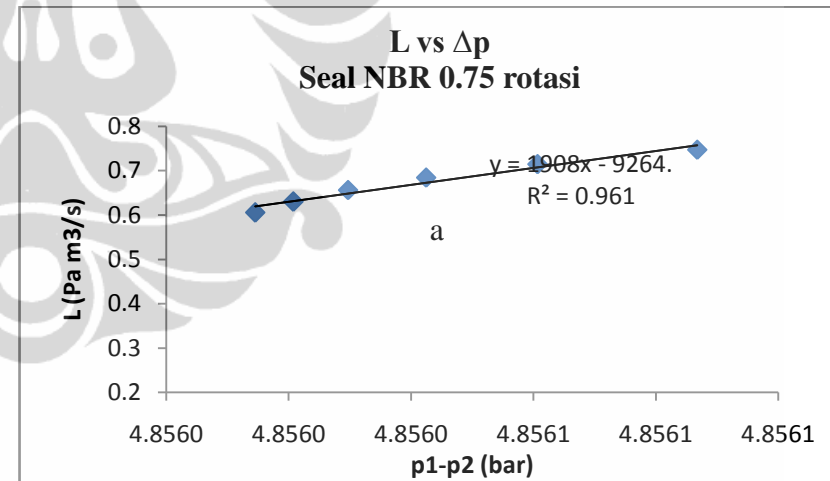
a



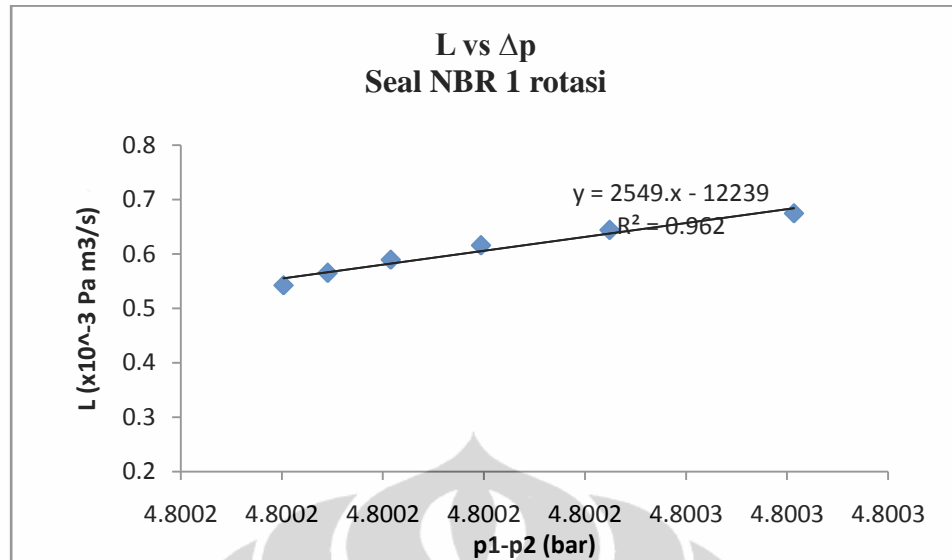
b



c



d



e

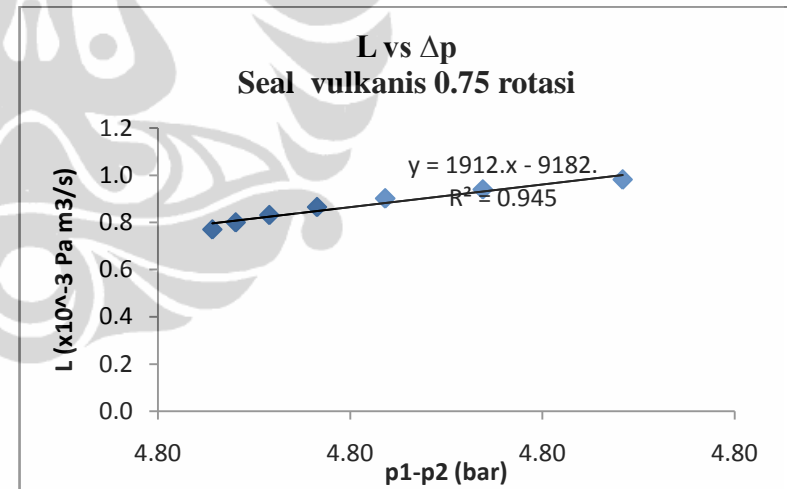
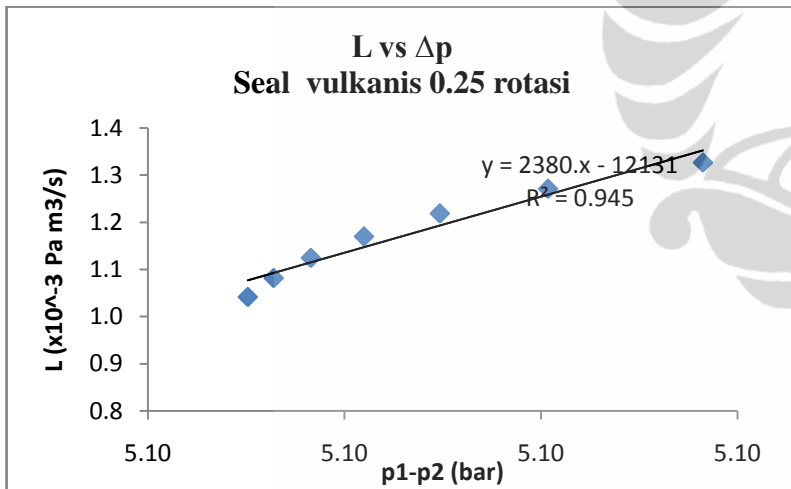
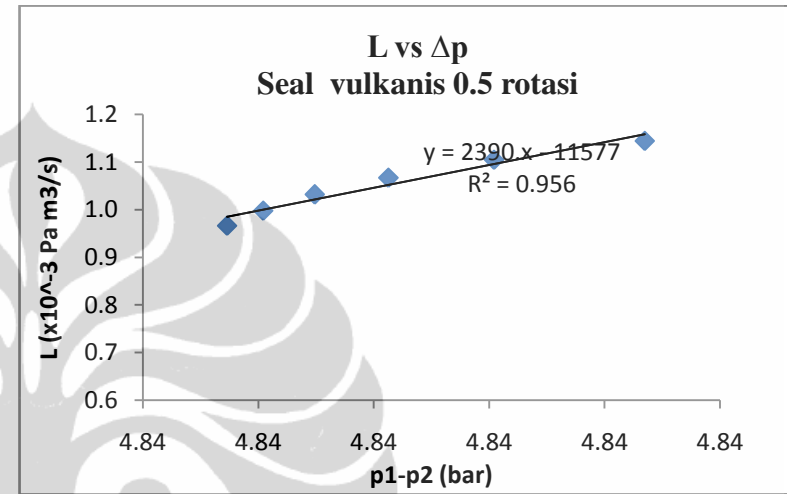
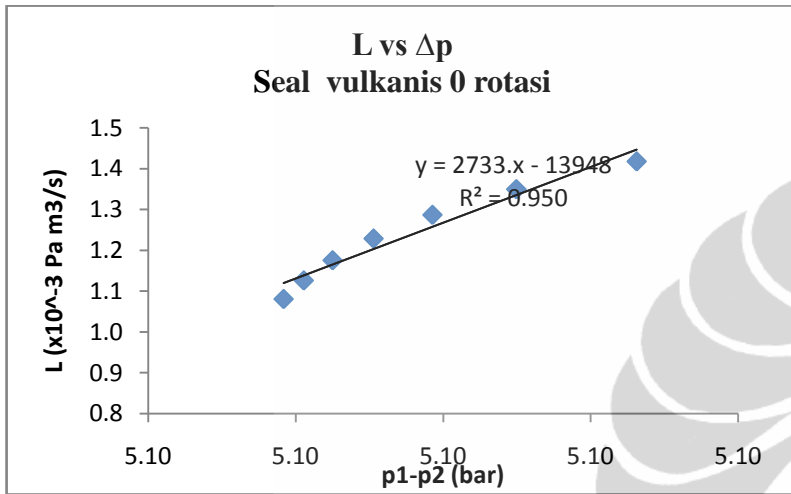
Gambar 4.6 Grafik Kebocoran Terhadap Beda Tekanan Seal NBR a. 0 rotasi;
b.0.25 rotasi ; c. 0.5 rotasi; d 0.75 rotasi; e 1 rotasi

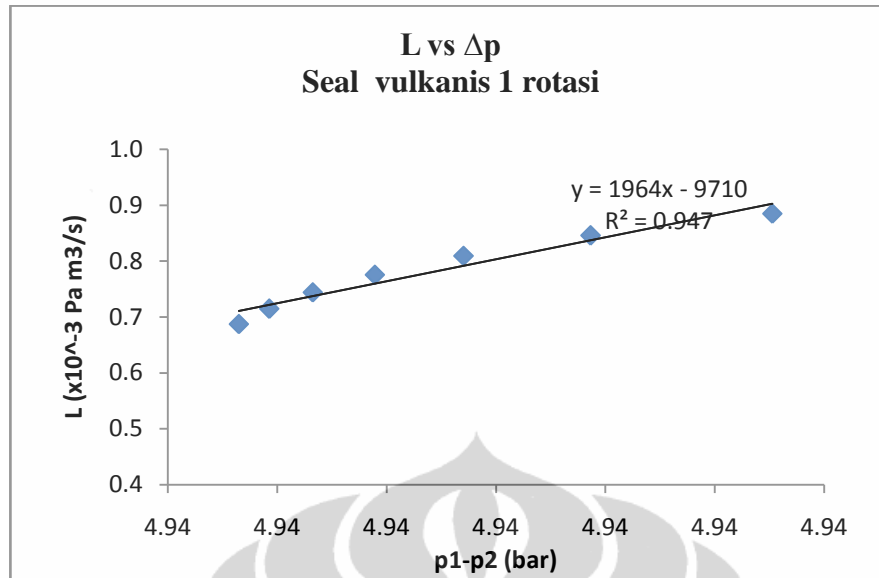
Tabel 4.9 Perbedaan Tekanan Terhadap Leakage Seal Vulkanis

t (menit)	0 rotasi		0.25 rotasi		0.5 rotasi		0.75 rotasi		1 rotasi	
	L (Pa m3/s)	p1-p2 (bar)	L (Pa m3/s)	p1-p2 (bar)	L (Pa m3/s)	p1-p2 (bar)	L (Pa m3/s)	p1-p2 (bar)	L (Pa m3/s)	p1-p2 (bar)
30	0.00421	5.1445	0.00316	5.1354	0.00234	4.8387	0.00234	4.8387	0.00227	4.9779
60	0.00386	5.1322	0.00296	5.1235	0.00223	4.8694	0.00219	4.8277	0.00211	4.9678
90	0.00355	5.1235	0.00198	5.1151	0.00212	4.8615	0.00206	4.8200	0.00197	4.9607
120	0.00327	5.1174	0.00261	5.1092	0.00203	4.8559	0.00203	4.8146	0.00184	4.9558
150	0.00302	5.1132	0.00246	5.1051	0.00194	4.8520	0.00182	4.8108	0.00172	4.9523
180	0.00280	5.1102	0.00232	5.1022	0.00185	4.8493	0.00172	4.8082	0.00161	4.9499
210	0.00260	5.1082	0.00219	5.1002	0.00177	4.8474	0.00162	4.8063	0.00151	4.9482
240	0.00242	5.1067	0.00207	5.0988	0.00170	4.8461	0.00153	4.8050	0.00142	4.9471
270	0.00226	5.1067	0.00196	5.0978	0.00162	4.8452	0.00145	4.8041	0.00134	4.9462
300	0.00212	5.1050	0.00186	5.0972	0.00156	4.8445	0.00137	4.8035	0.00127	4.9456
330	0.00199	5.1045	0.00176	5.0967	0.00149	4.8441	0.00130	4.8030	0.00120	4.9452
360	0.00187	5.1041	0.00168	5.0963	0.00144	4.8437	0.00124	4.8027	0.00113	4.9450
390	0.00176	5.1039	0.00160	5.0961	0.00138	4.8435	0.00118	4.8025	0.00108	4.9448
420	0.00166	5.1037	0.00152	5.0959	0.00133	4.8434	0.00112	4.8024	0.00102	4.9446
450	0.00157	5.1036	0.00145	5.0958	0.00128	4.8433	0.00107	4.8022	0.00097	4.9445
480	0.00149	5.1035	0.00139	5.0957	0.00123	4.8432	0.00103	4.8022	0.00093	4.9445
510	0.00142	5.1035	0.00133	5.0957	0.00119	4.8431	0.00098	4.8021	0.00088	4.9444
540	0.00135	5.1034	0.00127	5.0957	0.00114	4.8431	0.00094	4.8021	0.00085	4.9444
570	0.00129	5.1034	0.00122	5.0956	0.00110	4.8431	0.00090	4.8021	0.00081	4.9444
600	0.00123	5.1034	0.00117	5.0956	0.00107	4.8430	0.00087	4.8020	0.00078	4.9443

630	0.00118	5.1034	0.00112	5.0956	0.00103	4.8430	0.00083	4.8020	0.00074	4.9443
660	0.00113	5.1034	0.00108	5.0956	0.00100	4.8430	0.00080	4.8020	0.00071	4.9443
690	0.00108	5.1033	0.00104	5.0956	0.00097	4.8430	0.00077	4.8020	0.00069	4.9443



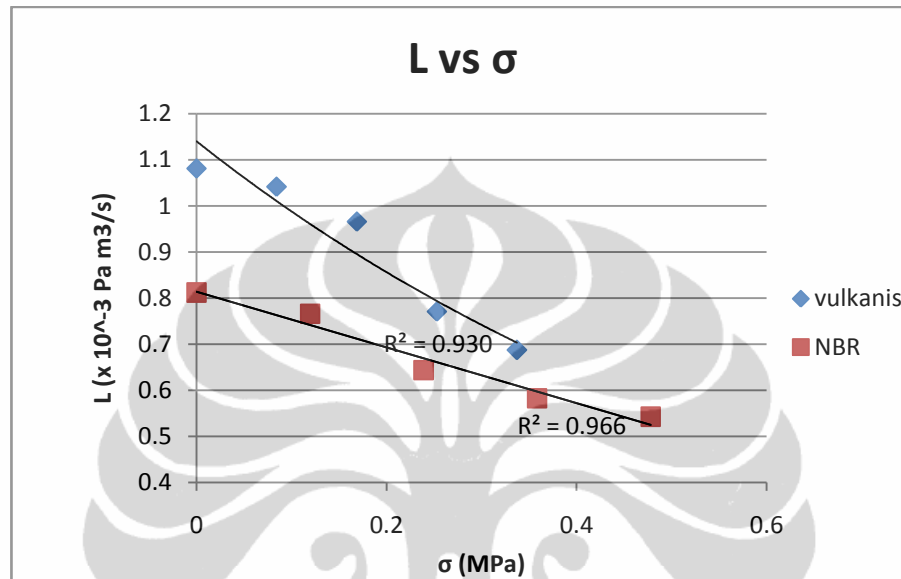




Gambar 4.7 Grafik Kebocoran Terhadap Beda Tekanan Seal Vulkanis a. 0 rotasi;
b.0.25 rotasi ; c. 0.5 rotasi; d 0.75 rotasi; e 1 rotasi

4.1.5 Laju Kebocoran (*Leakage*) Terhadap Penambahan *Compressive Stress*

Hal utama yang menjadi fokus penelitian ini adalah karakteristik penambahan kompresif *stress* terhadap laju kebocoran untuk kedua jenis seal seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.8



Gambar 4.8 Grafik Laju Kebocoran Terhadap Penambahan *Compressive Stress*

Seperti yang sudah dihipotesis sebelumnya bahwa penambahan *compressive stress* akan mengurangi laju kebocoran tabung gas LPG. Menurut persamaan 3.6 penambahan *compressive stress* seharusnya memiliki hubungan eksponensial terhadap laju kebocoran sudah sesuai dengan hasil eksperimen pada grafik ini dengan nilai R-square 0.93 dan 0.966. Grafik ini memperlihatkan secara umum penambahan *compressive stress* lebih besar pengaruhnya untuk *seal* vulkanis dibandingkan dengan NBR untuk nilai σ dari 0-3.5 kPa yang terlihat dari kemiringan grafik. Fenomena ini besar kecenderungan diakibatkan oleh propertis yang berbeda untuk kedua *seal* sesuai dengan persamaan 4.18

$$k = f_1(\sigma^{-m}), \quad r_i = f_2(\sigma^{-n}) \quad (4.18)$$

dimana f_1 dan f_2 merupakan fungsi yang bergantung pada jenis dan geometri material yang diberikan *stress* sebesar σ ^[15]. Perbedaan fungsi inilah yang menjadi kecenderungan berbedanya karakteristik dari laju kebocoran untuk kedua *seal* ketika

diberikan stress dari luar. Jumlah pori (k) dan radius pori (r) merupakan faktor yang menentukan laju aliran difusi sehingga ketika fungsi f_1 dan f_2 ya berbeda maka secara tidak langsung akan mempengaruhi pola aliran difusi yang akan tercermin dari nilai *leakage*.

Karet perapat vulkanis umumnya memiliki tingkat kebocoran yang lebih besar dibandingkan dengan seal NBR. Hal ini terutama terlihat pada saat kondisi tanpa penambahan *compressive stress* dimana terdapat perbedaan nilai tingkat kebocoran yang sangat besar antara kedua jenis seal. Seiring dengan penambahan *compressive stress* ternyata perbedaan tingkat kebocoran berangsur-angsur mengecil untuk kedua *seal* yang disebabkan oleh fungsi material seperti yang dijelaskan pada persamaan 4.18 diatas.

4.2 Analisis Numerikal

Analisis numerikal yang digunakan pada penelitian ini adalah analisis Finite Element Analysis untuk mengetahui dampak pembebanan terhadap kekuatan material dan analisis fenomena perpindahan melalui media berpori yang menggunakan *software* COMSOL 4.1.

4.2.1 Analisis Pembebanan Material

Analisis pembebanan material menggunakan perangkat lunak Solid Works 9 dengan metode *Finite Element Analysis (FEM)* untuk mengetahui pengaruh beban kerja terhadap karet perapat saat dioperasikan pada sistem bahan bakar LPG. Pembebanan yang menjadi input simulasi adalah sebagai berikut:

- Tekanan

Input tekanan yang diberikan adalah 6 bar sesuai dengan hasil eksperimen yang sudah dilakukan, dimana terlihat kisaran tekanan operasional dari LPG ini berada pada nilai itu.

- Gravitasi (berat)

Beban gravitasi yang tercermin dari gaya berat ini secara *default* bernilai 9.81 m/s^2 .

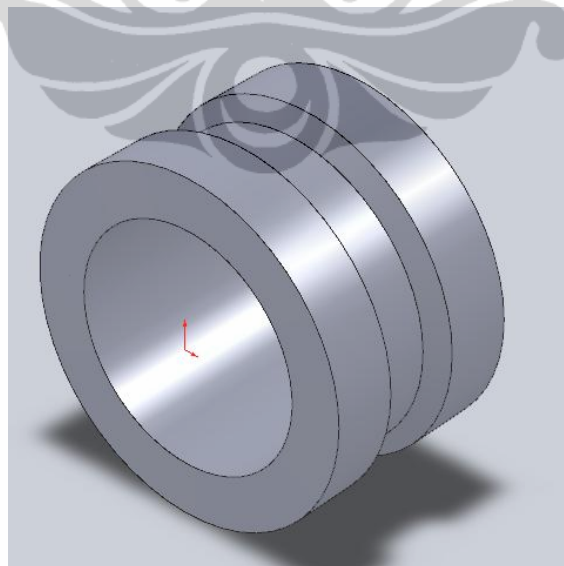
- Temperatur

Temperatur operasional yang digunakan adalah 20° C yang didasarkan pada tabel tekanan saturation 60% propana dan 40% butane.

Dalam Finite Element Analysis secara garis besar dibagi dalam 3 tahapan yaitu pembuatan geometri, pemberian fungsi keadaan (pembebanan, tumpuan dll), dan pemrosesan simulasi. Untuk mendapatkan hasil yang mendekati keadaan sebenarnya maka ketiga proses ini harus didasarkan pada data dan kondisi yang sebenarnya dari karet perapat. Berikut penjelasan secara singkat dari masing-masing proses dalam analisis FEM dalam penelitian ini.

- Pembuatan Geometri

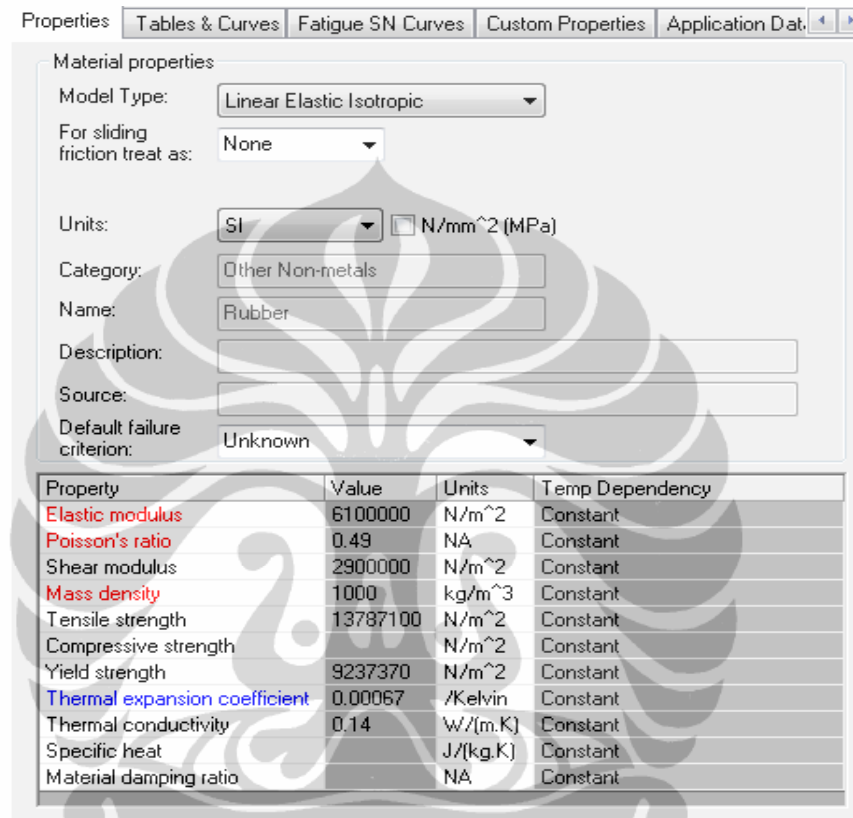
Geometri yang digunakan dalam simulasi *finite element* ini menggunakan data Standar Nasional Indonesia untuk Karet Perapat LPG. Hal ini didasarkan pada pertimbangan bahwa seal NBR dan seal Vulkanis memiliki sedikit perbedaan dalam hal geometri meskipun tidak signifikan sehingga data standar dirasa mampu menjadi jalan tengah untuk dijadikan parameter geometri dalam simulasi. Ukuran geometri SNI karet perapat dapat dilihat pada gambar 2.3 pada Bab 2. Geometri input pada solver Solid Works 9 dapat dilihat pada gambar 4.9.



Gambar 4.9 Geometri Seal Pada Simulasi

- Pemberian Fungsi Pembebanan

Pembebanan yang difokuskan pada simulasi ini adalah pembebanan statik yang diakibatkan oleh tekanan, suhu, dan gravitasi bumi. Material yang digunakan adalah rubber dengan properties sebagai berikut

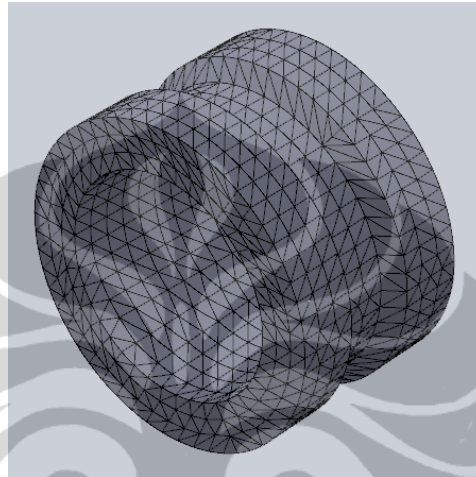


Gambar 4.10 Propertise Rubber dalam Simulasi

Fixture (tumpuan) yang digunakan dalam simulasi dibuat sedemikian sehingga merepresentasikan keadaan sebenarnya. *Fixture* yang digunakan adalah *fixed geometry* pada bagian alas, permukaan luar selimut seal (permukaan di daerah cekungan tidak diberi fixture mengingat memang tidak bersentuhan dengan bottle valve saat beroperasi), dan permukaan atas. Fixed geometry dipilih mengingat gaya yang diberikan oleh bottle valve kepada seal ini dapat dikategorikan sebagai fixed fixture (tumpuan tetap).

- Simulasi

Sebelum pada proses simulasi dilakukan meshing terlebih dahulu dengan kondisi yang sudah ditetapkan pada tahapan sebelumnya. Meshing yang digunakan adalah *triangle meshing* pada level *intermediate* seperti yang terlihat pada gambar 4.11

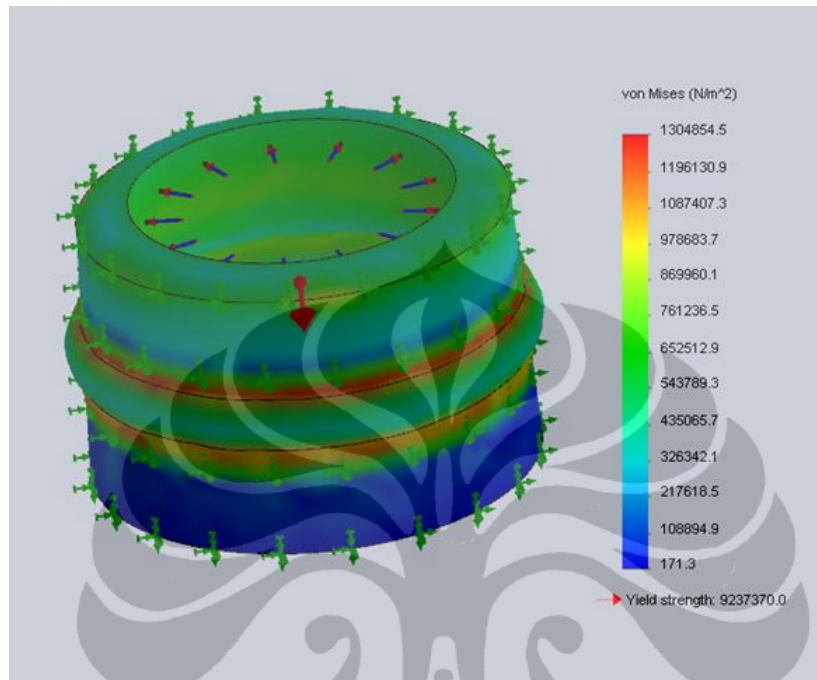


Gambar 4.11 Meshing Karet Perapat dalam Simulasi FEM

4.2.1.1 Analisis Von Mises Stress Karet Perapat LPG

Analisis stress yang digunakan adalah *Von Mises Stress Analysis* yang merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengetahui kekuatan bahan dalam pembebanan. Nilai maksimum tegangan Von Mises yang terjadi adalah sebesar 1304854.5 N/m^2 sedangkan nilai minimum berkisar 171.3 N/m^2 . Hal ini memberikan gambaran bahwa sebenarnya *seal* ini memiliki area (bagian) kerja yang tidak merata di setiap bagianya, sehingga sebenarnya optimaslisasi fungsi material bisa dilakukan pada bagian dengan wilayah pembebanan maksimum saja. Dari gambar akibat adanya pembebanan ini terjadi deformasi pada area tengah yang memiliki ketebalan yang lebih tipis dibandingkan dengan bagian karet perapat lainnya, sehingga sangat wajar apabila deformasi dan von mises stress terjadi pada daerah ini bernilai besar. Nilai von mises terendah berada pada daerah bawah dari *seal* hal ini disebabkan pada bagian bawah ini terdapat *fixture* berupa *fixed fixture* dimana dengan adanya *fixed fixture* ini menyebabkan adanya gaya dari *fixture* (dalam hal ini

adalah dasar *bottle valve*) terhadap alas bawah yang mengakibatkan pengurangan *stress* yang diterima oleh karet. Hal ini juga mengakibatkan adanya gradasi *stress* dari bawah ke atas yang terlihat pada permukaan luar dari karet.

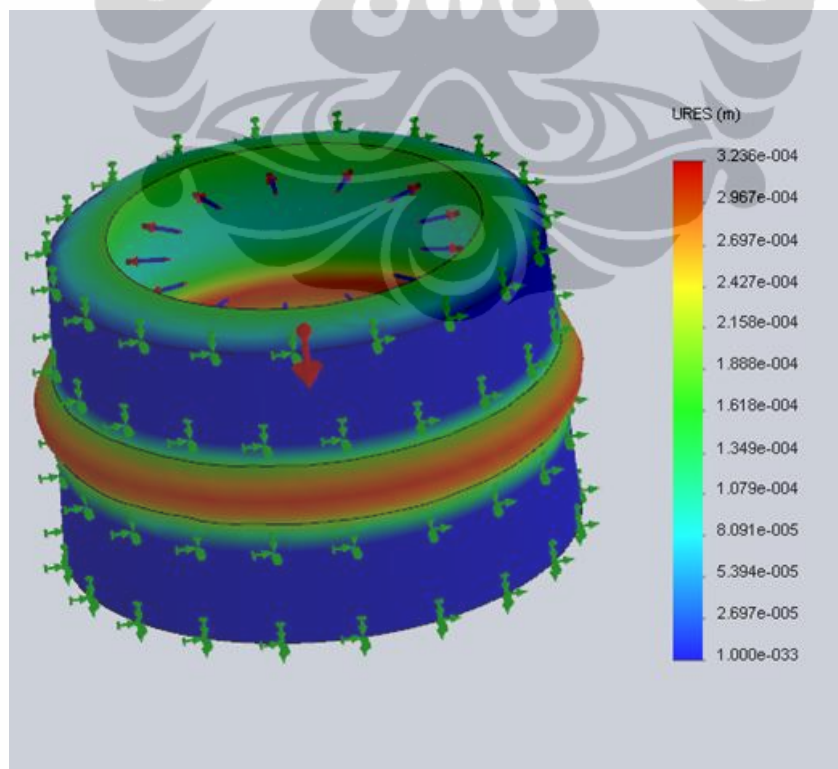


Gambar 4.12 Hasil Von Mises Stress dari FEM

Dari hasil von mises in terlihat bahwa nilai von mises maksimum lebih rendah dari *yield strength* dari *seal* ini. Perbandingan nilai *yield strength* terhadap nilai *von mises* maksimum dikenal dengan nama *Factor of Safety (FOS)* yang dalam kasus ini bernilai 7.08. Nilai FOS dalam kasus ini cukup besar yang berarti energi yang terdistorsi saat pembebanan belum mampu (sulit) untuk menyebabkan material karet perapat ini mengalami deformasi plastis sehingga dapat dikatakan deformasi yang terjadi masih berada pada daerah elastisnya. Hal ini cukup beralasan mengingat material yang digunakan dalam karet perapat ini adalah jenis rubber yang memiliki modulus elastisitas yang sangat baik. Dengan kata lain apabila penggunaan karet perapat ini baik saat pemasangan dan pelepasan dari katup regulator dilakukan dengan baik maka sebenarnya karet ini masih bisa digunakan lebih dari 1 tabung LPG.

4.2.1.2 Analisis Defleksi Karet Perapat LPG

Defleksi yang terjadi pada karet perapat akibat adanya pembebanan ini bernilai maksimum sebesar 0.3236 mm dan minimum yang nilainya mendekati 0. Maksimum defleksi terjadi pada daerah tengah dimana terdapat adanya pengurangan cekungan sehingga adanya pengurangan ketebalan karet yang mengakibatkan elastisitas pada daerah ini lebih besar dibandingkan daerah lainya. Daerah minimum defleksi terjadi pada permukaan bawah dan luar dari karet. Hal ini disebabkan pada daerah ini terdapat *fixed fixture* yang berasal dari dinding *valve regulator* LPG sehingga nilai defleksi bernilai mendekati 0 sangat logis. Defleksi yang terjadi juga mengalami gradasi sepanjang ketebalan karet, dimana terlihat defleksi akan berkurang dari diameter dalam karet menuju diameter luar. Seperti yang dijelaskan pada bagian analisis von mises bahwa nilai FOS yang tinggi menegaskan bahwa defleksi yang terjadi pada karet ini bersifat elastic dan bukan plastis dimana perubahan geometri tidak bersifat permanen.



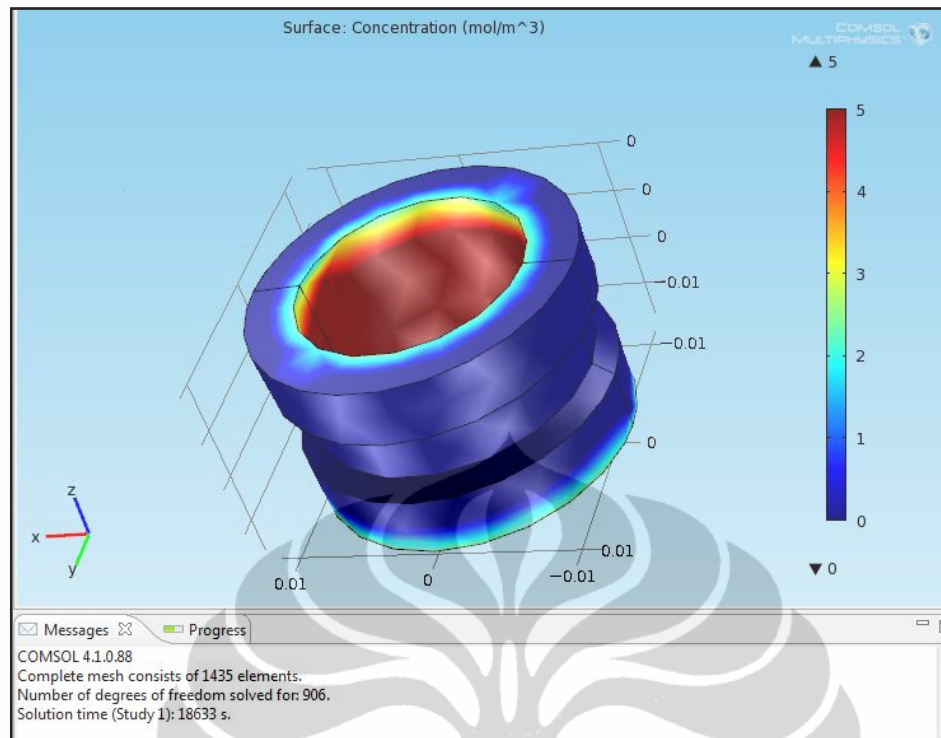
Gambar 4.13 Hasil Defleksi Seal dari simulasi FEM

Mengingat fungsi karet perapat sebagai *sealing* maka parameter defleksi menjadi sangat penting untuk menghindari terjadinya kebocoran. Mengingat defleksi yang terjadi pada bagian permukaan atas sebesar 0.188 mm maka kemungkinan hal ini menjadi salah satu penyebab adanya kebocoran gas.

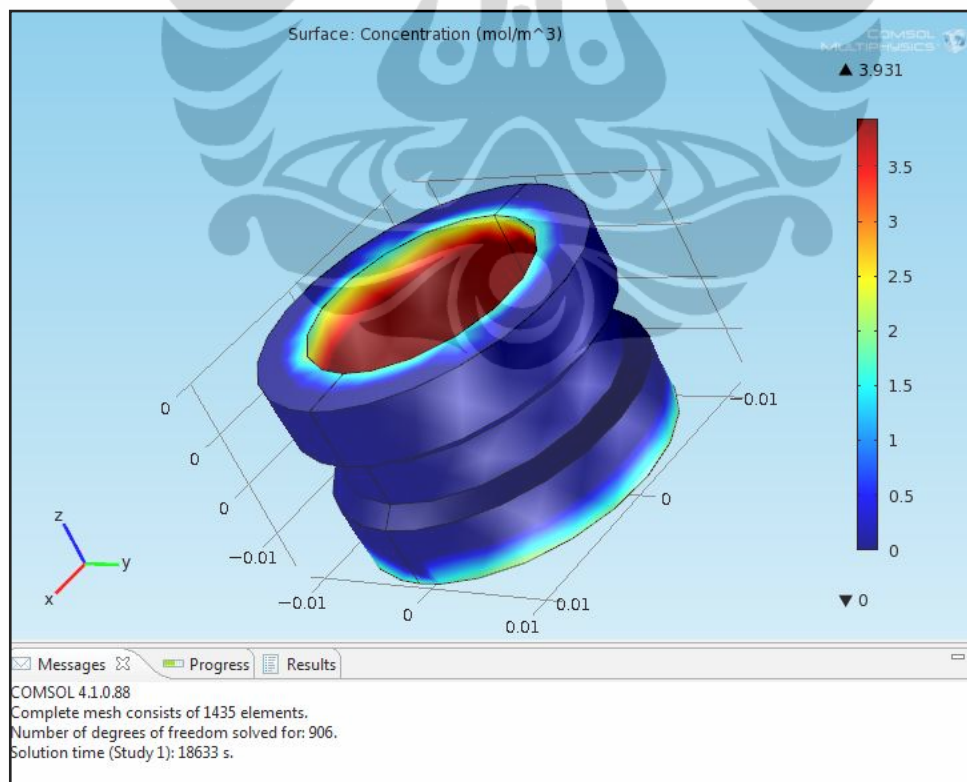
4.2.2 Analisis Perpindahan Melalui Media Berpori

Dari hasil simulasi menggunakan COMSOL 4.1 untuk fenomena perpindahan pada karet perapat dibatasi dengan perpindahan massa dan perpindahan momentum. Dalam simulasi ini karet perapat dinyatakan sebagai material berpori yang homogen yaitu material dengan jumlah dan diameter pori yang seragam untuk keseluruhan bagian. Berikut beberapa input penting dalam simulasi

- Tekanan yang digunakan dalam simulasi adalah 6 bar
- Material yang digunakan adalah NBR
- Komposisi input berupa 60% propana (C_3H_8) dan 40% butana (C_4H_{10}) yang apabila dinyatakan dalam konsentrasi sekitar 5 mol/m^3 dan 3 mol/m^3 untuk propana dan butana.
- Input dianggap bernilai konstan dengan nilai konsentrasi selalu tetap.



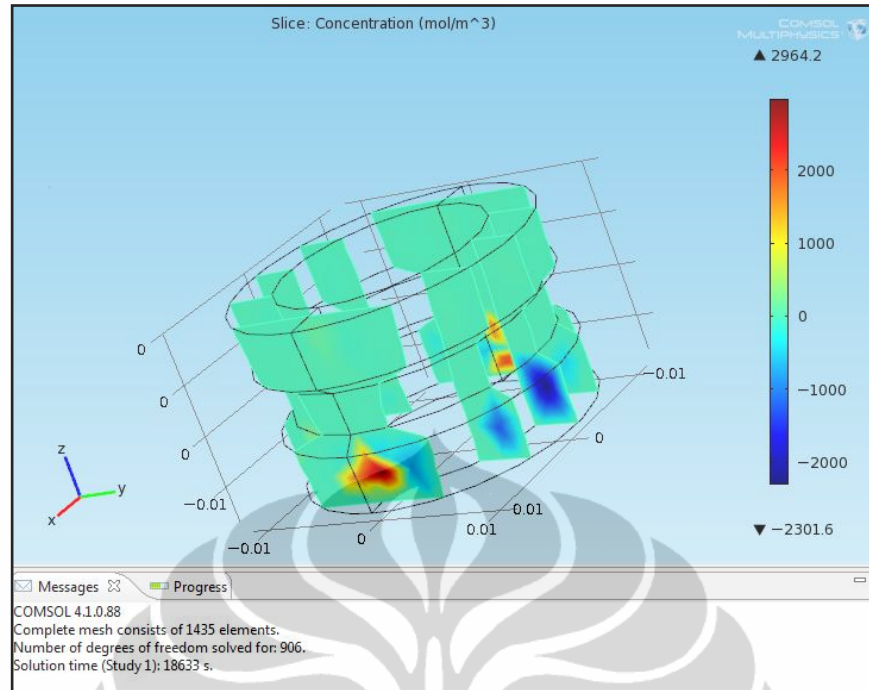
Gambar 4.14 Pola Aliran Difusi Propana pada Karet Perapat



Gambar 4.15 Pola Aliran Difusi Butana pada Karet Perapat

Gambar 4.14 dan 4.15 menunjukkan pola aliran difusi yang terjadi pada karet perapat pada saat dioperasikan dalam sistem bahan bakar LPG. Dari gambar 4.14 dan 4.15 terlihat adanya aliran difusi dari propana dan butana melalui material seal dengan range nilai konsentrasi mulai dari 0 sampai batas maksimum masing-masing konsentrasi yaitu 5 mol/m^3 untuk propana dan 3 mol/m^3 untuk butana. Pada karet perapat terlihat bahwa bagian dalam dan alas dari karet perapat berwarna lebih merah dibandingkan bagian lainnya mengingat pada bagian ini merupakan area kontak dari gas dengan seal. Berdasarkan analisis FEM pada pembahasan sebelumnya diketahui bahwa terdapat defleksi yang terjadi pada seal saat pembebanan berlangsung yang mengakibatkan adanya celah pada bagian tengah yang mengakibatkan gas bisa melalui bagian ini. Hal inilah yang menjadi pertimbangan saat memasukkan input area kontak gas dengan karet perapat pada COMSOL 4.1. Perpindahan konsentrasi terjadi karena adanya perbedaan potensial konsentrasi atau sering disebut sebagai *driving force* dari konsentrasi tinggi menuju konsentrasi rendah yang dalam hal ini perpindahan dari gas LPG menuju ke karet perapat yang sering disebut sebagai perpindahan molekular. Dalam kasus ini kecenderungan besar ada pula kontribusi dari perpindahan konvektif mengingat gas memiliki kecepatan saat dioperasikan sehingga difusi melalui media gas (konvektif) bisa terjadi.

Gambar 4.13 menunjukkan pola aliran difusi sepanjang ketebalan dari seal. Terlihat untuk difusi gas propana memiliki pola gradasi konsentrasi dari material sesuai dengan jaraknya terhadap area kontak difusi. Semakin dekat dengan area kontak difusi maka konsentrasi difusi yang terjadi semakin besar dan sebaliknya. Hal yang sama juga terjadi pada pola aliran butana.



Gambar 4.16 Aliran Difusi Propana pada Potongan Penampang Seal

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis baik berupa hasil eksperimental maupun analisis numerik dalam penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Karakteristik laju kebocoran (*leakage*) sistem bahan bakar LPG dengan tekanan 6 bar diformulasikan sebagai berikut:
 - *seal* NBR $L = \left[1.19 \times 10^{-21} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-0.248} P_m \right] \frac{P_1 - P_2}{l}$
 - *seal* Vulkanis $L = \left[1.28 \times 10^{-21} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{-0.305} P_m \right] \frac{P_1 - P_2}{l}$
- Penambahan *compressive stress* pada seal LPG berbanding lurus dengan penurunan laju kebocoran, dimana dalam penelitian ini penurunan laju kebocoran bisa mencapai 36,43% untuk *seal* Vulkanis dan 33.18% untuk *seal* NBR
- Dampak penambahan *compressive stress* terhadap pengurangan laju kebocoran pada *seal* Vulkanis lebih sensitif dibanding NBR yang direpresentasikan melalui nilai A_L dan n_L *seal* Vulkanis yang lebih besar dibanding dengan *seal* NBR.
- Laju kebocoran untuk *seal* Vulkanis dan NBR berbanding lurus dengan selisih tekanan dalam dan luar tabung jika nilai *gasket seating stress seal* lebih besar dibanding dengan *compressive stress* yang diberikan.
- Beban tegangan (*Von mises stress*) yang diterima oleh *seal* masih dibawah nilai *yield strength* dari material jenis karet dengan nilai *Factor of Safety (FOS)* mencapai 7.08 dari hasil simulasi *Finite Element Analysis*
- Defleksi yang terjadi pada seal adalah deformasi elastic dengan defleksi maksimum terjadi pada area cekungan di bagian tengah seal sebesar 0.326 mm dan terendah pada area yang bersentuhan dengan penyangga atau dinding.

- Aliran difusi yang terjadi pada seal membentuk gradasi konsentrasi dari dinding dalam menuju dinding luar seal sesuai kedekatan dengan permukaan kontak difusinya.

5.2 Saran

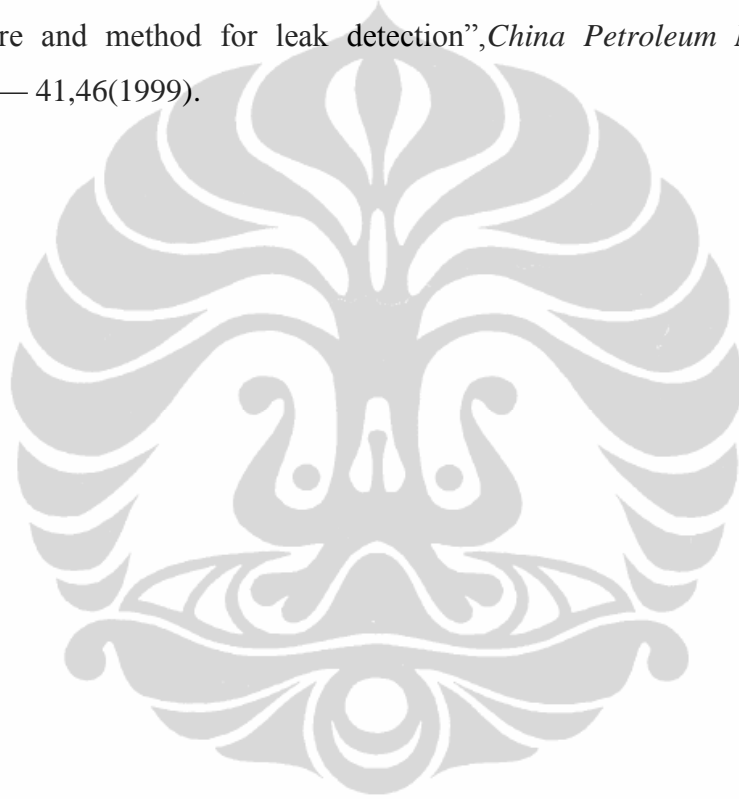
Saran yang penulis bisa berikan untuk penelitian ini adalah

- Penggunaan alat yang dengan tingkat ketelitian yang lebih baik khususnya untuk pengukur tekanan untuk dapat memetakan pola perubahan secara akurat.
- Mengadakan uji *sample* material seal untuk dapat memasukan parameter yang lebih tepat dalam menjalankan simulasi numerik

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Esdm (2011, Februari 01). *Artikel*. Januari 2, 2012. <http://www.esdm.go.id/berita/artikel/56-artikel/4122>
- [2] Birk, A.M., *The BLEVE: An Update and Reexamination of Response Strategies*, www.springerlink.com
- [3] Kusumaputra, R Adhi (2009,Oktober 6). *Listrik dan Kompor, Penyebab Kebakaran Utama Rumah Tangga*. Desember 29,2011. <http://properti.kompas.com/read/2009/10/06/18401431>.
- [4] Septiadevana,Riski. *Komposisi Penyusun Minyak Bumi dan Gas Alam*. Desember30,2011. http://kimia.upi.edu/utama/bahanajar/kuliah_web/2008/Riski%20Septiadevana%200606249_IE6.0/halaman_9.html
- [5] Satria, Arief (2008).*Perspektif Baru Pembangunan untuk Menanggulangi Krisis Pangan dan Energi*. Desember 30 2011.Institute Pertanian Bogor. <http://rks.ipb.ac.id>
- [6] Bab II Landasan Teori.(n.d). Desember 30,2011. <http://repository.upi.edu>
- [7] Badan Standardisasi Nasional (2007).SNI 1452:2007 Tabung Baja. Jakarta.
- [8] Badan Standardisasi Nasional (2008).SNI 7369:2008 Regulator Tekanan Rendah. Jakarta.
- [9] Badan Standardisasi Nasional (2010).SNI 7655:2010 Karet Perapat Tabung. Jakarta.
- [10] Badan Standardisasi Nasional (2008).SNI 1591:2008 Katup Tabung. Jakarta.
- [11] Serope Kalpakjian and Steven R. Schmid. *Manufacturing Engineering and Technology*, 4th ed., Prentice-Hall Int., New Jersey, 2001.

- [12] Robert H. Wagoner and Jean-Loup Chenot. *Fundamentals of Metal Forming*, John Wiley and Sons Inc., New York, 1996.
- [13] Huebner, Kenneth H dan Earl A. Thornton. 1982. *The Finite Element Method For Engineer*. Norfolk, Virginia : John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Gu, B. *et al.* (2007) ‘Prediction of Leakage Rate Through Sealing Connections with Non Metallic Gaskets’, *J.Chem. Eng.*, Vol. 15, No. 6, pp.837-841.
- [15] Gu, B.Q., Lu, X.F., “Test machine for gasket performancesat elevated temperature and method for leak detection”,*China Petroleum Machinery*, **27**(1), 39 — 41,46(1999).



LAMPIRAN

1. Tabel Ekstrapolasi Data Massa Seal NBR

t(s)	m(gr)				
	0	0.25	0.5	0.75	1
0	8424.548	8457.318	8456.819	8764.852	8763.471
5	8437.127	8469.093	8466.08	8773.077	8770.997
10	8436.937	8468.91	8465.888	8772.882	8770.784
15	8436.75	8468.73	8465.699	8772.692	8770.577
20	8436.565	8468.553	8465.514	8772.506	8770.377
25	8436.383	8468.379	8465.333	8772.325	8770.182
30	8436.204	8468.207	8465.155	8772.148	8769.992
35	8436.027	8468.038	8464.982	8771.976	8769.808
40	8435.854	8467.871	8464.812	8771.807	8769.629
45	8435.683	8467.708	8464.645	8771.642	8769.455
50	8435.514	8467.546	8464.482	8771.482	8769.286
55	8435.348	8467.387	8464.322	8771.325	8769.122
60	8435.185	8467.231	8464.166	8771.172	8768.962
65	8435.024	8467.077	8464.013	8771.022	8768.807
70	8434.865	8466.926	8463.863	8770.876	8768.656
75	8434.709	8466.776	8463.716	8770.734	8768.51
80	8434.555	8466.629	8463.573	8770.594	8768.368
85	8434.404	8466.485	8463.432	8770.458	8768.229
90	8434.255	8466.343	8463.294	8770.326	8768.095
95	8434.108	8466.202	8463.159	8770.196	8767.964
100	8433.963	8466.064	8463.027	8770.07	8767.837
105	8433.821	8465.929	8462.898	8769.946	8767.714
110	8433.68	8465.795	8462.771	8769.826	8767.594
115	8433.542	8465.663	8462.647	8769.708	8767.478
120	8433.406	8465.534	8462.526	8769.593	8767.365
125	8433.272	8465.406	8462.407	8769.481	8767.255
130	8433.14	8465.28	8462.291	8769.371	8767.148
135	8433.01	8465.157	8462.177	8769.264	8767.044
140	8432.882	8465.035	8462.065	8769.16	8766.943
145	8432.756	8464.915	8461.956	8769.058	8766.845
150	8432.631	8464.797	8461.849	8768.958	8766.75
155	8432.509	8464.681	8461.744	8768.861	8766.657
160	8432.389	8464.567	8461.641	8768.766	8766.567
165	8432.27	8464.454	8461.541	8768.674	8766.48
170	8432.153	8464.343	8461.443	8768.583	8766.395

175	8432.038	8464.234	8461.346	8768.495	8766.312
180	8431.925	8464.127	8461.252	8768.409	8766.232
185	8431.813	8464.021	8461.16	8768.325	8766.154
190	8431.703	8463.917	8461.069	8768.242	8766.078
195	8431.595	8463.815	8460.981	8768.162	8766.004
200	8431.488	8463.714	8460.894	8768.084	8765.933
205	8431.383	8463.614	8460.809	8768.007	8765.863
210	8431.28	8463.517	8460.726	8767.933	8765.796
215	8431.178	8463.42	8460.645	8767.86	8765.73
220	8431.077	8463.326	8460.565	8767.789	8765.666
225	8430.978	8463.232	8460.487	8767.719	8765.604
230	8430.881	8463.14	8460.41	8767.651	8765.544
235	8430.785	8463.05	8460.336	8767.585	8765.485
240	8430.691	8462.961	8460.262	8767.52	8765.429
245	8430.598	8462.873	8460.191	8767.457	8765.373
250	8430.506	8462.787	8460.12	8767.395	8765.319
255	8430.416	8462.702	8460.052	8767.335	8765.267
260	8430.327	8462.619	8459.984	8767.277	8765.217
265	8430.24	8462.536	8459.918	8767.219	8765.167
270	8430.154	8462.455	8459.854	8767.163	8765.119
275	8430.069	8462.376	8459.791	8767.108	8765.073
280	8429.985	8462.297	8459.729	8767.055	8765.028
285	8429.903	8462.22	8459.668	8767.003	8764.984
290	8429.822	8462.144	8459.609	8766.952	8764.941
295	8429.742	8462.069	8459.551	8766.902	8764.899
300	8429.664	8461.995	8459.494	8766.854	8764.859
305	8429.586	8461.922	8459.438	8766.806	8764.82
310	8429.51	8461.851	8459.383	8766.76	8764.782
315	8429.435	8461.78	8459.33	8766.715	8764.745
320	8429.361	8461.711	8459.278	8766.671	8764.709
325	8429.288	8461.643	8459.226	8766.628	8764.674
330	8429.216	8461.576	8459.176	8766.586	8764.64
335	8429.146	8461.51	8459.127	8766.545	8764.607
340	8429.076	8461.444	8459.079	8766.505	8764.575
345	8429.008	8461.38	8459.032	8766.466	8764.543
350	8428.94	8461.317	8458.986	8766.427	8764.513
355	8428.874	8461.255	8458.941	8766.39	8764.484
360	8428.808	8461.194	8458.897	8766.354	8764.455
365	8428.744	8461.134	8458.853	8766.318	8764.427
370	8428.68	8461.075	8458.811	8766.283	8764.4
375	8428.618	8461.016	8458.769	8766.25	8764.374
380	8428.556	8460.959	8458.729	8766.216	8764.349
385	8428.495	8460.902	8458.689	8766.184	8764.324

390	8428.436	8460.847	8458.65	8766.153	8764.3
395	8428.377	8460.792	8458.612	8766.122	8764.276
400	8428.319	8460.738	8458.575	8766.092	8764.253
405	8428.262	8460.685	8458.538	8766.062	8764.231
410	8428.205	8460.632	8458.502	8766.034	8764.21
415	8428.15	8460.581	8458.467	8766.006	8764.189
420	8428.096	8460.53	8458.433	8765.979	8764.169
425	8428.042	8460.48	8458.399	8765.952	8764.149
430	8427.989	8460.431	8458.366	8765.926	8764.13
435	8427.937	8460.383	8458.334	8765.9	8764.111
440	8427.886	8460.335	8458.302	8765.876	8764.093
445	8427.835	8460.289	8458.272	8765.851	8764.076
450	8427.785	8460.242	8458.241	8765.828	8764.058
455	8427.736	8460.197	8458.212	8765.805	8764.042
460	8427.688	8460.152	8458.183	8765.782	8764.026
465	8427.641	8460.108	8458.154	8765.76	8764.01
470	8427.594	8460.065	8458.126	8765.739	8763.995
475	8427.548	8460.022	8458.099	8765.718	8763.98
480	8427.502	8459.98	8458.073	8765.697	8763.966
485	8427.458	8459.939	8458.046	8765.677	8763.952
490	8427.414	8459.898	8458.021	8765.658	8763.938
495	8427.37	8459.858	8457.996	8765.638	8763.925
500	8427.327	8459.819	8457.971	8765.62	8763.912
505	8427.285	8459.78	8457.947	8765.602	8763.9
510	8427.244	8459.742	8457.924	8765.584	8763.888
515	8427.203	8459.704	8457.901	8765.567	8763.876
520	8427.163	8459.667	8457.878	8765.55	8763.864
525	8427.123	8459.63	8457.856	8765.533	8763.853
530	8427.084	8459.595	8457.835	8765.517	8763.842
535	8427.046	8459.559	8457.813	8765.501	8763.832
540	8427.008	8459.524	8457.793	8765.486	8763.822
545	8426.971	8459.49	8457.772	8765.471	8763.812
550	8426.934	8459.456	8457.752	8765.456	8763.802
555	8426.898	8459.423	8457.733	8765.442	8763.793
560	8426.863	8459.39	8457.714	8765.428	8763.784
565	8426.828	8459.358	8457.695	8765.414	8763.775
570	8426.793	8459.327	8457.677	8765.401	8763.766
575	8426.759	8459.295	8457.659	8765.388	8763.758
580	8426.726	8459.265	8457.642	8765.375	8763.75
585	8426.693	8459.234	8457.625	8765.363	8763.742
590	8426.66	8459.205	8457.608	8765.351	8763.734
595	8426.628	8459.175	8457.591	8765.339	8763.727
600	8426.597	8459.147	8457.575	8765.328	8763.72

605	8426.566	8459.118	8457.559	8765.316	8763.713
610	8426.535	8459.09	8457.544	8765.305	8763.706
615	8426.505	8459.063	8457.529	8765.295	8763.699
620	8426.476	8459.036	8457.514	8765.284	8763.693
625	8426.446	8459.009	8457.5	8765.274	8763.686
630	8426.418	8458.983	8457.485	8765.264	8763.68
635	8426.389	8458.957	8457.472	8765.254	8763.674
640	8426.361	8458.931	8457.458	8765.245	8763.669
645	8426.334	8458.906	8457.445	8765.235	8763.663
650	8426.307	8458.882	8457.432	8765.226	8763.658
655	8426.28	8458.857	8457.419	8765.217	8763.652
660	8426.254	8458.833	8457.406	8765.209	8763.647
665	8426.228	8458.81	8457.394	8765.2	8763.642
670	8426.203	8458.787	8457.382	8765.192	8763.637
675	8426.178	8458.764	8457.37	8765.184	8763.633
680	8426.153	8458.741	8457.359	8765.176	8763.628
685	8426.129	8458.719	8457.348	8765.168	8763.624
690	8426.105	8458.698	8457.337	8765.161	8763.619
695	8426.081	8458.676	8457.326	8765.154	8763.615
700	8426.058	8458.655	8457.315	8765.146	8763.611
705	8426.035	8458.634	8457.305	8765.14	8763.607
710	8426.013	8458.614	8457.295	8765.133	8763.603
715	8425.991	8458.594	8457.285	8765.126	8763.6
720	8425.969	8458.574	8457.275	8765.12	8763.596



2. Tabel Ekstrapolasi Data Massa Seal Vulkanis

t(s)	m(gr)				
	0	0.25	0.5	0.75	1
0	8539.689	8525.104	8395.393	8389.046	8450.334
5	8554.619	8539.946	8410.024	8400.026	8459.993
10	8554.172	8539.617	8409.784	8399.782	8459.755
15	8553.739	8539.295	8409.548	8399.544	8459.524
20	8553.318	8538.98	8409.315	8399.311	8459.298
25	8552.91	8538.672	8409.087	8399.083	8459.077
30	8552.514	8538.37	8408.862	8398.86	8458.862
35	8552.13	8538.076	8408.641	8398.642	8458.653
40	8551.757	8537.788	8408.424	8398.429	8458.448
45	8551.396	8537.506	8408.21	8398.221	8458.248
50	8551.045	8537.231	8407.999	8398.017	8458.054
55	8550.705	8536.962	8407.792	8397.818	8457.864
60	8550.376	8536.699	8407.589	8397.623	8457.679
65	8550.056	8536.441	8407.389	8397.433	8457.498
70	8549.745	8536.189	8407.192	8397.246	8457.322
75	8549.444	8535.943	8406.998	8397.064	8457.15
80	8549.152	8535.703	8406.808	8396.886	8456.983
85	8548.869	8535.467	8406.62	8396.712	8456.819
90	8548.594	8535.237	8406.436	8396.542	8456.66
95	8548.327	8535.012	8406.255	8396.376	8456.504
100	8548.068	8534.793	8406.076	8396.213	8456.352
105	8547.818	8534.577	8405.901	8396.054	8456.204
110	8547.574	8534.367	8405.729	8395.898	8456.06
115	8547.338	8534.162	8405.559	8395.746	8455.919
120	8547.109	8533.96	8405.392	8395.597	8455.782
125	8546.887	8533.764	8405.228	8395.452	8455.648
130	8546.671	8533.572	8405.067	8395.31	8455.517
135	8546.462	8533.384	8404.908	8395.171	8455.39
140	8546.259	8533.2	8404.752	8395.035	8455.265
145	8546.063	8533.02	8404.598	8394.902	8455.144
150	8545.872	8532.844	8404.447	8394.772	8455.026
155	8545.687	8532.673	8404.298	8394.645	8454.91
160	8545.507	8532.505	8404.152	8394.52	8454.798
165	8545.333	8532.34	8404.008	8394.399	8454.688
170	8545.164	8532.18	8403.867	8394.28	8454.581
175	8545	8532.023	8403.728	8394.164	8454.477

180	8544.841	8531.869	8403.591	8394.05	8454.375
185	8544.687	8531.719	8403.456	8393.939	8454.275
190	8544.537	8531.572	8403.324	8393.83	8454.178
195	8544.392	8531.428	8403.194	8393.724	8454.084
200	8544.251	8531.288	8403.066	8393.62	8453.992
205	8544.115	8531.151	8402.94	8393.519	8453.902
210	8543.982	8531.017	8402.816	8393.419	8453.814
215	8543.853	8530.885	8402.694	8393.322	8453.728
220	8543.729	8530.757	8402.574	8393.227	8453.645
225	8543.608	8530.631	8402.456	8393.135	8453.563
230	8543.49	8530.509	8402.341	8393.044	8453.484
235	8543.377	8530.389	8402.226	8392.955	8453.407
240	8543.266	8530.271	8402.114	8392.868	8453.331
245	8543.159	8530.157	8402.004	8392.783	8453.257
250	8543.055	8530.045	8401.895	8392.7	8453.185
255	8542.954	8529.935	8401.789	8392.619	8453.115
260	8542.857	8529.828	8401.684	8392.54	8453.047
265	8542.762	8529.723	8401.58	8392.462	8452.98
270	8542.67	8529.62	8401.479	8392.387	8452.915
275	8542.581	8529.52	8401.379	8392.312	8452.852
280	8542.494	8529.422	8401.281	8392.24	8452.79
285	8542.41	8529.326	8401.184	8392.169	8452.729
290	8542.328	8529.232	8401.089	8392.1	8452.67
295	8542.249	8529.141	8400.996	8392.032	8452.613
300	8542.173	8529.051	8400.904	8391.966	8452.557
305	8542.098	8528.964	8400.813	8391.901	8452.502
310	8542.026	8528.878	8400.724	8391.837	8452.449
315	8541.956	8528.794	8400.637	8391.775	8452.397
320	8541.888	8528.712	8400.551	8391.715	8452.346
325	8541.823	8528.632	8400.466	8391.655	8452.297
330	8541.759	8528.554	8400.383	8391.598	8452.248
335	8541.697	8528.477	8400.301	8391.541	8452.201
340	8541.637	8528.402	8400.22	8391.486	8452.155
345	8541.578	8528.329	8400.141	8391.431	8452.111
350	8541.522	8528.258	8400.063	8391.378	8452.067
355	8541.467	8528.188	8399.986	8391.327	8452.024
360	8541.414	8528.119	8399.911	8391.276	8451.983
365	8541.362	8528.052	8399.837	8391.226	8451.942
370	8541.312	8527.987	8399.764	8391.178	8451.903
375	8541.263	8527.923	8399.692	8391.131	8451.864
380	8541.216	8527.86	8399.622	8391.084	8451.827
385	8541.17	8527.799	8399.552	8391.039	8451.79
390	8541.126	8527.739	8399.484	8390.995	8451.754

395	8541.083	8527.681	8399.417	8390.952	8451.719
400	8541.041	8527.624	8399.351	8390.909	8451.685
405	8541.001	8527.568	8399.286	8390.868	8451.652
410	8540.962	8527.513	8399.222	8390.827	8451.619
415	8540.923	8527.459	8399.159	8390.788	8451.588
420	8540.886	8527.407	8399.097	8390.749	8451.557
425	8540.851	8527.356	8399.036	8390.711	8451.527
430	8540.816	8527.306	8398.977	8390.674	8451.498
435	8540.782	8527.257	8398.918	8390.638	8451.469
440	8540.749	8527.209	8398.86	8390.603	8451.441
445	8540.718	8527.163	8398.803	8390.568	8451.414
450	8540.687	8527.117	8398.747	8390.535	8451.387
455	8540.657	8527.072	8398.692	8390.502	8451.361
460	8540.628	8527.029	8398.638	8390.469	8451.336
465	8540.6	8526.986	8398.584	8390.438	8451.311
470	8540.573	8526.944	8398.532	8390.407	8451.287
475	8540.546	8526.903	8398.481	8390.376	8451.264
480	8540.52	8526.863	8398.43	8390.347	8451.241
485	8540.496	8526.824	8398.38	8390.318	8451.219
490	8540.471	8526.786	8398.331	8390.29	8451.197
495	8540.448	8526.749	8398.283	8390.262	8451.176
500	8540.425	8526.712	8398.235	8390.235	8451.155
505	8540.403	8526.677	8398.189	8390.209	8451.135
510	8540.382	8526.642	8398.143	8390.183	8451.115
515	8540.361	8526.608	8398.098	8390.158	8451.096
520	8540.341	8526.574	8398.053	8390.133	8451.077
525	8540.321	8526.542	8398.01	8390.109	8451.059
530	8540.302	8526.51	8397.967	8390.085	8451.041
535	8540.284	8526.478	8397.924	8390.062	8451.024
540	8540.266	8526.448	8397.883	8390.04	8451.007
545	8540.249	8526.418	8397.842	8390.018	8450.99
550	8540.232	8526.389	8397.802	8389.996	8450.974
555	8540.216	8526.36	8397.762	8389.975	8450.958
560	8540.2	8526.333	8397.723	8389.954	8450.943
565	8540.185	8526.305	8397.685	8389.934	8450.928
570	8540.17	8526.279	8397.647	8389.914	8450.914
575	8540.156	8526.253	8397.61	8389.895	8450.899
580	8540.142	8526.227	8397.574	8389.876	8450.885
585	8540.128	8526.202	8397.538	8389.858	8450.872
590	8540.115	8526.178	8397.503	8389.84	8450.859
595	8540.102	8526.154	8397.468	8389.822	8450.846
600	8540.09	8526.131	8397.434	8389.805	8450.833
605	8540.078	8526.108	8397.401	8389.788	8450.821

610	8540.066	8526.086	8397.368	8389.772	8450.809
615	8540.055	8526.064	8397.335	8389.755	8450.797
620	8540.044	8526.043	8397.304	8389.74	8450.786
625	8540.033	8526.022	8397.272	8389.724	8450.775
630	8540.023	8526.001	8397.241	8389.709	8450.764
635	8540.013	8525.981	8397.211	8389.694	8450.753
640	8540.003	8525.962	8397.181	8389.68	8450.743
645	8539.994	8525.943	8397.152	8389.666	8450.733
650	8539.985	8525.924	8397.123	8389.652	8450.723
655	8539.976	8525.906	8397.095	8389.639	8450.714
660	8539.967	8525.888	8397.067	8389.626	8450.704
665	8539.959	8525.871	8397.039	8389.613	8450.695
670	8539.951	8525.854	8397.012	8389.6	8450.686
675	8539.943	8525.837	8396.986	8389.588	8450.678
680	8539.935	8525.821	8396.959	8389.576	8450.669
685	8539.928	8525.805	8396.934	8389.564	8450.661
690	8539.921	8525.79	8396.908	8389.552	8450.653
695	8539.914	8525.774	8396.883	8389.541	8450.645
700	8539.907	8525.759	8396.859	8389.53	8450.637
705	8539.901	8525.745	8396.835	8389.519	8450.63
710	8539.894	8525.731	8396.811	8389.509	8450.623
715	8539.888	8525.717	8396.788	8389.499	8450.616
720	8539.882	8525.703	8396.765	8389.489	8450.609

3. Tabel Ekstrapolasi Data Tekanan Seal NBR

t(s)	P (bar)				
	0	0.25	0.5	0.75	1
0	6.00042	6.000011	5.9978	5.856	5.8002
5	6.04808531	6.0451324	6.03765457	5.8915088	5.8357088
10	6.04532971	6.04252386	6.03535051	5.8894559	5.8336559
15	6.0427334	6.04006613	6.03317966	5.8875218	5.8317218
20	6.0402872	6.03775048	6.03113431	5.8856995	5.8298995
25	6.03798241	6.0355687	6.0292072	5.8839825	5.8281825
30	6.03581087	6.03351305	6.0273915	5.8823648	5.8265648
35	6.03376487	6.03157625	6.02568077	5.8808406	5.8250406
40	6.03183715	6.02975141	6.02406894	5.8794045	5.8236045
45	6.03002088	6.02803207	6.02255029	5.8780515	5.8222515
50	6.0283096	6.02641213	6.02111943	5.8767766	5.8209766
55	6.02669726	6.02488584	6.0197713	5.8755755	5.8197755
60	6.02517813	6.02344778	6.01850111	5.8744438	5.8186438
65	6.02374682	6.02209287	6.01730434	5.8733776	5.8175776
70	6.02239826	6.02081628	6.01617676	5.8723729	5.8165729
75	6.02112767	6.01961349	6.01511438	5.8714264	5.8156264
80	6.01993052	6.01848024	6.0141134	5.8705346	5.8147346
85	6.01880259	6.01741251	6.0131703	5.8696943	5.8138943
90	6.01773986	6.0164065	6.01228172	5.8689026	5.8131026
95	6.01673857	6.01545865	6.01144451	5.8681567	5.8123567
100	6.01579517	6.01456559	6.0106557	5.8674539	5.8116539
105	6.01490631	6.01372417	6.00991249	5.8667917	5.8109917
110	6.01406883	6.01293139	6.00921225	5.8661678	5.8103678
115	6.01327977	6.01218444	6.00855249	5.86558	5.80978
120	6.01253633	6.01148068	6.00793087	5.8650262	5.8092262
125	6.01183586	6.0108176	6.00734519	5.8645044	5.8087044
130	6.01117589	6.01019285	6.00679337	5.8640127	5.8082127
135	6.01055408	6.00960422	6.00627344	5.8635495	5.8077495
140	6.00996821	6.00904962	6.00578358	5.863113	5.807313
145	6.00941621	6.00852708	6.00532204	5.8627018	5.8069018
150	6.00889613	6.00803476	6.00488718	5.8623144	5.8065144
155	6.00840611	6.00757089	6.00447746	5.8619493	5.8061493
160	6.00794442	6.00713384	6.00409142	5.8616054	5.8058054
165	6.00750942	6.00672206	6.0037277	5.8612813	5.8054813
170	6.00709957	6.00633408	6.00338501	5.860976	5.805176
175	6.00671342	6.00596853	6.00306214	5.8606883	5.8048883
180	6.00634958	6.00562412	6.00275792	5.8604173	5.8046173

185	6.00600678	6.00529962	6.0024713	5.8601619	5.8043619
190	6.0056838	6.00499387	6.00220124	5.8599213	5.8041213
195	6.0053795	6.00470581	6.0019468	5.8596946	5.8038946
200	6.00509278	6.00443439	6.00170707	5.859481	5.803681
205	6.00482264	6.00417867	6.00148119	5.8592798	5.8034798
210	6.00456811	6.00393773	6.00126838	5.8590902	5.8032902
215	6.00432831	6.00371072	6.00106787	5.8589115	5.8031115
220	6.00410236	6.00349683	6.00087895	5.8587432	5.8029432
225	6.00388948	6.00329531	6.00070095	5.8585846	5.8027846
230	6.0036889	6.00310544	6.00053324	5.8584352	5.8026352
235	6.00349992	6.00292654	6.00037523	5.8582944	5.8024944
240	6.00332187	6.00275799	6.00022635	5.8581618	5.8023618
245	6.0031541	6.00259918	6.00008608	5.8580368	5.8022368
250	6.00299604	6.00244956	5.99995391	5.857919	5.802119
255	6.00284712	6.00230858	5.99982939	5.8578081	5.8020081
260	6.0027068	6.00217575	5.99971207	5.8577036	5.8019036
265	6.0025746	6.00205061	5.99960153	5.8576051	5.8018051
270	6.00245004	6.00193269	5.99949738	5.8575123	5.8017123
275	6.00233268	6.0018216	5.99939925	5.8574249	5.8016249
280	6.0022221	6.00171692	5.9993068	5.8573425	5.8015425
285	6.00211792	6.0016183	5.99921969	5.8572649	5.8014649
290	6.00201976	6.00152538	5.99913761	5.8571918	5.8013918
295	6.00192728	6.00143783	5.99906028	5.8571229	5.8013229
300	6.00184014	6.00135534	5.99898742	5.8570579	5.8012579
305	6.00175804	6.00127763	5.99891878	5.8569968	5.8011968
310	6.00168068	6.0012044	5.9988541	5.8569392	5.8011392
315	6.0016078	6.00113541	5.99879316	5.8568849	5.8010849
320	6.00153913	6.0010704	5.99873574	5.8568337	5.8010337
325	6.00147443	6.00100916	5.99868165	5.8567855	5.8009855
330	6.00141348	6.00095145	5.99863068	5.8567401	5.8009401
335	6.00135604	6.00089708	5.99858266	5.8566973	5.8008973
340	6.00130193	6.00084586	5.99853741	5.856657	5.800857
345	6.00125094	6.00079759	5.99849478	5.856619	5.800819
350	6.0012029	6.00075212	5.99845461	5.8565832	5.8007832
355	6.00115764	6.00070927	5.99841677	5.8565495	5.8007495
360	6.0011115	6.00066891	5.99838111	5.8565177	5.8007177
365	6.00107482	6.00063087	5.99834752	5.8564878	5.8006878
370	6.00103696	6.00059504	5.99831586	5.8564596	5.8006596
375	6.0010013	6.00056127	5.99828604	5.856433	5.800633
380	6.00096769	6.00052946	5.99825794	5.856408	5.800608
385	6.00093603	6.00049949	5.99823147	5.8563844	5.8005844
390	6.00090619	6.00047125	5.99820652	5.8563622	5.8005622
395	6.00087809	6.00044464	5.99818302	5.8563413	5.8005413

400	6.0008516	6.00041957	5.99816088	5.8563215	5.8005215
405	6.00082665	6.00039595	5.99814002	5.8563029	5.8005029
410	6.00080314	6.00037369	5.99812036	5.8562854	5.8004854
415	6.00078099	6.00035273	5.99810184	5.8562689	5.8004689
420	6.00076012	6.00033297	5.99808439	5.8562534	5.8004534
425	6.00074046	6.00031436	5.99806795	5.8562387	5.8004387
430	6.00072193	6.00029682	5.99805246	5.8562249	5.8004249
435	6.00070448	6.0002803	5.99803786	5.8562119	5.8004119
440	6.00068803	6.00026473	5.99802411	5.8561997	5.8003997
445	6.00067254	6.00025006	5.99801115	5.8561881	5.8003881
450	6.00065794	6.00023624	5.99799895	5.8561773	5.8003773
455	6.00064418	6.00022322	5.99798745	5.856167	5.800367
460	6.00063122	6.00021095	5.99797661	5.8561574	5.8003574
465	6.00061901	6.00019939	5.9979664	5.8561483	5.8003483
470	6.00060751	6.0001885	5.99795678	5.8561397	5.8003397
475	6.00059667	6.00017824	5.99794772	5.8561316	5.8003316
480	6.00058645	6.00016857	5.99793918	5.856124	5.800324
485	6.00057683	6.00015946	5.99793113	5.8561168	5.8003168
490	6.00056776	6.00015088	5.99792355	5.8561101	5.8003101
495	6.00055922	6.00014279	5.99791641	5.8561037	5.8003037
500	6.00055117	6.00013517	5.99790968	5.8560977	5.8002977
505	6.00054359	6.00012799	5.99790334	5.8560921	5.8002921
510	6.00053644	6.00012123	5.99789736	5.8560867	5.8002867
515	6.00052971	6.00011486	5.99789173	5.8560817	5.8002817
520	6.00052337	6.00010885	5.99788643	5.856077	5.800277
525	6.00051739	6.0001032	5.99788143	5.8560726	5.8002726
530	6.00051176	6.00009787	5.99787673	5.8560684	5.8002684
535	6.00050646	6.00009284	5.99787229	5.8560644	5.8002644
540	6.00050146	6.00008811	5.99786811	5.8560607	5.8002607
545	6.00049675	6.00008365	5.99786417	5.8560572	5.8002572
550	6.00049231	6.00007945	5.99786046	5.8560539	5.8002539
555	6.00048813	6.0000755	5.99785697	5.8560508	5.8002508
560	6.00048419	6.00007177	5.99785367	5.8560478	5.8002478
565	6.00048048	6.00006825	5.99785057	5.8560451	5.8002451
570	6.00047699	6.00006494	5.99784765	5.8560425	5.8002425
575	6.00047369	6.00006183	5.99784489	5.85604	5.80024
580	6.00047059	6.00005889	5.9978423	5.8560377	5.8002377
585	6.00046766	6.00005612	5.99783985	5.8560355	5.8002355
590	6.00046491	6.00005351	5.99783755	5.8560335	5.8002335
595	6.00046231	6.00005105	5.99783538	5.8560315	5.8002315
600	6.00045987	6.00004874	5.99783333	5.8560297	5.8002297
605	6.00045756	6.00004656	5.99783141	5.856028	5.800228
610	6.00045539	6.0000445	5.99782959	5.8560264	5.8002264

615	6.00045334	6.00004256	5.99782788	5.8560248	5.8002248
620	6.00045142	6.00004074	5.99782627	5.8560234	5.8002234
625	6.0004496	6.00003902	5.99782475	5.8560221	5.8002221
630	6.00044789	6.0000374	5.99782332	5.8560208	5.8002208
635	6.00044628	6.00003587	5.99782197	5.8560196	5.8002196
640	6.00044476	6.00003444	5.9978207	5.8560184	5.8002184
645	6.00044333	6.00003308	5.9978195	5.8560174	5.8002174
650	6.00044198	6.0000318	5.99781838	5.8560164	5.8002164
655	6.00044071	6.0000306	5.99781731	5.8560154	5.8002154
660	6.00043951	6.00002947	5.99781631	5.8560145	5.8002145
665	6.00043838	6.0000284	5.99781537	5.8560137	5.8002137
670	6.00043732	6.00002739	5.99781448	5.8560129	5.8002129
675	6.00043632	6.00002645	5.99781364	5.8560122	5.8002122
680	6.00043537	6.00002555	5.99781286	5.8560115	5.8002115
685	6.00043449	6.00002471	5.99781211	5.8560108	5.8002108
690	6.00043365	6.00002392	5.99781141	5.8560102	5.8002102
695	6.00043286	6.00002317	5.99781075	5.8560096	5.8002096
700	6.00043212	6.00002247	5.99781013	5.856009	5.800209
705	6.00043142	6.00002181	5.99780954	5.8560085	5.8002085
710	6.00043076	6.00002118	5.99780899	5.856008	5.800208
715	6.00043013	6.00002059	5.99780847	5.8560075	5.8002075
720	6.00042955	6.00002004	5.99780798	5.896	5.8402

4. Tabel Ekstrapolasi Data Tekanan Seal Vulkanis

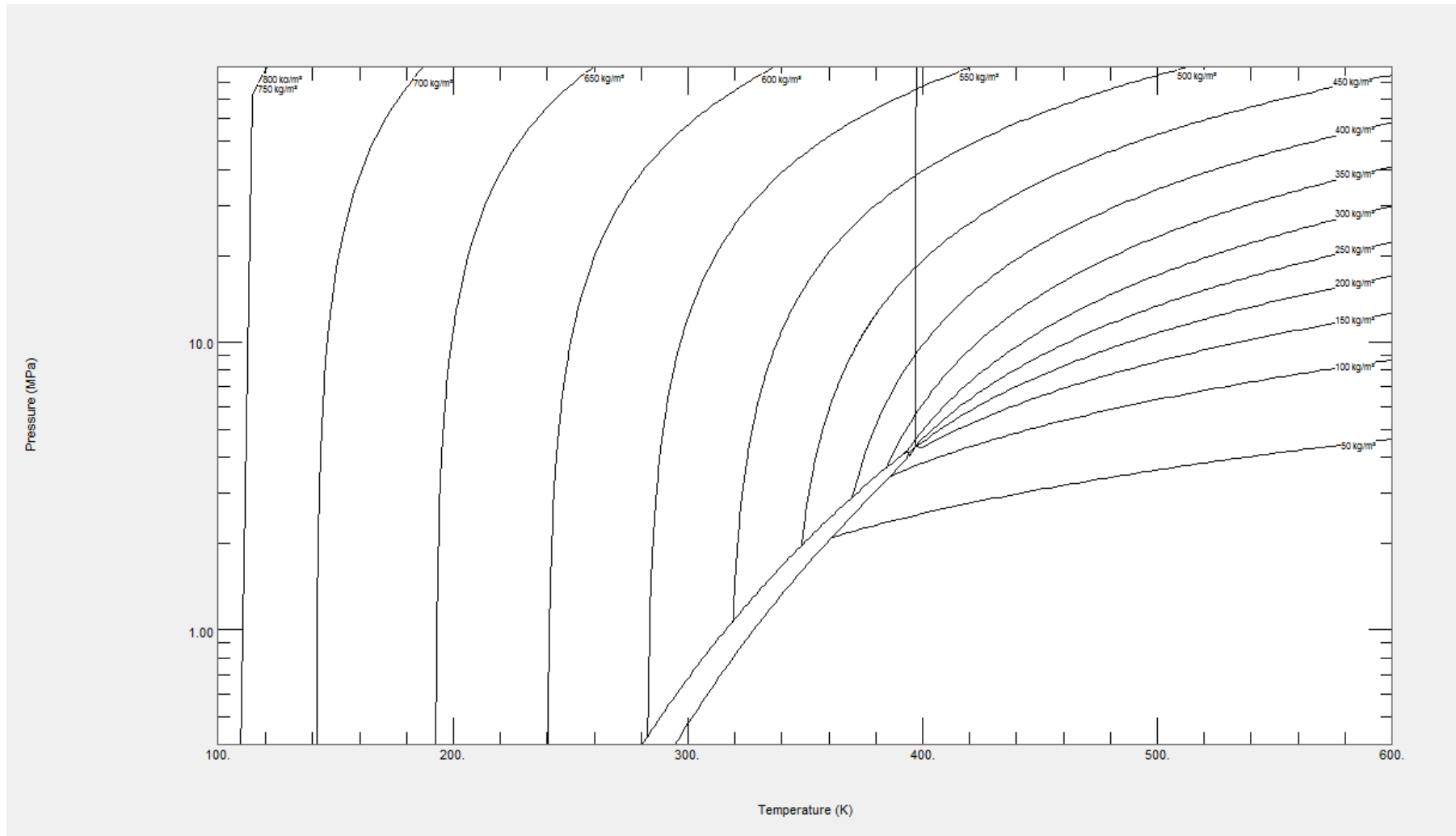
t(s)	P (bar)				
	0	0.25	0.5	0.75	1
0	6.10333	6.09556	5.843	5.802	5.9443
5	6.1588249	6.1492647	5.89387817	5.85146489	5.989525
10	6.15561665	6.14616	5.89093683	5.84860525	5.9869105
15	6.15259388	6.1432347	5.88816552	5.84591093	5.9844471
20	6.14974585	6.1404786	5.88555443	5.84337237	5.9821262
25	6.14706248	6.1378818	5.88309429	5.84098056	5.9799394
30	6.14453424	6.1354351	5.88077638	5.83872704	5.977879
35	6.14215216	6.1331298	5.87859247	5.83660379	5.9759377
40	6.13990779	6.1309579	5.87653481	5.83460329	5.9741087
45	6.13779317	6.1289115	5.87459611	5.83271844	5.9723854
50	6.1358008	6.1269834	5.87276949	5.83094256	5.9707618
55	6.13392361	6.1251667	5.87104847	5.82926934	5.969232
60	6.13215494	6.1234551	5.86942694	5.82769286	5.9677906
65	6.13048853	6.1218424	5.86789916	5.82620752	5.9664326
70	6.12891845	6.120323	5.8664597	5.82480804	5.9651531
75	6.12743914	6.1188914	5.86510346	5.82348947	5.9639475
80	6.12604535	6.1175426	5.86382562	5.82224713	5.9628117
85	6.12473214	6.1162718	5.86262166	5.82107661	5.9617415
90	6.12349485	6.1150744	5.8614873	5.81997376	5.9607332
95	6.12232909	6.1139462	5.86041852	5.81893467	5.9597831
100	6.12123072	6.1128833	5.85941153	5.81795565	5.958888
105	6.12019585	6.1118818	5.85846275	5.81703323	5.9580447
110	6.11922081	6.1109382	5.85756883	5.81616414	5.9572501
115	6.11830214	6.1100492	5.85672658	5.81534529	5.9565014
120	6.11743658	6.1092115	5.85593302	5.81457377	5.955796
125	6.11662105	6.1084223	5.85518535	5.81384686	5.9551314
130	6.11585268	6.1076787	5.85448089	5.81316198	5.9545052
135	6.11512872	6.1069781	5.85381716	5.81251669	5.9539153
140	6.11444662	6.106318	5.85319181	5.8119087	5.9533594
145	6.11380395	6.1056961	5.8526026	5.81133586	5.9528356
150	6.11319843	6.1051101	5.85204746	5.81079614	5.9523422
155	6.11262792	6.104558	5.85152441	5.81028762	5.9518773
160	6.1120904	6.1040378	5.8510316	5.8098085	5.9514392
165	6.11158394	6.1035477	5.85056728	5.80935708	5.9510265
170	6.11110677	6.1030859	5.85012981	5.80893176	5.9506376
175	6.11065718	6.1026508	5.84971762	5.80853102	5.9502712
180	6.11023359	6.1022409	5.84932926	5.80815345	5.949926
185	6.10983448	6.1018547	5.84896336	5.80779771	5.9496008

190	6.10945845	6.1014908	5.84861861	5.80746254	5.9492943
195	6.10910415	6.1011479	5.84829379	5.80714674	5.9490056
200	6.10877034	6.1008248	5.84798775	5.8068492	5.9487336
205	6.10845582	6.1005205	5.8476994	5.80656886	5.9484772
210	6.10815949	6.1002337	5.84742772	5.80630472	5.9482357
215	6.10788029	6.0999635	5.84717174	5.80605586	5.9480082
220	6.10761723	6.0997089	5.84693057	5.80582139	5.9477938
225	6.10736938	6.0994691	5.84670334	5.80560047	5.9475919
230	6.10713586	6.0992431	5.84648924	5.80539232	5.9474015
235	6.10691583	6.0990302	5.84628752	5.8051962	5.9472222
240	6.10670853	6.0988295	5.84609747	5.80501142	5.9470533
245	6.10651321	6.0986405	5.8459184	5.80483733	5.9468941
250	6.10632919	6.0984624	5.84574968	5.8046733	5.9467442
255	6.1061558	6.0982946	5.84559072	5.80451875	5.9466029
260	6.10599243	6.0981365	5.84544094	5.80437314	5.9464697
265	6.10583852	6.0979876	5.84529983	5.80423594	5.9463443
270	6.10569349	6.0978473	5.84516687	5.80410668	5.9462261
275	6.10555686	6.097715	5.8450416	5.80398489	5.9461148
280	6.10542812	6.0975904	5.84492357	5.80387014	5.9460098
285	6.10530682	6.0974731	5.84481237	5.80376202	5.945911
290	6.10519254	6.0973625	5.84470759	5.80366016	5.9458179
295	6.10508486	6.0972583	5.84460887	5.80356418	5.9457301
300	6.10498341	6.0971601	5.84451586	5.80347375	5.9456474
305	6.10488783	6.0970676	5.84442823	5.80338855	5.9455695
310	6.10479777	6.0969804	5.84434566	5.80330828	5.9454961
315	6.10471291	6.0968983	5.84426786	5.80323265	5.945427
320	6.10463296	6.0968209	5.84419457	5.80316138	5.9453618
325	6.10455764	6.096748	5.84412551	5.80309424	5.9453005
330	6.10448667	6.0966794	5.84406044	5.80303098	5.9452426
335	6.1044198	6.0966146	5.84399913	5.80297138	5.9451881
340	6.10435679	6.0965537	5.84394137	5.80291522	5.9451368
345	6.10429743	6.0964962	5.84388695	5.80286231	5.9450884
350	6.1042415	6.0964421	5.84383567	5.80281246	5.9450428
355	6.10418881	6.0963911	5.84378736	5.80276549	5.9449999
360	6.10413916	6.0963431	5.84374184	5.80272124	5.9449594
365	6.10409238	6.0962978	5.84369896	5.80267954	5.9449213
370	6.10404831	6.0962551	5.84365855	5.80264026	5.9448854
375	6.10400678	6.0962149	5.84362048	5.80260324	5.9448515
380	6.10396765	6.0961771	5.84358461	5.80256837	5.9448197
385	6.10393079	6.0961414	5.84355081	5.80253551	5.9447896
390	6.10389606	6.0961078	5.84351897	5.80250455	5.9447613
395	6.10386333	6.0960761	5.84348896	5.80247538	5.9447346
400	6.1038325	6.0960463	5.8434607	5.8024479	5.9447095

405	6.10380345	6.0960182	5.84343406	5.80242201	5.9446858
410	6.10377608	6.0959917	5.84340897	5.80239761	5.9446635
415	6.10375029	6.0959667	5.84338533	5.80237462	5.9446425
420	6.10372599	6.0959432	5.84336305	5.80235296	5.9446227
425	6.1037031	6.0959211	5.84334206	5.80233256	5.9446041
430	6.10368153	6.0959002	5.84332229	5.80231333	5.9445865
435	6.10366121	6.0958805	5.84330365	5.80229522	5.9445699
440	6.10364206	6.095862	5.8432861	5.80227815	5.9445543
445	6.10362402	6.0958445	5.84326956	5.80226207	5.9445396
450	6.10360702	6.0958281	5.84325398	5.80224692	5.9445258
455	6.10359101	6.0958126	5.84323929	5.80223265	5.9445127
460	6.10357592	6.095798	5.84322546	5.8022192	5.9445004
465	6.1035617	6.0957842	5.84321243	5.80220652	5.9444888
470	6.10354831	6.0957713	5.84320014	5.80219458	5.9444779
475	6.10353569	6.0957591	5.84318857	5.80218334	5.9444676
480	6.10352379	6.0957475	5.84317767	5.80217274	5.9444579
485	6.10351259	6.0957367	5.8431674	5.80216275	5.9444488
490	6.10350203	6.0957265	5.84315772	5.80215334	5.9444402
495	6.10349209	6.0957169	5.8431486	5.80214448	5.9444321
500	6.10348272	6.0957078	5.84314001	5.80213612	5.9444245
505	6.10347389	6.0956992	5.84313192	5.80212825	5.9444173
510	6.10346557	6.0956912	5.84312429	5.80212084	5.9444105
515	6.10345773	6.0956836	5.84311711	5.80211385	5.9444041
520	6.10345035	6.0956765	5.84311034	5.80210727	5.9443981
525	6.10344339	6.0956697	5.84310396	5.80210107	5.9443924
530	6.10343684	6.0956634	5.84309795	5.80209523	5.9443871
535	6.10343066	6.0956574	5.84309229	5.80208972	5.944382
540	6.10342484	6.0956518	5.84308695	5.80208454	5.9443773
545	6.10341936	6.0956465	5.84308192	5.80207965	5.9443728
550	6.10341419	6.0956415	5.84307719	5.80207504	5.9443686
555	6.10340932	6.0956368	5.84307273	5.80207071	5.9443646
560	6.10340474	6.0956323	5.84306852	5.80206662	5.9443609
565	6.10340042	6.0956281	5.84306456	5.80206277	5.9443574
570	6.10339635	6.0956242	5.84306083	5.80205914	5.9443541
575	6.10339251	6.0956205	5.84305731	5.80205572	5.9443509
580	6.1033889	6.095617	5.843054	5.8020525	5.944348
585	6.10338549	6.0956137	5.84305088	5.80204946	5.9443452
590	6.10338228	6.0956106	5.84304793	5.8020466	5.9443426
595	6.10337926	6.0956077	5.84304516	5.80204391	5.9443401
600	6.10337641	6.0956049	5.84304255	5.80204137	5.9443378
605	6.10337373	6.0956023	5.84304009	5.80203898	5.9443356
610	6.1033712	6.0955999	5.84303777	5.80203673	5.9443336
615	6.10336882	6.0955976	5.84303559	5.8020346	5.9443316

620	6.10336658	6.0955954	5.84303353	5.8020326	5.9443298
625	6.10336446	6.0955933	5.84303159	5.80203072	5.9443281
630	6.10336247	6.0955914	5.84302977	5.80202894	5.9443265
635	6.10336059	6.0955896	5.84302805	5.80202727	5.9443249
640	6.10335882	6.0955879	5.84302643	5.80202569	5.9443235
645	6.10335716	6.0955863	5.8430249	5.80202421	5.9443221
650	6.10335559	6.0955848	5.84302346	5.80202281	5.9443209
655	6.10335411	6.0955833	5.8430221	5.80202149	5.9443196
660	6.10335271	6.095582	5.84302082	5.80202025	5.9443185
665	6.1033514	6.0955807	5.84301962	5.80201908	5.9443174
670	6.10335016	6.0955795	5.84301849	5.80201797	5.9443164
675	6.103349	6.0955784	5.84301742	5.80201693	5.9443155
680	6.1033479	6.0955773	5.84301641	5.80201595	5.9443146
685	6.10334687	6.0955763	5.84301546	5.80201503	5.9443137
690	6.10334589	6.0955754	5.84301457	5.80201416	5.9443129
695	6.10334497	6.0955745	5.84301373	5.80201334	5.9443122
700	6.10334411	6.0955737	5.84301293	5.80201257	5.9443115
705	6.10334329	6.0955729	5.84301218	5.80201185	5.9443108
710	6.10334252	6.0955721	5.84301148	5.80201116	5.9443102
715	6.1033418	6.0955714	5.84301082	5.80201052	5.9443096
720	6.10334112	6.0955708	5.84301019	5.80200991	5.9443091

5. Grafik Tekanan vs Temperatur 60% propane dan 40% butane



6. Grafik Viskositas vs Temperatur 60% propane dan 40% butane

