

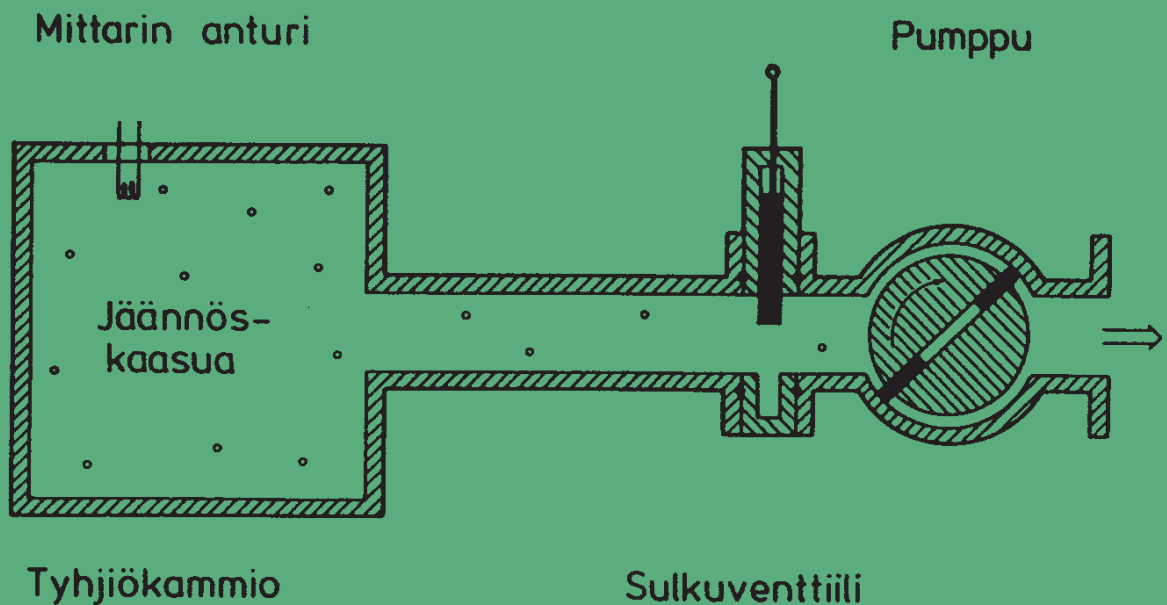


Tyhjiötekniikan perusteet

Veli Hulkkonen

No 12

FLUID
Finland
2-2005



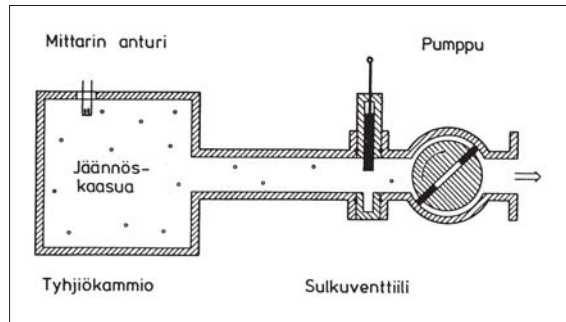
Tyhjiötekniikan perusteet

Tyhjiötekniikkaan kuuluvien laitteiden ja koko tyhjiösystemin mahdollisimman häiriöttömän toiminnan kannalta on tärkeitä hallita mm. seuraavat tyhjiötekniikan perusteisiin liittyvät seikat: Mitä tyhjiöllä ja tyhjiösystemillä tarkoitetaan, ilman koostumukseen ja paineeseen liittyvät käsitteet sekä paineen yksiköt, tyhjiöalueet ja jäännöskaasun ominaisuudet, nesteen käyttäytyminen tyhjiössä sekä tyhjiötekniikan eri käyttökohteisiin liittyvät seikat.

Tyhjiö ja tyhjiösystemi

Absoluuttisella tyhjiöllä tarkoitetaan tilavuutta, jossa ei ole ainetta eikä näin ollen myöskään molekyyliä, eikä painetta.

Käytännössä tyhjiöllä tarkoitetaan suljettua tilaa, josta kaasut ja höyryt on poistettu niin tarkoin kuin on tarpeellista tai mahdollista. Tämä merkitsee sitä, että käytännön tyhjiötilassa on aina enemmän tai vähemmän kaasuja ja höyryjä. Tätä kaasujen ja höyryjen jäännöserää sanotaan jäännöskaasuksi (kuva 1), riippumatta siitä, millainen sen koostumus on. Jäännöskaasun paine on pienempi kuin ympärillä olevan ilmakehän paine.

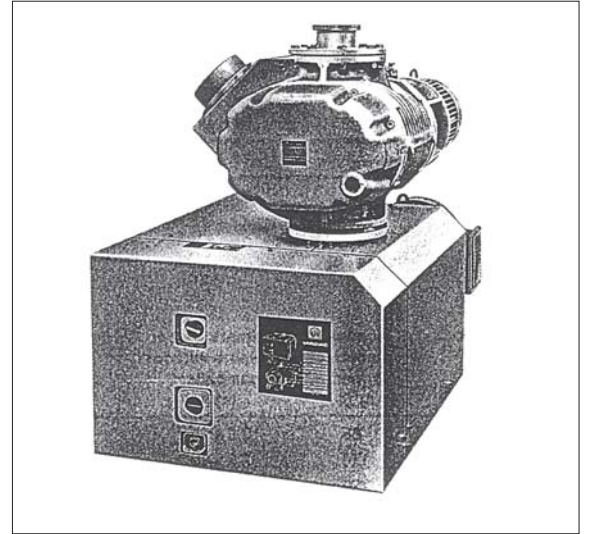


Kuva 1. Yksinkertaistettu tyhjiösystemi (1).

Tyhjiösystemin pääosat ovat pumppu, sulkuventtiili, tyhjiökammio ja mittari, kuva 1. Pumpun tehtävänä on poistaa tyhjiötilasta kaasuja ja höyryjä. Venttiili estää virtauksen tyhjiökammioon päin. Tyhjiökammion tehtävänä on ylläpitää tyhjiötä. Mittarista nähdään tyhjiötilan paine.

Ilman koostumus

Ilma koostuu siinä olevien kaasujen molekyyleistä. Normaali-ilman molekyyli tiheys on $2,5 \cdot 10^{19}$



Kuva 2. Tyhjiösystemi. Pumppu on sijoitettu tyhjiökammion päälle (Leybold).

mol/cm^3 . Pääkaasut ovat typpi ja happi. Ilmakehän koostumus käy ilmi kuvassa 3 olevasta taulukosta. Siitä ilmenevät ilmakehän sisältämät kaasut, niiden tilavuusprosentit ja osapaineet sekä keskimääräinen molekyyli massa.

Kuten taulukosta havaitaan, tilavuusprosenttien ja osapaineiden lukuarvot ovat samat. Tilavuusprosentit pätevät kuivalle ilmalle parinkymmenen kilometrin korkeuteen asti. Osapaineet pätevät kokonaispaineen ollessa 100 kPa.

Lisäksi ilmassa on vaihteleva määrä vesihöyryä. Kun lämpötila on 20 °C, veden höyrynpaine on 2,338 kPa.

Kaasumolekyylit ovat herkkäliikkeisiä. Ne liikkuvat taukoamatta törmäillen toisiinsa ja systeemin seinämiin. Ilmakehän paineessa jokainen molekyyli törmää toiseen molekyyliin noin 10^{10} kertaa sekunnissa.

Komponentti	Tilavuus (%) Osapaine (kPa)	Keskimääräinen molekyyli massa < μ >
Typpi	N ₂	78,084
Happi	O ₂	20,946
Argon	Ar	0,934
Hilidioksidi	CO ₂	~ 0,033
Neon	Ne	$1,82 \cdot 10^{-3}$
Helium	He	$5,24 \cdot 10^{-4}$
Krypton	Kr	$1,14 \cdot 10^{-4}$
Metaani	CH ₄	~ $2 \cdot 10^{-4}$
Vety	H ₂	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Typpioksididi	N ₂ O	~ $5 \cdot 10^{-5}$
Ksenon	Xe	$8,7 \cdot 10^{-6}$
Otoni	O ₃	~ $1 \cdot 10^{-6}$
Kuiva ilma	100	28,966

Kuva 3. Ilmakehän koostumus (2).

Huoneenlämpötilassa molekyylien nopeudet ovat satoja metrejä sekunnissa. Keskimääräinen molekyylien etäisyys toisistaan on noin kymmenen kertaa niin suuri kuin tyypillinen molekyylin halkaisija. Tyypillisenä halkaisijana voidaan pitää 3×10^{-10} m.

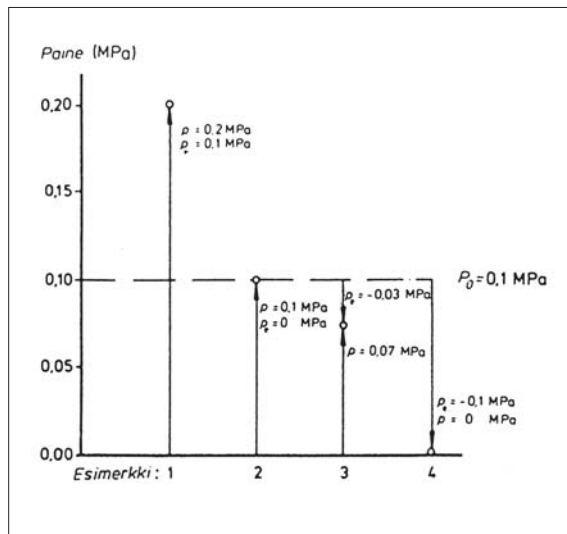
Ilmanpaine

Ilmanpaineella tarkoitetaan ilmassa olevien kaasujen molekyyli-törmäyksistä johtuvaa pinta-alayksikköön kohdistuvaa voimaa. Ilmakehän paineessa pintaan kohdistuu yhden neliösenttimetrin alalle $2,9 \times 10^{23}$ törmäystä sekunnissa. Voima kohdistuu jokaiseen pintaan kohtisuoraan sitä vastaan. Jotta paine olisi yksikäsitteisesti määriteltä, on paineen lukuarvon lisäksi tiedettävä, onko kysymyksessä absoluuttipaine, ylipaine vai alipaine.

Absoluuttipaine on kysymyksessä silloin, kun paineen mittaaminen alkaa absoluuttisesta tyhjiöstä eli nollapaineesta. Yli- ja alipaineen ilmoittamista varten tarvitaan vertailupaineena tietty absoluuttipaine. Yleisimmin vertailupaineena käytetään ilmakehän painetta (n. 0,1 MPa). Tämä merkitsee sitä, että yli- ja alipaineen mittaaminen alkaa ilmakehän paineesta, mutta eri suuntiin.

Paineen tunnuks

Absoluuttipaineen tunnus on p. Yli- ja alipaineen tunnus on p_g . Yli- ja alipaine erotetaan toisistaan merkitsemällä alipaineen lukuarvon eteen miinusmerkki. Tyhjiön paine voidaan ilmoittaa joko absoluutti- tai alipaineena.



Kuva 4. Neljä esimerkkiä paineen ilmoittamisesta absoluuttipaineen p ja yli- tai alipaineen p_g avulla (3).

Paineeseen liittyvien käsitteiden ja paineen ilmoittamisen selventämiseksi on kuvassa 4 ilmoitettu neljä eri paineen arvoa absoluuttipaineen p sekä yli- tai alipaineen p_g avulla.

Paineen yksiköt

SI-järjestelmän mukainen paineen perusmittayksikkö on pascal, Pa (N/m^2). Kerrannaisyksikköjä ovat kilopascal, kPa ja megapascal, MPa.

$$1 \text{ MPa} = 10^3 \text{ kPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

Myös yksikköjä baari [bar] ja millibaari [mbar] käytetään yleisesti.

$$1 \text{ bar} = 10^3 \text{ mbar} = 10^5 \text{ Pa}$$

Muita vielä esiintyviä, mutta pois jääviä yksikköjä ovat:

$$\begin{aligned} \text{torri,} & \quad 1 \text{ torri} = 1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa} \\ \text{atm,} & \quad 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 101,325 \text{ kPa} \\ \text{at,} & \quad 1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm}^2 = 98,0665 \text{ kPa} \\ \text{psi,} & \quad 1 \text{ psi} = 1 \text{ b/in}^2 = 6,89476 \text{ kPa} \\ \text{mmH}_2\text{O,} & \quad 1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9,80665 \text{ Pa} \end{aligned}$$

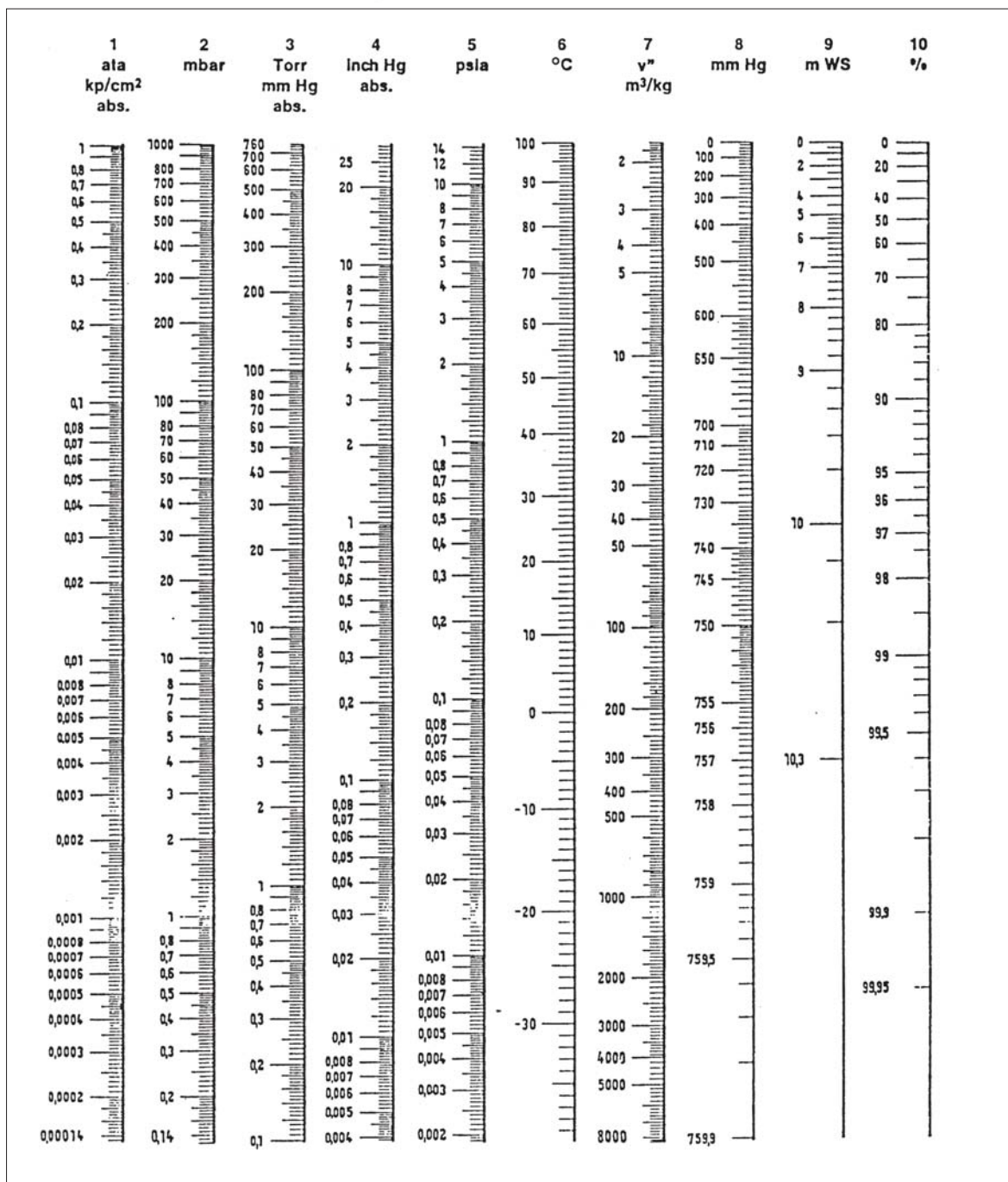
Tyhjiön paine

Tyhjiön paine on pienempi kuin ilmakehän paine. Se voidaan ilmoittaa absoluuttipaineena tai alipaineena. Mittayksikköinä ovat hyväksytyt SI-yksiköt, mutta ainakin vielä tällä hetkellä käytetään yleisesti myös muita yksikköjä.

Kuvissa 5 ja 6 on esitetty yleisimmin käytetyt yksiköt ja niiden vastaavuudet.

Π	Pa	Torr	inHg _{abs}	InHg	%
1	$1,013 \cdot 10^5$	760	29,92	0	0
10^1	10^6	10^2	1	26,93	90
10^2	10^7	1	10^{-2}	29,62	99
10^3	10^8	10^{-2}	10^{-4}	29,89	99,9
10^4	10^9	10^{-4}	10^{-6}	29,917	99,99
10^5	10^{10}	10^{-6}	10^{-8}	29,920	99,999
10^6	10^{11}	10^{-8}	10^{-10}		
10^7	10^{12}	10^{-10}	10^{-12}		
10^8	10^{13}	10^{-12}			
10^9	10^{14}				

Kuva 5. Paineen yksiköjä ja niiden vastaavuuksia tyhjiössä (4).



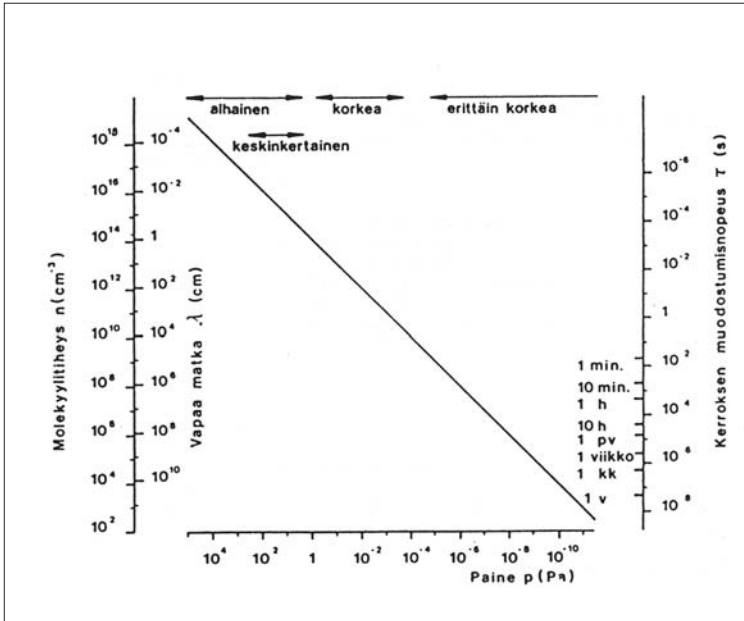
Kuva 6. Paineenyksikköjen vastaavuuksia ja veden kiehumispiste sekä vesihöyryn ominaistilavuus tyhjiössä (5).

Kuvassa 6 kohdissa 1...5 on kysymyksessä absoluuttipaine. Kohdasta 6 nähdään veden kiehumispiste ja kohdasta 7 vesihöyryn ominaistilavuus paineen funktiona. Kohdissa 8 ja 9 on kysymyksessä alipaine. Kohdasta 10 ilmenee tyhjiöprosentit. Esimerkiksi, jos tyhjiö on 50%, sen paine on noin 500 mbar, ja vastaavasti jos tyhjiö on 75%, paine on noin 250 mbar (absoluuttipainetta).

Tyhjiöalueet

Kuvassa 7 on tyhjiö jaettu neljään alueeseen seuraavasti (Teil 1):

$10^5 \dots 10^2$	Pa	alhainen tyhjiö
$10^2 \dots 10^{-1}$	Pa	keskinkertainen tyhjiö
$10^{-1} \dots 10^{-5}$	Pa	korkea tyhjiö
$10^{-5} \dots$	Pa	erittäin korkea tyhjiö



Kuva 7. Ilman fysikaalisten ominaisuuksien keskinäiset riippuvuudet (4).

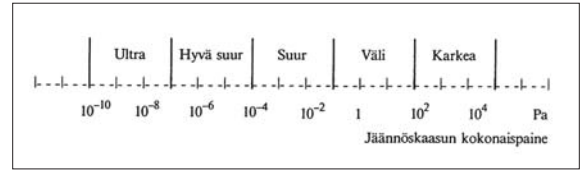
Kuvasta 7 ilmenevät myös molekyyliitiheyden, vapaan matkan sekä tyhjiön paineen ja kerroksen muodostumisaian keskinäiset riippuvuudet 25 °C lämpötilassa. Molekyyliitiheys on keskimääräinen molekyyliäärä tilavuusyksikköä (cm³) kohti.

Vapaa matka eli törmäysväli on se keskimääräinen matka (cm), jonka molekyyli kulkee kahden törmäyksen välillä. Kerroksenmuodostusaika on se aika (s), joka kuluu yhden molekyylin vahvuisen kerroksen muodostumiseen vastapuhdistetulle pinnalle. Kun tyhjiötilasta poistetaan kaasuja, paine ja molekyyliitiheys pienenevät. Sen sijaan vapaamatka ja kerroksenmuodostusaika pitenevät.

Tyhjiön painealueiden nimityksissä ja rajojen asettamisessa on paljon vaihtelevuutta. Tyhjiön alaraja on laskenut sitä mukaa kuin tyhjiön kehittämisessä tarvittavat laitteet ovat kehittyneet.

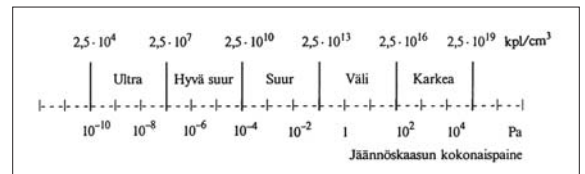
Kuvassa 8 on tyhjiö jaettu jäännöskaasun kokonaispaineen perusteella kuuteen alueeseen seuraavasti (Valli):

- 10⁵ ... 10² Pa karkea tyhjiö
- 10² ... 10⁻¹ Pa välityhjiö
- 10⁻¹ ... 10⁻⁴ Pa suurtyhjiö
- 10⁻⁴ ... 10⁻⁷ Pa hyvä suurtyhjiö
- 10⁻⁷ ... 10⁻¹⁰ Pa ultratyhjiö
- 10⁻¹⁰ ... Pa hyvä ultratyhjiö

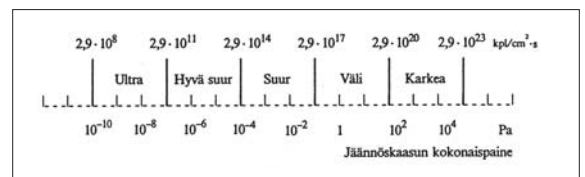


Kuva 8. Tyhjiöalueet (2).

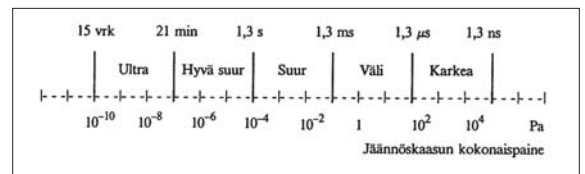
Kuvat 9 ... 12 esittävät molekyyliitiheyttä, törmäystaajuutta, kerroksen muodostumisaikaa ja törmäysväliä eri tyhjiöalueilla 20 °C lämpötilassa.



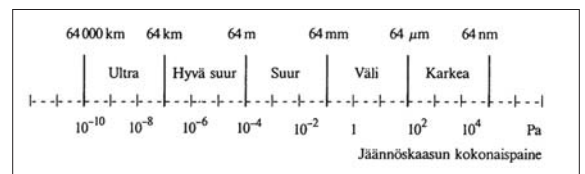
Kuva 9. Jäännöskaasun molekyyliitiheys (kpl/cm³) eri painealueilla (2).



Kuva 10. Kaasumolekyylien törmäystaajuus (kpl/cm² · s) eri tyhjiöalueilla. Jäännöskaasun koostumus oletettu samaksi kuin normaali-ilman.



Kuva 11. Vety molekyylikerroksen muodostumisaika eri tyhjiöalueilla. Ultratyhjiössä ja hyvässä suurtyhjiössä vety on usein runsaimpina esiintyvä kaasu (2).



Kuva 12. Keskimääräinen törmäysväli tyypikaaressa eri painealueilla. Karkeatyhjiössä ja välityhjiössä on usein eniten tyypettä (2).

Jäännöskaasu

Pumppauksen alkaessa tyhjiösystemi on useimmiten täynnä huoneilmaa. Sitä on sekä systeemin tilavuudessa että tarttuneena kaikkiin systeemin sisäpintoihin.

Pumppaus poistaa tyhjiötilasta kaasuja ja höyryjä. Aluksi niitä poistuu suhteellisen helposti, mutta mitä vähemmän niitä on jäljellä, sitä vaikeammaksi ja kallimmaksi jäännöskaasun pumppaaminen tulee.

Lämpöliike irrottaa kaasua- ja höyrymolekyylejä seinämiltä tyhjiötilaan. Seinämiltä irronneen jäännöskaasun osuus pumppauksessa on sitä suurempi, mitä alhaisempi tyhjiötilan paine on.

Käytännössä jokainen tyhjiösystemi tahtoo vuotaa. Tämä merkitsee sitä, että systeemiin tulee kaasuja ja höyryjä sen ulkopuolelta. Lisäksi tyhjiöön voi haihtua höyryjä rakennusmateriaaleista tai systeemin rakentamisen ja puhdistamisen yhteydessä jääneistä epäpuhtauksista.

Tasapaino syntyy, kun tyhjiötilaan vuotaa ulkopuolelta sekä irtoaa seinämiltä ja epäpuhtauksista kaasuja ja höyryjä yhtä nopeasti kuin pumppu pystyy niitä poistamaan. Tällöin pumppu ei pysty enää aikaansaamaan suurempaa tyhjiötä. Se pystyy ainoastaan pitämään yllä saavutetun tyhjiön.

Jäännöskaasun kolme tilaa

Sen mukaan, miten pitkä kaasumolekyylien keskimääräinen törmäysväli on systeemin seinämien väliseen etäisyyteen nähden, jäännöskaasun sanotaan olevan viskoottisessa tilassa, välitilassa tai molekyyli-tilassa.

Viskoottisessa tilassa jäännöskaasu on yleensä karkeatyhjiön alueella. Sille on tunnusomaista niin suuri jäännöskaasun tiheys, että molekyylit törmäilevät toisiinsa paljon tiheämmin kuin tyhjiötilan seinämiin.

Välitilassa jäännöskaasu on useimmiten välityhjiön alueella. Välitila edustaa siirtymävaihetta viskoottisen tilan ja molekyyli-tilan välillä. Sen leveys on pari kertalukua.

Molekyyli-tilassa jäännöskaasu on ultratyhjiön, hyvän suurtyhjiön ja yleensä myös suurtyhjiön alueilla. Molekyyli-tilassa kaasu on harvaa. Sen tiheys on niin pieni, että molekyylit törmäävät toisiinsa paljon harvemmin kuin tyhjiötilan seinämiin. Suurin osa molekyyleistä onkin kiinnittynyt tyhjiötilan sisäpintoihin.

Jäännöskaasun ominaisuudet muuttuvat vähitellen tilasta toiseen. Myös tyhjiötilan ominaisuudet vaikuttavat jäännöskaasun tilaan siten, että mitä kauempana laitteiston sisäpinnat ovat, sitä myöhemmin alkaa siirtyminen viskoottisesta tilasta molekyyli-tilaan suuntaan.

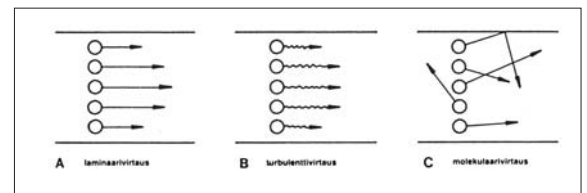
Kaasun virtaus

Pumpattaessa tyhjiö ilmakehän paineesta suurtyhjiön alueelle muuttuu jäännöskaasu vähitellen viskoottisesta tilasta välitilan kautta molekyyli-tilaan. Vastaavasti muuttuu kaasuvirtaus viskoottisesta virtauksesta välitilamuotoisen virtauksen kautta molekyyli-tilaan.

Virtausnopeudesta riippuen viskoottinen virtaus voi olla laminaarista eli suoraviivaista tai turbulenti- eli pyörteistä. Pienillä nopeuksilla virtaus on laminaarista ja suurilla nopeuksilla turbulenti- eli pyörteistä.

Molekyyli-tilassa kaasumolekyylien liike on yksilöllistä, toisista molekyyleistä riippumatonta, ja molekyylien väliset törmäykset ovat harvinaisia.

Kuva 13 esittää kaasumolekyylejä eri virtaustiloissa.



Kuva 13. Kaasumolekyylit laminaari-, turbulenti- ja molekyyli-tilassa (4).

Jäännöskaasun koostumus

Karkeatyhjiön alueella jäännöskaasun koostumus ei oleellisesti eroa ilman koostumuksesta. Välityhjiössä koostumukseen alkaa vaikuttaa tyhjiötilan seinämiltä irtoava kaasu, jolloin vesihöyryn osuus lisääntyy. Suurtyhjiön ja hyvän suurtyhjiön alueilla 70...90% jäännöskaasusta on useimmiten vesihöyryä. Ultratyhjiön alueella on yleensä eniten vetykaasua.

Höyry ja neste tyhjiössä

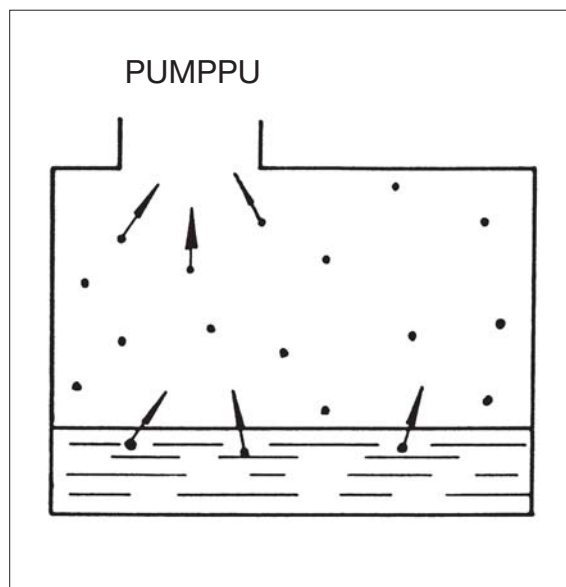
Höyryn ja kaasun ero on siinä, että kaasumolekyylejä tarttuu tyhjiötilan sisäpintoihin yleensä vain yhteen kerrokseen. Sitä vastoin höyrymole-

kyylit pystyvät tarttumaan miten moneksi kerrokseksi tahansa. Lisäksi höyry saattaa tiivistyä nesteeksi tyhjiötilaan.

Mikäli tyhjiötilassa on nestettä, syntyy tasapainotila, jossa höyrystä nesteeseen ja nesteestä höyryyn aikayksikössä siirtyvien molekyylien lukumäärät ovat yhtä suuret. Tätä tasapainotilaa vastaavaa painetta sanotaan nesteen höyryn paineeksi kyseisessä lämpötilassa.

Jos nestettä sisältävää tyhjiötilaa pumpataan jatkuvasti, syntyy jatkuvuustila, jossa nesteestä höyrystyy tyhjiötilaan aikayksikössä yhtä paljon molekyyliä kuin pumppu poistaa niitä. Tällä on merkitystä, sillä tyhjiötilan paine pysyy likimain vakiona niin kauan kuin nestettä riittää.

Myös kiinteistä aineista irtoaa tyhjiösystemiin molekyyliä. Tätäkin ilmiötä sanotaan höyrystymiseksi, joskin usein myös sublimoitumiseksi. Tällä on yleensä merkitystä vasta hyvän suurtyhjiön ja ultratyhjiön alueilla.



Kuva 14. Höyryn ja nesteen käyttäytyminen tyhjiötilassa (2).

Painealue	Fysikaalinen tila	Tavoite	Käyttö, sovellus
	↑ alhainen paine	saavuttaa paineero	tartunta, nosto kuljetus (pneumaattinen, puhdistus, suodatus) muovaus
alhainen tyhjiö	↑ alhainen molekyyli tiheys	poistaa aktiivisia aineosia ilmasta	lamput (hehku, loisteputki, elektroniputki) sulatus, sintraus pakkaus
keskinkertainen tyhjiö	↑ ↓	poistaa absorboituneet tai liuennet kaasut vähentää energiansiirtoa	eristys, vuodon havaitseminen kuivaus, vedenpoisto, tiivistys jäähdytyskuivaus, kuivatislaus, kyllästys lämpöeristys sähköeristys tyhjiömikrovaaka avaruussimulointi
korkea tyhjiö	↑ ↓	välttää törmäyksiä	elektroniputket, katodiputket, tv, valokennot, valomonistimet, röntgen kiihdyttimet, massaspektrometrit, isotooppiseparaattorit elektronimikroskoopit elektronisuihkuhitausta, kuumennus
erittäin korkea tyhjiö	↑ ↓	puhdistaa pintoja	pinnoitus (terminen, reaktiivinen) höyrystys, katodipölynnys) molekyyllitisausta kitka, adheesio, emissiotutkimukset materiaalien soveltuvuus avaruuskäyttöön

Kuva 15. Tyhjiötekniikan käyttökohteita (4).

Tyhjiötekniikan käyttö

Tyhjiötekniikalla on runsaasti käyttökohteita kaikilla tyhjiön painealueilla. Käyttösovellukset vaihtelevat hyvin paljon. Ne voidaan ryhmitellä joko eri painealueilla saavutettujen ilman fysikaalisten ominaisuuksien perusteella tai tavoitteena olevan käyttötarkoituksen perusteella.

Kuvassa 15 edellisellä sivulla on esitetty tyypillisiä tyhjiötekniikan käyttökohteita.

Aiemmin esitetyt (s. 4) ja myös kuvan 15 vasemmassa laidassa olevat tyhjiön neljä painealuetta (alhainen tyhjiö, keskinkertainen tyhjiö, korkea tyhjiö ja erittäin korkea tyhjiö) ja myöhemmin esitetyt (s. 5) tyhjiön kuusi painealuetta (karkeatyhjiö, välityhjiö, suurtyhjiö, hyvä suurtyhjiö, ultratyhjiö ja hyvä ultratyhjiö) vastaavat toisiaan siten, että

- alhainen tyhjiö vastaa karkeatyhjiötä
- keskinkertainen tyhjiö vastaa välityhjiötä
- korkeatyhjiö vastaa suunnilleen suurtyhjiötä
- erittäin korkea tyhjiö alkaa suunnilleen siitä, mistä hyvä suurtyhjiö ja pitää tämän lisäksi sisällään myös ultratyhjiön ja hyvän ultratyhjiön.

Lähdeluettelo

- 1 Tyhjiötekniikan kurssi. INSKO, Helsinki 1984.
- 2 Fontell Armas, Maula Jarmo, Nieminen Risto, Söderlund Charles, Valli Kalevi, Vehanen Asko, Vulli Martti, Ylilampi Markku: Tyhjiötekniikka. Helsinki: Suomen tyhjiöseura, 1986.
- 3 SFS-käsikirja 19, Suureet ja yksiköt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto, 1985.
- 4 Airila Mauri, Hallikainen Keijo, Kääpä Juha, Lairila Timo: Kompressorikirja. Vantaa: Hydor, 1983.
- 5 Tyhjiötekniikkaa ja sen sovellutuksia pakkausteollisuudelle. Busch Vakuumteknik.
- 6 Vacuum Technology, its Foundations, Formulae and Tables. Leybold-Heraeus, 1982.
- 7 Basic Vacuum Technology, Training Workbook, Varian Associates, 1984.
- 8 Seuraavien tyhjiötekniikkalaitteita toimittavien yritysten esitteitä:

Oy Finnvacuum Ab
Vacuumservice Oy
Leybold Oy
Busch Vakuumteknik Oy
Oy Jarlas Ab
Biab Ab
Oy Mercantile Ab
Bosch Rexroth Oy
Pimatic Oy
Starckjohann Telko Oy
Festo Oy
Oy Atlas Copco Ab
SPM Instrument Oy
Sensistor Ab
Espoon Paineilma Oy

