

MARA-SEPARAATTORIN TYHJIÖJÄRJESTELMÄ

JARI PARTANEN

Pro Gradu-tutkielma
Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos
31.5.2012
Ohjaaja: Juha Uusitalo

Tässä tutkielmassa tutustutaan tyhjiötekniikkaan painottaen suurtyhjiötä paremmassa tyhjiössä toimimista. Erityisesti tarkastellaan tyhjiötekniikan sovelluksia kokeellisessa ydifysiikassa separaattoritekniikan alalla. Tämän näkökulman kannalta oleelliset tyhjiöpumppumallit, turbomolekyylaaripumppu, kryopumppu, kiertosiipipumppu ja scroll-pumppu, esitellään ja käydään läpi niiden ominaisuuksia.

Jyväskylän yliopiston fysiikan laitokselle rakenteilla olevan MARA-massaseparaattorin toiminta esitellään. Erityisesti kiinnitetään huomiota MARAn sähköstaattisen dipolin tyhjiöjärjestelmälle asettamiin vaatimuksiin: paine sähköisessä dipolissa täytyy saada vähintään kertaluokkaan 10^{-7} mbar. MARAn suunniteltu tyhjiöjärjestelmä esitellään ja sitä verrataan vastaavaan käyttötarkoitukseen suunniteltujen separaattorien FMA:n ja JAERI-RMS:n tyhjiöjärjestelmiin. FMA:n tyhjiöjärjestelmä vaikuttaa alimitoitetulta JAERI:n ja MARAan verrattuna. Varmaa syytä sille, miksi FMA tulee toimeen pienemmällä pumppausnopeudella ei kyetä selvittämään saatavilla olevasta lähdeaineistosta, mutta mahdollisia syitä ovat vähäisempi elastomeeritiivisiteiden käyttö ja paremmin viimeistellyt tyhjiökammion sisäpinnat.

MARAn tyhjiöjärjestelmää käsitellään myös vertaamalla sitä RITU-separaattorin tyhjiöjärjestelmään. RITUa käytetään muun muassa kaasulaskurin kaasukuorman ja kaasunirtoamisvakion määrittämisessä. Yhdistämällä RITUun ja muihin separaattoreihin pohjautuvat tarkastelut, saadaan sähköstaattisen dipolin kammion paineeksi $(80 - 8) \cdot 10^{-8}$ mbar. Erityisesti kiinnitetään huomiota kaasulaskurin ja desorption aiheuttamaan kaasukuormaan.

Sähködipolikammion pumppausajaksi esityhjiöön saadaan 58 min ja käyttötyhjiöön 67 h. Rajoitinlevyt todetaan erittäin tehokkaiksi konduktanssin rajoittimiksi: oikein mitoitettujen rajoitinlevyjen avulla fokaalitasolle johtavan putken konduktanssi voidaan edullisesti pudottaa 37%iin alkuperäisestä.

Kokeellisessa osuudessa todetaan magneettisen dipolin tyhjiökammion taipuman olevan 3,1 mm ja merkityksetön separaattorin ominaisuuksien kannalta. Kammion taipuma esitetään karttana. Taipuman havaitaan lisäksi olevan paineen suhteen lineaarinen. Erinäisten tyhjiökammioiden tiiveys varmistetaan vuototesterillä.

Kiitokset

Kiitokset työn ohjaajalle Juha Uusitalolle. Lisäksi haluan kiittää työpajan väkeä, joka lainasi kokeellisessa osuudessa käytetyt mittalaitteet.

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Tyhjiötekniikan perussuureet	1
3	Tyhjiöpumput	4
3.1	<i>Esipumput (backing pumps)</i>	<i>5</i>
3.2	<i>Turbomolekylaaripumppu</i>	<i>9</i>
3.3	<i>Kryopumppu</i>	<i>14</i>
4	Painemittarit	17
5	Venttiilit, laipat ja tiivisteet	20
6	MARA-separaattorin rakenne	23
7	Muiden separaattoreiden tyhjiöjärjestelmiä	26
7.1	<i>FMA</i>	<i>26</i>
7.2	<i>JAERI-RMS</i>	<i>29</i>
8	MARAn tyhjiötasojen laskennallinen tarkastelu	30
9	Magneettisen dipolin tyhjiökammion mittaukset	35
10	Yhteenveto	38

1 Johdanto

1600-luvulla alkunsa saaneella tyhjiötekniikalla on nykyään tärkeä osa arkielämässä, teollisuudessa ja tieteellisessä tutkimuksessa [1]. Tyhjiössä kaasumolekyylien tiheys on vähäisempi kuin tavallisesti ilmassa. Eri elämänalueilla tavatut tyhjiösovellukset eroavat toisistaan esimerkiksi tyhjiöltä vaaditun "hyvyyden" eli tyhjiötason ja tyhjiöstä poistamista vaativan kaasumäärän suhteen. Näille moninaisille sovelluksille on yhteistä se, että luonnostaan vuotamaan pyrkivästä tyhjiöjärjestelmästä poistetaan kaasua pumpun avulla [2].

Molekyylien tiheyden vähentyessä niiden törmäystaajuus pienenee [2]. Ne siis vuorovaikuttavat toistensa kanssa yhä harvemmin. Mikäli tyhjiötävään tilavuuteen joutuu jokin muu hiukkanen, senkin vuorovaikutustiheys kaasumolekyylien kanssa on tavallista vähäisempi. Tämä kasvattaa hiukkasen vapaata matkaa. Ionien vapaa matka ilmassa on varsin lyhyt [3], joten tyhjiö on välttämätön, mikäli ioneja halutaan siirtää merkittäviä matkoja.

Koska ionit ovat varattuja hiukkasia, niihin vaikuttaa Lorenzin voima [4]. Ne siis muuttavat liiketilaansa sähkö- ja magneettikentissä. Tämä ominaisuus tekee mahdolliseksi ionien kiihdyttämisen ja ohjaamisen. Suurinta sähkökentän voimakkuutta, jota voidaan ylläpitää jossain tietysissä tilanteissa, rajoittaa eristävän väliaineen läpilyöntikestävyys. Tyhjiön läpilyöntikestävyys [5] on merkittävästi ilman läpilyöntikestävyyttä [6] suurempi. Näin ollen tyhjiön käyttö mahdollistaa paitsi ionien kuljettamisen, myös niiden ohjailun voimakkailla sähkökentillä. Näistä syistä tyhjiötekniikka on tärkeässä osassa kokeellisessa, kiihdytinpohjaisessa ydinfysiikassa [1]. Seuraavassa perehdytään tarkemmin tyhjiötekniikalle asetettuihin vaatimuksiin separaattori-sovellusten tapauksessa.

2 Tyhjiötekniikan perussuureet

Tyhjiötekniikassa tyhjiöllä tarkoitetaan tyhjiökammion rajaamaa tilavuutta, jossa kaasumolekyylien määrä on riittävän vähäinen tyhjiötä vaativan sovelluksen tarpeisiin. Tyhjiökammion paineen perusteella voidaankin määritellä taulukon 1 mukaiset tyhjiöalueet. Ydinfysiikan sovelluksissa toimitaan yleensä vähintään suurtyhjiön alueella. Kiihdytinfysiikan teollisissa sovelluksissa voidaan puolestaan pärjätä välityhjiölläkin.

Taulukko 1. Tyhjiöalueet

Tyhjiöalue	Paine [Pa]	Paine [mbar]
Karkeatyhjiö	$10^5 - 10^2$	$10^3 - 10^0$
Välityhjiö	$10^2 - 10^{-1}$	$10^0 - 10^{-3}$
Suurtyhjiö	$10^{-1} - 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-6}$
Hyvä suurtyhjiö	$10^{-4} - 10^{-7}$	$10^{-6} - 10^{-9}$
Ultratyhjiö	$10^{-7} - 10^{-10}$	$10^{-9} - 10^{-12}$
Hyvä ultratyhjiö	$10^{-10} -$	$10^{-12} -$

Tyhjiökammioon jäävää kaasua kutsutaan jäännöskaasuksi. Nimensä mukaisesti se on tyhjiökammion täyttäneestä kaasusta jäljelle jäänyt osuus. Tyhjiökammioit ilmataan tavallisesti tyypellä tai ilmalla. Jäännöskaasu koostuu useista eri kaasuista, joille pätee Daltonin osapainelaki [2]

$$P = \sum P_i, \quad (1)$$

Taulukko 2. Kaasuvirtauksen lajit

Virtausalue	N_K	$P \cdot d$ [mbar · m]
Viskoottinen	$N_K > 100$	$P \cdot d > 10^{-2}$
Välimuotoinen	$1 < N_K < 100$	$10^{-4} < P \cdot d < 10^{-2}$
Molekylaarinen	$N_K < 1$	$P \cdot d < 10^{-4}$

missä P_i on kunkin kaasun osapaine ja P tyhjiön kokonaispaine.

Jäännöskaasu on tyypillisesti harvaa, joten sille on perusteltua käyttää ideaalikaasun tilanyhtälöä [2]

$$PV = NkT, \quad (2)$$

missä P on jäännöskaasun paine, V tyhjiökammion tilavuus, N kaasumolekyylien lukumäärä kammiossa, k Boltzmannin vakio ja T jäännöskaasun lämpötila kelvineinä.

Kaasumolekyylien keskimääräiselle nopeudelle pätee [7]

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, \quad (3)$$

missä R on kaasuvakio, T lämpötila ja M moolimassa.

Kaasumolekyylien törmäystaajuus vaikuttaa oleellisesti kaasun ominaisuuksiin. Ilmakehän paineessa olevassa tyhjiökammiossa kaasumolekyylit vuorovaikuttavat toistensa kanssa törmäysten ja molekyylien välisten voimien kautta. Näiden vuorovaikutusten ansiosta molekyylien liike on kollektiivista. Viskoottinen virtaus on siis kaasumolekyylien kollektiivista liikettä. Kun tyhjiötä pumpataan, käyvät molekyylien väliset törmäykset harvinaisemmiksi. Lopulta päädytään tilanteeseen, jossa molekyylien liikettä voidaan pitää toisista molekyyleistä riippumattomana. Mikäli kahden toisiinsa yhteydessä olevan tilavuuden molekyyliitiheydessä on ero, useampia molekyyliä kulkeutuu tiheästä tilavuudesta harvaan kuin toisinpäin. Tällaista molekyylien satunnaista liikettä kohti matalampaa painetta kutsutaan molekylaariseksi tai molekyylivirtaukseksi.

Kaasuvirtauksen muutos viskoottisesta molekylaariseksi ei ole selvärajainen. Kahden päävirtausmuodon välille jääkin niin kutsuttu välimuotoisen virtauksen alue. Virtauksen lajin määrittämiseen voidaan käyttää Knudsenin lukua [2]

$$N_K = \frac{d}{\langle \lambda \rangle} \quad (4)$$

missä d on virtauskanavan halkaisija ja $\langle \lambda \rangle$ kaasumolekyylien keskimääräinen törmäysväli. Käytännön sovelluksissa kätevämpi suure virtauslajin määrittämiseen on $P \cdot d$, jota voidaan käyttää kaasun lämpötilan ja yhden molekyylikerroksen maksimipintatiheyden pysyessä vakiona. Taulukossa 2 on annettu kaasuvirtauslajin raja-arvot sekä N_K :n että $P \cdot d$:n avulla.

Kaasuvirran voimakkuutta vakiolämpötilassa kuvaa läpäisy

$$Q = \frac{d(P \cdot V)}{dt}, \quad (5)$$

Taulukko 3. Sähkö- ja tyhjiösuureiden analogisuus [2]

Virtapiiri	Tyhjiösystemi
Jännite U	Paine-ero ΔP
Virta I	Läpäisy Q
Sähkövastus R	Virtausvastus $\frac{1}{C}$

jota kutsutaan myös kaasukuormaksi. Läpäisyn avulla saadaan määriteltyä virtauskanavan konduktanssi

$$C = \frac{Q}{P_1 - P_2}, \quad (6)$$

missä Q on virtauskanavan läpäisy, P_1 paine imuaukolla ja P_2 paine poistoaukolla.

Havaitaan, että tyhjiötekniikan suureet ovat analogisia sähkötekniikan suureiden kanssa taulukon 3 mukaisesti. Tyhjiötekniikassa pätevät Ohmin lain, rinnan- ja sarjaankytkettyjen vastusten ja Kirchoffin lakien kanssa analogiset lait.

Molekylaarisessa virtauksessa putken konduktanssille pätee [1]

$$C = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} \left(\frac{2kT}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{A^2}{BL}, \quad (7)$$

missä k on Boltzmanin vakio, T lämpötila, m molekyylin massa, A virtauskanavan poikkipinta-ala, B sen ympärysmitta ja L sen pituus. Aukon konduktanssille puolestaan pätee molekylaarisessa virtauksessa [7]

$$C = \frac{\bar{c}A}{4}, \quad (8)$$

missä \bar{c} on yhtälön (3) mukainen kaasumolekyylien terminen nopeus ja A on rei'än poikkipinta-ala.

Tyhjiöjärjestelmään kohdistuva kaasukuorma voidaan määrittää mittaamalla paineen nousu tyhjiöjärjestelmässä ajan funktiona. Mikäli tyhjiötä ei pumpata mittauksen aikana, pätee paineen nousulle [1]

$$\frac{dp}{dt} = \frac{Q}{V}, \quad (9)$$

missä Q on tyhjiötilavuuteen kohdistuva kokonaiskaasukuorma. Se voi pitää esimerkiksi sisälleen vuodon ja desorption aiheuttamat kuormat.

Päästään suljetun putken, joka on toisesta päästään yhteydessä pumpattavaan tyhjiötilavuuteen, päiden väliselle paine-erolle pätee [1]

$$P_L - P_O = \frac{q_D BL}{2C}, \quad (10)$$

missä q_D on kaasun irtoamisen arvo putken materiaalille, B putken ympärysmitta, L putken pituus ja C putken konduktanssi.

3 Tyhjiöpumput

Tyhjiöpumput ovat kaasuja ja jossain määrin myös höyryjä pumppaamaan suunniteltuja pumppuja, joilla tyhjiökammioon pumpataan tyhjiö. Kuten todettua, tarvittavan tyhjiön laatu eli astiassa vallitseva jäännöskaasun paine vaihtelee sovelluksesta toiseen. Näin ollen ei ole yllättävää, että eri tyhjiöpumppumallejakin on paljon.

Tyhjiöpumpun valintaan vaikuttavia merkittäviä ominaisuuksia on joitakin. Pumpulla on tietty painealue, jolla se toimii. Tämä asettaa rajoituksia pumpun kurkun ja ulostulon väliselle paine-erolle. Pumppausnopeus $S \left[\frac{1}{s} \right]$ kertoo pumpun siirtämän kaasutilavuuden aikayksikköä kohti. Datalehdessä annettu pumppausnopeus pätee nimenomaisesti pumpun kurkulla. Tämä on erityisesti huomioitava tapauksessa, jossa pumpun sisäänmenoa joudutaan kuristamaan pumpun kytkemiseksi pieneen aukkoon. Pumpun aukon koon vaikutus näkyy helposti datalehdestä [8], jossa on annettu saman pumpun tiedot 100 mm ja 160 mm kurkulla. Pumppausnopeus suurella kurkulla on $510 \left[\frac{1}{s} \right]$ ja pienellä kurkulla $290 \left[\frac{1}{s} \right]$. Pumpun kurkun halkaisijan pienentäminen pienentää konduktanssia, mikä aiheuttaa tehollisen pumppausnopeuden pienenemisen [1]. Pumppausnopeus on harvoin vakio pumpun koko toiminta-alueella ja tästä syystä pumppujen datalehdistä löytyy numeerisen arvon lisäksi myös graafi, joka kertoo pumppausnopeuden kurkun paineen funktiona. Tässä työssä ilmoitetut pumppausnopeudet on annettu tyypikaasulle mikäli lukuarvon yhteydessä ei muuta ilmoiteta.

Läpäisy on yhtälön (5) mukaisesti vakiopaineessa

$$Q = P \frac{dV}{dt}.$$

Tyhjiöpumpun pumppausnopeus puolestaan on

$$S = \frac{dV}{dt}.$$

Täten tyhjiöpumpun läpäisy on

$$Q = PS. \tag{11}$$

Tyhjiökammion, johon ei kohdistu kaasukuormaa, pumppausajalle pätee [7]

$$t = \frac{V}{S} \ln \frac{p_0}{p_1}, \tag{12}$$

missä V on tyhjiökammion tilavuus, S pumpun pumppausnopeus, p_0 paine pumppauksen alkaessa ja p_1 pumppauksen lopetuspaine.

Ultimaattinen paine on se jäännöskaasun paine, jota pumpulla lähestytään asymptoottisesti, kun pumpataan määritellyissä perusolosuhteissa tyhjiökammiota, jossa ei ole kaasuvuotoa. Tämä arvo riippuu erityisesti pumpussa tapahtuvasta takaisinvirtauksesta. Nykyisin ilmoitetaan useammin peruspaine, joka on ISO 21360-1 -standardin määrittelemä, äärellisessä ajassa saavutettu paine [7].

Useimmat tyhjiöpumput toimivat puristamalla sisään ottamansa kaasun suurempaan paineeseen ja työntämällä tämän korkeammassa paineessa olevan kaasun pois ulostulon kautta. Ulos-

menevän ja sisääntulevan kaasun paineiden suhde on pumpun puristussuhde, ja se antaa alarajan ultimaattiselle paineelle tietyllä ulostulon paineella. On tavallista, että puristussuhde riippuu voimakkaasti pumpattavasta kaasusta. Näin myös pumpulla saavutettava paine riippuu pumpattavasta kaasusta. Datalehdissä annetaan yleensä puristussuhteet yleisimmille kaasuille.

Haluttaessa päästä suurtyhjiön, hyvän suurtyhjiön tai ultratyhjiön alueelle, on useimmissa tapauksissa tarpeen käyttää useita tyhjiöpumppuja ketjutettuna. Näin muodostuvan pumppuaseman ominaisuudet määräytyvät osaltaan kunkin pumpun ominaisuuksista. Olleellista on huomata, että tyhjiökammion imetty kaasumäärä pitää pystyä siirtämään koko pumpuketjun läpi. Toisin sanoen läpäisy pysyy vakiona läpi koko pumppuaseman. Tällä tavoin läpäisyltään pienin pumppu rajoittaa koko pumppuaseman suorituskykyä.

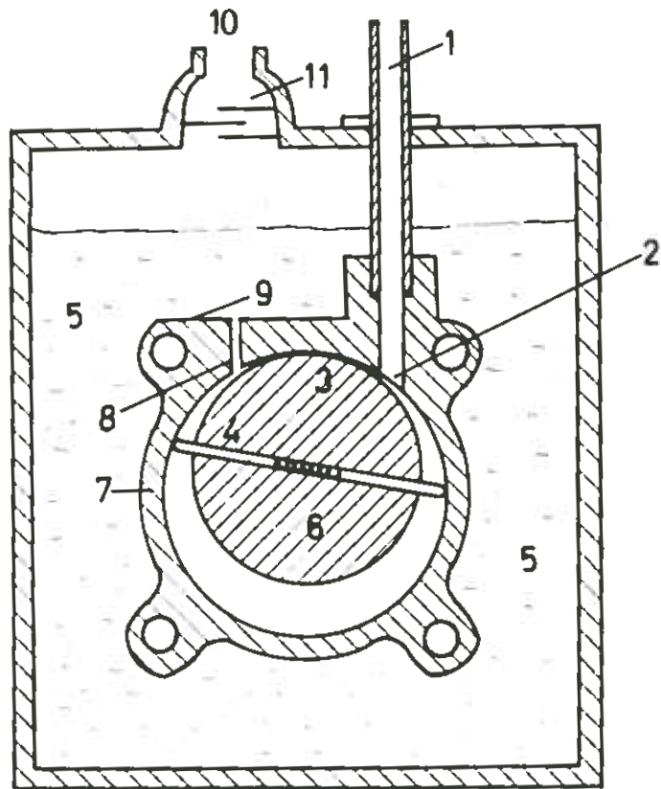
Monissa tyhjiösovelluksissa on tärkeää, ettei pumpuissa mahdollisesti käytetty öljy pääse tyhjiökammioon missään olosuhteissa. Perinteisesti tämä ongelma on ratkaistu sijoittamalla kylmäloukku tyhjiölinjaan kammion ja pumpun väliin. Valitettavasti tämä pienentää pumppausnopeutta merkittävästi [1]. Teknisen kehityksen myötä vaihtoehtoiseksi ratkaisumalliksi on noussut öljyttömien pumppujen käyttäminen.

3.1 Esipumput (backing pumps)

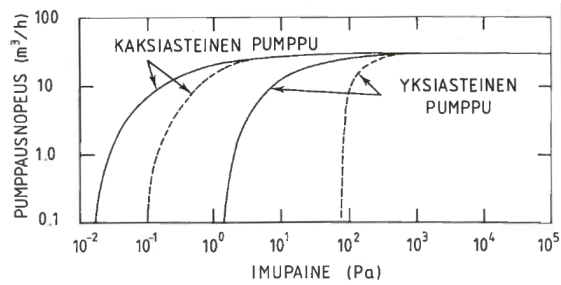
Pumput, joilla tyhjiökammio voidaan pumpata suurtyhjiöalueelle tai parempaan tyhjiöön, eivät yleensä kykene pumppaamaan ilmakehän painetta vastaan. Tällaisen pumpun toiminta vaatii esipumpun käyttämistä. Esipumpun tehtävänä on pitää varsinaisen tyhjiöpumpun ulostulo karkean tai välityhjiön alueella. Varsinaisen tyhjiöpumpun pumppaama kaasu kulkee siis esipumpun läpi. Esipumpuiksi soveltuvia pumpputyyppejä voidaan käyttää myös karkean tyhjiön pumppuina (roughing pump), joilla tyhjiökammio pumpataan painealueelle, jossa varsinainen tyhjiöpumppu voidaan käynnistää.

Perinteisesti suosituin esipumpputyyppi on ollut yleisesti öljypumpun nimellä tunnettu kiertosiipipumppu (rotating-vane pump), jonka rakenne on esitetty kuvassa 1. Sylinterinmuotoinen roottori on sijoitettu sylinterimäisen staattorin sisään siten, että roottori on käytännöllisesti katsoen kiinni staattorin ylälaidassa. Roottoriin kiinnitetyt, päistään pyöristetyt ja jousikuoritteiset metallilevyt ottavat kiinni kammion laitoihin roottorin pyöriessä jakaen kammion kolmeen osioon. Kaasu ei pääse virtaamaan osiosta toiseen, sillä öljy, johon pumppu on upotettu, tiivistää seinämän ja roottorin väliset rajapinnat. Roottorin pyöriessä sisäänmenoaukosta pumppuun tullut kaasu puristuu pienempään tilavuuteen, kunnes paine-ero ulkoilmaan nähdessä saa poistoventtiilin avautumaan. Pumpattavan paineen tulee siis olla idealisoidussakin tapauksessa niin suuri, että tilavuudenmuutoksen aiheuttama paineennousu riittää avaamaan poistoventtiilin. Parhaimmassa tapauksessa kiertosiipipumpulla päästään painealueelle 10^{-3} mbar. Pumppausnopeudet ovat tyypillisesti luokkaa $1 - 500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ [2]. Pumppausnopeus alkaa laskea vasta lähellä ultimaattista painetta, kuten kuvasta 2 voidaan havaita. Öljyn joutuminen tyhjiökammioon pumppauksen keskeytyessä on mahdollista, etenkin ilman kylmäloukkuja tai imupuolelle sijoitettua pumpun automaattisesti ilmaavaa venttiiliä. Lisäksi vesihöyryn tiivistyminen voi joissain käyttötilanteissa ohentaa öljyä, mikä vaarantaa pumpun riittävän voitelun.

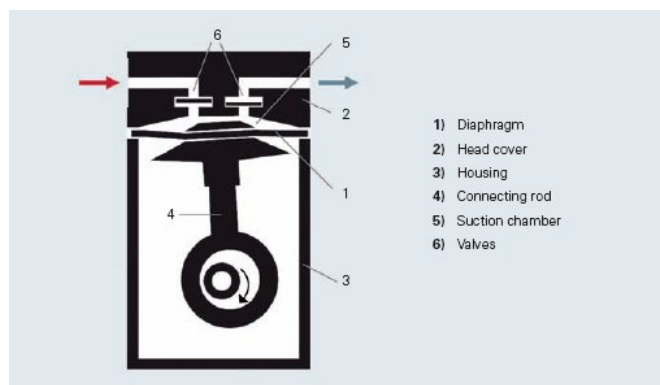
Kalvopumppu on tyhjiöpumppu, jossa mäntä liikuttaa kalvoa pumppukammiossa. Sisäänmenoon ja ulostuloon sijoitetut venttiilit ovat olennaisia pumpun toiminnalle: kun mäntä on matkalla alas ja pumppu imee kaasua, sisäänmenoventtiili on auki ja ulostuloventtiili kiinni.



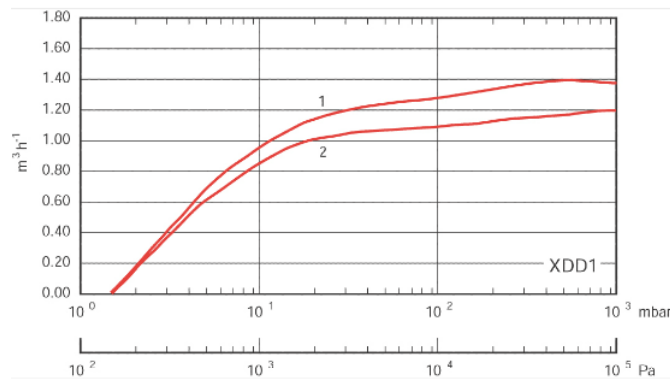
Kuva 1. Kiertosiipipumpun rakenne [1].



Kuva 2. Kiertosiipipumpun pumppausnopeuden riippuvuus tyhjiökammion paineesta [2].

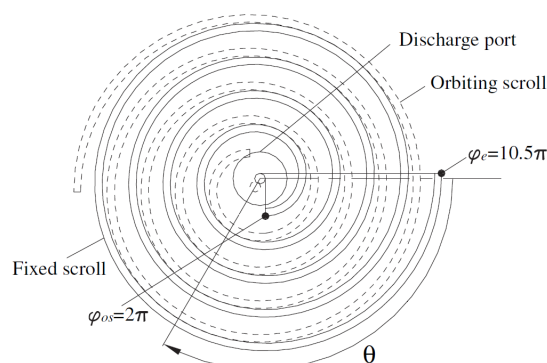


Kuva 3. Kalvopumpun rakenne [7].



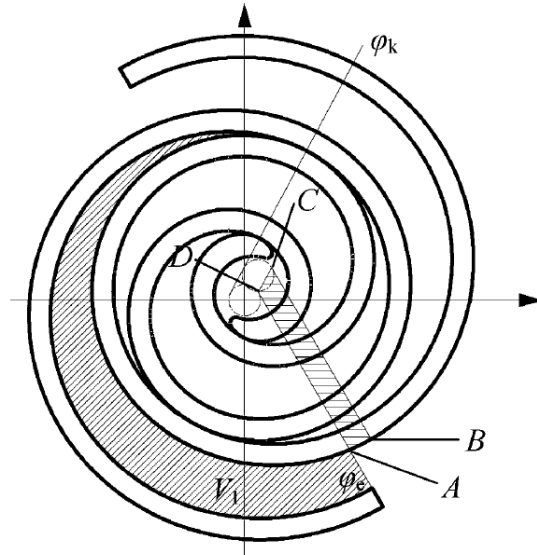
Kuva 4. Kalvopumpun pumppausnopeus tyhjiökammion paineen funktiona. 1: 60 Hz syöttöjännite, 2: 50 Hz [9].

Vastaavasti ulostuloventtiili aukeaa ja sisäänmenoventtiili sulkeutuu, kun mäntä alkaa palata ylös työntäen pumppukammiossa olevaa kaasua ulostuloon. Kuva 3 esittää kalvopumpun rakennetta. Pumppukammio on kalvon ansiosta hermeettisesti eristetty männästä ja sitä liikuttavasta koneistosta, joten koneistossa käytetyt voiteluaineet eivät pääse kosketuksiin pumpattavan tyhjiön kanssa. Kalvopumppu on näin ollen esimerkki öljyttömästä eli kuivasta tyhjiöpumpusta. Ulostuloventtiilin ja pumppukammion väliin jäävä tilavuus rajoittaa kalvopumpun puristussuhdetta ja yksiasteisen kalvopumpun ultimaattinen paine jääkin 70 mbar:iin. Kytke-mällä kalvopumppuja sarjaan saadaan ultimaattista painetta alennettua. Useat kaupalliset, 2 - 4 pumppuasteesta koostuvat ratkaisut lupaavat ultimaattiseksi paineeksi 1 - 5 mbar [9, 10]. Näillä painearvoilla virtaus pumpussa on vielä selvästi viskoottisella alueella. Sisäänmenoventtiilin avautumiseen vaadittava voima antaa ultimaattisen paineen alarajaksi 0,5 mbar [7]. Kalvopumppujen pumppausnopeudet ovat tyypillisesti pieniä, alle $10 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$. Kuvasta 4 nähdään pumppausnopeuden olevan suurimmillaan ilmakehän paineessa ja laskevan merkittävästi jo paljon ennen ultimaattista painetta.

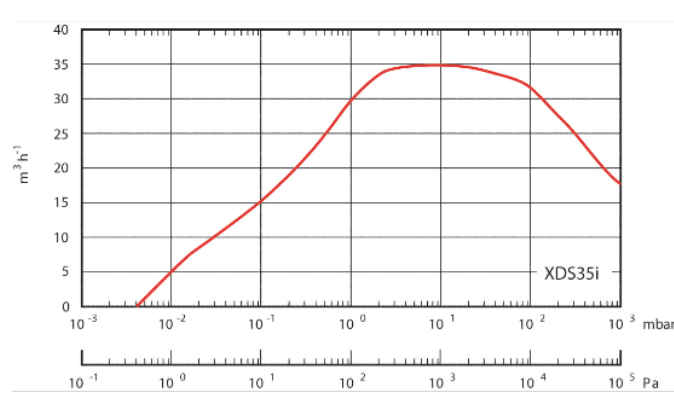


Kuva 5. Scroll-pumpun geometria [11].

Scroll-pumppu on varsin uusi tyhjiöpumppumalli. Se koostuu kahdesta pumppukammioon sijoitetusta sisäkkäisestä ympyrän evolventista eli spiraalista, joista toinen on 180° toista edellä kuvan 5 mukaisesti. Yksi spiraali on kiinni pumppukammiossa ja toinen, kiertävä spiraali liikkuu epäkeskoisesti ensimmäisen suhteen tyypillisesti muutaman senttimetrin säteellä siten, että spiraalit ottavat kiinni toisiinsa useassa kohtaa muodostaen toisistaan eristettyjä kammioi-



Kuva 6. Scroll-pumpun imukammio (varjostettu alue) [12].



Kuva 7. Edwards XDS35i scroll-pumpun pumppausnopeus tyhjiökammion paineen funktiona. [13].

ta [14]. Sisäänmenosta pumppuun tuleva kaasu tulee spiraalien väliin ulkolaidalle muodostuvaan imukammioon kuvan 6 mukaisesti. Kiertävän spiraalin liikkuessa kaasulle avautuu reitti sisemmäs spiraalien väliin samalla kun reitti takaisin ulos sulkeutuu. Kun kiertävä spiraali on kulkenut täyden kierroksen, edellisen kierroksen alussa pumppuun tullut kaasu on yhtä kierrosta sisempänä spiraalien välissä ja uutta kaasua pääsee pumppuun ensimmäiselle kierrokselle. Lopulta kaasu tulee spiraalin keskelle muodostuvaan purkauskammioon, josta se pääsee ulostuloon. Imu- ja purkauskammion tilavuuksien suhde vaikuttaa oleellisesti pumpun ominaisuuksiin: kun suhdetta pienennetään, pumpun ultimaattinen paine matalilla kierrosluvuilla laskee ja korkeilla kierrosluvuilla nousee [11].

Scroll-pumppu on öljytön ja luottaa tiivisteisiin sekä tarkkaan koneistukseen vuotojen pitämiseksi kurissa. Spiraalien keskinäisen välyksen on pienimmillään oltava kymmenien mikrometrien suuruusluokkaa. Vaaditun tarkkuuden saavuttamisen vaikeuden vuoksi scroll-pumppu saatiin kehitettyä toimivaksi vasta 1970-luvun puolivälissä vaikka pumpun toimintaperiaate on kuvattu jo 1900-luvun alussa. Vähäinen liikkuvien osien määrä, tärinättömyys ja hiljaisuus ovat scroll-pumpun hyviä ominaisuuksia verrattuna muihin öljyttömiin tyhjiöpumppuihin [12]. Scroll-pumppujen ultimaattinen paine on luokkaa 10^{-2} mbar ja pumppausnopeus $35 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ tai vähemmän. Kuva 7 näyttää pumppausnopeuden maksimin olevan 10 mbar:n tietämillä.

3.2 Turbomolekylaaripumppu

Turbomolekylaaripumppu eli turbopumppu on vuosikymmenten ajan ollut merkittävä suurtyhjiöpumpputyyppejä. Pumppu koostuu kuvan 8 mukaisesti samalle akselille sijoitetuista siipipyöristä, joista joka toinen on staattori ja joka toinen roottori. Roottorin ja staattorin lavat ovat toisiinsa nähden vastakkaiset kuvan 9 osoittamalla tavalla. Roottoriin osuvat kaasumolekyylit absorboituvat siihen hetkeksi ja desorptoituessaan saavat ulostuloa kohti suuntautuvan impulssin [7, 1]. Voidaan helposti näyttää, että 45° lapakulmalla saavutetaan suurin pumppausnopeus [15]. Pumpun toiminta vaatii, että roottorinlavojen nopeus on samaa suuruusluokkaa pumpattavien molekyylien termisen nopeuden kanssa eli 100 - 500 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$. Roottorin kierrostaajuudeksi muutettuna tämä tarkoittaa 15000 - 60000 rpm eli 10 - 40 kertaa edellä käsiteltyjen esipumppujen kierrostaajuus [2].

Koska turbopumpun imuaukon konduktanssi on verrannollinen molekyylien termiseen nopeuteen yhtälön (8) mukaisesti, on myös efektiivinen pumppausnopeus verrannollinen siihen [7]

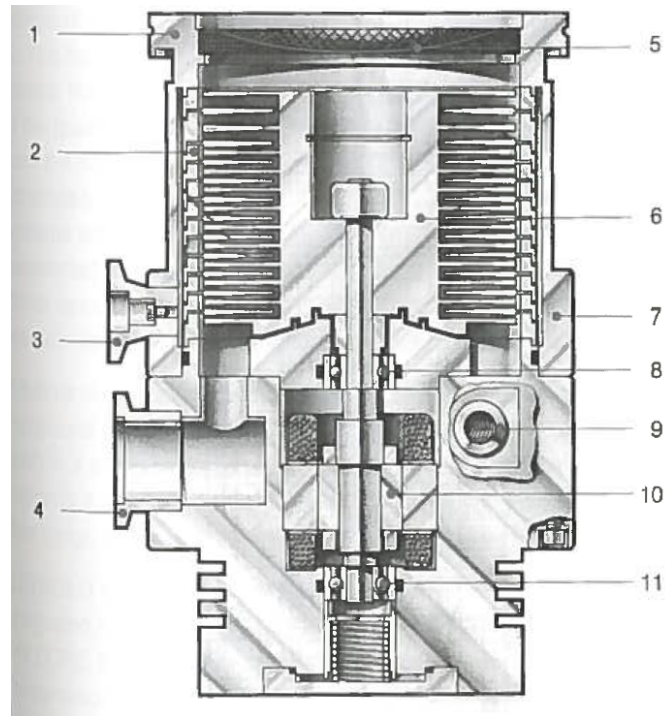
$$S_{\text{eff}} = \frac{Av}{4 \cdot \frac{v}{c} + 1}, \quad (13)$$

missä v on roottorinlavan kehänopeus. Pumpun puristussuhteelle puolestaan pätee [7]

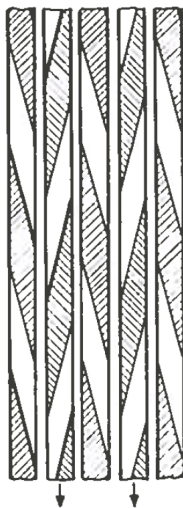
$$K_0 \propto e^{\frac{1}{c}}. \quad (14)$$

Yhtälöistä (13) ja (14) nähdään, että turbopumpun pumppausnopeus riippuu verrattain vähän kaasun moolimassasta, kun taas puristussuhde riippuu siitä voimakkaasti. Kuvista 10 ja 11 nähdään tämän pätevän myös kokeellisesti.

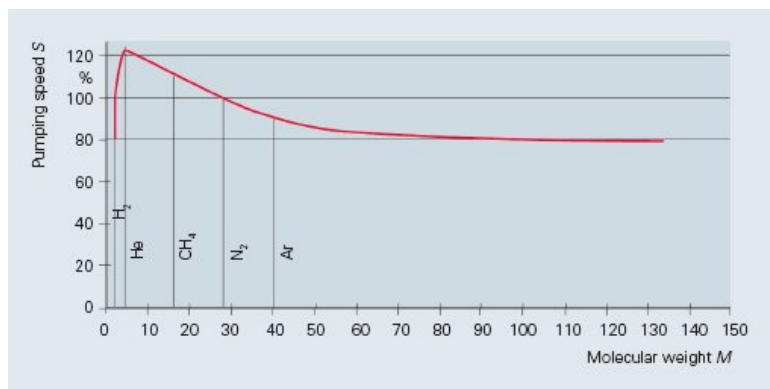
Käytännössä turbopumppu koostuu useista peräkkäisistä puristusasteista, jotka käsittävät root-



Kuva 8. Leybold TURBOVAC 151 -turbomolekylaaripumpun rakenne. 1: imuaukko, 2: staattori, 3: ilmausaukko, 4: poistoaukko, 5: suojaverkko, 6: roottori [16].



Kuva 9. Turbopumpun staattori- ja roottorilavat sivusta katsottuna. [1].



Kuva 10. Turbopumpun pumppausnopeuden riippuvuus kaasun moolimassasta [7].

torin ja staattorin. Yhtä puristusastetta kohti voidaan saavuttaa puristussuhde 5 [2]. Pumpun, jossa on N yhtä suurella puristussuhteella k_1 varustettua astetta, lopulliselle puristussuhteelle saadaan

$$k = (k_1)^N. \quad (15)$$

Mikäli oletetaan, että kaikki pumpun puristusasteet tuottavat samanlaisen puristussuhteen, saadaan yhtälöstä (15) esimerkiksi Leyboldin TURBOVAC 151:lle, jonka rakenne näkyy kuvassa 8,

$$N = \frac{\log k}{\log k_1} = \frac{\log 8 \cdot 10^2}{\log 5} = 12,8,$$

kun käytetään tyypelle ilmoitettua puristussuhdetta $k = 1 \cdot 10^9$ [17]. Kuvasta 8 voidaan laskea TURBOVAC 151:n roottorien määräksi 12.

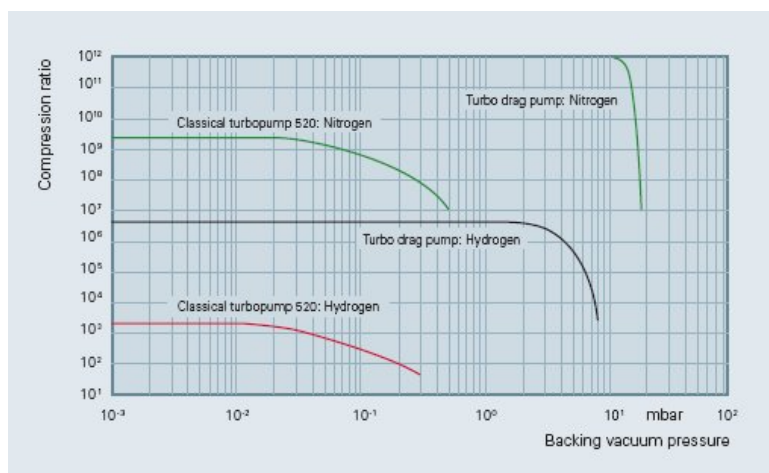
Turbopumppu vaatii esipumpun, joka pitää turbon ulostulon riittävän matalassa paineessa. Tämän esityhjiön paineen (backing pressure) enimmäisarvo annetaan yleensä tyypelle ja se löytyy turbopumppujen teknisistä tiedoista. Esimerkiksi Leyboldin TURBOVAC 151:lle esityhjiön tulee olla vähintään $5 \cdot 10^{-1}$ mbar ja Pfeifferin TMH1000:lle 11 mbar [17] Pfeiffer TMH1000. Turbopumppua käytettäessä myös pumpattavan tyhjiökammion paineelle on rajoituksia. Mikäli pätee [16]

$$\frac{S_v}{V} > 40 h^{-1}, \quad (16)$$

missä S_v on esipumpun pumppausnopeus ja V tyhjiökammion tilavuus, voidaan turbopumppu käynnistää samaan aikaan esipumpun kanssa. Tämä auttaa myös minimoimaan esipumpun mahdollisesti sisältämän öljyn takaisinvirtausta tyhjiökammioon. Muussa tapauksessa kammiota on pumpattava esipumpulla turbon läpi ja turbopumpun käynnistyspaineen voi määrittää yhtälöstä [16]

$$P_{\text{start}} = e^{\frac{S_v}{6V}} \text{ mbar}. \quad (17)$$

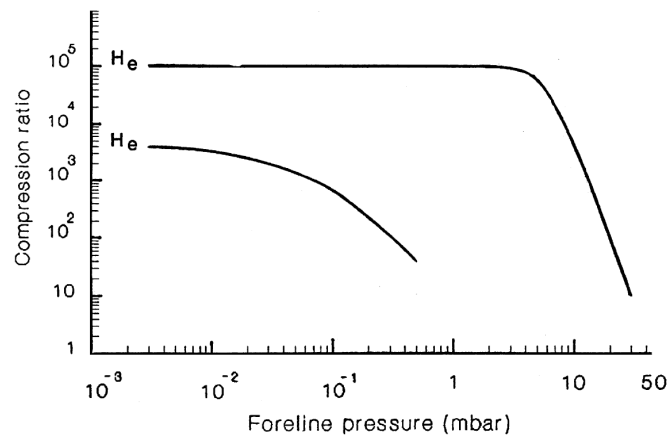
Toinen tapa tyhjiökammion pumppaamiseen ilmanpaineesta suurtyhjiöön on aluksi pumpata kammiota erillisellä esipumpulla. Kun riittävä tyhjiötaso on saavutettu, avataan turbopumpun kammiota yhdistävä porttiventtiili ja jo valmiiksi täydellä kierrosnopeudella käyvä turbopumppu alkaa pumpata tyhjiötä. Modernien turbopumppujen laakerointi on toteutettu magneettisesti siten, että normaalin käytön aikana laakerin pintojen välillä ei ole mekaanista kontaktia. Lisänä oleva kuulalaakerointi toimii pumppua käynnistettäessä ja pysäytettäessä [16]. Nämä seikat huomioon ottaen on ilmeistä, että turbopumppu altistuu vähemmälle mekaaniselle rasitukselle, mikäli sitä ei jouduta pysäyttämään aina tyhjiökammiota ilmattaessa. Tällaisella menettelyllä vältetään myös turbon esipumpun öljyhöyryjen takaisinvirtausongelma pumppausta aloitettaessa ja lopetettaessa. Mikäli tyhjiökammion esipumppaukseen käytetään kiertosiipipumppua, on öljyn takaisinvirtauksen mahdollisuus tietenkin olemassa. Takaisinvirtaus on voimakkaimmillaan molekyylivirtauksen painealueella $10^{-1} - 10^{-3}$ mbar, mikä tulee ottaa huomioon päätettäessä painearvoa, jolla siirrytään käyttämään turbopumppua esipumpun sijaan. Modernit turbopumput pystyvät toimimaan hyvin millibaarin painealueella, joten esipumpun öljyn takaisinvirtaus on minimoitavissa pumppuaseman oikealla käytöllä.



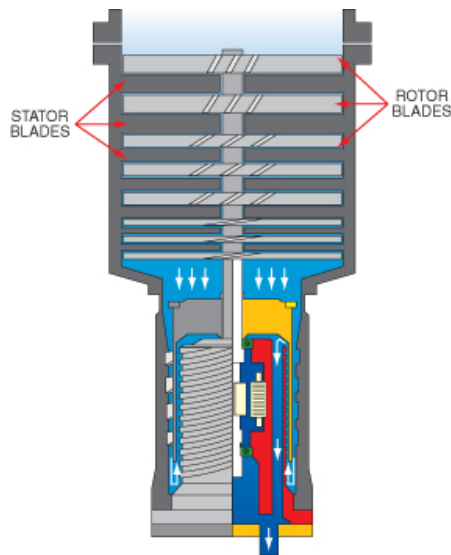
Kuva 11. Tavallisen ja hybriditurbopumpun puristussuhteet [7].

Turbopumpun toiminta vaatii, että pumpussa vallitsee molekylaarinen virtaus [7]. Öljyttömässä tyhjiöjärjestelmässä voidaan haluta käyttää esimerkiksi kalvopumppua turbopumpun esipumppuna. Kalvopumppujen ultiimaattinen paine on millibaariluokassa, joten kaasun virtauskanavan tulee olla hyvin kapea, jotta virtaus olisi taulukon 2 mukaisesti molekylaarista. Tästä syystä moderneissa turbopumpuissa on varsinaisen turbomolekylaaripumpun jälkeen Holweckin aste. Holweckin aste pumppaa kaasua uurretun staattorin ja sileäpintaisen roottorin välissä. Toimintaperiaate on samankaltainen kuin turbomolekylaariasteissa, mutta nyt molekyyileille pyritään antamaan roottorin kiertosuunnan tangentin suuntainen impulssi, joka vie molekyyliä eteenpäin staattorin urassa. Kuvassa 13 on hybridipumppu, jossa turbomolekylaarisen asteen perässä on kaksiosainen Holweckin aste: ensin kaasu virtaa ulkoseinämän muodostaman uurretun staattorin ja sylinterimäisen roottorin välissä alas, sitten roottorin ja sen sisällä olevan staattorin välissä takaisin ylös ja lopulta ulos pumpusta. Koska turbomolekylaariaste on jo puristanut kaasua kokoon huomattavasti, ei Holweckin asteelta vaadita suurta läpäisyä. Tämän vuoksi staattorin ja roottorin väli voidaan tehdä niin kapeaksi, että virtaus on molekylaarista vielä millibaarialueellakin. Tämä mahdollistaa kalvopumpun käyt-

tämisen esipumppuna. Myös puristussuhde kasvaa Holweckin asteen ansiosta pari-kolme kertalukua, kuten kuva 11 osoittaa [7]. Ultimaattinen paine kuitenkin riippuu esityhjiöstä, joten kalvopumppua esipumppuna käytettäessä joudutaan tyytymään huonompaan tyhjiöön. Esimerkiksi Pfeiffer TMH 1000:n ultimaattinen paine kalvopumpulla on $1 \cdot 10^{-8}$ mbar ja kierto-siipipumpulla $5 \cdot 10^{-10}$ mbar [18]. Holweckin asteen tilalla voidaan käyttää muita vastaavia molekylaaripumppuasteita (molecular drag pump). Esimerkiksi muuttamalla neljä viimeistä turbopumpun astetta Gaeden asteeksi saadaan kuvan 12 mukaisesti puristussuhdetta kasvatettua noin kaksi kertalukua, mutta pumpun koko kasvaa vähemmän kuin Holweckin astetta käytettäessä [15].



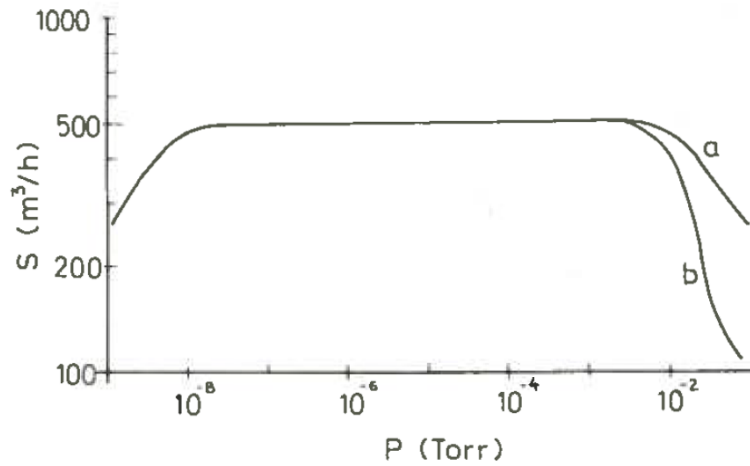
Kuva 12. Turbopumpun neljän viimeisen puristusasteen muuttaminen Gaeden asteeksi nostaa puristussuhdetta. Ylempi käyrä: hybridipumppu, alempi käyrä: pelkkä turbopumppu [15].



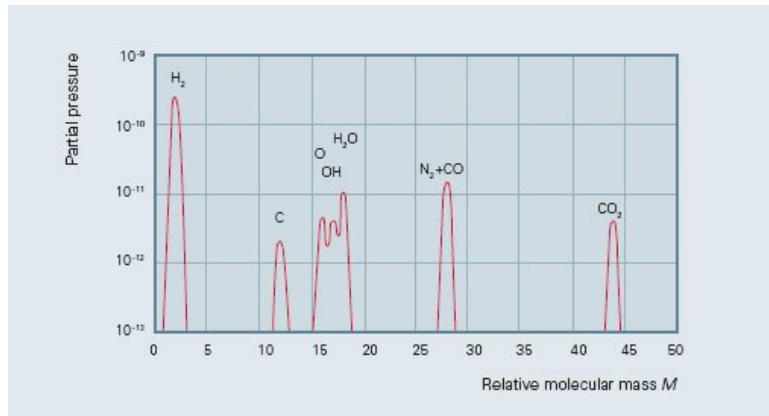
Kuva 13. Turbopumpusta ja Holweckin asteesta koostuva hybridipumppu. Holweckin asteen oikean puolen kuvassa näkyvät staattorin sisällä olevat kanavat [19].

Esipumpun tyyppin lisäksi myös esipumpun pumppausnopeus on valittava siten, että saavutetaan haluttu turbopumppuaseman suorituskyky. Vaadittavaa esipumpun pumppausnopeutta määritettäessä on muistettava, että läpäisy pysyy vakiona läpi koko pumppuaseman, kuten luvussa 3 todettiin. Läpäisyn määritelmästä (11) havaitaan, että vakiopumppausnopeudella läpäisy on suoraan verrannollinen paineeseen. Näin ollen esipumpun koko vaikuttaa sitä enemmän

pumppuaseman ominaisuuksiin mitä huomompaa tyhjiötä pumpataan. Esipumpun täytyy pystyä pitämään esityhjiön paine turbopumpulle sallituissa rajoissa tai turbon kierrosnopeus ja täten myös pumppausnopeus laskee. Esipumpun pumppausnopeuden vaikutus suurtyhjiötä huonommilla tyhjiöalueilla on hyvin nähtävissä kuvasta 14, jossa on esitetty tyypillisen $500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ turbopumpun pumppausnopeus paineen funktiona eri esipumpuilla.



Kuva 14. Turbopumpun pumppausnopeus. Esipumpun pumppausnopeus a: $S_V = 45 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, b: $S_V = 10 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ [1].



Kuva 15. Turbopumpulla pumpatun tyhjiökammion jäännöskaasun koostumus. [7].

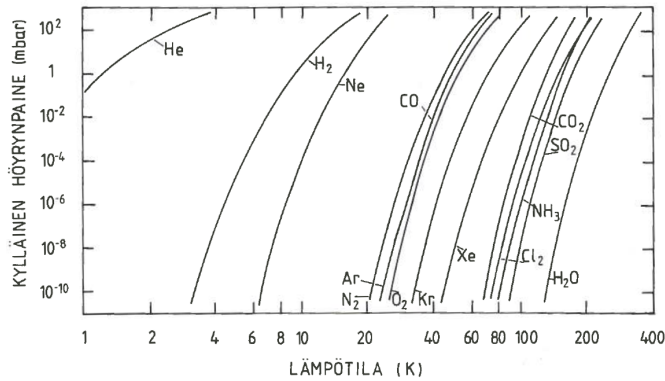
Kuva 15 esittää tyypillistä jäännöskaasun koostumusta turbopumpulla pumpatussa tyhjiökammiossa. On syytä huomata vedyn suuri osapaine jäännöskaasussa, sillä esimerkiksi TMH 1000:n puristussuhde vedylle on vain $4 \cdot 10^4$. Ultratyhjiölaitteistoissa onkin oleellista valita turbopumpulle esipumppu, joka pääsee matalaan vedyn osapaineeseen eli joka pumppaa vetyä hyvin. Käyttämällä turbon esipumppuna kiertosiipipumppua päästään 10^{-11} mbar luokan ultraattiseen paineeseen [16].

3.3 Kryopumppu

Kryopumppu poikkeaa edellä esitetyistä pumpuista siinä, että se ei purista kaasua korkeampaan paineeseen ja siirrä sitä pois tyhjiötilavuudesta vaan sitoo sen itseensä. Tällä tavoin kaasumolekyylien määrä astiassa vähenee, mikä aiheuttaa ideaalikaasun tilanyhtälön (2) mukaisesti

paineen pienenemisen. Tällaisella periaatteella toimivia pumppuja kutsutaan sieppauspumppuiksi. Muita sieppauspumpputyyppejä ovat esimerkiksi höyrystyspumput, ionipumput ja sorptiopumput [2].

Kryopumppu hyödyntää kolmea pumppausmekanismia: kryokondensaatiota, kryosorptiota ja kryoloukkuuntumista, jotka kaikki perustuvat kaasumolekyylejä sitovien pintojen matalaan lämpötilaan. Kryopumpun pinnoilla tavattavat matalimmat lämpötilat ovat luokkaa 10 - 20 K. Näihin lämpötiloihin pääseminen vaatii heliumin käyttöä, sillä sen kiehumispiste on noin 4 K kun toisen yleisesti jäähdtykseen käytetyn kaasun, typen, kiehumispiste on noin 77 K.



Kuva 16. Tyhjiökammiossa yleisesti esiintyvien aineiden höyrinpainekäyriä [2].

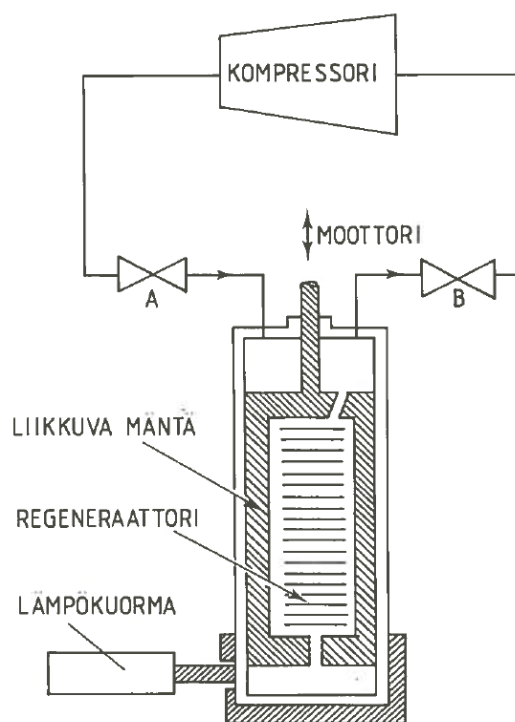
Kryokondensaatiossa pinnan lämpötila on niin matala, että sen läheisyydessä olevan kaasun osapaine on suurempi kuin kyseisen kaasun kylläinen höyrinpaine pinnan lämpötilassa. Tällöin kaasua kondensoituu pinnalle nesteeksi tai härmistyy kiinteäksi aineeksi, kunnes sen osapaine on kylläisen höyrinpaineen suuruinen. Kuvasta 16 nähdään, että alle 20 K lämpötilassa oleva pinta kondensoi kaikkia kaasuja heliumia, vetyä ja neonia lukuun ottamatta niin, että niiden osapaineet ovat alle 10^{-10} mbar. Kryokondensaatiolla kerralla pumpattavissa olevaa kaasumäärää rajoittaa vain lämpökontakti kylmän pinnan ja sen päälle muodostuneen kondenssikerroksen pinnan välillä.

Kryosorptio toimii samalla periaatteella kuin nestetyypen lämpötilassa käytettävä sorptiopumppu ja sen käytön päätarkoituksena on päästä eroon niistä keveistä kaasuista, jotka eivät pumpaudu tehokkaasti kryokondensaatiolla. Nestemäisellä heliumilla jäähdtytylle pinnalle sijoitetaan erittäin huokoista zeoliittia tai aktiivihiliä, johon kaasut adsorpoituvat. 20 K:n lämpötilassa aktiivihili kykenee adsorpoimaan noin 200 mbar · l vetykaasua grammaa kohti. Kun kryosorptioaineen kapasiteetti tulee täyteen, se täytyy regeneroida lämmittämällä. Tällöin kaasut pääsevät desorptoitumaan ja ne voidaan pumpata ulos pumpusta.

Kryoloukkuuntumisessa kylmälle pinnalle jo adsorpoitunut kaasu tehostaa jonkin toisen kaasun adsorptiota. Esimerkiksi vesihöyry tehostaa argonin ja argon vedyn pumppausta. Kryoloukkuuntumisen fysikaalisena toimintamekanismina pidetään loukkuuntuvan kaasun jäämistä kylmälle pinnalle kondensoituvista ja kiteytyvistä höyryistä muodostuvan kiderakenteen huokosiin [1].

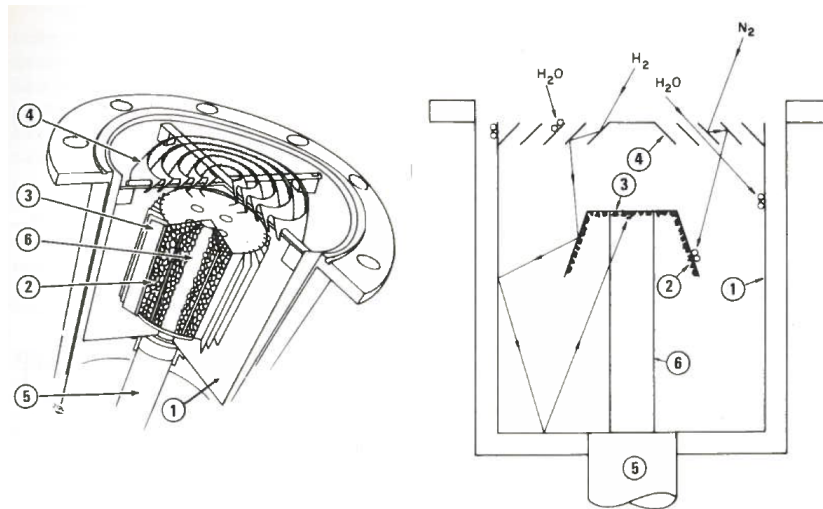
Modernit kryopumput ovat yleensä kompressorikäyttöisiä, eli nestemäisen heliumin sijasta jäähdtytys hoidetaan lämpöpumpulla, jonka kylmäaineena on heliumia. Järjestelmän toiminta-periaate on samankaltainen korkeammilla lämpötila-alueilla toimivien lämpöpumppujen kans-

sa. Pumpussa lämpöä sitonut heliumkaasu johdetaan kompressoriin, joka paineistaa kaasun. Tässä yhteydessä heliumkaasun sekaan suihkutetaan pieni määrä öljyä, mikä auttaa kaasun jäähtymistä lauhduttimessa. Korkeapaineinen kaasu johdetaan lauhduttimeen, jossa se jäähtyy luovuttaen lämpöenergiaansa lämmönvaihtimen kautta jäähdytysveteen. Korkeapaineinen ja jäähtynyt kaasu johdetaan öljynsuodattimen läpi pumppuun, jossa se pääsee laajenemaan itseensä lämpöä sitoen [20]. Pumpun toimintaa tehostaa pumpun kylmäpäässä sijaitseva lämmönsiirrinkennostolla eli regeneraattorilla varustettu siirtomäntä. Kuvan 17 mukaiseen kylmäpäähän päästetään kaasua venttiilistä A männän ollessa alakuolokohdassaan. Männän liikkuessa ylöspäin helium virtaa männän ja sen sisällä olevan regeneraattorin läpi. Kun venttiili A suljetaan ja venttiili B avataan hieman ennen männän yläkuolokohtaa, pääsee kaasu laajenemaan. Mäntä liikkuu alaspäin ja syrjäyttää lopun heliumin, joka virtaa kompressoriin. Koska kuvattunkaltainen kryojäähdytin pääsee vain 30 - 60 K lämpötiloihin, on tehokasta kryopumpusta varten liitettävä kaksi kryojäähdytintä sarjaan. Esimerkiksi CTI-Cryogenicsin On-Board kryopumpun kylmäpään ensimmäisen asteen lämpötila on 60 - 120 K ja toisen asteen 10 - 20 K.



Kuva 17. Kompressorikäyttöisen kryojäähdytimen rakenne [2].

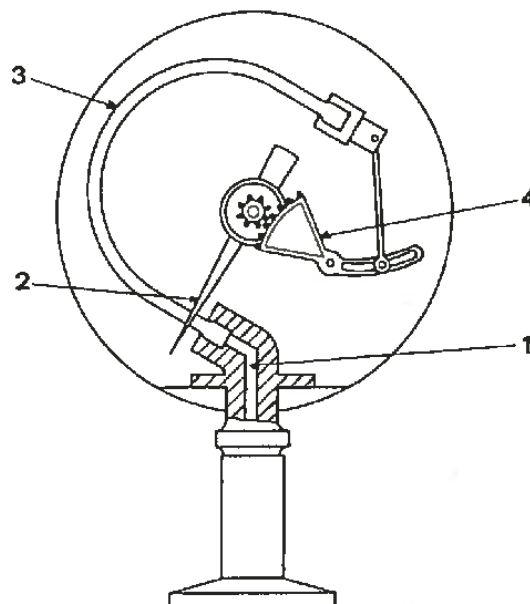
Kuvasta 18, jossa näkyy kryopumpun rakenne, havaitaan, että tyhjiökammioista päin katsottuna kryopumpun ensimmäinen pumppaava pinta on ensimmäisen jäähdytysasteen kryokondensaatiopumppu. Se kondensoi useita kaasuja, erityisesti vesihöyryä. Tällaisella jäähdytysasteiden järjestyksellä varmistetaan, että vesihöyry jää enimmässä määrin ensimmäiseen jäähdytysasteeseen eikä täytä toista jäähdytysastetta, jonka tehtävänä on pumpata kylmempää lämpötilaa vaativia keveämpiä kaasuja. Toisen asteen kryokondensaatiopumppu pumppaa kaikkia muita kaasuja paitsi heliumia, vetyä ja neonia. Näitä pumpataan toisen asteen kryosorptiopumpulla [2].



Kuva 18. Kryopumpun rakenne. 1: 1. jäähdytysasteeseen kiinnitetty kylmäpinta, 2: 2. asteen kryosorptiopumppu, 3: 2. asteen kryokondensaatiopumppu, 4: 1. asteen kryokondensaatiopumppu, 5: 2. asteen kylmäsoarmi, 6: 1. asteen kylmäsoarmi [2].

4 Painemittarit

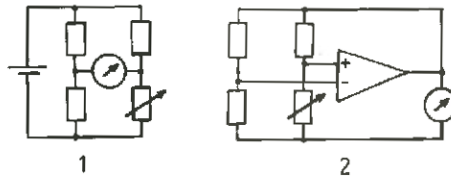
Tyhjiön mittaamiseen käytettäviä mittareita on lukuisa joukko. Mittarin valintaan vaikuttaa ensisijaisesti tyhjiöalue, jolla mittarin halutaan toimivan. Varsinkin hyvää suurtyhjiötä huonompaa tyhjiötä mitattaessa halutulle mitta-alueelle löytyy usein eri tekniikoilla toteutettuja mittalaitteita. Tällöin valintaan vaikuttavia seikkoja voivat olla esimerkiksi mittaustarkkuus, hinta ja mittarityypin käyttökokemus.



Kuva 19. Bourdonkarimanometrin rakenne. 1: tyhjiölinja, 2: osoitin, 3: bourdonkaari, 4: nivelmekanismi [2].

Yksinkertaisimmat tyhjiömittarit ovat mekaanisia. U-putkimanometri eli elohopeamanometri on vanha mittarityyppi, jolla voidaan mitata painetta ilmanpaineesta 100 mbar asti. Paine luetaan elohopeapatsaan korkeudesta, mistä juontaa juurensa elohopeamillimetrin eli torrin käyttö

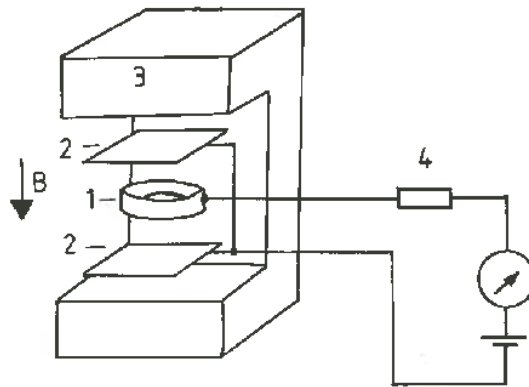
paineen yksikkönä. Bourdonkaari on kuvan 19 mukainen, yleisesti käytössä oleva mekaaninen painemittari. Bourdonkaaren toinen pää on suljettu ja toinen yhdistetty tyhjiöastiaan, jolloin sen sisällä vallitsee tyhjiöastian paine. Ilmanpaineen ja tyhjiöastian paineen välisestä paine-erosta johtuva voima aiheuttaa kaaressa muodonmuutoksen, mikä voidaan muuntaa osoittimen liikkeeksi asteikolla. On syytä huomata, että toisin kuin elohopeamanometri, bourdonkaari mittaa painetta suhteessa ilmanpaineeseen. Se ei näin ollen sovellu tarkkoihin painemittauksiin [2]. Bourdonkaaren hyviä puolia ovat helppolukuisuus sekä erityisesti riippumattomuus sähkövirrasta.



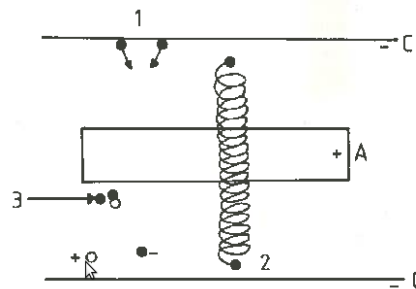
Kuva 20. Piranimittarin periaatteellinen piirikaavio. 1: vakiojännitemenetelmä, 2: vakioresistanssimenetelmä [2].

Piranimittarit ovat sähköisiä painemittareita, joissa mittaus perustuu jäännöskaasun lämmönjohtavuuteen. Piranianturissa on lämmitettävä vastuslanka, josta lämpö johtuu anturin seinämiin. Lämmönjohtavuus on riippuvainen jäännöskaasun molekyyliitiheydestä, kun molekyylien vapaa matka on suurempi kuin vastuslangan ja seinämän välimatka. Toisaalta riittävän matalassa paineessa jäännöskaasun lämmönjohtavuus on niin pieni, että lämpösäteilyn vaikutus alkaa olla merkittävä. Nämä ilmiöt rajaavat piranien mitta-alueen välille $10^{-4} - 10^3$ mbar. Tarkkoja, virheeltään $\pm 10 - 30\%$ olevia tuloksia saadaan välillä $10^{-3} - 10$ mbar [2]. Piranianturin vastuslanka kytketään kolmen muun vastuksen kanssa Wheatstonen siltaan. Kuvan 20.1 mukaisessa kytkennässä siltaan syötetään vakiojännite. Silta on tasapainotettu joko ilmanpaineessa tai selvästi mitta-alueen ulkopuolella olevassa matalassa paineessa [1]. Vastuslangan lämpötilanmuutoksesta johtuva resistanssin muutos saa sillan epätasapainoon ja sähkövirran kulkemaan galvanometrini kautta. Galvanometrini lukema on paineeseen verrannollinen mutta vastuslangan lämpötila vaikuttaa mittarin herkkyyteen. Vakiojännitemenetelmää käyttävä pirani on herkimmillään matalissa paineissa. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää kuvan 20.2 mukaista järjestelyä, jossa sillan haarojen keskipisteet pidetään samassa jännitteessä differentiaalivahvistimen avulla. Tällöin siltaan syötetään tehoa siten, että vastuslangan resistanssi pysyy samana kuin sillan muiden vastusten resistanssi. Tehonkulutus on verrannollinen jäännöskaasun lämmönjohtavuuteen ja täten myös paineeseen.

Penningmittarit ovat ionissatiomittareiden alatyyppejä. Ionisaatiomittarin anturissa jäännöskaasua ionisoidaan sähkökentässä. Mittaamalla ionisaation synnyttämä ionivirta saadaan anturissa vallitseva jäännöskaasun paine selville. Muunnos ionivirrasta paineeksi sisältää muun muassa oletuksen jäännöskaasun ionisaatiovoimakkuudesta, minkä vuoksi painelukemaa voi tarkoissa mittauksissa olla syytä korjata jäännöskaasun koostumuksen mukaan korjausgraafin avulla. Penninganturin rakenne on kuvan 21 mukainen. Penninganturit ovat kylmäkatodiantureita, mutta hetkellisesti käytettävä hehkukatodi auttaa anturin käynnistyksessä. Katodien ja anodin välinen jännite, joka on luokkaa $2 - 10$ kV, kiihdyttää katodilta emittoituvia elektroneja kohti rengasmaista anodia. Anodin ohittamisen jälkeen sähkökenttä alkaa hidastaa elektroneja ja kääntää ne lopulta takaisin kohti anodia. Elektronin aikaansaaman ionisaation määrä on verrannollinen sen kaasussa kulkemaan matkaan. Sähkökentän kanssa yhdensuuntainen,



Kuva 21. Penninganturin kaaviokuva. 1: anodi, 2: katodi, 3: kestmagneetti, 4: suojavastus [2].



Kuva 22. Elektronien ratoja penninganturissa. 1: elektroni irtoaa katodilta, 2: elektroni kääntyy takaisin kohti anodia, 3: elektroni ionisoi jäännöskaasumolekyylin [2].

0,05 – 0,2 T : n suuruinen magneettikenttä muuttaa elektronien radat spiraalimaisiksi pidentäen näin elektronien kaasussa kulkemaa matkaa kuvan 22 mukaisesti ja lisäksi ionisaatiota. Penninganturin tyypillinen mittausalue on noin $10^{-6} - 10^{-2}$ mbar. Mittausalueen alarajalla purkaus sammuu ja ylärajalla virran riippuvuus paineesta lakkaa [2]. Moderneissa kaupallisesti saatavilla olevissa antureissa mittausalueen alarajaa on saatu laskettua huomattavasti. Esimerkiksi Pfeiffer IKR 251:n mittausalueeksi ilmoitetaan $0,01 - 2 \cdot 10^{-9}$ mbar [21]. Käytännössä paineen yläraja on alempana, sillä yli $5 \cdot 10^{-3}$ mbar paineessa katodille osuvat ionit aiheuttavat katodimetallin voimakasta sputteroitumista. Nämä epäpuhtaudet pienentävä purkausvirtaa ja mittari alkaa näyttää todellista painetta alempia lukemia. Katodien sputteroitumisesta aiheutuvaa haittaa voidaan ehkäistä pitämällä penninganturit jännitteettöminä tyhjiökammioita ilmattaessa [2]. Nykyisin on kaupallisesti saatavilla kaksoisantureita, jotka siirtyvät piranista penningiin tyhjiökammion paineen laskettua riittävän alas. Esimerkiksi yhdellä penning- ja yhdellä piranianturilla varustetun Pfeiffer DualGauge TPG 262, 1 TPR 280, 1 IKR 251 -anturin mittausalueeksi ilmoitetaan $2 - 2 \cdot 10^{-9}$ mbar [22]. Edistyneimpien anturien tapauksessa mittausalue alkaa ilmanpaineesta. Sähköiset painemittarit voidaan yleensä liittää tietokoneeseen esimerkiksi sarjaportti- tai usb-liitännän avulla ja käyttää niistä saatua painetietoa automaatio- ja etävalvontajärjestelmissä.

Taulukko 4. DN-standardoidut tyhjiötekniikan laippakoot [2]

Nimellinen sisähalkaisija [mm]	
ISO-DN-KF	ISO-DN-K
10	63
16	100
25	160
40	200
50	250

5 Venttiilit, laipat ja tiivisteet

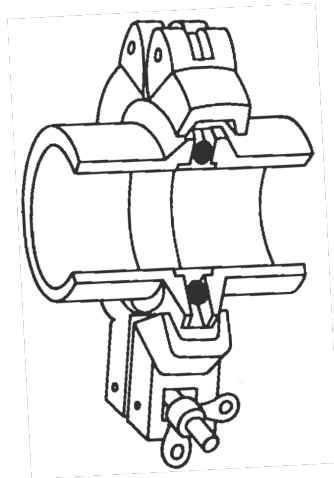
Tyhjiölaitteiston eri komponentit ovat yhteydessä toisiinsa yhdysputkien välityksellä. Nämä on muun tyhjiölaitteiston tapaan valmistettu usein ruostumattomasta teräksestä. Yleisimmin putken poikkileikkaus on ympyrä, mutta neliskanttisiakin putkia voidaan käyttää. Liikkeen läpivihti tyhjiöön toteutetaan usein käyttämällä paljeputkia. Paljeputkien käyttö yhdysputkina mahdollistaa myös tyhjiökomponenttien liikuttelun toistensa suhteen.

Tyhjiökomponenttien väliset avattavat liitokset toteutetaan laippaliitoksina. Laippa on tyhjiökomponentin liitosputken päässä oleva levennös, jonka toista laippaa vasten tuleva pinta on sileä. Liitettävien komponenttien laipat asetetaan vastakkain ja tiiviste niiden väliin. Kun liitos kiristetään, tiiviste puristuu kokoon ja tiivistää liitoksen. Laippatyyppejä on useita ja käytettävän laipan valintaan vaikuttavat ainakin vaadittu tyhjiötaso, liitoksen avaamistiheys sekä tyhjiökomponenttien saatavuus kyseisellä laipalla. Laipoissa käytetään yleisesti taulukon 4 mukaisia standardikokoja.

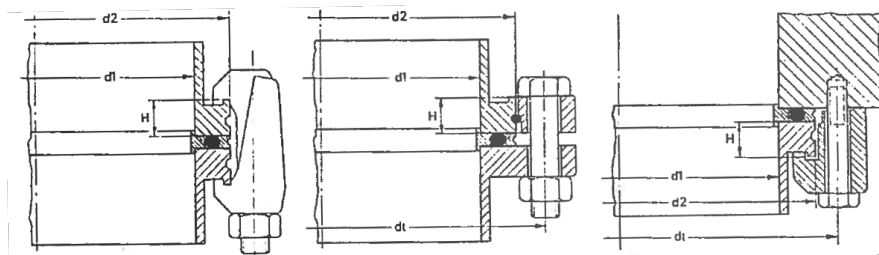
Käytettävän tiivisteiden muoto ja koko määräytyy käytettävän laipan mukaan, mutta joidenkin laippatyyppeiden kanssa on mahdollista käyttää joko elastomeeri- tai metallitiivisteitä. Elastomeeritiiviste eli O-rengas on tyhjiösovelluksissa yleensä Viton-kumia. Sen merkittävänä etuina ovat uudelleenkäytettävyys ja edullinen hinta. Kaasun irtoaminen tyhjiötilavuuteen on kuitenkin voimakasta eivätkä elastomeerit kestä korkeita lämpötiloja, mikä estää tyhjiölaitteiston tehokkaan paahtamisen ultratyhjiöalueelle pääsemiseksi. Kahdentoista tunnin ajan lämpötilassa 200 °C paahtetusta Vitonista irtoaa saman verran kaasua kuin saman ajan ilman paahtoa pumppauksessa olleesta happivapaasta OFHC-kuparista [2]. Metallitiivisteinä käytetään ruostumatonta terästä pehmeämpiä metalleja, pääasiassa alumiinia, OFHC-kuparia, indiumia, hopeaa ja kultaa. Metallitiivisteet kestävät elastomeeritiivisteitä korkeampia paahtolämpötiloja: alumiini 300 °C ja kulta sekä kupari 450 °C, mutta ovat niitä kalliimpia ja kertakäyttöisiä [2].

Kuvan 23 mukaista pikalaippaa eli ISO-DN-KF käytetään yleisesti pienten, sisähalkaisijaltaan 10 – 50 mm olevien putkien liittämiseen. Tällaisia ovat esimerkiksi esipumppujen putket sekä instrumentointi. Pikalaippojen kanssa käytetään tavallisesti O-rengasta keskitysrenkaalla, mutta myös metallitiivisteiden käyttäminen on mahdollista. Laipan keskitysrenkaalle tarkoitettu syvennys takaa tiivisteiden asettumisen paikoilleen. Kokojen 10 ja 16 laippojen ulkomitat ovat samat, joten ne voidaan liittää käyttämällä erikoisvalmisteista keskitysrenkasta, jonka toinen puoli on mitoitettu koolle 10 ja toinen koolle 16. Liitos kiristetään längillä.

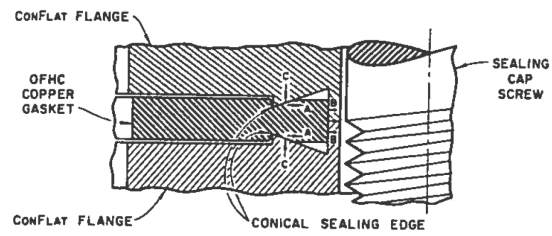
Suurempien laippakokojen yhteydessä käytetään kynsilaiippoja tai ylimenolaiippoja. Kuvan 24 mukaisesti laippojen välissä on O-rengas keskitysrenkaalla. Liitos kiristetään laippojen ulkopintojen uriin tarttuvilla kynsiruuveilla, joiden määrän on syytä olla riittävä tasaisen kiristyksen



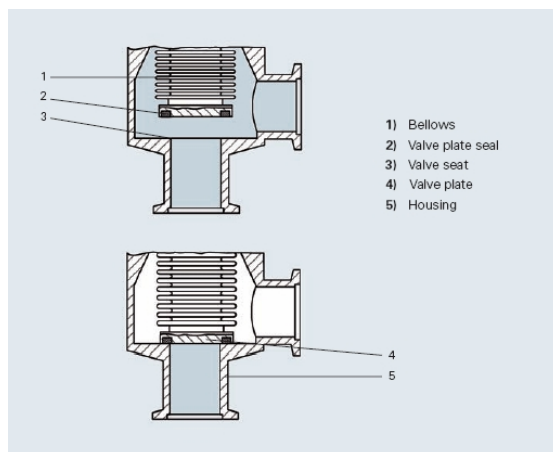
Kuva 23. Pikalaippa [2]



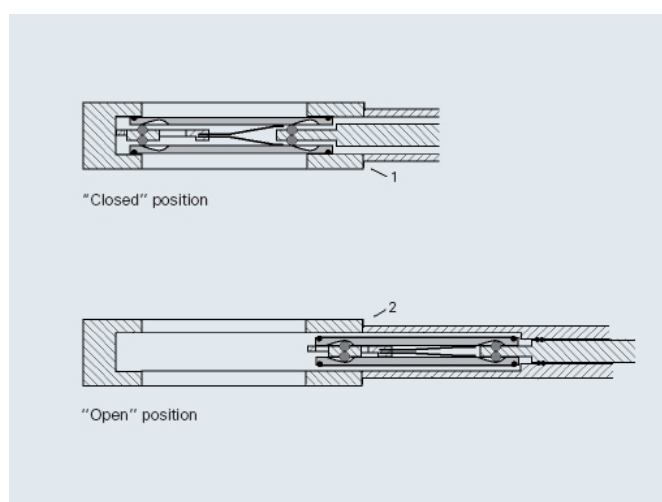
Kuva 24. Erilaisia kynsilaiippoja [2]



Kuva 25. Conflat-laipan rakenne [2]



Kuva 26. Kulmaventtiilin rakenne [7]



Kuva 27. Porttiventtiilin rakenne [7]

aikaansaamiseksi. ISO-mallimerkintänä on ISO-DN-K. Mikäli keskitysrenkas on epäkäytännöllinen laipan muodon tai suuren koon vuoksi, voidaan tiivisteelle koneistaa ura laipan pintaan.

Ultratyhjiösovelluksissa kaikkien ja hyvän suurtyhjiönkin alueella mahdollisimman monien laippaliitosten on oltava metallitiivisteisiä. Conflat- eli CF-laippa on tällöin suosittu laippatyyppejä. Tiiviste on valmistettu OFHC-kuparista ja laipan kartiomainen 'kynsi' pureutuu siihen laippaa kiristettäessä kuvan 25 mukaisesti. Tiiviste voidaan käyttää kahdesti kiristämällä liitos ensimmäisellä kerralla puoleen väliin ja vasta toisella käyttökerralla laippa laippaa vasten.

Tyhjiöjärjestelmissä käytettyjä venttiilityyppejä on useita. Yleisesti käytetään kuvan 26 mukaisista kulmaventtiileistä, josta on olemassa myös suoralla rungolla oleva versio. Tässä venttiilityypissä elastomeeritiivisteistä venttiililautasta liikutetaan mekanismilla, jonka paljeputki erottaa tyhjiötilavuudesta. Ydinfysiikan sovelluksissa tarvitaan usein venttiilejä, joiden läpi voidaan ajaa ionisuihkua venttiilin ollessa auki. Tällaisia venttiilejä, joissa reitti sisäänmenosta ulostuloon on suora ja esteetön, kutsutaan porttiventtiileiksi. Kuvassa 27 on esitetty rebound-tyyppisen porttiventtiilin mekanismi. Huomionarvoista on, että sulkumekanismi vetäytyy kokonaan pois venttiiliaukosta venttiilin ollessa auki. Porttiventtiilien konduktanssit ovat huomattavan suuria, joten niitä käytetään myös tyhjiöpumppujen erottamiseen tyhjiötilavuudesta. Eri käyttö-

tarkoituksiin tarkoitettujen porttiventtiilien välillä on eroja niiden tiiviydessä, suurimmassa paineessa, jota vastaan venttiilin saa avata, sekä suurimmassa suljetun venttiilin yli sallitussa paine-erossa.

6 MARA-separaattorin rakenne

MARA (Mass Analyzing Recoil Aparatus) on Jyväskylän yliopiston kiihdytinlaboratorion laajennuksen myötä IGISOL-laitteistolta vapautuneeseen tilaan rakenteilla oleva massaseparaattori. Sen tutkimustavoitteiksi on määritelty muun muassa protoni- ja alfahajoamisen tutkiminen ^{100}Sn -nuklidin ympäristössä, peilikuvaytimet sekä super- ja hyperdeformoituneet ytimet [23].

Nyt käytössä oleva kaasutäytteinen rekyyliseparaattori RITU (Recoil Ion Transport Unit) on suunniteltu raskaiden reaktiotuotteiden erottamiseen. [24] Kaasutäytteisille separaattoreille on ominaista huono massaresoluutio ja suuri läpäisy, joka on RITUn tapauksessa jopa 60%. [23] RITUn ionioptinen konfiguraatio kohtiosta fokaalitasolle on QV MD QH QV, missä QV ja QH ovat pysty- ja vaakasuunnassa fokuoivia magneettisia kvadrupoleja ja MD varsinaisen separoinnin tekevä magneettinen dipoli. Magneettinen dipoli separoi hiukkaset magneettisen jäykkyyden suhteen. Vastaava suure, sähköinen jäykkyys, voidaan määritellä sähkökentän suhteen. Magneettiselle ja sähköiselle jäykkyydelle pätee [25]

$$B\rho = \frac{p}{q} = \frac{mv}{q} \text{ ja} \quad (18)$$

$$E\rho = \frac{pv}{q} = \frac{2E_k}{q}, \quad (19)$$

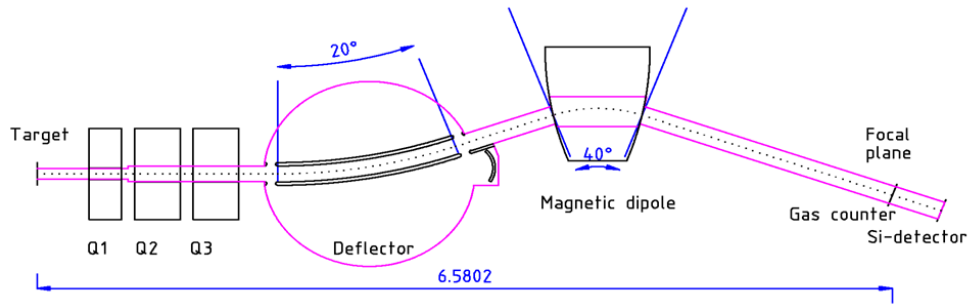
missä q on ionin varaustila ja E_k sen liike-energia.

Lisäksi kaasutäytteisten separaattorien kohdalla pätee [26]

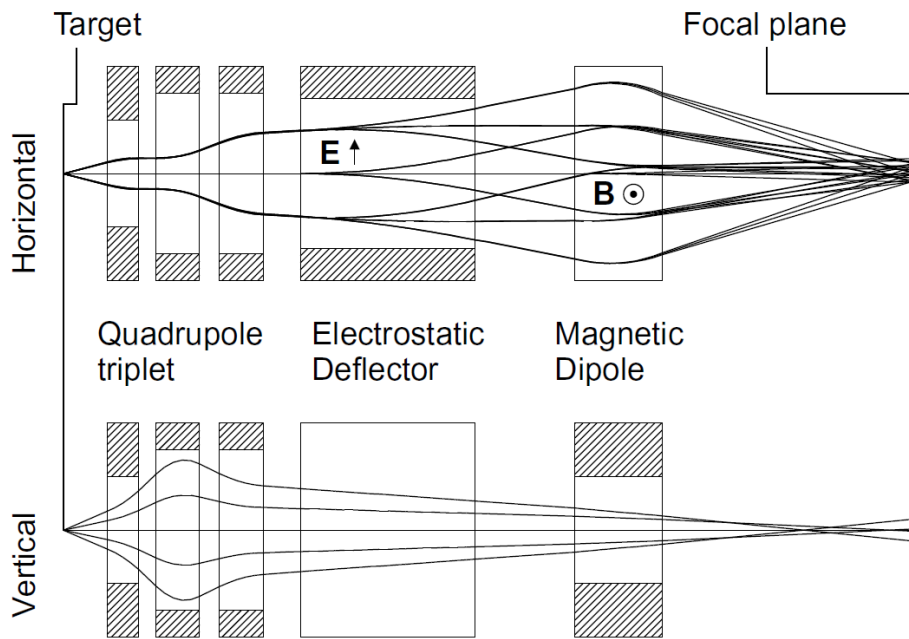
$$B\rho \propto \frac{A}{Z^{1/3}}. \quad (20)$$

Yhtälöstä (20) nähdään, että magneettinen jäykkyys riippuu hiukkasen massa- ja järjestysluvusta. Tämä aiheuttaa ongelmia esimerkiksi käänteisen kinematiikan fuusiohyrystysreaktioissa, joissa kevyeen kohtioon ammutaan raskasta suihkua. Ammushiukkasten magneettinen jäykkyys voi tällöin olla niin lähellä reaktiotuotteiden jäykkyyttä, että primäärisuihkun luotettava erottaminen käy mahdottomaksi.

MARAN, joka on tyhjiöseparaattori, ionioptiset komponentit ovat QQQ ED MD, missä ED on sähköinen dipoli ja Qt magneettisia kvadrupoleja. MARAn rakenne on nähtävissä kuvassa 28 ja oleellimmat tunnusluvut on esitetty taulukossa 8. Suihkulinjassa, joka tuo suihkun kiihdyttimeltä kohtiolle, on XY-magneetti ja kaksi kvadrupolia suihkun kohdistamista varten. Suihkulinjaa pumpataan kahdella turbopumpulla. Kohtiokammio on ainakin alkuvaiheessa neliskulmainen ja sitä pumpataan yhdellä turbopumpulla. Kohtion turbopumppu voidaan siirtää pumppaamaan suihkulinjaa mikäli tulevaisuudessa siirrytään käyttämään RITUn nykyisen kohtiokammion tapaista kammiota, joka mahdollistaa mittausjärjestelmien sijoittamisen kohtion ympärille.



Kuva 28. MARA-separaattorin kaaviokuva [27].

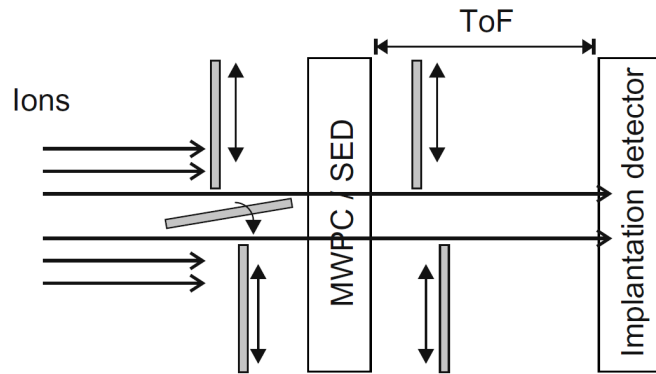


Kuva 29. Ionien ratoja MARAssa kolmella eri energialla, massalla ja tulokulmalla [24].

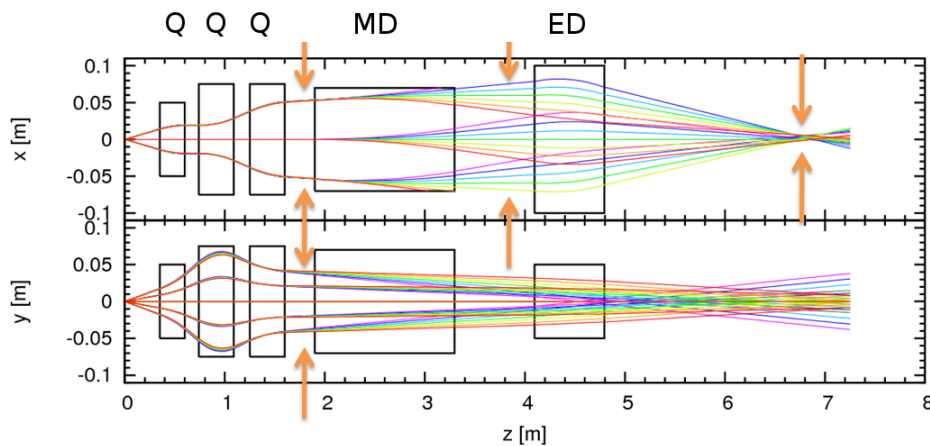
Sähköinen dipoli erottelee hiukkaset sähköisen jäykkyydenn perusteella. Sähköistä dipolia käytetään erottamaan toisistaan korkeaenerginen primäärisuihku ja reaktiotuotteet. Tätä tarkoitusta varten sähköisen dipolin anodi on jaettu kahtia ja anodin taakse on sijoitettu suihkunsieppaaja (beam dump). Tyhjiöseparaattoreissa yhtälöiden (18) ja (19) q on ionin varaustila, koska separaattorissa ei ole täytekaasua, jonka kanssa ionit voisivat vaihtaa varausta. Näin ollen ionit läpäisevät separaattorin vain tietyillä varaustiloilla.

MARAN kulma-akseptanssi on normaalikäytössä 10 msr, mutta se voidaan kaksinkertaistaa kääntämällä kvadrupolien napaisuudet. Tällöin suurin tutkittavien ionien magneettinen jäykkyys laskee normaalista 1,0 Tm arvoon 0,75 Tm. Kuvasta 29 voidaan nähdä, ettei ionien paikka fokaalitasolla riipu niiden energiasta. Tämä ensimmäisen kertaluvun energiadisersion katoaminen on saatu aikaan magneettisen dipolin ja fokaalitason välimatkan sopivalla mitoituksella [24]. Aberraatioita eli kuvausvirheitä pyritään vähentämään kaareuttamalla magneettisen dipolin kenttää sen sisäänmenossa ja ulostulossa.

MARAN fokaalitason suunniteltu instrumentointi on esitetty kuvassa 30. Liikuteltavan massarakosysteemin (mass slit system) tarkoituksena on pysäyttää massaltaan ei-toivotut hiukkaset



Kuva 30. MARAn fokaalitason instrumentointi [24].



Kuva 31. Ionien ratoja MARAssa. Nuolet merkitsevät rakosysteemien paikkoja [24].

ennen fokaalitasoa. Simulaatiossa esimerkiksi massaluvun 110 tapauksessa optimaalisesti säädetty rakosysteemi pienentää pii-ilmaisimen laskentataajuutta 80%, mutta mielenkiinnon kohteena olevan isobaarin läpäisy laskee 34 prosentista 28 prosenttiin eli vain 18% [24]. MARAn kaikkien rakosysteemien paikat on merkitty kuvaan 31 nuolin.

Kuvan 30 mukaisesti fokaalitasolla on läpäisy- ja implantaatioilmaisimet, joista kumpikin on paikkaherkkä. Implantaatioilmaisimina käytetään piivalmisteisiä DSSSD- ja PIN-puolijohdeilmaisimia. Läpäisyilmaisimena käytettäne ainakin aluksi kaasutäytteistä monilankaista verrannollisuusilmaisinta (MWPC). Myös sekundäärielektronien eli SED-ilmaisimen käyttö on mahdollista. SED-ilmaisimen etuna verrannollisuusilmaisimeen on, että SEDissa hiukkaset kulkevat vain yhden (hiili)kalvon läpi, kun kaasulaskurissa läpäistävänä on kaksi mylarikkunaa. SED-ilmaisimessa käytetään tavallisesti kaasulaskuria elektronien havaitsemiseen, joten se ei ole tyhjiötekniikan kannalta merkittävästi pelkkää kaasulaskuria parempi ratkaisu. Kaasutäytteisen ilmaisimen ikkunoiden vuodosta aiheutuvasta kaasukuormasta päästäisiin kokonaan eroon käyttämällä SED-ilmaisimen yhteydessä mikrokanavalevyä (MCP) elektronien havaitsemiseen. Mikrokanavalevyjen käytön kannalta on ongelmallista saatavilla olevien MCP-ilmaisimien pieni koko.

MARAn sähköisen dipolin elektrodien välissä vallitsee voimakas, $36 \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$ sähkökenttä [27]. Tästä syystä dipolikammioon tulee saada ainakin kertaluokan 10^{-7} mbar tyhjiö, kun separaattorin muissa osissa riittää RITUssa tavattu kertaluokan 10^{-6} mbar tyhjiö. Läpilyöntien ehkäisemiseksi sähködipolikammion sisäpinta on myös kiillotettu. Riittävän tyhjiötason saavuttaminen

Taulukko 5. MARAn osat

Osa	Tilavuus [m ³]	Pinta-ala [m ²]
Putki QQQ	0,014	0,377
ED-kammio	2,815	11,058
Putki ED – MD	0,039	0,628
MD-kammio	0,021	0,697
Putki MD – fokaalitaso	0,079	1,257

Taulukko 6. MARAn ja RITUn tyhjiötilavuudet

	Tilavuus [m ³]	Pinta-ala [m ²]	A/V [m ⁻¹]
MARA	2,97	14,02	4,72
RITU	0,15	3,59	24,11

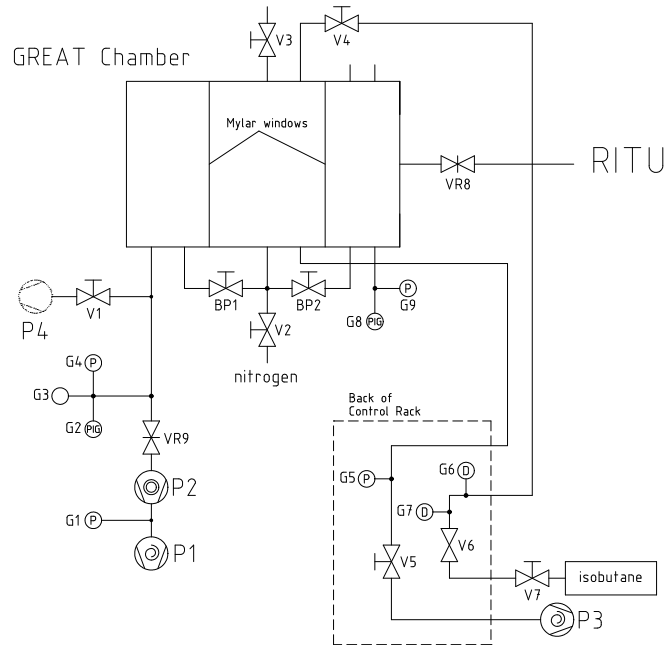
edellyttää tyhjiöpumpuilta suurta pumppausnopeutta sekä mahdollisimman vähäistä vuotoa ja desorptiota. Harvoin avattavista liitoksista osa pyritään tekemään metallitiivisteillä. Sähködipolin kammio on kuitenkin niin kookas, että metallitiivisteen käyttö ei ole kustannussyistä mahdollista. MARAn laitteistoa ei myöskään paahdeta, joten on ilmeistä, ettei MARA ole varsinaisesti ultratyhjiölaitteisto. Sähködipolikammio on lisäksi yhteydessä kaasulaskuriin magneettisen dipolin ja suihkuputken välityksellä. Kuten kuvasta 31 ilmenee, suihku vaatii separaattorin näissä osissa leveän, poikkipinta-alaltaan suuren putken. Kaasulaskurin kaasukuorman pumppaamisessa auttavat ennen fokaalitasoa ja ennen magneettista dipolia sijoitetut tehokkaat turbopumpit. Itse sähködipolin kammiota pumppaa sekä suuri turbopumppu että kryopumppu. Kryopumpun käyttö rajoitetaan mittauksiin, jolloin kammio pidetään hyvässä suurtyhjiössä. Loput turbopumpit pumppaavat fokaalitasoa, kohtiokammiota sekä sitä edeltävää suihkulinjaa. Kaikkien pumppujen esipumpit ovat öljyttömiä scroll-pumppuja.

Valmisteltaessa separaattoria mittauksiin sekä sitä huollettaessa on tärkeää, että separaattorin eri osat voidaan eristää toisistaan ilmaamista varten. Fokaalitaso, magneettinen dipoli, sähködipoli ja kvadrupolit sekä kohtio ovat eristettävissä toisistaan ja edeltävästä suihkulinjasta pneumaattisin toimilaittein varustettujen porttiventtiilien avulla. Turbopumppuja ei normaalisti sammuteta tyhjiökammion ilmaamisen yhteydessä, joten nekin ovat porttiventtiilien takana. Esityhjiön pumppaamiseen käytetään tehokasta scroll-pumppua. MARAn tyhjiöjärjestelmä näkyy kuvassa 32 ja sen tyhjiöpumpit on eritelty taulukossa 7. Koska MARAn fokaalitalason instrumentointi ja tyhjiöjärjestelmän toteutus on samankaltainen kuin RITUssa, fokaalitalason tyhjiöjärjestelmää havainnollistaa kuvan 33 RITUn fokaalitalason tyhjiöjärjestelmän piirikaavio.

7 Muiden separaattoreiden tyhjiöjärjestelmiä

7.1 FMA

Useimpien sähkö- ja magneettidipolia käyttävien separaattorien rakenne on symmetrinen ED MD ED. Joissain separaattoreissa on käytössä myös rakenne MD ED [24]. Argonnen Fragment



Kuva 33. RITUn fokaalitason tyhjiöjärjestelmä [28].

Taulukko 7. MARAn tyhjiöpumput

Sijainti	Tyyppi	Malli	Pumppausnopeus $\left[\frac{1}{s}\right]$	Liitännä	Esipumppu
Suihkulinja	turbo	Pfeiffer THM521	510	DN-160-ISO-K	Edwards XDS10
Suihkulinja	turbo	Pfeiffer THM521	510	DN-160-ISO-K	Edwards XDS10
Kohtio	turbo	Pfeiffer THM521	510	DN-160-ISO-K	Edwards XDS10
Sähködipoli	turbo	Edwards STPA1603	1600	DN-200-CF-F	Edwards XDS10
Sähködipoli	kryo	Cryo Plex 10	3000	14 OD-CF	ei tarvitse
Magn. dipolin jälkeen	turbo	Edwards STPA1603	1600	DN-200-ISO-K	Edwards XDS10
Fokaalitaso	turbo	Pfeiffer THM521	510	DN-160-ISO-K	Edwards XDS10
Esipumppu	scroll	Edwards XDS35i	10	DN-40-ISO-KF	ei tarvitse

Taulukko 8. MARAn ja FMA:n suoritusarvoja [29, 24, 23, 27]

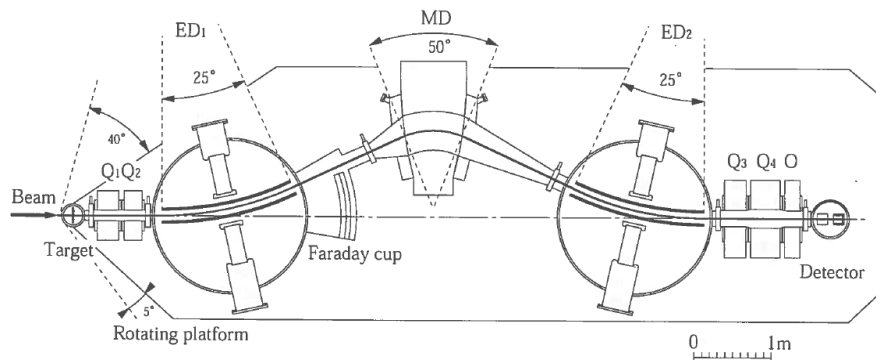
Ominaisuus	MARA	FMA
Kokonaispituus [m]	6,9	8,2
1. kertaluvun $\frac{M}{Q}$ -resoluutio	$\frac{1}{259}$	$\frac{1}{259}$
Kulma-akseptanssi [msr]	10	8
Dispersio $\left[\frac{\text{mm}}{\% (m/q)} \right]$	8	10
Pystysuuntainen suurennus	-4,48	0,98
Vaakasuuntainen suurennus	-1,55	-1,93
Energia-akseptanssi [%]	+20 – 15	+20 – 15
Massa-akseptanssi [$\pm\%$]	7	4
Magneettisen dipolin taivutussäde [m]	1	1
Sähköisen dipolin taivutussäde [m]	4	4
Magneettisen dipolin maksimijäykkyys [Tm]	1,0	1,1
Sähköisen dipolin maksimijäykkyys [MV]	17	20

Mass Analyzer-, eli FMA-separaattoria voidaan käyttää esimerkkinä symmetrisestä separaattorista. Sen ionioptinen konfiguraatio on QQ ED MD ED QQ. Ensimmäisen kertaluvun energiadiispersio kumoutuu MARAn tavoin myös FMAssa [29]. FMAa voidaan kääntää kulmaan -5° – $+45^\circ$ suhteessa primäärisuihkuun. Primäärisuihku pysäytetään normaalisti ensimmäisen sähköiseen dipoliin. Taulukossa 8 on listattuna MARAn ja FMA:n tärkeimpiä suoritusarvoja, jotka ovat pituutta, pystysuuntaista suurennusta, massa-akseptanssia ja sähköistä jäykkyyttä lukuunottamatta jokseenkin samankaltaiset.

FMA:n tyhjiöjärjestelmän tämän työn kannalta olennaisin osa ovat sähködipolien tyhjiöpumput. Tyhjiön ylläpitoon laitteiston ollessa poissa päältä käytetään ionipumppuja, pumppausnopeudeltaan $500 \frac{1}{s}$. Kummankin sähködipolin kammioon on kytketty yksi ionipumppu. Käytön aikana pumppuina käytetään kryopumppua ($S = 1500 \frac{1}{s}$) ja turbomolekylaaripumppua ($S = 1200 \frac{1}{s}$), joita kumpaakin on yksi kummassakin kammiossa. Tällä järjestelyllä päästään rutiininomaisesti 10^{-8} mbar tyhjiötasoon ilman tyhjiölaitteiston paahtoa. FMA:n käyttöönotto-testit suoritettiin käyttämällä fokaalitasolla kaasulaskuria, johon syötettiin isobutaania 5,3 mbar paineella. FMA:n virtalähteitä käytetään ja valvotaan tietokoneohjelman avulla. Tämä ohjelma valvoo myös separaattorin tyhjiötasoja [29].

7.2 JAERI-RMS

Japanin atomienergiatutkimusinstituutin (JAERI) rekyylimassaseparaattori (RMS) on FMA:n tavoin symmetrinen laite. Sen ionioptinen konfiguraatio QQ ED MD ED QQ O, missä O on m/q -dispersion epälinearisuutta korjaava oktupolimagneetti [30], on nähtävissä kuvassa 34. Magneettisen ja sähköisten dipolien taivutussäteet ovat samat kuin FMA:n tapauksessa, mutta taivutuskulmat ovat suuremmat. Mekaanisesti ja sähkökemiallisesti kiillotetut sähködipolien kammiot ovat tilavuudeltaan 2990 l ja niistä kutakin pumppaa $S = 1000 \frac{1}{s}$ turbopumppu ja $S = 2900 \frac{1}{s}$ kryopumppu. Normaali tyhjiötaso on $6,7 \cdot 10^{-8}$ mbar [31].



Kuva 34. JAERI-RMS rekyyliseparaattori [30].

8 MARAn tyhjiötasojen laskennallinen tarkastelu

MARA-separaattori koostuu lukuisista komponenteista, joiden tyhjiövaatimukset ovat erilaiset. Yleisesti ottaen kertaluokan 10^{-6} mbar tyhjiö on riittävä, mutta deflektorikammiossa tyhjiön on syytä olla kertaluokkaa 10^{-7} mbar. Yksinkertaisimmillaan koko separaattoria voidaan tarkastella yhtenä tyhjiötilavuutena. MARA koostuu taulukon 5 mukaisista osista. MARAn tyhjiöominaisuuksia voidaan jossain määrin arvioida vertaamalla sitä JYFL:n nykyiseen RITU-separaattoriin. RITU on kaasutäytteinen separaattori, mutta sitä voidaan käyttää myös tyhjiömoodissa. Tällöin loppupaine magneettisen dipolin ja kvadrupolien välissä on suuruusluokkaa $5 \cdot 10^{-6}$ mbar, kun kaasulaskurin kaasunsyöttö on pois päältä. MARAn ja RITUn tyhjiötävien osien perustiedot on annettu taulukossa 6.

RITUn dipolin ja kvadrupolien välissä oleva paineanturi ei ole suoraan kiinni suihkulinjassa, sillä luvun 4 mukaisesti voimakkaat magneetikentät häiritsevät anturin toimintaa. Anturin yhdistää suihkulinjaan 73 cm pitkä KF-40-putki. Tämän yhdysputken konduktanssiksi saadaan yhtälön (7) avulla $C_{\text{yhdysputki}} = 10,6 \frac{1}{\text{s}}$. Tällöin RITUn käyttötyhjiö suihkulinjassa on yhtälön (10) mukaisesti $4,5 \cdot 10^{-6}$ mbar.

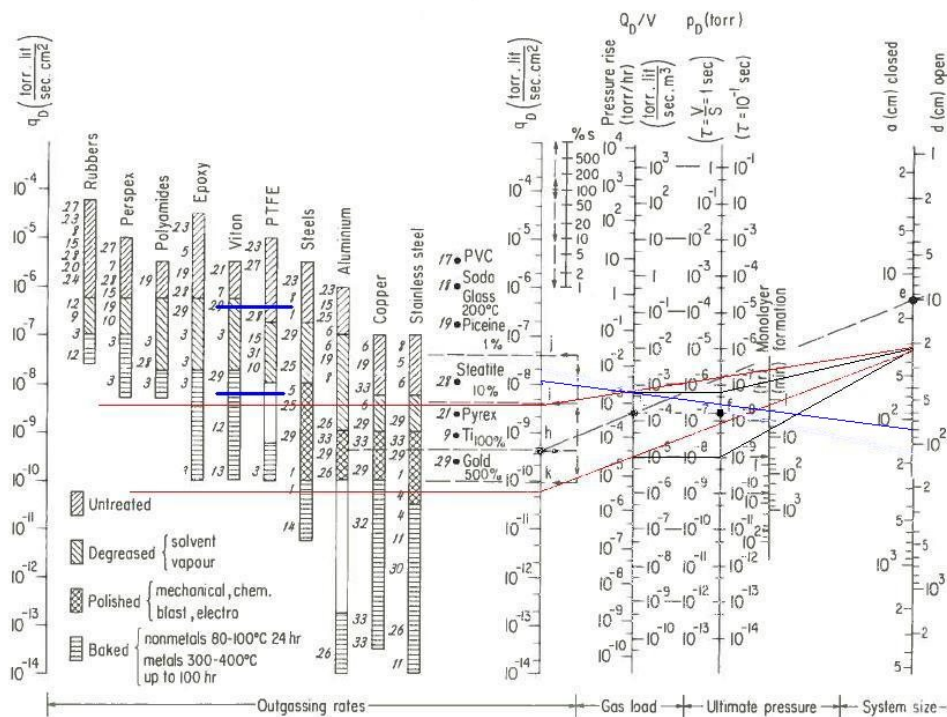
Tyhjiötä ylläpidettäessä tyhjiökammion kokonaisläpäisy menee nolnaan [2]. Tällöin tyhjiökammion kaasukuorma ja pumpun läpäisy ovat yhtäsuuret. Lisäksi, kun kammiota on pumpattu kauan, voidaan desorption katsoa loppuneen. RITUn turbopumpun esipumppu on öljypumppu, joten saavutettu loppupaine $P_f = 4,5 \cdot 10^{-6}$ mbar on noin neljä kertaluokkaa suurempi kuin turbopumppuaseman ultimaattinen paine. Tällöin ajasta riippumaton läpäisy $Q_{\text{RITUkuorma}}$ kammiioon on helppo määrittää

$$\begin{aligned} Q_{\text{RITUkuorma}} + Q_{\text{RITUpumppu}} &= 0 \\ Q_{\text{RITUkuorma}} &= -Q_{\text{RITUpumppu}} \\ &= 154 \frac{1}{\text{s}} \cdot 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar} \\ &= 6,93 \cdot 10^{-4} \text{ mbar} \frac{1}{\text{s}}. \end{aligned}$$

RITUn kaasukuorman perusteella saadaan määriteltyä kaasun irtoamisen arvoksi

$$q_{\text{RITU}} = \frac{Q_{\text{RITUkuorma}}}{A_{\text{RITU}}} = 1,93 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} = 1,93 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}. \quad (21)$$

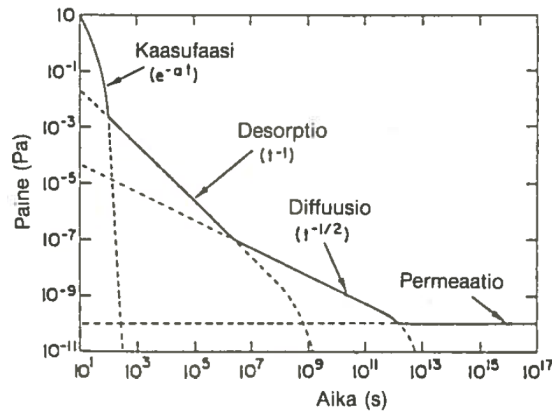
MARAn pääasiallisena rakennusmateriaalina käytetään ruostumatonta terästä. Tarkastellaan tätä materiaalivalintaa tyhjiötekniikan näkökulmasta. Eri materiaalien tyhjiötilavuuteen aiheuttamat kaasukuormat vaihtelevat materiaalin ja sen puhtausasteen mukaan. Kuvan 35 nomogrammin avulla voidaan arvioida eri materiaalien soveltuvuutta tyhjiösovelluksiin. MARAn tyhjiöpumppauksen aikavakio $\tau = \frac{V}{S} = \frac{29681}{5240} \frac{1}{s} = 0,57 \text{ s}$ osuu nomogrammissa esitettyjen nopean pumppauksen ($\tau = 0,1 \text{ s}$) ja hitaan pumppauksen ($\tau = 1 \text{ s}$) puoliväliin. Erittäin konservatiivinen arvio materiaalivalinnasta saadaan käyttämällä kammion halkaisijana magneettisen dipolin sisäleveyttä $d = 24 \text{ cm}$. Alempi punainen viiva on saatu vaatimalla tyhjiötaso 10^{-8} mbar hitaalla pumppauksella kun ylemmän punaisen viivan kohdalla tyhjiötaso on noin $8 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}$. Halutun tyhjiötason saavuttava tyhjiökammio voidaan rakentaa viivan vaakasuoran osan alapuolelle jäävistä materiaaleista. Paksut siniset viivat osoittavat materiaaleja, joita voi olla enintään 1% tyhjiökammion pinta-alasta. Nomogrammistä havaitaan, että tyhjiötasoon $8 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}$ päästään valmistamalla kammio vähintään liuottimella puhdistetusta ruostumattomasta teräksestä kuparista tai alumiinista tai kiillotetusta teräksestä. Tiivisteinä voidaan käyttää liuottimella puhdistettu vitonia. Nomogrammin mukaan materiaalivaatimukset löyhentyvät edelleen, mikäli kammion halkaisijaa kasvatetaan eli pienennetään pinta-alan ja tilavuuden suhdetta. Yhtälöä (21) ja nomogrammia vertaamalla havaitaan, että kaasun irtoaminen RITUsta on varsin voimakasta. Ruostumattoman teräksen kohdalla se vastaa kaasun irtoamista käsittelemättömältä pinnalta. Ohut sininen viiva on piirretty RITUn kaasun irtoamisen arvon ja hitaalla pumppauksella MARAlta vaaditun tyhjiötason $8 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}$ kautta ja sen avulla voidaan päätellä, että kyseiseen tyhjiötasoon päästään tyhjiökammion halkaisijan ollessa vähintään $d = 80 \text{ cm}$. Sylinterimäisen kammion, jonka halkaisija on vähintään 80 cm , tilavuuden ja pinta-alan suhde on enintään $\frac{A}{V} = 5 \text{ m}^{-1}$. Taulukosta 6 nähdään tämän suhdeluvun olevan MARAlle $\left(\frac{A}{V}\right)_{\text{MARA}} = 4,7 \text{ m}^{-1}$.



Kuva 35. Nomogrammi tyhjiölaitteistolla saavutettavissa olevan tyhjiötason arvioimiseksi [1].

MARAn pumppaamiseen esityhjiöstä käyttötyhjiöön kuluva aika voidaan arvioida RITUn pumppaukseen kuluvan ajan perusteella. RITUn turbon kokonaispumppausnopeus suoja-verkon vaikutuksella korjattuna on $S_{RITU} = 154 \frac{1}{s}$. Kun pumppaaminen aloitetaan esityhjiöstä 10^{-2} mbar, saadaan yhtälöä (12) käyttäen pumppausajaksi tyhjiötasolle $5 \cdot 10^{-6}$ mbar $t_{RITU} = 7,34$ s. Tämä ei ole realistinen aika, sillä tarkastelussa jätettiin täysin huomiotta mahdolliset vuodot sekä desorptio tyhjiökammion seinämistä. Tästä puutteesta huolimatta MARAn pumppaamiseen kuluva aika voidaan arvioida yhtälön (12) avulla käyttämällä RITUn pumppaamiseen kuluva aika referenssinä.

Koska kryopumppu kytketään pumppaamaan MARAa vasta tyhjiötason ollessa $p_{kryo} = 5 \cdot 10^{-6}$ mbar, on lasku suoritettava kahdessa osassa: esityhjiöstä kryopumpun käynnistystyhjiöön p_{kryo} pelkkien turbopumppujen pumppausnopeudella $S = 2 \cdot S_{turbo}$ ja p_{kryo} sta lopulliseen tyhjiöön p_f pumppujen yhteenlasketulla pumppausnopeudella $S = 2 \cdot S_{turbo} + S_{kryo}$. MARAan suunniteltujen kahden keskenään samanlaisen turbopumpun suoja-verkon vaikutuksella korjattu pumppausnopeus on $S_{turbo} = 1120 \frac{1}{s}$ ja kryopumpun pumppausnopeus $S_{kryo} = 3000 \frac{1}{s}$. Näillä lukuarvoilla MARAn tyhjiön pumppaamiseen kuluva ajaksi saadaan $t_{MARA} = t_{turbo} + t_{turbo+kryo} = 10,07$ s + $2,61$ s = $12,68$ s = $1,7 \cdot t_{RITU}$. Kun tiedetään, että RITUn pumppaukseen $5 \cdot 10^{-6}$ mbar-tyhjiötasolle kuluu todellisuudessa tunti, saadaan MARAn pumppausaika-arvioksi $t_{MARA} = 1,7$ h. Tässä tarkastelussa oletetaan, että pumppausaika riippuu yhtälön (12) mukaisista tekijöistä. Erityisesti oletetaan pumppausajan riippuvan tyhjiökammion tilavuudesta muttei sen pinta-alasta. RITUn pinta-alan ja tilavuuden suhde on $\left(\frac{A}{V}\right)_{RITU} = 24 \text{ m}^{-1}$ ja MARAn $\left(\frac{A}{V}\right)_{MARA} = 4,7 \text{ m}^{-1}$. Näin ollen MARAn vaatimaa pumppausaika voidaan arvioida edellä kuvatulla tavalla jokseenkin mielekkäästi vain, jos pumppausaikaan merkittävästi vaikuttavista tekijöistä yksikään ei ole pinta-alariippuvainen.



Kuva 36. Tyhjiökammion paineenlaskua rajoittavat ilmiöt [2].

Kaasukuorman merkittävin pinta-alariippuvainen lähde on desorption ja diffuusion aiheuttama kaasun irtoaminen tyhjiökammion seinäistä. Permeaatiota ei tarvitse huomioida, sillä se tulee merkittäväksi vasta alle 10^{-8} mbar paineessa [7]. Tyhjiökammion paineeseen vaikuttavia mekanismeja on eritelty kuvassa 36.

Kaasun irtoamisen aiheuttamalle kaasukuormalle pätee [2]

$$Q_{des} = q \cdot A \cdot t^{-a} . \quad (22)$$

Vakiotilavuudessa yhtälön (5) tulos läpäisylle saa muodon

$$Q = V \frac{dp}{dt},$$

josta saadaan differentiaaliyhtälö

$$\begin{aligned} V dp &= Q_{\text{tot}} dt \\ &= (Q_{\text{des}} - Q_{\text{pumppu}}) dt \\ &= (q_{\text{teras}} \cdot A \cdot t^{-a_{\text{teras}}} + q_{\text{viton}} \cdot A_{\text{viton}} \cdot t^{-a_{\text{viton}}} - S_{\text{RITU}} \cdot p) dt. \end{aligned} \quad (23)$$

Merkittävä kaasukuorman lähde molemmissa separaattoreissa on lentoaikamittauksiin käytettävä kaasulaskuri, johon syötetään isobutaania 3,5 mbar paineella. Isobutaania vuotaa kaasulaskurin ikkunoiden läpi tyhjiötilavuuteen. Tämän vuodon arvioimiseksi mitattiin RITUn tyhjiötaso sekä kaasulaskurin kaasunsyöttö katkaistuna että kaasunsyöttö kytkettynä. RITUn kohtiokammio oli mittausten aikana ilmanpaineessa, tyhjiössä olivat osat fokaalitasosta dipolimagneettiin. Koko tyhjiötilavuutta pumppasi yksi turbopumppu, nimelliseltä pumppausnopeudeltaan $200 \frac{1}{s}$. Ilman kaasunsyöttöä RITUn tyhjiö oli $p_0 = 9,1 \cdot 10^{-6}$ mbar ja kaasunsyötön kanssa $p_{\text{kaasu}} = 1,9 \cdot 10^{-5}$ mbar. Yhtälö (11) pumpun läpäisyksi ilman kaasua $Q_0 = 1,27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{s}$ ja kaasun kanssa $Q_{\text{kaasu}} = 2,66 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{s}$. Molempien mittausten yhteydessä odotettiin painelukeman tasaantumista, joten kyseessä oli tasapainotila, jossa pumpun läpäisy vastaa kaasukuormaa. Koska mittaukset suoritettiin peräjälkeen, voidaan muiden kaasukuormien olettaa pysyneen vakioina mittausten välillä. Täten kaasulaskurin vuoto saadaan läpäisyjen erotuksena

$$Q_{\text{laskuri}} = Q_{\text{kaasu}} - Q_0 = 1,39 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{s} \approx 1,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{s}. \quad (24)$$

MARAan asennettava kaasulaskuri on likimain samankokoinen kuin RITUn kaasulaskuri, joten sen vuotokin on samaa suuruusluokkaa.

Käyttämällä yhtälön (21) RITUlle laskettua kaasunirtoamisvakiota ja yhtälön (24) antamaa kaasulaskurin kaasukuormaa, saadaan MARAn keskimääräiseksi ultimaattiseksi paineeksi laskettua yhtälön (11) avulla

$$\begin{aligned} p_{\text{MARA}} &= (q_{\text{RITU}} \cdot A_{\text{MARA}} + Q_{\text{laskuri}}) \cdot S_{\text{MARA}} \\ &= \left(2,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{s} + 1,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{s} \right) \cdot 5240 \frac{1}{s} = 7,8 \cdot 10^{-7} \text{ mbar}. \end{aligned} \quad (25)$$

Jaetaan MARAn kokonaiskaasukuorma seuraavaksi kahtia: sähködipolikammion jälkeisen diagnostiikkaboksin kaasukuorma Q_{MD} koostuu kaasuilmaisimen kuormasta sekä muun kaasukuorman siitä osasta, joka irtoaa magneettisesta dipolista ja fokaalitasolle vievästä putkesta. Vastaavasti sähködipolikammion kaasukuorma Q_{ED} on sähködipolikammion ja kohtiosta ja kvadrupoleilta tulevan putken kuorma. Nämä kaksi tyhjiötilavuutta ovat yhteydessä toisiinsa 24 cm halkaisijaltaan olevan aukon kautta siten, että niiden välinen konduktanssi on yhtälön (8) mukaisesti $C = 1,67 \frac{\text{m}^3}{s}$, kun jäännöskaasun lämpötila on $T = 293$ K ja moolimassa on ilman keskimääräinen moolimassa $M = 28,966$ u [2]. Yhtälöistä (6) ja (11) saadaan magneettisen

Taulukko 9. MARAn odotetut tyhjiötasot

$C \left[\frac{l}{s} \right]$	$P_{ED} [10^{-7} \text{ mbar}]$	$P_{MD} [10^{-7} \text{ mbar}]$	$Q \left[10^{-4} \frac{\text{mbar} \cdot l}{s} \right]$
10^9	7,8	7,8	10
$1,67 \cdot 10^3$	7,0	10	6,6
0	5,4	17	0

dipolin kaasukuormalle

$$Q_{MD} = P_{MD}S_{MD} + C(P_{MD} - P_{ED}) \text{ ja} \quad (26)$$

sähköisen dipolin paineelle

$$P_{ED} = \frac{Q_{ED} + C(P_{MD} - P_{ED})}{S_{ED}}. \quad (27)$$

Yhtälöistä (26) ja (27) saadaan ratkaistua sähköisen dipolin paineelle

$$P_{ED} = \frac{(C + S_{MD}) \cdot Q_{ED} + C \cdot Q_{MD}}{(S_{ED} + C)(S_{MD} + C) - C^2}. \quad (28)$$

Taulukossa 9 on yhtälön (28) ratkaisuja suurella, pienellä ja odotetulla konduktanssin arvolla. Havaitaan, että paine laskee sähködipolin kammiossa kertaluokkaan 10^{-7} mbar. Lasku jättää kuitenkin huomiotta turbopumpun kurkun ja tyjiökammion välisen konduktanssin vaikutuksen. Taulukosta 9 nähdään myös konduktanssin vaikutus sähködipolin kammion paineeseen: paine vaihtelee välillä $(5,4 - 7,8) \cdot 10^{-7}$ mbar konduktanssin arvosta riippuen.

Sähködipolikammioon kohdistuvan kaasukuorman pienentämiseksi sähködipolin jälkeiset suihkuputket voitaisiin tehdä neliskanttisiksi, sillä kuvan 31 mukaan sähkö- ja magneettidipolin välillä suihkun leveys on suurimmillaan 17 cm ja korkeus 8 cm. Magneettidipolin jälkeen suurin leveys on 16 cm ja korkeus 6 cm. Yhtälön (7) mukaan $C \propto \frac{A^2}{B}$, joten 18 cm \times 8 cm putken ja sisähalkaisijaltaan 240 mm olevan ISO K-250 putken konduktanssien suhde on

$$\frac{C_{\text{kantti}}}{C_{\text{pyöreä}}} = 0,29. \quad (29)$$

Koska neliskanttiset putket ovat valmistusteknisesti pyöreitä putkia haastavampia, pyritään mahdollisesti tarpeelliseksi tuleva konduktanssin rajoittaminen hoitamaan rajoitinlevyillä. Tässä yhteydessä on syytä huomata, että rajoitinlevy on oleellisesti aukko ja sen konduktanssi noudattaa näin ollen yhtälöä (8). Kuvasta 31 nähdään, että magneettisen dipolin jälkeen rajoitinlevyn aukko voi olla kooltaan $(18 \times 8) \text{ cm}^2$ ja ennen fokaalitasoa $(16 \times 6) \text{ cm}^2$. Taulukon 3 sähkönvastusanalogiaa hyödyntäen saadaan laskettua konduktanssien suhteeksi esimerkiksi rajoittamattoman 1,5 m ISO K-250 putken ja vastaavan, päistään edellä mainituilla rajoittimilla rajoitetun putken tapauksessa

$$\frac{C_{\text{kollimoitu}}}{C_{\text{putki}}} = 0,37. \quad (30)$$

Rajoitinlevyillä voidaan siis merkittävästi pienentää konduktanssia ja samalla vältetään mitta-

tilausputkien aiheuttama kustannuserä.

Pumppausaika voidaan arvioida ilman yhtälön (23) ratkaisemista, kun muistetaan kokonaisläpäisyn menevän nolnaan tasapainotilanteessa. Tätä käytettiin aiemmin yhtälön (21) yhteydessä määritettäessä RITUn kaasunirtoamisvakiota. Näin saadaan yhtälö

$$Q_{\text{laskuri}} + q_{\text{teräs}} \cdot A_{\text{MARA}} \cdot t^{-a_{\text{teräs}}} + q_{\text{viton}} \cdot A_{\text{MARA,viton}} \cdot t^{-a_{\text{viton}}} - S_{\text{MARA}} \cdot p_{\text{MARA}} = 0, \quad (31)$$

joka toteutuu arvolla

$$t = 67 \text{ h}, \quad (32)$$

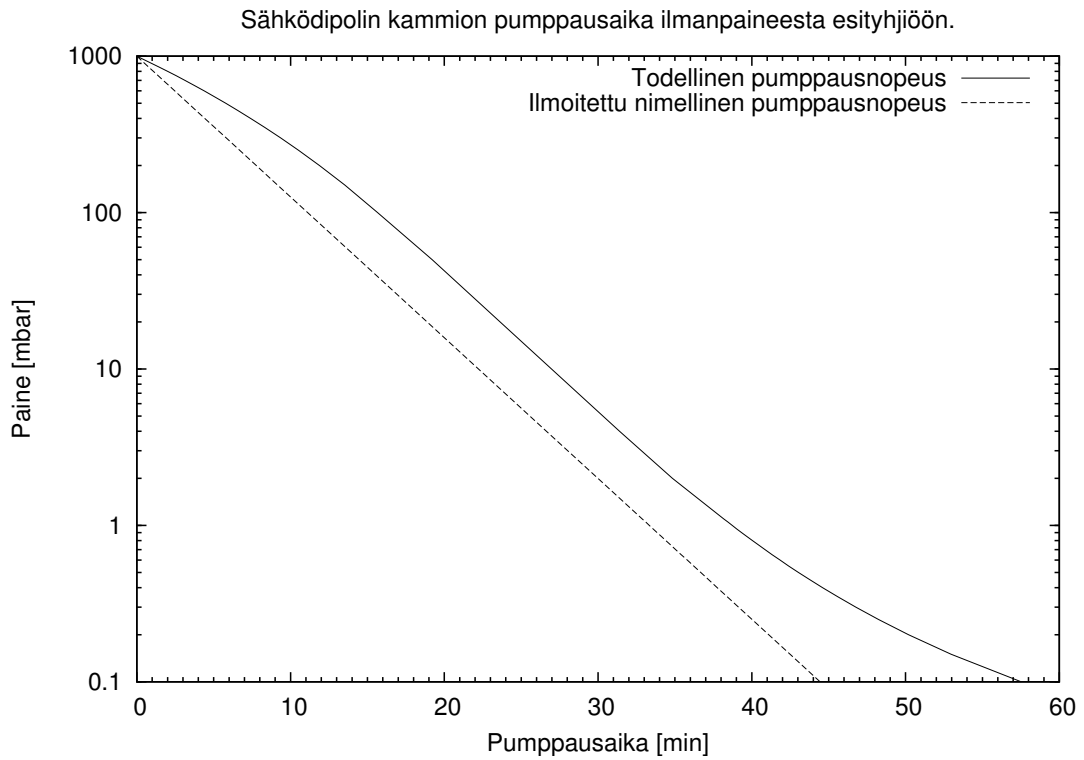
kun käytetään teräksen desorptiolle hiekkapuhalletun teräksen arvoa $q_{\text{teräs}} = 11 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mbar} \cdot \text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$ ja Vitonin desorptiolle $q_{\text{viton}} = 1520 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mbar} \cdot \text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$. Aikariippuvuusparametrille a puolestaan käytetään arvoja $a_{\text{teräs}} = 1,2$ ja $a_{\text{viton}} = 0,8$ [2]. Viton-tiivisteiden pinta-alaksi otetaan $A_{\text{MARA,viton}} = 0,03 \text{ m}^2$. Tiivisteiden pinta-alassa on mukana sähköisen dipolin kammion tiiviste, jonka halkaisijaksi otettiin sähködipolin kammion halkaisija 1,6 m ja paksuudeksi 5 mm, ja kuusi pienempää tiivistettä, halkaisijaltaan 250 mm.

Tarkastellaan seuraavaksi sähködipolikammion esityhjiön pumppaukseen kuluvaan aikaan. Kuvassa 7 on Edwards XDS35i -scrollpumpun pumppausnopeuskäyrä. Numeerista integrointia varten sen nouseva ja laskeva osa kuvattiin suorina (log p,S)-koordinaatistossa ja väli 2 - 100 mbar yksittäisinä kuvaajasta katsottuina arvoina. Yhtälöä (12) käyttäen saadaan pumppausaika alkupaineesta loppupaineeseen kun tyhjiötilavuuteen ei kohdistu kaasukuormaa. Kuvan 36 perusteella desorptio ei ole merkittävä vielä pumppauksen tässä vaiheessa. Painealue 0,1 - 100 mbar jaettiin 43 osaväliin ja kullekin osavälille sovellettiin yhtälöä (12) laskien pumppausnopeus edellä kuvatulla tavalla. Kokonaisajaksi saatiin $t_{\text{EDesi}} = 58 \text{ min}$ ja tyhjiökammion paineen ennustetuksi aikakehitykseksi kuvan 37 mukainen tulos.

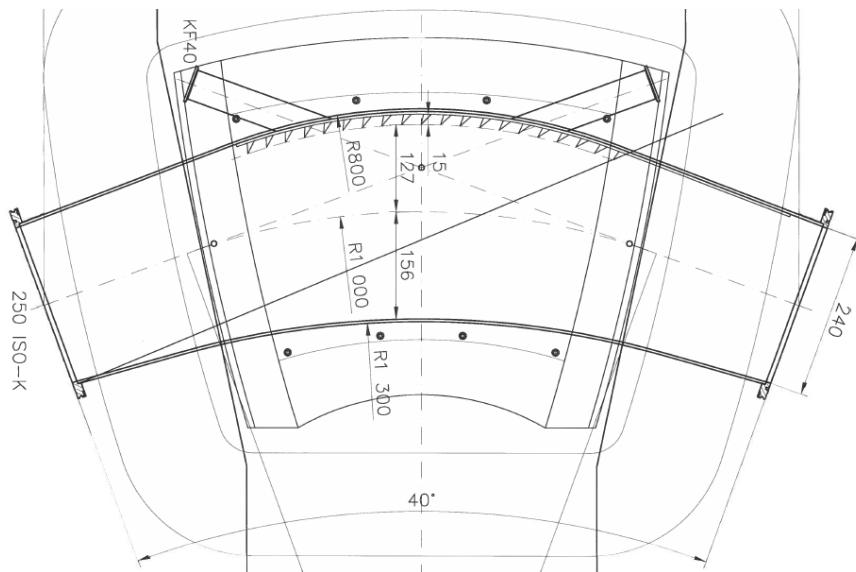
9 Magneettisen dipolin tyhjiökammion mittaukset

MARAN magneettisen dipolin tyhjiökammio on kuvan 38 mukainen 82 mm korkea ja leveimmillään 306 mm leveä magnetoitumattomasta teräksestä valmistettu kammio. Kuten MARAN esittelyn yhteydessä luvussa 6 todettiin, magneettisessa dipolissa vaaditaan leveää, esteetöntä suihkuputkea. Dipolikammion keskelle ei tästä syystä voida sijoittaa tukia, joilla voitaisiin vähentää kammion kokoonpainumista, kun siihen on imetty tyhjiö. Tämä ongelma on huomioitu kammion suunnitteluvaiheessa siten, että kammion ylä- ja alaseinämien paksuus on 6 mm, kun se on sivuseinämissä vain 4 mm [32]. Kuvasta 31 nähdään, että magneettisen dipolin kammion korkeuden merkittävä pieneneminen pienentää separaattorin kulma-akseptanssia. Tästä syystä kammion muodonmuutos tyhjiössä mitattiin.

Paine-eron aiheuttama taipuma mitattiin kuvan 40 mukaisissa 18 mittauspisteessä. Mittauksessa asetettiin vankka metallinen suorakulma dipolikammion yli poikittain ja mitattiin eripaksuisilla metalliliuskoilla tyhjiökammion pinnan ja suorankulman väliin jäävä rako. Vastaava mittaus tehtiin myös kammion ollessa ilmanpaineessa. Käytetyssä mittaliuskasarjassa liuskat olivat paksuudeltaan 0,05 - 1 mm. Joissain pisteissä taipuma mitattiin myös käyttäen mittaria, jossa jousikuormitteinen kara painuu kammion pintaa vasten ja liikuttaa viisaria. Tämän

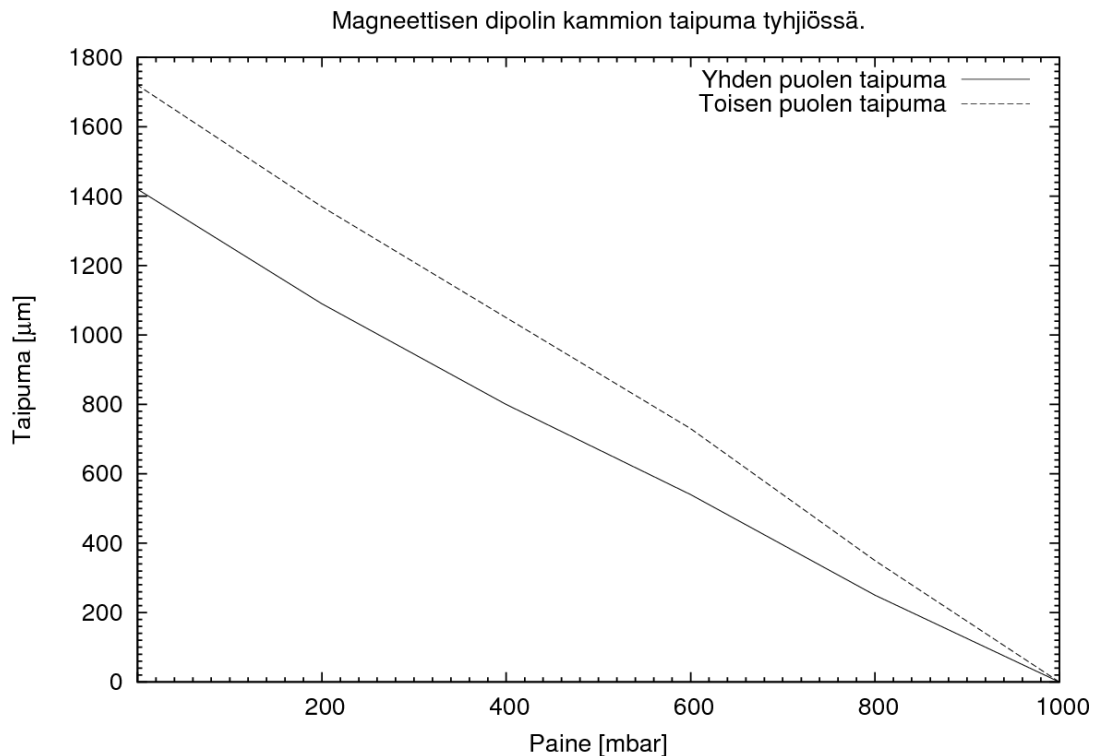


Kuva 37. Sähködipolin kammion paineen laskennallinen käytös Edwards XDS35i pumpulla pumppattaessa. Katkoviiva ilmoitetulla pumppausnopeudella $35 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$, yhtenäinen viiva kuvan 7 mukaisella pumppausnopeudella.



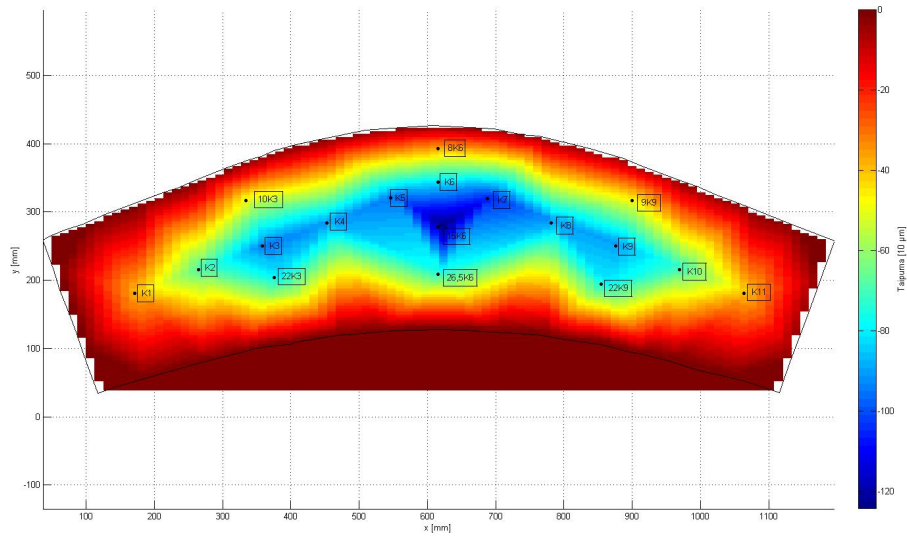
Kuva 38. Magneettisen dipolin tyhjiökammio.

mittarin asteikon lukematarckkuus oli 0,01 mm. Mekaanista painemittaria käyttämällä myös taipuman seuraaminen paineen funktiona oli mahdollista. Nämä tulokset on esitetty kuvassa 39. Mittarilla saadut tulokset olivat suurempia kuin liuskoilla mitatut, kammion keskimmaisessä mittauspisteessä 15K6 ero oli toisella puolella 0,2 mm ja toisella 0,5 mm. Liuskoilla mittausten välillä havaittiin enintään 0,2 mm ero, yleensä ero ei ylittänyt 0,1 mm. Mittarilla ero oli 0,04 mm. Pisteessä 15K6 kummankin puolen yhteenlaskettu taipuma liuskoilla mitaten oli 2,5 mm ja mittarilla 3,1 mm. Kolmen millimetrin taipuma ei aiheuta merkittävää muutosta kulma-akseptanssiin. Kuvassa 40 on esitetty kartta liuskoilla mitatusta kammion toisen puolen taipumasta. Kuvassa kohdissa $x = 500$ mm ja $x = 750$ mm esiintyvä taipuman paikallinen pieneneminen reuna-alueilla on mittauspisteiden vähydestä johtuva kuvausvirhe, sillä kammiossa ei ole tukirakenteita, jotka vähentäisivät taipumista noilla kohdin.



Kuva 39. Magneettisen dipolin tyhjiökammion taipuma mittauspisteessä 15K6.

Magneettisen dipolin kammion vuototestaus tehtiin vuodonetsijällä eli heliumnuuskijalla. Vuodonetsijän toiminta perustuu massaspektrometriin, jonka avulla heliumin määrää jäännöskaa-sussa pystytään mittaamaan. Koska heliumia on ilmassa vain 4,5 ppm, epäiltyyn vuotokohtaan suihkutettu helium näkyy selvästi massaspektrometrissa. Vuodonetsijä ilmoittaa vuodon yksikössä $\frac{\text{mbar}\cdot\text{l}}{\text{s}}$. Mittauksiin käytetty vuodonetsijä oli Balzers HLT150, jonka tyhjiöpumppuna on Pfeifferin TPH060-turbopumppu [33]. Vuodonetsijä nolaa heliumin tausta-arvon, kun se laitetaan mittaustilaan. Mittaustilassa laite ilmoittaa havaitun heliumvuodon suuruuden myös äänimerkillä, mikä helpottaa vuodon paikallistamista. Mittaustilasta poistumisen jälkeen odotettiin heliumtason tasaantumista ennen uuden mittauksen aloittamista. Ensimmäisessä mit-tauksessa vuodot hitsaussaumojen ja laippojen ympärillä olivat yleisesti luokkaa $10^{-8} \frac{\text{mbar}\cdot\text{l}}{\text{s}}$ ja toisen päätylaipan ympärillä luokkaa $10^{-7} \frac{\text{mbar}\cdot\text{l}}{\text{s}}$. Tämän vuotavan päätylaipan tiivisteen ras-vaamisen jälkeen vuodot laskivat tasolle $10^{-9} \frac{\text{mbar}\cdot\text{l}}{\text{s}}$. Kolme tuntia kestäneessä pumppauksessa



Kuva 40. Magneettisen dipolin tyhjiökammion taipuma mittaliuskoilla mitattuna. Kammio on rajattu mustalla viivalla. Mittauspisteet on nimetty ja merkitty kuvaan.

vuodonetsijän turbopumpulla päästiin paineeseen $8,7 \cdot 10^{-4}$ mbar. Pumppauksen lopettamisen jälkeen paine nousi kolmessa vartissa lähtöarvosta $1,6 \cdot 10^{-2}$ mbar arvoon $3,8 \cdot 10^{-2}$ mbar. Tyhjiökammion paine oli 1,4 mbar 162 tuntia pumppauksen lopettamisen jälkeen. Näistä saadaan laskehtua yhtälöä (9) käyttäen keskimääräisiksi kaasukuormiksi $1,2 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$ ja $4,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s}}$ ja edelleen kaasun irtoamisen arvoiksi $1,8 \cdot 10^{-8} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$ ja $7,1 \cdot 10^{-9} \frac{\text{mbar} \cdot \text{l}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$. Kuvasta 35 nähdään, että nämä arvot asettuvat liuottimella puhdistetun ja käsittelemättömän ruostumattoman teräksen arvojen välimaastoon. Tyhjiökammion pinnat puhdistettiin etanolilla ennen mittausta, mutta sitä on varastoitu niin, että tyhjiötilavuudessa on ollut huoneilmaa, joten tulos ei ole yllättävä. Myös kaksi suihkulinjaan tulevaa diagnostiikkakammiota tutkittiin vuodonetsijällä. Vuotoja ei havaittu.

10 Yhteenveto

Tässä työssä on tarkasteltu Jyväskylän yliopiston fysiikan laitokselle rakennettavan MARA-separaattorin tyhjiöjärjestelmää. MARAssa on saavutettava Jyväskylän aiempia separaattoreja parempi tyhjiötaso, koska MARA on sähköistä dipolia hyödyntävä massaseparaattori. Sähköisen dipolin elektrodien välisen korkeajännitteen luoman läpilyöntivaaran vuoksi sähköisen dipolin kammiossa vaadittu vähimmäistyhjiötaso on 10^{-7} mbar. MARAn sähköisen dipolin kammiota, jonka tilavuus on noin 2800 l, on tarkoitus pumpata $S = 1600 \frac{1}{\text{s}}$ turbopumpulla ja $S = 3000 \frac{1}{\text{s}}$ kryopumpulla. Muiden, jo käytössä olevien massaseparaattorien tyhjiöjärjestelmiä tarkastelemalla voidaan tehdä suuntaa-antavia arvioita MARAn tyhjiöjärjestelmän suorituskyvystä. FMA-separaattorin kaksi sähköistä dipolia ovat samankokoisia kuin MARAan hankittavakin, joten myös niiden tyhjiökammioiden voidaan olettaa olevan samankokoiset. FMAssa yhtä kammiota pumpkaa $S = 1200 \frac{1}{\text{s}}$ turbopumpu ja $S = 1500 \frac{1}{\text{s}}$ kryopumpu. Näin saavutetaan 10^{-8} mbarin tyhjiötaso. JAERI-RMS -separaattorin, joka on FMA:n tavoin symmetrinen separaattori, sähködipolien kammioiden tilavuus on 2990 l. Pumppuina kussakin kammiossa

käytetään $S = 1000 \frac{1}{s}$ turbopumppua ja $S = 2900 \frac{1}{s}$ kryopumppua, joilla saavutetaan tyhjiö $6,7 \cdot 10^{-8}$ mbar. FMAN tyhjiötaso vaikuttaa poikkeuksellisen hyvältä JAERIin verrattuna. Tämä voi selittyä esimerkiksi vähäisemmällä elastomeeritiivisteiden käytöllä tai muidenkin kuin sähködipolin kammioiden pintojen hionnalla FMAssa. Näistä seikoista, kuten tyhjiöjärjestelmien yksityiskohdista ylipäätään, ei ole tietoa julkaistuissa artikkeleissa. Kummankaan puheena olleen separaattorin yhteydessä ei kerrota erikseen ensimmäisen ja jälkimmäisen sähködipolin tyhjiötasoja. Kaasulaskurin vuodon vaikutuksesta ei siis valitettavasti saada tätä kautta lisätietoa. Kahden sähködipolin separaattorissa kiillotetun pinnan osuus kokonaispinta-alasta on suurempi ja pinta-alan ja tilavuuden suhde pienempi kuin MARAssa. MARAssa saavutettava tyhjiötaso on siis todennäköisesti jonkin verran huonompi kuin mitä vertailu JAERI-RMSään ja FMAhan antaa olettaa.

Tarkastelemalla koko MARAa yhtenä kaasutilavuutena ja käyttämällä nomogrammia havaitaan, että ruostumattomasta teräksestä rakennettava MARA vaatii pintakäsittelykseen hionnan tai liuottimella puhdistuksen riippuen halutusta tyhjiötasosta. Koska määrittämissä käytetyn tyhjiöastian pinta-ala – tilavuussuhde on huomattavasti suurempi kuin MARAssa, pintakäsittelyvaatimus ei todellisuudessa ole näin ankara. Hiottu sähködipolin kammio käsittää liki 80% MARAn kokonaispinta-alasta, joten pintakäsittelyvaatimusten ei pitäisi aiheuttaa ongelma. RITUn kaasun irtoamisen arvo on käsittelemättömän ruostumattoman teräksen alueella. Tämä ei ole yllättävää, sillä vaikka RITU onkin puhdistettu alkoholilla ennen käyttöönottoa, on se ollut tutkimuskäytössä jo liki kahdenkymmenen vuoden ajan. Nomogrammin mukaan MARA saavuttaisi siedettävän $8 \cdot 10^{-7}$ mbarin tyhjiötason myös siinä tapauksessa, että sen kaasunirtoamisvakio olisi sama kuin RITUssa.

MARAn sähködipolin kammion tyhjiön laskemiseksi on arvioitava kaasukuorma. Käyttämällä RITUn kaasun irtoamisen arvoa voidaan todeta, että kaasulaskurin vuoto muodostaa yli kolmasosan MARAn kaasukuormasta. Todellisuudessa osuus on vieläkin suurempi MARAn pienemmän kaasunirtoamisvakion ansiosta. Tästä syystä mikrokanavalevyn kanssa käytetty SED-ilmaisin olisi tyhjiötekniikan kannalta kaasulaskuria merkittävästi parempi läpäisyilmaisin. Jakamalla kaasutilavuus kahtia sähköisen ja magneettisen dipolin välistä ja yhdistämällä nämä puoliskot 240 mm aukolla saatiin sähködipolin puolen tyhjiöksi $7,0 \cdot 10^{-7}$ mbar. Tämä malli vastaa tilannetta, jossa $S = 1600 \frac{1}{s}$ turbopumppu on sijoitettu magneettisen dipolin eteen. Tilanpuutteen vuoksi pumppu kuitenkin sijoitetaan magneettisen dipolin jälkeen.

Kaiken kaikkiaan MARAn sähködipolikammion tyhjiötason voidaan arvioida asettuvan välillä $(80 - 8) \cdot 10^{-8}$ mbar. Konduktanssin rajoittaminen sähködipolille päätyvän kaasukuorman vähentämiseksi onnistuu käyttämällä poikkileikkaukseltaan neliskulmaista suihkuputkea tai asentamalla putken päihin rajoitinlevyt. Laskuesimerkillä voidaan todeta, että rajoitinlevyt ovat konduktanssin pienentämisessä tehokkaita. Ne ovat myös neliskulmaisia suihkuputkia kustannustehokkaampi vaihtoehto.

Tarkasteltaessa sähködipolin kammion esipumppaukseen kuluva aikaa havaittiin, että nimellisen ja pumppausnopeuskäyrästä määritetyn pumppausnopeuden ero aikaansai 13 minuttin eli 23% eron pumppausajassa. Aikaa, joka kuluu MARAn pumppaamiseen käyttötyhjiöön arvioitiin kahdella tavalla. Ensinnäkin käytettiin RITUn pumppaamiseen kuluva aikaa referenssinä ja laskettiin molemmille separaattoreille pumppausajat ottamatta kaasukuormaa huomioon. Tuloksena saatiin $t = 1,7t_{RITU} = 1,7$ h. Tämä pumppausaika-arvio on epärealistisen pieni, mikä johtuu kaasun irtoamisen huomiotta jättämisestä. Kaasun irtoaminen vähenee ajan

funktiona kun taas pumppujen läpäisy pienenee paineen funktiona. Kaasun irtoaminen hidastaakin pumppausta erityisesti matalissa paineissa, mikä aiheuttaa ongelmia pumppausaikatarkastelussa, koska MARAssa tavoiteltava tyhjiötaso on kaksi kertaluokkaa parempi kuin RITUssa saavutettava. Pumppausaika määritettiin myös laskemalla, milloin tyhjiöpumppujen läpäisy on kaasukuorman suuruinen. Näin saatu pumppausaika oli $t = 67$ h.

Magneettisen dipolin taipumista tyhjiössä testattiin kokeellisesti. Taipumaksi mitattiin suurimmillaan 3,1 mm, joka ei aiheuta merkittävää kulma-akseptanssin laskua. Taipuman riippuvuuden tyhjiökammion paineesta huomattiin olevan lähes lineaarinen. Lisäksi magneettisen dipolin kammio ja kaksi diagnostiikkakammiota todettiin vuototesterillä riittävän tiiveiksi.

Viitteet

- [1] Alexander Roth. *Vacuum Technology*. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands, 1976.
- [2] Armas Fontell et al. *Tyhjiötekniikka*. Suomen tyhjiöseura ry, Finland, 1986.
- [3] John Lilley. *Nuclear Physics*. John Wiley & Sons, 2004.
- [4] I. S. Grant et al. *Electromagnetism, Second Edition*. John Wiley & Sons, 2004.
- [5] Stefan Giere et al. Hv dielectric strength of shielding electrodes in vacuum circuit-breakers. *20th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, 2002.
- [6] MAOL Ry. *MAOL taulukot*. Otava, 2010.
- [7] Pfeiffer Vacuum. Know how.
<http://www.pfeiffer-vacuum.com/know-how/container.action>
[Online; haettu 23.9.2011].
- [8] Pfeiffer Vacuum. Operating instructions turbomolecular drag pumps TMH 521 P.
- [9] Edwards Vacuum. XDD1 technical data.
<http://www.edwardsvacuum.com/Products/View.aspx?sku=A74602983>
[Online; haettu 23.9.2011].
- [10] Pfeiffer Vacuum. MVP020 technical data.
<http://www.pfeiffer-vacuum.com/products/diaphragm-pumps/mvp-020/onlinecatalog.action?detailPdoId=2634\#product-technical-data>
[Online; haettu 23.9.2011].
- [11] Zeyu Li et al. Theoretical and experimental study of dry scroll vacuum pump. *Vacuum 84 (2010) 415*, 2010.
- [12] Baolong Wang et al. A general geometrical model of scroll compressors based on discretionary initial angles of involute. *International Journal of Refrigeration 28 (2005) 958*, 2005.
- [13] Edwards Vacuum. XDS35i technical data.
<http://www.edwardsvacuum.com/Products/View.aspx?sku=A73001983>
[Online; haettu 23.9.2011].
- [14] Tadashi Sawada et al. Experimental verification of theory for the pumping mechanism of a dry-scroll vacuum pump. *Vacuum 53 (1999) 233*, 1999.
- [15] M.H. Hablanian. Engineering aspects of turbomolecular pump desing. *Vacuum 82 (2008) 61*, 2008.
- [16] Walter Umrath et al. *Fundamentals of Vacuum Technology*. Leybold Vacuum, 2000.
- [17] Oerlikon Leybold Vacuum. TURBOVAC operating instructions, 2006.
- [18] Pfeiffer Vacuum. TMH1000 technical data.
<http://www.pfeiffer-vacuum.com/products/turbopumps/magneticturbo/tmh-u-1000-m/onlinecatalog.action?detailPdoId=3004\#product-technical-data>
[Online; haettu 23.9.2011].
- [19] Kurt J. Lesker Company. Pump classifications technical notes.
http://www.lesker.com/newweb/Vacuum_Pumps/vacuum_pumps_technicalnotes_1.cfm\#TurboDragHybridPump
[Online; haettu 23.9.2011].
- [20] Brooks Automation. On-board cryopump installation and maintenance instructions, 2011.
- [21] Pfeiffer Vacuum. Active cold cathode transmitter IKR 251.

- <http://www.pfeiffer-vacuum.com/products/measurement/activeline/activeline-transmitters/onlinecatalog.action?detailPdoId=3910\#product-technical-data> \{\{[Online;haettu9.5.2012]}\}.
- [22] Pfeiffer Vacuum. Dualgauge measurement equipment TPG 262, 1 TPR 280, 1 IKR 251. <http://www.pfeiffer-vacuum.com/products/measurement/activeline/measurement-equipment/onlinecatalog.action?detailPdoId=3358> \{\{[Online;haettu9.5.2012]}\}.
- [23] Cath Scholey. *RITU AND MARA: A complementary couple*. Arctic FIDIPRO-EFES Workshop Jyväskylä, 2009.
- [24] Jan Saren et al. The new vacuum-mode recoil separator mara at jyfl. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 266 (2008) 4196, 1992.
- [25] S. Y. Lee. *Accelerator Physics*. World Scientific Publishing Co, 2004.
- [26] M. Leino. Gas-filled separators - an overview. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 204 (2003) 129, 2003.
- [27] Juha Uusitalo. *The new vacuum mode separator MARA*. JYFL Workshop, 2010.
- [28] Ulrika Jakobsson et al. *RITU-cave vacuum guide*. Jyväskylän yliopisto, 2010.
- [29] C. N. Davids et al. Startup of the fragment mass analyzer at atlas. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 70 (1992) 358, 1992.
- [30] S. Mitsuoka et al. The present and the future of jaeri recoil mass separator. *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences* 3 (2002) 209, 2002.
- [31] H. Ikezoe et al. Jaeri recoil mass separator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 376 (1996) 420, 1996.
- [32] Danfysik. Dipole magnet, 2008. piirrustukset.
- [33] Balzers. *Helium leak detector HLT 150 User's Guide*.