

SKRIPSI

PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP TINGKAT KEVAKUMAN AKHIR DALAM RANCANGAN SISTEM EVAPORASI VAKUM

oleh:

SINATRYO ABIKUSUMO

165090307111013

PROGRAM STUDI: S1 FISIKA



JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2020

PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP TINGKAT KEVAKUMAN AKHIR DALAM RANCANGAN SISTEM EVAPORASI VAKUM

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains dalam bidang Fisika

oleh:

SINATRYO ABIKUSUMO

165090307111013



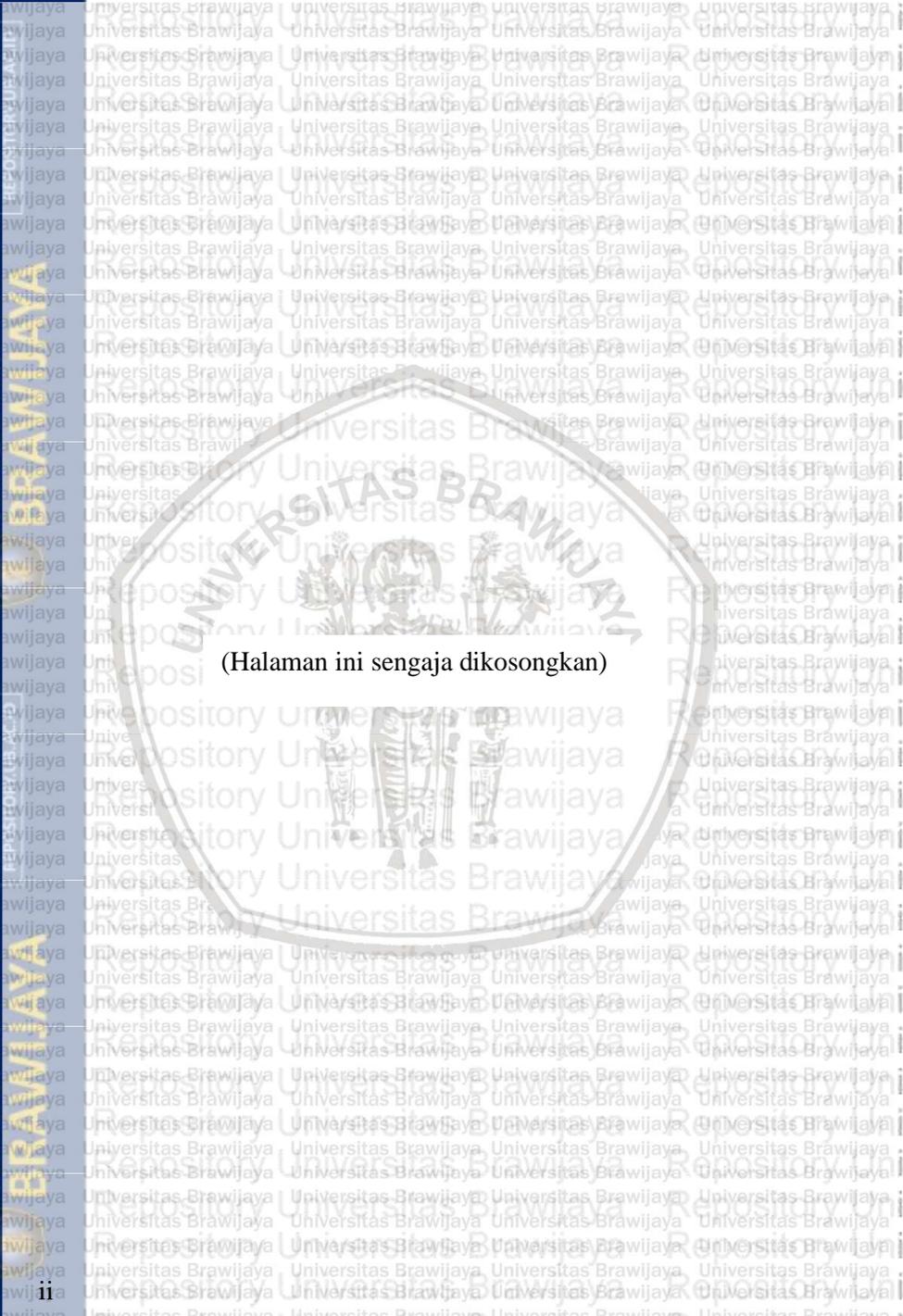
JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2020



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP TINGKAT
KEVAKUMAN AKHIR DALAM RANCANGAN SISTEM
EVAPORASI VAKUM**

Oleh:

SINATRYO ABIKUSUMO

165090307111013

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal **16 JULI 2020**
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Pembimbing I

Pembimbing II


Ir. D.J. Djoko H.S., M.Phil., Ph.D.
NIP 196601311990021001

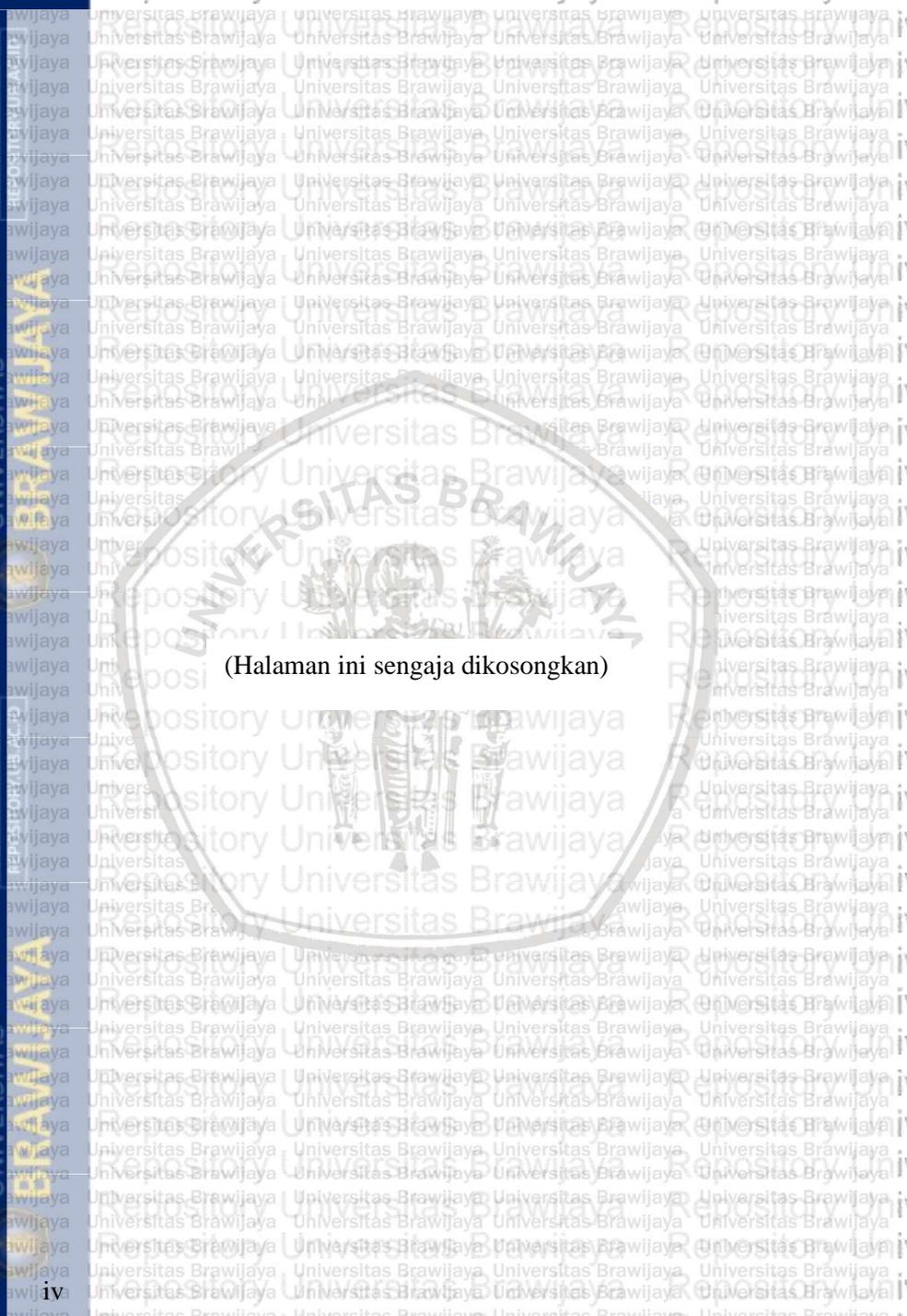

Dr. Eng. Masrurub S.Si., M.Si.
NIP 197512312002122002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika

Fakultas MIPA Universitas Brawijaya


Prof. Dr. rer. nat. Muhammad Nurhuda
NIP 196409101990021001



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sinatryo Abikusumo

NIM : 165090307111013

Jurusan : Fisika

Penulis Skripsi Berjudul :

PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP TINGKAT KEVAKUMAN AKHIR DALAM RANCANGAN SISTEM EVAPORASI VAKUM

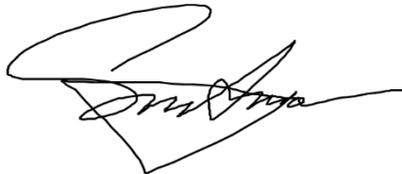
Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Isi dari skripsi yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar Pustaka dalam skripsi ini
2. Apabila di kemudian hari ternyata skripsi yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya akan bersedia menanggung segala risiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, 2 Juli 2020

Yang menyatakan,



Sinatryo Abikusumo

NIM 165090307111013

PENGARUH TEMPERATUR TERHADAP TINGKAT KEVAKUMAN AKHIR DALAM RANCANGAN SISTEM EVAPORASI VAKUM

ABSTRAK

Konduktansi dan kecepatan pemompaan dalam rancangan sistem evaporasi vakum telah berhasil disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak MolFlow+. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur terhadap tingkat kevakuman akhir pada sistem evaporasi vakum yang dipengaruhi oleh konduktansi dan kecepatan pemompaan efektif. Tahapan penelitian ini dilakukan dengan mempersiapkan pengujian kerja sistem vakum pada sistem evaporasi vakum; menghitung beban gas yang berada dalam sistem evaporasi vakum; membuat desain sistem evaporasi vakum menggunakan piranti lunak Inventor yang kemudian disimulasikan menggunakan perangkat lunak MolFlow+; menentukan profil tekanan pada sistem evaporasi vakum; dan menentukan tingkat kevakuman akhir yang ada pada sistem evaporasi vakum. Tingkat kevakuman akhir yang dapat dicapai untuk komponen evaporasi vakum adalah 4.979×10^{-4} torr untuk sistem pada temperatur $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tekanan kevakuman akhir dapat dipengaruhi oleh temperatur. Jika temperatur yang digunakan semakin tinggi, maka tingkat kevakuman akhir yang dihasilkan akan semakin rendah. Sehingga dapat disimpulkan jika temperatur sistem yang diberikan akan mempengaruhi besarnya konduktansi dan laju pemompaan efektif pada sistem evaporasi vakum.

Kata Kunci: Evaporasi vakum, kevakuman akhir, konduktansi, kecepatan pemompaan efektif.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

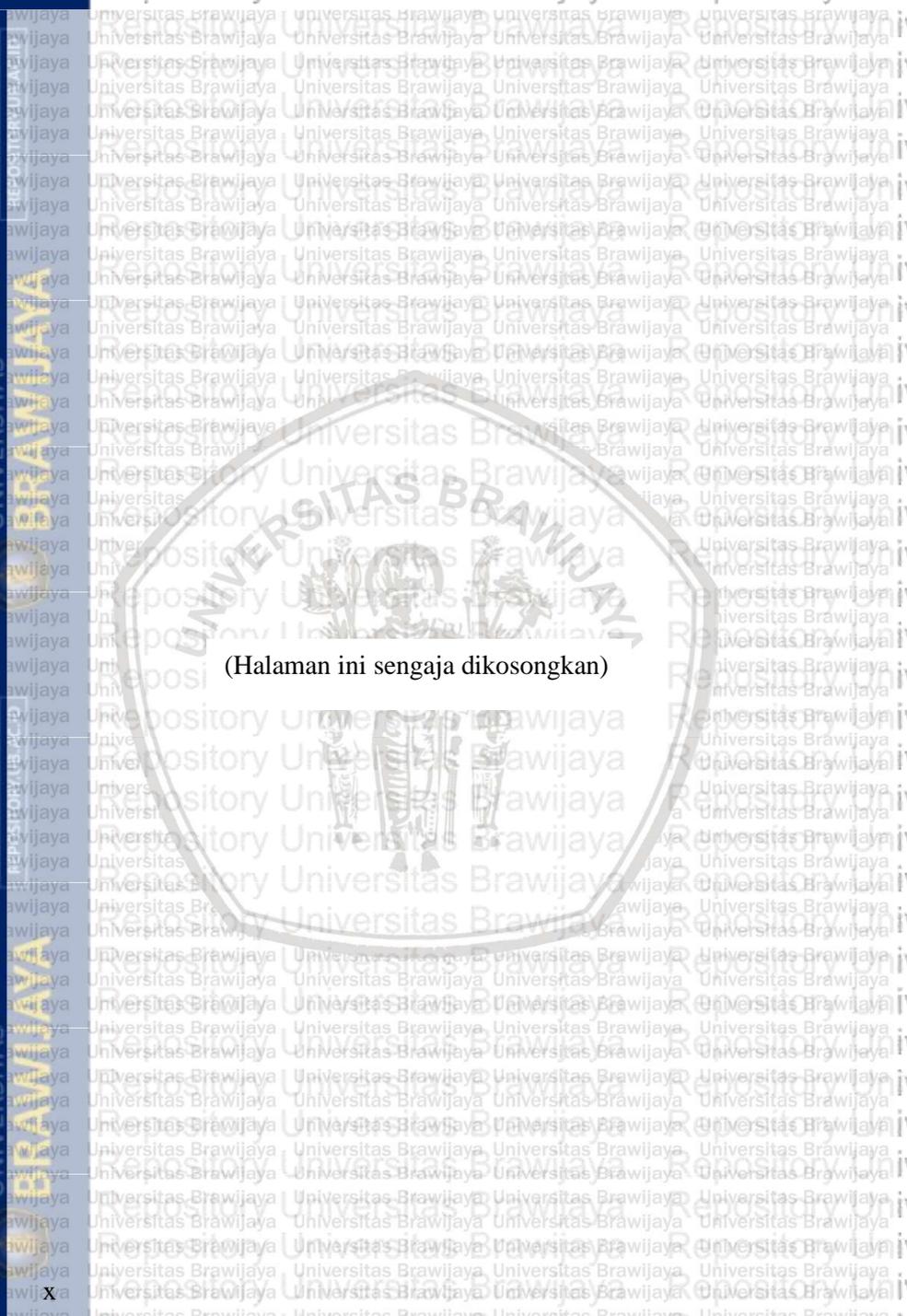


THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE ULTIMATE PRESSURE IN DESIGN OF VACUUM EVAPORATION SYSTEM

ABSTRACT

Conductance and pumping speed in the design of vacuum evaporation systems have been successfully modeled using MolFlow+ software. This study aims to determine the effect of temperature on the ultimate pressure in the vacuum evaporation system which is influenced by the conductance and effective pumping speed. The stages of this research were carried out by preparing the working test of the vacuum system on the vacuum evaporation system; calculate the load of gas in the vacuum evaporation system; designing a vacuum evaporation system using Inventor then simulated using MolFlow+; determine the pressure profile in the vacuum evaporation system; and determine the ultimate pressure in the vacuum evaporation system. The ultimate pressure that can be achieved for vacuum evaporation components is 4.979×10^{-4} torr at 20 °C. The ultimate pressure can be affected by temperature. If the temperature used is higher, then the final vacuum level produced will be even lower. The temperature of a given system will affect the value of conductance and effective pumping speed in the vacuum evaporation system.

Keywords: Vacuum evaporation, ultimate pressure, conductance, effective pumping speed.



Repository Universitas Brawijaya

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya

Repository Universitas Brawijaya

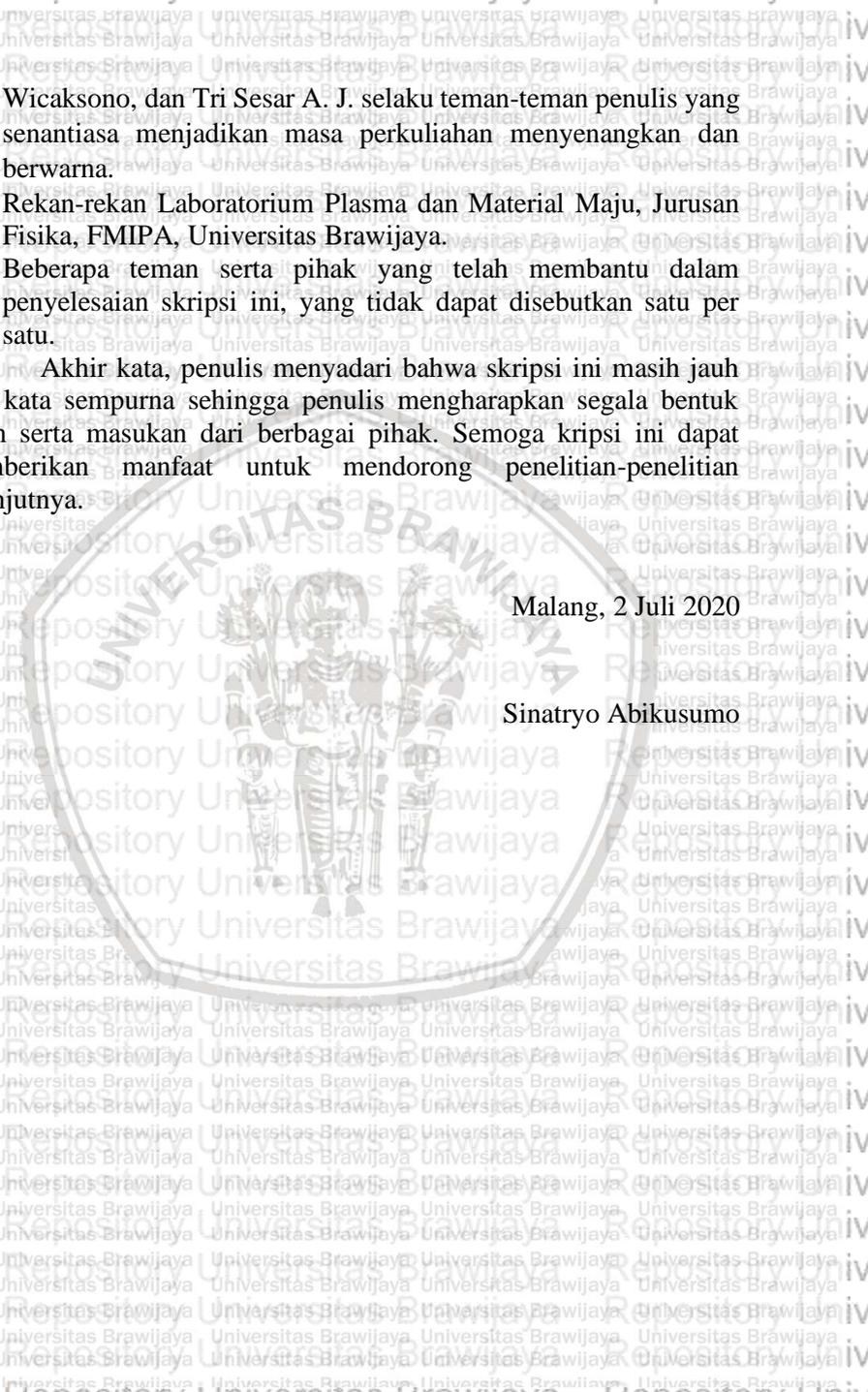
Wicaksono, dan Tri Sesar A. J. selaku teman-teman penulis yang senantiasa menjadikan masa perkuliahan menyenangkan dan berwarna.

6. Rekan-rekan Laboratorium Plasma dan Material Maju, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Brawijaya.
7. Beberapa teman serta pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna sehingga penulis mengharapkan segala bentuk saran serta masukan dari berbagai pihak. Semoga kripsi ini dapat memberikan manfaat untuk mendorong penelitian-penelitian selanjutnya.

Malang, 2 Juli 2020

Sinatryo Abikusumo



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	iii
LEMBAR PERNYATAAN.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II METODOLOGI.....	5
2.1 Konsep Penelitian	5
2.2 Metode Eksperimen	7
2.2.1 Waktu dan Tempat Penelitian	7
2.2.2 Alat dan Bahan.....	7
2.2.3 Tahapan Penelitian	7
2.2.3.1 Persiapan Desain dan Pengujian Sistem Evaporasi Vakum	9
2.2.3.2 Perhitungan Beban Gas	14
2.2.3.3 Persiapan Desain Sistem Evaporasi Vakum dengan Inventor 2018 dan Simulasi dengan Molflow+.....	14
2.2.3.4 Menentukan Profil Tekanan Sistem Evaporasi Vakum	16
2.2.3.5 Menentukan Kevakuman Akhir pada Sistem Evaporasi Vakum	18
	xiii



2.3 Telusur Pustaka 18

BAB III PEMBAHASAN 27

3.1 Tinjauan Teori Dasar 27

3.1.1 Vakum 27

3.1.2 Pompa Vakum 33

3.1.3 Pengukuran Tekanan 37

3.1.4 Pelepasan Gas dari Padatan 39

3.1.4.1 Gas Sebelum Dipompa 40

3.1.4.2 Gas yang Disebabkan Adanya Pelepasan Gas 40

3.1.4.3 Gas yang Masuk dengan Cara Permeasi Melalui Dinding 42

3.1.4.4 Gas yang Masuk karena Adanya Kebocoran 44

3.1.4.5 Gas yang Disebabkan Adanya Penguapan 45

3.1.4.6 Jumlah Gas sebagai Beban Pompa 45

3.1.5 Evaporasi vakum 46

3.1.6 Monte Carlo 46

3.2 Pembahasan Penelitian 48

3.2.1 Hasil Perakitan Sistem Evaporasi Vakum 48

3.2.2 Hasil Pengujian Sistem Evaporasi Vakum 49

3.2.3 Hasil Perhitungan Profil Tekanan 52

3.2.4 Hasil Perhitungan Beban Gas 58

3.2.4.1 Hasil Perhitungan Laju Pelepasan Gas 58

3.2.4.2 Hasil Perhitungan Laju Permeasi 60

3.2.4.3 Hasil Perhitungan Laju Kebocoran 60

3.2.5 Hasil Kevakuman Akhir 62

3.3 Pembahasan Studi Literatur 64

3.3.1 Pengaruh Temperatur terhadap Tingkat Kevakuman Akhir 65

3.3.2 Perhitungan tekanan dengan menggunakan metode Monte Carlo 66

BAB IV PENUTUP 73

4.1 Kesimpulan 73

4.2 Saran 73

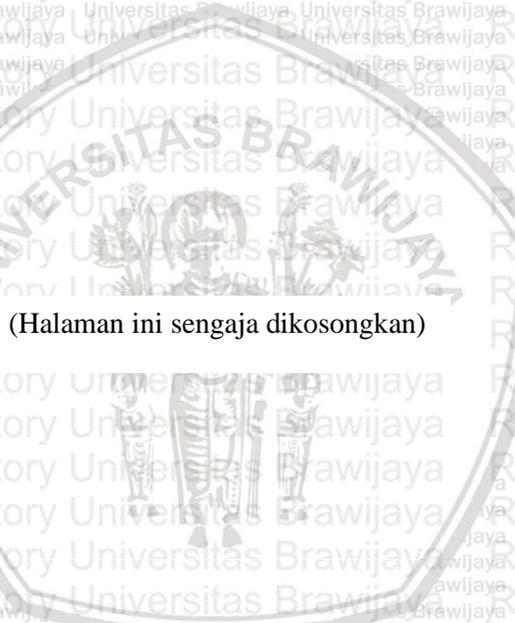
DAFTAR PUSTAKA.....
LAMPIRAN.....

75
77





(Halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Peta konsep penelitian.	6
Gambar 2.2	Diagram alir penelitian.	8
Gambar 2.3	Diagram alir program Molflow+.	9
Gambar 2.4	Chamber vakum sistem evaporasi vakum. Tampak luar (a) tampak dalam (b). Komponennya terdiri dari kaca chamber (1); alas chamber (2); jalur perpipaian (3); penyangga substrat (4); elektroda (5); segel (6); dan elemen pemanas (7).....	11
Gambar 2.5	Desain volume sistem evaporasi vakum dengan Inventor.	11
Gambar 2.6	MolFlow+ interface.	12
Gambar 2.7	Model sederhana dengan MolFlow+.	12
Gambar 2.8	Facet pemompaan.....	14
Gambar 2.9	Rangkaian sistem evaporasi vakum; 1) chamber, 2) elbow, 3) tees, 4) baffle, 5) pompa difusi.	15
Gambar 3.1	Lintasan suatu molekul (O’Hanlon, 2003).....	29
Gambar 3.2	Aliran viskos (a), aliran transisi (B), dan aliran molekuler (C) (Hoffman et al., 1998).	30
Gambar 3.3	Pipa penampang lingkaran (Jousten, 2016).....	31
Gambar 3.4	Sistem vakum dengan garis pemompaan antara chamber vakum (tekanan pc) dan pompa (tekanan pm).	31
Gambar 3.5	Prinsip kerja pompa mekanis beraling-baling: (a) Sistem yang akan mulai dipompa (b) Tekanan dalam pompa dan sistem sama (c) Tekanan dalam pompa menurun (d) Gas teremis lewat outlet pompa (Roth, 1990).	34
Gambar 3.6	Pompa difusi (Roth, 1990).	35
Gambar 3.7	Konfigurasi pirani gauge (Mattox, 1998).....	37
Gambar 3.8	Pirani gauge.....	38
		xvii

Gambar 3.9 Skema beban gas dalam sistem vakum (O'Hanlon, 2003).....	40
Gambar 3.10 Desorpsi pada aliran molekuler (Harsha, 2006).....	41
Gambar 3.11 Tampilan grafis komputer dari lintasan 15 molekul yang memasuki siku dalam aliran molekul bebas (O'Hanlon, 2003).	47
Gambar 3.12 Geometri tabung untuk perhitungan TPMC: 100 sisi persegi panjang facets yang ditambah 2 sisi ujung tutup poligon (Kersevan & Pons, 2009).	48
Gambar 3.13 Sistem evaporasi vakum.	49
Gambar 3.14 Grafik perubahan tekanan chamber selama pemompaan dari 5 menit sampai 60 menit.	51
Gambar 3.15 Grafik perubahan tekanan chamber selama pemompaan dari 0 menit menuju 5 menit.....	51
Gambar 3.16 Facet pengukuran pada MolFlow+.....	52
Gambar 3.17 Tumbukan antara molekul gas dengan dinding.	53
Gambar 3.18 Hasil profil tekanan dengan gas hidrogen pada chamber sebelum dipanasbersihkan untuk berbagai temperatur yang berbeda.....	54
Gambar 3.19 Hasil pengukuran tekanan dengan gas hidrogen pada chamber setelah dipanasbersihkan untuk berbagai temperatur yang berbeda.....	55
Gambar 3.20 Tekanan parsial gas untuk temperatur 20 °C (chamber sebelum dipanasbersihkan).	56
Gambar 3.21 Tekanan parsial gas untuk temperatur 20 °C (chamber setelah dipanasbersihkan).	57
Gambar 3.22 Grafik Temperatur terhadap tingkat kevakuman akhir	64
Gambar 3.23 Distribusi tekanan pada tabung sepanjang 500 cm (Howell et al., 1991).....	65
Gambar 3.24 Profil tekanan perhitungan metode Monte Carlo. Kurva atas (garis merah): tekanan sepanjang e-beam	



chamber; kurva bawah (garis biru): tekanan sepanjang tabung 45° (Kersevan & Pons, 2009). 67

Gambar 3.25 Grafik hubungan tekanan dengan jarak untuk simulasi sistem celah vertikal (Amann et al., 2008). 69

Gambar 3.26 Profil tekanan pada waktu yang berbeda untuk model beam line (a) tanpa ADL (b) dengan ADL (Suetsugu, 1996). 70

Gambar 3.27 Hubungan tekanan dengan waktu pada jarak $z = 4.95 - 5.75$ m (Suetsugu, 1996). 71





Repository Universitas Brawijaya

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Laju pelepasan spesifik gas dari beberapa gas untuk baja tahan karat dan aluminium setelah 100 jam pemompaan (Chao et al., 2012).	10
Tabel 2.2 Laju pelepasan spesifik gas dari beberapa gas untuk baja tahan karat dan aluminium setelah 50 jam dipanasbersihkan pada 150°C (Chao et al., 2012).....	10
Tabel 2.3 Spesifikasi Alat Rotary-vane pump RZ 6 + FO + VS 16.	15
Tabel 2.4 Parameter berbagai gas (Jousten, 2016).....	17
Tabel 2.5 Pemetaan Data.....	18
Tabel 3.1 Faktor Konversi untuk Unit Tekanan.	27
Tabel 3.2 Jangkauan Vakum (O’Hanlon, 2003).	27
Tabel 3.3 Spesifikasi pirani gauge TPR 280	38
Tabel 3.4 Koefisien difusi (D1) gas hidrogen dalam baja tahan karat (Perkins, 1973).	43
Tabel 3.5 Konstanta permeasi (D1b = K) untuk gas hidrogen dalam baja tahan karat (Perkins, 1973).	43
Tabel 3.6 Data hasil pembacaan tekanan sistem evaporasi vakum pada berbagai periode pemompaan.	50
Tabel 3.7 Profil tekanan dari hidrogen pada chamber yang belum dipanasbersihkan.	54
Tabel 3.8 Profil tekanan dari hidrogen pada chamber yang sudah dipanasbersihkan.	55
Tabel 3.9 Kecepatan molekul rata-rata gas.	56
Tabel 3.10 Tekanan total pada chamber sebelum dipanasbersihkan.	57
Tabel 3.11 Tekanan total pada chamber setelah dipanasbersihkan..	57
Tabel 3.12 Rangkuman hasil perhitungan beban gas yang dipompa dengan temperatur 20 °C.	62



Tabel 3.13 Profil tekanan total pada tabung sepanjang 50 m (Welch, 1973)..... 66

Tabel 3.14 Perbandingan probabilitas transmisi antara metode Monte Carlo dengan hasil yang sebenarnya (Kersevan & Pons, 2009)..... 68



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Tabel perhitungan tekanan dengan dua pirani gauge.	77
Lampiran 2	Tabel profil tekanan pada chamber sebelum panasbersih.....	77
Lampiran 3	Kecepatan molekul rata-rata dari gas dalam chamber sebelum panasbersih.	78
Lampiran 4	Tabel profil tekanan chamber setelah panasbersih. ..	78
Lampiran 5	Kecepatan molekul rata-rata dari gas dalam chamber setelah panasbersih.	78
Lampiran 6	Desain chamber MolFlow+. Tampak atas (A), Tampak samping (B).....	79
Lampiran 7	Desain chamber Inventor. Tampak bawah (A) dan Tampak samping (B).	79
Lampiran 8	Skema akselerator linier.....	80
Lampiran 9	Distribusi tekanan pada tabung panjang dengan laju pelepasan gas yang sama dan dipompa pada satu titik.	80
Lampiran 10	Tekanan total tabung sepanjang 50 m.....	81
Lampiran 11	Perbandingan probabilitas transmisi pada MOLFLOW dan probabilitas transmisi sebenarnya.	82
Lampiran 12	Tangkapan layar dari perhitungan Monte Carlo dari profil tekanan.....	83
Lampiran 13	Sistem vakum.	84
Lampiran 14	Profil tekanan pada tabung sepanjang 500 cm.	84
Lampiran 15	Tampilan samping dari beamline tunggal pada PETRA III.....	85
Lampiran 16	Grafik hubungan tekanan dengan jarak untuk simulasi sistem celah vertikal.	85
Lampiran 17	Profil tekanan pada waktu yang berbeda untuk model beam line (a) tanpa ADL (b) dengan ADL.	86

Lampiran 18 Hubungan tekanan dengan waktu pada jarak $z = 4.95 - 5.75$ m.87

Lampiran 19 Model beamline untuk perhitungan distribusi tekanan (a) tanpa ADL (b) dengan ADL.87



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Evaporasi vakum merupakan salah satu teknik untuk membuat lapisan tipis. Lapisan tipis dapat terbentuk ketika bahan tersebut menguap setelah ditembakkan ke bahan target sehingga akan menempel pada substrat. Lapisan padat dapat diendapkan pada suhu yang lebih rendah menggunakan evaporasi vakum (Shah et al., 2018). Proses dari evaporasi vakum bekerja dengan mendeposisikan material ke substrat. Sistem dari evaporasi vakum membutuhkan vakum tinggi untuk dapat mendeposisikan material. Sistem vakum terdiri dari *chamber* deposisi, sistem pompa, sistem keluaran, dan sistem perpipaan (Mattox, 1998).

Dalam sistem perpipaan terdapat aliran molekuler. Distribusi tekanan gas dan konduktansi dari pipa pada daerah aliran molekuler dapat dihitung dengan menggunakan metode Monte Carlo. Metode Monte Carlo dapat mensimulasikan aliran molekuler stabil dan tekanan statis pada vakum, yang mana dapat digunakan untuk menghitung waktu distribusi tekanan pada sistem vakum. Program simulasi Monte Carlo dapat melacak partikel-partikel pengujian dengan cara menentukan pergerakan gas hingga gas tersebut dikeluarkan oleh pompa. Metode Monte Carlo dapat digunakan untuk memperkirakan variasi waktu distribusi tekanan dalam sistem vakum meskipun strukturnya rumit dan sulit untuk mendapatkan konduktansi yang akurat dalam daerah aliran molekuler (Suetsugu, 1996).

Howell et al., pada tahun 1991 telah melakukan perhitungan distribusi tekanan pada sistem vakum dengan pendekatan menggunakan analisis perpindahan panas. Metode yang digunakan yaitu metode elemen berhingga dengan

variabel sebagai berikut: luas penampang, konduktivitas termal material, dan tingkat pembangkitan panas volumetrik. Konduktansi dari gas yang tepat serta laju *outgassing* pada komponen vakum dapat ditentukan. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini ialah distribusi dari tekanan pada tabung panjang (500 cm). Pompa yang berada lebih dekat dengan *facet* pengukuran menunjukkan tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan pompa yang berada lebih jauh dari *facet* pengukuran.

Dalam penelitian ini, penulis akan melakukan studi mengenai sistem evaporasi vakum yang digunakan di Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya menggunakan *software* MolFlow+ sebagai piranti lunak, yang nantinya akan digunakan dalam pengukuran konduktansi dan kecepatan pemompaan dengan asumsi mampu digunakan untuk perhitungan tekanan gas yang berada pada *chamber* vakum. Sehingga tujuan dari penelitian ini nantinya dapat diketahui waktu pemompaan efektif dan konduktansi dari sistem evaporasi vakum, serta dapat diketahuinya pengaruh temperatur terhadap tingkat kevakuman akhir sistem evaporasi vakum.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dipecahkan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh temperatur terhadap tingkat kevakuman akhir pada sistem evaporasi vakum?
2. Bagaimana perhitungan distribusi tekanan dengan menggunakan metode Monte Carlo pada MolFlow+?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh temperatur terhadap tingkat kevakuman akhir pada sistem evaporasi vakum.



2. Melakukan studi literatur untuk mengetahui perhitungan distribusi tekanan dengan metode Monte Carlo pada MolFlow+.

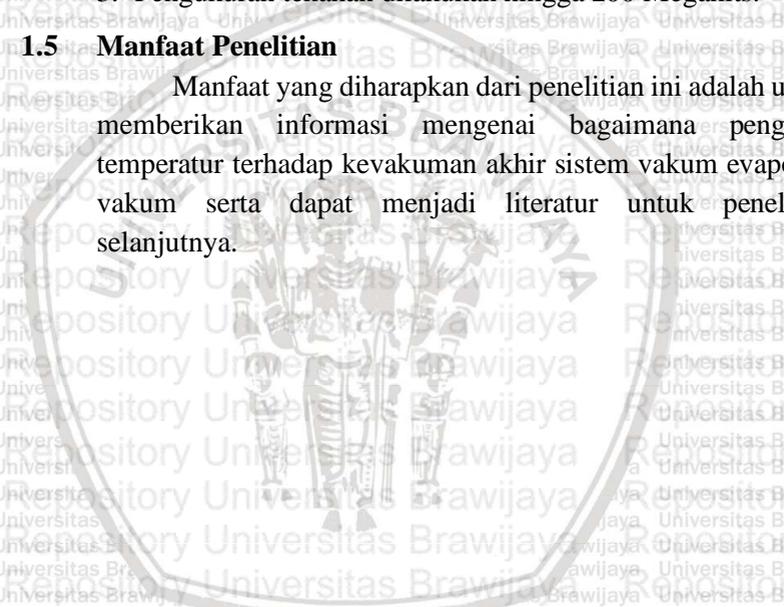
1.4 Batasan Masalah

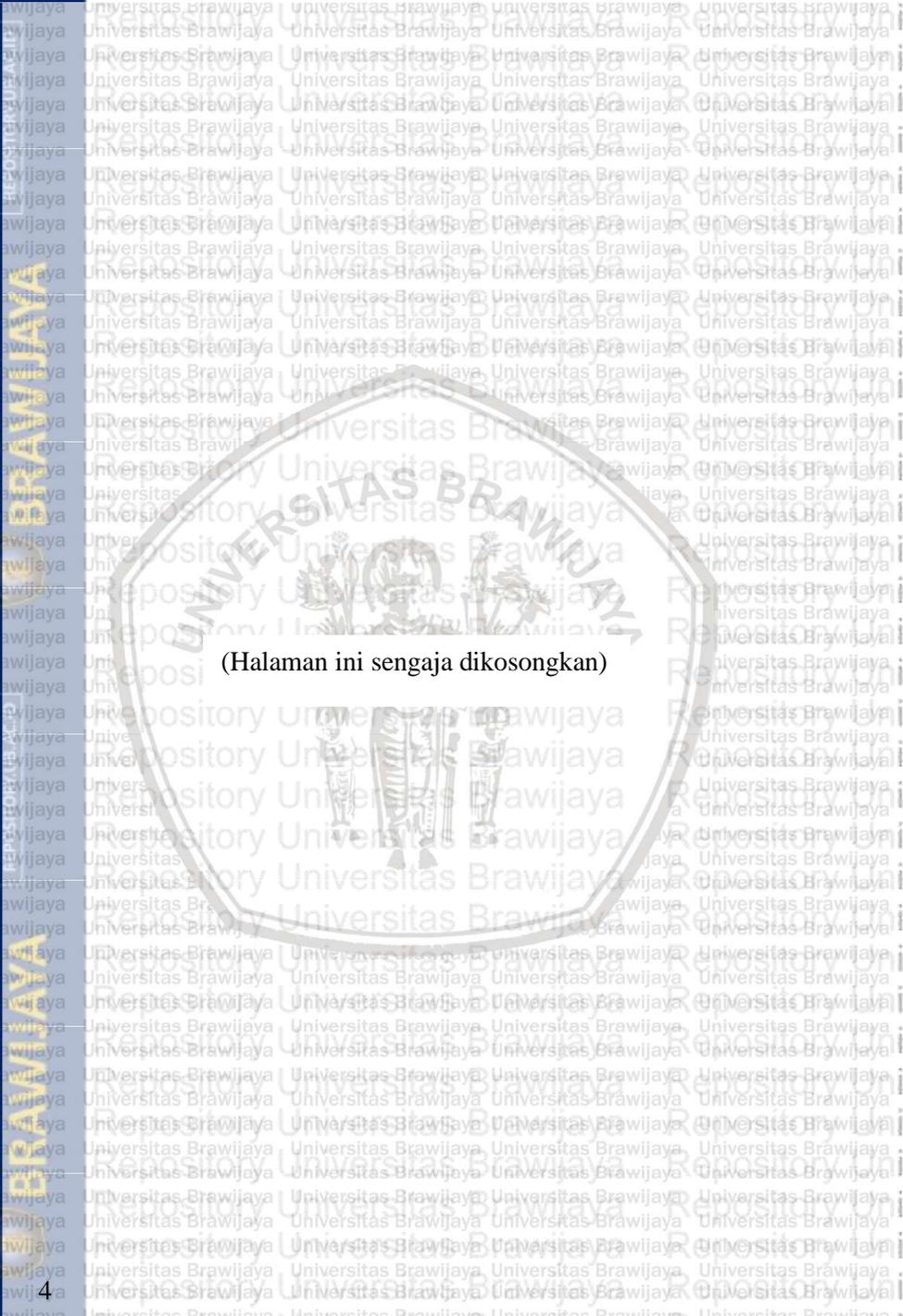
Batasan masalah yang digunakan pada penelitian adalah:

1. Perangkat lunak yang digunakan MolFlow+.
2. Temperatur yang digunakan 20°C dan 100°C.
3. Pengukuran tekanan dilakukan hingga 200 Megahits.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah untuk memberikan informasi mengenai bagaimana pengaruh temperatur terhadap kevakuman akhir sistem vakum evaporasi vakum serta dapat menjadi literatur untuk penelitian selanjutnya.





(Halaman ini sengaja dikosongkan)

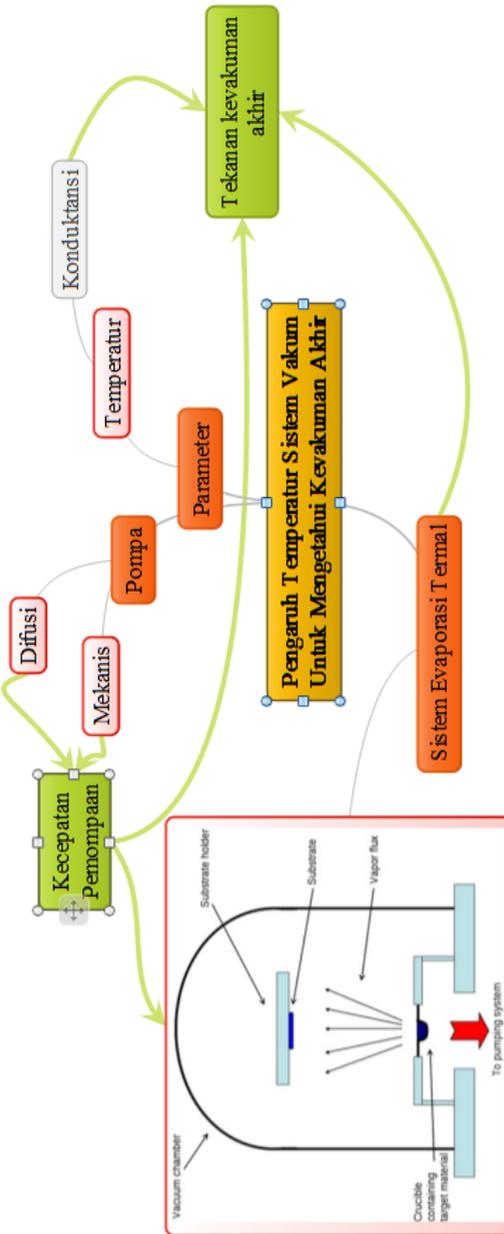
BAB II

METODOLOGI

2.1 Konsep Penelitian

Topik penelitian ini adalah pengaruh temperatur sistem vakum untuk mengetahui kevakuman akhir. Penentuan bahan untuk sistem vakum ini penting karena masing-masing bahan memiliki laju pelepasan gas yang berbeda-beda. Konduktansi dari tabung pada sistem vakum mempengaruhi tingkat kevakuman akhir sistem vakum. Konduktansi dapat digunakan untuk menentukan laju pelepasan gas dari sistem vakum. Pompa yang digunakan yaitu pompa mekanis dan pompa difusi. Kecepatan pemompaan pompa difusi digunakan untuk menentukan tekanan pada daerah kevakuman tinggi. Jika sistem vakum memiliki kecepatan pemompaan yang besar, maka tingkat kevakuman akhir dari sistem vakum akan bernilai lebih kecil. Sedangkan konduktansi tabung memiliki probabilitas transmisi yang sesuai dengan panjang dan besar diameter dari tabung. Jika probabilitas transmisi tabung besar maka partikel akan lebih banyak yang dapat melewati tabung hingga keluar dari tabung tersebut.

Berdasarkan berbagai penjelasan di atas, didapatkan berbagai hal penting yang berkaitan dengan penelitian ini. Hal penting tersebut kemudian dirangkai menjadi sebuah peta konsep dengan menghubungkan satu sama lain. Peta konsep pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Peta konsep penelitian.

2.2 Metode Eksperimen

2.2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Februari hingga Mei 2020. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Plasma dan Material Maju Jurusan Fisika, Universitas Brawijaya dan secara studi literatur yang merujuk pada jurnal-jurnal yang telah diterbitkan dan dilaksanakan pada bulan Juni 2020 di Kota Jakarta.

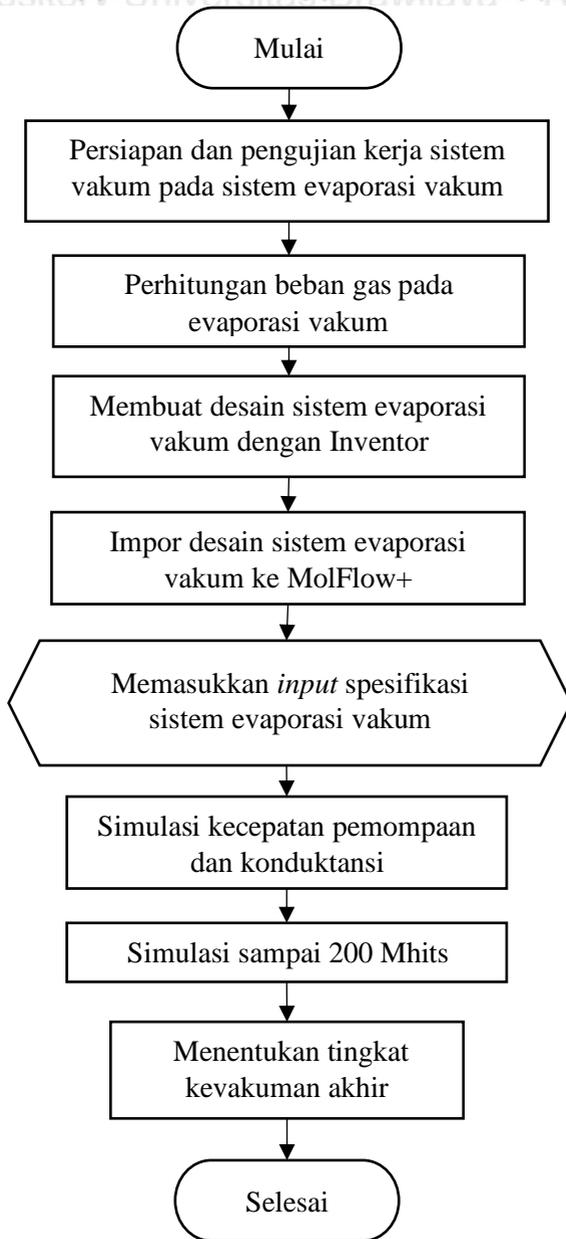
2.2.2 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Kontainer makanan berbahan dasar kaca soda-kapur
2. Batang Baja tahan karat, pipa Leybold
3. Pompa mekanis (*rotary*)
4. Penggaris
5. Multimeter
6. O-ring
7. Seperangkat *pirani gauge*
8. Laptop msi GL62MVR 7RFX

2.2.3 Tahapan Penelitian

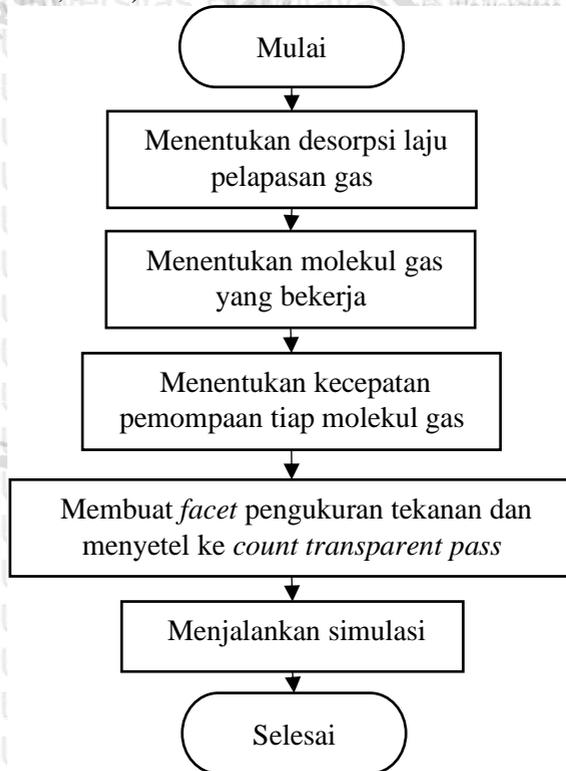
Diagram alir penelitian ini diperlihatkan pada gambar yang terlampir di bawah ini:



Gambar 2.2 Diagram alir penelitian.

2.2.3.1 Persiapan Desain dan Pengujian Sistem Evaporasi Vakum

Desain *chamber* sistem evaporasi vakum pada penelitian ini adalah untuk menguji kemampuan membangkitkan vakum tinggi *chamber*. *Chamber* dibuat dari kontainer makanan berbahan dasar kaca yang terbuat dari soda kapur. Kelebihan dari material berbahan dasar kaca ialah karena memiliki laju pelepasan gas (*outgassing*) yang kecil (Weissler & Carlson, 1979). Dalam sistem vakum tanpa dipanasbersihkan, tekanan parsial didominasi oleh H₂O. Setelah dipanasbersihkan, molekul H₂O biasanya dikeluarkan sehingga komposisi gas utamanya terdiri dari H₂ (Malyshev, 2020).



Gambar 2.3 Diagram alir program Molflow-1.



Pada desain sistem evaporasi vakum material berbahan dasar baja tahan karat dipilih karena cukup untuk menjaga kevakuman di dalam *chamber*. Parameter dari laju pelepasan gas pada material baja tahan karat dengan *chamber* yang belum di dipanasbersihkan dijelaskan dengan Tabel 2.1, sedangkan untuk laju pelepasan gas yang sudah dipanasbersihkan dijelaskan dengan Tabel 2.2.

Tabel 2.1 Laju pelepasan spesifik gas dari beberapa gas untuk baja tahan karat dan aluminium setelah 100 jam pemompaan (Chao et al., 2012).

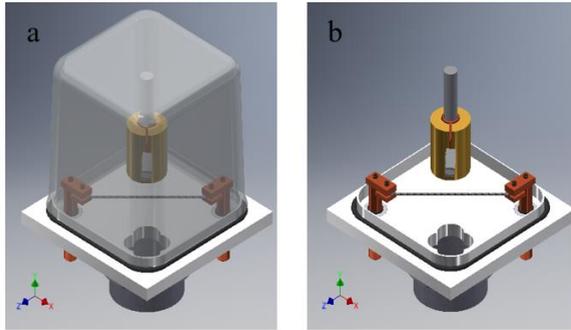
Material	Laju pelepasan gas spesifik (mbar l/s cm ⁻²)				
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ O
Baja tahan karat	9.3x10 ⁻¹²	6.7x10 ⁻¹²	6.7x10 ⁻¹³	6.7x10 ⁻¹³	4x10 ⁻¹⁰
Aluminium	9.3x10 ⁻¹²	6.7x10 ⁻¹²	6.7x10 ⁻¹³	6.7x10 ⁻¹³	4x10 ⁻¹⁰

Tabel 2.2 Laju pelepasan spesifik gas dari beberapa gas untuk baja tahan karat dan aluminium setelah 50 jam dipanasbersihkan pada 150°C (Chao et al., 2012).

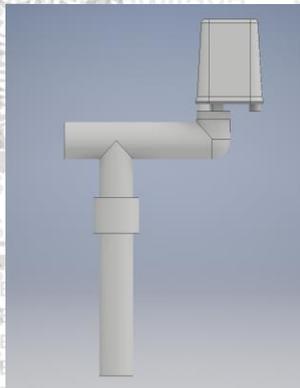
Material	Laju pelepasan gas spesifik (mbar l/s cm ⁻²)			
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄
Baja tahan karat	6.7x10 ⁻¹³	1.3x10 ⁻¹⁴	1.3x10 ⁻¹⁴	6.7x10 ⁻¹⁵
Aluminium	6.7x10 ⁻¹³	1.3x10 ⁻¹⁴	1.3x10 ⁻¹⁴	6.7x10 ⁻¹⁵

Chamber yang telah didesain dapat dilihat pada Gambar 2.5. Desain tersebut menggunakan Inventor untuk pelajar. Pengukuran kecepatan pemompaan di dalam *chamber* menggunakan perangkat lunak MolFlow+. Aplikasi MolFlow+ hanya dapat menghasilkan, memantulkan, dan menyerap molekul pada permukaan (bukan di dalam *chamber*). Desain *chamber* pada Gambar

2.6 yang selanjutnya disederhanakan dan hanya mengukur bagian dalam dari *chamber* tersebut. Gambar dari desain yang telah disederhanakan dapat dilihat pada Gambar 2.7.



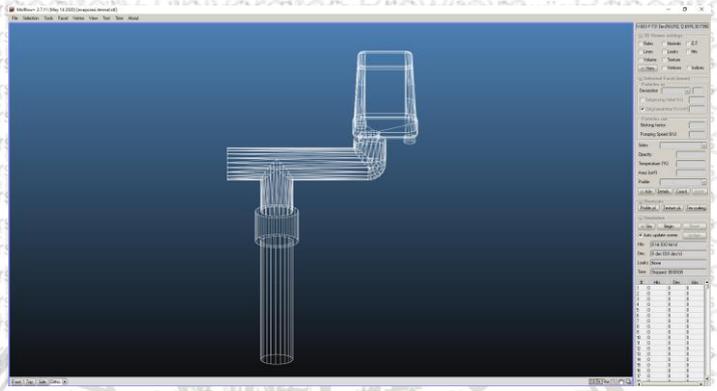
Gambar 2.4 Chamber vakum sistem evaporasi vakum. Tampak luar (a) tampak dalam (b). Komponennya terdiri dari kaca chamber (1); alas chamber (2); jalur perpipaan (3); penyangga substrat (4); elektroda (5); segel (6); dan elemen pemanas (7).



Gambar 2.5 Desain volume sistem evaporasi vakum dengan Inventor.

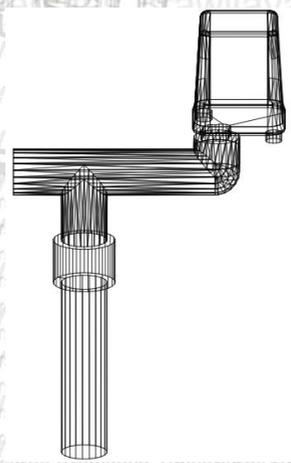
Berikut adalah gambar awal dari sistem evaporasi vakum dalam piranti lunak MolFlow+. Setelah mendesain *chamber*, selanjutnya memberikan berbagai inputan seperti

outgassing, massa molekul gas apa saja yang mempengaruhi, dan memilih *pumping facet* serta *output* dari molekul gas tersebut, sehingga dari data konduktansi serta kecepatan pemompaan dapat dicari.



Gambar 2.6 MolFlow+ interface.

Model *chamber* sederhana yang telah digambar menggunakan aplikasi Inventor 2018 lalu dipindahkan ke dalam MolFlow+ dengan format STL (*Standard Tessellation Language*).

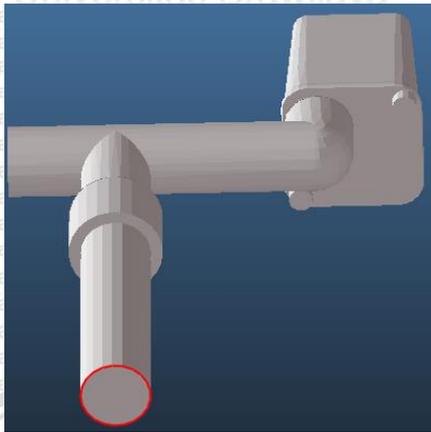


Gambar 2.7 Model sederhana dengan MolFlow+.

MolFlow+ merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh CERN (Organisasi Eropa untuk Riset Nuklir) yang digunakan untuk mengukur tekanan stabil pada volume di tekanan vakum tinggi. Jika lintasan bebas rata-rata dari molekul gas cukup panjang sehingga terbentuk daerah aliran molekuler dan tumbukan antara molekul dapat diabaikan. Untuk dapat menentukan tekanan pada daerah vakum tinggi maka penentuan sampel secara acak dari partikel tertentu pada temperatur tertentu serta pengaruhnya terhadap dinding *chamber* menggunakan metode Monte Carlo. MolFlow+ digunakan untuk mensimulasikan tekanan pada sistem untuk dengan laju pelepasan gas dan kecepatan pemompaan yang telah ditentukan. Jumlah dari tumbukkan antara molekul dengan dinding *chamber* diasumsikan sebagai “*hits*” dalam MolFlow+.

Simulasi dimulai dengan menentukan *facet* pada sumbu X dan sumbu Y dari pipa penghubung *chamber* dengan pompa. Selanjutnya menentukan laju pelepasan gas yang sesuai dengan material baja tahan karat yang digunakan sebagai pipa dari sistem vakum. Setelah ini memilih tekstur dalam MolFlow+ untuk menentukan berapa molekul gas yang dapat diteliti dengan menghitung *transparent pass*. *Transparent pass* berfungsi sebagai *facet* yang berlaku sebagai daerah untuk mengukur tekanan tanpa menghalangi molekul gas yang melewatinya.

Setelah menentukan *facet*, langkah selanjutnya adalah menentukan *facet* pemompaan yang sesuai untuk selanjutnya ditentukan kecepatan pemompaan dan menentukan molekul gas yang digunakan dalam simulasi. Simulasi dilakukan dengan 200 Megahits.



Gambar 2.8 *Facet pemompaan*

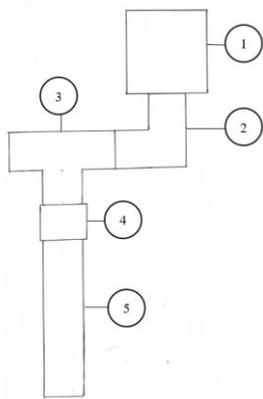
2.2.3.2 Perhitungan Beban Gas

Hal-hal yang perlu dilakukan perhitungan pada saat pemompaan untuk beban gas antara lain jumlah gas yang berada di dalam ruangan (harus dalam keadaan vakum), pelepasan gas, permeasi, kebocoran, dan penguapan. Jumlah gas yang berada di dalam ruang vakum bergantung pada volume dari ruang vakum, yang mana volume dari ruang akan berpengaruh pada waktu yang digunakan untuk pemvakuman awal dengan pompa rotari. Sedangkan pelepasan gas (jumlah gas hasil pelepasan gas dan permeasi) sangat bergantung pada nilai-nilai konstanta yang berhubungan dengan sifat material terhadap pelepasan gas dan luas dinding instalasi sistem vakum. Kemudian, penggunaan material perapat (*seal*) akan mempengaruhi gas yang diakibatkan dari kebocoran. Berbeda dengan gas yang diakibatkan oleh penguapan, hal yang mempengaruhinya adalah jenis material yang berada dalam ruang vakum.

2.2.3.3 Persiapan Desain Sistem Evaporasi Vakum dengan Inventor 2018 dan Simulasi dengan Molflow+

Desain skema sistem evaporasi vakum dapat dilihat pada Gambar 2.5. Desain *chamber* menggunakan Autodesk

Inventor 2018 versi pelajar. Sistem evaporasi vakum terdiri dari sistem vakum dan sistem pemanasan. Sistem vakum meliputi chamber, jalur perpipaian, pompa vakum, dan alat ukur keadaan vakum. Berikut ialah bagian-bagian yang perlu dilakukan perhitungan: *chamber*, *tees* DN 16, *tees* DN 50, pompa difusi, *baffle* DN 50, dan *elbow* DN 50.



Gambar 2.9 Rangkaian sistem evaporasi vakum; 1) chamber, 2) elbow, 3) tees, 4) baffle, 5) pompa difusi.

Sistem pompa mekanis yang digunakan ialah pompa mekanis beraling-baling RZ 6 + FO + VS 16, yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 2.3 Spesifikasi Alat Rotary-vane pump RZ 6 + FO + VS 16.

Data Teknis	Unit	Nilai
Kecepatan pompa (maks) 50/60	m ³ /h	5.7/6.8
Tekanan akhir tanpa gas ballast	mbar	2 x 10 ⁻³

Tekanan akhir dengan $mbar$ 1×10^{-2}
gas ballast

Daya kW 0.3

Kapasitas Oli I 0.34/ 0.65
 (min/max)

Molekul air merupakan gas yang dipompa pada *chamber* bertekanan tinggi. Sedangkan pada *chamber* bertekanan rendah molekul hidrogen yang menjadi kontaminan utama pada tekanan vakum tinggi. Kondisi vakum tinggi akan dihitung untuk gas hidrogen dan menghasilkan tekanan yang disimpulkan sebagai perkiraan dari jumlah dari tekanan parsial atau dapat juga disebut tekanan total. Selanjutnya kecepatan rata-rata dari molekul dihitung untuk dibandingkan dengan data hasil penelitian sebelumnya.

2.2.3.4 Menentukan Profil Tekanan Sistem Evaporasi Vakum

Pengukuran konduktansi diawali dengan menentukan tipe aliran yang berlaku dalam rentang tekanan yang berbeda. Dengan menggunakan Persamaan (3.2), nilai jalur bebas rata-rata dapat dicari, yang digunakan untuk mencari nomor Knudsen. Untuk menentukan tipe aliran maka digunakan persamaan Knudsen yang berada di Persamaan (3.3). Setelah didapat tipe aliran, konduktansi selanjutnya dapat ditentukan. Untuk aliran viskos konduktansi menggunakan Persamaan (3.5), sedangkan untuk aliran molekuler menggunakan Persamaan (3.6). Pada Persamaan (3.5) dibutuhkan parameter dari viskositas dinamik gas yang disajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Parameter berbagai gas (Jousten, 2016).

Gas	Massa molar	Kecepatan termal rata-rata (m/s) pada 20°C	Viskositas dinamik (kg/m s) pada 20°C dan 100 kPa
Hydrogen (H ₂)	2	1754	8.8
Uap air (H ₂ O)	18	585	9
Karbon Dioksida (CO ₂)	44	375	14.6
Karbon Monoksida (CO)	28	-	17.6
Metana (CH ₄)	16	-	10.8

Pengukuran konduktansi pada aliran transisi dan molekuler dapat ditentukan dengan Persamaan (3.6) di mana gas nitrogen merupakan sebagian besar gas yang akan dipompa, sedangkan untuk tekanan yang memiliki nomor Knudsen yang lebih besar dari 0.5, utamanya sebagian besar uap air berada pada daerah tersebut. Persamaan yang digunakan ialah Persamaan (3.9).

Profil tekanan digunakan untuk berbagai kemungkinan situasi *outgassing* sehingga desain sistem akan membutuhkan biaya yang minimum untuk kinerja vakum yang dibutuhkan. Pada bagian *outgassing* seragam, tekanan dan tekanan rata-rata dari panjang tabung *outgassing* seragam dihitung dengan asumsi tidak ada kebocoran pada ruang vakum dan beberapa pompa memiliki jarak yang sama sepanjang tabung. Apabila setiap pompa memiliki kecepatan S_P yang sama, maka profil tekanan antara dua pompa dalam sistem akan simetris. Tekanan akan

menjadi maksimum pada titik setengah diantara dua pompa tersebut. Gas akan mengalir, melewati titik tekanan maksimum sehingga nilainya menjadi nol. Oleh sebab itu, analisis untuk menemukan profil tekanan dapat disederhanakan dengan cara tekanan yang berada dalam tabung panjang *outgassing* seragam dipompa pada satu ujung (Welch, 1973).

2.2.3.5 Menentukan Kevakuman Akhir pada Sistem Evaporasi Vakum

Pada perhitungan kevakuman akhir dibutuhkan beberapa besaran mulai dari konduktansi, beban gas, dan kecepatan pemompaan efektif. Untuk mendapatkan tekanan akhir digunakan Persamaan (3.37).

2.3 Telusur Pustaka

Pada penelitian ini, dilakukan dengan mengumpulkan berbagai jurnal internasional. Pemilihan jurnal tersebut berdasarkan keterkaitan antara pembahasan dari jurnal dengan topik pada penelitian ini. Dari jurnal tersebut, didapatkan berbagai data yang dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Pemetaan Data

No	Judul	Data	Metode Percobaan	Lain-lain
1	<i>The pressure profile in a long outgassing vacuum tube</i> (Welch, 1973)	<ul style="list-style-type: none"> Kurva distribusi tekanan dalam pipa panjang dengan laju pelepasan gas sama dan satu pompa Lampiran 9 	<ul style="list-style-type: none"> Gambar rangkaian Lampiran 8 Parameter 1. Tabung baja nirkarat dengan diameter 5.7 cm dan panjang 50 m 	<ul style="list-style-type: none"> Karakterisasi konduktansi lebih dapat diandalkan daripada laju kenaikan tekanan dalam mencari laju pelepasan gas

		<ul style="list-style-type: none"> • Tekanan total dengan laju pelepasan sama dalam tabung panjang Lampiran 10 	<ol style="list-style-type: none"> 2. Tekanan rata-rata 5×10^{-7} torr 3. Tekanan pompa 10^{-7} torr 4. Desorpsi termal 5×10^{-12} torr l/s cm^2 5. Kecepatan pemompaan 10 l/s <ul style="list-style-type: none"> • Prosedur <ol style="list-style-type: none"> 1. Menentukan profil tekanan pada pipa 50 m dan diameter 5.7 cm 2. Menentukan pemompaan akhir dan selama panasbersih 3. Dilakukan karakterisasi laju kenaikan tekanan dan konduktansi 	
2	<p><i>Calculation of pressure distribution</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kurva hubungan tekanan dan jarak dalam 	<ul style="list-style-type: none"> • Gambar rangkaian Lampiran 13 • Parameter 	<ul style="list-style-type: none"> • Konduktansi gas dan konduktansi termal

	<p><i>in vacuum systems using a commercial finite element program</i> (Howell et al., 1991)</p>	<p>tabung sepanjang 5 m dan diameter 10 cm Lampiran 14</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tabung dengan diameter 10 cm dan panjang 5 m 2. Kecepatan pemompaan 30 l/s 3. Desorpsi termal 3×10^{12} torri/scm² 4. Temperatur 293 K <ul style="list-style-type: none"> • Prosedur 	<p>berpengaruh pada daerah vakum tinggi</p>
<p>3</p>	<p><i>Simulation of the pressure profiles of the PETRAIII</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kurva tekanan dan jarak dari sistem simulasi dengan 	<ul style="list-style-type: none"> • Gambar rangkaian Lampiran 15 • Parameter <ol style="list-style-type: none"> 1. Lintasan bebas rata- 	<ul style="list-style-type: none"> • Kecepatan pemompaan pompa ion tidak mampu untuk evakuasi

	<p><i>frontends</i> (Amann et al., 2008)</p>	<p>desorpsi termal Lampiran 16</p>	<p>rata 6400 cm pada 10⁻⁶ mbar 2. Diameter pipa 4 cm 3. Desorpsi termal 8x10⁻¹¹ mbarl/s cm²</p> <ul style="list-style-type: none"> • Prosedur <ol style="list-style-type: none"> 1. Memodelkan sikrotron PETRA III 2. Menentukan distribusi tekanan dalam PETRA III 3. Membandingkan tekanan akhir dengan pompa yang berbeda 	<p>beban gas yang diharapkan pada awal operasi sistem</p>
4	<p><i>Application of the Monte Carlo method to pressure calculation</i> (Suetsugu, 1996)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Kurva ketergantungan tekanan waktu dengan menggunakan ADL dan tanpa ADLs. Lampiran 17 • Distribusi tekanan 	<ul style="list-style-type: none"> • Gambar rangkaian Lampiran 19 • Parameter <ol style="list-style-type: none"> 1. Panjang total garis balok 12,1 m. 2. Salah satu garis balok digantikan dengan ADL 	<ul style="list-style-type: none"> • Metode perhitungan Monte Carlo sangat berguna untuk memperkirakan variasi waktu dari distribusi tekanan dalam



dengan waktu kondisi mantap (*steady-state*)
Lampiran 18

sepanjang 1,1 m.
3. Diameter luar tabung dan lubang sebesar 500 x 500 mm².
4. Kecepatan pompa dengan *aperture* 33 x 33 mm².
5. Temperatur 293 K.
6. Jumlah massa molekul gas 29 (udara).
7. Kecepatan molekul 461 m/s.
8. Tekanan dasar dari garis balok diasumsikan sebesar 1 x 10⁻⁸ Pa.

- Prosedur
- 1. Memodelkan perambatan tekanan dalam aliran molekul sepanjang garis balok

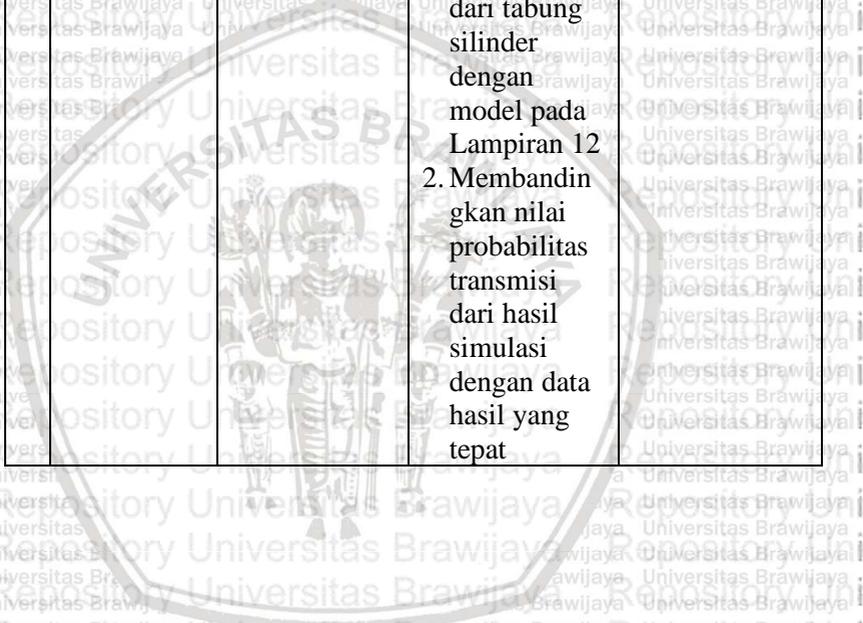
sistem vakum dengan struktur yang rumit dan sulit didapat konduktansi akurat dalam aliran molekuler.

			<p>sepanjang garis balok dengan waktu yang berbeda-beda</p> <p>6. Menghitung distribusi tekanan dalam keadaan <i>steady-state</i> di sistem vakum.</p>	
5	<p><i>Introduction to MOLFLOW+: New graphical processing unit-based Monte Carlo code for simulating molecular flows and for calculating angular coefficients in the compute unified device architecture environment</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tabel perbandingan probabilitas transmisi antara simulasi dan data hasil yang tepat. Lampiran 11 • Hasil simulasi MOLFLOW+ pada tabung silinder TPMC Lampiran 12 	<ul style="list-style-type: none"> • Gambar rangkaian Lampiran 12 • Parameter <ol style="list-style-type: none"> 1. Metode untuk menghitung probabilitas transmisi pada tabung silinder adalah metode TPMC. 2. Kecepatan pemompaan 150 l/s 3. $Hits = 10^{11} hits$. 4. Probabilitas transmisi 	<ul style="list-style-type: none"> • Dalam metode TPMC, kecepatan berbanding lurus dengan jumlah CPU dan kecepatan jam.



mt
(Kersevan
& Pons,
2009)

dari poligon
dengan sisi:
 $50 = 0.190$
 807
 $25 = 0.190$
 222
• Prosedur
1. Menghitung
probabilitas
dari tabung
silinder
dengan
model pada
Lampiran 12
2. Membandin
gkan nilai
probabilitas
transmisi
dari hasil
simulasi
dengan data
hasil yang
tepat





(Halaman ini sengaja dikosongkan)





BAB III

PEMBAHASAN

3.1 Tinjauan Teori Dasar

3.1.1 Vakum

Vakum adalah suatu istilah yang digunakan untuk menunjukkan volume atau suatu ruang yang tekanannya kurang dari tekanan atmosfer. Semakin kecil tekanan di dalam sistem vakum, maka semakin besar tingkat vakumnya.

Tabel 3.1 Faktor Konversi untuk Unit Tekanan.

Unit	Torr	Pascal (N/m ²)	Bar	Atmosfir (Standar)
1 torr	1	1.33x10 ²	1.33x10 ⁻³	1.31x10 ⁻³
1 pascal	7.50 x 10 ⁻³	1	10 ⁻⁵	9.86x10 ⁻⁶
1 bar	7.50 x 10 ²	10 ⁵	1	0.986
1 atmosfer	760	1.013x10 ⁵	1.013	1

Dalam sistem vakum, atom gas atau molekul mengalami gerakan acak, akan tetapi konsentrasi dan tekanan yang berada di dalam sistem tersebut tetap (Hoffman et al., 1998).

Tabel 3.2 Jangkauan Vakum (O’Hanlon, 2003).

Derajat Kevakuman	Jangkauan Tekanan (Pa)
Rendah	10 ⁵ > P > 3.3x10 ³
Sedang	3.3x10 ³ > P > 10 ⁻¹
Tinggi	10 ⁻¹ ≥ P > 10 ⁻⁴
Sangat tinggi	10 ⁻⁴ ≥ P > 10 ⁻⁷
Ultra tinggi	10 ⁻⁷ ≥ P > 10 ⁻¹⁰
Ultra tinggi ekstrim	10 ⁻¹⁰ > P

Pada tingkat derajat kevakuman rendah dan sedang, jumlah dari molekul dalam *chamber* vakum pada fase gas lebih

besar jika dibandingkan dengan molekul yang menyelubungi permukaan *chamber*. Dengan demikian pemompaan berfungsi untuk mengeluarkan molekul pada fase gas. Daerah vakum tinggi merupakan keadaan di mana molekul gas berada pada permukaan tertutup dan lintasan bebas rata-rata sama atau melebihi dimensi *chamber* vakum. Molekul yang berada dalam ruang vakum tinggi bergerak tanpa bertumbukan dengan molekul lain. Jadi, pada daerah vakum ini, pemompaan terdiri dari pengeluaran dan penangkapan molekul-molekul gas (Hoffman et al., 1998).

Berdasarkan tekanan total hukum Dalton P dari campuran gas yang tidak bereaksi adalah sama dengan jumlah tekanan parsial P_n tiap molekul gas. Dengan metode yang sama untuk semua campuran gas, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

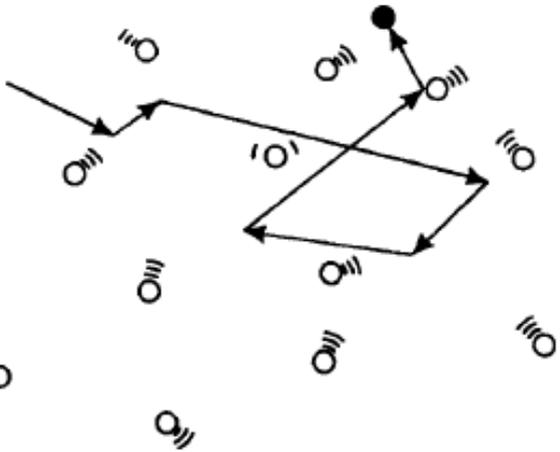
$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots \quad (3.1)$$

Hubungan antara tekanan dan densitas menggunakan Persamaan (3.1) yang sesuai untuk tekanan di bawah atmosfer (O'Hanlon, 2003).

Lintasan bebas rata-rata λ merupakan jarak rata-rata yang dapat dilalui oleh partikel sebelum bertumbukan dengan partikel lainnya, maka akan berlaku persamaan berikut ini:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi p d^2} \quad (3.2)$$

di mana k merupakan konstanta Boltzmann ($k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K), p merupakan tekanan gas dan d merupakan diameter kinetik gas dari molekul.

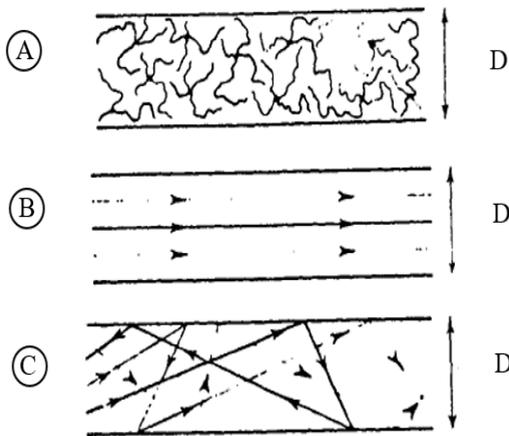


Gambar 3.1 Lintasan suatu molekul (O'Hanlon, 2003).

Sistem vakum akan melewati beberapa jenis aliran gas untuk sampai pada keadaan vakum tinggi. Jenis dari aliran gas dapat ditentukan oleh nomor Knudsen menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Kn = \frac{\lambda}{D} \quad (3.3)$$

di mana D merupakan diameter dari pipa yang dilewati gas. Nilai dari nomor Knudsen dapat dikategorikan menjadi 3 jenis aliran gas. Aliran viskos yang memiliki tingkat kevakuman yang rendah dan memiliki nomor Knudsen di bawah 0.01. Tingkatan kevakuman sedang merupakan daerah dari aliran transisi, di mana nomor Knudsen berada di antara 0.01 dan 0.5. Nomor Knudsen yang berada di atas $Kn = 0.5$ merupakan aliran molekuler dan terjadi pada tingkat vakum tinggi (Naik, 2018).



Gambar 3.2 Aliran viskos (a), aliran transisi (B), dan aliran molekuler (C) (Hoffman et al., 1998).

Molekul gas yang tertutup dalam *chamber* yang bertabrakan sepenuhnya secara acak satu sama lain. Energi dan impuls ditransmisikan dalam proses. Distribusi kecepatan dan energi kinetik yang terjadi merupakan hasil dari proses transmisi (O’Hanlon, 2003).

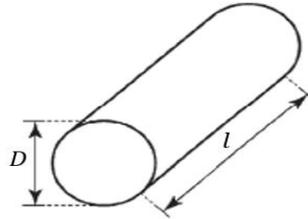
Pembangkitan vakum digunakan dalam proses evaporasi vakum yang mana berguna untuk menghasilkan suatu lintasan bebas rerata (*mean free path*) yang panjang untuk proses tumbukan antara target yang diupayakan dengan substrat dan serta untuk mengurangi tingkat kontaminasi gas (Mattox, 1998).

Laju alir gas Q (*throughput*) merupakan gas yang melewati suatu ruang tertentu per satuan waktu. Nilai dari laju alir pada lubang masuk sebanding dengan lubang keluar, yang mana ditunjukkan oleh persamaan matematis berikut:

$$Q = pS \quad (3.4)$$

di mana S merupakan kecepatan pemompaan dan p merupakan tekanan gas (Jousten, 2016).

Konduktansi C merupakan fungsi geometri sederhana untuk gas tertentu pada suhu tertentu. Konduktansi pada aliran molekuler tidak bergantung pada tekanan. Jika lintasan bebas rata-rata dari gas kurang dari ukuran sistem penampang yang dilewati gas, maka konduktansi akan bergantung pada tekanan.

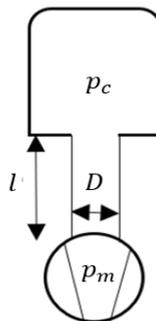


Gambar 3.3 Pipa penampang lingkaran (Jousten, 2016).

Konduktansi dengan penampang lingkaran panjang dapat diketahui menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{\pi}{128} \frac{1}{\eta} \frac{D^4}{l} \left(\frac{p_1 + p_2}{2} \right) (p_1 - p_2) \quad (3.5)$$

di mana p_1 dan p_2 merupakan tekanan pada akhir pipa, l merupakan panjang pipa, D merupakan diameter dari pipa, dan η merupakan viskositas dinamik dari gas (Jousten, 2016).



Gambar 3.4 Sistem vakum dengan garis pemompaan antara chamber vakum (tekanan p_c) dan pompa (tekanan p_m).

Pada kondisi aliran molekuler di dalam pipa lingkaran, konduktansi untuk molekul gas udara dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{\bar{c}}{4} AP = 11.77 \times r^2 \times \pi \times P \quad (3.6)$$

di mana \bar{c} merupakan kecepatan termal dari gas, A merupakan luas penampang dari pipa dan P merupakan probabilitas transmisi (probabilitas dari molekul yang memasuki pipa dan meninggalkan pipa pada akhir pipa) yang besarnya bergantung pada geometris dari komponen. Nilai daya hantar saluran untuk molekul atau atom menumbuk dinding sebelum belokan pada aliran molekuler dengan penampang aliran lingkaran ditentukan dengan persamaan berikut

$$C_1 = 3.81 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \left(\frac{D^3}{L_1 + L_2 + 1.33D} \right) \quad (3.7)$$

Sedangkan untuk molekul atau atom bergerak lurus kemudian menumbuk dinding setelah belokan sehingga terpantul setelah melalui belokan

$$C_2 = 3.81 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} \left(\frac{D^3}{L_1 + L_2} \right) \quad (3.8)$$

Konduktansi untuk molekul gas yang lain dapat ditentukan menggunakan konversi dari konduktansi udara, menggunakan persamaan berikut:

$$C_{\text{gas}} = \frac{C_{\text{udara}}}{\sqrt{\frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{gas}}}}} \quad (3.9)$$

Aliran gas pada saat evakuasi dari *chamber* melewati tabung menuju pompa, ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\Delta p = p_c - p_m \quad (3.10)$$

Ketika konduktansi bergabung secara seri, maka konduktansi sistem dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{1}{C_{sistem}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (3.11)$$

di mana C_{sistem} memiliki nilai yang lebih kecil daripada konduktansi individu. Ketika konduktansi terhubung secara paralel, maka konduktansi dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$C_{sistem} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (3.12)$$

Konduktansi keseluruhan terbatas karena terdapat daerah berbentuk cincin antara sambungan pipa (Jousten, 2016).

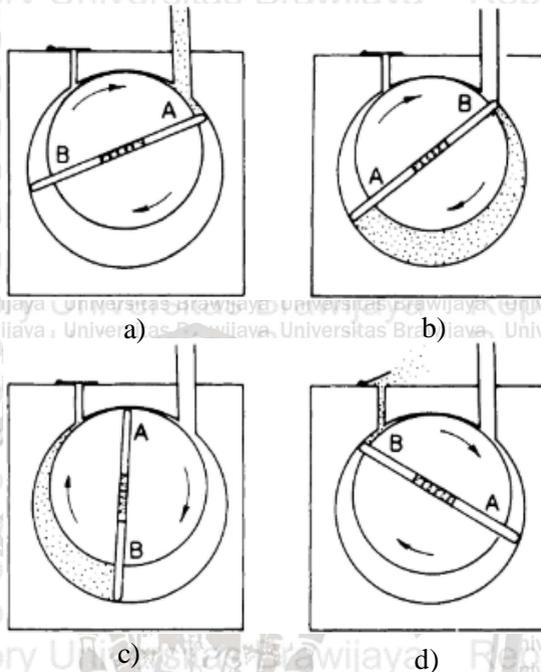
Daya hantar saluran sangat mempengaruhi laju pemompaan di dalam sistem vakum untuk menghasilkan tingkat kevakuman akhir dan waktu yang diperlukan. Gabungan dari laju pemompaan pompa atau kemampuan pompa (*pumping speed*) dengan daya hantar saluran akan menghasilkan laju pemompaan efektif. Laju pemompaan efektif adalah laju pemompaan pada sistem vakum yang menentukan pencapaian tingkat kevakuman akhir maupun waktu yang dibutuhkan. Besar laju pemompaan efektif (S_{ef}) dapat dituliskan

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C} \quad (3.13)$$

dengan S_{ef} adalah laju pemompaan efektif, S merupakan laju pemompaan pompa yang digunakan, dan C merupakan daya hantar secara keseluruhan yang menghubungkan antara pompa dengan sistem yang divakumkan (Jousten, 2016).

3.1.2 Pompa Vakum

Kondisi vakum tinggi dicapai dengan menggunakan 2 tipe pompa: pompa transfer gas dan pompa pengikat gas. Pompa transfer gas dibagi menjadi pompa pemindahan positif dan pompa dengan konversi dari fase gas ke padatan (Naik, 2018).



Gambar 3.5 Prinsip kerja pompa mekanis berbaling-baling:
 (a) Sistem yang akan mulai dipompa (b) Tekanan dalam pompa dan sistem sama (c) Tekanan dalam pompa menurun
 (d) Gas teremisi lewat *outlet* pompa (Roth, 1990).

Pompa mekanis merupakan pompa pemindahan positif yang digunakan untuk mengeluarkan sebagian besar udara pada tekanan atmosfer dari sistem ke tingkat vakum yang lebih tinggi. Pompa perpindahan positif yang paling banyak digunakan yaitu pompa mekanis berbaling-baling putar. Batas tekanan rendah pompa ini diatur oleh tekanan uap oli, *outgassing*, dan kebocoran sekitar segel (Naik, 2018).

Baling-baling pada pompa rotari terdiri dari 2 baling-baling. Saat kedua baling-baling tersebut berputar menyebabkan volume gas pada saat 1 rotasi dari rotor adalah sama dengan perpindahan oleh pompa. Maka tingkat volume

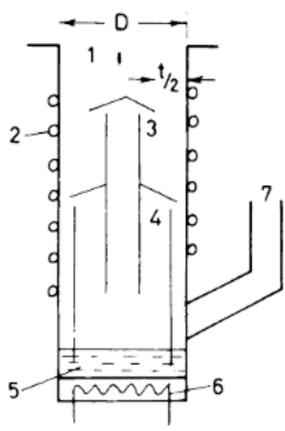


pada saat gas terdorong oleh pompa disebut sebagai pompa perpindahan S_t diberikan oleh persamaan berikut

$$S_t = 2Vn \quad (3.14)$$

di mana V merupakan volume antara baling-baling A dan B , n merupakan jumlah putaran per satuan waktu (rpm) (Roth, 1990).

Pompa difusi merupakan penunjang dari teknologi kevakuman tinggi. Pompa difusi terdiri dari badan pendingin dengan pemanas pada bagian bawah yang mengandung oli. Oli yang dipanaskan menyebabkan evaporasi. Uap oli dengan tekanan tinggi dipaksa melewati rakitan jet dipasang di dalam tubuh pompa. Uap tersebut mengalir dengan kecepatan supersonik. Difusi dari molekul gas melewati jet mengenai dinding untuk mencegah aliran uap memperluas. Pompa pendukung mengeluarkan muatan gas yang dipompa agar dibuang ke atmosfer (Naik, 2018).



Gambar 3.6 Pompa difusi (Roth, 1990).

Pada pompa difusi, uap oli terbang ke cerobong dan dibelokkan dengan nosel yang berada pada puncak cerobong. Molekul dari aliran uap bertumbukan dengan molekul gas yang



masuk melalui sambungan *inlet*. Dengan jalur bebas rata-rata λ dari molekul gas yang lebih besar dari lebar tekak (jarak nosel, $t/2$), maka interaksi antara gas dan uap berdasarkan difusi. Kecepatan pemompaan dari pompa difusi ditentukan oleh diameter *inlet* dan faktor Ho. Daerah dari inlet A (cm²) ditentukan dari persamaan berikut

$$A = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D-t)^2}{4} \quad (3.15)$$

di mana D merupakan diameter *inlet*. Faktor Ho H merupakan rasio antara kecepatan pemompaan pada pompa dan laju aliran maksimum. Kecepatan pemompaan dengan $H = 0.4$ dan $t = D/3$ untuk udara pada temperatur ruang dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$S = 2D^2 \quad (3.16)$$

Kecepatan pemompaan tersebut mengikuti diameter pompa difusi (Roth, 1990).

Waktu pemompaan adalah waktu yang diperlukan untuk menurunkan tekanan dari tekanan awal menjadi tekanan akhir. Untuk waktu pemompaan pada aliran viskos dan aliran transisi dengan asumsi laju pemompaan tetap selama proses pemompaan walaupun sesungguhnya dipengaruhi akibat penurunan tekanan selama pemompaan, sedangkan waktu pemompaan pada aliran molekular dipengaruhi oleh perubahan tekanan (kevakuman) juga dipengaruhi oleh perubahan beban (jumlah gas yang dipompa). Hal ini disebabkan oleh perubahan tekanan akan menyebabkan perubahan laju pelepasan gas (*outgassing*), laju permeasi, laju kebocoran, dan laju penguapan. Persamaan (3.17) merupakan waktu pemompaan untuk aliran viskos, sedangkan Persamaan (3.18) untuk aliran molekular.

$$t = \frac{V}{S_{ef}} \ln \frac{P_0}{P} \quad (3.17)$$

dan



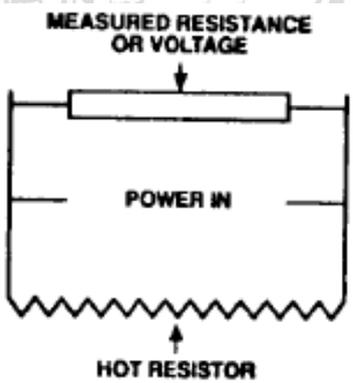
$$t = \left(\frac{v}{S_{ef}}\right) \left[1 + \frac{S_{ef}}{C}\right] \ln \frac{P_0 - P_u}{P - P_u} \quad (3.18)$$

dengan t waktu yang diperlukan untuk memvakumkan, S_{ef} laju pemompaan efektif, P_0 tekanan awal, P tekanan yang dicapai pada waktu (t), S laju pemompaan pompa, C konduktansi, dan P_u tekanan akhir yang dapat dicapai (Roth, 1990).

3.1.3 Pengukuran Tekanan

Pengukuran tekanan gas dapat ditentukan dengan menggunakan *gauge*. Keluaran alat pengukur vakum sering digunakan untuk mengontrol berbagai aspek pemrosesan evaporasi vakum seperti waktu untuk *crossover* dari *roughing* hingga pemompaan vakum tinggi dan kapan memulai evaporasi vakum. Pengukur vakum hanya dapat mengukur lingkungan di sekitarnya (Mattox, 1998).

Alat ukur tekanan yang digunakan pada sistem ini yaitu *pirani gauge* buatan Pfeiffer Vacuum. Prinsip operasi *pirani gauge* didasarkan pada ketergantungan pada konduktivitas termal (Mattox, 1998).



Gambar 3.7 Konfigurasi *pirani gauge* (Mattox, 1998).

Daerah pengukuran *pirani gauge* berada pada jarak tekanan antara $3 \times 10^{-2} - 10^{-5}$ Pa, sehingga cukup untuk membaca

tekanan pada lingkungan orde vakum sedang hingga tinggi (Pfeiffer, 2005).



Gambar 3.8 Pirani gauge

Multimeter digunakan untuk membaca tegangan yang kemudian dikonversi menjadi tekanan menggunakan persamaan sebagai berikut ini:

$$p = 10^{(U-c)} \quad (3.19)$$

di mana p merupakan tekanan, U merupakan tegangan yang terbaca pada multimeter, dan c (nilainya sebesar 3.5) merupakan konstanta yang nilainya bergantung pada satuan tekanan yang digunakan untuk satuan pascal (Pfeiffer, 2005).

Tabel 3.3 Spesifikasi pirani gauge TPR 280

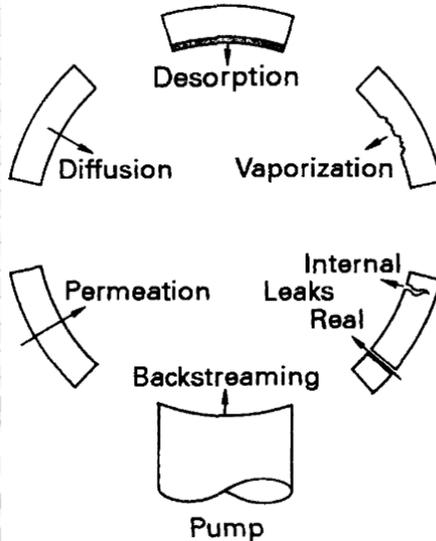
Deskripsi	Satuan	Nilai
Jarak Pengukuran	mbar	$1 \times 10^{-3} - 100$
Bahan yang terkena vakum	-	Baja tahan karat, kaca, tungsten
Temperatur bersih	°C	80

Temperatur Operasi	°C	5 - 60
Koneksi		DN 16 ISO-KF
Berat	kg	0.08

Sensor kawat dipanaskan dikelilingi oleh gas di dalam tabung, sehingga terjadi perpindahan panas dari kawat ke gas. Pada jarak aliran molekul, perpindahan termal sebanding dengan densitas jumlah molekul sehingga pengukuran variasi ketahanan kawat memberikan indikasi perpindahan panas karena dari tekanan (Pfeiffer, 2005).

3.1.4 Pelepasan Gas dari Padatan

Dalam sistem instalasi vakum, pada saat pemompaan dengan pompa mekanis (pompa rotari) bekerja untuk mengeluarkan udara atau gas dari tekanan atmosfer sampai kevakuman maksimum yang dapat dicapai. Pada saat kevakuman mencapai tingkat tertentu gas pada permukaan menambah volume gas yang akan dikeluarkan sehingga menjadi beban gas yang harus dipompa. Gas yang terlarut dan teradsorpsi pada padatan dianggap sebagai pelepasan gas (O'Hanlon, 2003). Beban gas dan uap yang harus dipompa tidak hanya sisa udara atau gas yang dipompa dari tekanan atmosfer, tetapi ditambah beberapa gas yang masuk ke dalam sistem vakum. Beban gas yang ada dalam sistem vakum berasal dari: (1) gas yang ada di dalam sistem sebelum dipompa, (2) gas yang masuk karena adanya kebocoran, (3) gas yang disebabkan adanya pelepasan gas (*outgassing*) dari permukaan bahan, (4) gas yang disebabkan adanya penguapan dari bahan, dan (5) gas yang masuk dengan cara permeasi melalui dinding (Roth, 1990).



Gambar 3.9 Skema beban gas dalam sistem vakum
(O'Hanlon, 2003)

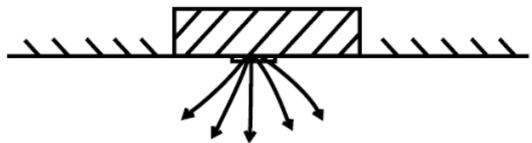
3.1.4.1 Gas Sebelum Dipompa

Pada awal pemompaan beban gas sesuai dengan volume ruangan sistem instalasi sistem vakum itu sendiri dan biasanya mulai dari tekanan atmosfer jika sistem tersebut belum divakumkan, namun jika sudah divakumkan terlebih dahulu tergantung dari tingkat kevakuman yang telah dicapai pada saat sistem akan dipompa (divakumkan) (Roth, 1990).

3.1.4.2 Gas yang Disebabkan Adanya Pelepasan Gas

Peristiwa difusi dari gas ke permukaan desorpsinya dapat menyebabkan pelepasan gas atau yang biasanya merupakan sumber utama kontaminasi gas dalam sistem vakum disebut dengan pelepasan gas (*outgassing*) (Mattox, 1998). Terjadinya difusi gas ketika suatu atom gas atau molekul menempel pada permukaan dinding, setelah dilakukan pemvakuman, molekul-molekul gas tersebut akan keluar serta lepas dari permukaan. Sedangkan peristiwa

desorpsi terjadi ketika atom gas atau molekul-molekul tersebut melekat (menempel) pada permukaan tetapi tidak sampai masuk ke dalam permukaan, yang mana jika dilakukan pemvakuman setelahnya akan menyebabkan atom gas atau molekul-molekul tersebut lepas dari permukaan. Hidrogen adalah gas utama yang dilepaskan oleh logam padat (Mattox, 1998).



Gambar 3.10 Desorpsi pada aliran molekuler (Harsha, 2006).

Tingkat laju pelepasan gas sangat mempengaruhi waktu pemompaan (Jousten, 2016). Jumlah gas yang disebabkan oleh pelepasan gas ini tergantung pada temperatur, bentuk, jenis bahan yang digunakan dan permukaan (Roth, 1990). Laju pelepasan gas K_h setelah waktu pemompaan t_h serta waktu pemompaan diberikan pada persamaan berikut:

$$K_h = K_u + \frac{K_1}{t_h} \quad (3.20)$$

dan

$$t_h^y = t_h^{1/2} - \frac{1}{2} \xi_2^1 \left[1 - \exp\left(\frac{t_h}{2\xi}\right) \right] \quad (3.21)$$

untuk $\xi > 10^4$ detik, nilai t_h^y adalah

$$t_h^y = \frac{\xi}{4} \quad (3.22)$$

dan

$$\xi = \frac{\pi h_0^2}{5,76 \cdot 10^4 D_1} \quad (3.23)$$

Nilai K_1 dan K_u dihitung dengan persamaan berikut:

$$K_1 = \left[\frac{2,79 \cdot 10^{-3}}{3600 \gamma^1} \right] T \varepsilon_0 \left[-\frac{D_1}{\pi} \right]^{1/2} \quad (3.24)$$

dan

$$K_u = 2,79 \cdot 10^{-3} T \left[\frac{D_1 b}{h_0} \right] P_0 \quad (3.25)$$

yang mana K_h merupakan laju pelepasan gas spesifik pada h jam setelah pompa dioperasikan, K_1 merupakan laju pelepasan gas spesifik setelah pompa dioperasikan selama 1 jam, t_h ialah waktu setelah pompa dioperasikan, γ ialah konstanta yang berkaitan dengan bahan ($\gamma = 0,5 - 2$), ξ ialah konstanta waktu difusi, D_1 merupakan koefisien difusi, ε_0 merupakan konstanta gas pada saat $t_h = 0$, T ialah suhu dinding pada saat operasi, $D_1 b$ ialah konstanta permeasi, h_0 ialah tebal dinding, dan P_0 merupakan tekanan parsial gas pada bagian luar dinding. Besar laju pelepasan gas (Q_D) dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$Q_D = q_D \cdot A \quad (3.26)$$

dan $q_D = K_h$, di mana A adalah luas permukaan ruang vakum (Roth, 1990).

3.1.4.3 Gas yang Masuk dengan Cara Permeasi Melalui Dinding

Permeasi merupakan proses gas yang teradsorpsi pada permukaan luar yang memiliki tekanan atmosfer, terdifusi melewati dinding ke permukaan dalam yang divakumkan, dan desorpsi dari dinding permukaan dalam yang memiliki tekanan lebih rendah. Difusi pada tahap kedua disebabkan oleh material dinding mempunyai permeabilitas sehingga memungkinkan molekul-molekul atau atom-atom yang telah larut di permukaan luar dan mempunyai konsentrasi tinggi menembus ke permukaan dalam (O'Hanlon, 2003).

Untuk menentukan laju permeasi, beberapa konstanta diperlukan seperti nilai koefisien difusi, konstanta permeasi, dan konstanta kelarutan. Untuk mendapatkan nilai koefisien

difusi, konstanta permeasi, dan konstanta kelarutan dapat digunakan persamaan berikut:

$$D_1 = (3 \times 10^{-10}) \times \exp(0.0176 \times T) \quad (3.27)$$

sedangkan untuk konstanta permeasi digunakan persamaan sebagai berikut:

$$K = (10^{-11}) \times \exp(0.017 \times T) \quad (3.28)$$

dengan menentukan koefisien difusi dan konstanta permeasi dapat menentukan konstanta kelarutan (b)

$$b = K/D_1 \quad (3.29)$$

Dalam perhitungan besar koefisien difusi (D_1) dan konstanta permeasi (K) ditentukan berdasarkan Tabel 3.4 dan Tabel 3.5.

Tabel 3.4 Koefisien difusi (D_1) gas hidrogen dalam baja tahan karat (Perkins, 1973).

T (°C)	D_1 (cm ² /detik)
200	1.01×10^{-8}
250	2.44×10^{-8}
300	5.89×10^{-8}
350	1.42×10^{-7}
400	3.42×10^{-7}
500	1.99×10^{-6}
600	1.15×10^{-5}

Tabel 3.5 Konstanta permeasi ($D_1 b = K$) untuk gas hidrogen dalam baja tahan karat (Perkins, 1973).

T (°C)	K
200	2.99×10^{-10}
250	7.01×10^{-10}
300	1.64×10^{-9}
350	3.83×10^{-9}
400	8.97×10^{-9}
500	4.91×10^{-8}
600	2.69×10^{-7}

Setelah didapat beberapa konstanta, maka untuk menentukan laju permeasi spesifik (Q_p) dapat menggunakan persamaan matematis berikut:

$$Q_p = q_p A = \frac{D_1 b (P_1^{1/j} - P_2^{1/j}) A}{h} \quad (3.30)$$

di mana $D_1 b$ merupakan kontanta permeasi (K), D_1 merupakan koefisien difusi, b merupakan konstanta kelarutan, P_1 dan P_2 merupakan tekanan di permukaan luar dan dalam, h merupakan tebal dinding, dan j merupakan konstanta desosiasi gas (untuk gas dalam logam $j = 2$ dan untuk semua gas dalam non logam $j = 1$) (O'Hanlon, 2003).

3.1.4.4 Gas yang Masuk karena Adanya Kebocoran

Pada sambungan-sambungan komponen pada sistem vakum dapat terjadi kebocoran gas. Sambungan komponen ini dapat diklasifikasikan menjadi 2, yaitu sambungan yang dapat dilepas dan sambungan yang tidak dapat dilepas. Untuk sambungan dapat dilepas yaitu sambungan dengan perapat (seal) baik dari bahan logam maupun *viton*. Perapat *viton* akan mengalami deformasi elastis sehingga jika sambungan dilepas bentuk perapat tersebut akan kembali ke bentuk semula. Dengan demikian perapat *viton* dapat digunakan berulang-ulang. Besarnya daya hantar pada perapat *viton* dapat ditentukan dengan persamaan

$$C = 4 \left(\frac{T}{M} \right)^{1/2} A^2 \frac{L}{w} \exp \left(-\frac{3F}{LWR} \right) \quad (3.31)$$

dan

$$\kappa = P/R = F/(LwR) \quad (3.32)$$

dengan C konduktansi perapat (liter/detik), M merupakan massa molekul gas, A merupakan luas permukaan, F ialah gaya pengencangan (kg), Lw ialah luas kontak (cm^3), R merupakan faktor perapat, κ ialah indeks pengencangan. Sehingga, besarnya laju kebocoran dengan perapat logam

maupun dengan menggunakan viton untuk beda tekanan udara ΔP dapat dicari dengan persamaan:

$$Q_L = C \cdot \Delta P \quad (3.33)$$

di mana ΔP merupakan beda tekanan antara 2 permukaan dinding dalam dan dinding luar (Roth, 1990).

3.1.4.5 Gas yang Disebabkan Adanya Penguapan

Adanya bahan-bahan yang berada di dalam sistem akan menyebabnya penguapan, yang mana hal ini terjadi akibat ketidakbersihan permukaan. Bisa juga terjadi apabila terdapat bahan yang mudah menguap di dalam sistem pada tekanan rendah, seperti minyak, air, dan sebagainya. Dari persamaan di bawah ini akan diperoleh bebas gas yang diakibatkan oleh peristiwa penguapan:

$$V = \frac{W \cdot N_A \cdot k \cdot T}{M \cdot P} \quad (3.34)$$

dan

$$Q_V = V \cdot A \quad (3.35)$$

di mana V adalah volume gas yang berasal dari peristiwa penguapan, W ialah laju penguapan, N_A merupakan bilangan Avogadro, P ialah tekanan yang ada di ruang vakum, k ialah konstanta Boltzmann, M ialah berat molekul bahan, dan T merupakan suhu ruang vakum (Roth, 1990).

3.1.4.6 Jumlah Gas sebagai Beban Pompa

Setelah mendapatkan nilai dari berbagai beban gas, maka untuk besar beban gas Q_G pada kondisi mantap (*steady state*) dapat diketahui dari persamaan:

$$Q_G = Q_L + Q_D + Q_V + Q_P \quad (3.36)$$

Berdasarkan beban gas dan kecepatan pemompaan efektif, maka tingkat kevakuman akhir (P_u) dapat dicari dengan persamaan matematis sebagai berikut:

$$P_u = \frac{Q_G}{S_{ef}} \quad (3.37)$$

yang mana P_u merupakan tekanan akhir, Q_G ialah beban gas, dan S_{ef} ialah kecepatan pemompaan efektif (Roth, 1990).

3.1.5 Evaporasi vakum

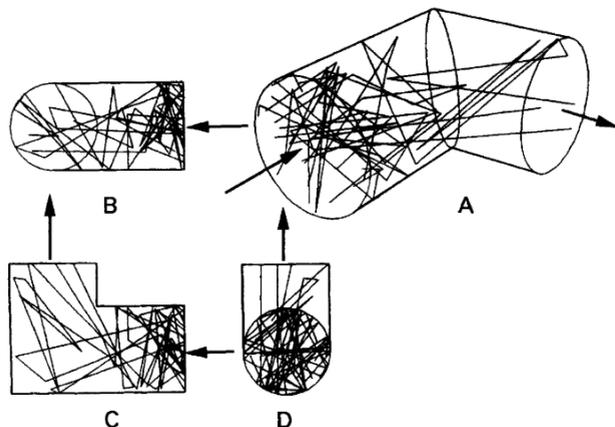
Evaporasi vakum merupakan proses penumbuhan lapisan tipis atau tebal yang dipanaskan di ruang vakum untuk menghasilkan fluks uap material yang diuapkan ke substrat. Bahan yang akan diuapkan biasanya dipanaskan terlebih dahulu hingga tekanan uapnya cukup tinggi untuk menghasilkan laju deposisi yang melebihi tingkat tumbukan dari gas sisanya. Evaporasi vakum tersebut terdiri dari *sputtering*, *ion plating*, arc vakum, dan evaporasi vakum (Naik, 2018). Sedangkan evaporasi vakum merupakan proses di mana material diuapkan pada tekanan yang berada di atas permukaan material berkurang menjadi di bawah tekanan uap material. Material yang menguap akan mencapai substrat tanpa mengalami tumbukan dengan material lain (Naik, 2018).

Evaporasi vakum merupakan proses penguapan material diuapkan dari padatan ke dalam bentuk molekul. Proses evaporasi vakum dapat dilakukan dalam sistem yang sudah vakum atau gas bertekanan rendah. Sistem dengan gas bertekanan rendah mengurangi kontaminasi gas pada deposisi material yang diuapkan. Suhu lebur dan didih dari suatu material juga dapat mempengaruhi keadaan vakum tersebut dikarenakan suhu dan tekanan uap dari suatu material saling berhubungan. Di mana semakin rendah keadaan vakum, semakin rendah pula suhu lebur dan didih suatu material (Mattox, 1998).

3.1.6 Monte Carlo

Metode Monte Carlo merupakan metode statistik yang digunakan untuk mengkalkulasikan konduktansi pada aliran

molekuler. Metode Monte Carlo merupakan algoritma komputasi yang memberikan solusi dari masalah termodinamika suatu material yang sangat sulit ditentukan (Lesar, 2013). Metode Monte Carlo menggunakan komputer untuk mensimulasikan lintasan individu dari sejumlah besar molekul yang dipilih secara acak. Pada gambar di bawah ini dapat dilihat sebuah tampilan grafis komputer yang menunjukkan molekul-molekul yang memasuki siku dalam aliran molekul bebas. Akurasi dari teknik Monte Carlo bergantung pada jumlah lintasan molekul yang dibutuhkan dalam perhitungan (O'Hanlon, 2003).

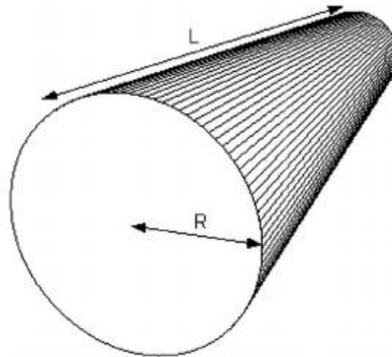


Gambar 3.11 Tampilan grafis komputer dari lintasan 15 molekul yang memasuki siku dalam aliran molekul bebas (O'Hanlon, 2003).

Konduktansi molekuler merupakan produk yang dihasilkan dari probabilitas dan konduktansi dari lubang atau celah yang identik dengan struktur yang digunakan (O'Hanlon, 2003). Program konduktansi molekuler dapat berfungsi untuk melacak lintasan molekul dalam struktur vakum dengan aliran molekul. Pada Gambar 3.12 dapat dilihat struktur *facets* yang

terdiri dari sisi datar yang mana pada setiap sisinya memiliki perekat, transparan, dan bidang. Ciri-ciri dari masing-masing aspek tersebut menentukan partikel yang melewatinya akan dipantulkan, diadsorpsi, diabaikan atau dihitung (Pace & Poncet, 1990).

Program simulasi dengan menggunakan Monte Carlo dapat digunakan untuk melacak setiap partikel uji dengan langkah kecil dari saat memasuki fase gas hingga akhirnya dipompa keluar.



Gambar 3.12 Geometri tabung untuk perhitungan TPMC: 100 sisi persegi panjang facets yang ditambah 2 sisi ujung tutup poligon (Kersevan & Pons, 2009).

Dua sisi ujung tutup pipa memiliki kedua *sticking factor* 1 untuk mensimulasikan tabung yang menghubungkan dua reservoir besar, dan sisi dinding. *Sticking factor* dari program Monte Carlo bervariasi dari 0 hingga 1 (Kersevan & Pons, 2009).

3.2 Pembahasan Penelitian

3.2.1 Hasil Perakitan Sistem Evaporasi Vakum

Berikut adalah desain skema dan desain *chamber* yang telah dibuat oleh Wahyudin pada tahun 2019, dapat dilihat pada

Gambar 3.13. Bahan-bahan yang digunakan oleh Wahyudin merupakan bahan-bahan yang tersedia di Laboratorium Plasma dan Material Maju, Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya.



Gambar 3.13 Sistem evaporasi vakum.

Keseluruhan sistem evaporasi vakum memiliki rangkaian utama yaitu terdiri dari sistem vakum dan sistem pemanasan. Bagian dari sistem vakum antara lain terdiri dari sistem *chamber*, sistem perpipaan, sistem pompa, dan sistem pengukur tekanan. Sedangkan bagian dari sistem pemanas ialah elektroda, penyuplai daya AC, dan jalur kabel.

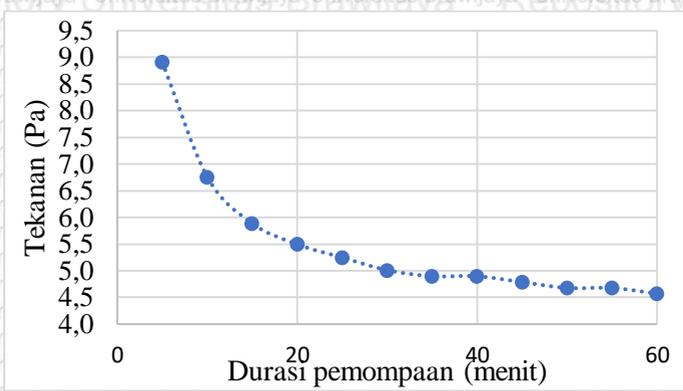
3.2.2 Hasil Pengujian Sistem Evaporasi Vakum

Pengujian sistem vakum dilakukan untuk mengetahui berapa tekanan vakum yang mampu dicapai oleh sistem pada periode waktu tertentu dan untuk mengetahui apakah sistem tersebut mengalami kebocoran. Tiap material memiliki laju kebocorannya masing-masing.

Tabel 3.6 Data hasil pembacaan tekanan sistem evaporasi vakum pada berbagai periode pemompaan.

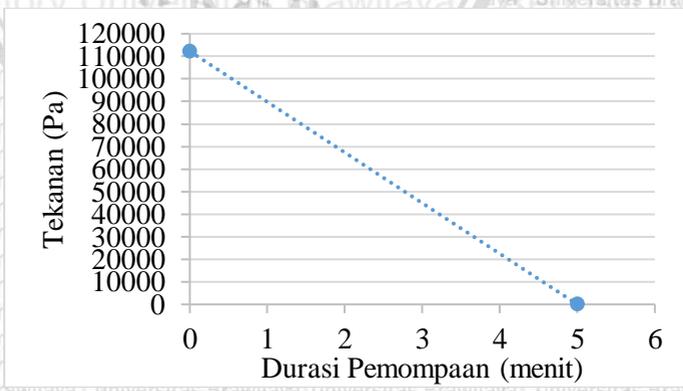
Waktu (menit)	Tegangan (V)	Tekanan (Pa)
0	8.55	112201.85
5	4.45	8.91
10	4.33	6.76
15	4.27	5.89
20	4.24	5.50
25	4.22	5.25
30	4.20	5.01
35	4.19	4.90
40	4.19	4.90
45	4.18	4.79
50	4.17	4.68
55	4.17	4.68
60	4.16	4.57

Hasil pengujian kemampuan sistem vakum ditunjukkan pada Tabel 3.6. Pengujian sistem vakum dilakukan dengan memompa keluar sebagian besar molekul gas yang berada di dalam sistem evaporasi vakum menggunakan pompa *rotary*. Sebelum dilakukan pemompaan, *pirani gauge* pertama-tama dinyalakan dan didiamkan selama 10 menit agar dapat terbiasa membaca tekanan atmosfer juga sebagai kalibrasi alat. Pengukuran tekanan dilakukan dengan mengukur perubahan tegangan yang terbaca pada multimeter, selanjutnya hasil tegangan yang tercatat digunakan untuk menghitung tekanan sistem menggunakan Persamaan (3.17).



Gambar 3.14 Grafik perubahan tekanan *chamber* selama pemompaan dari 5 menit sampai 60 menit.

Hasil perhitungan tekanan dapat digunakan sebagai input dari tekanan yang berada pada piranti lunak MolFlow+. Menurut Tabel 3.6. Pengukuran tekanan menunjukkan tekanan dari 30 hingga 60 menit tidak mengalami perubahan yang signifikan dibandingkan perubahan tekanan dari mulai pemompaan hingga 30 menit. Kemampuan pompa setelah diberikan alkohol pada segel dan sambungan antara pipa yang terhubung tidak menyebabkan kenaikan pada pembacaan tekanan sehingga dapat dikatakan bahwa tingkat kebocoran sangat kecil.

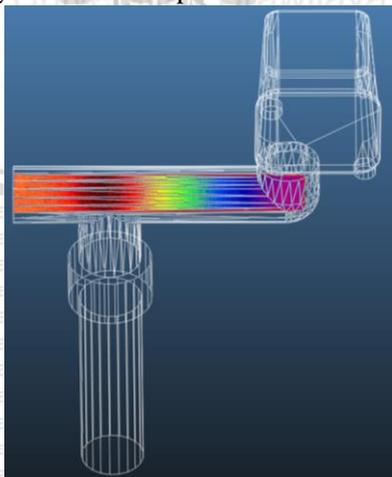


Gambar 3.15 Grafik perubahan tekanan *chamber* selama pemompaan dari 0 menit menuju 5 menit.

Berdasarkan pada hasil pengukuran tekanan pada Tabel 3.6 di atas, maka dipilih tekanan 4,57 Pa sebagai tekanan pada saat pompa *rotary* dilakukan *crossover* dengan pompa difusi pemilihan didasarkan karena tidak adanya perubahan tekanan secara signifikan pada waktu pengosongan setelah 30 menit.

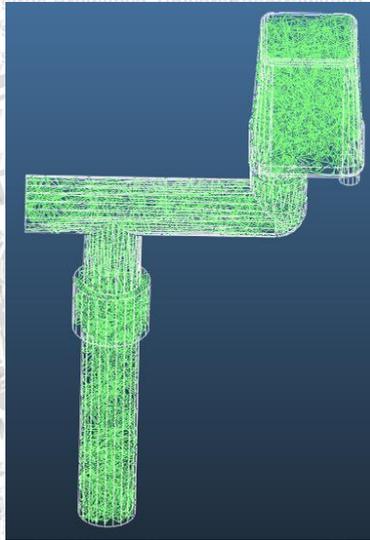
3.2.3 Hasil Perhitungan Profil Tekanan

Dalam MolFlow+, sistem didefinisikan sebagai suatu permukaan poligon datar (*facet*). *Facet* dapat diatur untuk nilai kegelapan (*opacity*) 1 maka molekul tidak dapat melewatinya, sedangkan untuk nilai kegelapan 0 maka molekul dapat bebas melewatinya. Faktor penempelan (*sticking factor*) didefinisikan sebagai rasio dari tingkat di mana partikel yang menempel pada permukaan. Saat tidak ada molekul yang menempel ke permukaan *facet* maka nilai *sticking factor*nya 0. Titik temu antara dua *facet* disebut sebagai sudut (*vertices*). Kumpulan dari banyak sudut dapat disebut dengan puncak (*vertex*). Dengan model geometri sederhana yang telah didesain, kondisi mantap (*steady state*) harus ditentukan laju pelepasan, kecepatan pemompaan, temperatur dan massa molekul. Tiap simulasi dilakukan hanya untuk satu tipe dari molekul.



Gambar 3.16 *Facet* pengukuran pada MolFlow+.

Hasil distribusi tekanan dalam *chamber* dapat dilihat dari Gambar 3.16. *Facet* pengukuran ini harus dua sisi dan transparan untuk memungkinkan molekul melewatinya. Tidak ada tingkat desorpsi yang ditetapkan untuk elemen-elemen ini. Menurut data, secara default kedua permukaan dibagi dalam 100 unit untuk masing-masing nilai tekanan yang disimulasikan.



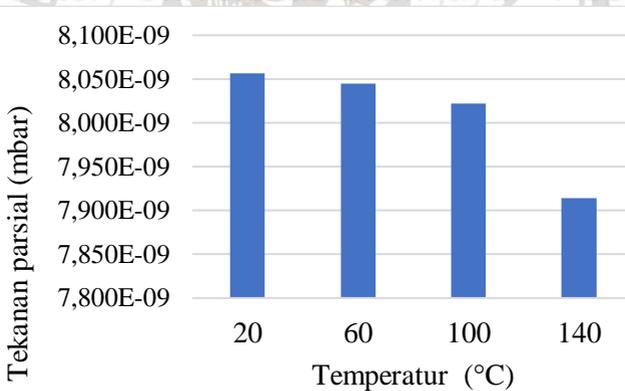
Gambar 3.17 Tumbukan antara molekul gas dengan dinding.

Gas hidrogen merupakan kontaminan utama dalam tekanan vakum tinggi, sehingga tekanan pada vakum tinggi diteliti dengan menggunakan gas hidrogen sebagai perkiraan untuk tekanan total. Laju desorpsi dari gas melewati suatu tabung menghasilkan distribusi kosinus. Distribusi kosinus merupakan kondisi di mana aliran molekuler (tanpa tumbukan antara molekul gas) diukur hanya sebagai interaksi permukaan dengan gas yang berdifusi (Kersevan & Pons, 2009). Laju pelepasan gas untuk baja tahan karat dan aluminium disajikan pada Tabel 2.1.

Empat temperatur yang berbeda dengan kecepatan pemompaan yang sama telah disimulasikan. Laju pelepasan gas profil tekanan molekul H_2 untuk *chamber* yang belum dipanasbersihkan dapat dilihat pada Tabel 3.7. Temperatur konstan sebesar 1.89 l/s ditentukan untuk semua simulasi.

Tabel 3.7 Profil tekanan dari hidrogen pada *chamber* yang belum dipanasbersihkan.

Temperatur (°C)	Profil Tekanan (mbar)
20	8.057×10^{-9}
60	8.045×10^{-9}
100	8.022×10^{-9}
140	7.914×10^{-9}



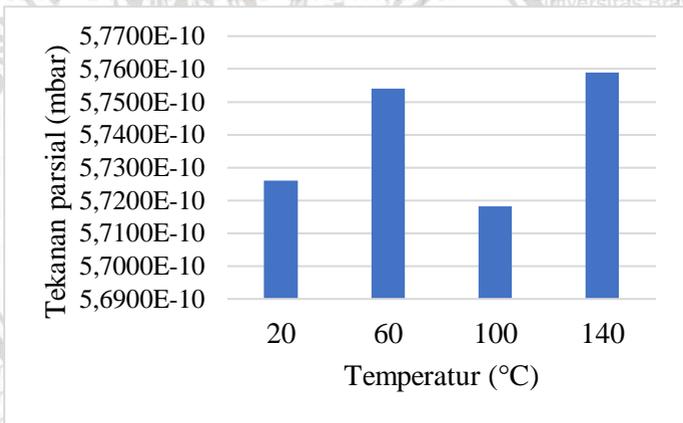
Gambar 3.18 Hasil profil tekanan dengan gas hidrogen pada *chamber* sebelum dipanasbersihkan untuk berbagai temperatur yang berbeda.

Dari hasil profil tekanan gas hidrogen pada *chamber* sebelum dipanasbersihkan dapat dilihat bahwa tekanan mengalami penurunan seiring dengan kenaikan dari temperatur.

Selanjutnya tekanan parsial untuk H₂ pada *chamber* yang telah dipanasbersihkan dapat dilihat pada Tabel 3.8. Profil tekanan tersebut memberikan informasi mengenai tekanan dari molekul hidrogen yang dipompa dengan temperatur yang berbeda.

Tabel 3.8 Profil tekanan dari hidrogen pada *chamber* yang sudah dipanasbersihkan.

Temperatur (°C)	Profil Tekanan (mbar)
20	$5,72 \times 10^{-10}$
60	$5,75 \times 10^{-10}$
100	$5,72 \times 10^{-10}$
140	$5,76 \times 10^{-10}$



Gambar 3.19 Hasil pengukuran tekanan dengan gas hidrogen pada *chamber* setelah dipanasbersihkan untuk berbagai temperatur yang berbeda.

Dari hasil profil tekanan pada *chamber* setelah dipanasbersihkan dapat diketahui bahwa tekanan pada suhu 100 °C merupakan tekanan parsial yang paling rendah untuk sistem evaporasi vakum. Selanjutnya tekanan parsial mengalami kenaikan karena beban gas sudah dalam keadaan yang stabil.

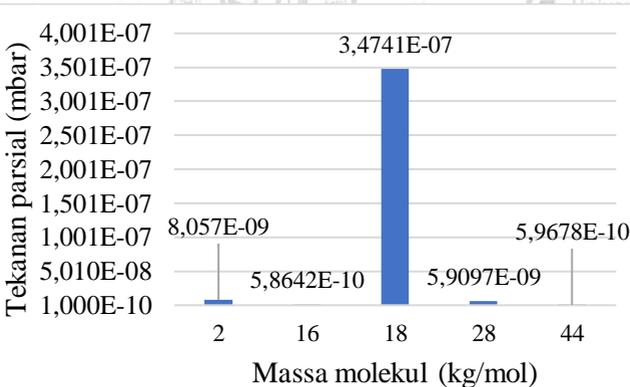
Kecepatan molekul rata-rata dari data simulasi pada Tabel 3.9 kemudian dibandingkan dengan data yang sudah ada pada Tabel 3.5.

Tabel 3.9 Kecepatan molekul rata-rata gas.

Kecepatan molekul rata-rata (m/s) H ₂ pada 20 °C	Kecepatan molekul rata-rata (m/s) H ₂ O 20 °C
1755.17	584.94

Dari kecepatan molekul yang didapat menggunakan MolFlow+ tidak memberikan nilai yang berbeda jauh dengan nilai aslinya yang menunjukkan bahwa MolFlow+ dapat memberikan informasi yang cukup akurat mengenai distribusi molekul gas di dalam ruang vakum yang tekanannya rendah atau sangat rendah.

Beberapa gas kontaminan dari H₂O, CO, CO₂, dan CH₄ juga dihitung untuk mendapatkan tekanan total dari sistem vakum yang telah dipanasbersihkan. Nilai tekanan total diperoleh sebagai jumlah dari tekanan parsial yang diperoleh untuk setiap jenis molekul individu menggunakan data laju pelepasan gas untuk baja tahan karat.

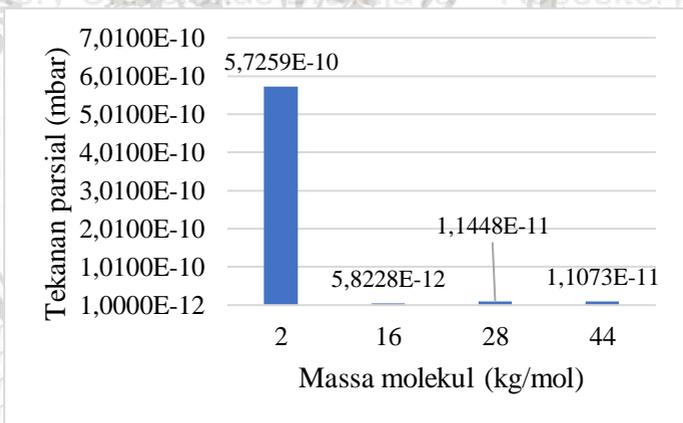


Gambar 3.20 Tekanan parsial gas untuk temperatur 20 °C (*chamber* sebelum dipanasbersihkan).

Tabel 3.10 Tekanan total pada *chamber* sebelum dipanasbersihkan.

Temperatur °C	Total tekanan (mbar)
20	3.626×10^{-7}

Dari Tabel 3.10 dapat dilihat bahwa tekanan total pada *chamber* sebelum dipanasbersihkan sebesar 3.626×10^{-7} mbar. Tekanan parsial molekul hidrogen yang dicapai sistem vakum dapat mencapai kurang dari 10^{-6} mbar, di mana tekanan tersebut sudah berada dalam tekanan vakum tinggi. Selanjutnya dapat dicari tekanan parsial untuk *chamber* yang belum dipanasbersihkan. Tanpa proses panasbersih, beban kontaminan harus diperhitungkan.



Gambar 3.21 Tekanan parsial gas untuk temperatur 20 °C (*chamber* setelah dipanasbersihkan).

Tabel 3.11 Tekanan total pada *chamber* setelah dipanasbersihkan.

Temperatur °C	Total tekanan (mbar)
20	6.009×10^{-10}

Pada tekanan total dari *chamber* setelah dipanasbersihkan, tekanan total yang didapat pada temperatur 20 °C sebesar 6.009×10^{-10} mbar yang mana tekanan vakumnya mencapai tekanan vakum sangat tinggi. Oleh karena itu, sistem vakum memenuhi persyaratan untuk mempertahankan tekanan yang dekat dengan tekanan vakum yang dibutuhkan.

3.2.4 Hasil Perhitungan Beban Gas

3.2.4.1 Hasil Perhitungan Laju Pelepasan Gas

Sebelum menghitung besarnya laju pelepasan gas, maka diperlukan konstanta-konstanta seperti konstanta waktu difusi (ξ), konstanta waktu operasi (t_n), koefisien difusi (D_1), konstanta permeasi (K), dan konstanta pelepasan gas sehingga dapat digunakan untuk menghitung laju pelepasan gas. Dalam perhitungan koefisien difusi (D_1) dan konstanta permeasi ($D_1 b = K$) ditentukan berdasarkan ekstrapolasi pada Tabel 3.4 dan Tabel 3.5. Koefisien difusi ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} D_1 &= (3 \times 10^{-10}) \times \exp(0.0176 \times 293) \\ &= 4,27 \times 10^{-10} \text{ cm/detik} \end{aligned}$$

sedangkan besar konstanta permeasi ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\begin{aligned} K &= (10^{-11}) \times \exp(0.017 \times 293) \\ &= 1,405 \times 10^{-11} \end{aligned}$$

dengan memperoleh nilai koefisien difusi dan konstanta permeasi dapat ditentukan nilai konstanta kelarutan (b) sebesar

$$b = \frac{K}{D} = 3.3 \times 10^{-2}$$

Konstanta waktu difusi untuk tebal dinding $h_0 = 0,3$ cm dihitung dengan menggunakan persamaan matematis sebagai berikut:

$$\xi = \frac{3.14159 \times (0.3)^2}{(5.76 \times 10^4) \times (4.27 \times 10^{-10})} = 1.15 \times 10^4 \text{ detik}$$

karena $\xi > 10^4$ detik, maka konstanta waktu operasi setelah pompa dioperasikan dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$t_h = \frac{1.15 \times 10^4}{4} = 2.88 \times 10^3 \text{ detik}$$

Sedangkan besarnya konsentrasi gas hidrogen untuk bahan *stainless steel* ($0,4 \text{ cm}^3$) pada saat $t_h = 0$ (ϵ_0) dan konstanta yang berkaitan dengan bahan ($\gamma = 1/2$). Kemudian laju pelepasan gas spesifik dapat dicari dengan menggunakan Persamaan (3.22) dan Persamaan (3.23).

$$K_1 = \left(\frac{2.79 \times 10^{-3}}{3600^{1/2}} \right) \times 293 \times 0.4 \left(\frac{4.27 \times 10^{-10}}{3.14159} \right)^{1/2}$$

$$= 6,502 \times 10^{-8} \text{ torr liter/detik cm}^2$$

dan

$$K_u = 2.79 \times 10^{-3} \times 293 \left(\frac{((4.3 \times 10^{-10}) \times 3.3 \times 10^{-2})}{0.3} \right)$$

$$\times 4 \times 10^{-4}$$

$$= 1,53 \times 10^{-14} \text{ torr liter/detik cm}^2$$

dengan persamaan berikut, laju pelepasan gas spesifik ($q_0 = K_h$) dapat dihitung.

$$K_h = 1,53 \times 10^{-14} + \left[\frac{6.502 \times 10^{-8}}{(2.88 \times 10^3)^{1/2}} \right]$$

$$= 1,212 \times 10^{-9} \text{ torr liter/detik cm}^2$$

laju pelepasan gas dengan luas permukaan (A) sehingga terjadinya pelepasan gas sebesar $1,212 \times 10^{-9}$ pada pipa

sambungan DN 50 dapat dicari menggunakan Persamaan (2.23)

$$Q_D = (1,212 \times 10^{-9}) \times 352,23 \\ = 4,27 \times 10^{-7} \text{ torr liter/detik}$$

3.2.4.2 Hasil Perhitungan Laju Permeasi

Sebelum menentukan laju permeasi, dicari terlebih dahulu nilai laju permeasi spesifik (q_p) menggunakan Persamaan (3.28). Konstanta desosiasi $j = 2$ (gas diatomik dalam logam) dan tebal dinding $h = 0,3$ cm.

$$q_p = 1,405 \times 10^{-11} \left[\frac{(760)^{1/2} - (0.03427)^{1/2}}{0.3} \right] \\ = 1,28 \times 10^{-9} \text{ torr liter/detik cm}^2$$

Dari nilai laju permeasi spesifik dapat digunakan untuk mencari besar laju permeasi serta luas permukaan (penyebab terjadinya permeasi) untuk *tees* DN 50 adalah sama dengan luas permukaan yang menyebabkan terjadinya pelepasan gas, yaitu sebesar $352,23 \text{ cm}^2$, sehingga

$$Q_P = 1,28 \times 10^{-9} \times 352,23 \\ = 4,52 \times 10^{-7} \text{ torr liter/detik}$$

3.2.4.3 Hasil Perhitungan Laju Kebocoran

Data flens, perapat (*seal*), indeks pengencangan baut pengikat, dan tinggi puncak diperlukan dalam penentuan nilai dari laju kebocoran yang terjadi pada sambungan. Flens yang digunakan DN 50 KF dengan perapat *viton* $L = 16,65$ cm dan lebar $w = 0,82$ cm. Indeks pengencangan $\kappa = 0,5$ dan tinggi puncak $A = 10^4$ cm. Daya hantar C dapat ditentukan dengan persamaan berikut ini:

$$C = 4 \left(\frac{293}{28} \right)^{1/2} \times (10^{-4})^2 \frac{16,65}{0,3} \times \exp(-3 \kappa)$$

$$= 1.6 \times 10^{-6} \text{ liter/detik}$$

Dengan persamaan di atas, besarnya laju kebocoran dapat ditentukan:

$$Q_L = C \times \Delta P$$

$$= 1.6 \times 10^{-6} \times 760$$

$$= 1,22 \times 10^{-3} \text{ torr liter/detik}$$

Dengan cara yang sama untuk bagian-bagian yang lain dapat dihitung dan hasilnya ditampilkan pada Tabel 3.12.

Selanjutnya ditentukan daya hantar di dalam *elbow* DN 50 dihitung dengan Persamaan (3.7), Persamaan (3.8), dan Persamaan (3.12) sebagai berikut

$$C_1 = 3.81 \left(\frac{293.15}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{5.2^2}{14 + 1.33 \times 5.2} \right)$$

$$= 11.46 \text{ liter/detik}$$

dan

$$C_2 = 3.81 \left(\frac{293.15}{28} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{5.2^2}{14} \right)$$

$$= 17.13 \text{ liter/detik}$$

sehingga

$$C = 11.46 + 17.13 = 28.60 \text{ liter/detik}$$

Konduktansi sangat mempengaruhi laju pemompaan di dalam sistem vakum untuk menghasilkan tingkat kevakuman akhir dan waktu yang diperlukan. Konduktansi juga dipengaruhi oleh tekanan gas. Apabila tekanan gas nilainya semakin kecil, maka konduktansi yang dihasilkan juga akan semakin kecil.

3.2.5 Hasil Kevakuman Akhir

Dari beberapa konstanta yang telah didapatkan pada bagian sebelumnya maka untuk menentukan tekanan kevakuman akhir dari sistem evaporasi vakum dilakukan perhitungan beban gas masing-masing rangkaian yang disajikan pada Tabel 3.12.

Tabel 3.12 Rangkuman hasil perhitungan beban gas yang dipompa dengan temperatur 20 °C.

No	Komponen evaporasi vakum	Q_D (torr l/det)	Q_P (torr l/det)	Q_L (torr l/det)
1	Chamber	6.98×10^{-7}	7.39×10^{-7}	4.44×10^{-3}
2	Elbow DN 50	3.14×10^{-7}	3.32×10^{-7}	1.22×10^{-3}
3	Tees DN 50	4.27×10^{-7}	4.52×10^{-7}	1.22×10^{-3}
4	Pompa Difusi	4.95×10^{-7}	5.23×10^{-7}	1.22×10^{-3}
5	Baffle	1.54×10^{-7}	1.63×10^{-7}	1.22×10^{-3}
Jumlah		2.16×10^{-6}	2.29×10^{-6}	9.68×10^{-3}
Jumlah beban gas (Q_G)		9.31×10^{-3} (torr liter/detik)		

Setelah diketahui beban gas pada temperatur 20 °C, maka dapat ditentukan untuk temperatur 100 °C. Untuk temperatur 100 °C, jumlah pelepasan gas (Q_D) sebesar $8,55 \times 10^{-6}$ torr liter/detik, jumlah laju permeasi (Q_P) sebesar $8,61 \times 10^{-6}$ torr liter/detik, jumlah laju kebocoran (Q_L) sebesar $1,05 \times 10^{-2}$ torr liter/detik, jumlah beban gas (Q_G) sebesar $1,05 \times 10^{-2}$ torr liter/detik, dan kevakuman akhir (P_v) sebesar $4,52 \times 10^{-4}$ torr.

Dengan menggunakan Persamaan (3.16) dan data spesifikasi pompa difusi, maka laju pemompaan efektif dapat ditentukan. Kecepatan pemompaan pompa difusi ditentukan dengan persamaan berikut:

$$S = 2D^2 = 2 \times 5.2^2 = 54 \text{ liter/detik}$$



Pompa difusi yang digunakan memiliki laju pemompaan untuk nitrogen ialah 54 liter/detik. Sehingga laju pemompaan efektifnya sebesar

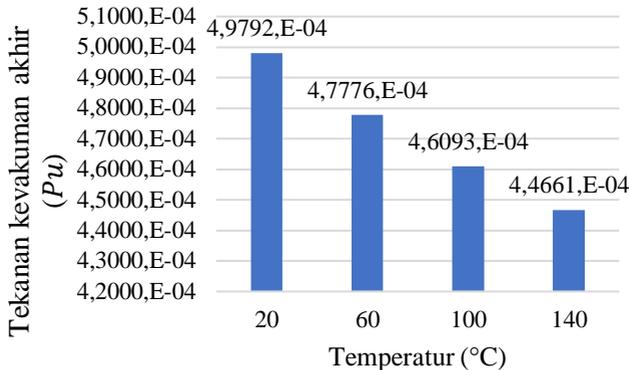
$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{28.60} + \frac{1}{54}$$

$$S_{ef} = 18.69 \text{ liter/detik}$$

Setelah didapatkan nilai kecepatan pemompaan efektifnya dapat dicari nilai atau tingkat kevakuman akhir dengan menggunakan Persamaan (2.36), sehingga diperoleh

$$P_u = \frac{9.31 \times 10^{-3}}{18.69} = 4.979 \times 10^{-4} \text{ torr}$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan untuk gas hidrogen pada suhu 20°C, didapatkan daya hantar *elbow* sebesar 28.60 liter/detik, laju pemompaan efektif sebesar 18.69 liter/detik, besarnya beban gas keseluruhan (Q_G) sebesar 9.31×10^{-3} torr liter/detik, dan tingkat kevakuman akhirnya (P_u) sebesar 4.979×10^{-4} torr. Hasil yang diperoleh ini cukup baik untuk mendukung operasi sistem evaporasi vakum. Setelah dilakukan instalasi pada sistem hampa, diharapkan hasil dari tingkat kehampaan (kevakuman) akhir sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan sehingga dapat mendukung operasi dari sistem evaporasi vakum.



Gambar 3.22 Grafik temperatur terhadap tingkat kevakuman akhir

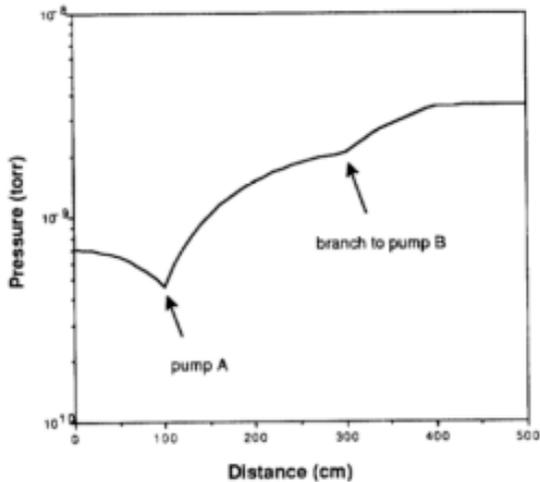
Berdasarkan Grafik 3.22 dapat dilihat jika simulasi yang dilakukan ini menghasilkan nilai tekanan kevakuman akhir yang semakin berkurang seiring dengan penambahan temperatur yang diberikan. Hal ini dipertegas oleh Roth (*Vacuum sealing techniques*, halaman 6) yang menyatakan bahwa nilai konduktansi dipengaruhi oleh tipe gas yang melewati suatu bukaan, daerah aliran gas, dimensi serta bentuk komponen, dan *degassing*. Laju *degassing* menurunkan waktu untuk mencapai tekanan vakum rendah dengan mengeluarkan gas yang diserap bahan atau tersumbat di dalam bahan menggunakan temperatur. Kenaikan nilai temperatur dalam sistem evaporasi vakum menyebabkan penurunan nilai konduktansi dari sistem evaporasi vakum.

3.3 Pembahasan Studi Literatur

Berikut ini merupakan hasil penelitian yang diambil dari masing-masing jurnal:

3.3.1 Pengaruh Temperatur terhadap Tingkat Kevakuman Akhir

Nilai temperatur terhadap tinggi rendahnya nilai konduktansi sangat berpengaruh terhadap tingkat kevakuman akhir. Distribusi tekanan dengan metode elemen berhingga dalam sistem vakum yang kompleks menggunakan hubungan antara konduktansi termal dengan konduktansi gas. Analogi termal digunakan untuk mendapatkan distribusi tekanan dalam sistem vakum berbentuk tabung dengan diameter 10 cm dan panjang 5 m. Desorpsi termal yang digunakan sebesar 3×10^{-12} torr l/s cm^2 , temperatur yang digunakan sebesar 293 K, kecepatan pemompaan 30 l/s. Tekanan kevakuman akhir dipengaruhi oleh temperatur dan juga jarak dari penempatan pompa (Howell et al., 1991).



Gambar 3.23 Distribusi tekanan pada tabung sepanjang 500 cm (Howell et al., 1991)

Penelitian dengan membandingkan tekanan kevakuman akhir dengan variasi temperatur sistem vakum sudah dilakukan oleh Welch pada tahun 1973. Sistem vakum yang digunakan berbentuk tabung baja nirkarat dengan diameter 5.7 cm dan

panjang 50 m. Tekanan rata-rata yang digunakan sebesar 5×10^{-7} torr, tekanan pada pompa sebesar 10^{-7} torr, desorpsi termal sebesar 5×10^{-12} torr l/s cm^2 , dan kecepatan pemompaan sebesar 10 l/s. Temperatur yang diberikan kepada sistem mempengaruhi tekanan kevakuman akhir, yang mana apabila semakin tinggi nilai temperatur yang diberikan akan menaikkan nilai tekanan total sistem vakum. Laju pelepasan gas pada temperatur 27 °C memberikan nilai sebesar 2.5×10^{-11} torr l/s cm^2 , sedangkan laju pelepasan gas pada temperatur 35°C memberikan nilai sebesar 8.3×10^{-11} torr l/s cm^2 yang dapat dilihat pada Lampiran 10. Variasi dari laju pelepasan gas perlu dipertimbangkan dalam simulasi karena berpengaruh pada tekanan total dari sistem vakum.

Tabel 3.13 Profil tekanan total pada tabung sepanjang 50 m (Welch, 1973)

Elapsed time of experiment (h)	System temperature (°C)	Indicated total pressure—torr (bayard-Alpert gauge)				
		$x = 0$	$x = 0.2l$	$x = 0.4l$	$x = 0.6l$	$x = l$
500	27	4.3×10^{-7}	9.68×10^{-7} (9.0×10^{-7}) [*]	1.55×10^{-6} (1.3×10^{-6})	1.95×10^{-6} (1.5×10^{-6})	2.35×10^{-6} (2.0×10^{-6})
600	35	4.52×10^{-6}	9.41×10^{-6}	1.58×10^{-5}	1.81×10^{-5}	2.05×10^{-5}
760	35	1.17×10^{-6}	2.44×10^{-6} (2.5×10^{-6})	3.60×10^{-6} (3.4×10^{-6})	4.49×10^{-6} (4.2×10^{-6})	5.39×10^{-6} (4.7×10^{-6})
910	100	3.85×10^{-5}	7.0×10^{-5}	8.8×10^{-5}	1.05×10^{-4}	1.15×10^{-4}
1100	23	5.18×10^{-8}	9.55×10^{-8} (9.4×10^{-8})	1.48×10^{-7} (1.2×10^{-7})	1.81×10^{-7} (1.5×10^{-7})	2.0×10^{-7} (1.7×10^{-7})
System Baked at 200°C for 100 h						
1410	23	3.5×10^{-8}	5.64×10^{-8} (6.3×10^{-8})	7.35×10^{-8} (8.4×10^{-8})	8.4×10^{-8} (1.0×10^{-7})	8.9×10^{-8} (1.2×10^{-7})
1450	42	1.5×10^{-7}	2.58×10^{-7} (2.7×10^{-7})	3.38×10^{-7} (3.5×10^{-7})	3.85×10^{-7} (4.2×10^{-7})	4.15×10^{-7} (4.7×10^{-7})
1480	90	7.3×10^{-7}	1.32×10^{-6} (1.3×10^{-6})	1.72×10^{-6} (1.7×10^{-6})	2.0×10^{-6} (1.9×10^{-6})	2.15×10^{-6} (2.1×10^{-6})
1500	120	2.98×10^{-6}	5.62×10^{-6} (5.1×10^{-6})	7.6×10^{-6} (6.6×10^{-6})	8.92×10^{-6} (7.8×10^{-6})	9.7×10^{-6} (8.7×10^{-6})

3.3.2 Perhitungan tekanan dengan menggunakan metode Monte Carlo

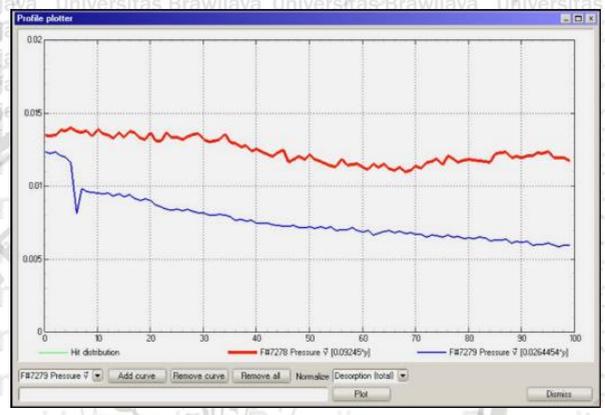
Monte Carlo merupakan metode untuk menghitung lintasan dari tiap molekul yang jumlahnya sangat banyak untuk mendapatkan gambaran dari aliran gas di dalam suatu struktur tiga dimensi. Dalam Monte Carlo lintasan molekul diasumsikan sebagai gelombang sehingga gravitasi dapat diabaikan (Kersevan & Pons, 2009). Arah desorpsi dan refleksi untuk

koordinat sferis dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$\theta = \arccos(\sqrt{1 - X})$$

$$\phi = 2\pi Y$$

di mana X dan Y merupakan distribusi pada interval [0,1].



Gambar 3.24 Profil tekanan perhitungan metode Monte Carlo. Kurva atas (garis merah): tekanan sepanjang *e-beam chamber*; kurva bawah (garis biru): tekanan sepanjang tabung 45° (Kersevan & Pons, 2009).

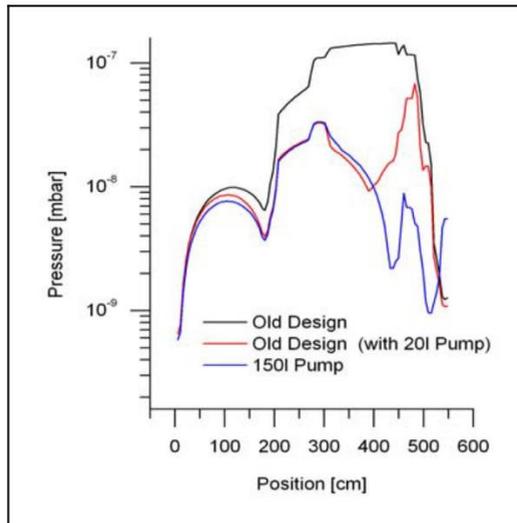
Densitas pada permukaan adalah sama dengan jumlah tumbukan antara molekul gas dengan dinding (hit) yang dibagi dengan jumlah molekul. *Confidence interval* (CI) merupakan jenis estimasi yang dihitung dari data statistik. Probabilitas transmisi di dalam MOLFLOW dengan *confidence interval* sebesar 95% ditentukan untuk dibandingkan dengan probabilitas transmisi yang sebenarnya dapat dilihat pada Tabel 3.6.



Tabel 3.14 Perbandingan probabilitas transmisi antara metode Monte Carlo dengan hasil yang sebenarnya (Kersevan & Pons, 2009).

L/R	W_{MOLFLOW} (10^8 molecules/tube)	95% CI	W_{exact} (rounding eight digits)
1	0.381 919 84	$\pm 9.52 \times 10^{-5}$	0.381 966 01
2	0.171 562 85	$\pm 7.39 \times 10^{-5}$	0.171 572 88
3	0.091 677 58	$\pm 5.66 \times 10^{-5}$	0.091 673 09
4	0.055 739 67	$\pm 4.50 \times 10^{-5}$	0.055 728 09
5	0.037 091 15	$\pm 3.70 \times 10^{-5}$	0.037 087 98
6	0.026 314 60	$\pm 3.14 \times 10^{-5}$	0.026 664 04
7	0.019 608 58	$\pm 2.72 \times 10^{-5}$	0.019 615 39
8	0.015 147 48	$\pm 2.39 \times 10^{-5}$	0.015 155 00
9	0.012 040 08	$\pm 2.14 \times 10^{-5}$	0.012 049 94
10	0.009 793 21	$\pm 1.93 \times 10^{-6}$	0.009 804 86
20	0.002 484 44	$\pm 9.76 \times 10^{-6}$	0.002 487 58
30	0.001 107 61	$\pm 6.52 \times 10^{-6}$	0.001 108 65
40	0.000 625 6	$\pm 4.90 \times 10^{-6}$	0.000 624 22
50	0.000 400 22	$\pm 3.92 \times 10^{-6}$	0.000 399 68
60	0.000 277 87	$\pm 3.27 \times 10^{-6}$	0.000 277 62
70	0.000 204 39	$\pm 2.80 \times 10^{-6}$	0.000 204 00
80	0.000 156 29	$\pm 2.45 \times 10^{-6}$	0.000 156 20
90	0.000 123 41	$\pm 2.18 \times 10^{-6}$	0.000 123 43
100	0.000 100 23	$\pm 1.96 \times 10^{-6}$	0.000 099 98
200	0.000 024 77	$\pm 9.76 \times 10^{-7}$	0.000 025 00
300	0.000 010 85	$\pm 6.46 \times 10^{-7}$	0.000 011 11
400	0.000 005 58	$\pm 4.63 \times 10^{-7}$	0.000 006 25
500	0.000 003 74	$\pm 3.79 \times 10^{-7}$	0.000 004 00
600	0.000 002 53	$\pm 3.12 \times 10^{-7}$	0.000 002 78
700	0.000 001 80	$\pm 2.63 \times 10^{-7}$	0.000 002 04
800	0.000 001 43	$\pm 2.34 \times 10^{-7}$	0.000 001 56
900	0.000 001 13	$\pm 2.08 \times 10^{-7}$	0.000 001 23
1000	0.000 000 89	$\pm 1.85 \times 10^{-7}$	0.000 001 00

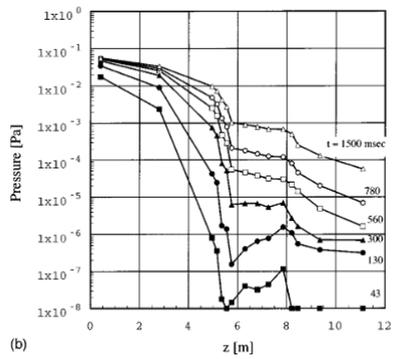
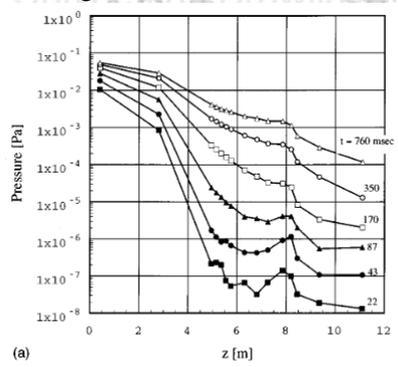
Penelitian dengan simulasi profil tekanan menggunakan program Monte Carlo MOLFLOW pada sumber radiasi generasi sinkrotron dengan lintasan bebas rata-rata sebesar 6400 cm pada 10^{-6} mbar, diameter pipa sebesar 4 cm, dan desorpsi termal sebesar 8×10^{-11} mbar l/s/cm² telah dilakukan. Variasi kecepatan pemompaan dengan pompa ion 20I dan pompa ion 150I (Amann et al., 2008). Grafik hubungan tekanan dengan jarak dapat dilihat pada Gambar 3.9.



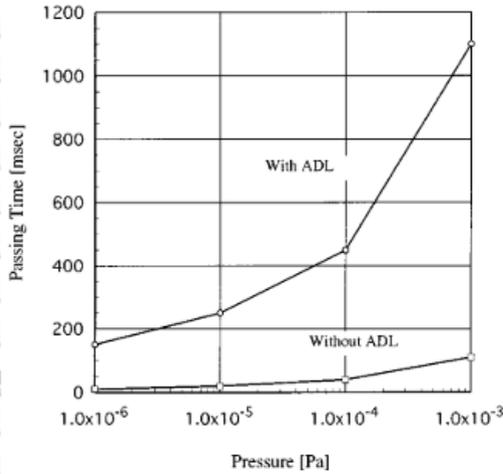
Gambar 3.25 Grafik hubungan tekanan dengan jarak untuk simulasi sistem celah vertikal (Amann et al., 2008).

Pengukuran desorpsi termal dibutuhkan untuk mengestimasi distribusi tekanan dalam *beamline*. Beban gas karena desorpsi termal ditentukan dengan pengukuran koefisien desorpsi termal. Beban gas termal dari sistem celah vertikal yaitu sebesar 6.4×10^{-7} mbar l/s. Tekanan rata-rata yang disebabkan oleh beban gas desorpsi termal bernilai kurang dari 10^{-7} mbar dalam *beamline* (Amann et al., 2008).

Simulasi dari tekanan sepanjang *synchrotron radiation beamline* setelah penghentian vakum secara tiba-tiba merupakan hal yang penting dalam merancang posisi komponen sistem *fail-safe* seperti *acoustic delay lines* (ADL). Distribusi tekanan pada aliran molekuler sepanjang *beamline* disimulasikan dengan Monte Carlo. Beamline memiliki panjang 12.1 m dan salah satu bagian pada Lampiran 19 dapat diganti dengan ADL dengan panjang 1.1 m. Kecepatan pemompaan sebesar $1.26 \times 10^{-1} \text{ m}^3/\text{s}$, temperatur yang digunakan sebesar 293 K, dan laju desorpsi gas sebesar $10^{-2} \text{ Pa m}^3/\text{s}$. Perhitungan profil tekanan beamline dapat dilihat pada Gambar 3.10 (Suetsugu, 1996).



Gambar 3.26 Profil tekanan pada waktu yang berbeda untuk model *beam line* (a) tanpa ADL (b) dengan ADL (Suetsugu, 1996).



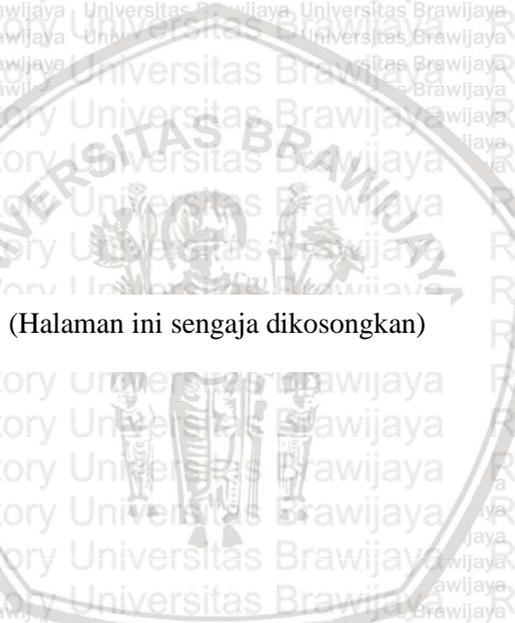
Gambar 3.27 Hubungan tekanan dengan waktu pada jarak $z = 4.95-5.75$ m (Suetsugu, 1996).

Waktu untuk melewati jarak 1.1 m (*passing time*) dengan menggunakan ADL memberikan nilai 10 kali lebih lama dibandingkan yang tidak menggunakan ADL. *Passing time* akan menjadi lebih lama untuk tekanan yang lebih tinggi.

Metode Monte Carlo merupakan metode yang dapat diandalkan karena dari *confidence interval* yang dapat menunjukkan hingga 95% . Monte Carlo juga dapat mengukur tekanan rata-rata yang memiliki nilai yang hampir sama dengan perhitungan secara analitik.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB IV

PENUTUP

4.1 Kesimpulan

1. Tingkat kevakuman akhir yang dapat dicapai komponen evaporasi vakum sebesar 4.979×10^{-4} torr untuk sistem vakum dengan temperatur 20°C . Hal ini terjadi karena temperatur mempengaruhi konduktansi dan laju pemompaan efektif. Konduktansi untuk aliran molekuler bergantung pada temperatur, semakin tinggi temperatur yang diberikan nilai konduktansi yang dihasilkan oleh simulasi sistem evaporasi vakum akan semakin rendah. Tingkat kevakuman akhir yang didapatkan akan semakin rendah apabila penambahan temperatur diberikan pada sistem evaporasi vakum. Laju pelepasan gas juga mempengaruhi tinggi rendahnya tingkat kevakuman akhir sistem vakum.
2. MolFlow+ dapat meneliti distribusi tekanan di dalam sistem vakum dengan tingkat kepercayaan yang tinggi sebesar 95%. Sehingga untuk menentukan tekanan gas dalam sistem vakum dapat menggunakan MolFlow+.

4.2 Saran

Berikut ini adalah beberapa saran yang penulis berikan untuk penelitian selanjutnya berdasarkan pada temuan hasil penelitian:

1. Error dari data hasil pengukuran profil tekanan sebaiknya dihitung agar diketahui standar jumlah molekul gas yang mempengaruhi.
2. Sebaiknya sistem evaporasi vakum telah diukur terlebih dahulu agar input tekanan ke MolFlow+ lebih akurat.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



DAFTAR PUSTAKA

- Amann, C., Hahn, U., Hesse, M., & Schulte-Schrepping, H. (2008). Simulations of the pressure profiles of the PETRAIII frontends. *Journal of Physics: Conference Series*, 100(PART 9), 7–11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/100/9/092017>
- Chao, A. W., Mess, K. H., Tigner, M., & Zimmermann, F. (2012). *Handbook of Accelerator Physics and Engineering* (2nd ed.). World Scientific Publishing.
- Harsha, K. S. S. (2006). Principles of Vapor Deposition of Thin Films. In *Elsevier Ltd.* (First). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044699-8.X5000-1>
- Hoffman, D. M., Singh, B., & Thomas, J. H. (1998). *Handbook of Vacuum Science and Technology* (D. M. Hoffman, B. Singh, & J. H. Thomas (eds.)). Academia Press.
- Howell, J., Wehrle, B., & Jostlein, H. (1991). Calculation of pressure distribution in vacuum systems using a commercial finite element program. *Conference Record of 1991 IEEE Particle Accelerator Conference*, 2295–2297. <https://doi.org/10.1109/pac.1991.164945>
- Jousten, K. (2016). *Handbook of Vacuum Technology* (K. Jousten (ed.); 2nd ed.). Wiley-VCH.
- Kersevan, R., & Pons, J.-L. (2009). Introduction to MOLFLOW+ : New graphical processing unit-based Monte Carlo code for simulating molecular flows and for calculating angular coefficients in the compute unified device architecture environment . *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 27(4), 1017–1023. <https://doi.org/10.1116/1.3153280>
- Malyshev, O. B. (2020). Vacuum in Particle Accelerators Modelling, Design and Operation of Beam Vacuum Systems. In *WILEY-VCH*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mattox, D. M. (1998). HANDBOOK OF PHYSICAL VAPOR DEPOSITION (PVD) PROCESSING Film Formation ,

Adhesion , Surface Preparation and Contamination Control. In *NOYES PUBLICATIONS*. Noyes Publications.

<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780815520313>

Naik, P. K. (2018). *Vacuum Science Technology and Applications*. CRC Press.

O'Hanlon, J. F. (2003). A User's Guide to Vacuum Technology. In *JOHN WILEY & SONS, INC.* (3rd ed.). Wiley Interscience.
<https://doi.org/10.13182/nt81-a32825>

Pace, A., & Poncet, A. (1990). Monte Carlo simulations of molecular gas flow: some applications in accelerator vacuum technology using a versatile personal computer program. *Vacuum*, *41*(7–9), 1910–1913. [https://doi.org/10.1016/0042-207X\(90\)94129-E](https://doi.org/10.1016/0042-207X(90)94129-E)

Perkins, W. G. (1973). Permeation and Outgassing of Vacuum Materials. *J Vac Sci Technol*, *10*(4), 543–556.
<https://doi.org/10.1116/1.1318061>

Pfeiffer. (2005). *Compact Pirani Gauge*.

Roth, A. (1990). *Vacuum Technology* (3rd ed.). Elsevier Science.

Shah, A., Izman, S., Ismail, S. N. F., Mas Ayu, H., Daud, R., & Kadir, M. R. A. (2018). Physical Vapour Deposition on corrosion resistance: A review. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, *13*(10), 3515–3523.

Suetsugu, Y. (1996). Application of the Monte Carlo method to pressure calculation. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, *14*(1), 245–250.
<https://doi.org/10.1116/1.579927>

Weissler, G. L., & Carlson, R. W. (1979). *Vacuum Physics and Technology* (G. L. Weissler & R. W. Carlson (eds.); 14th ed.). Academic Press.

Welch, K. M. (1973). The pressure profile in a long outgassing vacuum tube. *Vacuum*, *23*(8), 271–276.
[https://doi.org/10.1016/0042-207X\(73\)92284-7](https://doi.org/10.1016/0042-207X(73)92284-7)

LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel perhitungan tekanan dengan dua *pirani gauge*.

Waktu (Menit)	Pirani Gauge Baru		Pirani Gauge Lama	
	Tegangan (V)	Tekanan (Pa)	Tegangan (V)	Tekanan (Pa)
0	8,55	112201,85	6,28	112201,85
5	4,45	8,91	4,36	8,91
10	4,33	6,76	4,22	6,76
15	4,27	5,89	4,18	5,89
20	4,24	5,50	4,15	5,50
25	4,22	5,25	4,13	5,25
30	4,20	5,01	4,13	5,01
35	4,19	4,90	4,12	4,90
40	4,19	4,90	4,11	4,90
45	4,18	4,79	4,11	4,79
50	4,17	4,68	4,10	4,68
55	4,17	4,68	4,10	4,68
60	4,16	4,57	4,09	4,57

Lampiran 2 Tabel profil tekanan pada *chamber* sebelum panasbersih.

Temperatur (°C)	Profil tekanan (mbar)	
	Hidrogen	Air
20	9,36E-09	3,43E-07
100	9,28E-09	3,50E-07
250	9,21E-09	3,44E-07
500	9,08E-09	3,48E-07
1000	9,28E-09	3,49E-07

Lampiran 3 Kecepatan molekul rata-rata dari gas dalam *chamber* sebelum panasbersih.

Temperatur (°C)	Kecepatan molekul rata-rata (m/s) H ₂	Kecepatan molekul rata-rata (m/s) H ₂ O
20	1754,350	585,093
100	1979,670	659,270
250	2343,873	779,652
500	2850,040	950,212
1000	3657,733	1219,123

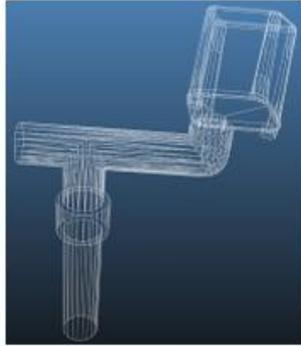
Lampiran 4 Tabel profil tekanan *chamber* setelah panasbersih.

Profile tekanan (mbar)	
Temperatur (°C)	Hidrogen
20	5,84E-10
100	5,67E-10
250	5,74E-10
500	5,74E-10

Lampiran 5 Kecepatan molekul rata-rata dari gas dalam *chamber* setelah panasbersih.

Temperatur (°C)	Kecepatan molekul rata-rata (m/s) H ₂
20	1750,133
100	1980,203
250	2342,360
500	2849,387
1000	3654,393

Lampiran 6 Desain *chamber* MolFlow+. Tampak atas (A), Tampak samping (B).



(A)

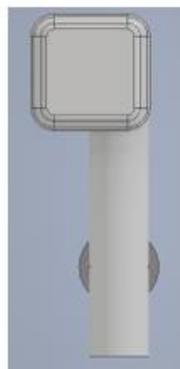


(B)

Lampiran 7 Desain *chamber* Inventor. Tampak bawah (A) dan Tampak samping (B).

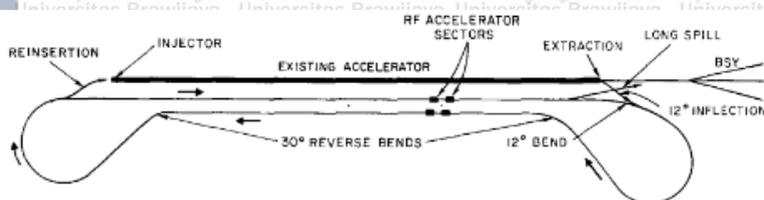


(A)

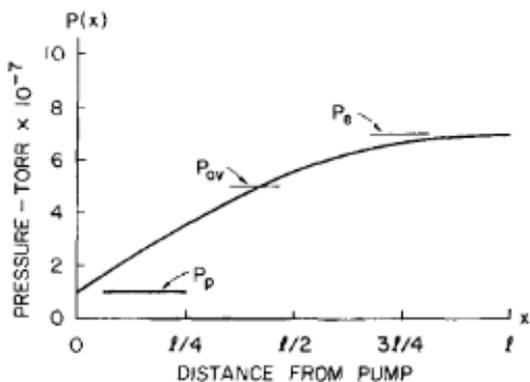
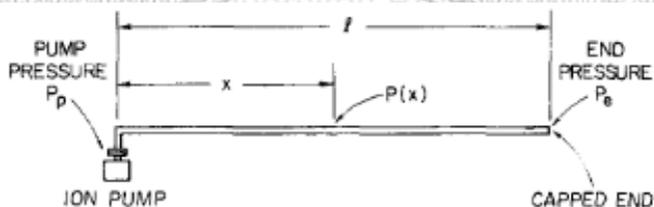


(B)

Lampiran 8 Skema akselerator linier.



Lampiran 9 Distribusi tekanan pada tabung panjang dengan laju pelepasan gas yang sama dan dipompa pada satu titik.



Lampiran 10 Tekanan total tabung sepanjang 50 m.

Table 3. Indicated total pressure profile along a uniformly outgassing tubing fifty meters long and pumped on one end

Elapsed time of experiment (h)	System temperature (°C)	Indicated total pressure— x = 0	x = 0.2f	x = 0.4f	x = 0.6f	x = f	Gas species proportion								
							Mass 2	Mass 18	Mass 28	Mass 44	Mass 44	Mass 44	Mass 44	Mass 44	
500	27	4.3 × 10 ⁻⁷	9.68 × 10 ⁻⁷ (9.0 × 10 ⁻⁷) [*]	1.55 × 10 ⁻⁶ (1.3 × 10 ⁻⁶)	1.95 × 10 ⁻⁶ (1.5 × 10 ⁻⁶)	2.35 × 10 ⁻⁶ (2.0 × 10 ⁻⁶)	1	1.5	0.5	0.3	2.5 × 10 ⁻¹¹				
600	35	4.52 × 10 ⁻⁶	9.41 × 10 ⁻⁶	1.58 × 10 ⁻⁵	1.81 × 10 ⁻⁵	2.05 × 10 ⁻⁵	No data								
760	35	1.17 × 10 ⁻⁶	2.44 × 10 ⁻⁶ (2.5 × 10 ⁻⁶)	3.60 × 10 ⁻⁶ (3.4 × 10 ⁻⁶)	4.49 × 10 ⁻⁶ (4.2 × 10 ⁻⁶)	5.39 × 10 ⁻⁶ (4.7 × 10 ⁻⁶)	1	5.0	0.4	0.3	8.3 × 10 ⁻¹¹				
910	100	3.85 × 10 ⁻⁵	7.0 × 10 ⁻⁵	8.8 × 10 ⁻⁵	1.05 × 10 ⁻⁴	1.15 × 10 ⁻⁴	No data								
1100	23	5.18 × 10 ⁻⁸	9.55 × 10 ⁻⁸ (9.4 × 10 ⁻⁸)	1.48 × 10 ⁻⁷ (1.2 × 10 ⁻⁷)	1.81 × 10 ⁻⁷ (1.5 × 10 ⁻⁷)	2.0 × 10 ⁻⁷ (1.7 × 10 ⁻⁷)	1	0.041	0.045	0.008	8.2 × 10 ⁻¹²				

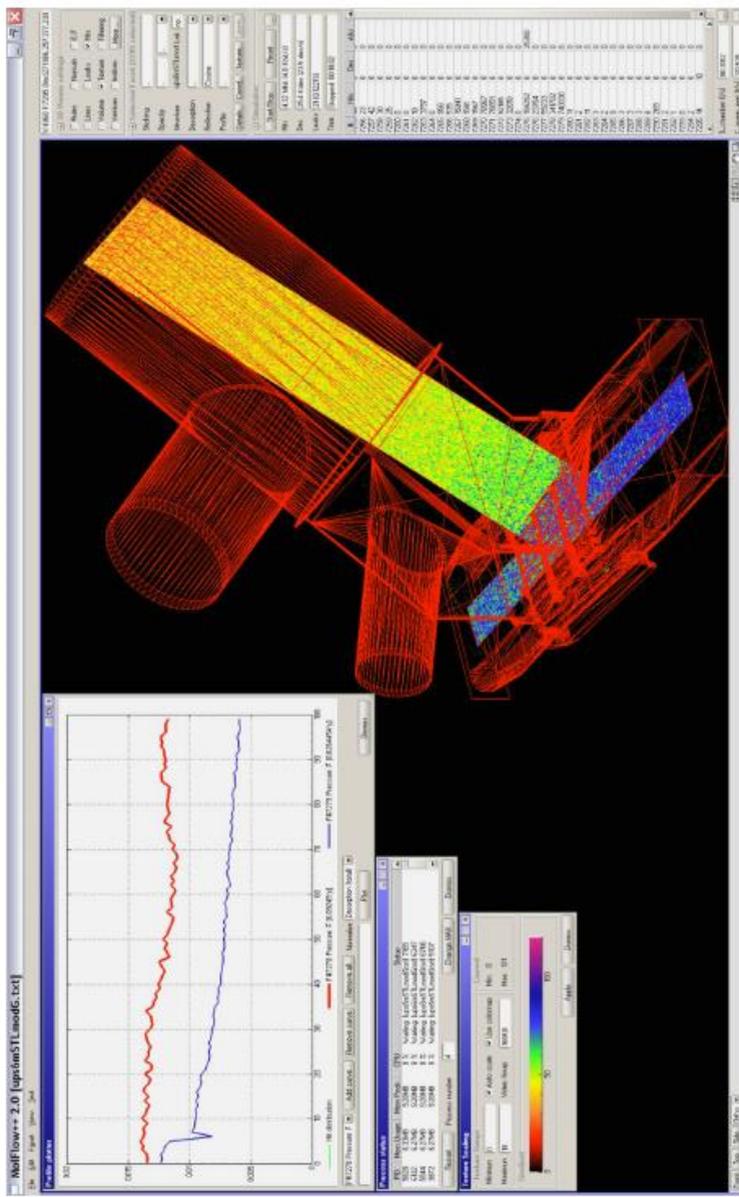
System Baked at 200°C for 100 h															
1410	23	3.5 × 10 ⁻⁸	5.64 × 10 ⁻⁸ (6.3 × 10 ⁻⁸)	7.35 × 10 ⁻⁸ (8.4 × 10 ⁻⁸)	8.4 × 10 ⁻⁸ (1.0 × 10 ⁻⁷)	8.9 × 10 ⁻⁸ (1.2 × 10 ⁻⁷)	1	0.03	0.07	0.02	5.5 × 10 ⁻¹²				
1450	42	1.5 × 10 ⁻⁷	2.58 × 10 ⁻⁷ (2.7 × 10 ⁻⁷)	3.38 × 10 ⁻⁷ (3.5 × 10 ⁻⁷)	3.85 × 10 ⁻⁷ (4.2 × 10 ⁻⁷)	4.15 × 10 ⁻⁷ (4.7 × 10 ⁻⁷)	1	0.02	0.02	0.01	2.3 × 10 ⁻¹¹				
1480	90	7.3 × 10 ⁻⁷	1.32 × 10 ⁻⁶ (1.3 × 10 ⁻⁶)	1.72 × 10 ⁻⁶ (1.7 × 10 ⁻⁶)	2.0 × 10 ⁻⁶ (1.9 × 10 ⁻⁶)	2.15 × 10 ⁻⁶ (2.1 × 10 ⁻⁶)	1	0.01	0.01	0.005	1.15 × 10 ⁻¹⁰				
1500	120	2.98 × 10 ⁻⁶	5.62 × 10 ⁻⁶ (5.1 × 10 ⁻⁶)	7.6 × 10 ⁻⁶ (6.6 × 10 ⁻⁶)	8.92 × 10 ⁻⁶ (7.8 × 10 ⁻⁶)	9.7 × 10 ⁻⁶ (8.7 × 10 ⁻⁶)	1	0.007	0.004	0.001	4.6 × 10 ⁻¹⁰				

Lampiran 11 Perbandingan probabilitas transmisi pada MOLFLOW dan probabilitas transmisi sebenarnya.

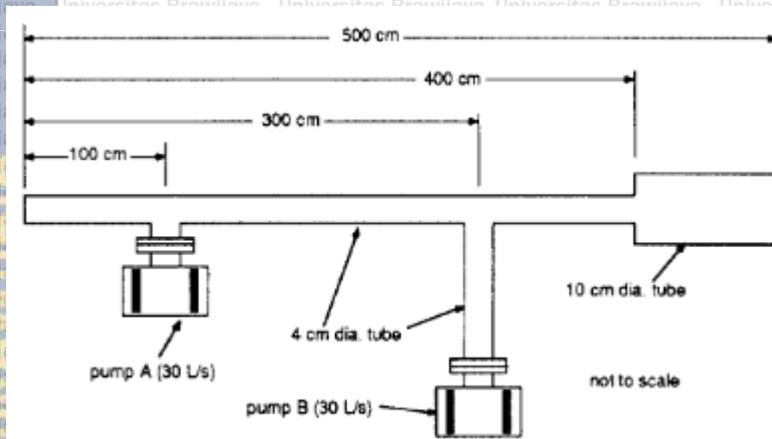
L/R	W_{MOLFLOW} (10^8 molecules/tube)	95% CI	W_{exact} (rounding eight digits)
1	0.381 919 84	$\pm 9.52 \times 10^{-5}$	0.381 966 01
2	0.171 562 85	$\pm 7.39 \times 10^{-5}$	0.171 572 88
3	0.091 677 58	$\pm 5.66 \times 10^{-5}$	0.091 673 09
4	0.055 739 67	$\pm 4.50 \times 10^{-5}$	0.055 728 09
5	0.037 091 15	$\pm 3.70 \times 10^{-5}$	0.037 087 98
6	0.026 314 60	$\pm 3.14 \times 10^{-5}$	0.026 664 04
7	0.019 608 58	$\pm 2.72 \times 10^{-5}$	0.019 615 39
8	0.015 147 48	$\pm 2.39 \times 10^{-5}$	0.015 155 00
9	0.012 040 08	$\pm 2.14 \times 10^{-5}$	0.012 049 94
10	0.009 793 21	$\pm 1.93 \times 10^{-6}$	0.009 804 86
20	0.002 484 44	$\pm 9.76 \times 10^{-6}$	0.002 487 58
30	0.001 107 61	$\pm 6.52 \times 10^{-6}$	0.001 108 65
40	0.000 625 6	$\pm 4.90 \times 10^{-6}$	0.000 624 22
50	0.000 400 22	$\pm 3.92 \times 10^{-6}$	0.000 399 68
60	0.000 277 87	$\pm 3.27 \times 10^{-6}$	0.000 277 62
70	0.000 204 39	$\pm 2.80 \times 10^{-6}$	0.000 204 00
80	0.000 156 29	$\pm 2.45 \times 10^{-6}$	0.000 156 20
90	0.000 123 41	$\pm 2.18 \times 10^{-6}$	0.000 123 43
100	0.000 100 23	$\pm 1.96 \times 10^{-6}$	0.000 099 98
200	0.000 024 77	$\pm 9.76 \times 10^{-7}$	0.000 025 00
300	0.000 010 85	$\pm 6.46 \times 10^{-7}$	0.000 011 11
400	0.000 005 58	$\pm 4.63 \times 10^{-7}$	0.000 006 25
500	0.000 003 74	$\pm 3.79 \times 10^{-7}$	0.000 004 00
600	0.000 002 53	$\pm 3.12 \times 10^{-7}$	0.000 002 78
700	0.000 001 80	$\pm 2.63 \times 10^{-7}$	0.000 002 04
800	0.000 001 43	$\pm 2.34 \times 10^{-7}$	0.000 001 56
900	0.000 001 13	$\pm 2.08 \times 10^{-7}$	0.000 001 23
1000	0.000 000 89	$\pm 1.85 \times 10^{-7}$	0.000 001 00



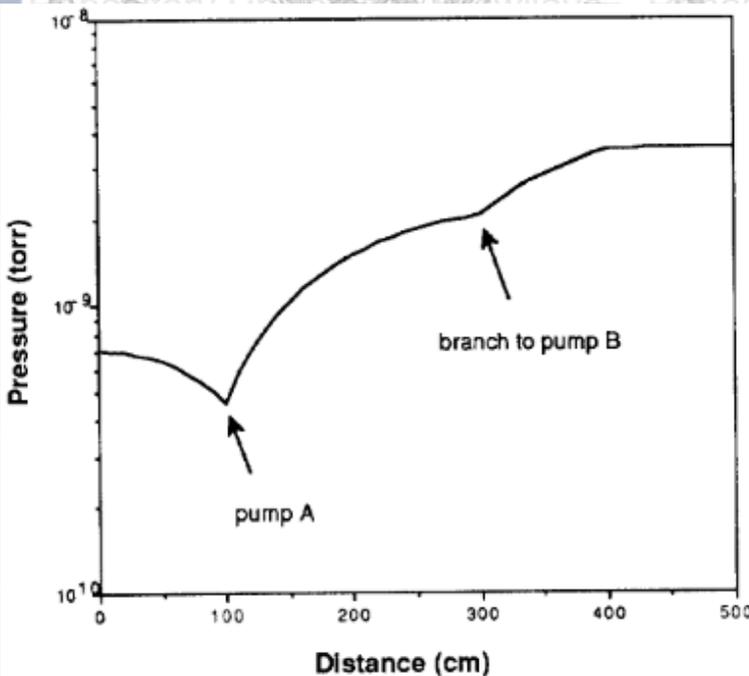
Lampiran 12 Tangkapan layar dari perhitungan Monte Carlo dari profil tekanan.



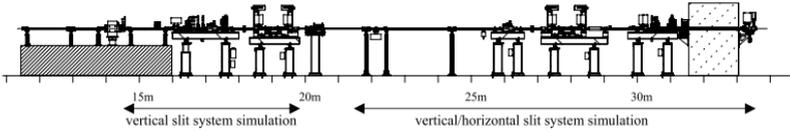
Lampiran 13 Sistem vakum.



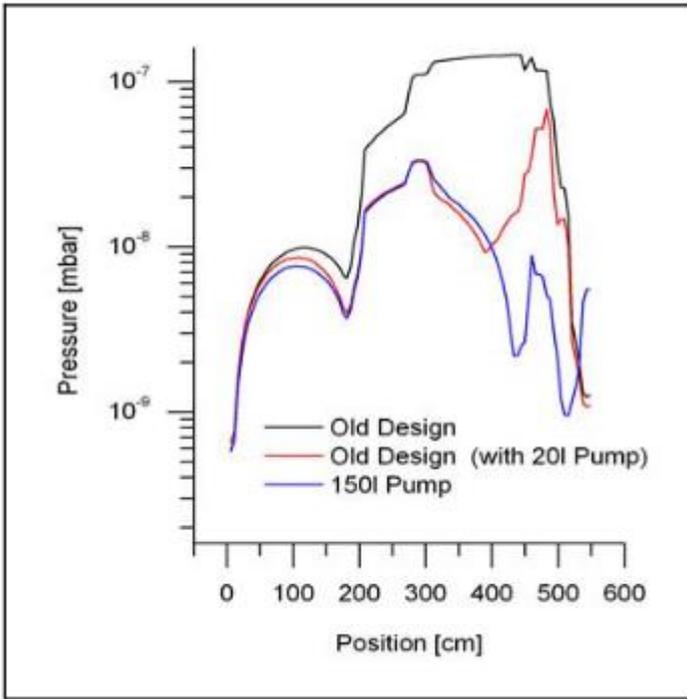
Lampiran 14 Profil tekanan pada tabung sepanjang 500 cm.



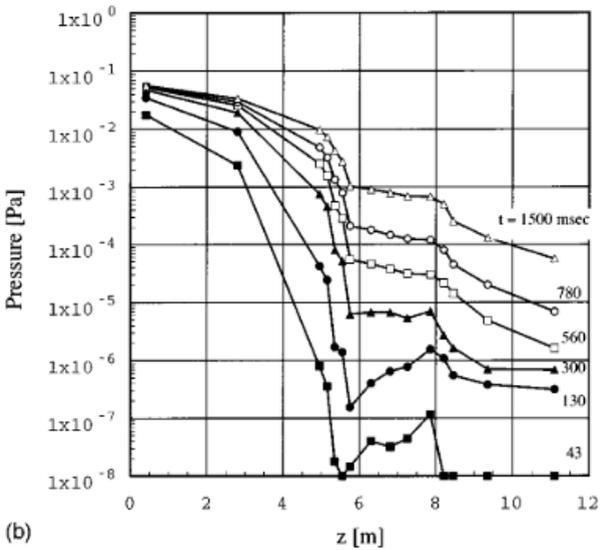
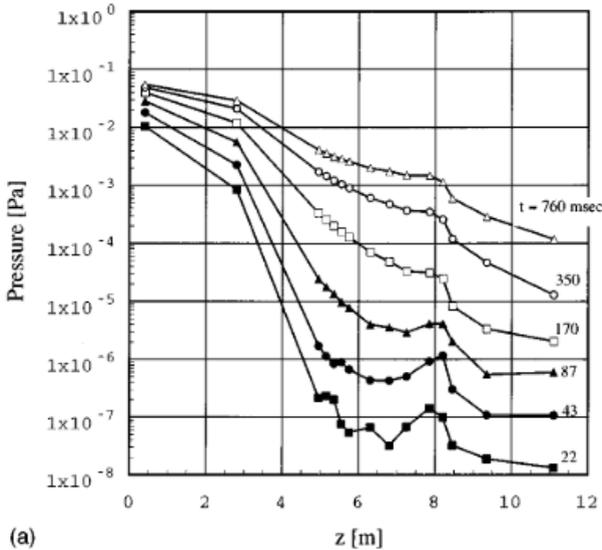
Lampiran 15 Tampilan samping dari *beamline* tunggal pada PETRA III



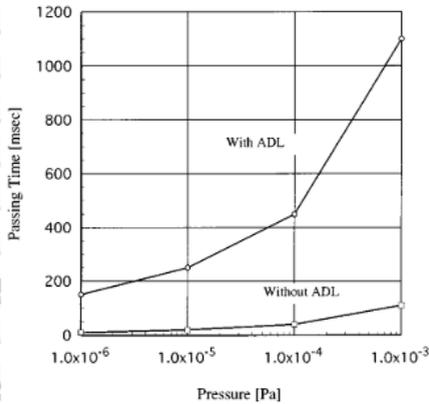
Lampiran 16 Grafik hubungan tekanan dengan jarak untuk simulasi sistem celah vertikal.



Lampiran 17 Profil tekanan pada waktu yang berbeda untuk model *beam line* (a) tanpa ADL (b) dengan ADL.



Lampiran 18 Hubungan tekanan dengan waktu pada jarak $z = 4.95 - 5.75$ m.



Lampiran 19 Model beamline untuk perhitungan distribusi tekanan (a) tanpa ADL (b) dengan ADL.

