

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TARLA TESİSİ ENJEKTÖR HATTI VAKUM İHTİYACI, TASARIMI VE
UYGULAMALARI**

Emre COŞGUN

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2017**

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Emre COŞGUN tarafından hazırlanan “**TARLA Tesisi Enjektör Hattı Vakum İhtiyacı, Tasarımı ve Uygulamaları**” adlı tez çalışması 24/07/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Jüri Üyeleri:

Başkan: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Hüseyin SARI
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Üye : Prof. Dr. Ömer YAVAŞ
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Atilla YETİŞEMİYEN
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

24.07.2017



Emre COŞGUN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TARLA TESİSİ ENJEKTÖR HATTI VAKUM İHTİYACI, TASARIMI VE UYGULAMALARI

Emre COŞGUN

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Parçacık hızlandırıcılarında, parçacık demetinin ömrünü ve kalitesini arttırmak ve parçacık demetinin sorunsuz bir şekilde taşınabilmesi için demet hattının ileri yüksek vakum seviyesinde tutulması gerekmektedir. TARLA bir parçacık hızlandırıcı tesisi olup, enjektör hattı birinci süperiletken hızlandırıcı modülüne kadar kısımların tamamından oluşur. Bu tez çalışmasında yapılan vakum çalışmaları TARLA enjektör hattının vakum ihtiyaçları gözetilerek yapılmıştır.

Vakum deney düzeneği için gerekli olan temiz oda TARLA ekibi tarafından kurulmuştur ve ISO-6 standardındadır. Kullanılan vakum kazanları ve flanşları CF tipindedir. İleri yüksek vakum kurulumunda ilk önce analitik hesaplama yapılmış ve iyon pompası için efektif pompalama hızı 35,4 l/s olarak bulunmuştur. Daha sonra Molflow+ simülasyon programı kullanılarak Monte Carlo yöntemiyle sistem üzerindeki basınç dağılımları hesaplanmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. İleri yüksek vakum seviyesine çıkabilmek için üç farklı pompa kullanılmıştır. Bunlar sırası ile mekanik pompa (10^{+3} - 10^{-3} mbar), turbo moleküler pompa (10^{-3} - 10^{-6} mbar) ve iyon pompasıdır ($<10^{-6}$ mbar). Kuadrupol kütle spektrometresi yöntemiyle çalışan artık gaz analizörü ile sistem içerisindeki gazların türü ve kısmi basınçları belirlenmiştir. Vakum sistemi içerisinde H_2 , H_2O , N_2 , O_2 , CO_2 ve Ar gazları ve bu gazların türevleri tespit edilmiştir. Vakum sistemi gaz giderme yöntemi ile 200 $^{\circ}C$ 'de 40 saat boyunca ısıtılmış, bunun sonucunda H_2O gazı sistemden atılmış ve vakum değeri 10^{-10} mbar seviyelerine ulaştırılmıştır. İyon pompasına yardımcı olması için yüksek derecede H_2 gazı pompalama hızına sahip buharlaşmayan tutucu pompa (NEG) kullanılmıştır. NEG pompa vakum sisteminin orta kısmına yerleştirilmiş ve bunun sonucunda basınç dağılımı daha kararlı hale gelmiş ve H_2 kısmi basıncında azalma gözlemlenmiştir. Son olarak sıcak katodun vakum üzerine etkileri incelenmiştir.

Temmuz 2017, 104 sayfa

Anahtar Kelimeler: TARLA, İleri yüksek vakum, Buharlaşmayan tutucu pompa, Temiz oda, Molflow, Artık gaz analizörü

ABSTRACT

Master Thesis

VACUUM REQUIREMENT, DESIGN AND APPLICATIONS ON INJECTOR LINE OF TARLA FACILITY

Emre COŞGUN

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

In particle accelerators, to increase the lifetime and quality of particle beam and to transport the particle bunch smoothly, it is necessary to keep the beam line at the ultrahigh vacuum level. The TARLA is a particle accelerator facility, and the injector line consists entirely of parts up to the first superconductor accelerator module. Vacuum experiments in this thesis are carried out by considering the vacuum requirements of the TARLA injector line.

The clean room required for the vacuum test setup has been established by the TARLA team and is in the ISO-6 standard. Vacuum chambers and flanges used are in CF type. In the ultrahigh vacuum setup, firstly, analytical calculation is performed and the effective pump speed for the ion pump has been found 35,4 l/s. Then the pressure distributions on the system has been calculated by Monte Carlo method using the Molflow+ simulation program and compared with the experimental results. Three different pumps are used to reach the ultrahigh vacuum level. These are mechanical pump (10^{-3} - 10^{-3} mbar), turbo molecular pump (10^{-3} - 10^{-6} mbar) and ion pump ($<10^{-6}$ mbar), respectively. The type and partial pressures of the gases in the system are determined by using a residual gas analyzer operated by quadrupole mass spectrometry. In our vacuum system, H₂, H₂O, N₂, O₂, CO₂ and Ar gases and derivatives of these gases have been identified. The vacuum system has been heated with the degassing method at 200 °C for 40 hours, resulting in the removal of H₂O gas from the system and the vacuum value reached 10^{-10} mbar. A non-evaporable getter pump (NEG) with high H₂ gas pumping speed is used to assist the ion pump. The NEG pump has been placed in the middle of the vacuum system, where the pressure distribution became more stable and a decrease in H₂ partial pressure was observed. Finally, the effects of the hot cathode on vacuum has been investigated.

July 2017, 104 pages

Key Words: TARLA, Ultra high vacuum, Non-evaporable getter pump, Clean room, Molflow, Residual gas analyzer

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bilgi, öneri ve yardımlarını esirgemeyen, tezimin deneysel ve araştırma evrelerinde her daim sabır ve özveriyle çalışmalarımı yakından takip edip yol gösteren danışman hocam sayın Prof. Dr. Ömer YAVAŞ'a (Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım için beni teşvik eden ve bana TARLA Takımı içinde çalışma olanağı tanıyan TARLA Teknik Koordinatörü ve HTE Müdürü Yrd. Doç. Dr. Avni AKSOY'a,

Deneysel çalışmalarım boyunca bana yol gösteren ve aklıma takılan her soruda her daim yardımcı olan ve öneri sunan Fizik Mühendisi Emre KAZANCI'ya,

Temiz oda çalışmalarında ve vakum ekipmanlarını hazırlamada yardımlarını esirgemeyen Ece Pınar DEMİRCİ'ye,

Bu çalışmalarım boyunca fikir alışverişinde bulunduğum ve türlü manevi destek veren TARLA ekibinden Dr. Ayhan AYDIN'a, Mühendisler Çağlar KAYA'ya, Burak KOÇ'a, Ahmet BAŞARAN'a, Umut BOSTANCI'ya, Aliakber KORKMAZ'a, Fizikçi Vahap KARAKILIÇ'a, Teknisyenler İbrahim ŞARA'ya ve Servet AYDIN'a

Tez çalışmasının tamamlanmasında, motivasyon desteği sağlayan ve zor zamanlarımda yardımlarını esirgemeyen sevgili arkadaşlarım, Denizhan ERENLER'e, Jale YALÇIN'a, Selen NİĞDELİOĞLU'na, Muammer BABAYİĞİT'e, Neslihan TOP'a, Davut HAKSEVER'e,

ve benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan çok değerli aileme gönülden teşekkürü bir borç bilirim.

Emre COŞGUN
Ankara, Temmuz 2017

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	4
2.1 Parçacık Hızlandırıcılarında Vakumun Önemi	4
2.2 TARLA Tesisi, Amacı ve Yerleşim Düzeni	5
2.2.1 TARLA enjektör hattı	6
2.3 Vakumun Tanımı	7
2.3.1 Gaz yasaları	9
2.3.2 Gaz kinetiği	11
2.3.3 Ortalama serbest yol ve Knudsen sayısı	18
2.4 İleri Yüksek Vakum Sistemi Tasarımı	20
2.4.1 Analitik olarak vakum tasarımı	21
2.4.2 Monte Carlo tekniği	25
2.5 Vakum Sistemi İçerisindeki Gaz Kaynakları	26
2.5.1 Gazların sistem içerisine nüfuzu	27
2.5.2 Sistem içerisinde buharlaşma	27
2.5.3 Gazların difüzyonu	27
2.5.4 Pompadan geri saçılma	28
2.5.5 Vakum kaçakları	28
2.5.6 Gaz salınımı (outgassing)	29
2.5.7 Gaz giderme (Gaz giderme) yöntemi ile gaz salınım oranının arttırılması	31
2.6 Kuadrupol Kütle Spektrometresi	32
2.6.1 İyonlaştırıcı	33
2.6.2 Kuadrupol kütle filtresi	34
2.6.3 İyon detektörü	36
2.6.4 Gaz moleküllerinin analizi	38
2.7 Vakum Pompaları	41
2.7.1 Pozitif yer değiştirme pompaları	41
2.7.2 Momentum transfer pompaları	44
2.7.3 Gaz kapanı pompaları	49
2.8 Vakum Ölçerleri	54
2.8.1 Pirani vakum ölçeri	54
2.8.2 Bayard-Alpert iyonlaşma ölçeri (hot cathode-sıcak katot)	55
2.8.3 Soğuk katot ölçer (magnetron tipi)	57

2.9 Temiz Oda Prosedürü ve Sınıflandırılması	58
2.9.1 Temiz oda sınıflandırılması.....	60
3. MATARYEL VE YÖNTEM.....	62
3.1 MOLFLOW++	62
3.2 Extorr VacuumPlus Software	63
4. BULGULAR	68
4.1 TARLA Enjektör Hattı Vakum Tasarımı ve İhtiyacı	68
4.2 TARLA Tesisi Temiz Oda Sistemi	71
4.3 Vakum Flanşlarının, Borularının ve Kazanlarının Hazırlanması	73
4.4 Analitik Olarak Efektif Pompalama Hızının Hesaplanması, Molflow+ ile Simülasyonun Yapılması ve Sistem İçerisindeki Gaz Dağılımının İncelenmesi	79
4.5 Gaz giderme Yöntemi ile Sistem Isıtılarak Gaz Salınımı Oranının Arttırılması	85
4.6 İyon Pompasından Uzak Bölgelerde Gaz Dağılımı.....	89
4.7 NEG Pompanın Sisteme Dâhil Edilmesi ve Karakterizasyonun İncelenmesi	91
4.8 Sıcak Katotun Sisteme Dahil Edilmesi ve Vakuma Etkisi	95
5. SONUÇ.....	96
KAYNAKLAR	100
ÖZGEÇMİŞ.....	104

SİMGELER DİZİNİ

AC	Alternatif akım
akb	Atomik kütle birimi
atm	Atmosfer basıncı
\vec{B}	Manyetik alan
c	Işık hızı (299.792.458 m/s)
C	İletkenlik
D	Vakum borusunun çapı
DC	Doğru Akım
e	Elektron
\vec{E}	Elektrik alan
$\langle E \rangle$	Ortalama kinetik enerji
F	Kuvvet
\vec{F}_L	Lorentz kuvveti
g	Yer çekimi ivmesi
GHz	Giga Hertz
I	Akım
k	Bolztmann sabiti
K	Sıkıştırma oranı
keV	Kilo elektron volt
K_n	Knudsen sayısı
kV	Kilovolt
m	Kütle
M	Moleküler ağırlık
mbar	Milibar
MeV	Mega elektron volt
MHz	Mega Hertz
MW	Mega Watt
N_A	Avogadro sayısı
n	Mol sayısı
nm	Nanometre
P	Basınç
Pa	Pascal
ps	Piko saniye
Q	Gaz akış oranı
R	Gaz sabiti (8,3145J/(mol K))
RF	Radyo Frekansı
S	Hacimsel akış
S_{eff}	Efektif pompalama hızı
V	Hacim
\vec{v}	Hız
v_p	En olası hız
v_{rms}	Kök ortalama kare hız
$\langle v \rangle$	Ortalama hız

$\langle \vec{v}^2 \rangle$	Hızın karesinin ortalaması
T	Sıcaklık
ρ	Yoğunluk
μm	Mikrometre
λ	Ortalama serbest yol
σ	Çarpışma kesiti
α_{TR}	İletim olasılığı
τ	Bekleme zamanı
ω	Açısal frekans

Kısaltmalar

CERN	Avrupa Nükleer Araştırma Merkezi
DP	Difüzyon Pompa
FC	Faraday Kabı
HTE	Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü
Linac	Lineer Hızlandırıcı
NEG	Buharlaşmayan Tutucu Pompa
QMS	Kuadrupol Kütle Spektrometresi
RGA	Artık Gaz Analizörü
Rpm	Dakikadaki Devir Sayısı
SEM	İkincil Elektron Çoğaltıcı
SI	Uluslararası Standart
TARLA	Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara
TMP	Turbo Moleküler Pompa
UHV	İleri Yüksek Vakum
XHV	Çok ileri yüksek vakum

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.2 TARLA tesisi enjektör hattı.....	7
Şekil 2.3 x düzleminde hareket eden parçacığın A kesiti (Houston 2006).....	12
Şekil 2.4 Azot gazı ($m=28$ akb) için bir boyutta Maxwell-Boltzmann hız dağılımı	16
Şekil 2.5 En olası hız, ortalama hız ve kök-ortalama-kare hız karşılaştırılması (Anonymous 2017a).....	17
Şekil 2.6 Atom yarıçapı d_0 ve çarpışma kesiti σ (Gatzen vd. 2015)	18
Şekil 2.7 Farklı akış rejimlerine göre moleküllerinin akış hareketleri (Garton 2011)	20
Şekil 2.8 Vakum sistemlerinin seri (a) ve paralel (b) bağlanması (Jimenez 2012).....	22
Şekil 2.9 Gaz akış kısıtlamasının şematik gösterimi (Chiggiato 2012)	24
Şekil 2.10 Vakum sistemi içerisindeki gaz kaynakları (Malyshev 2013).....	26
Şekil 2.11 Vida ve çatlak arasına sıkışmış sanal kaçak kaynakları (Bertolini 2002).....	29
Şekil 2.12 QMS cihazının genel yapısı	33
Şekil 2.13 İyonlaştırma kısmında gaz atomların iyonlaşması.....	34
Şekil 2.14 Kuadropol elektrotlar ve elektriksel bağlantıları	35
Şekil 2.15 Faraday kabı kullanılarak iyon akımı ölçümü (Anonymous 2017d)	37
Şekil 2.16 SEM kullanılarak M faktörü kadar yükseltip iyon akımının ölçülmesi	37
Şekil 2.17 Kısmi basınç değerlerine göre kütle spektrumu.....	39
Şekil 2.18 Döner pompanın şematik görünümü.....	42
Şekil 2.19 Kök pompasının kesit yapısı	43
Şekil 2.20 Pompa kanat yapısı	44
Şekil 2.21 Turbo moleküler pompa ve bıçak yapıları	45
Şekil 2.22 Sıkıştırma oranı-basınç ilişkisi.....	47
Şekil 2.23 Difüzyon pompasının şematik görünümü (Anonymous 2017e).....	48
Şekil 2.24 Gaz yayılımına göre difüzyon pompasının çalışma basıncı	48
Şekil 2.25 İyon pompasının şematik gösterimi (Dusza vd. 2008)	49
Şekil 2.26 Diyot iyon pompası.....	50
Şekil 2.27 Pompalama hızı 100 l/s olan iyon pompasının basınç grafiği	51
Şekil 2.28 Aktivasyon işleminin şematik gösterimi (Saes Getters 2001)	52
Şekil 2.29 Pirani ölçeri için wheatstone devresi (Anonymous 2017f).....	54
Şekil 2.30 Bayard-Alpert ölçücünün şematik gösterimi	56
Şekil 2.31 Sıcak katodun cam tüpsüz gösterimi (Anonymous 2017g)	57
Şekil 2.32 Soğuk katot (Kurt J. Lesker Company 2002)	58
Şekil 3.1 Molflow+ programı ve bir simülasyon örneği	62
Şekil 3.2 VacuumPlus programının arayüzü.....	64
Şekil 3.3 "Mass Sweep" modu	65
Şekil 3.4 "Trend Mode" modunda gaz kaçağı tespiti.....	66
Şekil 3.5 "Extorr" marka Artık Gaz Analizörü	67
Şekil 4.1 TARLA tesisi enjektör hattı vakum tasarımı	68
Şekil 4.2 CF Flanşın şematik olarak kesit görünümü (Anonymous 2017h)	70
Şekil 4.3 Enjektör hattı vakum simülasyon sonuçlarından elde edilen basınç dağılımı	71
Şekil 4.4 TARLA Tesisi temiz oda	72

Şekil 4.5 Partikül sayacından alınan sonuçlar	73
Şekil 4.6 Ultrasonik temizleyici içerisinde vakum elemanları.....	74
Şekil 4.7 Vakum deney düzeneğinin görünümü	75
Şekil 4.8 Kademeli sıkılama prosedürü	77
Şekil 4.9 Vakum düzeneğinin şematik görünümü	79
Şekil 4.10 Vakum sisteminin 3D gösterimi	80
Şekil 4.11 Vakum sisteminin Molflow+ arayüzünde, STL formatında gösterimi.....	81
Şekil 4.12 Molflow+ simülasyon sonucu.....	82
Şekil 4.13 Kısmi basınç değerlerine göre gaz dağılımları	83
Şekil 4.14 Simülasyon ve deneysel verilerin kısmi basınca göre değerleri	84
Şekil 4.15 Gaz giderme için sistem üzerinde kullanılan degasing battaniyesi ve kabloları.....	86
Şekil 4.15 Gaz giderme işlemi sonrası gaz dağılımı	86
Şekil 4.17 Gaz giderme sonrası simülasyon ve deneysel değerlerin karşılaştırılması	87
Şekil 4.18 Gaz giderme işlemi yapılan (kırmızı) ve yapılmayan (siyah) paslanmaz çeliğin, basıncın logaritmik değerine göre karşılaştırılması	89
Şekil 4.19 RGA uzak noktaya alınmış sistemin şematik gösterimi	89
Şekil 4.20 RGA uzak noktada iken sistem içerisindeki gaz dağılımı	90
Şekil 4.21 NEG pompa sisteme dahil edildikten sonra simülasyon ve deneysel verilerin sonuçları.....	92
Şekil 4.22 NEG pompa sonrası sistemdeki gaz dağılımı	93
Şekil 4.23 NEG pompa re-aktivasyon süreci	94
Şekil 5.1 İleri yüksek vakum deney düzeneğinde iyon pompası vakum ölçeri değeri.....	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1 Vakum seviyelerine göre basınç değerleri	9
Çizelge 2.2 Basınç değerlerine göre parçacık yoğunluğu ve ortalama serbest yol.....	19
Çizelge 2.3 Uygulanan prosedürlere göre malzemelerin gaz salınım oranı.....	30
Çizelge 2.4 Moleküllerin atomik ağırlıklarına gaz türleri (Dusza 2008).....	39
Çizelge 2.5 Federal Standart 209 E.....	60
Çizelge 2.6 ISO temiz oda standartları	61
Çizelge 4.1 Kullanılan vakum elemanları ve adetleri	76
Çizelge 4.2 Deney düzeneğinde bulunan vakum aletleri ve özellikleri	76
Çizelge 4.3 Vida türlerine maksimum tork değerleri.....	78
Çizelge 4.4 Vakum ölçerleri seviyelerinin karşılaştırılması	84
Çizelge 4.5 Vakum ölçerlerin deneysel veri sonuçları ile simülasyon sonuçları.....	85
Çizelge 4.6 Gaz giderme öncesi ve sonrası değerler ile simülasyon değerleri	88
Çizelge 4.7 Hidrojen ve su gazları kısmi basınçlarının karşılaştırılması.....	90
Çizelge 4.8 Kullanılan NEG pompanın özellikleri	91
Çizelge 4.9 NEG pompa aktif iken verilerin kıyaslanması.....	93
Çizelge 4.10 Sıcak katotun vakum seviyesine etkisi	95
Çizelge 5.1 Deneysel veriler ve simülasyon sonuçları.....	97
Çizelge 5.2 Gaz giderme işlemi öncesi ve sonrası basınç değerleri	98
Çizelge 5.3 NEG pompasının sisteme dâhil edilmesinden sonra sonuçlar	98

1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek teknolojiye dayalı araştırma ve uygulamalarda, vakum bilimi ve bu bilimin uygulanması sonucunda geliştirilen vakum teknolojileri önemli bir yere sahiptir. Her geçen gün incelenen fiziksel sistemlerin boyutları küçüldükçe daha kapsamlı vakum düzeneklerine olan ihtiyaç da artmaktadır. Günümüzde vakum düzeneği bulundurmayan araştırma laboratuvarı ve yüksek teknoloji üretim merkezi yok gibidir (Tarımcı ve Sarı 2006).

Hızlandırıcı teknolojileri günümüzdeki jenerik teknolojilerin başında gelmektedir. Gerek nükleer yapının incelemesi gerekse birçok uygulamanın gerçekleşmesinde önemli olan nükleer reaksiyonlar hızlandırılmış temel parçacık demetleri ile mümkün olabilmektedir. Bu amaca yönelik olarak günümüzde yaklaşık yarısı medikal alandaki uygulamaları olmak üzere 30.000 parçacık hızlandırıcısı mevcuttur (Yavaş 2016). Hızlandırıcılar, sağlık alanı dışında parçacık fiziği, nükleer fizik, biyoteknoloji ve nanoteknoloji, genetik, malzeme, endüstri, metroloji, çevre, kimya, ilaç, maden, enerji, savunma, uzay, eğitim, iletişim vb. alanlarda araştırma, eğitim ve uygulama amacıyla kullanılmaktadırlar (Akkurt 2013).

Birçok bilimsel ve endüstriyel işlem o kadar hassastır ki çalışmaların vakum ortamında yapılması gerekmektedir. Hızlandırıcılar için, parçacıklar hava molekülleri ile çarpıştırlarsa hızlarını kaybederler ve GeV (Giga elektron volt) mertebeli enerjilere hiçbir zaman ulaşamazlar. Parçacıkların taşındığı demet hattında, parçacıkların ömrünü ve kalitesini arttırmak için, ortamda bulunan gaz moleküllerinin mümkün olduğunca arındırılması gerekmektedir. Parçacık hızlandırıcılarında gerekli olan vakum seviyesi $<10^{-9}$ mbar olmalıdır. Bu vakum seviyesi hassas bir bölgedir ve bu seviyeye ulaşmak için belirli işlemlerin uygulanması gerekmektedir. Bunların başında demet hattını oluşturmak için uygun malzeme seçilmelidir. Seçilen malzeme düşük gaz salınımına sahip olmalı, sıcaklığa dayanıklı olmalı ve olabildiğince kirlilik (kontaminasyon) oluşturmamalıdır. Vakum malzemeleri mekanik birleşimden önce yağ ve toz parçalarından arındırılmalıdır. Yıkama işlemi ultrasonik temizleyici içerisinde yapılmalı ve de-iyonize su kullanılmalıdır. Yıkama sonrasında uygun sıcaklıkta bir fırın içeride

kurutulmalıdır. Çok ileri yüksek vakum seviyelerine ulaşabilmek için tek bir vakum pompası yeterli değildir, bu yüzden çeşitli basınç aralıklarına göre uygun pompalar kullanılmalıdır. Vakum kazanı içerisine yağ kirliliği oluşturacak pompalar kullanılmamalıdır. Vakum ekipmanlarının mekanik birleşimi sırasında vidalar için uygun sıkılama yöntemi uygulanmalı ve vakum kaçağına sebep oluşabilecek kasıntı engellenmelidir. Mekanik birleşim temiz oda içerisinde yapılmalı ve temiz oda minimum ISO-6 standardında olmalıdır. Kapalı sistem oluşturulduktan sonra, vakum teşhisi yapılmalıdır, sistem içerisindeki gazları türü ve miktarı ölçülmelidir. Bunun için artık gaz analizörü kullanılabilir. Gaz salınım oranını arttırmak ve daha yüksek vakum seviyelerine çıkabilmek için gaz giderme işlemi uygulanmalıdır. Paslanmaz çelik malzeme için ileri yüksek vakum seviyelerinde temel gaz yükünü H₂ gazı oluşturur. H₂ gazını efektif bir şekilde ortamdan atmak için NEG (Non-Evaporable Getter) pompa kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında ilk olarak, Türkiye'nin ilk parçacık hızlandırıcı tesisi olan TARLA tesisinde, birinci süperiletken hızlandırıcıya kadar kısımlardan oluşan enjektör hattının vakum ihtiyacı ele alınmıştır. Vakumun tanımı yapılarak, kapalı sistem içerisindeki gaz yasaları açıklanmıştır. Gazların davranışı hakkında bilgi vermesi açısından gaz kinematiği açıklanarak, gazların hızları, enerjileri ve sıcaklıkları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Ayrıca gazlar, vakum seviyelerine göre akış türleri ve bu akış şekillerinin bağlı olduğu ortalama serbest yoldan bahsedilmiştir.

İleri yüksek vakum düzeneği kurulurken pompa seçimi için belirli hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu hesaplamalardan birincisi analitik olarak hesaplama yapmaktır. Bu yöntem ile kullandığımız iyon pompasının efektif pompalama hızı hesaplanmıştır. Analitik hesaplamada sistemin iletkenlik ve efektif pompalama hızının hesaplanması için gaz akış oranının bilinmesi gerekmektedir ve büyük sistemler için oldukça zor ve karmaşıktır. İkincisi ise Monte Carlo metodu kullanmaktır. Bu tez çalışmasında, bu yöntem için CERN tarafından geliştirilen Molflow+ programı kullanılmıştır ve elde edilen simülasyon sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Kurulan ileri yüksek vakum deney düzeneğinde kullanılan mekanik, turbo moleküler, iyon ve NEG pompasının yanı sıra vakum basınç değerlerini ölçmek için kullanılan pirani, soğuk katot ve sıcak katot aletlerinin çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Ayrıca vakum diyagnostiği için gerekli olan kuadrupol kütle spektrometresi (Artık gaz analizörü) hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

Vakum sistemi içerisinde gaz yükü oluşturan kaçaklar, buharlaşma, gaz salınımı ve difüzyon olayları anlatılarak bu gaz yüklerinin azaltılabilmesi için yapılabilecek işlemler açıklanmıştır. 10^{-10} mbar seviyesine çıkmak için yukarıda anlatılan işlemler adım adım uygulanmıştır. Gaz giderme işlemi 200 °C'de 40 saat boyunca uygulanmış ve NEG pompanın karakterizasyonu incelenmiştir. Her işlemde sonra sistemdeki gazların türleri ve kısmi basınçları belirlenmiş ve bu gazların oluşma sebepleri araştırılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Parçacık Hızlandırıcılarında Vakumun Önemi

Parçacık hızlandırıcıları, genel olarak yüklü parçacıkları yüksek enerjilere ulaştırmak için kullanılan sistemlerin bütünüdür. Parçacık hızlandırıcılarının kullanım alanlarındaki çeşitlilik, bilime katkılarının çok geniş bir alanda olduğunu göstermektedir. Hızlandırıcıların, temel araştırma alanı olan temel kuvvetler ve parçacıklar üzerine çalışmaların yanı sıra, endüstri, tıp, arkeoloji, meteoroloji gibi alanlarda bilimsel veriler ve ürünler sağlayan yüksek teknolojik donanımlar olduğu bilinmektedir (Ercan 2011).

Hızlandırıcılar lineer (doğrusal) ve dairesel hızlandırıcılar olmak üzere iki gruba ayrılır (Yavaş 2013). Lineer hızlandırıcılarda parçacıklar tanıma uygun olarak doğrusal yörüngeler boyunca, elektrostatik alanlar ile veya salınımlı RF alanlarla hızlandırılır. Dairesel hızlandırıcılar ise yüklü parçacıkları RF kaviteler yardımıyla hızlandıran ve manyetik alanlar yardımıyla dairesel yörüngelerde hareket etmesini sağlayan hızlandırıcılardır (Yıldız 2010). İki tür hızlandırıcı grubu için herhangi bir temel avantaj veya dezavantajdan bahsedilmez. Çoğunlukla belirli bir uygulama ve bazen mevcut teknoloji bu iki sınıftan hangisinin kullanılacağına karar verir (Wiedemann 2003).

Parçacıkları hızlandırılması için parçacıkların yüklü olması gerekmektedir. Yüklü parçacıkların elektromanyetik alanlarla etkileşiminden ve referans sisteminden bağımsız olarak Lorentz kuvvet denkleminin koordinat dönüşümleri değişmezliğini korur (Aksoy vd 2008). Hızlandırıcı fiziğinde tüm hızlanma ve demet yönlendirmesi, bir elektrik alan \vec{E} ve manyetik alan \vec{B} 'nin varlığında yükü q olan bir parçacık üzerine etkiyen Lorentz kuvvetinden (\vec{F}) türetilir:

$$\vec{F}_L = q(\vec{E} + \frac{\vec{v} \times \vec{B}}{c}) \quad (2.1)$$

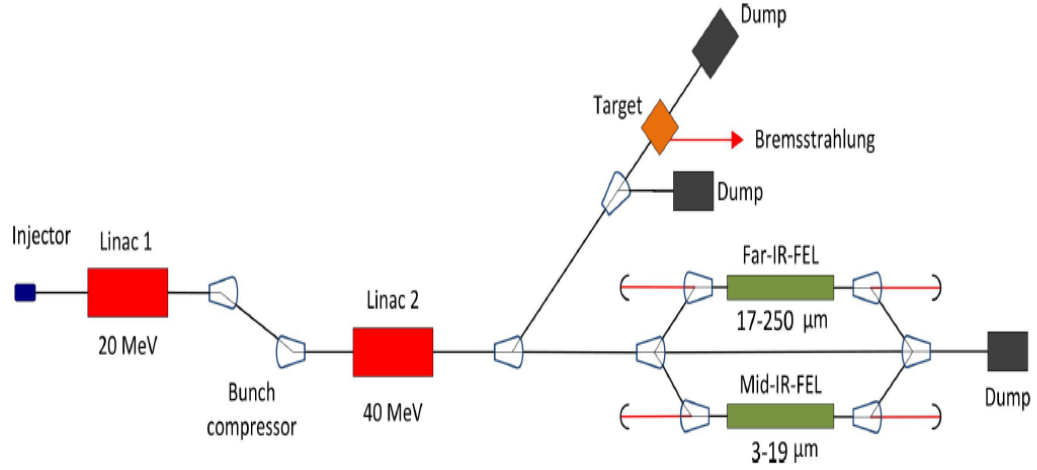
Burada c ışık hızı (299.792.458 m/s), \vec{v} ise parçacığın hızıdır. Burada elektrik alandan kaynaklanan kuvvet demet enerjisini arttırmak için kullanılırken, manyetik alan demeti istenen yörünge hatları boyunca yönlendirmek için kullanılır (Aksoy vd. 2016).

Parçacıkların taşındığı demet hattında, parçacık demetlerinin taşınabilmesi için, hattın içerisindeki gaz moleküllerinden mümkün olduğunca arındırılması gerekmektedir. Ayrıca hızlandırılan parçacıkların ömrünü ve kalitesini arttırmak için demet hattının içerisi olabildiğince ileri yüksek vakum (UHV) seviyelerinde tutulmalıdır (Aksakal vd. 2013). Parçacık hızlandırıcı sistemlerinde vakum seviyesi demet hattı boyunca farklılık gösterebilmektedir. Örnek olarak katot kontaminasyonunu engellemek için elektron tabancası yaklaşık olarak 10^{-9} mbar seviyesinde, elektron demetinin tabancadan hızlandırıcı kavitelere kadar taşınması sürecinde saçılmasını engellemek için 10^{-8} - 10^{-10} mbar seviyelerinde olmalıdır. Kaviterler içerisinde, kyro-pompa yardımı ile vakum seviyesi 10^{-11} mbar seviyelerine ulaşabilmektedir. Ayrıca undulatör ve wiggler salındırıcı sistemlerinde elektron saçılımını engellemek için vakum seviyesi 10^{-9} - 10^{-10} mbar aralığında tutulmalıdır (Garcia 2011).

2.2 TARLA Tesisi, Amacı ve Yerleşim Düzeni

TARLA (Turkish Accelerator and Radiation Laboratory at Ankara) tesisi bir süperiletken elektron hızlandırıcısı ve ışınım tesisi olarak Türk Hızlandırıcı Merkezi projesi kapsamında kurulmaktadır. Ankara Üniversitesi Gölbaşı yerleşkesinde, Hızlandırıcı Teknolojileri Enstitüsü (HTE) ile aynı yerde bulunmaktadır. TARLA tesisinde kızıl-ötesi bölgesinde 3-250 mikrometre dalgaboyu aralığında serbest elektron lazeri üretilmesi amaçlanmaktadır (Aksoy vd. 2014). Tesis, tamamen normal iletken teknolojiye dayalı enjektör, sürekli modda elektron demeti hızlandırabilen iki adet süperiletken hızlandırıcı modülünden oluşan ana hızlandırma bölümü ve farklı periyotlarda magnetleri (undulator) barındıran iki adet birbirinden bağımsız optik rezonatörden oluşmaktadır. Tesiste hızlandırıcıdan elde edilen elektron demeti aynı zamanda Bremsstrahlung ışınımı üretmek için de kullanılacaktır (Aksoy ve Özkorucuklu 2011). TARLA tesisinin temel amacı: Türk Hızlandırıcı Merkezi'nin ilk tesisi olarak ülkemize ve bölgemize elektron hızlandırıcısına dayalı ışınım kaynakları ile

Ar-Ge hizmeti sunmak ve hızlandırıcı teknolojileri ile uygulamaları konusunda bilgi ve deneyim kazandırmaktır (Yavaş 2014).



Şekil 2.1 TARLA tesisi demet hattının şematik gösterimi

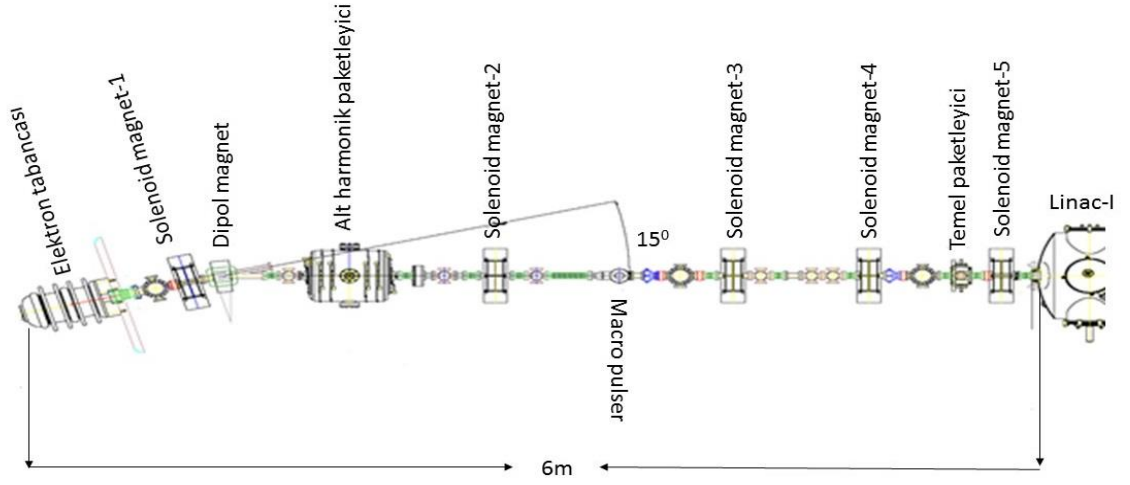
TARLA tesisinin genel olarak iki temel karakteristiği vardır:

Birincisi, 15-40 MeV enerjili elektron demeti ve 25 mm ile 90 mm periyot uzunluklu salındırıcı magnetler kullanılarak 3-250 μm dalgaboyu aralığında Serbest Elektron Lazeri (SEL) üretmek ve yüksek güçlü (ortalama güç ~ MW) serbest elektron lazerleri ile Ar-Ge çalışmaları yapmaktır. İkincisi ise elektron demetinin, farklı radyatör-kolimatör düzeneklerinden geçirilmesi ile elde edilecek Bremsstrahlung radyasyonu ile nükleer yapı çalışmaları yapmaktır. Ayrıca, elektron demetinin kendisini sabit hedef deneylerinde doğrudan kullanılabilir.

2.2.1 TARLA enjektör hattı

Enjektör hattı, elektron kaynağını da içeren, birinci süperiletken hızlandırıcı modüle kadar olan kısımların tamamından oluşur. Enjektör sistemi, elektron tabancasında üretilen 250 keV enerjili elektron demetinin uygun parametreler kazandırılarak hızlandırıcı modüle (Linac-I) taşınmasını sağlar. Yaklaşık 6 m uzunluğundadır. 250 kV gerilimde çalışan termiyonik DC elektron tabancası, 260 MHz ve 1.3 GHz’de çalışan iki adet paketleyici kovuk (Buncher), beş adet solenoid magnet, bir adet macro pulser ve

bir adet eğici (dipol) magnetten oluşmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 TARLA tesisi enjektör hattı

Elektron akımı tungsten katottan ısı yolla elde edilir ve yaklaşık 500 ps uzunluklu elektron paketlerinden oluşur. Buna ek olarak elektron paketine alt harmonik paketleyicide enerji yayılımı verilir. Kafası ile kuyruğu arasında enerji yayılımı olan paket, temel paketleyici kovuğun linear bölgesine sığacak şekilde sürüklenme tüpünde sıkıştırılır. İkinci paketleyici kovuk süper iletken hızlandırıcı oyuğun ilk hücresinde optimum boyuna faz uzayı dağılımı oluşturacak şekilde pakete enerji yayılımı kazandırır. Yüksek gradyende çalışan süper iletken hızlandırıcı yapılarında kovuk duvarlarındaki yüksek elektrik alan kovuk yüzeyinden yüklü parçacık kopmasına neden olur. Bu yüklü parçacıklar alanın negatifine rastladığında katot yüzeyine doğru geri hızlanacaktır. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi demet hattı eksenini ana hızlandırıcı ekseninden 15° bükülerek bu etkinin azaltılması amaçlanmıştır.

2.3 Vakumun Tanımı

Vakum terimi atmosfer basıncı ‘Atmosferik basıncın’ altında olan gazların doldurduğu kapalı bir ortam olarak tarif edilmiştir (Tarımcı ve Sarı 2006). Vakum ortamının bugünün teknolojisinde temel ve vazgeçilmez bir rolü bulunmaktadır. Vakum teknolojisi endüstriyel üretim ile uygulamaları alanında büyük oranda tercih

edilmektedir. Ayrıca mühendislerin, bilim adamlarının çeşitli amaçlar doğrultusunda araştırma ve geliştirme laboratuvarlarında geniş bir kullanım aralığına sahiptir.

Vakum, sistem içerisindeki basıncın göreceli bir ölçüsüdür. Basınç (P), A (m^2) birim metrekareye uygulanan F (N) kuvvetidir (Gatzen vd. 2015):

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Uluslararası Standartlarda (SI) basınç birimi N/m^2 'dir ve bu da Pascal olarak kullanılır. Bu kuvvet 0,76 metre yüksekliğindeki civa kolonunun ağırlığı ile dengelenir. Civanın yoğunluğu 13600 kg/m^3 olduğuna göre, sıvı kolonunun birim yüzeye uyguladığı basınç $P = \rho g y$ formülünden (Tarımcı ve Sarı 2006) :

$$P = \left(\frac{13600 \text{ kg}}{m^3} \right) \times \left(\frac{9,81 \text{ m}}{s^2} \right) \times (0,76 \text{ m}) = 1,013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

olarak bulunur. Burada ρ sıvının yoğunluğu, g yer çekimi ivmesidir. Bu büyüklük atmosfer basıncına eşittir ve 1 atm olarak birimlendirilir. Fakat vakum çalışmalarında en çok kullanılan birim milibar (mbar) dır. Milibar uygun ve kabul edilebilir bir birimdir çünkü vakum çalışmalarında birim alana uygulanan kuvvetten bahsedilmez, genel olarak belli hacim içerisinde bulunan moleküllerin yoğunluğundan bahsedilir. Ek olarak birçok laboratuvarında kullanılan aletler bir başka basınç birimi olan Torr'a göre kalibre edilmiştir. Bu birimler arasındaki ilişki şu şekildedir (Chambers 2004):

$$100 \text{ Pa} = 1 \text{ mbar} = 0,76 \text{ torr}$$

Vakum sisteminde basınç, büyüklüğüne göre belirli bölgelere ayrılmıştır. Vakum seviyesi üst ve alt limitlerine göre sınıflandırılmıştır. Aşağıdaki çizelge 2.1'de vakum seviyesine göre basınç değerleri verilmektedir (Marquardt 1999).

Çizelge 2.1 Vakum seviyelerine göre basınç değerleri

Vakum Seviyesi	Basınç değeri
Düşük vakum	750 torr- 1 torr
Orta vakum	1 torr- 10 ⁻³ torr
Yüksek vakum	10 ⁻³ torr-10 ⁻⁶ torr
Çok yüksek vakum	10 ⁻⁶ torr-10 ⁻⁹ torr
İleri yüksek vakum	10 ⁻⁹ torr 10 ⁻¹² torr
Çok ileri yüksek vakum	<10 ⁻¹² torr

2.3.1 Gaz yasaları

Gaz yasaları, gazlardaki termodinamik sıcaklık (T), basınç (P) ve hacim (V) aralarındaki ilişkiyi açıklayan bir takım kanundur.

Boyle-Mariotte yasası

Anglo-İrlandalı filozof ve yazar Robert Boyle (1627-1691) ve Fransız fizikçi Edme Mariotte (1620-1684) belirli bir sıcaklık için gazların hacmi basınçları ile ters orantılı bir şekilde değiştiğini açıklamışlar (Gatzen vd. 2015).

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (2.3)$$

Boyle Yasası hesaplamaları çeşitli durumlarda kullanılır: hava kompresörü seçerken, pistonlu hava tüplerinde sıkıştırılmış havanın tüketiminin hesaplanması ve havanın depolanması için gereken süreyi belirlemek içindir.

Charles yasası

Fransız fizikçi Jacques Charles (1746-1823) ilk hidrojen balonunu kullanan kişidir. Onun anısına Charles yasası, sabit kütle ve sabit basınçta gazların hacminin sıcaklıkla doğru orantılı olduğunu açıklamaktadır. Sıcaklık arttıkça, moleküllerin ortalama hızı artar ve böylece moleküllerin içerisinde bulunduğu sistemin duvarlarına yaptığı basınç artar.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2.4)$$

İdeal Gaz yasası

İdeal gaz yasası, sadece teoride olan ideal gazların durumları hakkında denklemler sağlayan yasadır. Belirli bir sistemdeki gazın durumu basınca, hacme ve sıcaklığa göre belirlenir. İdeal gaz denklemi aşağıdaki gibidir:

$$PV = nRT \quad (2.5)$$

n : mol sayısı, R : gaz sabiti (8,3145J/(mol K)). Gerçekte doğada ideal gaz yoktur. Ancak tüm gazlar, yeterince düşük yoğunluklarda, yani moleküllerin birbirinden yeterince uzak olduğu, birbirleri ile etkileşime girmediği koşullar altında ideal duruma yaklaşırlar. Böylece ideal gaz denklemi, düşük yoğunluklarda gerçek gazların davranışa hakkında bilgi edinmemizi sağlar (Halliday vd. 2014).

Avogadro yasası

Matematikçi, fizikçi Amadeo Avogadro (1776-1856) eşit hacimlerdeki gazların; eşit sıcaklık ve eşit basınçta aynı sayıda parçacık ya da molekül sayısına sahip olduğunu öne sürdü. Buna göre belirli bir hacimdeki gazın bulundurduğu molekül sayısı, gazın kütlesi ya da boyutundan bağımsızdır. Avogadro sayısı (ya da sabiti) N_A bir mol gaz içerisindeki molekül sayısını belirtir ve 12 gram saf C^{12} nükleitinde bulunan atom sayısına eşittir (Gatzen vd. 2015);

$$N_A = 6,02214129 \times 10^{23} \text{mol}^{-1}$$

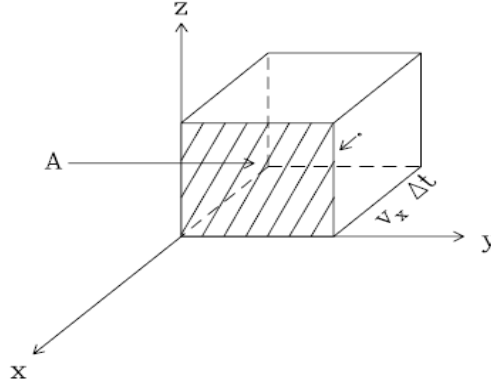
Gaz sabitinin Avogadro sayısına oranına Avusturyalı fizikçi Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906) adına Boltzmann sabiti (k) denir (Gatzen vd. 2015).

$$k = \frac{R}{N_A} = 1,3804 \times 10^{-23} \frac{J}{K} \quad (2.6)$$

2.3.2 Gaz kinetiği

Kapalı bir kazan içerisinde, bir gazın kazan duvarına uyguladığı basınç, moleküllerin kazan duvarı ile çarpışmasından kaynaklanmaktadır. Kazan içerisindeki molekül sayısı fazla ise birim zamanda çarpışma sayısı fazla olmakta ve uygulanan basınç artmaktadır. Gazların kinetik teorisi, ideal gaz moleküllerin etkileşiminin bir tanımıdır. İdeal bir gazda, gaz molekülleri arasında çekici ve itici kuvvet yoktur. Gaz molekülleri bağımsız küreler gibi davranır, moleküllerin çaplarına kıyasla bitişik moleküller arasındaki ortalama mesafeler büyüktür (Gatzen vd. 2015). Herhangi bir anda bir gazın tüm moleküllerinin hızları birbirine eşit değildir. Moleküllerin çoğu birbirine yakın hızlara sahip iken çok az kısmı düşük, çok az kısmı da daha yüksek hızla hareket eder. Gaz moleküllerinin hızları mutlak sıcaklıkla doğru orantılıdır. Sıcaklık arttıkça moleküllerin hızları da artar (Anonymous 2017a).

Birim Δt zamanında duvarlara çarpan molekül sayısını bulmak için v_x hızına ve m kütlesine sahip moleküllerin x yönünde hareket ettiğini düşünelim. Bu moleküller $z - y$ düzleminde A alanına sahip duvara çarpmaktadır. $z - y$ düzlemi şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 x düzleminde hareket eden parçacığın A kesiti (Houston 2006)

$A\vartheta_x\Delta tn^*$ sayıdaki molekül kazanın duvarına çarpmaktadır. Burada n^* birim hacimdeki molekül sayısıdır. Moleküllerin yarısı $+x$ yönünde, diğer yarısı $-x$ yönünde hareket ettiği için birim zamanda duvara çarpan molekül sayısı $\frac{1}{2} A\vartheta_x\Delta tn^*$ olur (Halliday 2014).

Bir molekülün duvara çarpmasından dolayı duvar yüzeyinde oluşan kuvvet Newton yasası ile açıklanır. $F = ma = \frac{m d\vartheta}{dt} = d(m\vartheta)/dt$ olur. Bu denklem $F\Delta t = \Delta(mv)$ şeklinde olur. Eğer bir molekül elastik bir şekilde duvara çarpıp geri dönerse momentum değişimi $\Delta(m\vartheta) = 2m\vartheta_x$ şeklinde olur. Sonuç olarak bir molekülün duvara çarpmasından dolayı oluşacak kuvvet $F\Delta t = 2m\vartheta_x$ şeklinde ve toplam çarpışma sayısından dolayı oluşacak kuvvet $F\Delta t = \frac{1}{2} A\vartheta_x\Delta tn^*(2m\vartheta_x)$ şeklinde olur. Birim alandaki basınç $p = F/A$ olduğundan $p = n^*m\vartheta_x^2$ olur.

Şüphesiz bütün moleküller aynı ϑ_x hızında hareket etmemektedirler. Bu yüzden basınç x yönünde hareket eden moleküllerin hızlarının karesinin ortalaması ile orantılıdır, $P = n^*m \langle \vartheta_x^2 \rangle$ şeklinde olur. Serbest bir molekül x, y ve z yönünde hareket ettiği için toplam vektörel hız $\vec{\vartheta} = \vartheta_x^2 + \vartheta_y^2 + \vartheta_z^2$ şeklinde ve toplam ortalama hızın karesi $\langle \vec{\vartheta}^2 \rangle = \langle \vartheta_x^2 \rangle + \langle \vartheta_y^2 \rangle + \langle \vartheta_z^2 \rangle$ şeklinde olur. Sonuç olarak $\langle \vartheta_x^2 \rangle = \langle \vartheta_y^2 \rangle = \langle \vartheta_z^2 \rangle = \langle \vec{\vartheta}^2 \rangle / 3$ olur. Bu sonuçtan dolayı basınç:

$$P = \frac{1}{3} n^* m \langle v^2 \rangle \quad (2.7)$$

şeklinde olur. n^* birim hacimdeki molekül sayısıydı ve nN_A/V şeklinde yazılabilir. Burada N_A Avogadro sayısı ve n mol sayısıdır. Bu sonuç ile birlikte,

$$PV = \frac{1}{3} nN_A m \langle v^2 \rangle \quad (2.8)$$

şeklinde olur. Moleküllerin ortalama kinetik enerjisi $\langle E \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$ şeklindedir. Denklem (2.8):

$$PV = \frac{2}{3} nN_A \langle E \rangle \quad (2.9)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (2.8) ve denklem (2.9) ideal gaz yasasına benzemektedir. İdeal gaz yasası eğer sıcaklık sabit ise basınç ve hacmin sabit olacağını söylerken denklem (2.8) ve denklem (2.9), $\langle v^2 \rangle$ ve $\langle E \rangle$ sabit iken basınç ve hacmin sabit olacağını belirtir. Molekülün sayısı, enerji ve hız sabit iken moleküllerin duvara ulaşması için daha uzun süre gerekecek böylece sistemin basıncı düşecektir (Houston 2006).

Moleküllerin sıcaklık ve enerji ilişkisi incelenecek olursa, farklı ortalama enerjiye sahip iki molekül düşünülebilir. Bu iki molekül çarpışacak olursa enerjisi büyük olan molekülden diğerine bir sıcaklık akışı olacaktır. Eğer moleküllerin ortalama enerjileri eşitse moleküller arasında herhangi bir sıcaklık değişimi olmayacaktır. Matematiksel olarak $T_1 = T_2$ ise $\langle E \rangle_1 = \langle E \rangle_2$ olur. Gerçekte sıcaklık, kinetik enerjiden tanımlanamaz, bunun için ideal gaz yasasına başvurulabilir: $T = PV/nR$. Denklem (2.9)'un yerine yazılarak ve her iki taraf nR ye bölünürse;

$$T = \frac{PV}{nR} = \frac{2}{3} \frac{N_A}{R} \langle E \rangle$$

ya da:

$$\langle E \rangle = \frac{3}{2} kT \quad (2.10)$$

bulunur. Burada k Boltzmann sabiti olarak bilinir ve R/N_A ya eşittir. Sıcaklık ile hız arasındaki ilişkiye bakılacak olunursa $\langle E \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$ eşitliğinden,

$$\langle v^2 \rangle = \frac{3kT}{m} \quad (2.11)$$

şeklinde olur.

Belirli bir sıcaklıkta bir gazdaki hızların dağılımını incelenirse, moleküllerin v_x ile $v_x + dv_x$ hızları arasında v_y ile $v_y + dv_y$ hızları arasında ve v_z ile $v_z + dv_z$ hızları arasında bulunma olasılığı $F(v_x, v_y, v_z)dv_x dv_y dv_z$ ile verilir. $F(v_x, v_y, v_z)$ dağılım fonksiyonunun dört ana özelliği bulunmaktadır:

- i. **Hız dağılımı, hız fonksiyonunun çift fonksiyonu olmalıdır;** Çift fonksiyon olması için $F(v_x) = F(-v_x)$ özelliğini taşıması gereklidir. Bu yüzden dağılım fonksiyonu hızın karesine bağlıdır; $F(v_x) = f(v_x^2)$
- ii. **Hız fonksiyonu bağımsız olmalıdır;**
 $F(v_x, v_y, v_z) = F(v_x)F(v_y)F(v_z) = f(v_x^2)f(v_y^2)f(v_z^2)$

Bunun yanında $\exp(a + b + c) = e^a e^b e^c$ olduğu için $F(v_x) = f(v_x^2) = K \exp(\pm \kappa v_x^2)$ yazılabilir. Burada K ve κ sabitlerdir ve denklemden görülebildiği gibi κ artı veya eksi işaret alabilir. Fakat κ sabiti eksi işaret almalıdır çünkü çok yüksek hızlarda olasılık küçük olmalıdır.

K sabitini bulmak için olasılık fonksiyonunu normalize edilmelidir;

$$1 = K \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\kappa v_x^2) dv_x = K \left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Buradan $K = (\kappa/\pi)^{1/2}$ bulunur.

- iii. $\langle v^2 \rangle$ **ideal gaz yasası ile uyuşmalıdır.** Denklem (2.11)'den $\langle v^2 \rangle = 3kt/m$ idi.

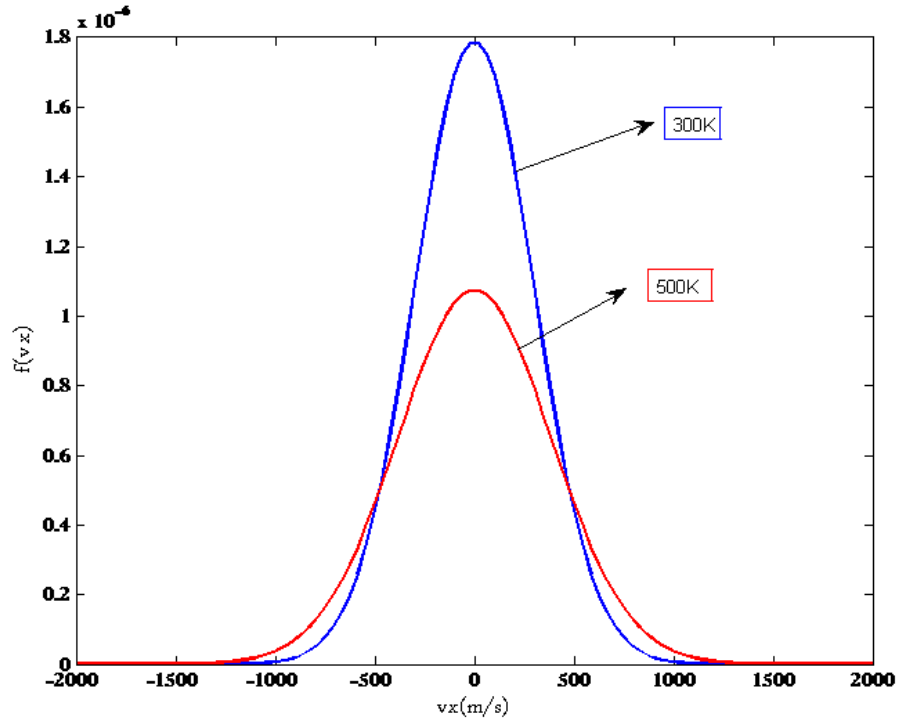
$$\langle v_x^2 \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} F(v_x) dv_x = v_x^2 \left(\frac{\pi}{\kappa}\right)^{\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} v_x^2 \exp(-\kappa v_x^2) dv_x = \frac{1}{2\kappa}$$

Sonuç olarak toplam hızın karesinin ortalaması $\langle \vec{v}^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle = 3 \langle v_x^2 \rangle$ olduğundan $\langle v^2 \rangle = \frac{3}{2\kappa} = 3kt/m$ olur. Buradan $\kappa = m/(2kT)$ bulunur.

κ ve K sabitlerini bulduktan sonra bir boyutta dağılım fonksiyonu şu şekilde ifade edilir;

$$F(v_x)dv_x = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{m v_x^2}{kT}\right) dv_x \quad (2.12)$$

Denklem (2.12) **bir boyutta Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonudur**. Bir gazdaki moleküler hızların Maxwell-Boltzmann dağılımı aslında bir molekülün sürekli değişken hızı v olan olasılık yoğunluk fonksiyonudur. Sürekli değişkenler için, olasılık yoğunluk fonksiyonundan belli bir hıza sahip molekülün olasılığı elde edilemez. Daha ziyade, olasılık yoğunluk fonksiyonunu bu aralıkta bütünleştirerek bir molekülün hızının belli bir aralıkta olmasının olasılığını belirlenebilir. Başka bir deyişle, $v = 2.0$ m/s için Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonunu değerlendiremez ve bir molekülün bu hızda hareket etme ihtimalini ele almaz. 1.9 m/s ve 2.1 m/s limitleri kullanarak Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonunu entegre ederek bir molekülün hızının 1.9 m/s ile 2.1 m/s arasında olma ihtimalini belirlenebilir (Baliga 2008). Azot gazı için bu dağılım 300 K ve 500 K sıcaklıklarında şekil 2.4'de gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Azot gazı (m=28 akb) için bir boyutta Maxwell-Boltzmann hız dağılımı

Denklem (2.12) bir boyutta hız dağılımı idi. Bu durumda üç boyutta hız dağılımı aşağıdaki gibidir:

$$F(\vartheta_x, \vartheta_y, \vartheta_z) d\vartheta_x d\vartheta_y d\vartheta_z = F(\vartheta_x) F(\vartheta_y) F(\vartheta_z) d\vartheta_x d\vartheta_y d\vartheta_z$$

$$= \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{m\vartheta^2}{kT}\right) d\vartheta_x d\vartheta_y d\vartheta_z$$

- iv. **Dağılım sadece hıza bağlıdır.** Hız dağılımı, yarıçapı ϑ olan bir küresel kabuğun içerisinde olmalıdır. Bu küresel kabuğun hacmi $d\vartheta_x d\vartheta_y d\vartheta_z = 4\pi\vartheta^2 d\vartheta$ olmalıdır. Bu durumda hız olasılığı:

$$F(\vartheta) d\vartheta = 4\pi\vartheta^2 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{m\vartheta^2}{kT}\right) \quad (2.13)$$

olur. Bazen hız dağılımı sıcaklık gibi tek bir parametre ile karakterize edilebilir. Bir diğer sıcaklığa bağlı ortalama hız, “kök ortalama kare hız, v_{rms} ”dır. Kök-ortalama-kare hızı, bir gazdaki kinetik teoride problem çözme için en uygun parçacık hızının ölçüsüdür. Bir gazdaki moleküllerin ortalama hız karelerinin kökleri olarak tanımlanır:

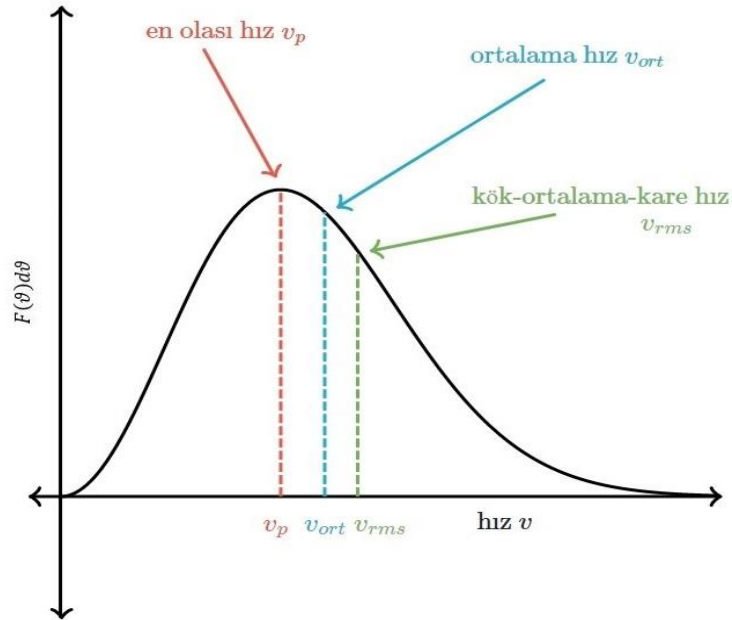
$$v_{rms} = (3kT/m)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

Bir diğer hız türü ortalama hızdır;

$$\langle v \rangle = \int_0^{\infty} vF(v)dv = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

Son olarak dağılım, hızın en yüksek olduğu “en olası hız v_p ” ile tanımlanır:

$$v_p = \left(\frac{2kT}{m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.16)$$

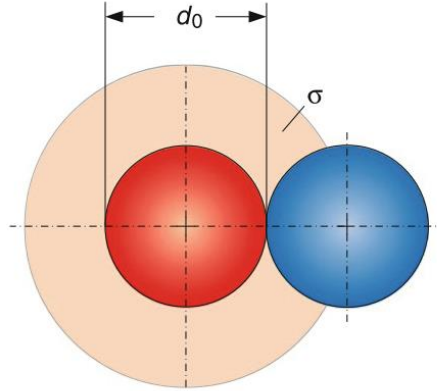


Şekil 2.5 En olası hız, ortalama hız ve kök-ortalama-kare hız karşılaştırılması (Anonymous 2017a)

Örnek olarak, neon gazının oda sıcaklığında (293 K) en olası hız, ortalama hız ve kök ortalama kare hız değerleri sırası ile 491, 554 ve 602 m/s'dir.

2.3.3 Ortalama serbest yol ve Knudsen sayısı

Gaz molekülleri sürekli bir şekilde rastgele hareket halindedir. Her molekül başka bir moleküle veya içerisinde bulunduğu kabın duvarlarına çarpana kadar düz bir çizgi boyunca hareket eder. Çarpışma sebebiyle, yönünü değiştirir ve başka bir yönde başka bir düz yol üzerinde devam eder. İlgili iki çarpışma arasındaki ortalama mesafe ortalama serbest yol olarak adlandırılır. İdeal gazlarda, gaz molekülleri, çarpışma haricinde birbirlerine kuvvet uygulamazlar. Gaz moleküllerinin birbirleri ve buldukları kapın duvarları ile çarpışmaları elastiktir. Duvarla yaptıkları çarpışmalara bağlı olarak oluşturulan etki, basıncı belirler.



Şekil 2.6 Atom yarıçapı d_0 ve çarpışma kesiti σ (Gatzen vd. 2015)

Ortalama serbest yol şu şekilde tanımlanır:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma n} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d_0^2 n} \quad (2.17)$$

Burada, gaz molekülün çapı d_0 , yoğunluk sayısı $n = P/k_B T$ ve çarpışma kesiti $\sigma = \pi d_0^2$ olarak tanımlanmıştır (Şekil 2.6). Helyum, azot ve metan moleküllerinin etkin çapları

sırasıyla, 0.218, 0.376 ve 0.414 nm'dir. Böylece, helyumdaki ortalama serbest yol, herhangi bir basınçta azot için ortalama yolundan yaklaşık üç kat daha büyük olacaktır (Chambers 2004). $\lambda \sim 1/P$ olduğu için sistemin basınç değeri düştükçe, moleküllerin ortalama serbest yolu artmaktadır. Aşağıdaki çizelge 2.2'de sistemdeki basınç değerlerine göre moleküllerin parçacık yoğunluk sayısı ve ortalama serbest yolu karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.2 Basınç değerlerine göre parçacık yoğunluğu ve ortalama serbest yol (Marquardt 1999)

	Basınç (mbar)				
	10³	10⁰	10⁻³	10⁻⁶	10⁻⁹
Parçacık yoğunluğu, n (cm⁻³)	10 ¹⁹	10 ¹⁶	10 ¹³	10 ¹⁰	10 ⁷
Ortalama serbest yol (cm)	10 ⁻⁵	10 ⁻²	10 ¹	10 ⁴	10 ⁷

Bir sistem, atmosfer basıncı altına pompalanıp yüksek vakum seviyelerine yükseltildiğinde sistem içerisindeki gaz, çeşitli gaz akış rejimleri oluşturur. Bu akış rejimleri, vakum bileşenlerinin büyüklüğüne, gaz türlerine ve sıcaklığa bağlıdır. Yüksek basınçlarda oluşan viskoz akış ile düşük basınçlarda oluşan moleküler akış arasında bir ara geçiş durumu bulunmaktadır. 1 mbar basınç seviyelerinde gaz moleküllerinin ortalama serbest yolu oldukça küçüktür. Bu yüzden gaz akışı viskozite ile sınırlıdır ve akış türüne viskoz akış denir (Marquardt 1999). Akış rejimleri sadece ortalama serbest yoldan saptanamaz, sistemin karakteristik uzunluğu da göz önüne alınmalıdır. Bu ikisi arasındaki ilişki Knudsen sayısı ile ilişkilendirilir (Lafferty 1998). Knudsen sayısı, gaz moleküllerinin serbest mesafesinin (λ) sistemin karakteristik uzunluğuna (D) oranı şeklinde tanımlanmıştır:

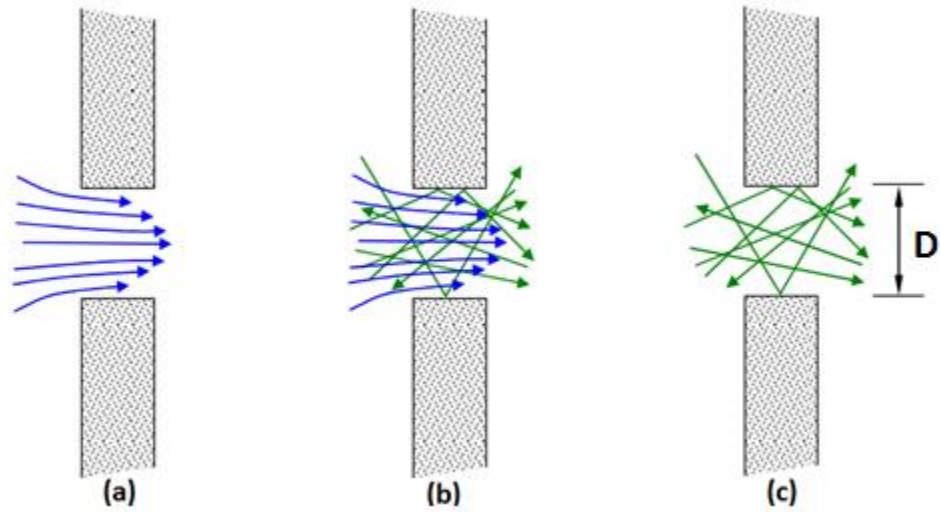
$$K_n = \frac{\lambda}{D} \quad (2.18)$$

Viskoz akış bölgesinde $K_n \ll 0,01$ değerindedir ve moleküllerin ortalama serbest yolu, vakum elemanının çapına (D) göre oldukça küçüktür. Moleküller arası çarpışma,

molekül-yüzey çarpışmalarına kıyasla daha sıktır (Şekil 2.7.a). Bu akış rejimi düşük vakum seviyesinde (10^{-3} -1 mbar) oluşur.

$0,01 < K_n < 0,5$ ise bu bölge vizkoz akış ile moleküler akış arasındadır. Basınç değeri 1 ile 10^{-3} mbar arasındadır ve orta vakum seviyesine denk gelmektedir. Hem molekül-yüzey çarpışmaları hem de moleküller arası çarpışmalar bu bölgede etkindir (Şekil 2.7.b).

Moleküler akış bölgesinde $K_n > 0,5$ değerindedir ve ortalama serbest yol, vakum elemanının çapına göre aynı seviyededir veya daha büyüktür. Bu bölgede molekül-yüzey çarpışmaları daha baskındır (Şekil 2.7.c). 10^{-3} mbar seviyesinden daha düşük basınç seviyelerinde ortaya çıkar.



Şekil 2.7 Farklı akış rejimlerine göre moleküllerinin akış hareketleri (Garton 2011)

2.4 İleri Yüksek Vakum Sistemi Tasarımı

Vakum tasarımı yaparken sistemin iletkenlik ve efektif pompalama hızının hesaplanması gerekir. Basit sistemler için analitik olarak yaklaşım yapılabilir. Çok pompalı sistemlerde basınç dağılımı hesaplanırken daha etkili yöntem olan Monte Carlo metodudur.

2.4.1 Analitik olarak vakum tasarımı

Vakum sisteminin akış özelliğini tanımlarken iki önemli kavram vardır: bunlardan birincisi, gaz akış oranı diğeri ise hacimsel akıştır. Hacimsel akış S , birim zamanda belirli bir alandan geçen gazın net hacmi iken, gaz akış oranı Q , kütle akışı ile yakından ilişkilidir (Weissler ve Carlson 1979). Birim hacim başına molekül sayısı basınç ile orantılı olduğu için, gaz akış oranı, basınç ve hacimsel akış oranı ile orantılıdır:

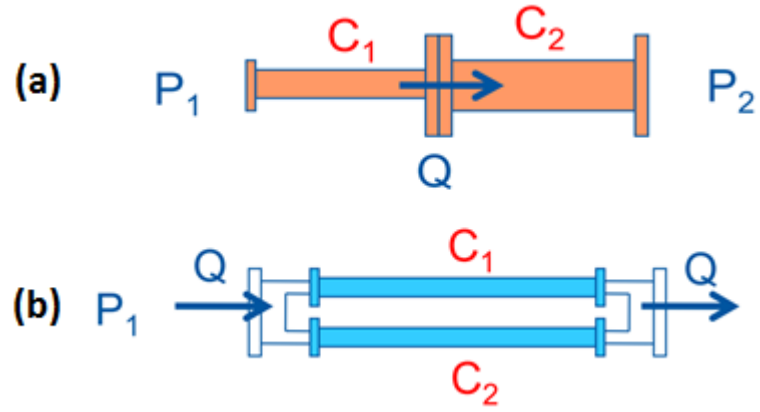
$$Q = P \left(\frac{dV}{dt} \right) = P \times S \quad (2.19)$$

Basınç birimi mbar, hacimsel akış oranı litre/saniye (l/s) olduğu için gaz akış oranı birimi mbar.l/s olur.

Bir borunun iletkenliği, gaz taşıma kabiliyetinin bir ölçüsüdür ve birim zamanda aktarılan hacim ile ifade edilir. Farklı koşullar altında, bir sistemin iletkenliğini hesaplamak için kullanılan niceliksel ifadeler oldukça karmaşıktır ve geometrik, yüzeysel faktörlerin yanı sıra gaz akış türüne de bağlıdır (Hoffman vd. 1997). Sabit sıcaklık koşullarında, bir basınç farkı varlığında bir delik veya borudaki gaz akışı daima ortaya çıkar. Gaz akış sistemin basınç farklılığına ($P_1 - P_2$) orantılıdır:

$$Q = C(P_1 - P_2) \quad (2.20)$$

Burada, C katsayısına vakum sisteminin gaz iletkenliği denir. Genel olarak birimi l/s'dir. Bu, iyi bir vakum oluşturmak için sadece güçlü bir pompaya değil aynı zamanda gaz akışına karşı çok düşük dirençli bir boru ve boru sistemi gerektiği anlamına gelir.



Şekil 2.8 Vakum sistemlerinin seri (a) ve paralel (b) bağlanması (Jimenez 2012)

Vakum elemanları seri bağlanırsa net gaz akışı aşağıdaki gibi bulunur (Şekil 2.8.a):

$$\frac{1}{C_{top}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.21)$$

Genel olarak N tane vakum elemanı seri olarak bağlanırsa:

$$\frac{1}{C_{top}} = \sum_i^N \frac{1}{C_i} \quad (2.22)$$

olarak hesaplanır.

Aynı şekilde N tane vakum elemanı sisteme paralel olarak bağlanırsa toplam iletkenlik tüm vakum elemanlarının iletkenliğinin toplamı şeklinde yazılır (Şekil 2.8.b):

$$C_{top} = \sum_i^N C_i \quad (2.23)$$

Uzunluğu L , çapı D olan uzun bir vakum borusunun ($L \gg D$) gaz iletim oranı şu şekildedir:

$$Q = \frac{\pi D^3}{16L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \quad (2.24)$$

Bu durumda uzun bir vakum borusunun iletkenliği (C_L):

$$C_L = \frac{D^3}{6L} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} = \frac{D^3}{6L} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}} \quad (2.25)$$

Burada m kütle, M moleküler ağırlıktır. Denklem (2.25) ilk defa Knudsen tarafından önerilmiştir. D^3/L oranı geometrik tasarım için çok önemli bir özelliktir, iletkenliğin büyük olması için vakum borularının uzunluğu olabildiğince kısa ve çapı büyük olmalıdır. $\sqrt{T/M}$ oranından görüldüğu gibi, belli bir gazın sıcaklığı, moleküler hız ile orantılıdır. Dikkat edilirse, moleküler akış bölgesinde iletkenlik basınca bağlı değildir, sadece ortalama moleküler hıza ve sistemin geometrisine bağlıdır (Chambers 2004). Sıcaklığı 295 K olan nitrojen için iletkenlik değerı:

$$C_L = 12,4 \frac{D^3}{L} \quad (2.26)$$

Bu denklemde D ve L cm mertebesindedir. Aynı şekilde kısa vakum borularında ($L \sim D$) iletkenlik değerı:

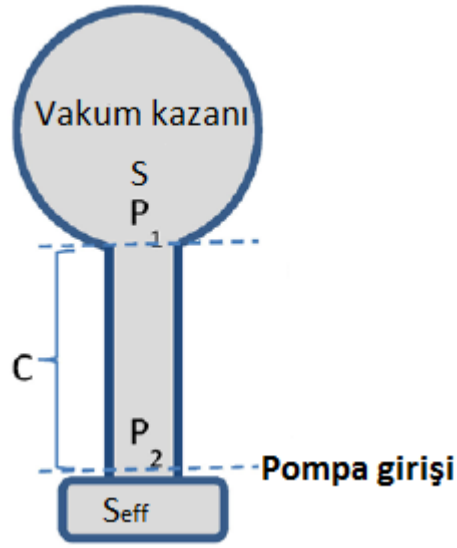
$$C_s = \frac{C_L}{1 + \frac{4D}{3L}} \quad (2.27)$$

Hacimsel akış oranına genel olarak pompalama hızı denir. Bu, özellikle, bir pompanın giriş portuna veya diğer ucuna bağlı bir pompaya sahip bir boru girişi için önemlidir. Pompalama hızı birimi olarak saniye başına litre veya dakika başına m^3 kullanılır (Chambers 2004).

Vakum teknolojisinde pompa, gaz moleküllerini vakum ortamından kaldıran bir araçtır. Bir vakum pompası pompalama hızı “S” ile karakterize edilmiştir ve pompalanan gaz akış oranının (Q), pompanın iç hacmine (P) oranı ile bulunur:

$$S = \frac{Q}{P} \quad (2.28)$$

Gaz akışı kısıtlamalarından dolayı “ana pompalama hızı” yerine “efektif pompalama hızı S_{eff} ” kullanılmaktadır. Efektif pompalama hızı, pompa ve vakum kazanı arasındaki gaz akışı kısıtlamalarından dolayı ana pompalama hızından daha düşüktür.



Şekil 2.9 Gaz akış kısıtlamasının şematik gösterimi (Chiggiato 2012)

Efektif pompalama hızı aşağıdaki gibi hesaplanır (Şekil 2.9):

$$Q = C(P_1 - P_2) = SP_2 = S_{eff}P_1$$

Buradan:

$$\frac{1}{S_{eff}} = \frac{1}{S} + \frac{1}{C} \quad (2.29)$$

şeklinde bulunur.

Sonuç olarak $C \ll S$ ise $S_{eff} \approx C$ şeklinde olur. Diğer bir ifadeyle eğer pompa ile vakum bağlantıları arasındaki iletkenlik çok küçük olursa, efektif pompalama hızı

sisteme kurulan pompaya bağılı değildir. Bu sonuç vakum sistemi tasarımının önemli bir sonucudur.

2.4.2 Monte Carlo tekniğı

Analitik yöntemle ilgili temel sorun, karmaşık geometriler için iletkenlik hesaplanamamaktadır. Monte Carlo tabanlı vakum simülasyonları, poligon kümesi şeklinde tanımlanan bir vakum sisteminde çok sayıda “test parçacığı” kullanarak sorunu çözmektedir. Bir test parçacığı ile duvar arasında bir çarpışma tespit edildiğinde, Kundsén’in kosinüs yasasına göre parçacık yeni görüngesinde devam eder. Biz dizi çarpışma sonrasında parçacık pompa bölgesine geldiğinde sistemi terk eder (Ady 2016).

Parçacıklar girişte rasgele üretilir ve ya tuzağa düşürülene (pompalanana kadar) ya da her iki ucundan da çıkana kadar sistem boyunca takip edilir. Monte Carlo tekniğinde, parçacıklar birbirleri ile etkileşime girmezler, sistem içerisinde rastgele saçılırlar ve sistemin yüzeyi ile esnek çarpışma yaparlar. Herhangi bir yüzeye uygulanan basınç daha sonra bu yüzeye çarpan molekül sayısı ile orantılıdır. Hızlandırıcı gibi kompleks bir dize boyunca sıralanmış sistemde basınç dağılımı, eksende şeffaf bir hayali faset boyunca geçen parçacıkların aksel dağılımını sayarak kolayca tespit edilebilir (Reid 2010).

Karmaşık bir geometri için, parçacıkların oluşturulduğu kaynak S noktasından, parçacıkların sistemi terk ettiği hedef T noktasına olan iletim olasılığı α_{TR} , sistemi terk eden parçacıkların, tüm oluşturulan parçacıklara oranı olarak tanımlanabilir. Moleküllerin ortalama hızına ($\langle \vartheta \rangle$) göre iletkenlik değeri:

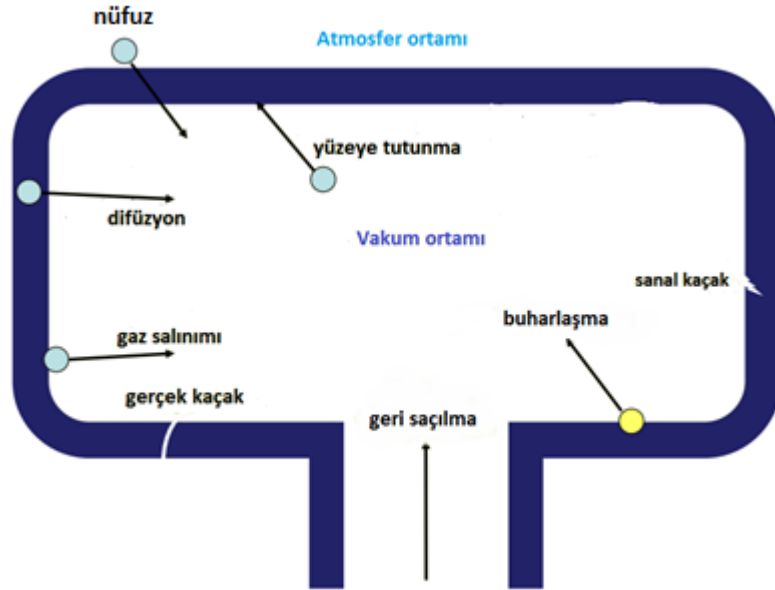
$$C_{S \rightarrow T} = \alpha_{TR} \frac{1}{4} \langle \vartheta \rangle A_S \quad (2.30)$$

şeklindedir. Burada, A_S parçacıkların oluşturduğu yüzeyin alanıdır. Monte Carlo hesaplamaları ve simülasyonu yapan birçok ticari program bulunmaktadır. Bunlardan bir kaçısı Comsol (Anonymous2017b), ANSYS (Anonymous2017c) ve CERN tarafından

geliştirilen, ücretsiz bir program olan Molfow+ programıdır. Bu tez çalışmasında Molfow+ programı tercih edilmiştir.

2.5 Vakum Sistemi İçerisindeki Gaz Kaynakları

Vakum sistemi, vakum kazanı içerisindeki gaz moleküllerini gidermek zorundadır. Hacim gazının yanı sıra ortamdan uzaklaştırılması gereken kazan yüzeyinden ortama yayılan gaz kaynakları da mevcuttur. Genel olarak yüzey gazı, gaz salınımı (outgassing) denilen bir süreçte ortama yayılır. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, gaz salınımı yanı sıra vakum ortamında gaz kaynağı oluşmasına sebep olan diğer olaylar nüfuz, sanal ve gerçek kaçaklar, buharlaşma ve difüzyondur (Gatzen vd. 2015). Buna ek olarak, pompa sisteminden geri gaz akışı da olabilir. Bu etkilerin hepsinden dolayı vakum sisteminin ulaşabileceği minimum bir basınç vardır. Bu minimum basınç, pompalama oranı ile gaz çıkışı oranı arasındaki denge ile belirlenir.



Şekil 2.10 Vakum sistemi içerisindeki gaz kaynakları (Malyshev 2013)

2.5.1 Gazların sistem içerisine nüfuzu

Gazlar çoğu malzeme içerisine nüfuz eder, bu nedenle atmosfer ortamındaki gazlar sistem duvarları boyunca vakum içerisine nüfuz edebilir. Gaz nüfuzu olayı iki fiziksel sürecin birleşimidir: çözünme ve difüzyon. İlk önce gaz katı içinde çözülür ve daha sonra sistemin iç duvarına dağılır. Gaz iç yüzeye geldiğinde, vakum hacmi içerisine yayılır (Segovia 1999). Bu olay yüksek derecede sıcaklığa bağlıdır. Nüfuz etme olayı moleküler veya atomik şekilde olabilir. Moleküller cam, seramik ve polimerik malzeme içerisinden nüfuz ederken ayrışmazlar. Diğer yandan, H₂ molekülü çelik malzemeden geçerken ayrışır ve iç hacim içerisinde tekrar birleşirler (Gatzen vd. 2015).

2.5.2 Sistem içerisinde buharlaşma

Bir katı veya sıvı oluşmak üzere bir araya getirilmiş atomların ya da moleküllerin kinetik enerjileri, bağlanma enerjilerini aşmak için yeterli ise parçacık gaz fazına geçebilir. Buharlaşma adı verilen bu süreç, herhangi bir zamanda gerçekleşebilir, çünkü parçacıkların enerjilerinin rastgele dağılımına bağlı olarak, bazı parçacıkların buharlaşmaya yeterli enerjiye sahip olabileceği her zaman mevcuttur (Weston 1985). Buharlaşma, vakum malzemelerinin yıkanması sırasında su buharı tam olarak kurutulmazsa vakumlama işleminde su buharı vakum içerisinde bir gaz kaynağı oluşturur. Bu etki düşük vakum seviyelerinde önemsizdir fakat yüksek ve ileri yüksek vakum seviyelerinde kullanılacak vakum malzemelerini büyük ölçüde kısıtlar. Bu yüzden kullanılacak vakum kazanı malzemeleri özenle seçilmelidir (Jousten 1999).

2.5.3 Gazların difüzyonu

Difüzyon, bir maddenin taşınmasıdır. Katı yüzeydeki gaz basıncı molekülleri ve atomları yüzeyden uzaklaştırdığı bir konsantrasyon gradyenti oluşturur. Difüzyon, gaz salınımına kıyasla daha yavaş bir işlem olduğu için, toplu olarak yüzey üzerinde taşınma oranı, vakum içerisine salınan gaz oranını belirler (O'Hanlon 2003).

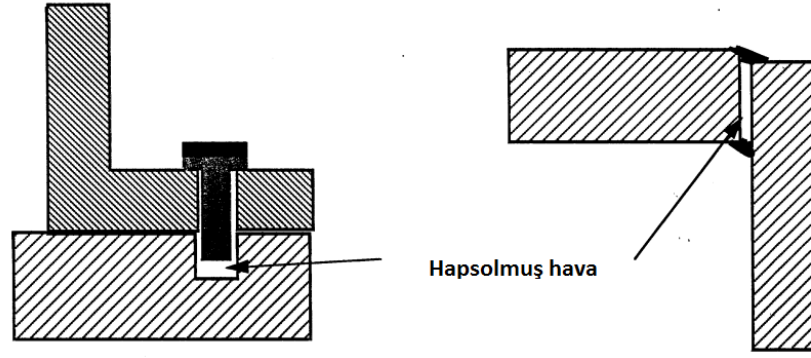
2.5.4 Pompadan geri saçılma

Düzgün şekilde çalışmayan ve bütün molekülleri yakalamayan pompalar, moleküllerin bir kısmını vakum ortamına geri salar. Difüzyon pompası için, özel olarak kullanılan pompa sıvısı buharlaştığında vakum ortamına saçılabilir ve kazan içerisinde kirlilik oluşmasına sebep olur (Tsipenyuk 2009).

2.5.5 Vakum kaçakları

Vakum sistemleri gaz kaçaklarına karşı çok hassastır. Vakum sistemlerinde büyük kaçaklar sistem işlevini tehlikeye atar. Herhangi bir noktadaki kaçak değerini sıfırlamak deneysel olarak mümkün değildir. Vakum sisteminde her bir flanş ve kaynak noktası bir potansiyel gerçek kaçak noktasıdır. Gözenekliliğe bağlı kaçaklar, özellikle polikristalin materyallerin ve döküm bileşenlerin mekanik deformasyonunun veya termal işlenmesinin ardından ortaya çıkabilir (Gatzen vd. 2015). İleri yüksek vakum sistemlerde genel olarak kabul edilen standart kaçak değerleri şu şekildedir: Flanş bağlantılarında 1×10^{-10} mbar.l/s, kaynak noktalarında 1×10^{-11} mbar.l/s, hareketli parçalarda 1×10^{-9} mbar.l/s şeklindedir (Aksoy ve Özkorucuklu 2011).

Sanal kaçak, vakum sistemi içindeki ölü hacimlerde kalan gazların efektif bir şekilde pompalanamayarak çalışma süresi boyunca yavaş yavaş ortama difüze olmasıdır. Bir diğer ifadeyle, vakum hattı boyunca deliklerden veya çatlaklardan geçerek vakum kazanı içerisine sızan atmosferik gazın hacmidir (Lou 2004).



Şekil 2.11 Vida ve çatlak arasına sıkışmış sanal kaçak kaynakları (Bertolini 2002)

2.5.6 Gaz salınımı (outgassing)

Katı veya sıvı materyalden kendiliğinden gaz moleküllerinin sökülmesi olayına gaz salınımı denir. Vakum kazanlarının iç yüzeylerine tutunan ve malzeme içindeki yapısal kusurlarda biriken gaz moleküllerinin vakum ortamına salınmasıdır. Bir vakum düzeneğinde gaz kaynaklarından biriside ortama salınan bu gaz molekülleridir. Bu gaz salınımı iki sebepten dolayı kaynaklanır: Birincisi, yukarıda bahsedildiği gibi vakum odası duvarları içerisinde olan gaz difüzyonudur. Difüzyon sonrası vakum ortamına gaz salınımı olur. İkincisi, daha önce vakum odasının duvarlarının iç yüzeyine tutunan (absorbe edilen) gazların veya buharların serbest kalmasıdır. Bu gazlar vakum ortamına gaz salınımı ile bir gaz yükü oluşturur (Avdiaj ve Erjavec 2012). Toplam gaz salınımı oranını, PV gaz miktarına bağlı olarak şu şekilde ifade edilir (Tsipenyuk 2009):

$$-VdP = (SP - Q_{kaçak} - Q_{gazzsalınımı} - Q_{gerisaçılma})dt \quad (2.31)$$

Burada, V sistemin hacmi, P basınç, S pompalama hızı, $Q_{kaçak}$ kaçaklardan dolayı gaz yükü, $Q_{gerisaçılma}$ pompadan geri saçılan gaz miktarı, $Q_{gazzsalınımı}$ ise difüzyon, buharlaşma ve yüzeyden salınımdan dolayı oluşan gaz yüküdür. Toplam gaz yükünü,

$$Q_{toplam} = Q_{kaçak} + Q_{gazzsalınımı} + Q_{gerisaçılma}$$

şeklinde ifade edersek, denklem (2.31):

$$Q_{toplam} = SP + V \frac{dP}{dt} \quad (2.32)$$

şeklinde olur. A birim yüzey alanı olmak üzere, gaz salınım oranı (q_{toplam}) ile Q_{toplam} arasında:

$$Q_{toplam} = q_{toplam} \cdot A \quad (2.33)$$

şeklinde bir ilişki olur. Gaz salınım oranı birimi $\text{mbar.l.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}$ ile ifade edilir. Gaz salınım oranı kullanılan malzemeye, malzeme üzerine uygulanan işleme, pompalama süresine göre değişmektedir. Aşağıdaki çizelge 2.3’de farklı vakum malzemelerin gaz salınım oranları verilmiştir.

Çizelge 2.3 Uygulanan prosedürlere göre malzemelerin gaz salınım oranı

Malzeme	q_{toplam} (mbar.l.s ⁻¹ .cm ⁻²)	Açıklama	Referans
Alüminyum	9×10^{-9}	-	(Malyshev 2013)
Alüminyum	5×10^{-13}	20 saat, 150 °C’de gaz giderme	
Bakır	6×10^{-12}	24 saat, 150 °C’de gaz giderme	
Paslanmaz çelik	20×10^{-10}	4 saat vakum altında	(Bertolini 2004)
Paslanmaz çelik	$1,95 \times 10^{-10}$	24 saat, 200 °C’de gaz giderme, 1 saat vakum altında	(Garton 2011)
Paslanmaz çelik	$5,2 \times 10^{-11}$	Yağdan arındırılmış, su ile durulama, 40 saat vakum altında	
Paslanmaz çelik	$5,2 \times 10^{-12}$	Yağdan arındırılmış, su ile durulama, 12 saat boyunca 150 °C’de gaz giderme, 5 saat vakum altında	
Paslanmaz çelik	$3,9 \times 10^{-12}$	Elektroliz parlatma, 30 saat boyunca 150 °C’de gaz giderme	
Paslanmaz çelik	$1,2 \times 10^{-12}$	45 saat boyunca 360 °C’de gaz giderme	

Gaz yükü birimi genellikle mbar.l/s şeklindedir. Gaz salınımı üretim sırasında mümkün oldukça dışarıdaki hava ile az etkileşim halinde olan materyal seçilerek azaltılabilir. Vakum çalışmalarında istenilen vakum değerine kısa sürede çıkmak için tüm vakum sisteminin sıcaklığı arttırıldığında gaz çıkışı artmaktadır. İmalat sırasında malzemeye bulaşan yağ bazlı kimyasallar, el izi, asitler yüksek oranda gaz salınımına sebep olur, bu nedenle vakum kazanları montajdan önce tamamen temizlenmelidir.

İleri yüksek vakum seviyelerinde, sızdırmaz ve herhangi bir işlem gazı bulunmayan paslanmaz çelik kazanları için, temel gaz kaynağı çelikten salınan hidrojen gazıdır (Mamun vd. 2013).

2.5.7 Gaz giderme yöntemi ile gaz salınım oranının arttırılması

Vakum sistemlerinin iç yüzeylerinden yayılan su buharı, vakum teknolojisinde bir bütün olarak ortak bir problemdir. Bir vakum sistemi, atmosfer ortamına her açıldığında ortamın nemine bağlı olarak vakum yüzeyi su molekülleri ile kaplanır. Vakum sistemine yerleştirilen her madde aynı şekilde su molekülleri ile kaplıdır. Atmosfer basıncından başlayarak yüksek vakum seviyelerine çıkıldıkça yüzeylerden salınan gaz yükünün büyük bir kısmı su moleküllerinden kaynaklanır (Danielson 2001). Belirli bir basıncın sabit bir pompalama hızı ile sağlanabilmesi için, gaz salınımı oranının belirli bir noktaya düşmesi gerekir. Su buharının giderilmesi için, su molekülüne aktarılan enerjinin moleküler bağlarının enerjisinden yüksek olması gerekmektedir. Bu genellikle vakum kazanından moleküllere aktarılan termal enerjiden kaynaklanmaktadır. Su gazının yüzeye tutulmasını minimum seviyeye indirmek için kuru azot kullanılır çünkü azot, paslanmaz çelik gibi malzemelerin yüzeyine su molekülünden daha küçük kuvvetle tutunur ve vakumlama sırasında daha kolay bir şekilde malzeme yüzeyinden ayrışır (Chambers 2004). Bu durumda, eğer moleküllere ilave enerji uygulanırsa, gaz salınımı oranı artabilir. Böylece daha kısa sürede nihai basınca ulaşılabilir.

Gaz giderme yöntemi, dışarıdan bir ısıtma yöntemi kullanarak katı veya sıvı malzemeden gaz moleküllerini sökme işlemidir. Isı, gaz salınımını geçici olarak arttırmak için neredeyse tüm vakum sistemine uygulanabilir. Bunun için bir ısıtıcı

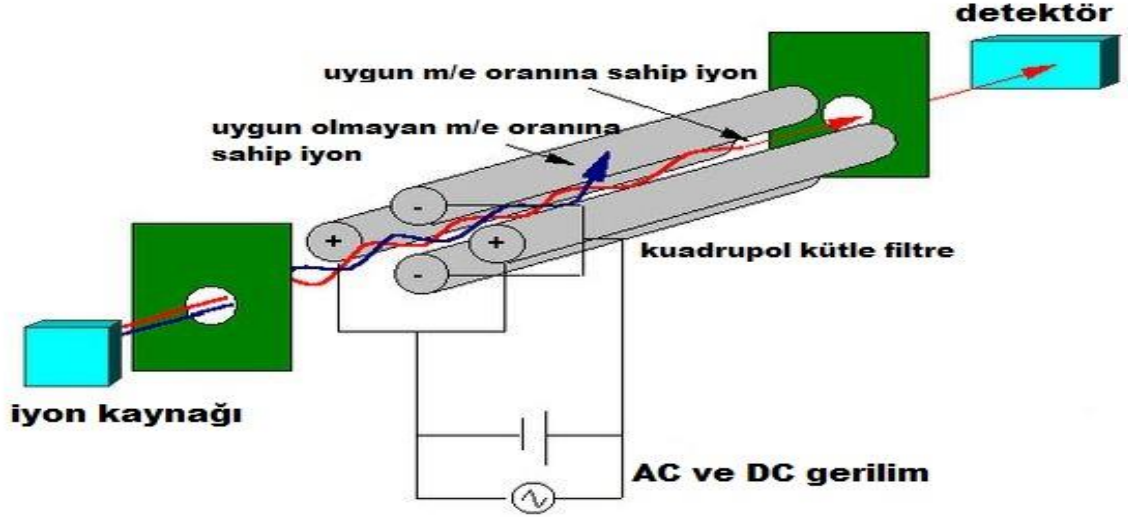
(örnek olarak gaz giderme kabloları) vakum kazanına dışarıdan kaplanır. İleri yüksek vakum seviyesi için tavsiye edilen sıcaklık değeri genellikle 250 °C'dir. Bu yöntemi uygulamak için kullanılacak pompalar, contalar ve malzemeler özenle seçilmelidir. Özellikle plastik contalar veya kauçuk malzeme yerine metal contalar (O-ring) kullanılmalıdır. Paslanmaz çeliğin düşük ısı iletkenliği ve yüksek ısı kapasitesi nedeniyle istenilen sıcaklık değerine çıkma süresi artar. Bunun tersine paslanmaz çeliğin serinleme süreside uzundur. Alüminyum kazanlar kullanılıyorsa zaman gecikmesi problemi ortadan kalkar çünkü alüminyum yüksek termal iletkenliğe sahiptir.

2.6 Kuadrupol Kütle Spektrometresi

Bir vakum sisteminin amacı deney sürecine etki edecek olan molekülleri ortamdan uzaklaştırmaktır. Amaç, sistemin toplam basıncını düşürmek olsa da, temel sorun vakum ortamında su, hidrokarbon, oksijen gibi vakum kirliliği yaratan gazların varlığıdır. Sadece toplam basınç üzerinden basınç değişimini etkileyen sebep saptanamaz. Bir diğer sebep ise vakum ortamında bulunan gaz türleri tespit edilemez. Vakum sistemlerinde detaylı bilgi edinilmesi istendiğinde mutlaka kısmi basınç bilgisine sahip olmamız gerekir (Elkatmış ve Kangı 2013). Kısmi basınç ölçümleri genellikle kütle spektrometreleri ile yapılır. Artık Gaz Analizörleri (RGA-Residual Gas Analyzer) kütle spektrometresi yapan cihazlardan birisidir. Artık gaz analizörleri vakum sistemi içerisinde bulunan gazları iyonize ederek, iyonize olmuş bu gaz kütlelerinin sayımını yaparak işlem görmektedirler.

RGA çeşitlerinden biri olan Kuadrupol Kütle Spektrometre (QMS-Quadrupole Mass Spectrometer), çelik işleme, ilaç üretimi, gaz karışım ve saf gaz dolumu, nükleer yakıt üretimi gibi endüstriyel alanların yanı sıra, parçacık hızlandırıcıları, yüksek vakum deneyleri gibi bilimsel çalışmalarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Kısmi gaz basıncı ölçümleri, vakum hacimlerinde gaz saflığının belirlenmesi ve vakum şartlarının gözlemlenmesi, gaz salınım oranı (outgassing rate) belirleme, proses işleme ve kontrolü kullanım amaçlarına örnek olarak gösterilebilir.

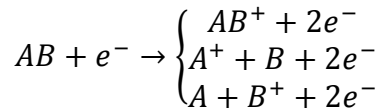
QMS cihazı temel olarak 3 ana kısımdan oluşmaktadır: İyonlaştırıcı, Kuadrupol kütle filtresi ve İyon detektörü. QMS cihazının genel yapısı Şekil 2.12’de gösterilmektedir.



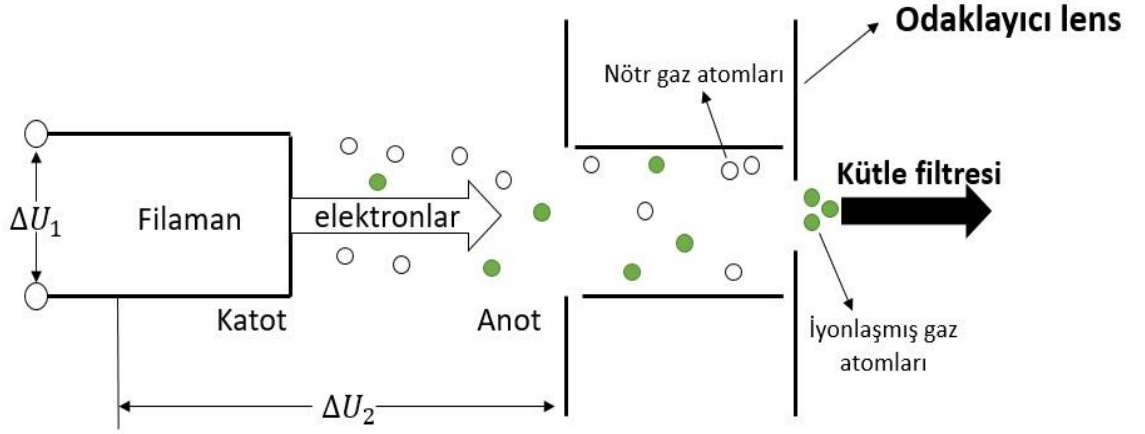
Şekil 2.12 QMS cihazının genel yapısı

2.6.1 İyonlaştırıcı

QMS’in çalışması, parçacıkların cihaz içerisinde m/e (kütle/yük) oranına göre elektrik alan etkisi altında ayrışması prensibine dayanır. Bu yüzden vakum ortamında bulunan nötr halde bulunan atomların veya moleküllerin iyonlaştırılması gerekir. Kısmi basınç analizlerinde en çok kullanılan teknik elektron etkili iyonlaştırmadır. Isıtılan metal filamandan salınan elektronlar 50 ile 150 V DC gerilim etkisi altında elektrostatik olarak anot veya elektron toplayıcı plakaya doğru hareket ederler (Peter ve Müller 2007). Bu hareket doğrultusunda bazı elektronlar nötr gaz molekülleri ile çarpışırlar ve çarpışma etkisi ile gaz atomlarının dış yörüngelerinden elektron koparılarak pozitif yüklü iyonlar oluşur (Şekil 2.13). Bazı gaz molekülleri ise parçalanarak daha küçük gaz moleküllerine dönüşür. Molekülün parçalanması için iyonlaşma enerjisinin yanında ayrışma enerjisine de sahip olması gerekmektedir. AB iki atomlu gaz molekülün iyonlaşma ihtimalleri şu şekildedir:



Odaklayıcı lens anoda göre negatif gerilimde tutulmaktadır. Odaklayıcı lens pozitif iyonları anot kafesinden çektikten sonra demet haline getirir. Bu şekilde iyonlaşan moleküllerin bir kısmı kütle filtresi tarafına geçer.



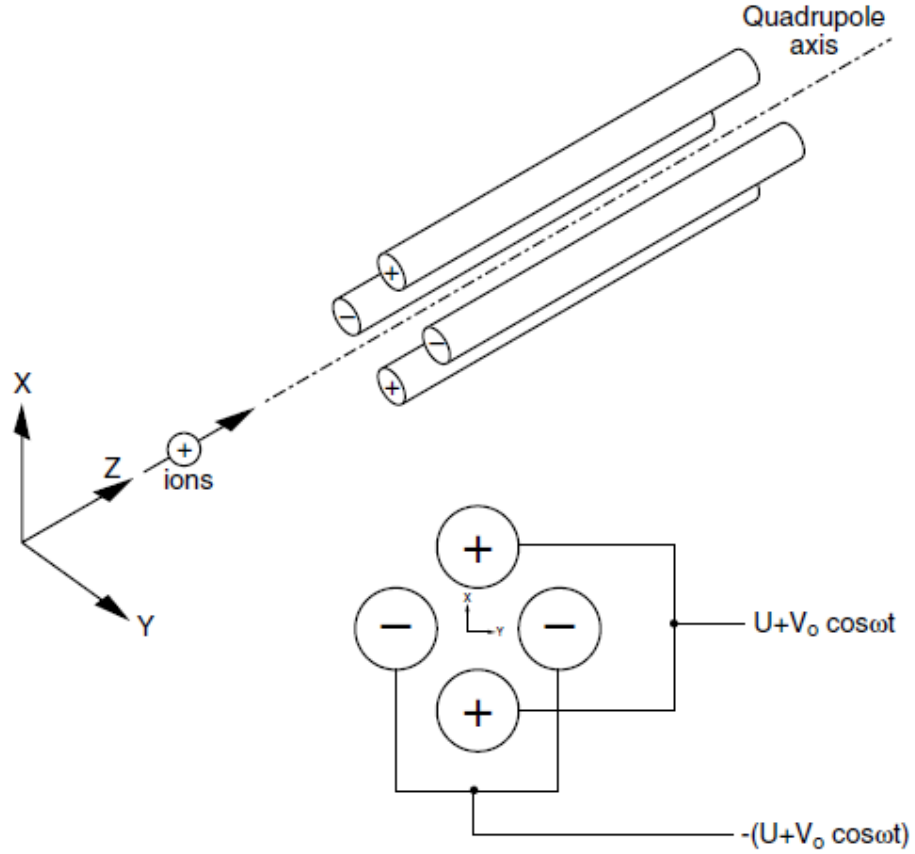
Şekil 2.13 İyonlaştırma kısmında gaz atomların iyonlaşması

Kısmi basınç analiz cihazlarında kullanılan filamanlar, yapılan çalışmalara göre ısıya dayanıklı metal ve alaşımlardan yapılabilir. Tungsten filamanları, ısıtıldığında önemli miktarlarda karbon monoksit ve karbondioksit salınımı yaparlar. İridyum filamanlar ortam içerisinde yüksek oksijen basıncı mevcut olduğunda kullanılır. İridyum filamanları hidrokarbon kirlenme olasılığına karşı duyarlı olduğuna dikkat edilmelidir. Bu kirlenme gerçekleştiğinde filamanın elektron emisyonu düşmektedir. Diğer özel amaçlı kullanılan filamanlar ise renyum ve lantan heksaborür'den yapılabilir.

2.6.2 Kuadrupol kütle filtresi

Kuadrupol kütle spektrometresi AC ve DC elektrik alanları kullanarak kütle/yük oranına göre iyonların ayrıştırması olayını gerçekleştirir. Adından da anlaşılacağı üzere, kuadrupol kütle spektrometresinde iyonların kütle/yük oranına bağlı olarak iyonları ayırmak için dört “kutup” ya da çubuk şeklinde elektrotlar vardır. Şekil 2.14’de kuadrupol kütle filtresi ve bağlantıları gösterilmektedir. Bu voltajların büyüklüğüne bağlı olarak, yalnızca belirli kütleli iyonlar kuadrupol uzunluğu boyunca ilerleyip

detektöre ulaşabilir, diğer iyonlar saptırılarak kuadrupol çubuklara çarpar ve cihazdan çıkarak ortama geri dönerler (Chambers 2004).



Şekil 2.14 Kuadrupol elektrotlar ve elektriksel bağlantıları

Şekilde görüldüğü gibi karşıt elektrotlar aynı gerilimde olacak şekilde bağlanmıştır. Kütle filtresi içerisine giren bir iyon Z eksenini boyunca ilerlemektedir ve X-Y düzleminde salınım yapmaya başlamaktadır. RF ve DC voltajlarının bir kombinasyonu kuadrupol filtreleme işlemini kontrol eder. İlgilenilen iyon türünün sabit bir yörüngede ilerleyip detektöre ulaşması için RF ve DC değerleri bu iyon için ayarlanması gerekir. Aynı zamanda DC ve RF voltajlarının genliği değiştirilerek tüm kütle spektrumu taranabilir. Elektrotlar arasında oluşan potansiyel şu şekilde ifade edilebilir:

$$V_x = +(U + V_0 \cos \omega t) \quad (2.34)$$

$$V_y = -(U + V_0 \cos \omega t)$$

U her çift elektroda uygulanan DC gerilimin büyüklüğü, V_0 elektrotlara uygulanan RF voltajın genliği, ω RF gerilimin açısal frekansıdır.

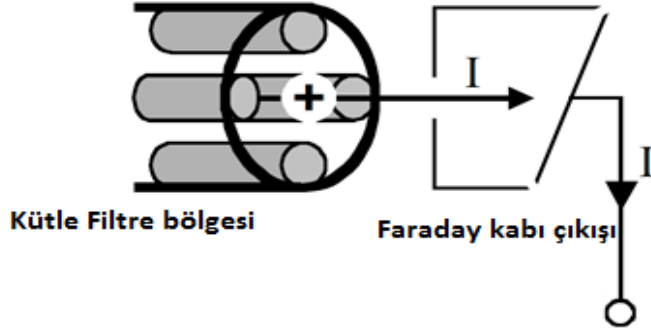
Hafif iyonlar (düşük kütle/yük oranı) değişken alan bileşenine göre hareket ederler. X yönünde, bu iyonlar RF alanı ile aynı fazda kalarak enerjileri artar. Bunun sonucunda detektöre ulaşmadan elektrotlara çarpma kadar genlikleri artar ve nötr hale geçerler. Bu nedenle X yönü yüksek geçişli kütle filtresidir (high-pass mass filter). X yönündeki elektrotlara çarpmadan sadece yüksek kütleli iyonlar geçebilir. Diğer taraftan Y yönünde ağır iyonlar DC gerilimin etkisi ile kararsız bir yörünge izleyeceklerdir fakat daha hafif iyonlar RF gerilim ile dengede tutulurlar. Bu sebeple Y yönü düşük geçişli kütle filtresidir (low-pass mass filter). Sadece düşük kütleli iyonlar Y yönündeki elektrotlara çarpmadan detektöre ulaşabilir. Bu iki yön beraber kütle analizi için uygun bir kütle filtresi oluştururlar (Peter ve Müller 2007). Uygun bir RF/DC oranı seçimi ile kütle filtresi, hem yüksek hem de düşük kütleli iyonları istenen dereceye kadar ayırım yapmak üzere yapılabilir.

RF geriliminin büyüklüğü ve frekansı filtre boyunca kararlı bir yörüngede gidecek iyonların kütesini belirlemektedir. RF geriliminin genliği arttığında ağır kütleli iyonlar RF fazında salınım yapmaya başlamakta ve elektrotlara çarpmaktadırlar. DC/ RF oranı filtre seçimini belirlemektedir. Sabit RF gerilimi altında DC gerilimi arttığında, DC gerilimin negatif bileşeni sebebiyle ağır iyonların odaklığı bozulmaktadır. DC ve RF voltajlarının genliklerinin eş zamanlı olarak değiştirilmesi, tüm kütle spektrumunun taranmasını sağlar (SRS 1996).

2.6.3 İyon detektörü

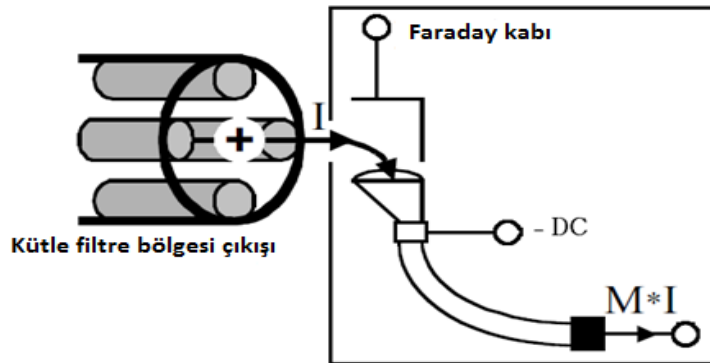
Belli m/e oranına sahip iyonlar kütle filtresini geçince iyon detektörü tarafından algılanıp sayımı yapılır. İyon sayımında iki yol vardır. Birincisi bütün RGA araçlarında

kullanılan Faraday Kabı (FC-Faraday Cup), ikincisi ise İkincil Elektron Çoğaltıcılarıdır (SEM-Secondary Electron Multiplier).



Şekil 2.15 Faraday kabı kullanılarak iyon akımı ölçümü (Anonymous 2017d)

Faraday kabın şematik görünümü şekil 2.15’de verilmiştir. Pozitif iyonlar kütle filtresini geçip, kaba çarparak nötralleşmesi için kap içerisindeki metal yapı negatif potansiyelde tutulmaktadır. Akım (I) ne kadar büyükse, elde edilen sinyal o kadar büyük olur. Bunun için daha fazla iyon olmalıdır. Akım, basitçe birim alan düzleminde birim zaman başına yük akışı olduğu için ve çoklu iyonize olmuş bir molekül tek defa iyonize olmuş bir molekülden daha fazla yük taşıdığından, çoklu iyonize olmuş molekül daha fazla sinyal üretmesi beklenir. Örneğin: Her bir Ar^{++} iyonu her bir Ar^+ iyonunun iki katı iyon taşır. Dolayısıyla, aynı sayıda iyon varsa, Ar^{++} sinyali Ar^+ sinyalinden iki katı daha büyük olmalıdır (Hoffman vd. 1997).

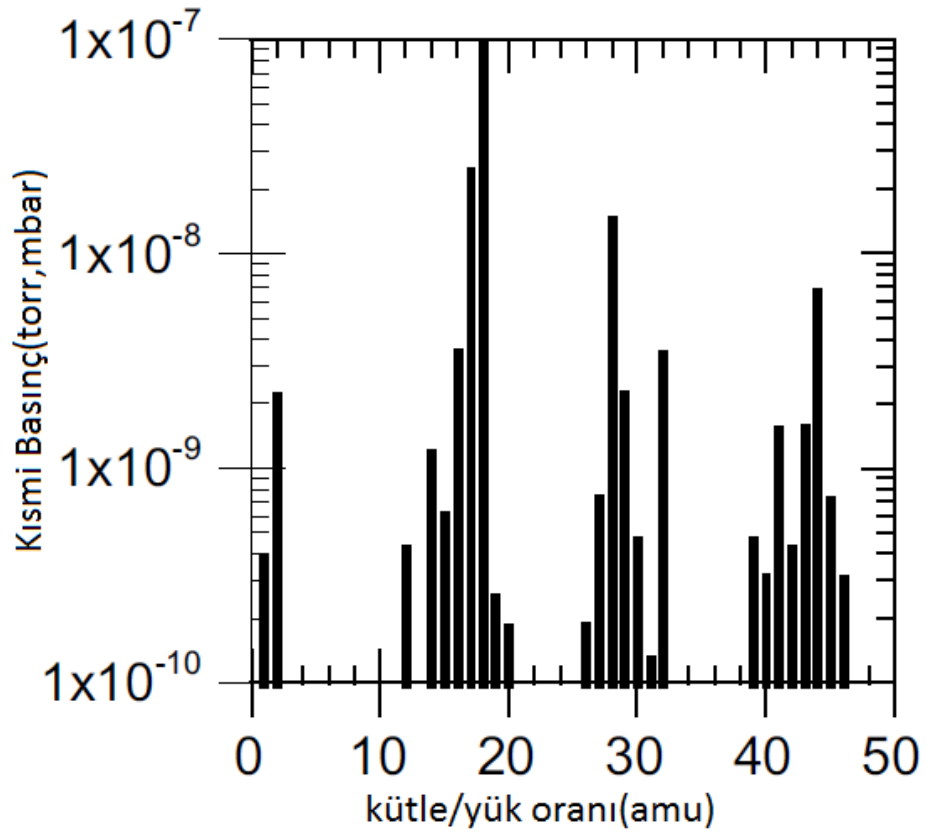


Şekil 2.16 SEM kullanılarak iyon akımının M faktörü kadar yükseltip ölçülmesi

Şekil 2.16’da SEM’in şematik görünümü gösterilmektedir. Elektron çoğaltıcıları, özel bir iç kaplaması ve ön ucunda geniş bir “ağız” bulunan bükülmüş cam tüplerdir. Tüpün ön ucu negatif beslemede tutulur. Tüpün arka ucunda üretilen elektronları toplayan bir faraday kabı bulunmaktadır. SEM, hassasiyeti arttırmaya yönelik olarak yükselteç görevi görür. Algılanacak iyonlar SEM girişine doğru birkaç kilo-elektron-volt değerlerine kadar negatif gerilim ile hızlandırılarak (genellikle -1,0 kV veya fazlası) çoğaltıcı plakalara çarparlar ve ikincil elektronları açığa çıkarırlar. Bu elektronlar, diğer elektronların açığa çıkmasına sebep olacak daha yüksek pozitif gerilimdeki ikincil yüzeye hızlandırılırlar. Çoğaltıcı çıkışından elektron sinyali ortaya çıkıncaya kadar bu işlem devam eder ve Faraday kap üzerinde toplanırlar. SEM’den elde edilen akım değeri tüpün ön ucundan giren akım değerine göre M katı kadar daha büyüktür. Yükseltme faktörü, M, çoğaltıcının yapısına ve uygulanan voltaja bağlı olarak yaklaşık 10^4 ile 10^9 arasında değişir (O’ Hanlon 2003). Elektron çıkış akımının gelen iyon akımına oranı SEM kazancı olarak tanımlanır ve genel olarak SEM tipine, girişine uygulanan gerilime, SEM boyunca uygulanan gerilime ve daha az ölçüde kütleye ve gelen iyonun kimyasal yapısına bağlıdır. SEM algılayıcısının en önemli avantajı yüksek hassasiyete sahip olmasıdır. 2×10^{-4} Amper/Torr hassasiyete sahip tipik bir FC ile algılanabilecek minimum kısmi basınç $6,7 \times 10^{-12}$ mbar iken, SEM ile bu basınç $2,7 \times 10^{-14}$ mbar’a kadar düşebilmektedir (bu değerler modele göre değişiklik gösterir).

2.6.4 Gaz moleküllerinin analizi

Bu karmaşık adımların serisinden (iyonlaşma, hızlandırma, kütle ayrımı, iyon algılama) sonra veriler kütle/yük oranının fonksiyonu olarak sinyal yoğunluğu şeklinde gösterilmesidir. Neredeyse evrensel olan bu veriler şekil 2.17’ye benze bir şekilde sinyal şeklinde bir çıktı verirler. Yatay eksen moleküllerin kütle/ yük oranları gösterilmektedir. Örneğin: molekül ağırlığı 40 olan Ar molekülü eğer bir kez iyonlaşıp Ar^+ iyonuna dönüşürse, 40 değerinde pik verir. Ar molekülü iki defa iyonlaşıp Ar^{++} iyonuna dönüşürse $40/2=20$ pikinde görülür. Dikey eksen ise ortam içerisinde bulunan moleküllerin kısmi basıncıdır. Bazı cihazlarda bu değer torr cinsinden ölçülmekte iken, bazılarında ise mbar cinsinden verilir (Weissler ve Carlson 1979).



Şekil 2.17 Kısmi basınç değerlerine göre kütle spektrumu

Kısmi basınç analizinde elde edilen verileri yorumlamak için sistem içerisindeki gazların niteliksel özellikleri bilinmelidir. Çizelge 2.4’de kısmi basınç analiz işleminde kütle/yük piklerine ait gazların türü belirtilmiştir.

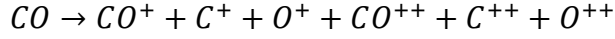
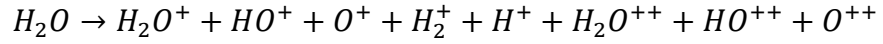
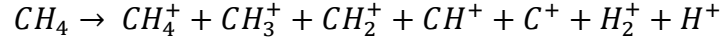
Çizelge 2.4 Moleküllerin atomik ağırlıklarına gaz türleri (Dusza 2008)

Kütle/yük oranı	Gaz türü	Açıklama
2	Hidrojen	Hidrojen UHV sistemlerinde paslanmaz çelik malzemeden salınan başlıca gaz türüdür. Su ve hidrokarbonların ayrışması sonucunda da oluşabilir
4	Helyum	Kaçak kontrolleri işlemlerinde kullanılır. Helyum ayrıca elastomer contalar içerisine nüfus eder
16	Oksijen	Su moleküllerinin veya hava kaçağlarının ayrışması sonucu oluşur.

Çizelge 2.4 Moleküllerin atomik ağırlıklarına gaz türleri (Dusza 2008) (devam)

18	Su	Yüksek vakum aralıklarında su buharı en büyük gaz yüküdür. Eğer sistemde su molekülü tespit edilirse 16 ve 17 piklerinde de görülebilir.
19	Flor	Florokarbonların ayrışması sonucu tespit edilebilir.
20	Neon	İyon pompası kullanılan UHV sistemlerinde gözlemlenebilir.
28	Azot	Vakum kazanlarının temizlenmesinden sonra kuru azot kullanılmaktadır. Ayrıca hava kaçaklarından dolayı gözlemlenebilir.
28	Karbon monoksit	Isıtılan tungsten filaman yüksek miktarda karbon monoksit salmaktadır. Bu etkiyi azaltmak için sıcak katotlar kapatılabilir.
30	Azot oksit	Isıtılmış filaman yüzünden gözlemlenen diğer bir gaz türüdür.
30	Etan (C ₂ H ₆)	Hidrokarbonların ayrışması sebebiyle bulunur.
32	Oksijen	Hava kaçağı sebebiyle ve özellikle 28 piki yüksek derecede ise gözlemlenebilir.
40	Argon	Sistemdeki hava kaçakları sebebiyle bulunabilir.
44	Karbon dioksit	Karbon monoksit gibi filamanın ısıtılması sonucu oluşur.
45	İzopropil alkol	Vakum bileşenlerini temizleme sırasında kullanılmaktadır. Bu sebepten özellikle delikler arasına sızmaktadır.
58	Aseton	Bir diğer temizleme malzemesidir.
95	Trikloretilen	Bir diğer temizleme malzemesidir.

Moleküller iyonlaştırıcıda, iyonlaşmalarının yanında parçalanarak daha küçük molekülleri oluşturabilirler. Oluşan bu molekül parçaları pozitif iyon haline gelirler ve hızlandırılarak kütle analize giderler. Ayrışmış bir molekülün parçalarına bağlı olarak kütle spektrumu üzerindeki oluşan pikler “cracking pattern” olarak adlandırılır. Bu kavramın anlaşılması, kütle spektrumunun yorumlanmasına büyük ölçüde yardımcı olacaktır. Aşağıda sık kullanılan bazı gazlar için oluşan “cracking pattern” molekülleri verilmiştir.



Örneğin: Eğer sistem içerisinde CH_4 molekülü mevcutta bu molekülün kendisi iyonlaşabilir veya parçalanarak $CH_4^+, CH_3^+, CH_2^+, CH^+, C^+, H_2^+, H^+$ iyonlarına dönüşebilir, bunun sonucu olarak kütle/yük oranına göre sırası ile 16,15,14,13,12,2,1 değerlerinde pik oluşturur. Bu yüzden kütle analizi yaparken oluşan spektrum dikkatli bir şekilde okunmalıdır.

2.7 Vakum Pompaları

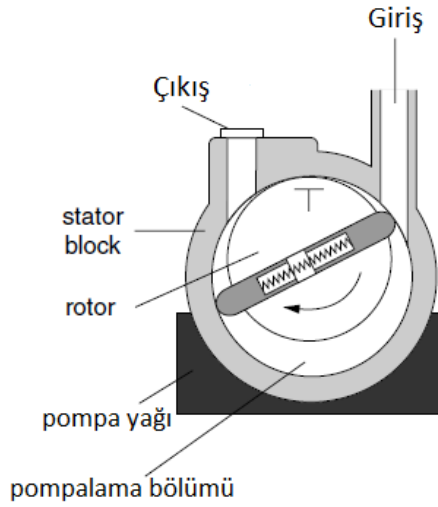
Bir vakum pompası, vakumu oluşturan ve vakum düzeyinin sürdürülmesini sağlayan araçtır. Genel olarak atmosfer basıncının altındaki basınçlar vakum değerleri olarak tanımlanmaktadır. Vakum seviyesi atmosfer basıncına yakın seviyelerden başlayarak çok ileri yüksek vakum (XHV) seviyelerine kadar çok geniş bir aralıkta yer alır. Tek bir pompa ile böyle geniş bir aralıkta vakum elde etmek mümkün değildir. Her vakum bölgesinde farklı pompalar kullanılmalıdır. Sistem içerisindeki bulunan gazlara karşı yaptıkları vakumlama işlemlerine göre vakum pompaları üç ana başlık altında toplanır (Chambers 2004).

2.7.1 Pozitif yer değiştirme pompaları

Bu pompaların, içi gaz ile dolunca, periyodik olarak girişle ilişki kesilerek içeri dolan gaz, genellikle sıkıştırılarak dışarı atılır. Pozitif yer değiştirme pompaların çalışma aralığı genel olarak 1000 ile 10^{-3} mbar aralığında veya biraz daha düşük seviyelerdedir. Daha iyi vakum gerektiren uygulamalar genellikle birden fazla pompa gerektirir ve gerekli vakumun sağlanması için bir dizi işlem gerektirir.

Döner (Rotary) pompası

10^{-3} mbar basınç seviyesinin üstünde çalışan tüm temel uygulamalar için en yaygın kullanım gören pompalardır (Roth 1990). Turbo moleküler gibi yüksek vakum seviyesinde çalışan pompalar için destekleyici (backing) pompa olarak kullanılır. Döner pompanın temel şeklinin yapısı şekil 2.18’de gösterilmektedir. Yağa batırılmış silindirik bir yatak (stator) içinde, silindirik eksenini ile çakışık olmayan bir eksen etrafında ve doğrudan bağlantılı bir motor ile döndürülen bir rotordan oluşur.



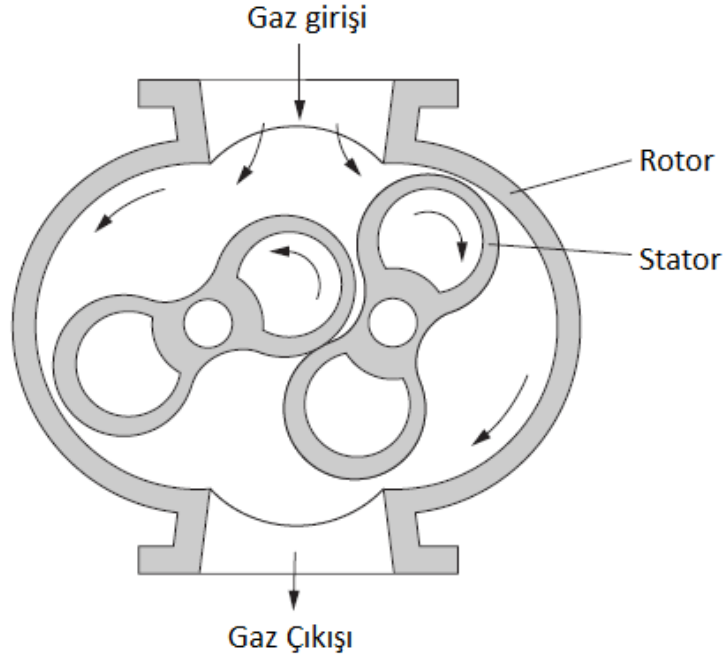
Şekil 2.18 Döner pompanın şematik görünümü

Girişi dolduran hava veya gaz rotorla birlikte dönen kanatlar yardımı ile sıkıştırılarak çıkışa aktarılır ve çıkıştaki yaylı bir kapaktan dışarı atılır. Yatağın da içinde bulunduğu pompa kabını dolduran ve ısı aktarımını da sağlayan özel bir yağ, rotor ile yatak iç duvarı arasındaki sızdırmazlığı sağlar (Hilleret 1999).

Kök (Roots) Pompası

Bu pompalar, 10 ile 10^{-2} mbar basınç aralığında yüksek hacimsel akış hızlarına sahiptir. Şekil 2.19 kök pompasının kesit yapısını göstermektedir. Yaklaşık “sekiz” şekline sahip rotorlar bir motor tarafından döndürülür ve vakum alanına doğru tam senkronize bir şekilde zıt yönde dönerler. Rotorlar, gaz girişi ve çıkışı portlarına sahip oval biçimli

stator içerisine alınmışlardır ve aralarındaki boşluklar çok küçük olup, tipik olarak milimetrenin onda biri kadardır (Roth 1990). Rotorlar ve stator arasında herhangi bir yağ maddesi yoktur bu yüzden bir “kuru pozitif yer değiştirme pompası” olarak bilinir. Kök pompaları tipik olarak yaklaşık 3000 rpm gibi yüksek hızlarda dönebilirler. Rotorlar birbirleri ile uyumlu döndükçe gaz girişten çıkışa aktarılır.

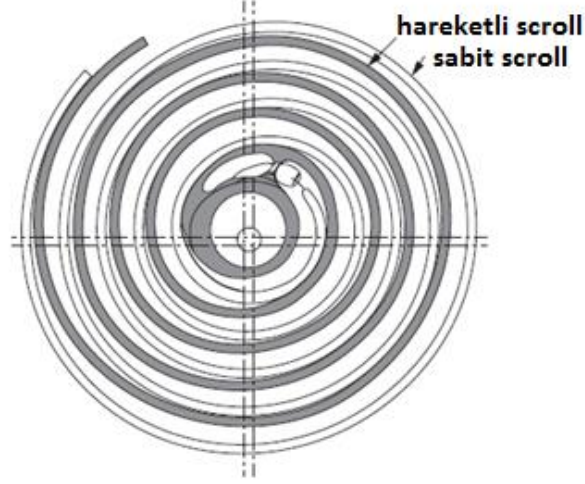


Şekil 2.19 Kök pompasının kesit yapısı

Bu pompanın çıkışı doğrudan atmosferik basınca açılmaz, çıkışına mutlaka bir döner pompa bağlanıp onun çıkışı atmosfere açılır. Başlangıç olarak kök pompa atmosferik basınçta çalıştırılacak olursa rotorlar aşırı ısınarak genişlediğinden sıkışıp kilitlenebilir.

Salyangoz (Scroll) pompası

Salyangoz pompası, merkeze doğru kaydırmanın sağlandığı kanat geometrisine sahiptir. Tür olarak kuru pozitif yer değiştirme pompasıdır. Gaz molekülleri girişten başlayarak merkeze kadar sıkıştırılarak ortamdaki uzaklaştırılır. Bu tasarım düşük gürültü ve düşük titreşimlidir. Bunun yanında nadir bakım gerektirir ve yıkıcı arıza modlarının ortadan kaldırılması gibi pek çok avantaj sağlar (Hilleret 1999). Salyangoz pompanın kanat yapısı şekil 2.20’de gösterilmiştir.



Şekil 2.20 Pompa kanat yapısı

Kanatlardan biri sabit iken diğer kanat hareketli bir spiral kanattan oluşur. Tipik bir spiral kanatın yüksekliği 28 mm ve kalınlığı ise 4 mm'dir. Yakın temasta spiral kanatlar arasındaki boşluk yaklaşık 0,1mm'dir. Tipik salyangoz pompalar yaklaşık 10 m³/saat pompalama hızına ve 5x10⁻² mbar seviyesine kadar basınç düşürebilirler.

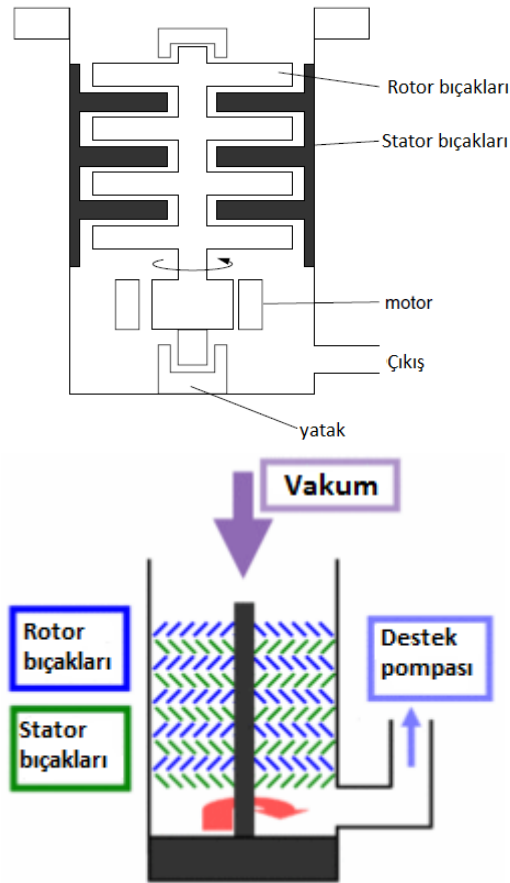
2.7.2 Momentum transfer pompaları

Pozitif yer değiştirme pompalarında viskoz akışa sahip moleküller belli bir hacim içerisinde izole edilir ve sıkıştırma yapılarak ortamdan uzaklaştırılır. Moleküler akışta ise, moleküllere tercihli bir hız yönü vererek hız dağılımlarını değiştirmek mümkündür. Bu olay, moleküller hızlı hareket eden bir yüzeye çarptığında oluşabilir. Bu pompalama mekanizması yalnızca moleküler akış bölgesinde verimlidir, bu yüzden bu tür pompalar atmosferik basınçta gaz pompalayamazlar.

Kısacası, girişe gelen gaz molekülleri, atmosfer basıncı altında yüksek hızda akışkan ve hareketli yapılarla etkileşerek momentum kazandırılarak çıkışa aktarıldığı pompa türleridir (Tarımcı ve Sarı 2006). Örnek olarak difüzyon (püskürtme) pompaları ve turbo moleküler pompalarıdır.

Turbo Moleküler Pompası

Turbomoleküler pompa (TMP), gaz moleküllerinin yüksek hızlı yüzeylerle etkileşimini kullanarak onları sistemden dışarı yönlendirir. Bu yüzeyler rotor denilen uçak türbinlerinin çok katmanlı yapısına benzeyen, dairesel bir diskin radyal olarak içe doğru açılı bir şekilde işlenmesiyle oluşturulan eğimli yüzeylerdir (Tarımcı ve Sarı 2006). Rotorlar moleküler hızlarla kıyaslamak için yeterli hızlarda dönerler. Her rotor şekil 2.21’de gösterildiği gibi, silindirik pompa gövdesinin duvarından içeri doğru çıkıntı yapan benzer bir bıçak yapısına sahip stator kanat takımıyla eşleştirilir. Moleküler akış ile pervane kanatları arasında giren moleküller, yüksek devirde dönen kanatların çarpması ile yönlendirilmiş bir ek momentum kazanır; bu moleküller bükümlü stator kanatlarından da yansırarak çıkışa gönderilir.



Şekil 2.21 Turbo moleküler pompa ve bıçak yapıları

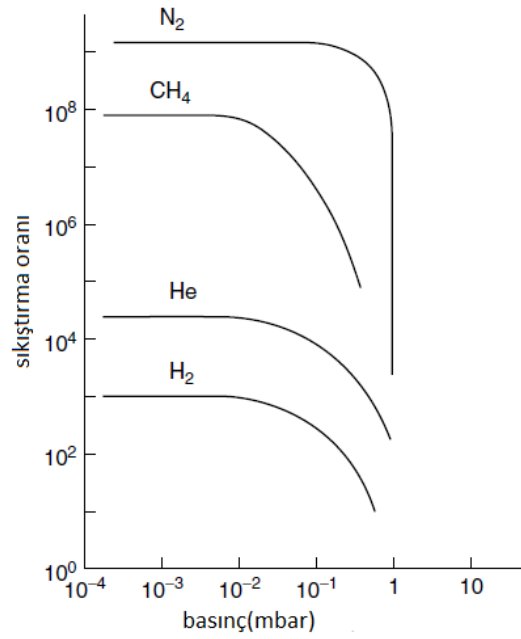
Atmosferik basınçta, gazların akışı viskoz akış şeklindedir ve moleküller buldukların kabın yüzeylerinden daha çok birbirleri ile etkileşim içerisindedirler. Turbomoleküler pompa bu bölgede çalışmaz. Bunun nedeni, bir bıçak tarafından moleküle uygulanan kuvvetin, moleküller arasındaki çarpışmalara kıyasla önemsiz kalması ve bu nedenle akışın etkilenmeden kalmasıdır. Bu nedenle bir mekanik pompa (döner pompa, salyangoz pompa vb.) turbo moleküler pompa açılmadan önce basıncı 10^{-3} mbar seviyesine kadar düşürmek zorundadır. Bu basınç seviyesinden sonra moleküller “moleküler akış” seviyesine geçer ve moleküller nispeten serbest davranış sergilerler (Hilleret 1999). Bu akışta TMP, bağımsız olarak her bir moleküle ek bir momentum kazandırır ve böylece moleküller pompanın çıkışına düzgün bir şekilde geçer. Sistemin basıncı yaklaşık olarak 10^{-7} mbar seviyesine düştüğünde TMP artık basınç seviyesini düşüremeyecektir (Dusza 2008). Bunun temel sebebi; TMP çıkış basıncının giriş basıncına oranı olarak tanımlanan maksimum sıkıştırma oranına ulaşmasıdır. Sıkıştırma oranı,

$$K = \frac{P_{\text{çıkış}}}{P_{\text{giriş}}} \quad (2.35)$$

şeklindedir. Maksimum sıkıştırma oranı (Dechlar 2006):

$$K_{max.} = \{ \exp[(\vartheta_B M^{\frac{1}{2}})/(2k_B N_A T)^{\frac{1}{2}}] f_\phi \}^n \quad (2.36)$$

şeklindedir. Burada, M gazın molar kütlesi, ϑ_B bıçakların ortalama tanjant hızı, k Boltzmann sabiti, N_A Avogadro sabiti, T sıcaklık, f_ϕ bıçak açılarının fonksiyonu ve n toplam bıçak sayısıdır. Sıkıştırma oranı $M^{\frac{1}{2}}$ ile orantılı olduğu için büyük moleküllü gazlar küçük moleküllü gazlara göre daha kolay pompalanabilir. Özellikle hidrojen, diğer gazlara oranla daha düşük sıkıştırma oranına sahip olacaktır. Şekil 2.22 sıkıştırma oranının, destek pompası tarafından sağlanan ön hat basıncına nasıl bağlı olduğunu göstermektedir. Azot için 10^{-1} mbar (hidrojen ve helyum için 10^{-2} mbar) üzerindeki basınçlarda maksimum sıkıştırma değerinin düştüğü görülmektedir. Bahsedildiği gibi sıkıştırma oranı molekül ağırlığına bağlı olduğu için, maksimum sıkıştırma oranı hidrojen için 10^3 iken azot için bu değer 10^9 gibi büyük bir değerdir.



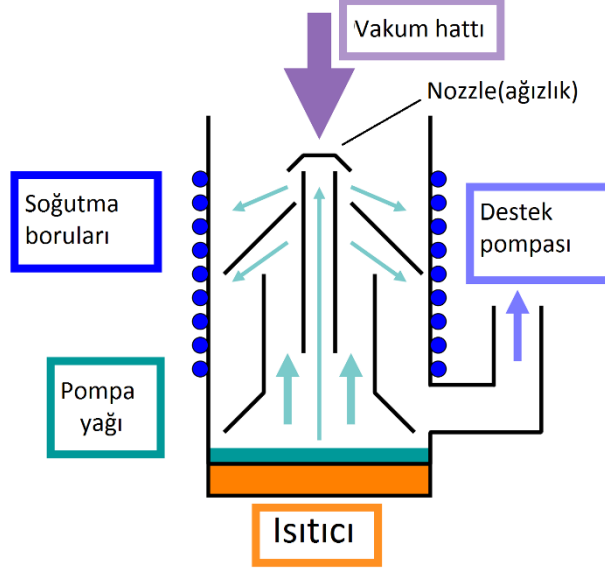
Şekil 2.22 Sıkıştırma oranı-basınç ilişkisi

Rotor bıçaklarını taşıyan milin konumunu tanımlayan yataklar, yağlı veya gres yağlamalı olabilir. Bazılarında yüksek devirde dönmeyi sağlamak ve bilyalı yatak yağlama sorunundan kurtulmak için duyarlı olarak yerleştirilmiş mıknatıslardan oluşan manyetik yatak kullanılır. Ayrıca yağlanmış rulmanlar söz konusu olduğunda, hidrokarbon kontaminasyonu ihtimali endişesi olur.

Difüzyon Pompası

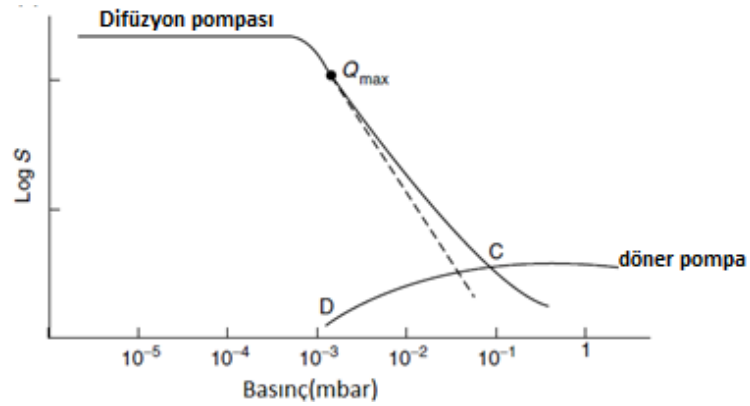
Difüzyon pompası (DP) yüksek vakum sistemlerinde yaygın olarak kullanılır; çünkü performans açısından güvenilirdir ve ses gürültüsü yapmaz. DP'lerin temel dezavantajı gaz buharının geri akış riskidir (Bülbül ve Jafarpour 2015). Difüzyon pompasının şematik görünümü şekil 2.23'de verilmiştir. Pompa sıvısı, pompanın altındaki kazanda ısıtılan ve buharlaştırılan yağdır. Buharlaştıran bu sıvı baca boyunca yükselecek ve ağızlık (nozzle) bölümüne ulaşacaktır. Buhar daha sonra ağızlıktan aşağıya doğru yüksek bir hızla hareket eder. Buhar moleküllerinin hareketi sırasında, pompa içerisine giren gaz moleküllerine çarparak bir momentum kazandırır ve gaz moleküllerine çıkışa doğru yönlendirmeye zorlar. Çıkış borusunda yığılan gaz molekülleri buraya bağlı bir mekanik pompa ile dışarı atılır. Yüksek hızlı buhar ise su boruları ile soğutulan pompa iç çeperine çarparak yoğunlaşır ve tekrar sıvı kazanına döner. Pompa sıvısı olarak silikon

yağları, hidrokarbon yağları vb. kullanılmaktadır (Gatzen vd. 2015). Pompaya giren gaz moleküllerinin moleküler akış bölgesinde olması gerekir. Gaz molekülleri çok yoğun olursa pompalama eylemi tahrip olması nedeniyle pompanın durmasına yol açar.



Şekil 2.23 Difüzyon pompasının şematik görünümü (Anonymous 2017e)

Şekil 2.24 logaritmik ölçekte pompalama hızına ($\log S$) göre difüzyon pompasının çalışma basıncı görülmektedir. Bu gaz yayılımı, Q_{max} sabittir. 10^{-3} mbar basıncından yüksek değerlerde difüzyon pompasının pompalama hızı düşmektedir.



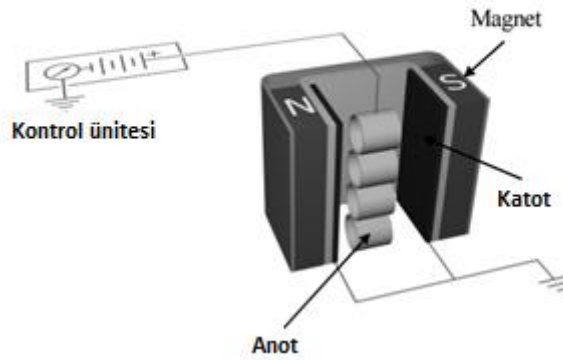
Şekil 2.24 Gaz yayılımına göre difüzyon pompasının çalışma basıncı

2.7.3 Gaz kapanı pompaları

Gaz kapanı pompaları moleküler akış bölgesinde çalışan pompalardır. Pompa içerisine giren gaz molekülleri soğurularak veya soğuk yüzeylerle yoğunlaştırılarak tutunurlar. Kriyojenik pompalar, soğurma pompaları ve iyon pompaları yakalama işleminde elektrik ve manyetik alanların yardımıyla pompalama yapan pompalardır. Kimyasal tutuculu (Getter) pompalar ise üzerine düşen gaz moleküllerini içerisine soğurur (Chambers 2004).

İyon pompası

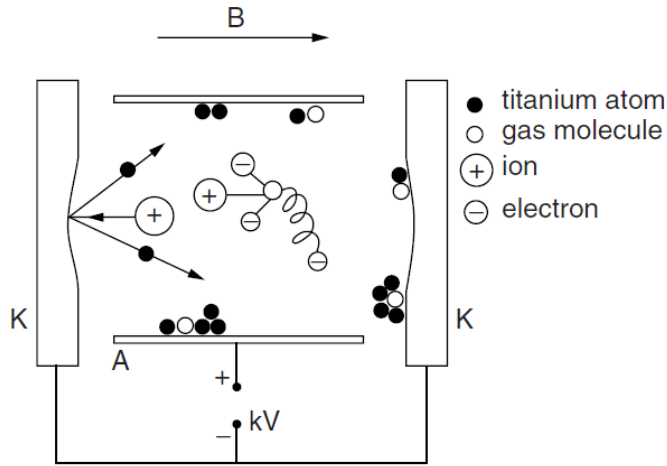
Bir gaz iyonize edilir ve ortama çıkan pozitif iyonlar negatif yüklü bir düzleme hızlandırılırsa, gaz atomları etkin bir şekilde sistemden kaldırılır ve böylece pompalama işlemi gerçekleşmiş olur. İyon pompası terimi, gaz moleküllerinin elektrik alan kullanılarak iyonize edilip, bir kimyasal tutucu olarak kullanılan aktif bir metal yüzeye doğru hızlandıran vakum pompası türleridir (Gatzen vd. 2015). Aktif yüzey olarak genelde titanyum kullanılır çünkü çoğu gaz ile aktif bir şekilde tepkime oluşturabilir. İyon pompaları ileri yüksek vakum seviyelerine kadar (10^{-11} mbar) çıkma olanağı vardır ve oldukça temiz, sessiz ve güvenlidirler (Schulz 1999).



Şekil 2.25 İyon pompasının şematik gösterimi (Dusza vd. 2008)

Bir iyon pompası temel olarak anot ve katot elektrotlarından ve bir mıknatıstan oluşur (Şekil 2.25). Anot genellikle silindirik ve paslanmaz çeliktir. Anot tüplerinin her iki

yanında yer alan katot plakaları titanyumdan yapılmıştır ve bu da tutucu malzeme olarak işlev görür. Manyetik alan, anodun eksenini boyunca yönlendirilir. Bir elektrik alanının etkisiyle katottan çıkan elektronlar manyetik alanın varlığı sebebiyle helis yörüngelerde hareket ederler ve böylece gaz molekülleri ile çarpışma olasılıkları artmış olur. Gaz molekülleri, anot kısmında birkaç kV gerilimle oluşturulan elektronlar ile çarpışırlar ve pozitif iyon haline geçerler. Böylece direkt olarak katot kısmına yönelirler (Şekil 2.26). Katot yüzeyine çarpan iyonlar titanyum moleküllerini saçtırarak bileşik oluşturur.



Şekil 2.26 Diyet iyon pompası

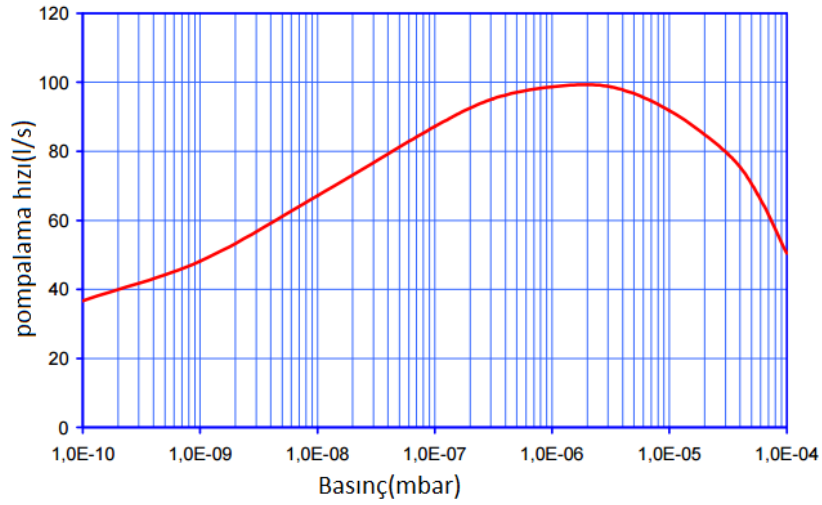
Bir diğer mekanizma ise iyonlaşan atomlar katot içerisine derinden nüfuz ederek gömülürler. Bazı moleküller konumlarına bağlı olarak daha sonra yeniden serbest kalabilir. Bu durum özellikle zayıf bağlanmış argon atomları için geçerlidir. Asıl gazların açtığı bu sorun triyot iyon pompası tasarımı ile giderilebilir. Bu pompa türünde sadece, saçtırma işleminin olduğu yüzeyle asıl gaz moleküllerinin biriktiği yüzeyler birbirinden bir kafes düzeneği ile ayrılmıştır. Üçüncü bir mekanizma ise katot yüzeyinden saçılan titanyum atomları anot yüzeyine kaplanır ve burada gaz molekülleri ile etkileşerek kimyasal tutma işlemini yapar. Böylece ikinci bir pompalama sistemi oluşmuş olur. Pompalama etkisi gaz türlerine göre değişkenlik gösterir. Yüzeyden saçtırılan titanyum atomlarının sayısı pompa içerisindeki basınç ile orantılıdır.

İyon pompaları her türlü gazları pompalayabilmektedir. Bütün aktif gazlar arasında H₂ moleküllerin pompalanması diğerlerinden farklıdır. Hidrojen atomları küçük kütleye

sahip oldukları için katottan çok fazla saçırma yapamaz. Hidrojen atomları, bir kere ayrıştığında difüzyon yolu ile katot yüzeyine nüfus eder. Helyum atomları asal gaz olmasına karşı, küçük hacimli olduğu için kolay bir şekilde nüfus edebilir.

Argon atomlarının geri saçılmasını önlemek için, katotlardan biri titanyum yerine tantaldan yapılmıştır. Çok yüksek atomik kütlesi (Ta-181 akb, Ti-48 akb) nedeniyle argon atomlarının (40 akb) geri saçılma olasılığı düşmektedir (O'Hanlon 2003).

Şekil 2.27, 100 l/s pompalama hızına sahip bir iyon pompasının basınca bağlı pompalama hızı görülmektedir. Basınç değeri yüksek değerlere çıktığında (10^{-4} mbar) iyon pompası çalışmayı durdurmaktadır. Maksimum pompalama hızına ise 10^{-6} mbar seviyelerinde ulaşabilmektedir. Bu seviyeden sonra pompalama hızı düşmektedir. Bunun sebebi pompalanan ve malzemeden salınan gazların eşitlenmesidir.

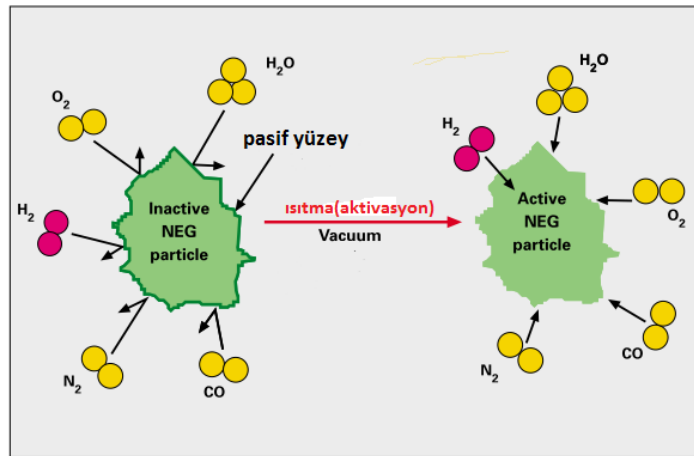


Şekil 2.27 Pompalama hızı 100 l/s olan iyon pompasının basınç grafiği

Buharlaşmayan Tutucu (NEG-NonEvaporable Getter) Pompası

NEG bir kartuş adı verilen buharlaşmayan tutucu (katı şekilde kalan) maddesi ile aktif gazları soğuran pompadır. İleri yüksek ve çok ileri yüksek vakum alanında birçok uygulamada tek başına veya diğer vakum pompalarıyla birlikte kullanılırlar. Pompalama işlemi, temiz metal yüzeye çarpan aktif gaz molekülleri ile kimyasal

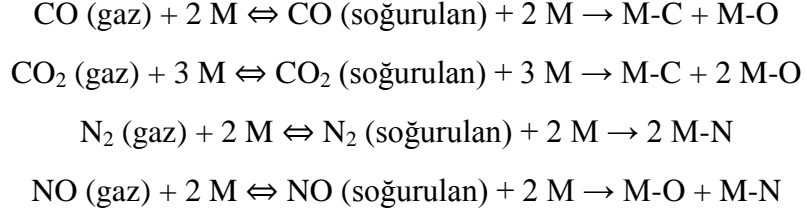
tepkime oluşturması ve bu gaz moleküllerinin soğurulması ile gerçekleşir. Temiz metal yzeyi, üretim ve kurulum basamakları sırasında tutucu madde havaya maruz kaldığında ortaya çıkan oksit karbür tabakalar tarafından kaplanmamış bir metal yzey anlamına gelir (Benvenuti ve Chiggiato 1996). NEG pompa vakum ortamına dâhil edilirken doğal olarak atmosfer ortamına maruz kalmaktadır. Bu yzden kartuşun temizleme işlemi vakum ortamında yapılmalıdır. Bunun için kartuşu belli bir sfire belli sıcaklıkta ısıtmak (kartuşun özelliğine gfre değişiklik gstermektedir) yeterlidir. Aktivasyon adı verilen bu işlem oksijen atomlarının kartuş içerisine gfmölmesine izin verir ve çok temiz bir yzey oluşturur (Benvenuti 1999). Aktivasyon sreci Şekil 2.28'de Şematik olarak gsterilmiştir. Aktivasyon öncesi moleküller NEG tutucu yzeyi ile reaksiyona girmemektedir ve geri yansımaktadır. Aktivasyon sonrası ise reaksiyon gerçekleşmektedir.



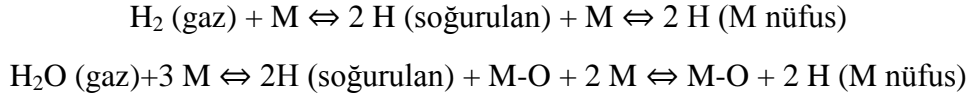
Şekil 2.28 Aktivasyon işleminin Şematik gsterimi (Saes Getters 2001)

Aktivasyon gerçekleştiğinde, pompalama eylemi u aşamaya ayrılabilir. İlk adım, yzey ile etkileşen gaz moleküllerinin ayrışmasıdır. İkinci adım, yzey soğurmasıdır ve her türlü aktif gaz için gerçekleşir. Üçüncü adım, spesifik çalışma sıcaklığına ve gazına bağlı olarak bazen gerçekleşen bazen gerçekleşmeyen gaz moleküllerinin toplu bir Şekilde tutucu içerisine gfmölme olayı, toplu difüzyondur. Eğer toplu difüzyon gerçekleşmezse, gaz molekülleri tutucu yzeyine birikir ve katman oluşturur. Bu yzden pompalama performansı duffer. Soğurma işlemini eski haline getirmek için, tutucu

yüzeyinin tekrar ısıtılması gerekir. Bu işleme reaktivasyon denir. H₂, CO, CO₂, O₂, N₂ ve NO_x türevli aktif gazların tutucu yüzeyle reaksiyonu ile aktif olamayan oksitler, karbürler ve nitrürlerin oluşumu aşağıdaki gibidir (Danielson 2001):



Burada M tutucu metal alaşımların yapısını temsil etmektedir. Bu denklemlerin istisnası, hidrojen molekülleri ve izotoplarıdır. Hidrojen molekülü kolayca tutucu içerisine nüfus eder çünkü tutucu yüzeyde atomik hidrojene indirgenir. Bu davranış ileri yüksek vakum uygulamalarında pompalanan en önemli gaz H₂ olduğu için çok önemlidir. Aşağıdaki reaksiyonlarda bu süreç gösterilmiştir:



Genel olarak NEG pompalar zirkonyum temelli tutucu alaşımlardır. Alaşım bileşimlerine göre farklı isimler ile tarif edilir. Örnek olarak St-101 (Zr_{0,84}-Al_{0,16}), St-707 (Zr_{0,70}-V_{0,246}-Fe_{0,054}) ve St-172 (%40Zr) alaşımlarıdır. Deneysel veriler, St-101 alaşımının tam aktivasyonun 45 dakika boyunca 400 °C'ye veya 24 saat boyunca 350 °C'ye ısıtılmasından sonra ulaşılabileceğini göstermiştir. St-707 alaşımının aktivasyonu ise genel olarak 1 saat boyunca 400 °C'de yapılmaktadır. Aynı şekilde St-172 alaşımının standart aktivasyonu 45 dakika boyunca 450 °C'de yapılmaktadır (Benvetuni 1999).

Bu tür pompalar, yakalanan bir molekülün tutucunun yüzeyinde harcadığı zaman olarak tarif edilen, bekleme süresi ile karakterize edilir (Barcellini 2015):

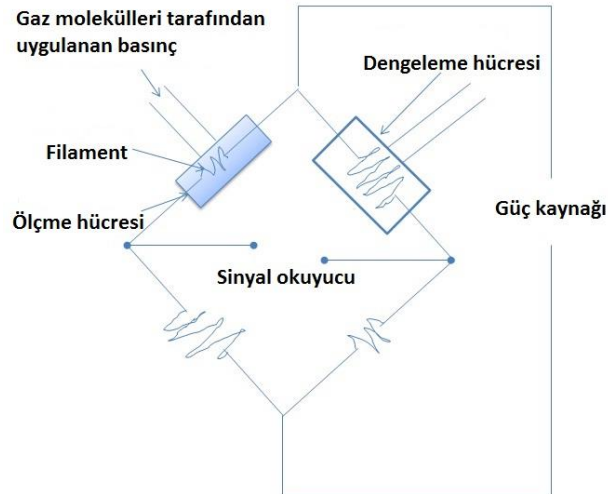
$$\tau = \tau_0 \exp\left\{\frac{BE}{k_B T}\right\} \quad (2.37)$$

Burada τ_0 bir sabit, BE , moleküllerin tutucu yüzeye bağlanma enerjisi (Binding Energy) ve T sıcaklıktır. Bekleme süresinin, deneylerin tamamı boyunca moleküllerin malzeme yüzeyine yapıştığını garanti edecek kadar uzun olması gerekmektedir. NEG pompaların tutucularının bağlanma enerjisi çok yüksek olduğu için bekleme süreleri oldukça uygundur.

2.8 Vakum Ölçerleri

2.8.1 Pirani vakum ölçeri

Wheatstone köprüsünün bir kolunu oluşturan, ısıtılmış tel bulunan herhangi bir basınç göstergesi Pirani ölçer olarak adlandırılır. Pirani ölçeri, 1906'da, Alman fizikçi Marcello Pirani (1880-1968) tarafından keşfedilmiştir (Weissler ve Carlson 1979). İletken bir tel, içerisinde elektrik akım geçtiğinde ısınır. Isınan telin ısı kaybetme oranı, teli çevreleyen ortamın iletkenliğine bağlıdır. İletkenlik ise ortamın yoğunluğuna bağlıdır. Bir başka deyişle ortamın basıncı düşük ise, daha düşük yoğunluğu olacaktır. Bu temel pirani ölçerin çalışma prensibini oluşturur. Pirani ölçerin elektronik devre yapısı şekil 2.29'da gösterilmiştir.

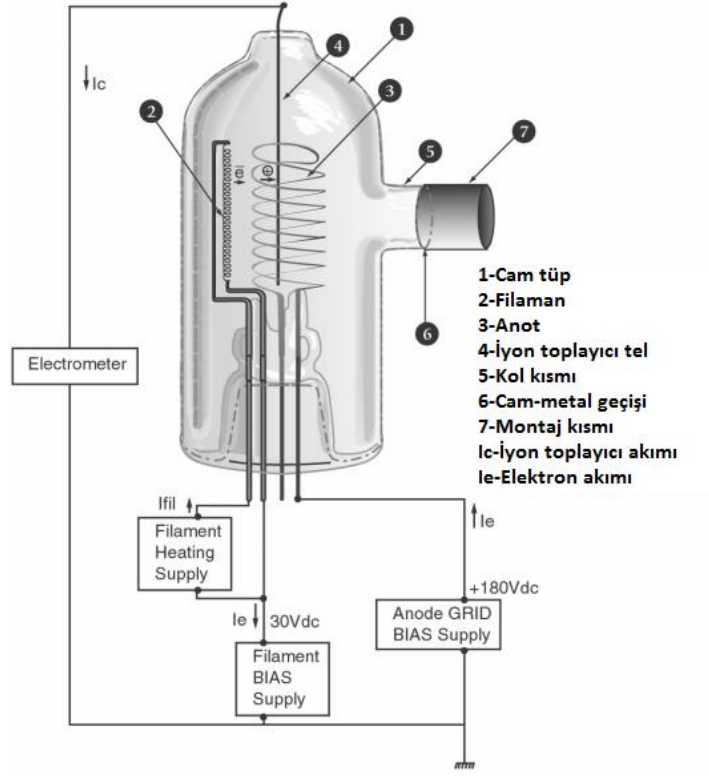


Şekil 2.29 Pirani ölçeri için wheatstone devresi (Anonymous 2017f)

Vakum ortamında moleküller filamana çarptığında, moleküller kinetik enerji kazanır ve filaman ısı kaybeder. Gaz basıncı azaldığında (vakum pompaları ile) mevcut moleküllerin sayısı orantılı olarak düşecek ve filaman daha yavaş bir şekilde ısı kaybedecektir. Filaman telinin elektriksel direnci sıcaklığına bağlı olarak değişir. Filaman direncindeki değişim, wheatstone devresi kullanılarak belirlenir. Kalibrasyon işleminden sonra Pirani ölçer filamanının direncindeki bu değişim, uygulanan basıncın bir göstergesidir. Birçok sistemde, filamanın R direnci sabit tutulur ve I akımındaki değişimler gözlemlenir. Direnç değeri wheatstone devresi kullanılarak ayarlanabilir. Tele verilen güç I^2R 'dir ve bu güç tele çarpan gaz moleküllerine aktarılır. Dolayısıyla, bu dengeyi sağlamak için gereken akım vakumun bir ölçüsüdür. Dengeyi sağlamak için "dengeleme hücresi" içerisine referans gazı yerleştirilir. Bu gaz, hava içerisinde % 79 oranında bulunan azot gazı ile yapılır. Ölçüm elektroniği, vakum sistemi içindeki telin sıcaklık kaybını ölçer ve referans telinkisiyle karşılaştırır ve vakum okumasını yapar. Pirani ölçerle, 10^{-4} mbar arasında ölçü gerçekleştirmek mümkündür (Gatzen vd. 2015).

2.8.2 Bayard-Alpert iyonlaşma ölçeri (hot cathode-sıcak katot)

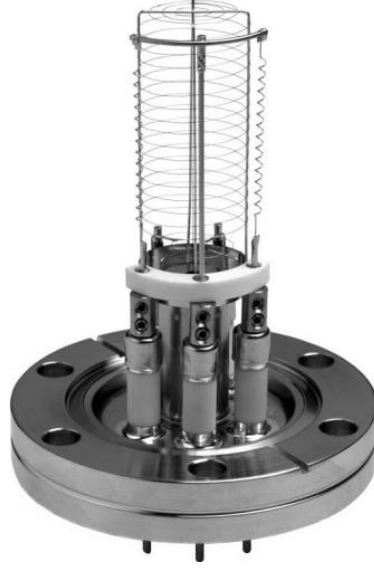
Şekil 2.30'da prototipik cam tüp içerisinde sıcak katot tasarımı tanımlanmaktadır. Elektronlar sıcak filaman tarafından üretilirler ve anot ızgarasına doğru hızlandırılırlar. Akım değeri 0,1-10 mA arasında olan elektronlar ızgara kafesinin iç tarafında karşılaştıkları gaz moleküllerini iyonize ederler. Anot ızgarasının içinde oluşan iyonlar, silindirik ızgaranın ekseni boyunca bulunan ve elektrometreye bağlanmış topraklanmış iyon toplayıcı tel tarafından toplanırlar. İyon toplayıcıda oluşan iyon akımı, ortamdaki gazın mutlak basıncı ile doğru orantılıdır (Chambers 2006). Eğer elektron emisyon akımı ve sıcaklık sabitse, iyon akımı gazların sayı yoğunluğuna ve basıncına bağlıdır. İyon toplayıcı zaman içerisinde kontaminasyona maruz kalır bu durumdan kurtulmak için "Gaz giderme" işlemi uygulanmalıdır, bu sayede toplayıcı yüzeyine biriken moleküller vakum ortamına tekrar aktarılır.



Şekil 2.30 Bayard-Alpert ölçücünün şematik gösterimi

Genellikle filamanlar itriyum kaplı iridyum, toryum kaplı iridyum veya kaplanmamış tungstendir. En yaygın kullanılan kaplanmış iridyumdur çünkü tungstenden daha düşük bir sıcaklıkta çalışır. Ayrıca kaplanmış iridyum filamanlar, güç açıkken atmosfer basınca maruz kaldıklarında daha dirençlidirler. Tungsten filamanlar çalışır durumda iken 10^{-2} torr ya da daha yüksek basınçlara maruz kaldıklarında yanarlar (Farrow 2009).

Çıplak (cam tüpsüz) sıcak katotlar (Şekil 2.31) flanş (genellikle ConFlat DN 40) bağlantılıdır ve direk olarak vakum ortamına eklemelidir. Bu modelin sağladığı avantaj, vakum ortamındaki gaz molekülleri iyonizasyon bölgesine serbestçe geçebilir ve cam tüpün oluşturduğu basınç farkları ortadan kalkar. Çıplak sıcak katotlar 10^{-3} ile 2×10^{-11} torr aralığında ölçüm yapabilir. Bu katotlar kullanılırken dikkat edilmelidir çünkü anot ızgarası kolay kırılmalıdır.



Şekil 2.31 Sıcak katodun cam tüpsüz gösterimi (Anonymous 2017g)

2.8.3 Soğuk katot ölçer (magnetron tipi)

Soğuk katot ölçer, iyonizasyon kullanımı yoluyla yüksek vakum ölçümü için en popüler yöntemlerden biridir. Sıcak katotta olduğu gibi elektron yayan bir filaman bulunmamaktadır. Soğuk katot, iyonizasyon bölgesi için bir silindirik katot ve etrafını çevreleyen bir magnet içermektedir (Şekil 2.32). Magnet sayesinde katodun eksenine doğru yaklaşık olarak 500 ile 3000 gauss'luk manyetik alan verilir. Yaklaşık 10^{-1} torr altındaki bir toplam basınç altında, bir elektron, güçlü elektrostatik alan tarafından katottan çıkarılır ve katodun etrafındaki bir yörüngede manyetik alana dik olarak kendini bulur (Weston 1985). Elektron daha sonra mevcut gaz molekülleri ile çarpışır ve böylece onları iyonlaştırarak pozitif yüklü iyonlar ve serbest elektronlar üretir. Ortaya çıkan serbest elektronlar ayrıca katot etrafında yörüngelerde ilerlemekte ve mevcut diğer gaz moleküllerini iyonize etmektedir. Manyetik alan etkisiyle elektronlar, elektrotlar arasında uzun spiral yollar almaktadır böylece iyonlaştırıcı çarpışmaların olasılığı artmaktadır. İyonlar, büyük kütleleri nedeniyle, manyetik alandan hemen hemen hiç etkilenmez ve doğrudan katoda geçerler. Pozitif iyonlar katotta toplanır ve basınç ile orantılı oluşan akım yüksek voltaj kaynağı ile seri olarak ölçerde gözlenir.



Şekil 2.32 Soğuk katot (Kurt J. Lesker Company 2002)

Oluşan akım ile basınç arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır (Jousten 1999):

$$I^+ = K \cdot P^m \quad (2.37)$$

Burada, m soğuk katotun yapısına bağlıdır 1 ile 1,4 arasında değişmektedir. K anot gerilimine bağlı bir sabittir.

Soğuk katot 2-10 kV aralığında yüksek gerilimde çalıştırılır. Uygulanan manyetik alan ise 0,05 ile 0,3 Tesla aralığındadır. Bu ölçerlerin ölçüm değeri yaklaşık olarak 10^{-2} ile 10^{-11} mbar aralığındadır.

2.9 Temiz Oda Prosedürü ve Sınıflandırılması

Vakum kazanları, pompalanırken mümkün olan en kısa sürede istenilen basınca ulaşmak için temiz olmalıdır. Tipik kirleticiler, kullanılan vida ve contalardaki yağ gresi, herhangi bir işlem sırasında oluşan ürünler, kazan yüzeyine soğurulan su buharıdır. Sonuç olarak, vakum ekipmanlarını birleştirirken, ekipmanların olabildiğince temiz olması sağlanmalıdır. Vakum kazanındaki tüm bileşenler temiz ve yağdan arındırılmış olmalıdır. Tüm contalarda kuru olarak montaj edilmelidir. Özellikle yüksek

ve ileri yüksek vakum seviyelerinde montaj sırasında temiz eldiven giyilmelidir. Hızlandırıcı vakum sistemlerinde yaygın kirleticilerin örnekleri: Döner pompa yağı, su, yüksek sıcaklıklarda plastik türevli malzemeler, genel havadaki toz partikülleri, boya sökücü yağlar ve işlem sırasında oluşacak arızalardır (Garton 2011). Bunun gibi istenmeyen özelliklerin birçoğunu ortadan kaldırmak için temiz odaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Temiz oda; daha kaliteli ve iyi hizmet veya imalat için gerekli olan partikül konsantrasyonlarının kabul edilen standartlar çerçevesinde sağlandığı hijyenik ortamlardır. Temiz odanın amacı daha ortam içerisinde bir temiz hava oluşturmaktır. Bu temiz hava; içerideki kirli havanın dışarı atılıp yerine filtrelenmiş havanın özel şekillerde verilmesiyle sağlanır. Ayrıca güvenlik şartları sağlanırken sıcaklık, bağıl nem, gürültü seviyesi, hava içerisindeki oksijen miktarı, basınç ve hava hareketi de kontrol altında tutulmalıdır.

Temiz oda sistemlerinin görevleri şu şekildedir (Kenter 2007):

- Çalışma ortamlarına toz taneciklerinin girmesini önlemek,
- İstenilen düşük toz oranını tüm ortamda homojen şekilde dağıtmak,
- Yapılacak iş için gerekli olan sıcaklığı sağlamak,
- Yapılacak işten kaynaklanan atık havayı, çevreye zarar vermeyecek şekilde dışarıya atmak,
- Kullanım haricinde de ortama toz girmesini önlemek,
- Uzun vadede, ortamda ve iklimlendirme sisteminin içinde mikroorganizma ve toz birikiminin oluşmasını engellemek,
- Ortamda istenen şartları sürekli olarak güvenilir şekilde sağlamak,
- Üründen çıkan maddelerin çalışan personele zarar vermesini engellemektir.

2.9.1 Temiz oda sınıflandırılması

Temiz odalar iç havasının temizlik kalitesi ile sınıflandırılırlar. Temiz odalar ve temiz odalarda birlikte kontrol edilen ortamların hava temizliğinin özellikle hava ile taşınan partikül konsantrasyonuna göre sınıflandırılmasını kapsar. Sınıflandırmada 0,1 µm'den 5 µm'ye kadar olan eşik (en alt sınır) boyut aralığındaki yayılıma dayalı sadece kümülatif dağılım gösteren partikül popülasyonları, sınıflandırma dikkate alınmıştır (Türkmen 2001). Temiz oda teknolojisinin temel standardı olarak kabul edilen Federal Standart 209'un 1963 yılında oluşturulmasından sonra; bu standart tüm dünyada 300'ün üzerinde rehber ve tavsiye dokümanlarının oluşturulmasına esin kaynağı olmuştur. Bir çok ülke Federal Standart 209'u baz alarak kendi temizlik sınıflandırmalarını geliştirmişlerdir. Bu noktayı açıklayıcı bir örnek olması amacıyla; Federal Standart 209 E'ye göre klas 100'ün tarif ettiği temizlik seviyesi Fransa'ya göre klan 4000, Avustralya'ya göre klan 3,5, Almanya'ya göre klan 3, İngiltere'ye göre klan E veya F, Japonya'ya göre klan 5'e denk gelmektedir.

Federal standart 209E(US FED STD 209E) Standartları

Federal Standart 209 E Amerika'da 1963 yılında oluşturulmuştur. Bu standart feet küp içerisinde 0,5µm'ye eşit veya daha büyük partikül sayımı ile sınıflandırılmıştır. Çizelge 2.5'de Federal Standardın belirlediği partikül büyüklüğüne göre sınıflar içerisinde bulunabilecek partikül sayısı verilmiştir. Partikül sayısı birim ft³ hacmi başınadır. Ayrıca Federal Standart 209 E standartlarının ISO standartlarındaki karşılığı eklenmiştir.

Çizelge 2.5 Federal Standart 209 E

US FED STD 209E						
Class	Maksimum partikül/ft ³					ISO standartı
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	5 µm	
1	35	7,5	3	1	0,007	ISO 3
10	350	75	30	10	0,07	ISO 4
100	3500	750	300	100	0,7	ISO 5
1000	35000	7500	3000	1000	7	ISO 6
10000	350000	75000	30000	10000	70	ISO 7
100000	3500000	750000	300000	100000	700	ISO 8

ISO Standartları 14644-1

ISO 14644-1, International Organization for Standardization (ISO) tarafından oluşturulmuş temiz oda sınıflandırılmasıdır. Temiz oda sınıflandırılmasında çok fazla sayıda standart olması ve bunların tanımlarının, partikül sayımlarının ve baz aldığı partikül boyutunun farklılık göstermesi bu konuda yeni bir standardın oluşturulma gerekliliğine itmiştir. Çizelge 2.6'da ISO 14644-1 temiz oda standardı verilmektedir. Tablodaki parçacık sayısı m^3 hacmi başınadır.

Çizelge 2.6 ISO temiz oda standartları

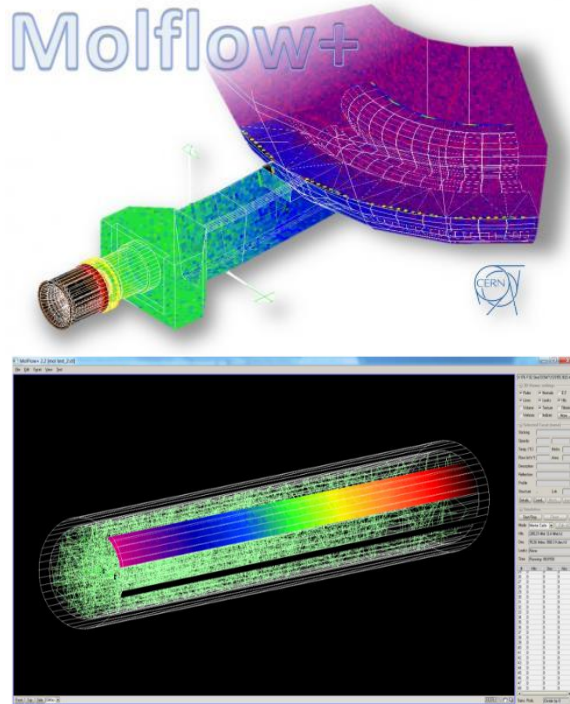
ISO 14644-1 Hava partiküllerinin temizlik sınıfı-partikül/ m^3						
Sınıf	0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	1 μm	5 μm
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1000	237	102	35	8	
ISO 4	10000	2370	1020	352	83	
ISO 5	100000	23700	10200	3520	832	29
ISO 6	1000000	237000	102000	35200	8320	293
ISO 7				352000	83200	2930
ISO 8				3520000	832000	29300
ISO 9				35200000	8320000	293000

Mikroorganizmalar 0,3 μm büyüklüğüne kadar toz taneciklerinin üzerinde yaşayabilmektedir. Hijyenik ortamlarda bu sebepten ötürü 0,3 μm büyüklüğündeki taneciklerin filtrelendirilmesi dolayısı ile mikroorganizmaların hava yolu ile bir yerden diğer yere nakliyesinin önlenmesi gereklidir. Tozsuz temiz odalarda ise yapılacak işe göre 0,1 μm büyüklüğünde taneciklerin ayrıştırılması gereklidir. Günümüzün teknolojisinde, temiz oda iklimlendirme sistemleri ile 1 m^3 içinde 0,1 μm büyüklüğündeki toz taneciklerinin 1 adetten daha az bulunacak şekilde filtrelemek olanaklar dâhilindedir.

3. MATARYEL VE YÖNTEM

3.1 MOLFLOW++

Molflow++ ileri yüksek vakum bölgesinde parçacık testi yapan Monte Carlo simülasyon programıdır. İsmi **Molecular Flow** kavramının kısaltmasından gelmektedir. Yani bu bölgede moleküllerin ortalama serbest yolu kullanılan malzemelerin geometrik boyundan daha büyüktür böylece moleküller arası çarpışmalar ihmal edilebilir. Kullanıcı tarafından fiziksel özellikleri tanımlanan düzlemsel çokgenler (facets, kesim) ile oluşturulan vakum kazanında, moleküler akış bölgesinde gaz moleküllerinin hareket simülasyonunu yapar. Her bir kesim üzerinde gerçekleşen çarpışmalar sayılıp, basınca dönüştürülmektedir (Kersevan ve Ady 2014). Böylece kullanıcı sistem üzerindeki vakum profilini saptayabilmektedir. Vakum sistemi öncelikle STL format destekli bir CAD programı oluşturulmalıdır ve Molflow+ programına aktarılmalıdır.



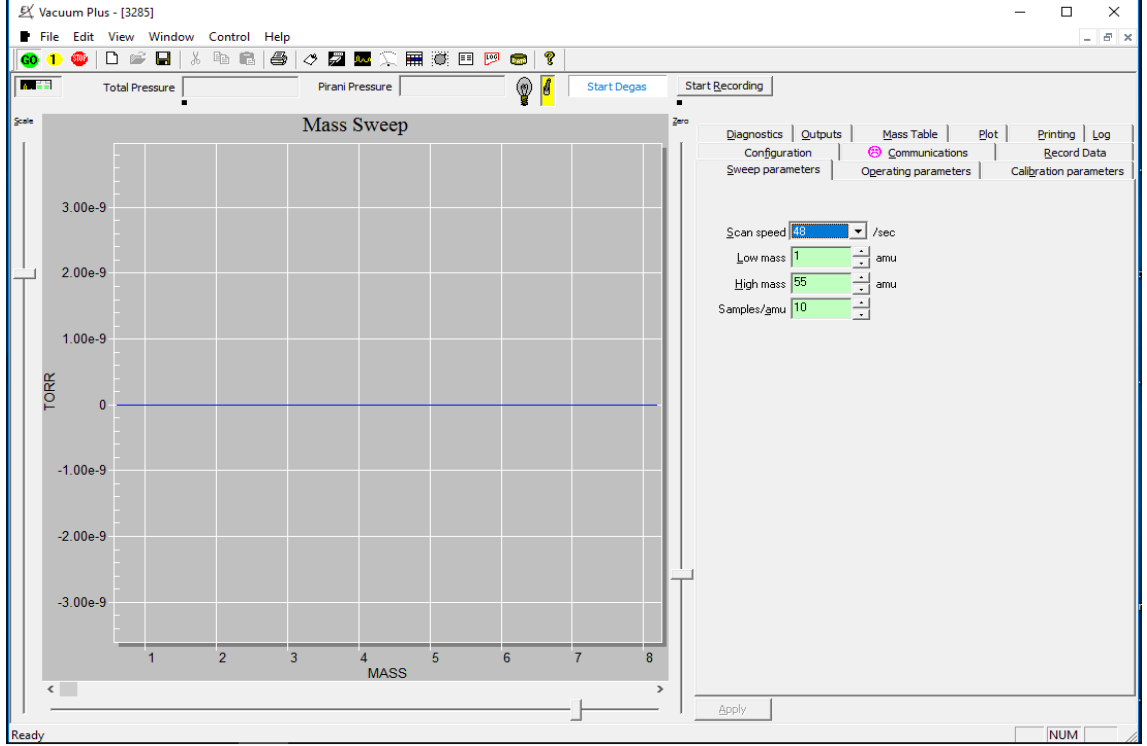
Şekil 3.1 Molflow+ programı ve bir simülasyon örneği

Molflow kullanarak vakum simülasyonu yapmak dört ayırt edici adımlardan oluşmaktadır:

- 1- Geometriyi dışa aktarmak: başlangıç olarak parçacıkların uçtuğu geometri oluşturulur. Bunun için çok bilinen CAD programları (Autodesk Inventor, Catia, Solidworks gibi) kullanılır ve STL (STereoLithography or Standart Tessellation Language) formatında dışa aktarılır. Molflow+ bu dosyaları açabilir ve adına kesim (veya faset) adını verdiğimiz üçgenlerden oluşan düzlemler olarak daraltabilir.
- 2- Geometriyi oluşturduğumuzda, yüzey parametreleri aracılığıyla sınırların fiziksel özelliklerini tanımlamamız gerekir. Bu parametreler parçacıkların oluştuğu kaynaklar (outgassing, desorption) ve ayrıca pompaların hızı ve konumlarıdır.
- 3- İkinci adımdan sonra simülasyon çalıştırılmaya hazırdır. Bazı fiziksel özellikler direk olarak ölçülebilse de bazen belirli bir kesim üzerindeki değişimler ve kesimlerde oluşan renklerden geometrideki farklılıklar saptanabilir.
- 4- Bütün veriler ayarlandıktan sonra Molflow+ parçacıkların yörüngelerini pompalara kadar izler. Her saniyede görüntülenen sonuçlar güncellenir. Simülasyon ne kadar uzun sürerse istatistiksel dalgalanma o kadar az olur.

3.2 Extorr VacuumPlus Software

Extorr XT aleti bir kuadrupol gaz analizörüdür. Vakum ölçümü bazı cihazların kullanılmasını gerektirmektedir. Bunlar, vakum sistemindeki gazlar ile etkileşime geçip basınç ile ilişkili bir voltaj veya akım üretecek mekaniksel, termal veya elektriksel cihazlardır. Extorr VacuumPlus Kuadrupol gaz analizörünü kontrol eden bir bilgisayar programıdır. VacuumPlus programının ara yüzü şekil 3.2’de verilmiştir.



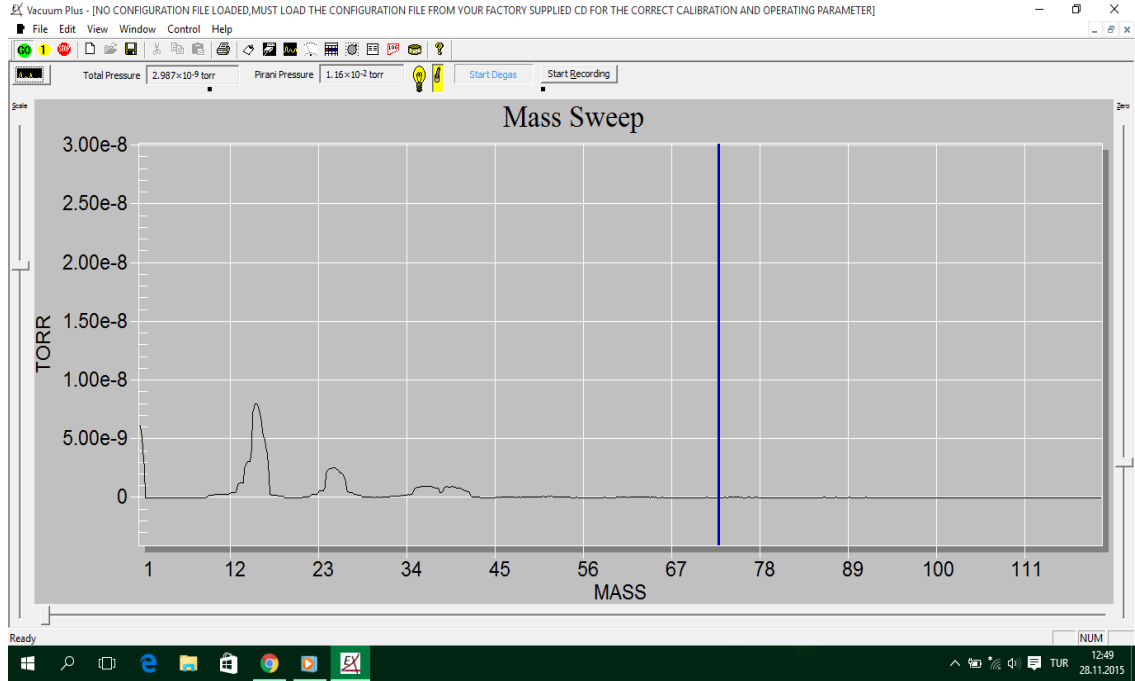
Şekil 3.2 VacuumPlus programının arayüzü

Sistem basınç seviyesi atmosfer seviyesinde 3×10^{-2} torr seviyesine kadar RGA içerisinde bulunan Pirani ölçer ile kontrol edilmektedir. Basınç değeri bu seviyeye düştüğünde iyonlaştırıcı çalışmaya başlamakta ve molekülleri iyonlaştırmaktadır. Basınç seviyesi 3×10^{-3} torr seviyesine düştüğünde Kuadropol filtre, kütle analizi yapmaya başlamaktadır. Bütün bu değişimler VacuumPlus programının ara yüzünden kontrol edilebilmektedir.

Kütle analizi iki yöntemle yapılmaktadır. Bunlardan birincisi sistemde bulunan bütün gazların kısmi basıncına göre 1 ile 200 akb arasında ölçüm yapan "mass sweep" modudur. İkincisi zamana bağlı olarak gazlardaki kısmi basınç değerlerinin gözlemlenebildiği "trend mode" modudur.

Şekil 3.3'de de "mass sweep" modunun ara yüzü gösterilmiştir. Sistemde bulunan gazlar kütle/yük oranına göre pik yapmaktadır. Bu gazların kısmi basıncı "torr"

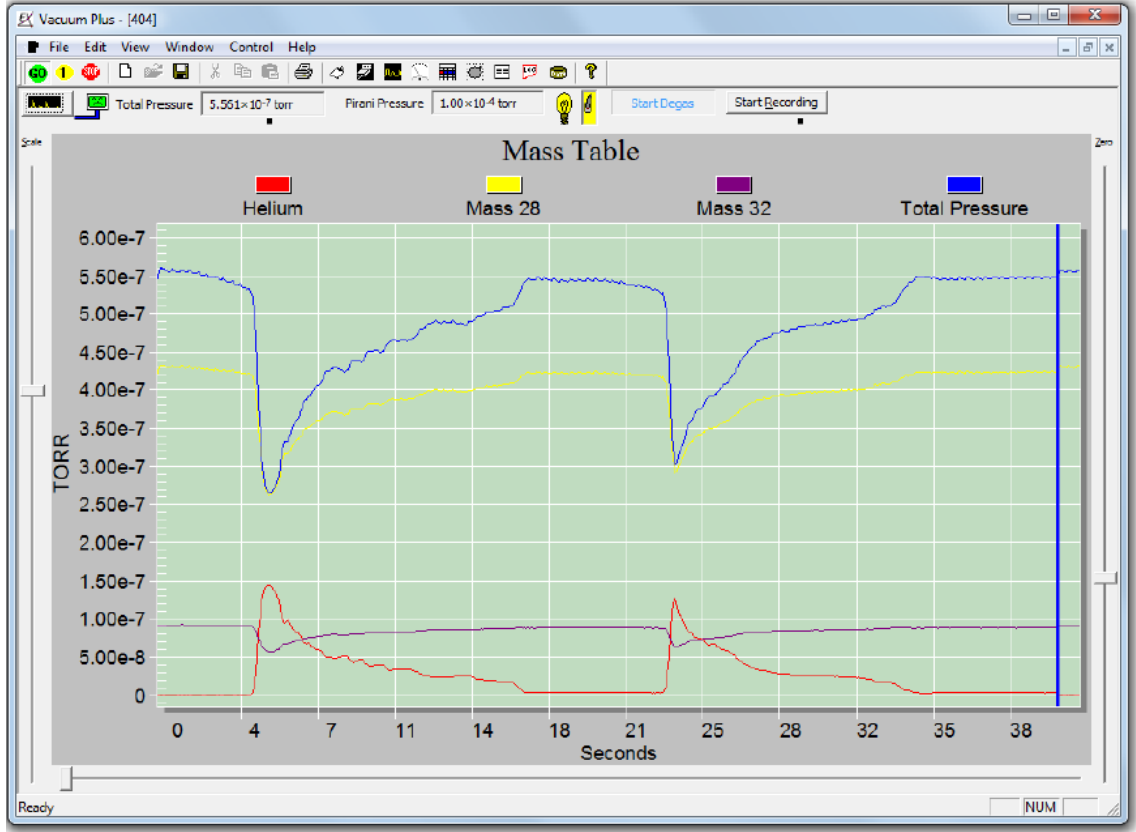
biriminden okunabilmektedir ve kısmi basıncın değerine göre sistemdeki bolluk oranları tespit edilebilmektedir.



Şekil 3.3 "Mass Sweep" modu

“Mass sweep” modunda yapılan işleme ve belli bir zamanda efektif şekilde iş yapabilmek için belirli bir kütle arası taraması yapılabilir. Bunun için bütün spektrum taranmalıdır ve sistem içerisinde bulunan gaz türleri belirlenmelidir. Ayrıca bu modda tarama hızı ayarlanabilir. Yüksek tarama hızlarında spektrumda, gürültü oluşmaktadır. Düşük tarama hızlarında ise vakum sistemindeki ani değişimler hızlı bir şekilde kontrol edilememektedir.

“Trend mode” modu kullanılabilmesi için ilk önce kütle spektrumu tamamen taranmalı ve sistem içerisinde bulunan gazların varlığı tespit edilmelidir. Bu modda “mass sweep” modunun aksine sadece belirli gaz türlerin kısmi basınçları ölçülmektedir ve zamana bağlı olarak kısmi basınçlarındaki değişim gözlemlenebilmektedir. Ayrıca bu modda gaz kaçağı tespiti yapılabilmektedir. Gaz kaçaklarının tespiti helyum gazının vakum sisteminde bulunmasına göre tespit edilebilir. Şekil 3.4’de “trend mode” modunun arayüzü gösterilmektedir.



Şekil 3.4 "Trend Mode" modunda gaz kaçağı tespiti

Şekil 3.4'de görüldüğü gibi kırmızı renkte helyum gazı, sarı renkte CO ve N₂ gazı, mor renkte O₂ gazı ve mavi renkte ise sistemin toplam basıncı tanımlanmıştır. Kırmızı renkte olan helyum gazının kısmi basıncındaki ani artmalar o zaman aralığında sistemde bir gaz kaçağı olduğunu belirtmektedir.

VacuumPlus programı ile gözlemlediğimiz kütle spektrumunu "Excel" dosyası olarak dışa aktarabiliriz ve verilerimizin grafiklerini elde edebiliriz.

Şekil 3.5'de ise kullandığımız Extorr marka RGA aleti görülmektedir. RGA aleti bir CCU (Control and Command Unit) ve bir Kuadrupol kütle spektrometresinden oluşmaktadır. Ayrıca şekil 3.5'de kontrol yazılım CD'si ve bilgisayar ortamına bağlantı için RS232 kablo görülmektedir.

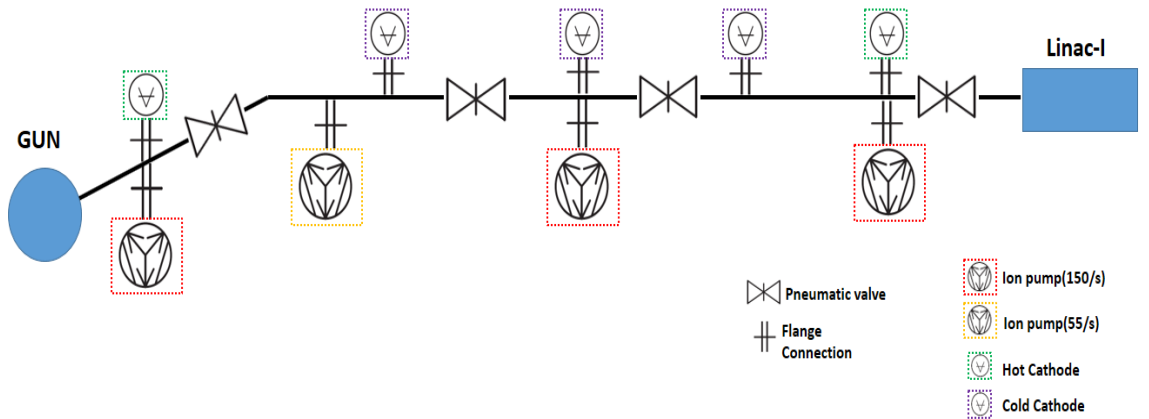


Şekil 3.5 "Extorr" marka Artık Gaz Analizörü

4. BULGULAR

4.1 TARLA Enjektör Hattı Vakum Tasarımı ve İhtiyacı

TARLA Enjektör hattı 2017 yılı itibaren kurulum aşamasındadır ve vakum seviyesinin 10^{-10} mbar mertebesinde olması hedeflenmiştir (Aksoy ve Özkorucuklu 2011). Demet hattının vakumlanmasındaki iki temel amaç; elektron demetinin hareket doğrultusu boyunca gaz molekülleri ile etkileşime girerek saçılmasını önlemek ve elektron tabancası ile hızlandırıcı kaviteler içerisinde mümkün olan en kısa alanda yüksek potansiyel farkları yaratarak hızlandırma gradyenini maksimum kılmaktır. 10^{-10} mbar çok ileri vakum bölgesi ulaşılması oldukça zor ve hassas bir vakum bölgesidir. Vakum bileşenlerinin imalat aşamasından itibaren çeşitli prosedürlerin takip edilmesi, malzeme kalitesi ve imalat toleranslarının takip edilmesi, vakumlama başlamadan önce uzun bir temizlik ve yüzey hazırlama prosedürünün uygulanması ve pompalama mekanizmalarının sisteme uyumlu şekilde hazırlanması gerekmektedir. Tüm bunların eksiksiz yerine getirilmesi halinde bile sistem tasarımına bağlı olarak bir kazanın çok ileri vakum bölgesine kadar ilk defa inebilmesi ve kararlı hale gelmesi 2-4 ay arası sürebilir. Çok ileri vakum bölgesinde en az 6 ay zaman geçirmiş bir kazan, uygun bekleme şartlarında tutulursa çok ileri vakum bölgesine tekrar 3-7 gün arasında dönebilir. Enjektör hattı vakum tasarımı şekil 4.1’ de verilmiştir.

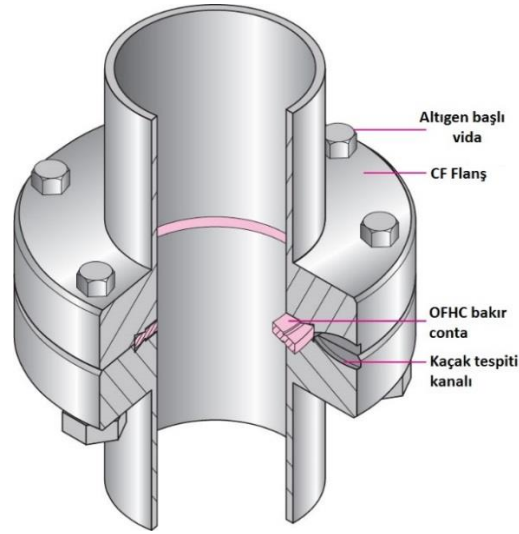


Enjektör hattı şekil 4.1’de görüldüğü gibi elektron tabancasını (e-Gun) da içermektedir ve birinci süperiletken hızlandırıcıya (Linac-I) kadar kısımlardan oluşmaktadır. Demet hattı paslanmaz çelik vakum kazanlarından oluşmaktadır. Demet hattı tasarımına göre çeşitli portlar taşıyan bu kazanlar çeşitli demet diyagnostiği ve demet dinamiği araçları ile bir araya gelerek kapalı bir hacim oluşturmaktadırlar.

Hat üzerinde üç adet 150 l/s pompalama hızına ve bir adet 55 l/s pompalama hızına sahip toplam dört adet iyon pompası kullanılmaktadır. Bunun haricinde hat üzerinde çeşitli bölgelerde vakum seviyesini okuyabilmek için üç adet soğuk katot (cold cathode) ve iki adet sıcak katot (hot cathode) kullanılmaktadır.

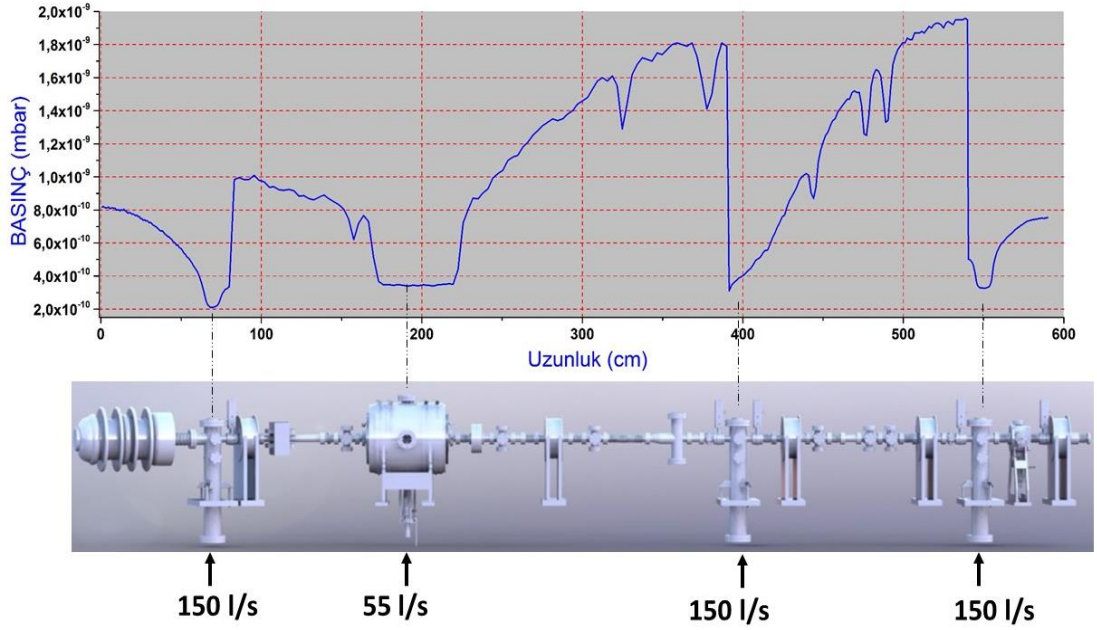
Hat üzerinde dört adet pnömatik valf (pneumatic valve) mevcuttur. Vakum pompalarında, katotlarda, flanşlarda olabilecek bir arızada vakumun kırılması ve atmosfer ortamına açılması gerekebilir. Bunun için bütün sistemi atmosfere açmak yerine arızanın bulunduğu kısmı atmosfere açılması sistemi tekrar vakum altına almayı kolaylaştırır ve zamandan kazanç sağlar. Bunun için hava ile uzaktan kontrollü pnömatik valfler kullanılmaktadır.

Hat boyunca CF tipi flanş (Şekil 4.2) ve OFHC (Oxygen-free high thermal conductivity) tipi bakır contalar kullanılmaktadır. Elektron tabancası çıkış portu CF DN63 flanş tipinde iken diğer tüm hat CF DN40 flanş tipindedir



Şekil 4.2 CF Flanşın şematik olarak kesit görünümü (Anonymous 2017h)

Şekil 4.3’de enjektör hattının üç boyutlu olarak yapılan çizimin görüntüsü verilmiştir (Aksoy ve Özkorucuklu 2011). Sistem pnömatik valflerle 5 ayrı bölmeye ayrılmıştır. Ayrıca kullanılan iyon pompalarının yerleri ve pompalama hızları şekilde gösterilmiştir. Sistemin vakum dağılımını belirlemek için Molflow+ ile vakum simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon yapılmadan önce hat üzerindeki magnetler ve flanşlar çıkarılmıştır böylece sistem daha basit hale getirilmiştir. Demet hattı paslanmaz çelikten oluştuğu için vakum kazanlarının ve flanşların gerekli temizleme işlemlerinin ve gaz giderme yönteminin uygulanmasından sonra gaz salınım oranı 5×10^{-12} mbar olarak seçilmiştir. Simülasyon sonucundan elde edilen basınç dağılımı şekil 4.3’de enjektör hattının üst kısmında gösterilmiştir.

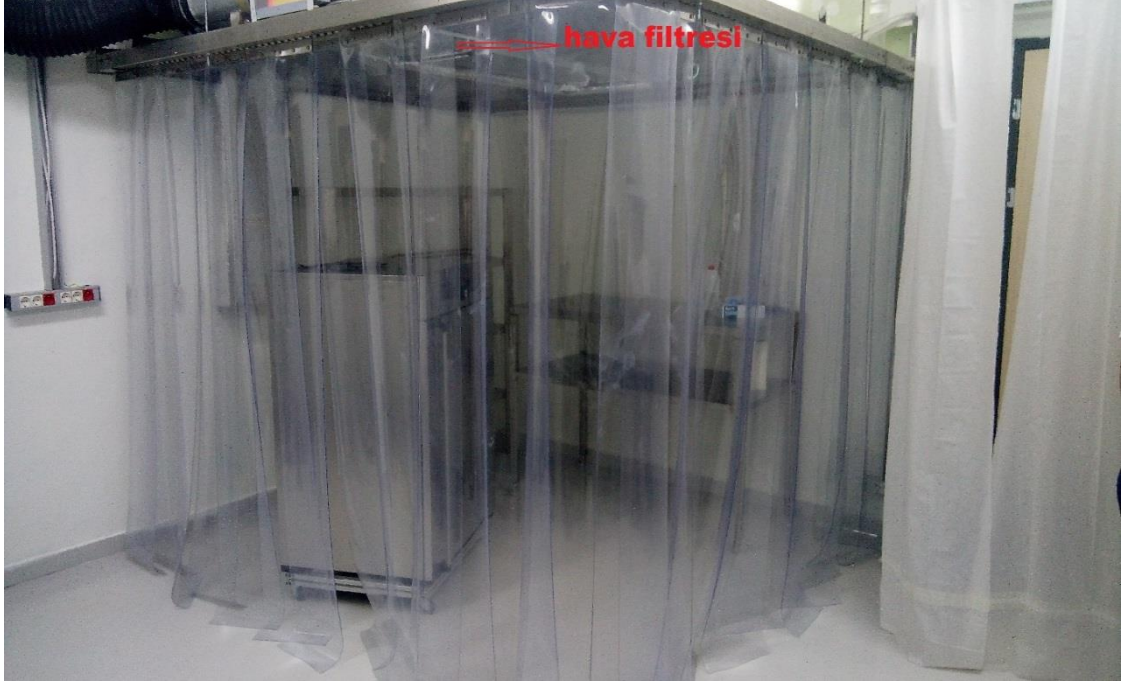


Şekil 4.3 Enjektör hattı vakum simülasyon sonuçlarından elde edilen basınç dağılımı

Demet hattı üzerinde vakuma alma işlemi 3 kademeli olarak yapılacaktır. $10^{+3} - 10^{-3}$ mbar arası bölge mekanik pompa ile sağlanır. TARLA tesisinde mekanik pompa olarak döner tip yağsız pompalar kullanılmaktadır. $10^{-3} - 10^{-6}$ mbar arası bölgede turbo moleküler pompa (TMP) kullanılmaktadır. Tesis genelinde, sürekli çalışacak olan TMP'ler mag-lev tipi (elektromıknatıslı), devreden çıkartılacak olan TMP'ler seramik yataklı olarak seçilmiştir. $10^{-6} - 10^{-10}$ mbar bölgesinde iyon pompaları kullanılacaktır. Aynı bölgede iyon pompalarının üzerindeki yükü azaltmak için buharlaşmasız toplayıcı tipi (non-evaporable getter, NEG) pompalar yardımcı eleman olarak devrede olacaktır. Mekanik ve turbo moleküler pompalar, iyon pompalarının yüklenmesinden sonra görevini tamamlamış olacağı için devreden çıkartılabilir.

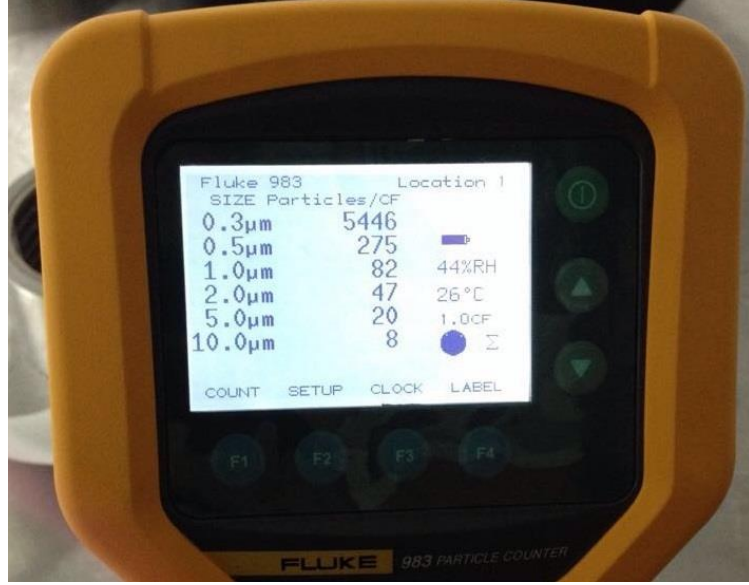
4.2 TARLA Tesisi Temiz Oda Sistemi

TARLA tesisinde Class100 standartlarında temiz oda kurulmaktadır. Ancak TARLA ekibi tarafından bu çalışmaların yapıldığı dönemde vakum ihtiyacını karşılamak, vakum flanşlarının ve kazanlarının temizlenmesi ve paketlenmesi için bir temiz oda kurulumu yapılmıştır. Şekil 4.4'de temiz oda kısmı görülmektedir. Oda içerisinde hava dolaşımını sağlaması için tavanda hava filtresi bulunmaktadır.



Şekil 4.4 TARLA Tesisi temiz oda

Parçacık hızlandırıcılarında temiz oda standartları ISO 5 sınıfında olmalıdır. Yani ft^3 hacim içerisinde $0,3 \mu\text{m}$ boyutundaki partiküllerin sayısı maksimum 300 olmalıdır. TARLA ekibi tarafından kurulan temiz odada partikül sayacı ile ortamdaki partiküllerin sayımı yapılmıştır. Yapılan sayım bir ft^3 hacim başınadır. Şekil 4.5’de partikül sayacının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.5 Partikül sayacıdan alınan sonuçlar

Şekil 4.5’de görüldüğü gibi 0,3 µm boyutundaki partiküllerin sayısı 5446’dır. ft³ hacmi başına ölçüm alındığı için çizelge 2.5’de verilen Federal Standart 209 E standartlarına göre sınıflandırma yapılabilir. Çizelge 2.6 incelendiğinde, Class1000 veya ISO-6 standartlarına yaklaşıldığı görülmektedir. Bu temiz odada yapılan bir önceki vakum çalışmalarında basınç değeri 10⁻¹² mbar değeri yakalanmıştır ve yapılan bu çalışmanın sonuçları Balkan Physics Letters dergisinde yayınlanmıştır (Coşgun vd. 2016).

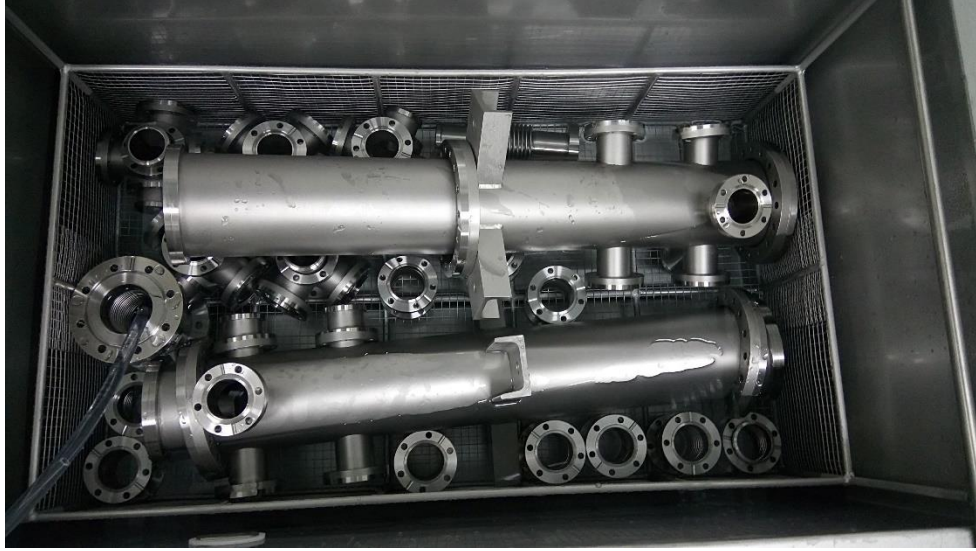
4.3 Vakum Flanşlarının, Borularının ve Kazanlarının Hazırlanması

Vakum ekipmanları kullanılmadan önce daha iyi bir vakum seviyesine erişebilmek için olabildiğince temiz olmasına dikkat edilmelidir. Bunun için bu malzemeler önce su ile yıkanılmış daha sonra fırın içerisinde kurutulmuştur. Yıkama ve kurutma işlemleri şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

Yıkama öncesinde kalsiyum, sodyum ve iyot gibi iyonların de-iyonize edilerek saf su (deionized water (DI)) elde edilmiştir. Bunun için saf su arıtma cihazı kullanılmıştır. Suyun elektriksel iletkenliğini içerisindeki iyonlar sağladığı için elde edilen de-iyonize suyun zayıf bir elektriksel iletkenliği vardır ve öz direnci 18,2 Mohm değerindedir.

Özdirenç değeri deniz sularında 100-20 ohm arasında, şehir şebekelerinde ise 10000-1000 ohm arasında değişmektedir (Anonymous 2017).

DI su elde edildikten sonra vakum bileşenleri ile birlikte ultrasonik temizleyiciye transfer edilir. Şekil 4.6'da ultrasonik temizleyici içerisindeki DI su içinde bulunan vakum elemanları görülmektedir. Ultrasonik temizleyicide 65 °C'ye kadar ısıtılan suda uygulanan işlem 15 dakikadır. Eğer vakum malzemeleri yağ bazlı ise endüstriyel deterjan kullanılır ve temizleyicide iki defa yıkama işlemi uygulanır. Paslanmaz çelik için kullanılan deterjan Decon-190 (% 95 etanol ve % 5 su) deterjanıdır.



Şekil 4.6 Ultrasonik temizleyici içerisinde vakum elemanları

Yıkama işleminden sonra vakum bileşenleri bir fırın yardımı ile kurutulmuştur. 85 °C'ye kadar ısıtılan fırın içerisinde kurutma süresi 60 dakikadır. Kurutulan vakum bileşenleri eğer kısa bir süre içerisinde kullanılmayacaksa paketlenir ve paketleme işlemi sırasında kuru azot kullanılır.

Vakum kurulumu olabildiğince hızlı bir şekilde temiz oda içerisinde hava filtresinin altında yapılmalıdır.

Temizleme ve kurutma işlemleri sırasında malzemelere çıplak el ile dokunulmamalıdır, nitril eldiven kullanılmalıdır.

TARLA Tesisinde temiz oda kurulumundan sonra kurulan vakum deney düzeneği şekil-4.7'de görülmektedir. Bütün vakum flanşları, boruları birleştirilmeden önce ultrasonik temizleyicide temizlenmiş ve vakum fırınında kurutulmuştur. Bütün flanşlar CF standardındadır. Flanşlar vakum borularına bağlanmadan önce izopropil alkol ile temizlenmiş ve kuru azot ile kurutulmuştur.



Şekil 4.7 Vakum deney düzeneğinin görünümü

Deney düzeneğinde kullanılan vakum kazanları, boruları ve flanşları çizelge 4.1'de verilmektedir. Bütün parçalar CF standartlarındadır.

Çizelge 4.1 Kullanılan vakum elemanları ve adetleri

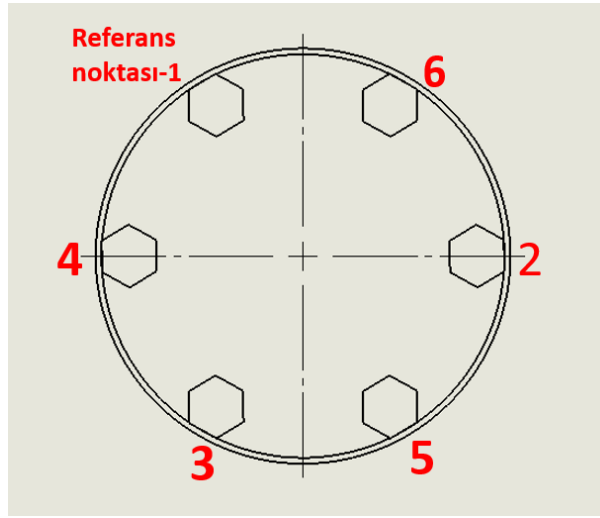
DN100-DN40 kazan	2 adet
DN60-DN40 altılı port	2 adet
Vakum borusu	1 adet (10cm) 1 adet (15cm) 2 adet (20 cm) 1 adet (30cm)
Vakum flanşları	1 adet kör DN100 3 adet kör DN63 2 adet kör DN40 3 adet DN40-DN63 dönüştürücü

Bunlar haricinde deney düzeneğinde kullanılan vakum cihazları çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Deney düzeneğinde bulunan vakum aletleri ve özellikleri

Cihaz	Marka-model	Özellikleri
Buharlaşmayan Tutucu (NEG)	SAES-CapaciTorr D400-2	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Alaşımı: St-172</i> • <i>Isıtıcısı: Tungsten</i> • <i>Aktivasyon zamanı: 16 V gerilimde 60 dakika</i>
Artık Gaz Analizörü	Extorr-XT200	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ölçüm aralığı: 1 ile 200 akb</i> • <i>Minimum çalışma basıncı: 10^{-3} torr</i> • <i>Ölçebileceği minimum kısmi basınç değeri: 10^{-11} torr</i>
Soğuk katot	Kurt J. Lesker company-423 series	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Basınç ölçüm aralığı: 10^{-11} ile 10^{-2} mbar</i>
Sıcak katot	Arun Microelectronics-AIG17G	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bayard-Alpert Ion Gauge</i> • <i>Basınç ölçüm aralığı: 3×10^{-11} ile 1×10^{-3} mbar</i>
İyon pompası	Gamma Vacuum-150TV	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Pompa ağırlığı: 36 kg</i> • <i>Minimum çalışma basıncı: 10^{-3} mbar</i> • <i>Ömrü: 50000 saat/10^{-6} mbar</i>
Mekanik pompa	Edwards-XDS100	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ölçüm aralığı: $1 \text{ atm} - 10^{-3}$ mbar</i>
Turbo Moleküler Pompa	Edwards	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Ölçüm aralığı: 10^{-3} ile 10^{-8} mbar</i>
Valf		<ul style="list-style-type: none"> • <i>2 adet- vakum bölmelendirilmesi için</i>

Vakum borularını, flanşları, kazanları birbirine birleştirmek için metrik vidalar kullanılmıştır. Vidaları sıkılamak için tork anahtarı kullanılmıştır ve sıkılama işlemi kademeli olarak yapılmıştır. Tork anahtarı cıvata, somun gibi cisimlerin istenilen basınçta sıkılığını kontrol eden ölçü aletidir ve cıvataların, somunların sıkma derecesini belirler. Eğer somun çok sıkılırsa cıvata kırabilir veya dişleri yalama olabilir. Bu uygun değeri sağlamak için tork anahtarı kullanılır. Bir diğer sebebi ise sıkılama sırasında parçalar arasındaki oluşabilecek kasıntıyı olabildiğince minimum seviyeye indirmektir. Kademeli sıkılama prosedürü şekil 4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.8 Kademeli sıkılama prosedürü

Kademeli sıkılama için önce bir tane için referans noktası seçilir. Şekil 4.8’de gösterildiği gibi sıraya göre (1-2-3-4-5-6) sıkılama işlemi yapılır. Tork anahtarında bir tane ayar vidası vardır. Bu vida çevrilerek istenilen tork değerine, anahtar ayarlanabilir. Bu tork değerinden daha yüksek kuvvet uygulandığında anahtardan tık sesi gelecektir. Bu sayede istenilen değerde cıvata sıkılabilir. Sıkılmadan önce, sıkılan vidanın ve somunun tork değeri bilinmelidir. Bunun için oluşturulmuş standart kataloglar mevcuttur.

Kademeli sıkılama işlemi üç farklı tork değerlerinde tekrarlanmıştır. Kullanılan somun ve vidalar metrik-6 ve metrik-8 standartlarındadır. Buna ek olarak bu somun ve

vidaların class-70 ve class-80 tipinde iki farklı türü mevcuttur. Kullanılan vida türü ve tipine göre uygulanabilecek maksimum tork değerleri çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 Vida türlerine maksimum tork değerleri

Vida türleri		
	Class-70	Class-80
Metrik-6 için mak. tork değeri	13 Nm	15 Nm
Metrik-8 için mak. tork değeri	32 Nm	35 Nm

DN-40 flanşlar için metrik-6 ve DN-63, DN-100 flanşlar için ise metrik-8 vidalar kullanılmıştır. Flanşların kalınlığına göre uygun uzunlukta vidalar seçilmiştir. Kademeli sıkılama işlemini 3 farklı tork değerlerinde tekrarlanmıştır.

- Metrik-6 vidalar için 8,10 ve 13 Nm tork değerleri,
- Metrik-8 vidalar için 20,25 ve 28 Nm tork değerleri uygulanmıştır.

Bu işlemler gerçekleştirdikten sonra vakum sisteminin kurulumu tamamlanmıştır. Böylece sistem üzerinde ölçümler alınmaya hazır hale getirilmiştir.

Sistem üzerinde yapılan çalışmalar beş aşamadan oluşmaktadır:

- Aşama:** Sistem yaklaşık olarak üç haftaya yakın bir süre vakum altında tutulmuştur ve kararlı hale gelmesi beklenmiştir. İlk olarak analitik şekilde iletkenlik ve efektif pompalama hızı hesaplanmıştır. Molflow+ programı yardımı ile Monte Carlo metodu kullanılarak sistemin basınç dağılımı gözlemlenmiştir ve elde edilen deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra RGA, iyon pompasının yakınına yerleştirilmiştir ve sistem içerisindeki gazların dağılımı tespit edilmiştir.
- Aşama:** Sistem dışarıdan gaz giderme kabloları ile sarılmış ve 40 saat boyunca 200 °C’de ısıtılmıştır. Bu işlemden sonra RGA ile ölçüm alınmış ve gaz salınımı oranı artacağı için sistemin tekrar simülasyonu yapılmıştır. Ayrıca gaz giderme yönteminin birim basınç değişimdeki etkisi incelenmiştir.

iyon pompası ile aynıdır. Bu değerlerden denklem (2.26)'ya göre nitrojen gazı için iletkenlik hesabı yapılırsa,

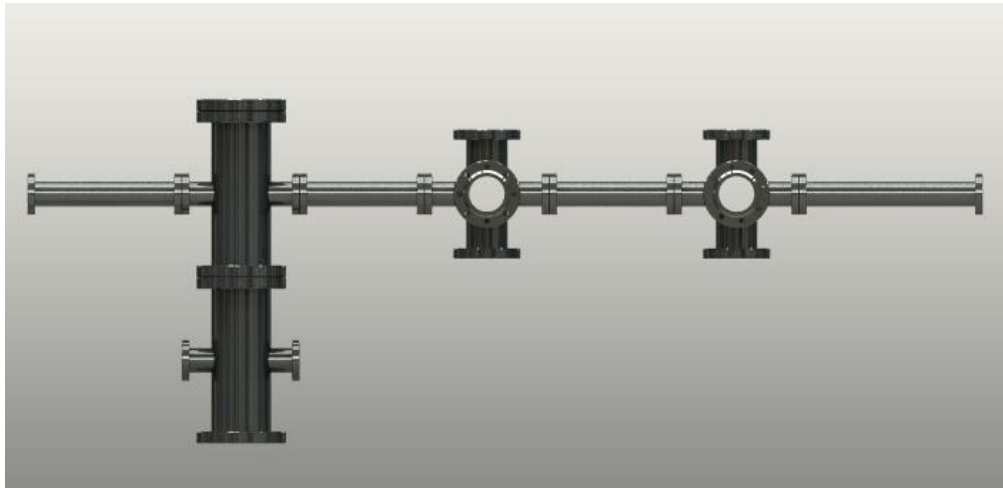
$$C = \frac{12,4D^3}{L} = \frac{12,4(9,76^3)}{30,06} = 38,4l/s$$

olarak bulunur. Denklem (2.29)'dan efektif pompalama hızı bulunabilir. Burada S , üretici tarafından belirlenen iyon pompasının hızıdır ve değeri 150 l/s'dir.

$$S_{eff} = S \cdot \frac{C}{S + C} = \frac{(150) \times (38,4)}{38,4 + 150} = 30,5l/s$$

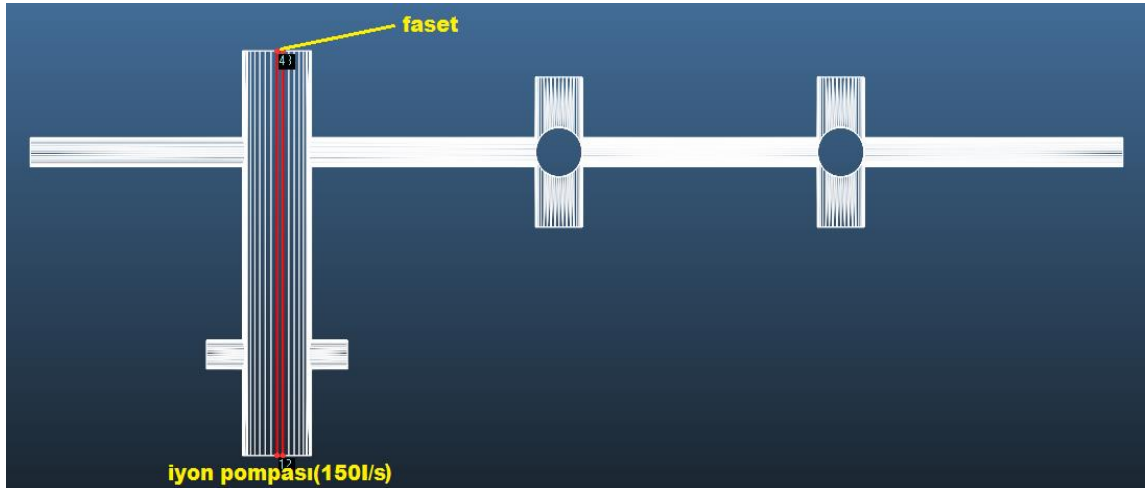
Kullanılan iyon pompası 150 l/s hıza sahip olmasına karşın efektif pompalama hızı 30 l/s olarak bulunmuştur. Bu sonuçtan anlaşılacağı üzere ileri yüksek vakum seviyesine çıkabilmek için kullanılan iyon pompasının hızı fazlasıyla yeterlidir.

Vakum sistemi şekil 4.10'da görüldüğü gibi 3D programı ile çizildi. Yapılan çizim vakum sisteminin ölçüleri ile tamamen aynı boyuttadır. TARLA tesisi temiz odada kurulan vakum sistemi 160 cm uzunluğundadır. Kullanılan malzeme tamamen paslanmaz çelikten oluşmaktadır. Yapılan bu çizim STL formatında kaydedilip vakum simülasyonu için Molflow+ programına aktarılmıştır.



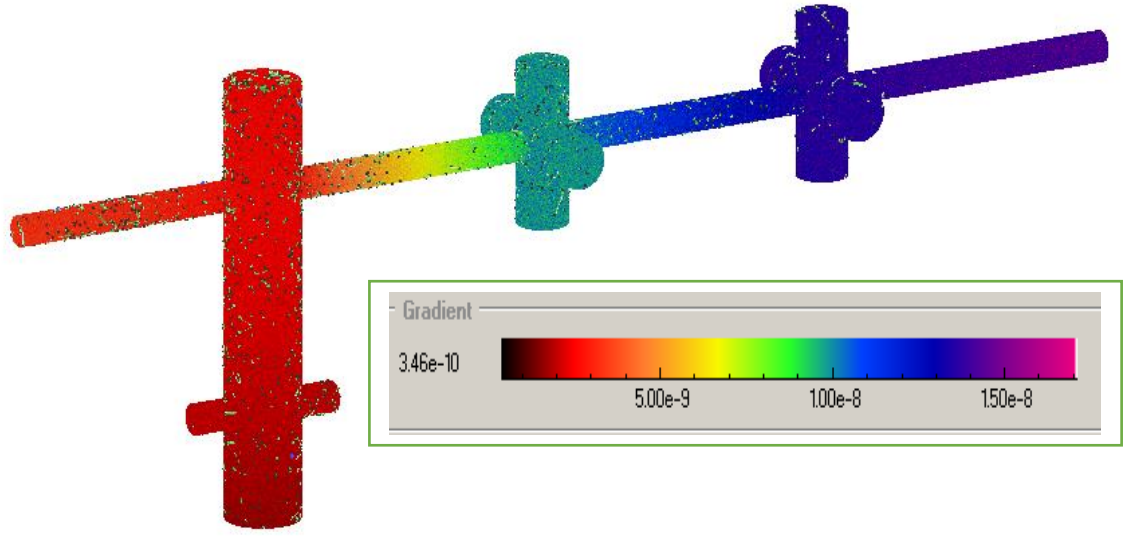
Şekil 4.10 Vakum sisteminin 3D gösterimi

Geometri Molflow+ programına aktarılmadan önce bütün flanşlar, vida yerleri kaldırılmıştır böylece geometri daha basit hale indirilmiştir. Molflow+ bütün sistemi faset adı verdiğimiz düzlemlere ayırmaktadır. Şekil 4.11’de geometri gösterilmektedir. Deneysel düzeneğimizde 150 l/s pompalama hızına sahip iyon pompası kullanılmıştır. Simülasyon için şekil 4.7’de deneysel düzeneğinde olduğu gibi iyon pompası tanımlanmıştır.



Şekil 4.11 Vakum sisteminin Molflow+ arayüzünde, STL formatında gösterimi

Oluşturulan vakum simülasyonu şekil 4.12’deki gibidir. Bütün birleştirilmeden önce ultrasonik temizleyicide yıkanmış ve kurutma fırınında kurutulmuştur. Ancak sisteme herhangi bir ısıtma prosedürü uygulanmamıştır. Bu durumda çelik malzemenin çizelge 2.3’e göre gaz salınımı oranı $5,2 \times 10^{-11}$ mbar.l.s⁻¹cm⁻² değerindedir. Ayrıca sıcaklık değeri oda sıcaklığı (293 K) değerine göre ayarlanmıştır.



Şekil 4.12 Molflow+ simülasyon sonucu

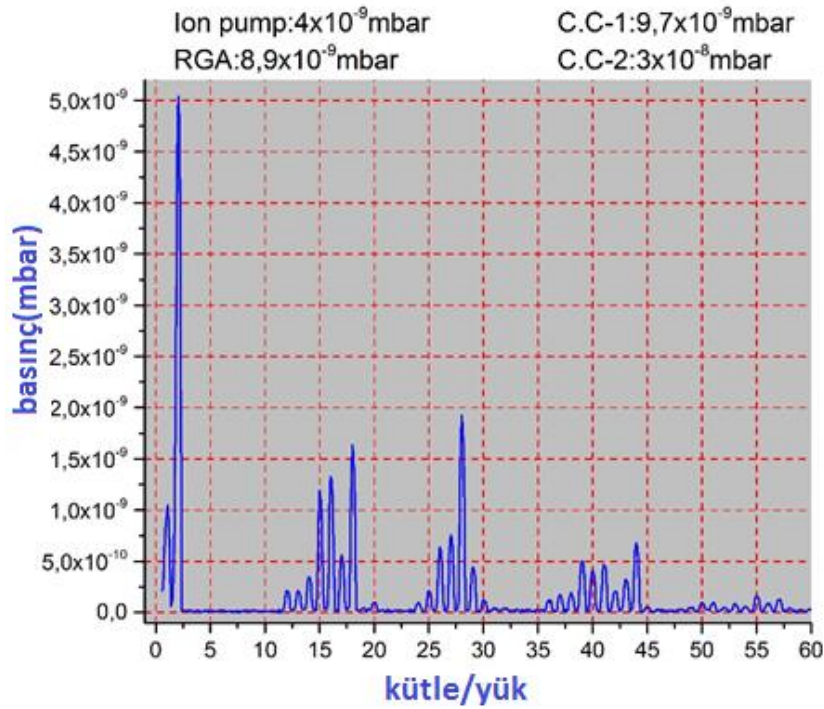
Şekil 4.12 incelenirse basınç değerleri farklılığı renk ölçeğinden anlaşılabilir. Kırmızı bölgeler iyon pompasına yakın bölgelerdir ve basınç değerleri daha düşük seviyededir. Mor bölgeler ise basınç seviyesinin en yüksek olduğu bölgelerdir.

TARLA tesisinde kurulan vakum testi deney düzeneğinde beş farklı vakum ölçeri bulunmaktadır. Bunlar iyon pompası kontrolcüsü, RGA, iki tane eş soğuk katot ve bir adet sıcak katottur. Bu vakum ölçerlerin sistem üzerindeki dağılımları şekil 4.9'da verilmektedir. Sistem üzerinde bulunan NEG pompa bir valf yardımı ile vakumdan ayrı tutulmakta olup deney düzeneğinin iv. aşamasında sisteme dâhil edilmektedir. Ayrıca sıcak katot ile ölçümler v. aşamada verilmiştir.

Sistemin vakum prosedürü şu şekildedir;

- Basınç değeri 10^{+3} mbar (atmosfer basıncı) ile 10^{-3} mbar değerleri arasında mekanik pompa kullanılmıştır.
- 10^{-3} mbar ile 10^{-6} mbar basınç değerleri arası TMP kullanılmıştır.
- 10^{-6} mbar ile daha düşük basınç değerleri arasında ise iyon pompası ile vakumlama yapılmıştır.

Vakum ortamında bulunan gazların varlığını tespit etmek için RGA kullanılmıştır. İlk olarak RGA iyon pompasının yakınına yerleştirmiştir. RGA'nın konumu şekil 4.9'da görülmektedir. Amaç, pompa çevresindeki gazların cinsini ve kısmi basıncını belirlemektir. Elde edilen gaz dağılımı ve vakum ölçütülerden gözlemlenen sonuçlar şekil 4.13'de görülmektedir. Burada C.C-1 (Cold Cathode) ve C.C-2 farklı konumlarda kullandığımız soğuk katotlardır.



Şekil 4.13 Kısımlı basınç değerlerine göre gaz dağılımları

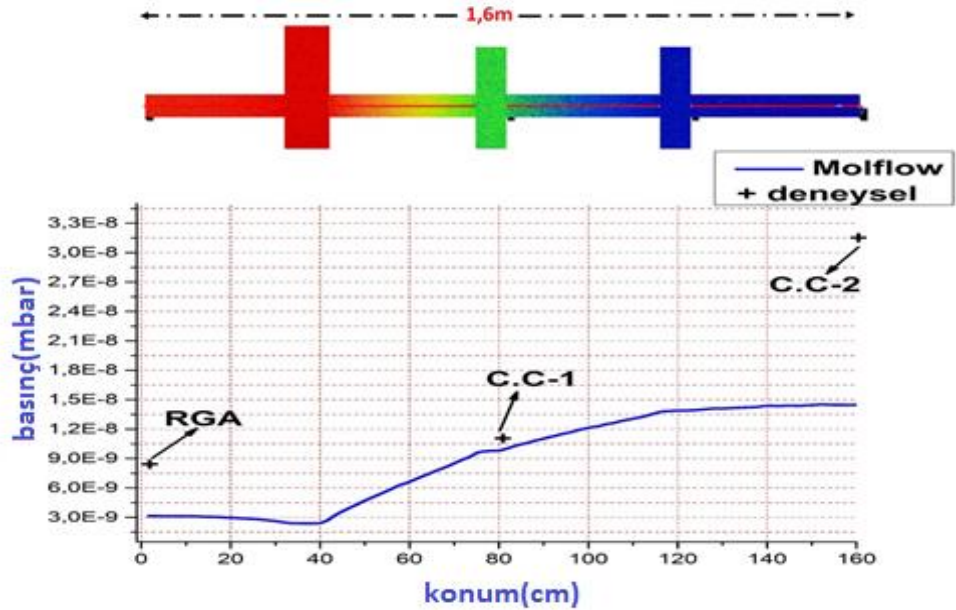
Şekil 4.13'de vakum sistemi içerisindeki gazları türü ve kısmi basıncı görülmektedir. Kısmi basıncı yüksek olan gazın sayısı fazladır. Kütle/yük oranına göre deney düzeneğimizde görülen gaz türleri: 2 hidrojen, 15 ve 16 oksijen türevleri, 18 ve 17 su türevleri, 28 karbon monoksit veya nitrojen, 40 argon, 44 karbondioksit gazlarıdır. Bunlar dışında 14 karbon, 39, 41, 43, 55 yağ türevleri, 45 izopropil alkol şeklindedir. H₂ gazının kısmi basıncı diğer gazlardan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi kullandığımız vakum kazanı paslanmaz çelik olduğu için H₂ gaz salınımı yüksek değerdedir. NEG pompa aktifleştirilerek sisteme dâhil edildiğinde H₂ gazının kısmi basıncının düşmesi beklenmektedir.

Bir diğ er sonuç ise vakum seviyesi pompadan uzaklaştıkça düştüğ ü görülmüştür. Şekil 4.6'da görüldüğ ü gibi pompadan uzaklaştıkça C.C-1 ve C.C-2 vakum değ eri ölçücülerinde daha düşük vakum seviyeleri okunmuştur. C.C-2 ile iyon pompası arası demet hattı mesafesi yaklaşık olarak 1,2 m'dir ve çizelge 4.4'de görüldüğ ü gibi vakum seviyesinde bir mertebeye yakın fark oluşmaktadır.

Çizelge 4.4 Vakum ölçerleri seviyelerinin karşılaştırılması

İyon pompası	C.C-1(soğuk katot)	C.C-2	RGA-toplam basınç
4×10^{-9} mbar	$9,7 \times 10^{-9}$ mbar	3×10^{-8} mbar	$8,9 \times 10^{-9}$ mbar

Molflow+ ile vakum simülasyonu hat boyunca demet hattı ile aynı pozisyonda yapılmıştır ve hat üzerinde bulunan soğuk katotlar ve RGA ile simülasyondan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Vakum profili Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Kırmızı bölgeler iyon pompasına yakın bölgelerdir ve grafikte görüldüğ ü gibi basınç seviyesinin en düşük seviyede olduğ u bölgedir. (+) ile belirtilen deneysel sonuçlardır ve deney düzeneğ inde montaj edildiğ i kısma göre grafikte işaretlenmiştir.



Şekil 4.14 Simülasyon ve deneysel verilerin kısmi basınca göre değ erleri

Çizelge 4.5 Vakum ölçerlerin deneysel veri sonuçları ile simülasyon sonuçları

	İyon pompası	C.C-1	C.C-2	RGA-toplam basınç
Molflow+Simülasyon	$1,3 \times 10^{-9}$ mbar	9×10^{-9} mbar	$1,5 \times 10^{-8}$ mbar	3×10^{-8} mbar
Deneysel veriler	4×10^{-9} mbar	$9,7 \times 10^{-9}$ mbar	3×10^{-8} mbar	$8,9 \times 10^{-9}$ mbar

Çizelge 4.5’de simülasyon değerleri ile deneysel veriler bir arada verilmiştir. Basınç değerlerini incelediğimizde simülasyon değerleri daha düşük çıkmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü Molflow+ programında herhangi bir vakum kaçağı tanımlanmamıştır ve kurulan sistemde flanşlar arasında gerçek kaçaklar ve kullanılan vidalardan dolayı sanal kaçaklar oluşmaktadır.

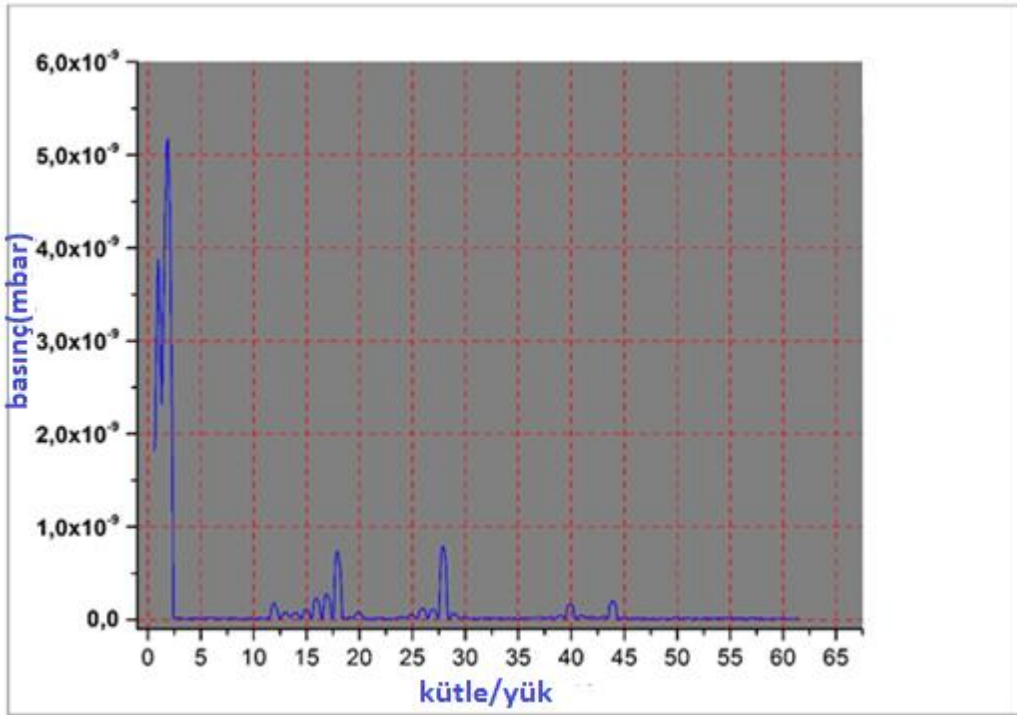
4.5 Gaz giderme Yöntemi ile Sistem Isıtılarak Gaz Salınımı Oranının Arttırılması

İkinci olarak vakum sistemine gaz giderme işlemi uygulandı. Bütün vakum sistemi 40 saat boyunca 200 °C derecede ısıtıldı. Isıtma öncesinde sıcaklıktan dolayı bir zarar görmemesi için iyon pompası, soğuk katotlar kapatılmıştır ve sıcaklıktan dolayı içeride buharlaşan gaz sistemden dışarı atmak için mekanik pompa ve TMP kullanılmıştır. Bu şekilde sistemin gaz salınımı oranının arttırılarak vakum seviyesinin yükseltilmesi amaçlanmıştır. Kontrollü ısıtma için sıcaklık kontrolcüsü kullanılmıştır. Şekil 4.15’de sistem üzerine sarılan gaz giderme kabloları ve battanisi görülmektedir. Kablolar tüm hat boyunca sistem üzerine sarılmaktadır ve sıcaklık seviyesini arttırmak için kablolar, gaz giderme battanisi ile kapatılmıştır.



Şekil 4.15 Gaz giderme için sistem üzerinde kullanılan gaz giderme battaniyesi ve kabloları

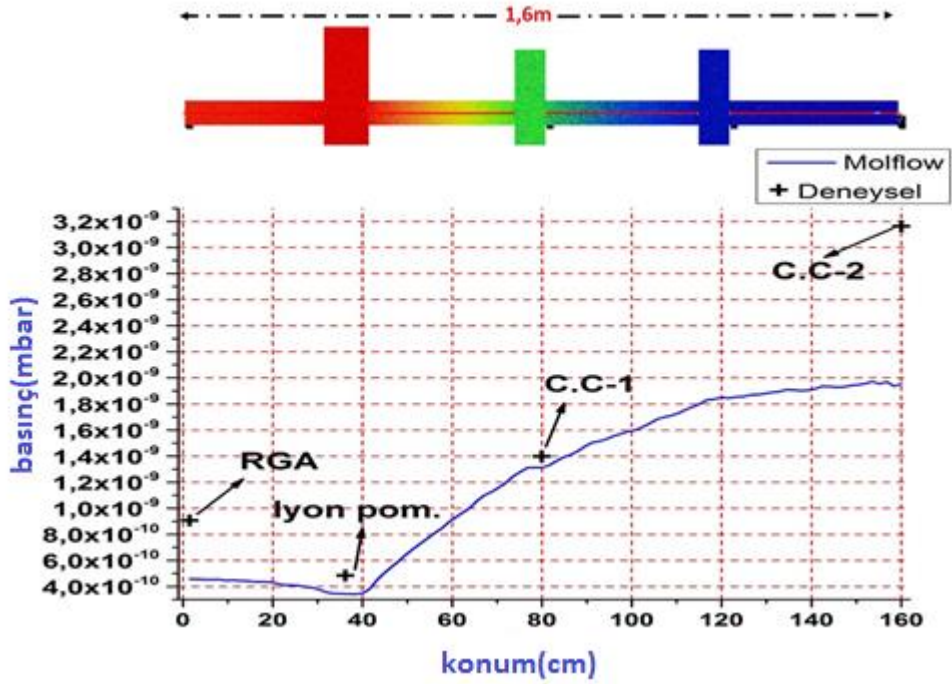
Gaz giderme işleminden sonra sistem içerisindeki gazların dağılımı şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16 Gaz giderme işlemi sonrası gaz dağılımı

Şekil 4.16'ya bakılacak olunursa H₂O pikinin kısmi basıncında düşüş görülmüştür. Yani gaz giderme işlemi sonucunda ortamdaki su moleküllerini buharlaştırarak sistemden dışarı atıldığı anlaşılmaktadır. Bir diğer sonuç ise vakum seviyesinde 1 kademe artma tespit edilmiştir.

Şekil 4.17'de yapılan ölçümlerin simülasyon değerleri ile karşılaştırılması verilmiştir. Bölüm 2'de yer alan çizelge 2.3'e göre. yağdan arındırılmış ve gaz giderme işlemi yapılmış paslanmaz çeliğin gaz salınımı oranı $5,2 \times 10^{-12}$ mbar.l.s⁻¹.cm⁻² değerindedir. Pompa hızı değiştirilmemiştir ve kullanım kılavuzunda verilen iyon pompasının hızı olan 150 l/s değeri kullanılmıştır.



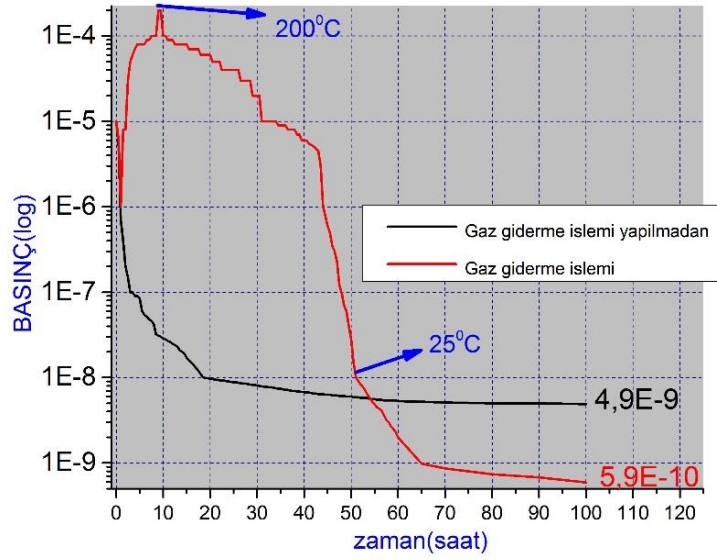
Şekil 4.17 Gaz giderme sonrası simülasyon ve deneysel değerlerin karşılaştırılması

Çizelge 4.6'da Gaz giderme öncesi, gaz giderme sonrası ve elde edilen simülasyon sonuçları bir arada verilmiştir. Sistemin basıncı bir merteye (10^{-9} mbar'dan 10^{-10} mbar'a) düştüğü için bütün vakum ölçerlerinde basınç seviyesinde bir mertebelik düşüş tespit edilmiştir.

Çizelge 4.6 Gaz giderme öncesi ve sonrası değerler ile simülasyon değerleri

	İyon pompası	C.C-1(soğuk katot)	C.C-2	RGA-toplam basınç
<i>Simülasyon değeri</i>	3×10^{-10} mbar	$1,35 \times 10^{-9}$ mbar	$1,9 \times 10^{-9}$ mbar	$4,4 \times 10^{-10}$ mbar
<i>Gaz giderme öncesi</i>	4×10^{-9} mbar	$9,7 \times 10^{-9}$ mbar	3×10^{-8} mbar	$8,9 \times 10^{-9}$ mbar
<i>Gaz giderme sonrası</i>	5×10^{-10} mbar	$1,4 \times 10^{-9}$ mbar	$3,2 \times 10^{-9}$ mbar	$9,2 \times 10^{-10}$ mbar

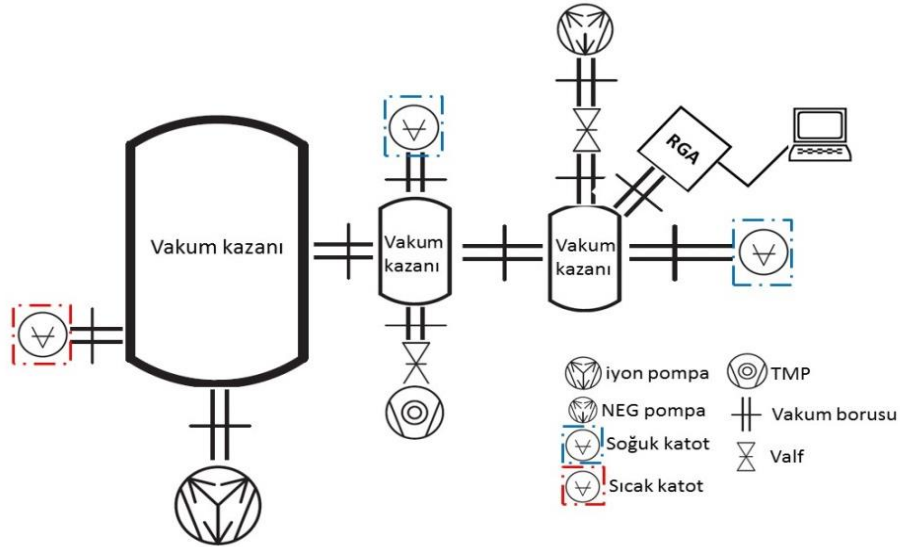
Gaz giderme işlemi sonrası gaz salınım oranı artacağı için basınç değerinin hızlı bir şekilde düşeceği bilinmektedir. Şekil 4.18’de gaz giderme işlemi yapıldıktan sonra basınç değerindeki değişim gösterilmektedir. Gaz giderme yapılmadan önce 100 saat içerisinde basınç seviyesi yaklaşık olarak $4,9 \times 10^{-9}$ mbar seviyesindedir. Gaz giderme yapıldıktan sonra aynı zaman diliminde basınç seviyesi $5,9 \times 10^{-10}$ mbar seviyesine düşürülmüştür. Her iki işlemde yaklaşık olarak 10^{-5} mbar seviyesi referans alınmıştır. Gaz giderme işlemi sırasında sıcaklık arttığında basınç seviyesi yükselmiştir. Şekil 4.18’de gösterildiği gibi sıcaklık 200 °C değerine ulaştığında basınç seviyesi 10^{-4} mbar seviyelerine yükselmiştir. Gaz giderme işlemi bittikten sonra sistemin sıcaklığı oda sıcaklığına düştüğünde istenilen sonuç elde edilmiştir.



Şekil 4.18 Gaz giderme işlemi yapılan (kırmızı) ve yapılmayan (siyah) paslanmaz çeliğin, basıncın logaritmik değerine göre karşılaştırılması

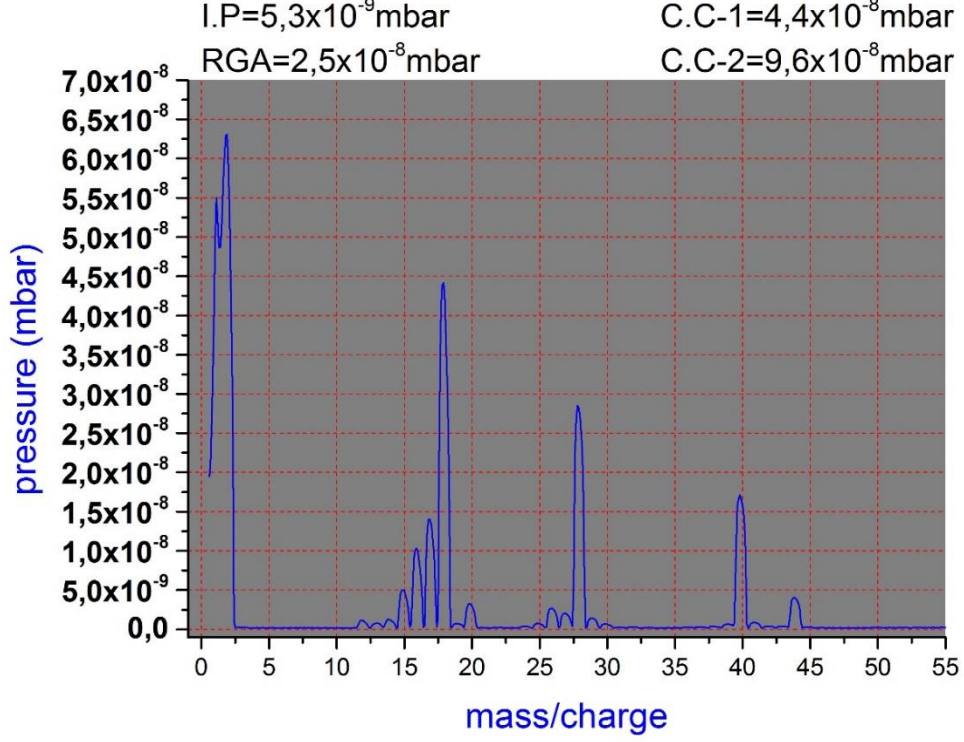
4.6 İyon Pompasından Uzak Bölgede Gaz Dağılımı

Şekil 4.19'da görüldüğü gibi RGA iyon pompasının yakın noktasından söküldü ve daha uzak bir noktaya monte edildi. Sistem atmosfer ortamına açıldığı için paslanmaz çelik malzemelerin gaz salınımı oranı daha yüksek olacaktır.



Şekil 4.19 RGA uzak noktaya alınmış sistemin şematik gösterimi

Sistem dengeye gelene kadar beklenmiş, iyon pompası değeri $5,3 \times 10^{-9}$ mbar değerine geldikten sonra ölçüm alınmıştır. Alınan ölçüm sonucu şekil 4.20'deki gibidir.



Şekil 4.20 RGA uzak noktada iken sistem içerisindeki gaz dağılımı

RGA iyon pompasının yakınında iken ölçülen gaz dağılımı şekil 4.13'de verilmişti. Şekil 4.20'de ise RGA iyon pompasının uzağında yani üçüncü vakum kazanına bağlı iken alınan ölçümler gösterilmektedir. RGA iyon pompasına yakın ve uzak iken H_2 gazı ve H_2O gazı basınçları ve oranları çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.7 Hidrojen ve su gazları kısmi basınçlarının karşılaştırılması

RGA konumu	H_2 gazı kısmi basıncı	H_2O gazı kısmi basıncı	H_2/ H_2O oranı
İyon pompasına yakın	5×10^{-9} mbar	$1,6 \times 10^{-9}$ mbar	3,12
İyon pompasından uzak	$6,3 \times 10^{-8}$ mbar	$4,5 \times 10^{-8}$ mbar	1,4

Çizelge 4.7 incelendiğinde, iyon pompasına yakın iken H_2/H_2O oranı 3,12 iken iyon pompasından uzak bir noktada bu oran 1,4 değerine düşmüştür. İyon pompasından uzaklaştıkça H_2 gazı ve H_2O gazının piklerinin birbirine yaklaştığı tespit edilmiştir. Bu durum iyon pompasının H_2 gazını diğer gazlarla karşılaştırıldığında düşük derecede pompaladığını veya ileri yüksek vakum seviyelerinde çelik malzemeden salınan birincil gazın H_2 olduğunu göstermektedir. Bu iki grafikten çıkarılacak diğer sonuç ise vakum sisteminde basınç dağılımının homojen olmadığıdır. Homojenliği arttırmak ve iyon pompasına yardımcı olması için NEG pompa kullanılmıştır.

4.7 NEG Pompanın Sisteme Dâhil Edilmesi ve Karakterizasyonun İncelenmesi

RGA ile vakum ortamında bulunan gazların varlığı ve kısmi basıncı belirlenirken H_2 gazının kısmi basıncı diğer gazların kısmi basıncından daha yüksek bir seviyede olduğu anlaşılmıştır. Vakum seviyesini yükseltmek için özellikle H_2 için etkili bir pompalama hızına sahip NEG pompa kullanılmıştır. Kullanılan NEG pompanın özellikleri çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8 Kullanılan NEG pompanın özellikleri

Alaşım tipi	St172	
Alaşım karışımı	Zr-V-Fe	
Kartuş kütlesi (g)	45	
Kartuş yüzeyi (cm ²)	380	
Pompalama hızı (l/s)	H_2	400
	CO	180
Soğurma kapasitesi (torr.l)	H_2	900
	CO	400

NEG pompanın kullanılabilmesi için aktifleştirilmesi gerekmektedir. Aktifleştirme işlemi şu şekilde yapılmaktadır:

Vakum ortamında bulunan NEG pompaya bir güç kaynağı bağlanır ve belli bir gerilim verilir. Kullanılan St-172 alaşımlı kartuş için üretici firma tarafından tavsiye edilen gerilim değeri **16 V** değerindedir. Bu gerilim değeri **1 saat** boyunca uygulanınca

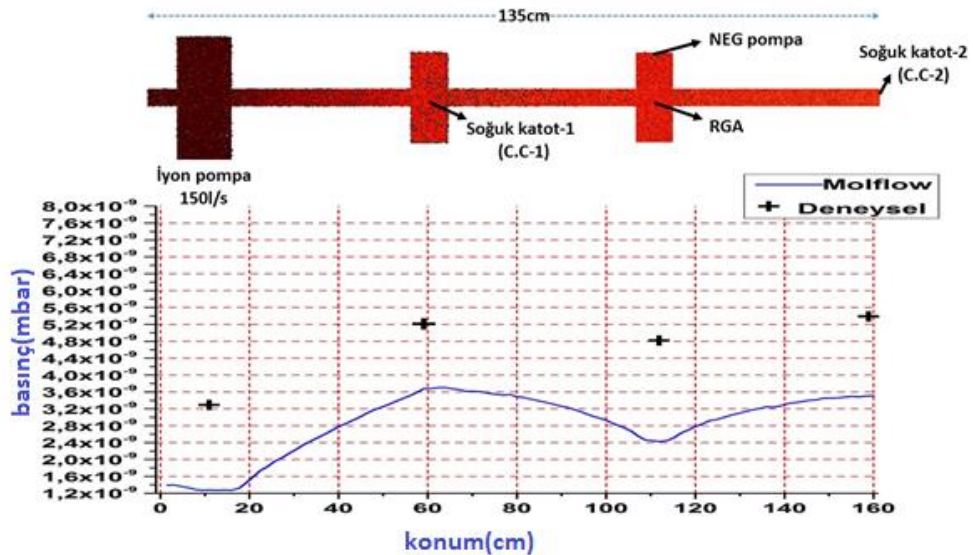
sıcaklık $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ değerine ulaşmaktadır. Bu işlem sonrasında NEG pompa aktifleştirilmiş olur ve pompalama yapabilir.

Dikkat edilmesi gereken hususlar:

- Uygulanılacak gerilim maksimum 18 V olmalıdır.
- Aktivasyon işlemi sırasında ortamın basıncı minimum 10^{-4} mbar olmalıdır. Bu yüzden aktivasyon işlemi sırasında TMP çalışır durumda ve basınç değerinin 10^{-6} mbar seviyesinin altına düşme ihtimalinden dolayı iyon pompası kapatılmıştır.

Bu işlem sırasında kullanılan NEG pompa, RGA, iyon pompası ve soğuk katotların deney düzeneğindeki konumları şekil 4.19'da gösterilmiştir.

Sistemin simülasyonu şu şekildedir: sistem üzerinde gaz giderme işlemi uygulanmadığı için gaz salınımı oranı 5×10^{-11} mbar.l.s⁻¹cm⁻² olarak belirlenmiştir. İyon pompasının hızı deney sırasında kullandığımız pompanın hızı olan 150 l/s olarak belirlenmiştir. NEG pompanın pompalama hızı 50 l/s olarak belirlenmiştir. Elde edilen simülasyon sonucu şekil 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.21 NEG pompa sisteme dahil edildikten sonra simülasyon ve deneysel verilerin sonuçları

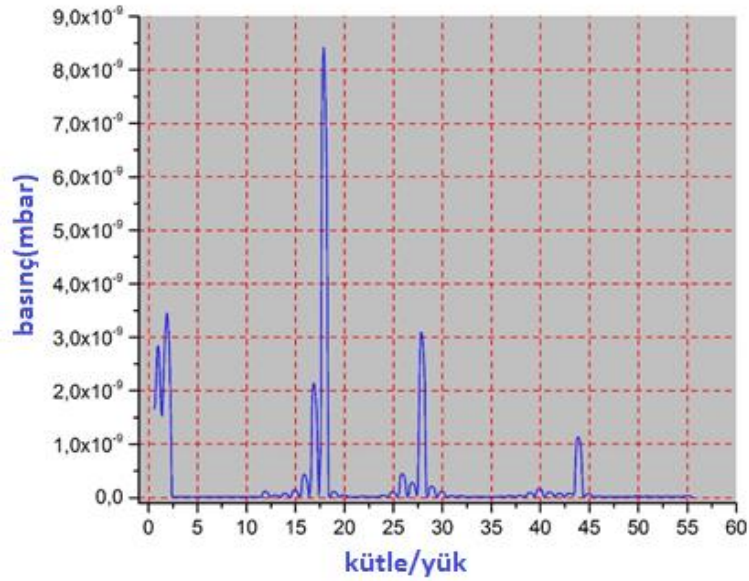
Şekil 4.18’de görüldüğü gibi sistemin uzunluğu 160 cm’den 135 cm değerine düşürülmüştür. NEG pompa aktifleştirildikten sonra sistemin vakum dağılımı biraz daha homojen hale geldi. Simülasyon sonuçlarından ve deneysel verilerden elde edilen sonuçlar çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9 NEG pompa aktif iken verilerin kıyaslanması

	İyon pompası	RGA	C.C-1	C.C-2
Simülasyon sonuçları	$1,3 \times 10^{-9}$ mbar	$2,4 \times 10^{-9}$ mbar	$3,6 \times 10^{-9}$ mbar	$3,6 \times 10^{-9}$ mbar
Deneysel veriler	$3,3 \times 10^{-9}$ mbar	$4,8 \times 10^{-9}$ mbar	$5,2 \times 10^{-9}$ mbar	$5,3 \times 10^{-9}$ mbar

NEG pompa kullanılmadan önce C.C-1/C.C-2 oranı $9,6 \times 10^{-8}$ mbar/ $4,4 \times 10^{-8}$ mbar = 2,18 değerindeydi. NEG pompa aktifleştirildikten sonra C.C-1/C.C-2 oranı $5,2 \times 10^{-9}$ mbar/ $5,3 \times 10^{-9}$ mbar = 0,98 değerine düşmüştür. Bir diğer gözlemlenen sonuç ise RGA toplam basıncı, C.C-1 ve C.C-2 katotların basınç değerleri, iyon pompasının basınç değerine yaklaşmasıdır.

NEG pompa aktifleştirildikten sonra sistemdeki gaz dağılımı şekil 4.22’de verilmiştir.

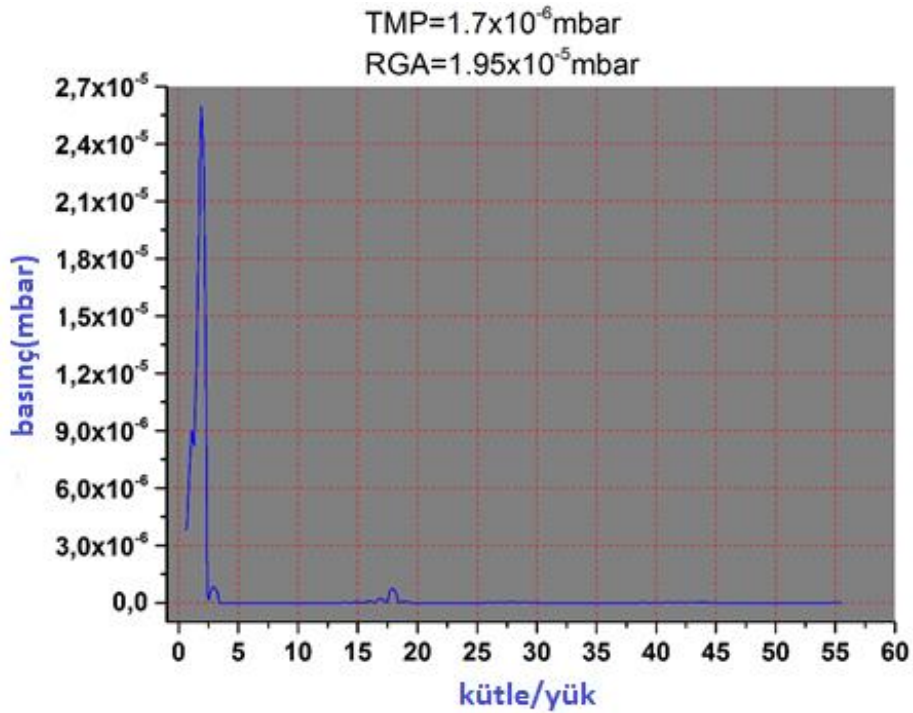


Şekil 4.22 NEG pompa sonrası sistemdeki gaz dağılımı

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi H₂ gazının kısmi basıncı H₂O gazının kısmi basıncından daha düşük seviyeye inmiştir. Aynı şekilde kütle/yük-28 (CO ve N₂) gazının kısmi basıncındaki düşüş gözlemlenmiştir.

Böylece NEG pompa kullanımından sonra çıkarılan iki sonuç şu şekildedir. Vakum sistemindeki basınç seviyesi düşürülmüştür. İkincisi ise ortamdaki özellikle H₂ gazının ve CO gazının kısmi basınçlarındaki düşüş gözlemlenmiştir.

Bir diğer gözlemlenen deney süreci NEG pompanın ikinci defa aktif edilmesi sürecidir. RGA’nın ve diğer vakum ölçücülerin sistem üzerindeki yerleri değiştirilirken vakum sistemi bozulmak zorunda kaldı bu yüzden NEG pompa atmosfer ortamına maruz kaldı. Bu gibi durumlarda NEG pompanın tekrar aktif edilmesi gerekmektedir. NEG pompa aktif edilirken kartuşunda bulunan H₂ moleküllerini vakum ortamında geri salmaktadır. Bu bilgiyi doğrulamak amacıyla için RGA sistem içerisinde NEG pompa yakınına yerleştirilmiştir. Şekil 4.23’de görüldüğü gibi NEG pompa aktif edilirken ölçüm alınmıştır.



Şekil 4.23 NEG pompa re-aktivasyon süreci

Şekil 4.23’de görüldüğü gibi NEG pompa aktifleştirilmesi sürecinde H₂ gazının piki diğer gazların pikinden oldukça yüksek bir seviyededir. Bu sonuçtan aktifleştirme sürecinde NEG pompanın H₂ gazını ortama saldığı gözlemlenmiştir.

4.8 Sıcak Katotun Sisteme Dahil Edilmesi ve Vakuma Etkisi

Bir diğer vakum değeri ölçücüsü sıcak katottur. Sıcak katot üzerinde bir filaman olduğu için sistemin sıcaklığını arttırmaktadır. Ayrıca sıcak katot gaz salınım oranına katkı vermektedir ve vakum seviyesini düşürmektedir. Bu yüzden sıcak katot olabildiğince iyon pompasına yakın yerleştirilmelidir. Çizelge 4.10’da sıcak katot çalışırken vakum seviyesine etkisini göstermektedir.

Çizelge 4.10 Sıcak katotun vakum seviyesine etkisi

	İyon pompası basınç seviyesi	Sıcak katot basınç seviyesi
Sıcak katot çalışmıyor	$4,5 \times 10^{-9}$ mbar	-
Sıcak katot çalışmaya başladığında	2×10^{-8} mbar	6×10^{-7} mbar
Sıcak katot çalışmaya başladıktan 1 saat sonra	$4,4 \times 10^{-9}$ mbar	$1,2 \times 10^{-8}$ mbar

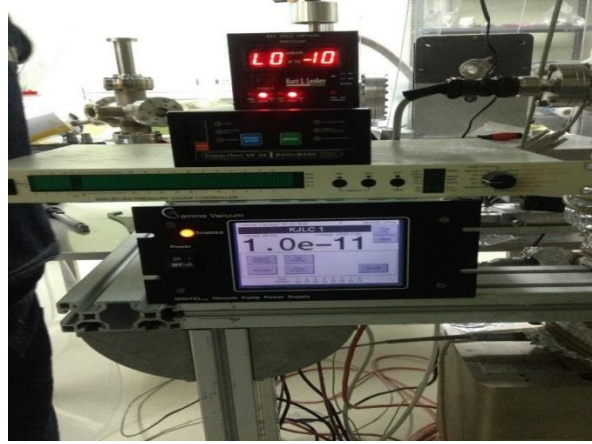
Çizelge 4.10 incelendiğinde, sıcak katot çalışmaya başladığında vakum seviyesi 10^{-9} mbar seviyesinden 10^{-8} mbar seviyelerine düşmüştür. 1 saat sonra sistemin vakum değeri eski seviyesine geri dönmüştür.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında TARLA enjektör hattı için gerekli olan 10^{-10} mbar vakum seviyesine ulaşmak için yapılan vakum tasarımı ve çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bunun için bir vakum deney düzeneği oluşturulmuş ve yapılan vakum çalışmaları ve kazanılan tecrübe ile enjektör hattı başta olmak üzere tüm demet hattı için uygulanacak vakum prosedürleri konusunda deneyim edinilmiştir.

Bütün kazanlar, vakum boruları ve flanşlar CF standartlarında seçilmiştir, CF flaşların gaz kaçağı oranı yaklaşık olarak 10^{-11} mbar.l/s mertebesinde ve bu oran 10^{-10} mbar seviyesine çıkılabildiğini sağlamıştır.

Vakum malzemelerinin mekanik olarak birleştirilmesi için temiz odaya ihtiyaç duyulmaktadır. TARLA ekibi tarafından temiz oda kurulumu yapılmış ve yapılan ölçümlerde ISO-6 standartları yakalanmıştır. Bu temiz odada, bir önceki deney düzeneğinde 10^{-11} mbar seviyesi yakalanmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 İleri yüksek vakum deney düzeneğinde iyon pompası vakum ölçeri değeri

Kullanılan iyon pompasının hızı 150 l/s'dir. Analitik olarak hesaplama yapılmış ve efektif pompalama hızı 30,5 l/s olarak bulunmuştur. Sistem üzerindeki basınç dağılımını analitik olarak hesaplamak pek mümkün değildir. Bunun için Monte Carlo

hesaplamaları yapan Molflow+ programı kullanılarak basınç dağılımı hesaplanmış ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Kurulan deney düzeneğinde demet hattı DN-40 ölçülerindedir ve uzunluğu 160 cm olarak belirlenmiştir. Kurulan sistemde 5 tane vakum ölçeri kullanılmıştır bundan ikisi soğuk katot, bir tane sıcak katot, iyon pompası vakum ölçeri ve RGA vakum ölçeridir. Soğuk katotlardan bir tanesi sistemin en uç noktasına yerleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1 Deneysel veriler ve simülasyon sonuçları

	İyon pompası	C.C-1	C.C-2	RGA-toplam basınç
Molflow+ simülasyon	$1,3 \times 10^{-9}$ mbar	9×10^{-9} mbar	$1,5 \times 10^{-8}$ mbar	3×10^{-8} mbar
Deneysel veriler	4×10^{-9} mbar	$9,7 \times 10^{-9}$ mbar	3×10^{-8} mbar	$8,9 \times 10^{-9}$ mbar

İyon pompası ile C.C-2 arası uzaklık yaklaşık olarak 120 cm mertebesindedir. Çizelge 5.1'e göre iyon pompası basınç değeri 4×10^{-9} mbar iken C.C-2 basıncı 3×10^{-8} mbar seviyesindedir. Bu iki ölçer arasında yaklaşık bir mertebelik fark olduğu görülmektedir. Bu özellik parçacık hızlandırıcılarında vakum sistemi kurulurken dikkat edilmesi gereken bir sonuçtur. Sistem içerisinde vakum değerinin değişken olduğu görülmektedir. Simülasyon sonuçları ile deneysel veriler kıyaslandığında aynı mertebede olduğu, küçük farkların olduğu görülmektedir. İyon pompası için deneysel değer 4×10^{-9} mbar seviyesinde iken simülasyon sonucu $1,3 \times 10^{-9}$ mbar değerindedir. Bunun sebebi sitem içerisindeki vakum kaçaklarıdır.

RGA ile vakum içerisindeki gazların varlığı tespit edilmiştir. H₂ gazının kısmi basıncı diğer gazlara göre daha yüksek mertebededir. Bunun temel sebebi ileri yüksek vakum seviyelerinde paslanmaz çelikten ortama salınan temel gaz hidrojenidir. Ayrıca H₂O, N₂ ve O₂ gazlarının kısmi basınçları yüksek seviyelerdedir (Şekil 4.12).

Ortamdaki H₂O gazını kaldırmak için gaz giderme ile sistem 40 saat boyunca 200 °C’de ısıtılmıştır. Böylece kısmi basınç ölçümlerinde su moleküllerinin başarılı bir şekilde ortamdaki uzaklaştırıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca vakum seviyesi 10⁻⁹ mbar seviyesinden 10⁻¹⁰ mbar seviyesine yükselmiştir (Çizelge 5.2). Bunun yanında gaz salınım oranı arttığı için istenilen basınç seviyesine daha hızlı bir şekilde ulaşılmıştır.

Çizelge 5.2 Gaz giderme işlemi öncesi ve sonrası basınç değerleri

	İyon pompası	C.C-1(soğuk katot)	C.C-2	RGA-toplam basınç
Simülasyon sonuçları	3x10 ⁻¹⁰ mbar	1,35x10 ⁻⁹ mbar	1,9x10 ⁻⁹ mbar	4,4x10 ⁻¹⁰ mbar
Gaz giderme öncesi	4x10 ⁻⁹ mbar	9,7x10 ⁻⁹ mbar	3x10 ⁻⁸ mbar	8.9x10 ⁻⁹ mbar
Gaz giderme sonrası	5x10 ⁻¹⁰ mbar	1,4x10 ⁻⁹ mbar	3,2x10 ⁻⁹ mbar	9,2x10 ⁻¹⁰ mbar

İyon pompasına yardımcı bir pompa olan ve H₂ pompalama hızı oldukça yüksek olan NEG pompa incelenmesi yapılmıştır. NEG pompa sistem içerisine direk olarak yerleştirilmiştir. NEG pompanın sisteme dahil edilmesi ile H₂ kısmi basıncı düşürülmüştür ve vakum dağılımı daha kararlı hale gelmiştir (Çizelge 5.3). NEG pompa aktifleştirilmeden önce iyon pompası vakum ölçeri (~10⁻⁹ mbar) ile C.C-2 (~10⁻⁸) arasında yaklaşık bir mertebelik fark gözlemlenmiştir. Demet hattının ortasına yerleştirilen NEG pompanın çalışmaya başlamasından sonra bu iki ölçer aynı basınç mertebesinde. Çizelge 5.3’e göre iyon pompası vakum değeri 3,3x10⁻⁹mbar iken C.C-2 değeri 3,6x10⁻⁹mbar seviyesindedir.

Çizelge 5.3 NEG pompasının sisteme dâhil edilmesinden sonra sonuçlar

	İyon pompası	RGA	C.C-1	C.C-2
Simülasyon sonuçları	1,3x10 ⁻⁹ mbar	2,4x10 ⁻⁹ mbar	3,6x10 ⁻⁹ mbar	3,6x10 ⁻⁹ mbar
DeneySEL veriler	3,3x10 ⁻⁹ mbar	4,8x10 ⁻⁹ mbar	5,2x10 ⁻⁹ mbar	5,3x10 ⁻⁹ mbar

Son olarak sıcak katodun vakum üzerine etkisi incelenmiştir. Sıcak katot çalışmaya başladığında vakum seviyesinde bir düşme gözlemlenmiştir (Çizelge 4.10). Bunun sebebi ise sıcak katot vakum ortamı içerisinde gaz salınım oranına katkı yapmaktadır ve sistem içerisinde bir gaz yükü oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Ady, M. 2016. Monte carlo simulations of ultra high vacuum and synchrotron radiation for particle accelerators. Doctoral Thesis, À la faculté des sciences de base laboratoire de physique des accélérateurs, 181, Lausanne, France.
- Ady, M. and Kersevan, M. 2014. Introduction to the latest version of the test-particle monte carlo code Molflow. IPAC, 38; 2348-2350.
- Akkurt, İ. 2013. Parçacık hızlandırıcıları ve Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) projesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 17(3); 10-11.
- Aksakal, H., Arıkan, E. and Nergiz Z. 2013. Vacuum properties of TARLA. Turkish Journal of Physics, 37; 322-329.
- Aksoy, A., Arıkan, P., Karlı, Ö., Kaya, Ç., Kazancı, E., Özkorucuklu, S. and Yavaş, Ö. 2014. Turkish Accelerator Center Project: The Status and Roadmap. 7th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics, 23-25 October 2013, Ürgüp, Nevşehir, TURKEY
- Aksoy, A., Karlı, Ö. and Yavaş, Ö. 2008. The Turkish Accelerator Complex IR FEL Facility, Infrared Physics & Technology, 51; 378-381.
- Aksoy, A., Ketenoglu, B., Karlı, Ö., Kaya, Ç., Nergiz, Z. and Yavaş, Ö. 2016. Accelerator Based Light Source Projects of Turkey. 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC2016), 8-13 May 2016, Busan, SOUTH KOREA
- Aksoy, A. and Özkorucuklu, S. 2011. The technical design report (TDR) of Turkish Accelerator and Radiation Laboratory in Ankara (TARLA), IAT, Ankara University.
- Anonymous. 2017a. Web Sitesi: <https://tr.khanacademy.org/what-is-the-maxwell-boltzmann-distribution>, Erişim Tarihi: 19.03.2017
- Anonymous. 2017b. <https://www.comsol.com/release/5.1/molecular-flow-module>, Erişim Tarihi: 17.04.2017
- Anonymous. 2017c. <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>, Erişim Tarihi: 17.04.2017.
- Anonymous. 2017d. <https://www.utdallas.edu>, Erişim tarihi: 02.03.2017
- Anonymous. 2017e. <http://www.spectrose.com/diffusion-pump-working.html>---resim, Erişim Tarihi: 16.02.2017.
- Anonymous. 2017f. <http://instrumentationandcontrollers.blogspot.in/2012/03/piranigauge-thermal-conductivity-gauge.html>, Erişim tarihi: 06.04.2017.
- Anonymous. 2017g. www.thinksrs.com/.../ApplicationNotes/IG1BAGapp, Erişim Tarihi: 13.03.2017.
- Avdiaj, S. and Erjavec, B. 2012. Outgassing of hydrogen from a stainless steel vacuum chamber. Materiali in tehnologije, 46(2); 161-167.
- Baliga, J. 2008. Maxwell-Boltzmann Distribution. 1-8, Triton college.
- Barcellini, C. 2015. Non-Evaporable getter thin film coatings for vacuum applications. Politecnico di Milano, 151, Milano.

- Benvenuti, C. 1999. Molecular surface pumping: the getter pumps, CERN Accelerator School(CAS), 28 May-3 June, Scanticon Conference Centre, 43-48, Denmark.
- Benvenuti, C. Chiggiato, P. 1996. Pumping characteristics of the st707 non-evaporable getter (Zr 70-V 24,6-Fe %4 wt%). Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces and Films, 14(6), 3278 – 3282.
- Bertolini, L. 2002. Vacuum testing and leak detection, The US Particle Accelerator School, 10-14 June, Yale University, USA.
- Bülbül, F. Jafarpour, S. 2015. Vakum pompaları. Ordu Üniversitesi Bilim Teknoloji Dergisi, 5(2), 42-54.
- Chambers, A. 2004. Modern Vacuum Physics. CRC Press, 361, United States of America.
- Chiggiato, P. 2012. Vacuum technology for ion sources, CERN Accelerator School (CAS), 29 May-8 June, Hotel Senec, 463-502, Senec, Slovakia.
- Coşgun, E., Aksoy, A., Demirci, E.P., Kaya, Ç., Koç, B. and Yavaş, Ö. 2016. Vacuum Studies on Electron Gun and Injector Line of TARLA Facility. Balkan Physics Letters, 24, 139-145.
- Danielson, P. 2001. Desorbing water in vacuum systems: bakeout or UV, R&D Magazine, 1-5.
- Danielson, P. 2001. How to use getters and getter pumps, R&D Magazine, 6-10.
- Dusza, P., Ely, N., Lang, D., Osburn, R., Stec, T., Swain, T. and Webb, D. 2008. Sputter ion pumps, In: Vacuum technology 60A&60B. Spring 120-125, California.
- Dusza, P., Ely, N., Lang, D., Osburn, R., Stec, T., Swain, T. and Webb, D. 2008. Turbomolecular pumps, In: Vacuum technology 60A&60B. Spring 126-135, California.
- Dusza, P., Ely, N., Lang, D., Osburn, R., Stec, T., Swain, T. and Webb, D. 2008. Partial Pressure Analysis, In: Vacuum technology 60A&60B. Spring 152-170, California.
- Elkatmış, A. ve Kangı, R. 2013. Kuadrupol kütle spektrometresi ve kararlılık ölçümleri, VIII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi, 26-28 Eylül, TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, 1-10 Gebze.
- Ercan, D.A. 2001. Parçacık hızlandırıcılarının bilime katkısı, I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi(UPHUK-I), 25-26 Ekim, TAEK, Ankara.
- Farrow, W. D. 2009. Basic vacuum principles and measurement. Specialty Gas Report, 38-41.
- Garcia, C. H. 2011. Vacuum components, First Mexican Particle Accelerator School, 26 September-7 October, Guanajuato-Mexico.

- Garton, D. 2011. Vacuum technology and vacuum design handbook for accelerator technicians, Australian Nuclear Science and Technology Organisation, 81, Australia.
- Gatzen, H. H., Saile, V. and Leutbold, J. 2015. Vacuum Technology, In: Micro and Nano Fabrication, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 7-63, New York.
- Halliday, D., Resnick, R. and Walker, J. 2014. The kinetic theory of gases, In: Fundamentals of physics. Wiley, 507-526, United States of America.
- Hilleret, N. 1999. Mechanical pumps, CERN Accelerator School(CAS), 28 May-3 June, Scanticon Conference Centre, 25-35, Denmark.
- Hoffman, D., Singh, B. and Thomas, J. 1997. Handbook of vacuum science and Technology, Academic Press, 835, USA.
- Houston, L.H. 2006. Kinetic theory of gases, In: Chemical kinetics and reaction Dynamics, Dover Publications, 1-53, Mineola, New York.
- Jimenez J.M. 2012. Vacuum systems, CERN Accelerator School, 28 October-9 November, University of Granada, Spain.
- Jousten, K. 1999. Thermal Outgassing, CERN Accelerator School (CAS), 28 May-3 June, Scanticon Conference Centre, 111-124, Denmark.
- Jousten, K. 1999. Pressure measurement with ionization gauges, CERN Accelerator School (CAS), 28 May-3 June, Scanticon Conference Centre, 75-86, Denmark.
- Kenter, M. 2007. Temiz oda ve hijyenik klima sistemi tasarımı ve ödevleri. TTMD dergisi, 49; 21-28.
- Kersevan, R. and Ady, M. 2014. Molflow+ tutorial, AVS 61st International Symposium & Exhibition, 9-14 November, Baltimore Convention Center, 1-30, New York.
- Lafferty, J.M. 1998. Flow of gases through tubes and orifices, In: Foundations of vacuum science and technology, Wiley, 81-105, New York.
- Lou, B. 2004. Estimating gasloads, Accelerator Vacuum and Mechanical Engineering, United States Particle Accelerator School (USPAS), 19 January-24 January, Lawrence Livermore National Laboratory, California.
- Malyshev, O. B. 2013. Introduction to vacuum systems for particle accelerators, Particle accelerator school, The Cockcroft Institute of accelerator science and technology, California.
- Mamun, M.A., Elmustafa, A.A., Stutzman, M.L., Adderley, P.A. and Poelker, M. 2013. The effect of Heat treatments and coatings on the outgassing rate of stainless chambers, Journal of Vacuum Science & Technology a Vacuum Surfaces and Films 32(2); 1-32.
- Marquardt, N. 1999. Introduction to the Principles of Vacuum physics, CERN Accelerator School(CAS), 28 May-3 June, Scanticon Conference Centre, 1-24, Denmark.
- O'Hanlon, J. F. 2003. A User's Guide to Vacuum Technology. Wiley, 536, New Jersey.
- Peter, G. J. Müller, N. 2007. Partial pressure gauges, 195-212

- Reid, R. 2010. Vacuum science and technology in accelerators, Cockcroft Institute Lectures, United Kingdom.
- Roth, A. 1990. Vacuum Technology. Elsevier, 554, Netherlands.
- Saes Getters. 2001. CapaciTorr pumps MK5 Series, SAES, 9, Italia.
- Schulz, L. 1999. Sputter-Ion pumps, CERN Accelerator School(CAS), 28 May-3 June, Scanticon Conference Centre, 37-41, Denmark.
- Segovia, J.L. 1999. Physics of outgassing, CERN Accelerator School: Vacuum Technology, 28 May-3 June, Scanticon conference Centre, 99-109, Snekersten, Denmark.
- SRS. 1996. Models RGA100, RGA200 and RGA300 Residual gas analyzer, Stanford Research Systems Inc, 357, California
- Tarımcı, Ç. ve Sarı, H. 2006. Vakum tekniği. Seçkin yayıncılık, 147, Ankara.
- Tsipenyuk, D. Y. 2009. Vacuum technology, In: Physical Methods, Instruments and Measurements. Eolss Publishers Co. Ltd., 305-312, Singapore.
- Türkmen, B. 2001. Temiz oda standartları ve laminar hava akışlı tavan sistemleri. TTMD Dergisi, 13; 1-4.
- Weston, G. F. 1985. Ultrahigh vacuum practice, Great Britain at the University Press, 296, London
- Weissler, G. L. Carlson, R. W. 1979. Vacuum Physics and technology, Academic Press, 592, New York.
- Wiedemann, H. 2003. Particle Accelerator Physics. Springer, 441, New York.
- Yavaş, Ö. 2013. Turkish Accelerator Center Project: The Status and Roadmap. 7th Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics, 23-25 October, Ürgüp, Nevşehir, Turkey
- Yavaş, Ö. 2014. Facilities of TAC and Their Reserach Potential, 30th European Conference on Surface Science (ECOSS30), 31 August-5 September, Antalya, Turkey
- Yavaş, Ö. 2016. Turkish Accelerator Center Project: The results of 3rd stage and vision of the project. Balkan Physics Letters, 24; 191-202.
- Yıldız, H. 2010. Türk hızlandırıcı merkezinin sinkrotron halkasında dinamik aralığının hesabı. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 58, Ankara.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre Coşgun
Doğum Yeri : Yozgat
Doğum Tarihi : 20.04.1990
Medeni Hali : Bekâr
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Bahçelievler Yenibosna Lisesi (2004-2007)
Lisans : Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği
Bölümü (2009-2014)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği
Anabilim Dalı (Eylül 2015-Temmuz 2017)

Hakemli Dergiler

Coşgun, E. Aksoy, A. Demirci, E.P. Kaya, Ç. Koç, B. Yavaş, Ö. 2016. Vacuum Studies on Electron Gun and Injector Line of TARLA Facility. Balkan Physics Letters, 24; 139-145.
Demirci, E. P. Aksoy, A. Kaya, Ç. Kazancı, E. **Coşgun, E.** Yavaş, Ö. The Status of Cryoplant of TARLA Facility, Balkan Physics Letters Letters, 24; 146-150.
Coşgun, E. Demirci, E. P. Kazancı, E. Koç, B. UHV Vacuum Experiments in TARLA Facility, Balkan Physics Letters (yayına gönderildi)

Uluslararası Bildiriler

Coşgun, E. Aksoy, A. Demirci, E.P. Kaya, Ç. Koç, B. Yavaş, Ö. 2016. Vacuum Studies on Electron Gun and Injector Line of TARLA Facility. 6th Internationally Participated Congress on Particle Accelerators and Applications, 29-30 August, Bodrum, Turkey.
Coşgun, E. Demirci, E. P. Kazancı, E. Koç, B. UHV Vacuum Experiments in TARLA Facility, 6th Internationally Participated Congress on Particle Accelerators and Applications, 29-30 August, Bodrum, Turkey.