



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

MIKKO-MATTI VIITANEN
AUTOMAATTISET KULJETINJÄRJESTELMÄT
ELINTARVIKETEOLLISUUDESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Kari T.
Koskinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone-, ja
materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoksen kokouksessa
9. joulukuuta 2009

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

VIITANEN, MIKKO-MATTI: Automaattiset kuljetinjärjestelmät

elintarviketeollisuudessa

Diplomityö, 80 sivua

kesäkuu 2010

Pääaine: Hydrauliteknikka

Tarkastaja: professori Kari T. Koskinen

Avainsanat: Hygienia, Kuljetin, Pneumaattinen kuljetin

Elintarvikealalla on tiettyjä eroavaisuuksia vaatimuksissa laitteiston ja tuotantotilojen suhteen verrattuna muihin teollisuuden aloihin. Tämän luonteeltaan kirjallisuusselvitystyypin diplomityön tavoitteena on näiden vaatimusten selvittäminen. Työn toisena tavoitteena on kootusti esitellä ja vertailla elintarviketeollisuudessa käytettäviä erilaisia kuljettimia. Erityisesti huomion kohteena on energiankulutus ja siihen vaikuttavat tekijät eri kuljetinjärjestelmissä. Pääpaino työssä kuljettimien osalta on pneumaattisissa kuljettimissa, joiden toiminnan taustalla olevan teorian ja pneumaattisen kuljetinjärjestelmän suunnitteluprosessin selvittäminen kuuluvat myös työn tavoitteisiin. Työssä rajoituttiin selvittämään vain jauhemaisten ja raemaisten bulk-materiaalien kuljettamista.

Työn alussa käsitellään paineilmatekniikkaa, pääpainon ollessa paineen kehittämiseen liittyvässä teoriassa, paineenkehittimissä ja pelkän ilman sekä materiaalin ja ilman seoksen putkivirtauksessa. Teoriaosuuden jälkeen työssä esitellään elintarviketeollisuudessa yleisesti käytetyt mekaaniset kuljetintyyppit ja erityyppiset pneumaattiset kuljettimet. Työssä selvitetään kuljettimien toimintaperiaatteita, ominaisuuksia ja soveltuvuutta erilaisiin elintarviketeollisuuden kuljetussovelluksiin sekä pneumaattisen kuljettimen pääkomponentit ja niiden valintakriteerejä. Kuljettimien jälkeen työssä selvitetään elintarviketeollisuudessa vaadittavia erikoisvaatimuksia muun muassa käytettävien rakenteiden ja materiaalien suhteen. Työn lopussa käsitellään pneumaattisten kuljetinjärjestelmien suunnittelua sekä suunnittelun eri vaiheita ja niissä tehtäviä valintoja muun muassa järjestelmään valittavien komponenttien suhteen.

Lähdeaineistona paineilmatekniikkaan liittyvää teoriaa selvittäessä käytettiin suomalaista ja ulkomaalaista alan kirjallisuutta sekä alipainetekniikkaa ja termodynamiikkaa käsittelevien Tampereen teknillisen yliopiston kurssien kurssimateriaaleja. Lisäksi moderneista alipaineenkehittimistä ja kuljettimista haettiin tietoa myös valmistajien internetsivuilta. Mekaanisista ja pneumaattisista kuljettimista haettiin tietoa internetsivujen lisäksi vain ulkomaalaisesta kirjallisuudesta, koska kotimaista on heikosti saatavilla. Kuljettimien erikoisvaatimuksia käsittelevässä luvussa lähteenä käytettiin elintarvikekoneiden hygieniavaatimuksia käsitteleviä standardeja sekä laitehygieniajärjestön ja tutkimuskeskuksen hygieniaohjeistuksia. Pneumaattisen kuljetinjärjestelmän suunnittelua käsiteltiin työssä järjestelmien suunnittelua käsittelevien ulkomaalaisten teosten näkökulmasta.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

VIITANEN, MIKKO-MATTI: Automatic conveying systems in food industry

Master of Science Thesis, 80 pages

June 2010

Major: Hydraulics

Examiner: Professor Kari T. Koskinen

Keywords: Conveyor, Hygiene, Pneumatic conveyor

There are certain differences in requirements for the machinery and production facilities in food industry compared with other industrial sectors. This master's thesis aims to determine these requirements. Another goal of the thesis is to present and compare collectedly different types of conveying systems used in food industry. Particular attention is given to energy consumption of different types of conveying systems and the factors affecting to it. The main focus of this thesis relating to conveying systems is on pneumatic conveyors. Determination of the theory of pneumatic conveying system and design procedures also are goals of this thesis. The study is limited to concern only conveying of powdery and granular bulk solids. The nature of the thesis is literature survey.

At the beginning of the thesis is a theoretical part in which compressed air technology is discussed. Emphasis is on the theory of pressure developing, pressure producers and on both single-phase flow (air only) and two-phase flow (material conveying) in the pipeline. After the theoretical part, different types of mechanical and pneumatic conveying system used in food industry are presented including operating principles, system properties and suitability for various conveying applications. In the following chapter, the special requirements in food industry such as structure and material requirements are presented. At the end of the thesis is pneumatic conveying system design discussed. Design procedures and decision stages like selecting system components to a particular system are described in the chapter.

References used in this thesis were both Finnish and foreign literature. Also course materials of Tampere University of Technology considering negative pressure technology and thermodynamics and internet pages of modern vacuum producer and conveyor manufacturers were used as source material. As well standards considering hygiene requirements for the design of machinery and hygiene instructions prepared by hygiene organisation and research centre were used as source material to gather information about special requirements in food industry.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Hydrauliiikan ja automatiikan laitokselle vuosien 2009-2010 välisenä aikana. Haluan kiittää professori Kari T. Koskista diplomityöaiheesta ja työn tarkastamisesta sekä työn ohjaajaa Harri Sairialaa hyvistä neuvoista ja palautteesta työn edistymisen aikana.

Suuri kiitos kuuluu myös perheelleni ja isovanhemmilleni niin henkisestä kuin taloudellisestakin tukemisesta koko opiskeluaikanani. Tämän lisäksi haluan kiittää myös ystäviäni kaikesta saamastani kannustuksesta opintojen ja työn tekemisen aikana.

Tampereella 23.4.2010

Mikko-Matti Viitanen

SISÄLLYS

1.	Johdanto.....	1
2.	Paineilman ja paineen tuottamisen sekä kaasu- ja materiaalivirtauksen teoriaa	3
2.1.	Yleistä paineilmateoriaa	3
2.1.1.	Paineesta, normaali-ilmasta ja ideaalikaasusta	3
2.1.2.	Ilman puristustavat ja -prosessit	5
2.2.	Ylipainetekniikka	8
2.2.1.	Kompressorit.....	8
2.2.2.	Monivaiheinen puristus	9
2.2.3.	Tuottosuhte	9
2.2.4.	Kompressorien hyötysuhteet	10
2.2.5.	Kuljettimissa käytettävät kompressorityypit	11
2.2.6.	Tuoton ilmoittaminen	12
2.3.	Alipainetekniikka	12
2.3.1.	Tyhjiöstä.....	12
2.3.2.	Alipaineen tuottaminen	15
2.3.3.	Alipainepumput pneumaattisissa kuljettimissa.....	17
2.3.4.	Alipainepumpun pumppausnopeus ja tuotto.	18
2.4.	Kaasun virtaus putkistossa (single-phase flow)	20
2.4.1.	Tilavuusvirta, massavirta, moolivirta ja molekyylivirta	20
2.4.2.	Paineenlasku putkivirtauksessa.....	21
2.4.3.	Virtausnopeus	22
2.4.4.	Virtausolosuhteet	23
2.4.5.	Virtauskanavan kaasunjohtavuus eli konduktanssi.....	24
2.4.6.	Virtausnopeudesta matalassa paineessa	26
2.5.	Materiaalivirtaus (two-phase flow)	27
2.5.1.	Pneumaattisen järjestelmän kapasiteetista.....	27
2.5.2.	Seossuhde (phase density).....	27
2.5.3.	Putkiston geometrian ja kuljetusetäisyyden vaikutukset kapasiteettiin	28
2.5.4.	Materiaalin virtaustavat kuljetuksessa	29
2.5.5.	Tilakaavio (state diagram).....	31
2.5.6.	Pystysuuntainen ja vaakasuuntainen virtaus	32
2.5.7.	Alipainejärjestelmien yhteydessä huomioitavaa.....	32
3.	Kuljettimet elintarviketeollisuudessa	34
3.1.	Mekaaniset kuljettimet	34
3.1.1.	Kuljetintyyppit ja niiden toimintaperiaatteet.....	34
3.1.2.	Mekaanisten kuljettimien energiankulutus.....	37
3.2.	Pneumaattiset kuljettimet.....	37
3.2.1.	Pneumaattisen kuljettimen toiminta ja pääkomponentit	38
3.2.2.	Suljettu ja avoin järjestelmä	42

3.2.3.	Ylipainekuljettimet.....	42
3.2.4.	Alipainekuljettimet.....	44
3.2.5.	Yhdistelmäkuljettimet	45
3.2.6.	Erikoiskuljettimet.....	46
3.2.7.	Pneumaattisten kuljettimien energiankulutus	49
4.	Erikoisvaatimukset elintarviketeollisuudessa.....	55
4.1.	Yleistä.....	55
4.1.1.	Käsitteitä.....	55
4.1.2.	Yleisiä ja toiminnallisia vaatimuksia	55
4.2.	Rakennemateriaalit	56
4.2.1.	Materiaaleista yleisesti	56
4.2.2.	Materiaalien ominaisuudet ja käyttö	57
4.3.	Rakenteiden vaatimuksia	59
4.3.1.	Elintarvikealue.....	59
4.3.2.	Roiskealue	61
4.3.3.	Elintarvikkeeseen koskematon alue	61
5.	Järjestelmien suunnittelu ja suunnittelun vaiheet	63
5.1.	Suunnitteluprosessikaaviot	63
5.1.1.	Matemaattisiin yhtälöihin perustuva suunnitteluprosessi.....	63
5.1.2.	Mittaustuloksiin perustuva suunnitteluprosessi	67
5.2.	Järjestelmän kokonaissuunnittelu.....	70
5.2.1.	Suunnittelun eteneminen ja laitteiston valinta	70
5.3.	Materiaalien ominaisuuksista.....	72
5.3.1.	Yleistä.....	72
5.3.2.	Materiaalipartikkelien ominaisuuksista (particle properties)	72
5.3.3.	Materiaalin virtausominaisuuksista (flow properties).....	74
5.3.4.	Materiaalin ilmastusominaisuuksista (aeration properties)	74
6.	Yhteenveto.....	77
	Lähteet.....	79

MERKINNÄT

Merkintä	SI-yksikkö	Selitys
η^0	[Ns/m ²]	Normaali-ilman dynaaminen viskositeetti
η_t, η_{tr}	[-]	Kompressorin isoterminen / isentrooppinen hyötysuhde
λ	[m]	Molekyylien keskimääräinen törmäysväli
λ_L	[-]	Kaasun virtauskerroin
ν^0	[m ² /s]	Normaali-ilman kinemaattinen viskositeetti
π	[-]	Painesuhde
ρ	[kg/m ³]	Tiheys (kaasu)
ρ^0	[kg/m ³]	Normaali-ilman tiheys
ρ_{N1}, ρ_{N2}	[kpl/m ³]	Molekyyli tiheys sisääntulo-/poistoaukolla
φ	[-]	Materiaali-ilmaseoksen seossuhde (phase density)
A	[m ²]	Virtauskanavan sisäpinta-ala
C	[m ³ /s]	Virtauskanavan kaasunjohtavuus eli konduktanssi
C_i	[m/s]	Äänennopeus normaali-ilmassa
C_{yhd}	[m ³ /s]	Yhdistetty konduktanssi
$C_{1,2,\dots,n}$	[m ³ /s]	Konduktanssi 1,2...n
c_p	[J/kg K]	Ominaislämpö vakio paineessa normaali-ilmalla
c_v	[J/kg K]	Ominaislämpö vakio tilavuudessa normaali-ilmalla
D, d	[m]	Virtauskanavan (putken) sisähalkaisija
f_L	[-]	Kitkakerroin ($\lambda_L = 4 f_L$)
\dot{G}_1	[kg/s]	Materiaalivirtaus, vastaava kuin \dot{m}_p
k	[-]	Polytrooppivakio
K''	[-]	Knudsenin luku
K	[-]	Kerroin putkihäviön laskemisessa alle 100mm putkella
L	[m]	Virtauskanavan (putken) pituus
M	[kg/mol]	Molaarinen massa
m	[kg]	Massa
\dot{m}	[kg/s]	Massavirta
\dot{m}_a	[kg/s]	Ilman massavirta
\dot{m}_p	[kg/s]	Materiaalin massavirta
N	[-]	Kaasumoolien lukumäärä
n	[-]	Yleinen muuttuja, myös puristusvaiheiden lukumäärä
Δp	[N/m ²]	Paine-ero, paineen lasku putkistossa, yksikkönä usein Pa, kPa, MPa tai bar
Δp_a	[N/m ²]	Painehäviö (paine-ero) putkessa pelkällä ilmavirtauksella
p^0	[N/m ²]	Normaali-ilman paine
p	[N/m ²]	Paine tunnetussa pisteessä
p_1, p_2	[N/m ²]	Paineet pisteessä 1 (alku) ja 2 (loppu)

P	[W]	Teho, yksikkönä käytetään usein kW
P_{aks}	[W]	Akseliteho, yksikkönä käytetään usein kW
P_p	[W]	Polytrooppisessa puristuksessa tarvittava teho
P_t	[W]	Isotermisessä puristuksessa tarvittava teho
P_{tr}	[W]	Isentrooppisessa puristuksessa tarvittava teho
R	[J/kg K]	Kaasuvakio
R_u	[J/(mol K)]	Yleinen kaasuvakio
Re	[-]	Reynoldsin luku
S_1, S_2	[m ³ /s]	Pumppausnopeus pisteessä 1 ja 2
S_p	[m ³ /s]	Pumppausnopeus (alipainepumpun)
S_t	[m ³ /s]	Tyhjennysnopeus
$S_{p1,2}$	[m ³ /s]	Tarkasteluvälin alkupaineen (1) ja loppupaineen (2) todellisen pumppausnopeuden keskiarvo
t	[s]	Tarvittavan alipaineen saavuttamiseen kuluva aika
T^0	[K]	Normaali-ilman lämpötila
T	[K]	Lämpötila
v	[m/s]	Kaasun keskimääräinen virtausnopeus
	[m ³ /kg]	Ominaistilavuus
v_g	[m/s]	Kaasun virtausnopeus
V	[m ³]	Tilavuus
\dot{V}	[m ³ /s]	Tilavuusvirran voimakkuus, sama kuin Q_v
V_1, V_2	[m ³]	Tilavuus pisteessä 1 (alku) ja pisteessä 2 (loppu)
w	[m/s]	Kaasun makroskooppinen virtausnopeus virtauskanavassa
\bar{w}	[m/s]	Keskimääräinen makroskooppinen virtausnopeus
W	[J]	Työ
Q_M	[kg/s]	Massavirran voimakkuus
Q_n	[mol/s]	Moolivirran voimakkuus
Q_N	[kpl/s]	Molekyylivirran voimakkuus
Q_p	[Pa · m ³ /s]	Pumpun tuotto/läpäisy
Q_v	[m ³ /s]	Tilavuusvirran voimakkuus
y	[-]	Isentrooppivakio

1. JOHDANTO

Teollisuudessa materiaalin ja tavaroiden siirtoon käytetään paljon erityyppisiä kuljettimia. Kuljettimia on käytössä runsaasti myös elintarviketeollisuudessa, jossa niiden avulla esimerkiksi siirretään elintarvikkeita ja raaka-aineita varastosta tuotantolinjalle, tuotantolinjalta toiselle ja tuotantolinjalta ylimääräinen ja käyttökelvoton materiaali säiliöihin. Kuljettimia käytetään myös esimerkiksi elintarvikkeiden pakkauslinjalla. Elintarvikkeita kuljettaessa syntyy aina riski epäpuhtauksille, mikä tulee huomioida järjestelmien suunnittelussa.

Tässä diplomityössä tarkastelu rajoitetaan pakkaamattomiin elintarvikkeisiin ja erityisesti jauhemaisten ja raemaisten bulk-materiaalien kuljettamiseen, vaikka työssä esitetyt mekaaniset ja pneumaattiset kuljetintyytit ovat kykeneviä monelta osin kuljettamaan myös melko suuria ja nestepitoisia elintarvikkeita. Lisäksi tässä työssä käsitellään ainoastaan automaattisia kuljetinjärjestelmiä, jotka saavat käyttövoimansa lihasvoiman sijasta esimerkiksi sähkö-, polttoaine-, hydraulinen-, tai paineilmamootorilta.

Työssä pyritään perehdyttämään lukija pneumaattisten kuljettimien toimintaan, kuljetintyyppihin, komponentteihin, energiankulutukseen vaikuttaviin tekijöihin sekä kuljettimen valintaan ja suunnitteluun. Lisäksi pyritään esittelemään elintarviketeollisuudessa käytettävät mekaaniset kuljettimet ja niiden sopivuutta erilaisiin järjestelmiin.

”Laitesuunnitteluinsinööreillä on yleensä hyvä käsitys elintarvikkeprosessien tarvittavista vaatimuksista ja ratkaisumalleista prosessiturvallisuuden, sähkön, mekaniikan, massan- ja energiansiirron näkökulmista. Hygieeninen näkökulma on usein saanut vähemmän huomiota.” [1] Tässä diplomityössä pyritään tuomaan hygienianäkökulma suunnitteluun käsittelemällä hygieniasetuksia ja ohjeistuksia hygieeniseen laitesuunnitteluun.

Diplomityön toisessa luvussa käsitellään paineilmatekniikkaan liittyvää teoriaa ylipainejärjestelmien ja alipainejärjestelmien osalta. Luvussa käsitellään myös paineen kehittämistä ja sen kehittämiseen käytettyjä laitteita. Lisäksi käsitellään pelkän kaasun virtausta putkistossa ja kaasu-materiaaliseoksen virtausta putkistossa. Toisessa luvussa käsitelty teoria ja laitteet ovat perusta pneumaattisten yli- ja alipainekuljettimien toiminnalle.

Kolmannessa luvussa käsitellään erityyppisten mekaanisten ja pneumaattisten kuljetinjärjestelmien toimintaperiaatteita ja energiankulutusta sekä pneumaattisen kuljettimen pääkomponentteja ja niiden valintaa. Kolmannessa luvussa käsiteltävät kuljetinjärjestelmätyytit ovat yleisesti elintarviketeollisuudessa käytettyjä.

Neljännessä luvussa perehdytään elintarviketeollisuusalalla vaadittuihin erikoisvaatimuksiin muun muassa rakenteiden suunnittelun ja käytettävien materiaalien suhteen. Koska diplomityön aiheena on elintarviketeollisuudessa käytettävät kuljettimet, perehdytään tässä luvussa erityisesti hygieniaongelmien välttämiseen laitteiden hygienialähtöisen suunnittelun vuoksi. Esitetyt vaatimukset ja suunnittelunäkökulmat perustuvat alan standardeissa ja hygieniaohjeissa esitettyihin vaatimuksiin ja ohjeistuksiin.

Viidennessä luvussa käsitellään pneumaattisten järjestelmien suunnittelua sekä järjestelmän suunnittelun eri vaiheissa tehtäviä päätöksiä esimerkiksi järjestelmään valittavien kuljettimen komponenttien suhteen. Lisäksi luvussa käsitellään kuljetettavan materiaalin kuljettamisen kannalta tärkeimmät ominaisuudet, koska kuljetettavan materiaalin merkitys järjestelmän kapasiteetin ja suunnittelun kannalta on ratkaiseva.

Viimeisessä luvussa esitetään diplomityön sisällöstä yhteenveto, jossa esitellään käsiteltyjä asioita, joista pyritään painottamaan tärkeimpiä.

2. PAINEILMAN JA PAINEEN TUOTTAMISEN SEKÄ KAASU- JA MATERIAALIVIRTAUKSEN TEORIAA

Tässä luvussa käsitellään paineilmateoriaa ylipainetekniikan ja alipainetekniikan osalta sekä käsitellään paineen kehittämiseen liittyviä asioita. Lisäksi käsitellään sekä pelkän kaasuvirtauksen että materiaalivirtauksen teoriaa.

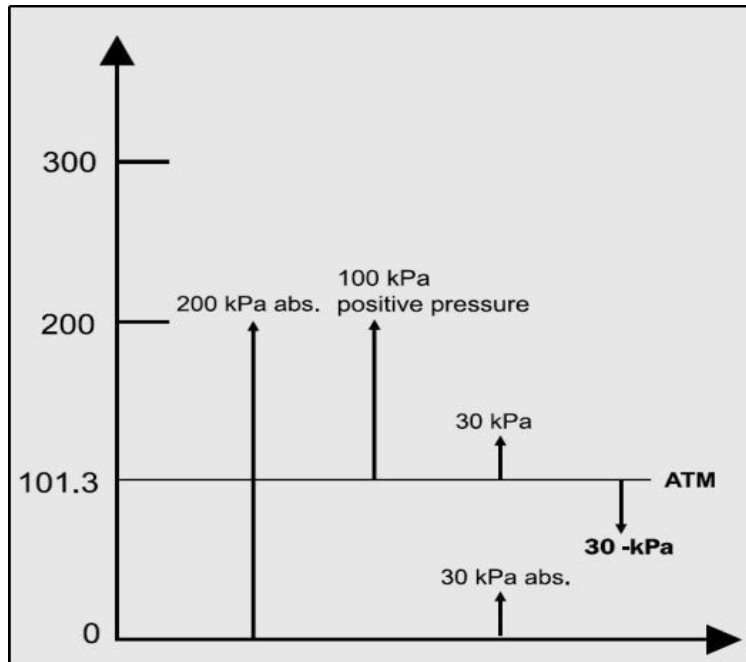
2.1. Yleistä paineilmateoriaa

2.1.1. Paineesta, normaali-ilmasta ja ideaalikaasusta

Paine ilmaisee pinta-alayksikköön kohdistuvaa voimaa. Paineen SI-yksikkö on Pa (Pascal) = N/m^2 . Pascal on yksikkönä pieni ja siitä käytetään usein kerrannaisia kPa ja MPa. Paineesta käytetään myös SI-järjestelmän sallimaa yksikköä baria, $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa}$. [2, s.20]

Ilmakehän aiheuttama paine on noin 1 bar, tarkempi sovittu normaali-ilmakehän paine on 1,013 bar. Painetta, joka on ilmakehän aiheuttamaa painetta suurempi, sanotaan ylipaineeksi ja ilmakehän painetta matalampaa painetta alipaineeksi. Alipaineesta käytetään myös joissakin tapauksissa käsitystä negatiivinen paine. Silloin normaali-ilmakehän painetta pidetään nollatasona ja sitä alhaisempi paine ilmoitetaan negatiivisena paineena. Esimerkiksi painemittareissa yleisesti asetetaan normaali-ilmakehän paine nollatasoksi. Tällöin absoluuttisen paineen nollataso on mittaripaineena 101,3 -kPa. Absoluuttisesta paineesta puhuttaessa tarkoitetaan painetta, jonka nollataso on absoluuttinen tyhjiö eli paine on 0 bar. Alipainejärjestelmässä absoluuttipaine on siis ilmanpaineen ja mittaripaineen erotus ja ylipainejärjestelmässä taas mittaripaineen ja ilmanpaineen summa. [2, s. 20; 3, s.6,8]

Tässä diplomityössä esitetyt paineet ovat ylipaineita (mittaripaineita), ellei erikseen ole mainintaa absoluuttisesta paineesta (abs). Alipaineet ilmoitetaan taas yleensä negatiivisina paineina ja käytetään silloin miinusmerkkiä erotukseksi ylipaineesta paineen yksikön edessä. Joissain yhteyksissä käytetään myös absoluuttista painetta alipaineen yhteydessä. Kuva 2.1. havainnollistaa paineiden erilaisia ilmoittamistapoja, joita käytetään sekä tässä diplomityössä että alan kirjallisuudessa ja valmistajien esitteissä.



Kuva 2.1. Paineen ilmoittamiseen käytettyjä tapoja ja merkintöjä [3].

Ilmalle on valittu tietyt vakiot normiarvot:

paine	$p^0 = 1,013 \text{ bar} = 101,3 \text{ kPa}$
lämpötila	$T^0 = 293 \text{ K} = 20 \text{ °C}$
tiheys	$\rho^0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$
dynaaminen viskositeetti	$\eta^0 = 18,14 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2$
kinemaattinen viskositeetti	$\nu^0 = 15,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
ominaislämpö vakioaineessa	$c_p = 1005 \text{ J/kg K}$
ominaislämpö vakiotilavuudessa	$c_v = 718 \text{ J/kg K}$
äänennopeus	$C_i = 342 \text{ m/s}$

Fysikaaliset ominaisuudet ovat riippuvaisia toisistaan. Riippuvuuksia voidaan tutkia ideaalikaasun käyttäytymistä kuvaavilla yhtälöillä. [2, s.20]

Pienissä paineissa ja kohtuullisissa lämpötiloissa kaasun tilasuureita sitoo toisiinsa ideaalikaasun tilayhtälö:

$$pv = RT \quad (2.1)$$

jossa p = paine [Pa]

v = ominaistilavuus [m^3/kg]

T = lämpötila [K]

ja R = kaasuvakio [J/kg K]

tilayhtälö voidaan esittää myös muodossa:

$$pV = m \frac{R_u}{M} T = NR_u T \quad (2.2)$$

jossa $V =$ tilavuus [m^3]

$N =$ kaasumoolien lukumäärä

$m =$ massa [kg]

$M =$ molaarinen massa [kg/mol]

ja $R_u =$ yleinen kaasuvakio [8,314 J/(mol K)] [4, s.3]

Puristusprosesseissa tarvittava tilavuudenmuutostyö W [J] saadaan yhtälöstä:

$$W = - \int_1^2 p dV \quad (2.3)$$

Jotta integraali voidaan laskea, pitää ensin selvittää puristusprosessin tyyppi. [4, s.7]

2.1.2. Ilman puristustavat ja -prosessit

Puristus voi kompressoreissa ja alipainepumpuissa tapahtua kineettisesti, staattisesti tai vastavirtausperiaatteella. Kineettisessä puristuksessa kaasu kiihdytetään tiettyyn nopeuteen juoksupyörän avulla. Paineen nousu aiheutuu, kun virtausta jarrutetaan palautuvasti. Kineettisessä puristuksessa imu- ja painetila ovat yhteydessä toisiinsa jatkuvasti ja kaasun dynaamiset voimat estävät kaasun virtauksen takaisinpäin. Kineettinen puristus tapahtuu jatkuvana virtauksena ilman annostelua. [5, s.15]

Staattisessa puristuksessa kaasu suljetaan pienenevään tilavuuteen, jossa kaasun paine nousee jatkuvasti tilavuuden pienentyessä. Kun kaasun paine on puristettu määräpaineeseen, se siirretään pois puristustilasta paineliitântään. Staattisessa puristuksessa virtaus on epäjatkovaa ja sykkivää, koska kaasu puristetaan ja siirretään puristustilasta annoksina. [5, s.16; 6, s.12]

Vastavirtapuristuksessa kaasu siirretään vakiotilavuudessa imupuolelta painepuolelle. Paine nousee jyrkästi painepuolella jo olevan kaasun takaisinvirtauksen johdosta. Paineistettua kaasua siirretään vähittäin pois painetilasta. [6, s.12]

Ideaalikaasuprosessi voidaan esittää yleisesti muodossa:

$$pV^n = \text{vakio} \quad (2.4)$$

jossa muuttuja n saa eri arvoja prosessista riippuen. [4, s.13]

Isotermisessä puristuksessa puristettavan ilman lämpötila säilyy vakiona, koska puristustyössä syntyvän lämmön kuvitellaan siirtyvän kokonaisuudessaan ympäristöön. Kaasun sisäinen energia säilyy muuttumattomana. Ideaalikaasuprosessin yhtälössä (2.4) isotermisessä tapauksessa $n = 1$, joten

$$pV^1 = \text{vakio} = mRT \quad (2.5)$$

josta saadaan yhtälöt tilavuudelle V ja isotermisessä puristuksessa tarvittavalle työlle W_t

$$V = mRT / p \quad (2.6)$$

$$W_t = -\int_1^2 mR(T/p) dp \quad (2.7)$$

$$W_t = -mRT \ln(p_2/p_1) \quad (2.8)$$

Isotermisessä puristuksessa tarvittavaksi tehoksi P_t saadaan:

$$P_t = \dot{m}RT_1 \ln(p_2/p_1) \quad (2.9)$$

jossa \dot{m} = massavirta [kg/s]. [5, s.16-18; 7, s.39; 4, s.13]

Isentrooppisen puristuksen periaatteena on, että puristus tapahtuu lämpöeristetyksi ja puristustyö siirtyy kokonaisuudessaan kaasun sisäenergiaksi. Isentrooppisen puristuksen tapauksessa ideaalikaasuprosessin yhtälössä (2.4) $n = \gamma$. Isentrooppivakio γ on kaasun ominaislämpöjen suhteen määritelty vakio ja kokeellisesti on määritelty, että ilmalle $\gamma = 1,4$. Yhtälö (2.4) voidaan esittää isentrooppisen puristuksen tapauksessa muodossa:

$$pV^\gamma = \text{vakio} \quad (2.10)$$

$$p_1V_1^\gamma = p_2V_2^\gamma \quad (2.11)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{1/\gamma} \quad (2.12)$$

ja koska:

$$p_1V_1 / p_2V_2 = T_1/T_2 \quad (2.13)$$

eliminoimalla V_2/V_1 saadaan lämpötilan nousulle isentrooppisessa puristuksessa:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (2.14)$$

Tehtävä työ tilavuuden muuttuessa tilavuudesta V_1 tilavuuteen V_2 on:

$$\int_{V_1}^{V_2} p dV = p_1 V_1 \gamma \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma} \quad (2.15)$$

josta isentrooppisessa puristuksessa tehtäväksi työksi W_{tr} saadaan:

$$W_{tr} = \frac{p_1 V_1 \gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] = \frac{mRT_1 \gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right] \quad (2.16)$$

ja isentrooppisen puristuksen tehontarpeeksi P_{tr} [W] saadaan:

$$P_{tr} = \frac{\dot{m}RT_1 \gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (2.17)$$

[5, s.16-18; 7, s.40-41; 4, s.13; 6, s.14-15]

Todellisuudessa kompressoreiden puristusprosessi ei ole isoterminen eikä isentrooppinen, vaan osa puristustyöstä muuttuu kaasun sisäenergiaksi ja osa johtuu lämpönä ympäristöön kompressorin rakenteiden kautta. Todellisia puristusprosesseja kuvaa parhaiten polytrooppisen puristuksen malli. Yhtälö (2.4) voidaan kirjoittaa polytrooppisen puristuksen tapauksessa

$$pV^k = \text{vakio} \quad (2.18)$$

jossa k on polytrooppivakio. Yhtälöstä (2.18) huomataan, että isoterminen ja isentrooppinen puristus ovat polytrooppisen puristuksen erikoistapauksia. Todellisuudessa polytrooppivakion arvo riippuu kompressorista. Lähimmäksi isotermistä prosessia päästään kompressoreilla, joiden puristuskaasu jäähtyy hyvin. Tällaisia ovat muun muassa isot vesijähdytteiset mäntäkompressorit ($k = 1, 2, \dots, 1, 3$) ja öljyruiskutteiset ruuvi- ja lamellikompressorit ($k \geq 1, 1$).

Polytrooppisessa puristuksessa tehtävä työ W_p ja tarvittava teho P_p saadaan kuten isentrooppisessa tapauksessa, mutta isentrooppivakion tilalla käytetään polytrooppivakiota:

$$W_p = \frac{mRT_1 k}{k - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (2.19)$$

$$P_p = \frac{\dot{m}RT_1 k}{k - 1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (2.20)$$

Kaavoja (2.19) ja (2.20) voidaan käyttää yleisesti kaikkien kompressorien puristustyön ja puristukseen vaadittavan tehon laskennassa, kun tiedetään kompressorille määritelty

polytrooppivakion arvo. Arvo voidaan määrittellä kullekin kompressorityypille kokeellisesti lämpötilan nousun mittausta hyväksi käyttäen. [5, s.16-18; 6, s.15]

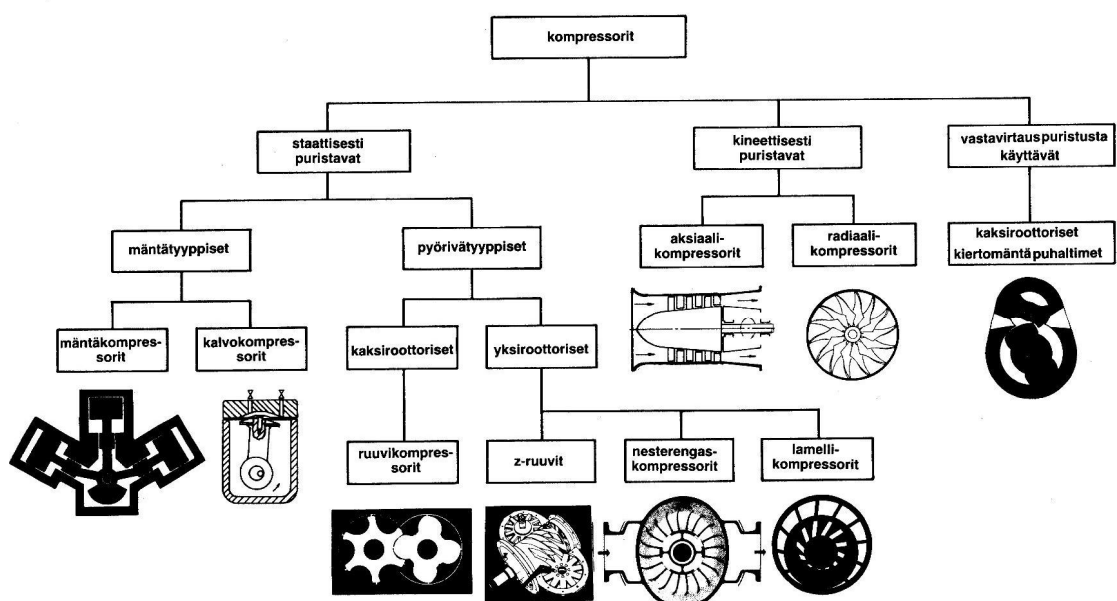
2.2. Ylipainetekniikka

2.2.1. Kompressorit

Kompressorin tehtävä on nostaa kaasumaisen väliaineen painetta siten, että saavutettava loppupaine on vähintään kaksinkertainen imupaineeseen nähden eli painesuhde on vähintään 2. Painesuhteella tarkoitetaan loppupaineen ja imupaineen suhdetta ja siitä käytetään merkintää π . Paineen muodostamiseen käytettäviä laitteita, joiden painesuhde on alle 2, kutsutaan puhaltimiksi tai ahtimiksi. Ilmastoinnissa käytettävissä puhaltimissa painesuhde voi olla 1 ja matalapaineisessa pneumaattisessa siirrossa 1,5. [8, s. 43; 5, s.25]

Kompressoreilta vaaditaan erilaisia ominaisuuksia eri käyttötilanteisiin. Tarvittava painetaso voi vaihdella muutamasta barista satoihin baareihin, laboratorio-olosuhteissa joissain kokeissa tarvitaan jopa 1000 barin painetta. Teollisuudessa käytetään tavanomaisesti 6...10 barin painetta, korkeapaineverkoissa myös 15...20 barin painetta. Pneumaattisessa siirrossa tarvitaan ylipainejärjestelmissä 0,5...3 barin painetta, mutta korkeapainejärjestelmissä paine voi olla huomattavasti suurempikin. Tarvittavan paineen lisäksi kompressoreilta vaaditaan eri käyttötilanteisiin sopivaa virtausta. Tarve voi vaihdella muutaman litran minuuttituotosta tuhansien kuutiometrien tarpeeseen minuutissa. Yhdellä kompressorityypillä ei ole mahdollista kaikkien paineilmajärjestelmien vaatimuksia toteuttaa vaan erilaisia tarpeita varten on olemassa useita eri kompressorityyppejä. [5, s.25; 9 s.118-122]

Kompressorit voidaan kuvan 2.2 mukaisesti jaotella ryhmiin puristustavan mukaan.



Kuva 2.2. Kompressorityypit jaoteltuna puristustavan mukaan [5, s.25].

Kuvassa on esitelty vain yleisimmät kompressorityypit, mutta markkinoilla on lisäksi runsaasti muitakin kompressorityyppejä ja erilaisia muunnoksia tavanomaisista kompressorirakenteista, jotka on kehitetty yleensä varsin rajoitetulle käyttöalueelle. [5, s.25-26]

2.2.2. Monivaiheinen puristus

Kompressoreita voidaan valmistaa yksi- tai useampivaiheisina. Yksivaiheinen kompressor puristaa kaasun kerralla suoraan tavoitepaineeseen. Tällöin tavoiteltavat painetasot ovat useimmilla kompressorityypeillä melko pieniä, koska korkea painesuhde on epätaloudellinen. Puristus jaetaan usein vaiheisiin, jotta päästäisiin suuriin loppupaineisiin, saavutettaisiin parempi hyötysuhde ja korkeampi tuottosuhde sekä pystyttäisiin hallitsemaan lämpötiloja. Yhdessä vaiheessa ilma puristetaan noin painesuhteisiin 2...10 ja vaiheiden välissä ilman yleensä jäähdytetään. Puristus kannattaa jakaa pääsääntöisesti sitä useampaan vaiheeseen mitä isompi on käytettävä kompressor. Kineettisesti puristavissa kompressoreissa käytetään huomattavasti pienempiä painesuhteita kuin staattisesti puristavissa. Jos puristus tapahtuu lähes isotermisesti, kuten voidelluissa ruuvikompressoreissa, ei useampivaiheisesta puristuksesta ole merkittävästi hyötyä. Tämän vuoksi voidellut ruuvikompressorit ovat yleensä yksivaiheisia 12...13 barin loppupaineisiin saakka. [5, s.22]

Monivaiheisessa puristuksessa kompressorin tuottosuhde on ensimmäisen vaiheen tuottosuhde. Energiataloudellisesti on järkevintä valita kaikkien vaiheiden painesuhteet yhtä suuriksi. Tarvittavan kokonaispainesuhteen ollessa π ja puristusvaiheiden lukumäärän n saadaan yhden vaiheen optimipainesuhteeksi $\sqrt[n]{\pi}$. [5, s.21-22]

2.2.3. Tuottosuhde

Kompressorin iskutilavuuden perusteella määritetty teoreettinen ilmantuottomäärä on todellisuudessa aina suurempi kuin todellinen kompressorin tuotto. Tämä johtuu muun muassa sisäisistä ja ulkoisista kaasuvuodoista kompressorissa, jäännöstilavuuden vaikutuksesta ja imuilman kuristuksesta ja lämpenemisestä imukanavissa. [5, s.20]

Kompressorin todellisen ja teoreettisen ilmantuoton suhde määritellään tuottosuhteen η_v avulla. Tuottosuhteesta käytetään myös käsitettä volymetrinen hyötysuhde, joka on Airilan [5] mukaan epäonnistunut. Airilan mukaan hyötysuhde viittaa aina energiataseisiin, mutta mäntäkoneissa tuottosuhde ei kuitenkaan vaikuta oleellisesti kompressorin hyötysuhteeseen. [5, s.20]

Mäntätyyppisissä kompressoreissa tuottosuhde on noin 0,60...0,90 riippuen vaiheluvusta ja painesuhteesta. Eniten tuottosuhteeseen vaikuttaa jäännöstilavuus, jonka vaikutus kasvaa voimakkaasti, kun puristuksen painesuhde nousee. [5, s.21]

2.2.4. Kompressorien hyötysuhteet

Isotermisen tai isentrooppisen puristuksen mukaan laskettu vaadittava ihanteellinen teho on aina pienempi kuin kompressorin vaatima todellinen akseliteho, koska kompressorissa syntyy tehohäviöitä. Tehohäviöt voidaan jakaa mekaanisiin häviöihin ja puristustyön häviöihin. [5, s.21]

Hyötysuhteen määrittelyssä käytetään vertailuperusteena ihanteellista isotermistä tai isentrooppista puristusprosessia. Kompressorille voidaan määrittellä isoterminen ja isentrooppinen hyötysuhde puristusprosessin tehontarpeen ja akselitehon suhteena:

$$\eta_{tr} = \frac{P_{tr}}{P_{aks}} \quad (2.21)$$

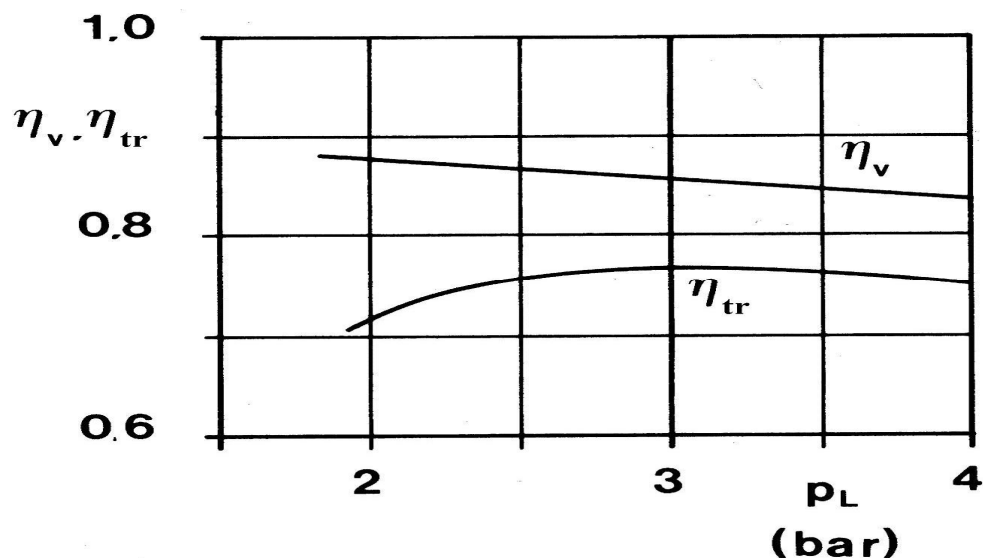
jossa η_{tr} = isentrooppinen hyötysuhde

P_{tr} = isentrooppisen puristuksen tehontarve [W]

ja P_{aks} = akselitehontehontarve [W]

Isoterminen hyötysuhde η_t määritellään vastaavalla tavalla isotermisen puristuksen tehontarpeen ja akselitehontarpeen suhteena. Isentrooppinen hyötysuhde on yleensä luokkaa 0,7...0,95 ja isoterminen hyötysuhde 0,5...0,7 kompressorin nimelliskuormituksella. [5, s.21]

Kuvassa 2.3 on esitetty erään öljyttömän ruuvikompressorin tuottosuhteen η_v ja isentrooppisen hyötysuhteen η_{tr} riippuvuus loppupaineesta p_L (abs).



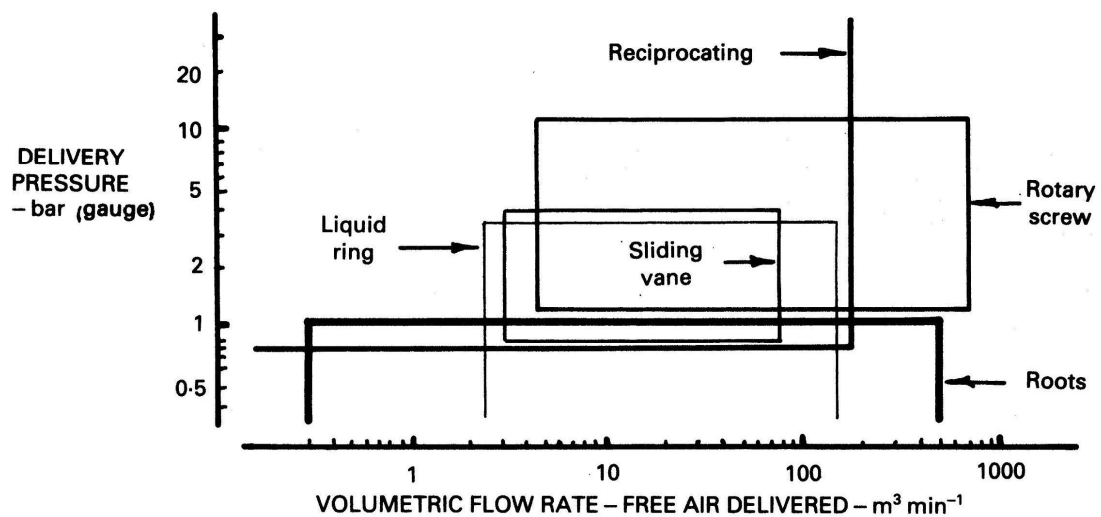
Kuva 2.3. Tuottosuhteen η_v ja isentrooppisen hyötysuhteen η_{tr} riippuvuus loppupaineesta p_L (abs). Suunnitteluloppupaine on 3 bar (abs) [5, s.20] (muokattu).

Kuvasta 2.3 nähdään, että isentrooppinen hyötysuhde on suurimmillaan suunnitellun loppupaineen kohdalla.

2.2.5. Kuljettimissa käytettävät kompressorityypit

Ylipainekuljettimissa käytetään sekä ahtimia ja puhaltimia että kompressoreita tuottamaan pneumaattisissa kuljettimissa tarvittavaa virtausta. Matalapainekuljettimissa käytetään yleensä puhaltimia ja ahtimia, joilla saavutetaan matalilla paineilla suuri tilavuusvirta, kuten Rootin puhaltimia ja keskipakopuhaltimia. Kun tarvitaan korkeampaa painetta esimerkiksi pidempiin kuljetusmatkoihin tai sakeamman virtauksen takia, käytetään kuljettimissa yleisesti mäntä- tai ruuvikompressoreita. Kineettisesti puristavista kompressorityypeistä pneumaattisissa kuljettimissa käytetty tyyppi on lähinnä radiaalinen malli. Kineettisten- eli turbokompressoreiden tuottama virtaus on hyvin riippuvainen järjestelmässä tapahtuvasta paineenlaskusta. Jos paine-ero järjestelmässä kasvaa, laskee jyrkästi myös turbokompressorin tuotto, mikä voi aiheuttaa virtauksen vähenemisen myötä tukkeutumisen putkistossa. Tämän vuoksi turbokompressoreita käytetäänkin pääasiassa vain matalilla paineilla ilma-materiaaliseosvirtauksessa puhaltimina. [9, s.118-119]

Kuvassa 2.4 on esitetty eri kompressorityyppien tuotot ja painealueet. Alueet ovat suuntaa-antavia, mutta havainnollistavat eri kompressorityyppien sopivuutta erilaisiin sovelluksiin. Erityisesti mäntäpumpuja valmistetaan hyvin erikokoisina, erityyppisinä ja erimallisina, joten yleensä mäntäpumpulla voidaan kattaa lähes kaikki kuvassa 2.4 esitettävät käyttöolosuhteet. [9, s.119]



Kuva 2.4. Kompressorityypeille ominaiset painealueet ja tuottoalueet [9, s.349].

Kuten kuvasta 2.4 voidaan nähdä, liukusiipi- eli lamellikompressorit sopivat hyvin keski- ja korkeapainejärjestelmiin. Rootin puhaltimeen verrattuna lamellikompressorit tuottavat tasaisemman virtauksen korkeammilla paineilla. Yksivaiheinen lamellikompressorit pystyy 4 barin maksimipaineella noin 50 m³ minuuttituottoon. Kaksivaiheisella lamellikompressorilla päästään aina 10 barin paineeseen asti, mutta tuotto jää korkeammalla paineella alle 6 m³ / min. Myös nesterengaskompressorit sopivat keskipainejärjestelmiin noin 4 barin painetasoon asti. Kompressorityypin

tehottomuuden takia niitä käytetään kuitenkin kompressorina lähinnä matalapainejärjestelmissä ja erityisesti pumppuna alipainejärjestelmissä. [9, s.120-121]

Rootin puhaltimia käytetään järjestelmissä, joissa painetaso ei ylitä yhden baarin painetta. Rootin puhaltimen vastavirtausperiaatteen mukainen puristustapa on termodynaamiselta hyötysuhteeltaan heikko, mikä on suurin syy sille, että Rootin puhallinta käytetään vain pienillä paineilla. Rootin puhallinta käytetään nesterengaskompressorin tavoin myös alipainejärjestelmissä. [9, s.120]

Kuten aikaisemmin mainittiin, korkeilla paineilla käytetään yleensä ruuvi- tai mäntäkompressoreita. Mäntäkompressorit on perinteisesti ollut yleisin käytettävä kompressorityyppi korkeapainejärjestelmissä, mutta suurta virtausta vaativissa järjestelmissä ruvikompressorit on vakavasti otettava kilpailija mäntäkompressorille. [9, s.122]

2.2.6. Tuoton ilmoittaminen

Kompressoreiden tuottoja vertaillessa on tärkeää, että kompressorien tuotot on ilmoitettu samalla tavalla ja olosuhteissa. Ilman tuotto voidaan ilmoittaa usean eri standardin mukaisesti, mikä pitää myös huomioida tuottoja vertailtaessa. Yleisemmin käytössä olevat mittaustandardit perustuvat pohjimmiltaan tuottoilman massavirran mittaamiseen standardiolosuhteissa. Käytännössä mittaus suoritetaan mittaamalla tuottoilman tilavuusvirta ja redusoidaan se imuilman paineeseen ja lämpötilaan. Kompressoreiden tuoton mittausperusteita on määritelty tarkemmin seuraavissa standardeissa:

DIN 1946, Osa 1, liite F

ISO 1217, Osa 1, liite C

Pneurop/Cagi PN2CPTC2 [8, s.50-51; 5, s.22-24]

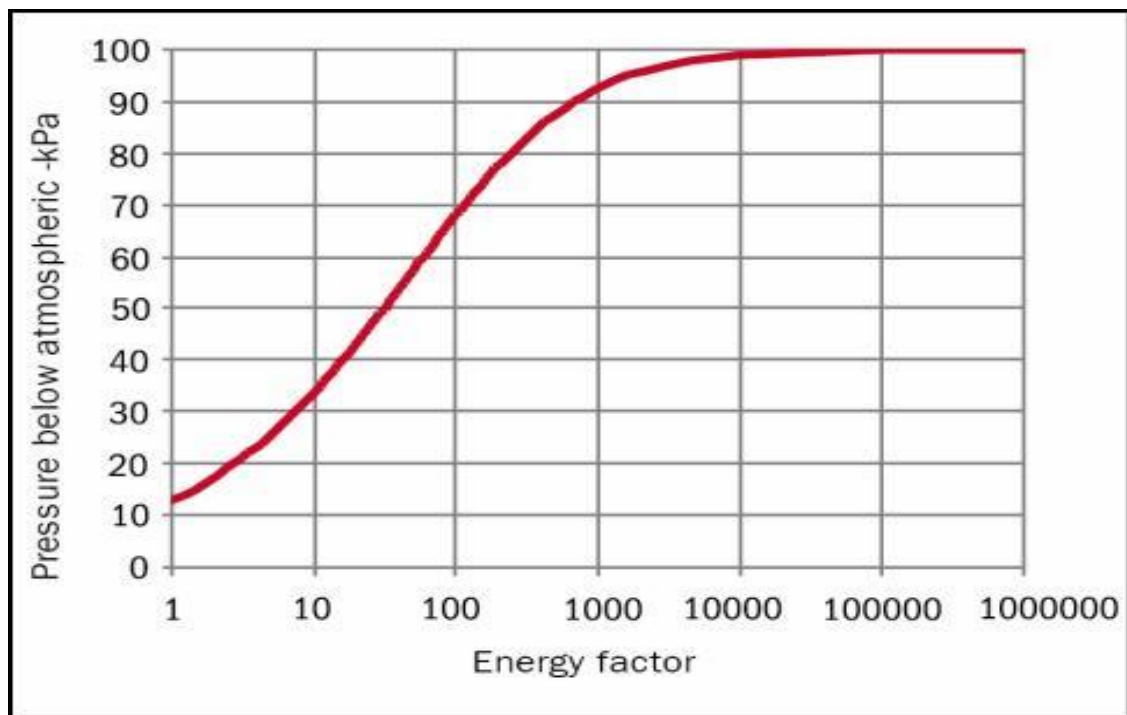
2.3. Alipainetekniikka

Alipainetekniikasta käytetään usein myös nimitystä tyhjiötekniikka. Molemmilla nimityksillä tarkoitetaan tekniikkaa, joka perustuu paineen alentamiseen alle normaali-ilmakehän paineen. Painetta alentamalla saadaan ympäröivän ilmakehän paineesta potentiaalinen energianlähde. [3, s.6]

2.3.1. Tyhjiöstä

Tyhjiö on käsitteenä suljettu tila, jossa kaasun paine on pienempi kuin ympäröivän ilmakehän paine. Absoluuttisella tyhjiöllä tarkoitetaan fysiikassa ja tekniikassa tilavuutta, jossa ei ole ainetta ja paine on nolla. Luonnollinen tyhjiö saavutetaan noustessa maapallon pinnalta kohti avaruutta, kun taas maapallon ilmakehässä tyhjiö pitää luoda keinotekoisesti poistamalla suljetusta tilasta kaasuja ja höyryjä. [3, s.6; 10 s.15; 5, s.180]

Alipaine aikaansaadaan erilaisilla alipainepumpuilla tai ejektoreilla. Alipaineen kehittämistä käsitellään tarkemmin luvussa 2.3.2. Aluksi alipaineen tuottaminen kaasuja ja höyryjä poistamalla on kohtuullisen vaivatonta, mutta kaasujen ja höyryjen määrän vähetessä, käy kaasun harventaminen yhä vaikeammaksi. Nykyisillä laitteistoilla on mahdollista saavuttaa lähes ideaalinen tyhjiö, mutta sen saavuttaminen ei ole kovinkaan energiataloudellista. Kuvasta 2.5 nähdään, että energian tarve kasvaa jyrkästi tavoiteltaessa yhä suurempaa alipainetta. Tietynlaisena järkevänä alipainerajana pidetään 90 -kPa. Edetessä kohti tätä suurempaa alipainetta kasvaa energian tarve hyvin jyrkästi, kuten kuvasta voidaan päätellä. [3, s.12; 10, s.15]



Kuva 2.5. Alipaineen kehittämiseen tarvittava energia. Kaasun harventaminen käy sitä vaikeammaksi mitä alhaisempaa painetta tavoitellaan [3, s.12].

Alipaineen tuottamisen yhteydessä tyhjiöön jäänyttä kaasua ja höyryä kutsutaan jäännöskaasuksi, jota tyhjiö käytännössä aina jonkin verran sisältää. Tyhjiöitä luokitellaan yleensä jäännöskaasun paineen ja koostumuksen perusteella eri luokkiin. Luokituskäytäntöjä painerajoineen on lukuisia. Laurilan mukaan [5] DIN 28400, Teil 1 -standardissa nimetään paineluokat seuraavasti:

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

Tyhjiön ominaisuuksia voidaan soveltaa monessa eri sovelluksessa, joista kuvassa 2.6 on esitetty muutamia. [10, s.15-16; 5, s.180-181]

Painealue	Fysikaalinen tila	Tavoite	Käyttö, sovellus
	↑ alhainen paine	saavuttaa paine-ero	tartunta, nosto kuljetus (pneumaattinen, puhdistus, suodatus) muovaus
alhainen tyhjiö	↑ alhainen molekyyliheisyys	poistaa aktiivisia aineosia ilmasta	lamput (hehku, loisteputki, elektroniputki) sulatus, sintraus pakkaus
keskinkertainen tyhjiö	↕	poistaa absorboituneet tai liuenneet kaasut vähentää energiansiirtoa	eristys, vuodon havaitseminen kuivaus, vedenpoisto, tiivistys jäähdytyskuivaus, kuivatislaus, kyllästys
korkea tyhjiö	↑ suuri keskimäär. vapaa matka	välttää törmäyksiä	lämpöeristys sähköeristys tyhjiömikrovaaka avaruussimulointi
erittäin korkea tyhjiö	↑ pitkä kerroksenmuodostumisaika	puhdistaa pintoja	elektroniputket, katodiputket, tv, valokennot, valomonistimet, röntgen kiihdyttimet, massaspektrometrit, isotooppiseparaattorit elektronimikroskoopit elektronisuihkuhitsaus, kuumennus pinnoitus (terminen, reaktiivinen) höyrytys, katodipölynnys) molekyylitilaisuus kitka, adheesio, emissiotutkimukset materiaalien soveltuvuus avaruuskäyttöön

Kuva 2.6. Eri tyhjiöasteiden sovelluskohteita [5, s.182].

Teollisuudessa käytettävät alipaineet ovat lähes aina edellisen luokituksen mukaisesti alhaisen tyhjiön alueella eli negatiivisena paineena ilmaistuna alueella 0...99 -kPa. Mäkinen [kalvot] esittää teollisuuden käyttöön paremmin sopivan luokittelun, joka jakaa alipaineen karkeasti kolmeen luokkaan:

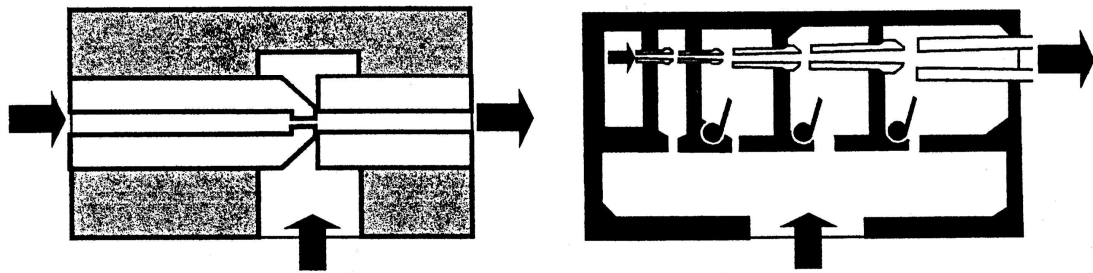
0 ...20 -kPa ($10^5 \dots 8 \cdot 10^4$ Pa)	Ahtimet ja puhaltimet / kevyt alipaine
20...99 -kPa ($8 \cdot 10^4 \dots 10^0$ Pa)	Teollisuusalipaine
99... -kPa ($10^0 \dots$ Pa)	Prosessialipaine / korkea alipaine [3, s.11]

Ilmassa on muiden kaasuseoksien tapaan jokaisella kaasukomponentilla oma osapaineensa ja Daltonin osapainelain mukaisesti kaasun kokonaispaine on kaasukomponenttien osapaineiden summa. Alhaisen ja keskinkertaisen tyhjiön alueella kaasun koostumus vastaa normaali-ilmakehän paineessa olevan kaasun koostumusta, mutta korkean tyhjiön alueella koostumus muuttuu jatkuvasti. Erittäin korkean tyhjiön alueella kaasuseoksen pääasiallinen komponentti on tyhjiösäiliön seinämistä tuleva vety. [5, s.181]

2.3.2. Alipaineen tuottaminen

Alipaine tuotetaan ja ylläpidetään erityyppisillä alipainepumpuilla tai ejektoreilla. Karkea perussääntö valittaessa alipaineenkehittäjä alipaine pumpun ja ejektorin välillä on, että jos tarvitaan jatkuvaa alipainetta tai suurta virtausta, on kannattavampaa valita alipaine pumpu. Jos tarve on hetkellistä ja katkonaista, ejektorin on luultavasti parempi vaihtoehto. Sääntö ei ole täysin yksiselitteinen ja valinta on kuitenkin viimekädessä aina tehtävä tapauskohtaisesti. [2, s.111; 5, s.190]

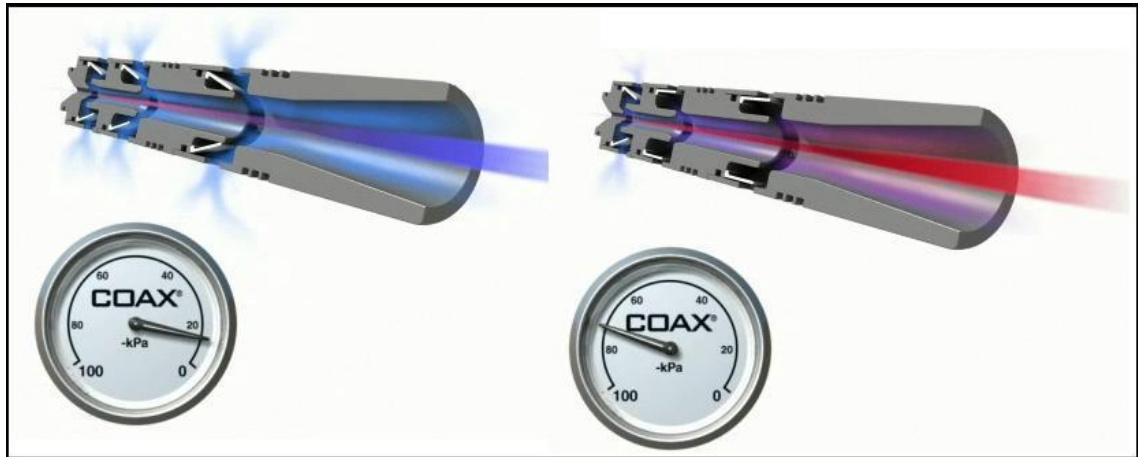
Ejektorien toiminta perustuu alipaineen tuottamiseen ilmapvirtaa hyödyntämällä venturiperiaatteella. Ejektorissa johdetaan suodatettu ja öljytön paineilma kuristimen kautta ulkoilmaan. Bernoullin lain mukaan virtaavan fluidin nopeus suurenee ja paine pienenee, kun se kulkee kavennetun putken läpi. Näin ollen ejektorin imuliittimeen syntyy alipaine, jonka suuruus on verrannollinen ejektorin syöttöpaineeseen. Kuvassa 2.7 on esitetty ejektorin periaatekuva [2, s.110-111]



Kuva 2.7. Ejektorin toimintaperiaate. Vasemmalla on yksiasteinen ja oikealla moniasteinen ejektori [2, s.111].

Ejektoreita on sekä yksiasteisia että moniasteisia. Moniasteisissa ejektoreissa on useampi kuristin sarjassa, mikä mahdollistaa alipaineen tuottamisen yksiasteista ejektoria nopeammin, hiljaisemmin ja paremmalla hyötysuhteella. Yksiasteiset ejektorit ovat hyötysuhteeltaan moniasteisia huonompia, mutta yksinkertaisempina myös selvästi halvempia. Ejektorit ovat kuitenkin moniasteisinakin edullisempia kuin mitkään mekaanisista alipaine pumpuista. Lisäksi ejektoreilla on alipaine pumpuihin nähden etuna, etteivät ne lämpene käytössä, ne kuluttavat energiaa vain tarvittaessa ja ejektorin voi sijoittaa pienen kokonsa vuoksi lähes mihin vain. [2, s.110; 3, s.15,18; 11]

Ejektoreita on perinteisesti käytetty erityisesti imukupeissa, joissa alipaineen tarve on yleensä lyhytaikaista ja katkonaista. Alipaineteknologiaan keskittynyt yritys BIAB on erityisesti uskonut ejektoritekniikkaan ja kehittänyt uudenlaisen COAX®-tyyppisen moniasteisen ejektorin, joka toimii normaaliejektoreiden tapaan imukuppien yhteydessä alipaineen tuottajana, mutta myös mekaanisen alipaine pumpun korvaajana tietyissä sovelluksissa, valmistajan mukaan esimerkiksi alipainekuljettimissa. Kuvassa 2.8 on esitetty COAX-ejektorin toimintaa. [12]



Kuva 2.8. COAX-ejektorin rakenne ja toimintaperiaate [12].

COAX-ejektorin, kuten muidenkin moniasteisten ejektorien toiminta perustuu siihen, että ejektorin eri asteita kontrolloidaan vaiheittain. Kuvassa 2.8 esitetyn COAX-ejektorin kaikki imuasteet ovat pienillä alipaineilla auki, jolloin virtaus on suurin. Tavoiteltaessa yhä suurempaa alipainetta, suljetaan imuasteita aste kerrallaan, kunnes lopulta vain viimeinen imuaste on avoinna. Alipaineen kasvaessa virtaus pienenee. [12]

Suomalaiselta valmistajalta MariMaticilta on saatavilla myös vesikäyttöinen ejektori. Valmistaja lupaa erityisesti elintarviketeollisuuden käyttöön tarkoitetun vesiejektorin olevan perinteistä ejektoria hiljaisempi, 40 % ympäristöystävällisempi ja kuluttavan 20 - 30 % vähemmän energiaa kuin perinteinen ilmaejektori. [13]

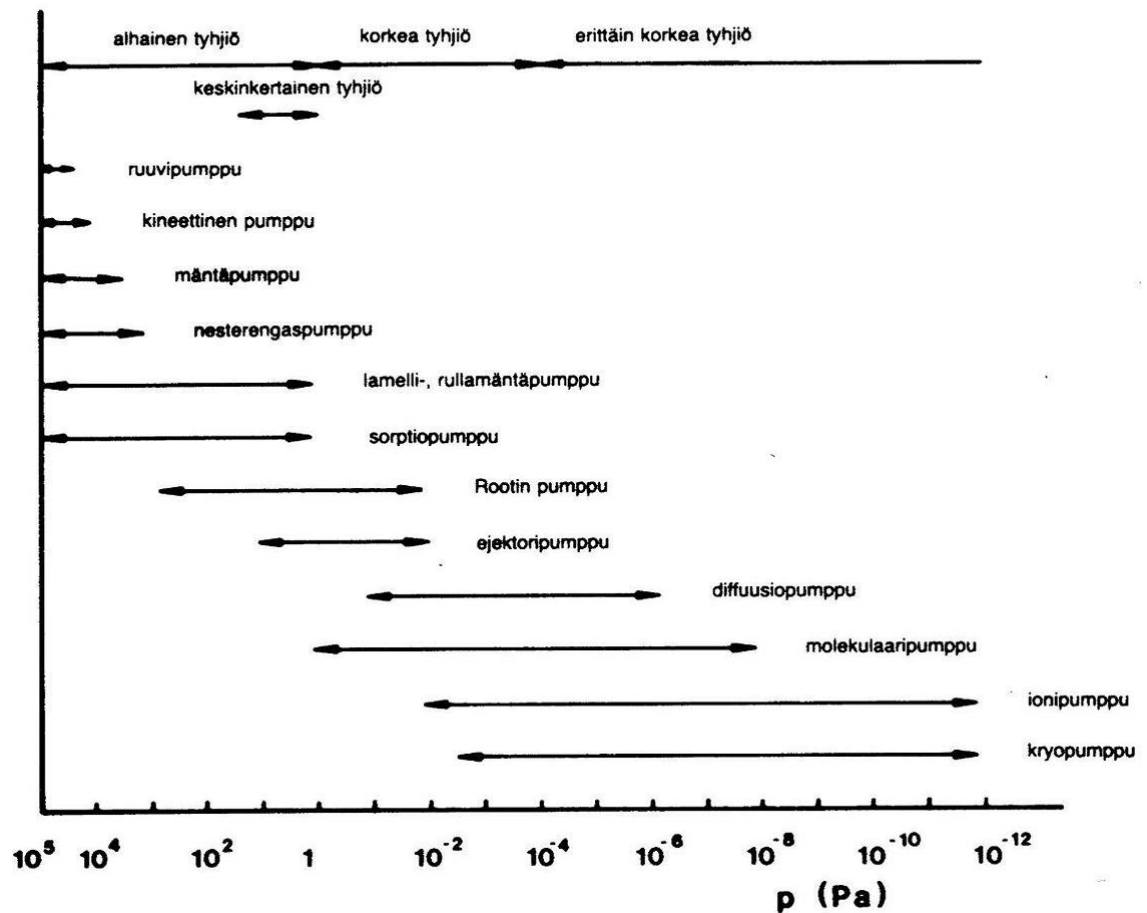
Kuten mainittu, suurempaa virtausta ja jatkuvaa alipainetta tarvittaessa käytetään perinteisesti alipainepumppua. Mekaaninen alipainepumppu on toimintaperiaatteeltaan kompressori, jonka imupaine on ympäristön painetta pienempi ja joka puristaa kaasun ympäristön paineeseen tai tätä alhaisempaan paineeseen. Suurin paineenmuutos alipainepumpussa on korkeintaan yhden ilmakehän paineen suuruinen. [5, s.190; 2, s.110]

Eriytyypisiä alipainepumppuja, kuten kompressoreitakin, on lukuisia ja erilaisia tarpeita varten on kehitetty useita erilaisella periaatteella toimivia alipainepumppuja. Useita alipainepumppuja, monesti eri toimintaperiaatteella toimivia, voidaan myös kytkeä sarjaan, jotta saadaan haluttu imu- ja poistopaine sekä tyhjennysnopeus. [5, s.190]

Mekaaniset pumput voidaan jakaa kaasun staattisesti puristaviin, kaasun kineettisesti puristaviin ja molekyyli-ilmioon perustuviin pumppuihin. Staattisesti puristavia ovat mäntä- ja nesterengaspumput sekä pyörivät pumput ja Rootin pumput. Kineettisesti puristavia ovat aksiaali- ja radiaalipumput. Molekyyli-ilmiota hyödyntävät molekulaaripumput. [5, s.190]

Höyrypumput perustuvat kaasun viskositeettiin (ejektorit) tai kaasun diffuusion (diffuusiopumput). Mekaanisten pumppujen ja höyrypumppujen lisäksi on olemassa pintailmiöön perustuvia pumppuja, kuten ioni- ja kryopumput. [5, s.190]

Alin pumpulla saavutettava paine on pumpputyypistä riippuva. Kuvassa 2.9 on esitetty eri alipainepumpputyypeille sopivia ylä- ja alapainerajoja.



Kuva 2.9. Alipainepumpputyypeille ominaiset painetasot [5, s.191].

Kullekin pumpputyypille voidaan laskea teoreettinen alhaisin saavutettava paine, jolloin pumpun tuotto on nolla. Todellisuudessa alhaisimman saavutettava paineen määrää joko pumpun vuodot, puristuksen loppulämpötila tai nesteen höyrynpaine nesterengaspumpun tapauksessa. [5, s.191]

2.3.3. Alipainepumput pneumaattisissa kuljettimissa

Teollisuuden alipainesovelluksissa ja varsinkin alipainekuljettimissa käytettävät alipainepumpputyypit ovat perinteisesti mekaanisia, staattisesti tai kineettisesti puristavia. Suurinta osaa ylipainekuljettimissa käytettävistä kompressorityypeistä (ks. luku 2.2.1) voidaan käyttää pumppuina alipainekuljettimissa, mutta useimmiten alipainepumppuna käytetään Rootin pumppua, jolla saavutetaan suuri alipainevirtaus. Vaikka Rootin pumppulla voidaan erityisesti nestejäähdytettyinä saavuttaa suuri alipaine, käytetään sitä yleensä kuljettimissa, joiden alipainetaso on enintään 50 -kPa. Suurempaa alipainetta tarvittaessa käytetään useasti nesterengaspumppua.[9, s.120-121; 3, s.17]

Mäntäpumppua käytetään ylipainekuljettimien lisäksi paljon myös alipainekuljettimissa. Mäntäpumppuja käytetään erityisesti pyrittäessä edulliseen järjestelmään, koska mäntäpumppu on Rootin pumppua ja nesterengaspumppua halvempi, mutta toisaalta saavutettava alin paine jää suhteellisen vaatimattomaksi, mikä

rajoittaa mäntäpumpun käyttöä. Yleisesti kineettisesti puristavia puhaltimia voidaan käyttää kuljettimissa, joissa tarvittava alipainetaso on vaatimaton. Monet puhaltimet pystyvät kuitenkin tuottamaan suuren alipainevirtauksen huonosta alipaineenmuodostamiskyvystä huolimatta. [9, s. 119,120-121; 3, s.17]

2.3.4. Alipainepumppun pumppausnopeus ja tuotto.

Alipainepumppun pumppausnopeus S_p määritellään tilavuutena, jonka pumppu tietyssä ajassa poistaa järjestelmästä pumpun imuaukon paineessa eli $S_p = dV / dt$.

Pumpun tuotto eli läpäisy määritellään yhtälön (2.22) mukaisesti paineen ja pumppausnopeuden tulona:

$$Q_p = pS_p = p(dV / dt) \quad (2.22)$$

jossa Q_p = pumpun tuotto/läpäisy [Pa · m³/s]

ja S_p = alipainepumppun pumppausnopeus [m³/s] tai [l/s] [5, s.184]

Sijoittamalla konduktanssin määritelmän (luku 2.4.5) yhtälöön (2.40) $p_1 = Q/S_1$ ja $p_2 = Q/S_2$ saadaan:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} \quad (2.23)$$

Yhtälön (2.X) avulla voidaan määrittää pumppausnopeus jokaisessa systeemin pisteessä, kun tunnetaan pumppausnopeus jossakin pisteessä ja pisteiden välinen kokonaiskonduktanssi. Jos esimerkiksi säiliö on yhdistetty konduktanssilla C tyhjiöpumppuun, jonka pumppausnopeus on S_p , saadaan tyhjennysnopeus yhtälöstä:

$$\frac{1}{S_s} = \frac{1}{S_p} - \frac{1}{C} \quad (2.24)$$

jossa S_s = tyhjennysnopeus [m³/s] [5, s.185]

Alipainepumppu on alipainejärjestelmässä keskeisin komponentti. Pumpputyypin valinta vaikuttaa ensisijaisesti saavutettavaan alimpaan paineeseen ja poistopaineeseen. Pumpputyypin lisäksi imukykyominaisuuksiin, pumppausnopeuteen paineen funktiona, vaikuttaa myös pumpun mitoitus. Alipainesysteemin halutun paineen saavuttamisaika eli tyhjennysaika ja ylläpidettävä alipaine ovat yleisesti alipainepumppun kapasiteetin ja tehontarpeen määräävät tekijät. [5, s.185]

Alipainepumppun todellinen pumppausnopeus paineen laskiessa poikkeaa aina jonkin verran alipainepumppun teoreettisesta pumppausnopeudesta, joka voidaan määrittää pumpun syrjäytystilavuuden perusteella, etenkin mekaanisilla alipainepumppuilla.

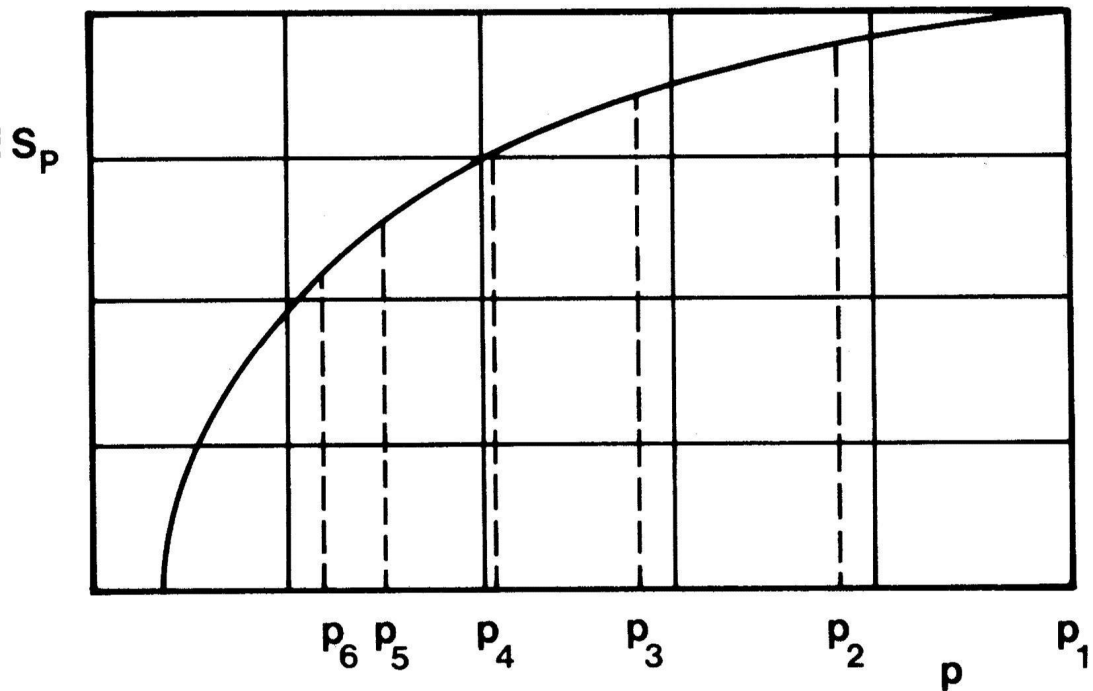
Höyry- ja pintapumppujen pumppausnopeuden määrittäminen on hankalampaa ja se tehdäänkin usein kokeellisesti. [5, s.186]

Pumpuille tehdään kokeita, joiden perusteella piirretään imukykyominaiskäyriä. Kuvassa 2.10 on esitetty alipainepumpun imukykykäyrä. Imukykykäyrästä voidaan määrittää aika tarvittavan alipaineen saavuttamiseksi kaikilla pumpputyypeillä yhtälön (2.25) avulla:

$$t = V \left(\frac{1}{S_{p1'2}} \ln \frac{p_1}{p_2} + \frac{1}{S_{p2'3}} \ln \frac{p_2}{p_3} + \frac{1}{S_{p3'4}} \ln \frac{p_3}{p_4} + \dots \right) \quad (2.25)$$

jossa $S_{p1'2}$ = tarkasteluvälin alku- ja loppupaineen todellisen pumppausnopeuden keskiarvo [m^3/s], $S_{p2'3}$, - $S_{p5'6}$ vastaavasti.

ja t = tarvittavan alipaineen saavuttamiseen kuluva aika [s] [5, s.186]



Kuva 2.10. Tyhjiöpumpun imukykyominaiskäyrä [5, s.186].

Imukykykäyrät esittävät pumpun ominaisuuksia. Tyhjennysaikaa määriteltäessä ja tavoitellun alipaineen ylläpitämiseksi täytyy ottaa huomioon myös systeemin ominaisuudet, kuten vuodot. Tyhjennysajan arviointeihin liittyvissä laskelmissa oletetaan laskelmien yksinkertaistamiseksi pumppausnopeus S_p tarkastelualueella vakioksi. Näin ollen pumpun volymetrinen tuottosuhte ei muutu paineen funktiona. [5, s. 186]

2.4. Kaasun virtaus putkistossa (single-phase flow)

2.4.1. Tilavuusvirta, massavirta, moolivirta ja molekyylivirta

Virtauskanavan kuten putken, venttiilin tai pumpun läpi aikayksikössä kulkeva kaasumäärä voidaan ilmoittaa usealla eri tavalla. Yhtälöissä (2.26) – (2.27) on esitetty kaasuvirran voimakkuus, kun virtauskanavan poikkileikkauspinta-alan A [m] (ks. kuva 2.11) läpi ajassa dt kulkeman kaasuvirran tilavuus on dV , massa dM , moolien lukumäärä dn ja molekyylien lukumäärä dN

$$Q_V = dV / dt = \dot{V} \quad (2.26)$$

$$Q_M = dM / dt = \dot{m} \quad (2.27)$$

$$Q_n = dn / dt \quad (2.28)$$

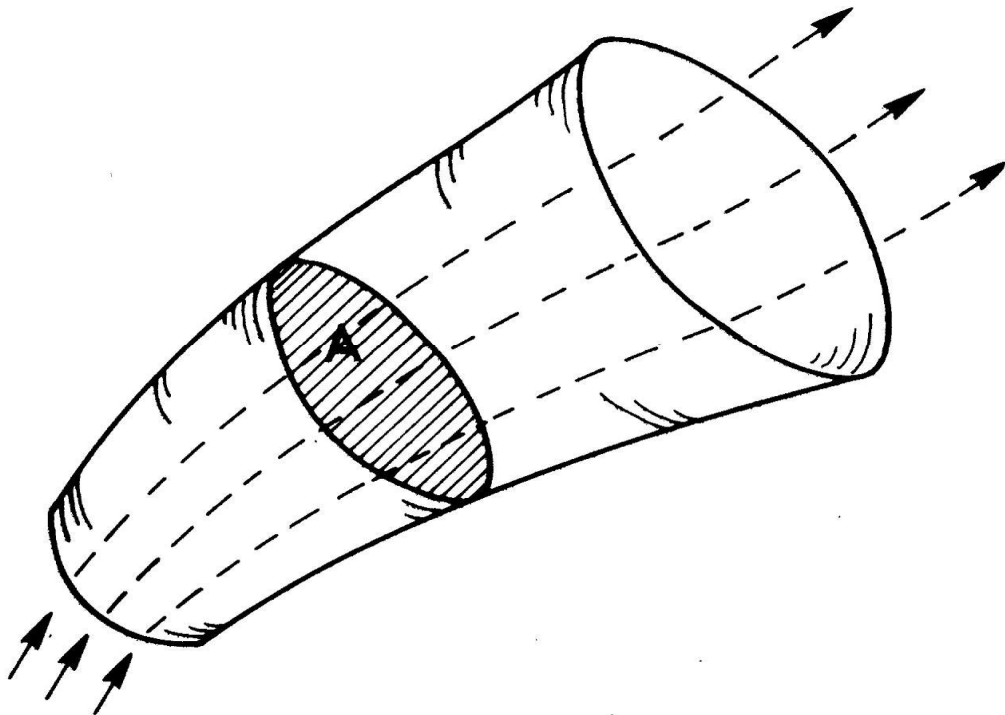
$$Q_N = dN / dt \quad (2.29)$$

jossa Q_V = tilavuusvirran voimakkuus [m^3/s] = \dot{V}

Q_M = massavirran voimakkuus [kg/s] = \dot{m}

Q_n = moolivirran voimakkuus [mol/s]

ja Q_N = molekyylivirran voimakkuus [kpl/s] [10, s.62-63]



Kuva 2.11. Virtauskanava, jonka poikkipinta-ala A [10, s.62].

Kaasujen tiheys ei ole vakio, vaan riippuu paineesta ja lämpötilasta. Tämän vuoksi teoreettisissa tarkasteluissa käytetään massavirtaa, joka tilavuusvirran tapauksesta poiketen ei ole riippuvainen paineesta tai lämpötilasta. Tilavuusvirtaa käytetään yleensä käytännön mitoituksissa. Paineen alainen tilavuusvirta yleensä redusoidaan normaali-ilmanpaineeseen, jolloin tilavuusvirran arvot ovat vertailukelpoisia keskenään. Normaali-ilmanpaineeseen redusoidusta tilavuudesta käytetään nimitystä normaali litra ja tilavuusvirta ilmoitetaan usein [Nl/s] eli normaali litraa / s. [2, s.25; 8, s.17-18]

2.4.2. Paineenlasku putkivirtauksessa

Ylipainetekniikassa virtaus on joko laminaarista tai turbulenttista. Virtauksen luonne voidaan selvittää Reynoldsin luvun avulla kuten luvussa 2.4.4. Pitkissä pienissä putkissa päästään mahdollisesti pienellä virtausnopeudella laminaariseen virtaukseen, mutta yleisesti virtaus on aina turbulenttista. Kaasujen virtausta voidaan tarkastella vastaavalla tavalla kuin nesteiden, mutta kaasujen kokoonpuristuvuudesta johtuen se on selvästi hankalampaa. [2, s.33]

Virtauksen kitka aiheuttaa virtausnopeudesta ja kaasun viskositeetista riippuvan painehäviön putkistoon. Putkistossa syntyvä paineenlasku voidaan määrittää Darcyn yhtälön avulla:

$$\Delta p = \lambda_L \rho L v^2 / 2d \quad (2.30)$$

jossa Δp = paineenlasku putkivirtauksessa

λ_L = kaasun kitkavastuskerroin.

ρ = tiheys [kg/m³]

L = putken pituus [m]

v = virtaavan kaasun nopeus [m/s]

ja d = putkiston sisähalkaisija [m] [7, s.46]

Kitkavastuskerroin λ_L voidaan määrittää muun muassa Reynoldsin luvun avulla. Laminaariselle virtaukselle saadaan:

$$\lambda_L = 64 / \text{Re} \quad (2.31)$$

jossa Re = Reynoldsin luku

Turbulenttisen virtauksen kitkavastuskertoimen λ_L määrittämiseksi on useita tapoja. Yleisesti voidaan Reynoldsin luvun ollessa yli 10000 olettaa, että $\lambda_L \approx 0,02$ laajalla alueella. λ_L voidaan myös määrittää Blasiuksen yhtälön (2.32) avulla, kun $\text{Re} < 10^5$

$$\lambda_L = 0.316 / (\text{Re})^{0.25} \quad (2.32)$$

Kitkavastuskertoimen määrittämiseksi voidaan käyttää myös Koon yhtälöä:

$$f_L = 0,0014 + 0,125/(\text{Re})^{0,32} \quad (2.33)$$

jossa f_L = kitkakerroin, jolle on olemassa yhteys $\lambda_L = 4 f_L$ [7, s.46-47]

Paineenlasku putkistossa voidaan turbulentsisessa virtauksessa määrittää myös likimääräisen yhtälön avulla:

$$\Delta p = 1,6 \cdot 10^3 \dot{V}^{1,85} L / (d^5 p_1) \quad (2.34)$$

Yhtälössä (2.34) lämpötila putkistossa oletetaan samaksi kuin ympäristön lämpötila. [7, s.46-47]

Runkoputkiston mitoitukseen voidaan käyttää apuna valmiita taulukoita ja käyrästäjä, joissa määritellään ekvivalenttiset pituudet putkiston eri komponenteille, kuten putkimutkille ja -sovitteille sekä venttiileille. Nämä ekvivalenttiset pituudet lisätään putken pituuteen, jolloin voidaan laskea pelkän putkiston pituuden avulla kokonaispaineenlasku putkistossa. [7, s.48,50]

2.4.3. Virtausnopeus

Virtausnopeus voidaan laskea ideaalikaasulain avulla tietylle massavirralle:

$$p \dot{V} = \dot{m} RT \quad (2.35)$$

$$\dot{V} = v_g A \quad (2.36)$$

jossa v_g = kaasun virtausnopeus [m/s]

ja A = putken sisäpinta-ala [m²].

Yhtälöistä (2.35) ja (2.36) saadaan yhdistettyä yhtälö kaasun virtausnopeudelle:

$$v_g = \frac{4 \dot{m}_a RT}{\pi d^2 p} \quad (2.37)$$

Ilman virtausnopeus on pneumaattisessa kuljetuksessa yksi tärkeimmistä parametreista. Erityisen tärkeä on ilman virtausnopeus materiaalin syöttökohdassa. Jos virtausnopeutta ei ole määritelty, pitää se yleensä arvioida. [9, s.153]

2.4.4. Virtausolosuhteet

Virtausolosuhteet voidaan jakaa neljään alueeseen: turbulenti- ja laminaarivirtaukseen sekä transitio- ja molekulaarivirtaukseen. Turbulenssi- ja laminaarivirtauksessa virtaus on viskoosia eli virtausta rajoittaa kaasun viskositeetti. Normaali-ilmanpaineessa ja sen läheisyydessä on virtaus viskoosia, koska kaasun molekyylien keskimääräinen vapaamatka on hyvin pieni. Alipaineen kasvaessa kaasun virtausta hallitsevat sekä viskositeetti että molekyyli-ilmiot, jolloin virtaus on transitiotilassa. Alipaineen yhä kasvaessa virtaus on lopulta molekulaarista, jolloin kaasun molekyylien keskimääräinen vapaamatka on paljon tyhjiösystemin dimensioita suurempi ja näin ollen kaasumolekyylien väliset törmäykset harvinaisia. Kaasun molekyylien keskimääräisellä vapaamatkalla eli törmäysvälillä λ [cm] tarkoitetaan sitä keskimääräistä matkaa, jonka molekyyli kulkee kahden törmäyksen välillä. [5, s.182; 10, s.58]

Viskoottinen virtaus voi olla pyörteetöntä eli laminaaria tai pyörteistä eli turbulenttia. Virtausnopeuden ollessa pieni voidaan ajatella virtauksen muodostuvan ohuista, yhdensuuntaisista, toisiaan pitkin liukuvista kaasukerroksista eli laminaateista; tästä tulee nimitys laminaarivirtaus. Virtausnopeuden kasvaessa kasvaa myös kerrosten välinen leikkausjännitys, jolloin kaasun sisään syntyy paikallisia paine-eroja. Paine-erojen aiheuttamat monimuotoiset pyörteet hävittävät säännölliset kaasukerrokset, mikä aiheuttaa pyörteisen virtauksen. Reynoldsin luvun avulla voidaan määrittellä ero turbulenti- ja laminaarivirtauksen välillä seuraavasti:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\eta} \quad (2.38)$$

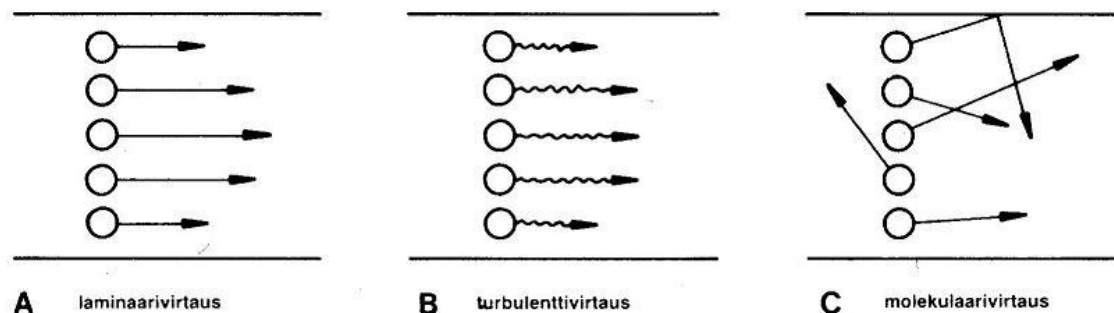
jossa ρ = kaasun tiheys [kg/m^3]

v = kaasun keskimääräinen virtausnopeus [m/s]

D = virtauskanavan sisähalkaisija [m]

ja η = kaasun viskositeetti [kg/m·s]

Kuva 2.12 selvittää molekyylien liikettä eri virtaustiloissa. [5, s.182; 10 s.58]



Kuva 2.12 Kaasumolekyylien liike eri virtaustiloissa [5, s.183].

Kriteerinä viskoottisen virtauksen ja molekulaarivirtauksen välillä käytetään Knudsenin lukua, joka määrittää virtauskanavan halkaisijan ja kaasumolekyylien keskimääräisen törmäysvälin suhteena yhtälön 2.39 mukaisesti:

$$K'' = \frac{D}{\lambda} \quad (2.39)$$

jossa K'' = Knudsenin luku

D = virtauskanavan halkaisija [m]

ja λ = molekyylien keskimääräinen törmäysväli [m]

Kuvassa 2.13 on selvitetty virtaustilojen sekä Reynoldsin ja Knudsenin lukujen yhteyksiä toisiinsa. [5, s.182; 10, s.58-60]

Virtaustila	Kaasun tila	Ehto
turbulentti laminaari	viskoosi	$Re > 2100$ $Re < 1100$ $D/\lambda > 110$
transitio molekulaari	rajatila harventunut	$1 < D/\lambda < 110$ $D/\lambda < 1$

Kuva 2.13. Kaasun virtaustilojen sekä Reynoldsin ja Knudsenin lukujen välisiä yhteyksiä [5, s.183].

Paineputkistoissa ilman virtaus on useimmissa tapauksissa turbulენტtista. Putkiston aiheuttama paine-ero voidaan määrittää likimääräisesti, mutta suhteellisen hyvin yhtälön (2.34) avulla myös alipaineella. [7, s.46; 3, s.42]

2.4.5. Virtauskanavan kaasunjohtavuus eli konduktanssi

Kaasuvirran voimakkuus virtauskanavan läpi molekyylivirtauksessa on suoraan verrannollinen virtauksen sisääntulo- ja poistumisaukon väliseen paine-eroon. Verrannollisuus voidaan esittää matemaattisesti yhtälön 2.40 mukaisesti:

$$Q = C \cdot (p_1 - p_2) \quad (2.40)$$

jossa Q = virtauskanavan läpäisy [$\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$]

C = virtauskanavan konduktanssi eli kaasunjohtavuus [m^3/s]

p_1 = paine virtauksen sisääntuloaukolla [Pa]

ja p_2 = paine virtauksen ulostuloaukolla [Pa]

Konduktanssi on joko vakio tai molekyyliitiheydestä riippuva. [10, s.68]

Molekyylitasolla verrannollisuus voidaan esittää yhtälön 2.41 avulla:

$$Q_N = C \cdot (\rho_{N1} - \rho_{N2}) \quad (2.41)$$

jossa ρ_{N1} = molekyylitiheys sisääntuloaukolla [kpl/m³]

ja ρ_{N2} = molekyylitiheys poistumisaukolla [kpl/m³]

Viskoottisen ja transiitotilassa olevan kaasuvirran voimakkuus ei yleensä ole suoraan verrannollinen virtauskanavan päiden väliseen paine-eroon, mutta yhtälöiden (2.40) ja (2.41) mukaista konduktanssin määritelmää käytetään myös kyseisten virtausten tapauksessa. [10, s.68]

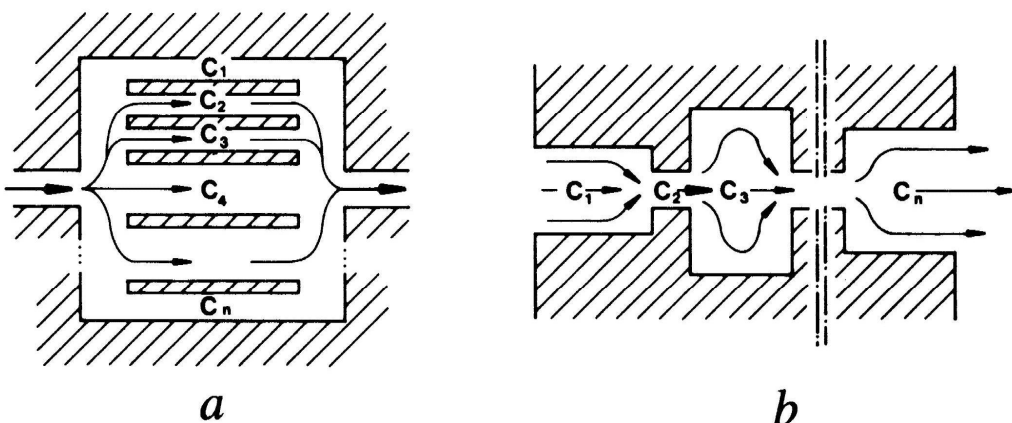
Usean peräkkäisen tai rinnakkaisen virtauskanavan yhdistelmän konduktanssin määritetään analogisesti Ohmin lain kanssa. Rinnankytkennässä (kuva 2.14a) virtauskanavien konduktanssit lasketaan yhteen yhtälön (2.42) mukaisesti:

$$C_{yhd} = C_1 + C_2 + C_n \quad (2.42)$$

ja sarjaankytkennässä (kuva 2.14b) yhdistelmän konduktanssi C_{yhd} saadaan yhtälöstä (2.43):

$$\frac{1}{C_{yhd}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_n} \quad (2.43)$$

Konduktanssien rinnan- ja sarjaankytkentä on esitetty kuvassa 2.14 [10, s.69; 5, s.183]



Kuva 2.14. Konduktanssit kytkettynä rinnan (a) ja sarjaan (b) [5, s.183].

Konduktanssi määrää muun muassa suurimman mahdollisen pumppausnopeuden (ks. luku 2.3.4).

2.4.6. Virtausnopeudesta matalassa paineessa

Molekyylit ovat kaasuvirtauksessa sekä lämpöliikkeessä että virtauksen suuntaan etenevässä liikkeessä. Etenevä liike johtuu yleensä systeemin eri osien välillä vallitsevista paine- ja tiheyseroista. [10, s60]

Molekyylivirtaus syntyy, kun molekyylitiheys on virtauskanavan alkupäässä suurempi kuin loppupäässä. Tällöin lämpöliike kuljettaa tietyllä aikavälillä useampia molekyylejä alkupäästä loppupäähän kuin päinvastoin. [10, s.60]

Viskoottisen tai transitiotilassa olevan virtauksen yhteydessä on paine- ja tiheyserojen aiheuttaman epätasapainon lisäksi huomioitava molekyyliin suuri törmäystaajuus toisiinsa. Suuri törmäystaajuus tuo virtaukseen kollektiivisia ominaisuuksia, joiden tarkastelu on paras suorittaa makroskooppisesti eikä molekyylitasolla. Makroskooppisessa tarkastelussa ei mennä niin pieniin yksityiskohtiin, että molekyyliin aiheuttamia epäjatkuvuuksia huomioitaisiin vaan tarkastelussa käytetään virtauskenttää, jonka ominaisuudet muuttuvat jatkuvasti pisteestä toiseen. Lämpöliike otetaan makroskooppisessa tarkastelussa huomioon viskositeettikertoimena ja etenevän liikkeen ominaisuuksia tarkastellaan liikeyhtälön pohjalta. [10, s.60]

Virtausnopeus w on kaasun makroskooppinen etenemisnopeus virtauskanavassa ja tärkeä virtauskenttää kuvaava suure. Virtausnopeus vaihtelee virtauskentän pisteestä toiseen. Seinämällä se on aina nolla ja muualla se noudattaa olosuhteista riippuvaa jakaumaa, joka voidaan mitata tai määrittää erilaisten kaavojen, käyrästöjen ja muiden kokeellisten menetelmien avulla. [10, s.60-61]

Virtaus voi olla yksi-, kaksi- tai kolmiulotteista. Virtausnopeus on siis vektori, jonka kolme komponenttia kuvaavat eri suuntiin tapahtuvia virtauksia. Suorassa tasapaksussa putkessa tai lievästi supistuvassa tai laajenevassa virtauskanavassa virtaus on likimäärin yksiulotteista, jolloin virtausnopeus voidaan korvata keskimääräisellä virtausnopeudella, joka saadaan laskemalla virtausnopeuden keskiarvo yli virtauskanavan poikkipinta-alan yhtälön (2.44) mukaisesti:

$$\bar{w} = \frac{1}{A} \int_A w dA \quad (2.44)$$

jossa \bar{w} = keskimääräinen virtausnopeus [m/s]

A = virtauskanavan sisäpinta-ala [m²]

ja w = virtausnopeus [m/s]

Virtausnopeuden jakauma siis korvataan käytännössä yhdellä virtausnopeudella siten, että poikkileikkauspinnan läpi kulkeva kaasumäärä pysyy vakiona. [10, s.61-62]

2.5. Materiaalivirtaus (two-phase flow)

Pneumaattisissa kuljettimissa kuljetetaan ilmapirtauksen avulla materiaalia. Materiaalin syöttäminen ilmapirtaukseen kasvattaa putkistossa tapahtuvaa painehäviötä, jonka suuruus riippuu kuljetettavan materiaalin konsentraatiosta virtauksessa. [9, s.127]

Pelkän kaasun virtaukselle putkessa on olemassa vakiintuneet matemaattiset yhtälöt ja mallit, mutta materiaalivirtaukselle sellaisia ei ole. Materiaalivirtaukselle on johdettu matemaattisia ja kokeellisia malleja, jotka pyrkivät ennustamaan erilaisten materiaalivirtaukseen liittyvien muuttujien vaikutuksia, mutta niiden käyttö rajoittuu yleensä erikoistapauksiin tai tiettyihin olosuhteisiin. Ei ole olemassa valmiita malleja, jotka pystyisivät kaikissa olosuhteissa yleispätevästi ennustamaan kaikkien muuttujien vaikutuksia. Tämän takia vaikutukset pitää usein kokeellisesti selvittää todellisella materiaalilla. Kokeissa on myös järkevää käyttää putkistoa, jolla on samat mitat kuin todelliseen järjestelmään tulevalla putkistolla. Saman materiaalin käyttö on ensiarvoisen tärkeää, koska ominaisuudet vaihtelevat merkittävästi riippuen materiaalista. Täysin todellisuutta vastaavan putkikoon käyttäminen testeissä ei ole ratkaisevan tärkeää, koska todellinen järjestelmä voidaan testata skaalauskerroimien avulla riittävän tarkasti myös pienemmässä mittakaavassa tehdyllä mallilla. [9, s.130]

Pneumaattinen kuljetinjärjestelmä voidaan suunnitella käyttämällä saatavilla olevia matemaattisia malleja, hyödyntämällä testituloksia tai molempia tapoja yhdistämällä. Matemaattisia malleja käytettäessä pitää kuitenkin varmistua siitä, että malli on sopiva käytettäväksi suunniteltavan järjestelmän suunnitteluun. Järjestelmän suunnittelua käsitellään tarkemmin luvussa 5. [9, s.82]

2.5.1. Pneumaattisen järjestelmän kapasiteetista

Pneumaattisen kuljettimen kapasiteetti eli kyky saavuttaa määrätty materiaalin massavirta riippuu oleellisesti kolmesta tekijästä:

- putkiston sisähalkaisijasta
- materiaalin kuljetusetäisyydestä
- saatavilla olevasta paine-erosta putkiston päiden välillä

Ilman massavirta on toissijainen tekijä, koska se riippuu merkittävästi putkiston sisähalkaisijasta ja paineesta. Sillä on kuitenkin merkittävä vaikutus ihanteellisten kuljetusolosuhteiden saavuttamiseen tietyssä putkistossa. Myös kuljetettavan materiaalin ominaisuudet vaikuttavat ratkaisevasti materiaalivirtaukseen, erityisesti kuljetettavan ilma-materiaalivirtauksen seossuhteeseen.[9, s.22]

2.5.2. Seossuhde (phase density)

Seossuhde on kuljetettavan materiaalin massavirran ja kuljettamiseen käytettävän ilman massavirran suhde:

$$\varphi = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_a} \quad (2.45)$$

jossa φ = seossuhde

\dot{m}_p = materiaalin massavirta [kg/s]

ja \dot{m}_a = ilman massavirta [kg/s]

Seossuhde on hyödyllinen dimensioton suure selvittäessä virtauksen materiaalipitoisuutta. Seossuhde pysyy koko putkiston pituudella pääasiallisesti vakiona, vaikka ilman tilavuusvirta putkiston pituudella voi kasvaa merkittävästi johtuen ilman tiheyden paineriippuvuudesta. [9, s.22]

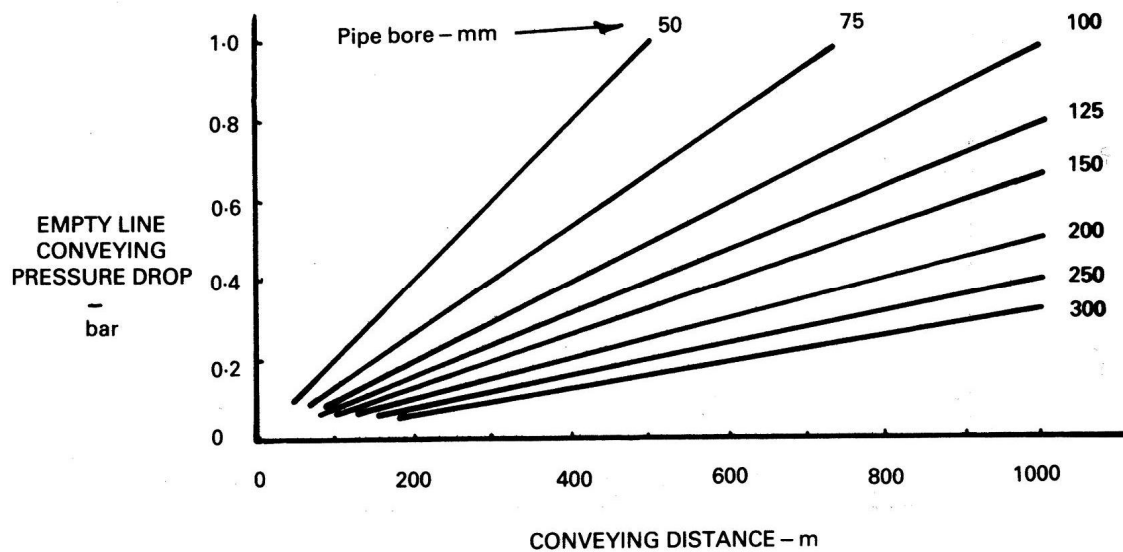
Materiaalin massavirta ei ole riippuvainen seossuhteesta, vaan seossuhteen arvo, jolla materiaalin kuljettaminen on ylipäättään mahdollista, riippuu sekä putkistossa tapahtuvasta paineenlaskusta että kuljetusetäisyydestä. [9, s.23]

2.5.3. Putkiston geometrian ja kuljetusetäisyyden vaikutukset kapasiteettiin

Putken sisähalkaisija vaikuttaa putken läpäisykapasiteettiin merkittävästi. Mitä suurempi putken sisähalkaisija sitä suurempi syöttökapasiteetti saavutetaan ja näin ollen myös suurempi materiaalivirta. Materiaalivirran kasvaessa on kuitenkin ilmantuottokapasiteetin kasvettava samassa suhteessa, jotta ilman virtausnopeus saadaan pysymään riittävänä. [9, s.23]

Osa saatavilla olevasta paine-erosta vaaditaan yksinomaan ilmavirtauksen kitkan voittamiseksi putkistossa. Jäljellä oleva paine on käytettävissä materiaalin kuljettamiseen putkiston kautta. Putken sisähalkaisijan kasvaessa ilmavirtauksen aiheuttaman painehäviön osuus pienenee (ks. yhtälöt 2.30 ja 2.34) ja suhteessa suurempi osa saatavilla olevasta paine-erosta voidaan käyttää materiaalin siirtämiseen. [9, s.23]

Putkiston pituuden kasvu kasvattaa aina putkistossa tapahtuvaa painehäviötä. Pitkillä kuljetusetäisyyksillä voi pelkästään ilmavirtauksesta johtuvan painehäviön osuus kasvaa suhteessa merkittävän suureksi kokonaispaine-eroon nähden, jolloin materiaalin kuljettamiseen jäävän paineen osuus voi jäädä vaatimattomaksi. Asiaa on havainnollistettu kuvassa 2.15, jossa on esitetty tyhjässä putkessa painehäviö kuljetusetäisyyden funktiona useammalla eri putken sisähalkaisijalla.



Kuva 2.15. Putken sisähalkaisijan ja kuljetusetäisyyden vaikutus putkessa syntyvään painehäviöön. Ilman keskimääräinen virtausnopeus 20m/s [9, s.366].

Paineenkehittimen paineentuottokyky määrää ensisijaisesti kuinka paljon ja kuinka pitkä matka materiaalia voidaan järjestelmässä kuljettaa. [9, s.24]

Hyvin pitkissä kuljetusetäisyyksissä seossuhde on suhteellisen pieni myös korkeapainejärjestelmissä, kun taas lyhyillä etäisyyksillä on mahdollista kuljettaa jopa matala- ja alipainejärjestelmissä sopivia materiaaleja suhteellisen korkealla seossuhteella. [9, s.24]

2.5.4. Materiaalin virtaustavat kuljetuksessa

Seossuhteen arvoa käytetään usein määrittämään kuljetettavan materiaalin virtaustapa putkistossa. Eri virtaustapoja materiaalin kuljettamiseksi putken sisällä voidaan määritellä useita, mutta jaottelu tehdään yleensä karkeasti kahteen pääkategoriaan: seosvirtaukseen (dilute phase, suspension flow) ja erillisvirtaukseen (dense phase, non-suspension flow). [3, s.48; 9, s.24]

Seosvirtauksessa materiaali kuljetetaan putkistossa pääasiassa materiaali-ilmasuoksena. Kuljetustapaa nimitetään myös lentokuljetukseksi. seossuhteen arvo on seosvirtauksessa yleensä alle 10. Jos arvo on nolla, virtauksessa ei ole lainkaan materiaalia. Kuljettamisen mahdollistava voima syntyy ilmapirtauksen patopaineesta kuljetettavan materiaalin otsapintaan nähden. Jotta saataisiin materiaali kulkemaan seoksena ilman kanssa, on tärkeää säilyttää putkessa riittävä ilmapirtaus, joka on selvästi suurempi kuin materiaalin kuljetusnopeus. Riittävä virtausnopeus vaihtelee materiaalista riippuen, mutta suurimmalle osalle materiaaleja, joita voidaan seosvirtauksessa kuljettaa, riittävä ilman virtausnopeus on pääsääntöisesti 13...15 m/s.

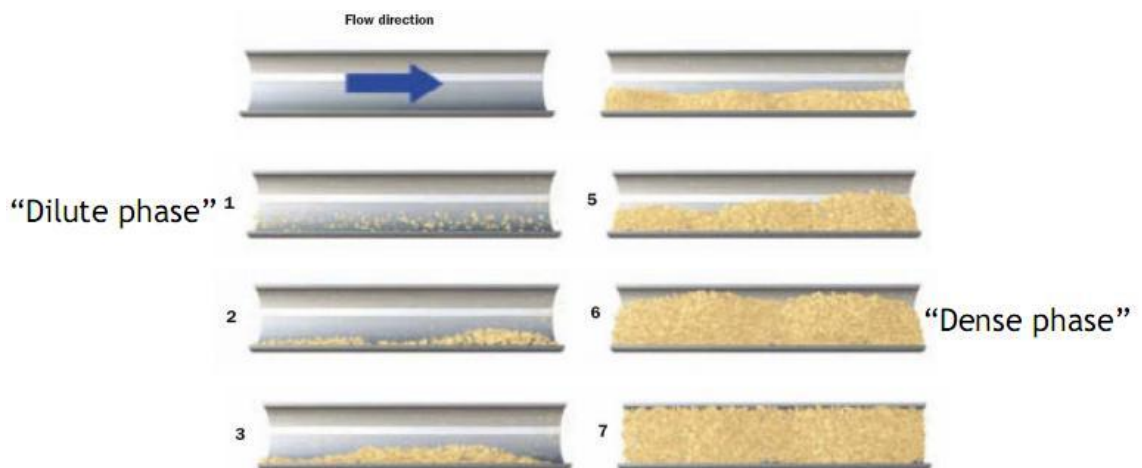
Alipainekuljettimissa ilman virtausnopeus on normaalisti yli 10 m/s ja alipainetaso noin 10...30 -kPa. Suurinta osaa kiinteistä irtomateriaaleista voidaan kuljettaa seosvirtaustavalla. [3, s.48; 9 s.24; 14 s.18]

Erillisvirtauksessa materiaali kuljetetaan putkistossa erillisinä kasaantumina ja kinoksina eivätkä ne ole ilman kanssa seoksessa. Materiaalivirtaus etenee aaltomaisesti materiaalipartikkeleiden etäisyyden toisiinsa ollen lyhyt. Seossuhteen arvo on erillisvirtauksessa pääsääntöisesti yli 40, mutta vähintään 15. Alipainekuljetuksessa seossuhde on yli 10. Alipainekuljettimissa tiheällä virtauksella alipainetaso on luokkaa 30...65 -kPa. Jos seossuhteen arvo saavuttaa kuljetettavan materiaalin tiheyden, putkistossa ei ole lainkaan ilmavirtausta ja putkessa on näin ollen tukos. [3, s.47; 7, s.8; 9, s.25; 14 s.19]

Virtausnopeus voi virtaustavasta johtuen olla erillisvirtauksessa merkittävästi seosvirtauksessa tarvittavaa virtausnopeutta alhaisempi. Tiheässä virtauksessa kuljetettavaksi sopivien materiaalien kuljettamiseksi tarvittavan ilman virtausnopeus voidaan yleensä puolittaa seosvirtauksessa tarvittavaan virtausnopeuteen nähden. Esimerkiksi seossuhteen arvolla 10 tarvitaan normaalisti noin 14 m/s ilman virtausnopeus, mutta seossuhteen noustessa arvoon 40 tarvitaan ilmalle enää noin 7 m/s virtausnopeus. [9, s.25]

Materiaalien, joiden kuljettaminen tiheässä virtaustilassa ei ole mahdollista, kuljettamiseen käytettävää pienintä mahdollista ilman virtausnopeutta ei voida laskea juuri lainkaan. Jos virtausnopeus tippuu liian alhaiseksi, materiaalia voi tippua pois seosvirtauksesta ja jäädä putkistoon aiheuttamaan tukoksia. [9, s.25]

Kuvassa 2.16 on havainnollistettu materiaalin virtausta eri virtaustavoissa.



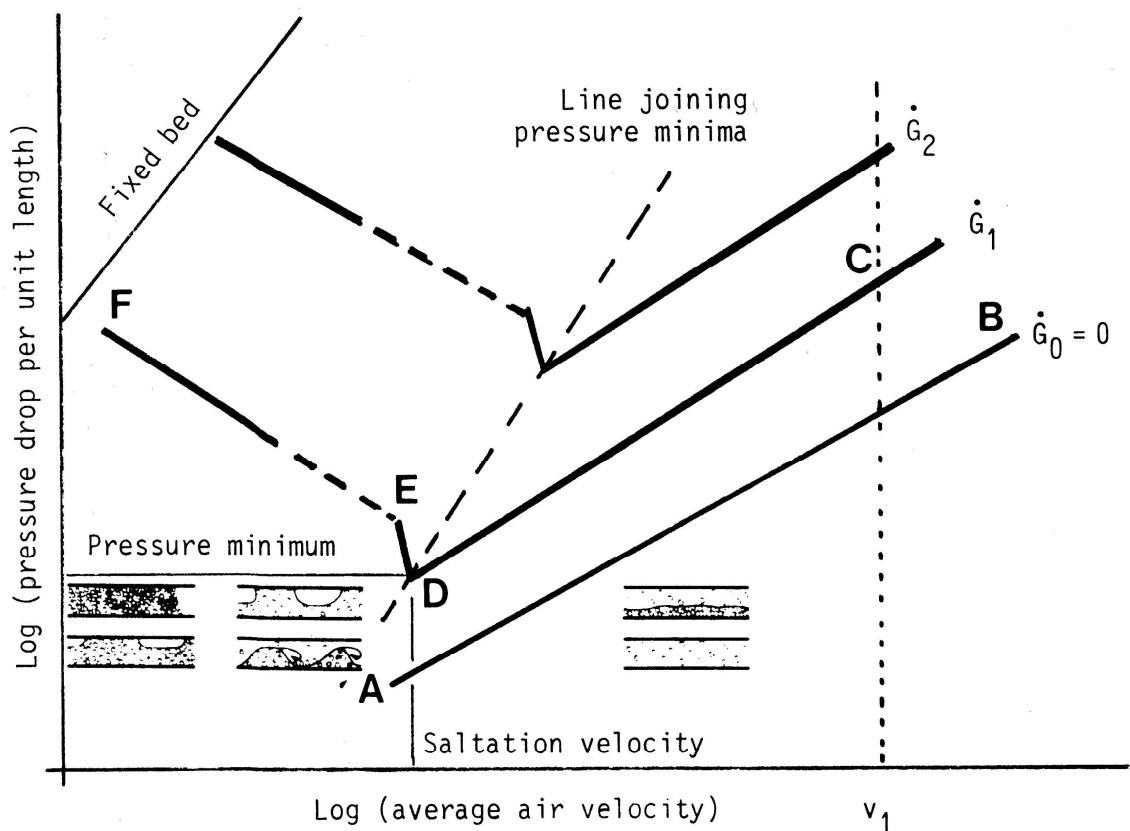
Kuva 1.16. Virtaustapoja seosvirtauksesta erillisvirtaukseen ja tulppakuljetukseen [3, s.49].

Kuvasta 2.16 nähdään, että materiaalin kuljetustapoja on monia laihan materiaaliseoksen lentokuljetuksesta aina lähes tukkeutuneessa putkessa tapahtuvaan kuljetukseen erillisvirtauksessa. Monesti materiaali kulkeutuu näiden seosvirtauksen ja erillisvirtauksen yhdistelmänä, jossa osa materiaalista kulkeutuu seosvirtauksessa putken yläosassa ja toinen osa erillisvirtauksena putken alaosassa. Näiden lisäksi

kuljetus voi tapahtua niin sanottuna tulppakuljetuksena, jossa materiaali kuljetetaan koko putken poikkipinnan täyttävänä tietyn mittaisina tulppina. Edellä mainittu materiaalin kuljetustapa ei vaadi suurta ilmavirtausta, mutta kompressorilta riittävää paineentuottoa. [3, s.49; 9, s.17-18; 14, s.19]

2.5.5. Tilakaavio (state diagram)

Materiaalin kuljetusprosessia voidaan esitellä niin sanotun tilakaavion avulla. Se on vaakasuoran tai pystysuoran materiaalin putkivirtauksen kuvaaja, jossa esitetään paineero pituusyksikköä kohden ilman keskimääräisen virtausnopeuden funktiona. Esimerkinomainen vaakasuoran virtauksen tilakaavio on esitetty kuvassa 2.17 [7, s.16]



Kuva 2.17. Tilakaavio vaakasuoralle materiaalivirtaukselle [7, s.17].

Tilakaavion tarkoitus on havainnollistaa, miten virtausnopeus vaikuttaa putkistossa syntyvään painehäviöön tietyllä materiaalivirtauksella ja mitkä ovat tietyt rajanopeudet eri materiaalin virtaustapojen välillä. [7, s.16]

Jana AB esittää syntyvää painehäviötä pelkällä kaasuvirtauksella. Virtausnopeuden kasvaessa myös painehäviö kasvaa. [7, s.16]

Kun virtaukseen lisätään ilman virtausnopeudella v_1 tasaisella syötöllä tietty materiaalivirtaus (\dot{G}_1), nousee painehäviö pisteen C tasolle johtuen partikkelien aiheuttamasta lisähäviöstä. [7, s.16]

Pisteessä C materiaali kulkeutuu seosvirtauksena. Liikuttaessa janalla CD pisteestä C kohti pistettä D ilman virtausnopeutta laskemalla kasvaa massavirran suhteellinen osuus virtauksessa, eli toisin sanoen PD kasvaa. Virtausnopeuden laskiessa vähenee myös materiaalipartikkelien aiheuttamat virtaushäviöt, joten painehäviö laskee aina pisteeseen D asti. Liian suuri ilman virtausnopeus on siis haitaksi ja voi aiheuttaa tukkeutumista erityisen herkästi varsinkin alipainejärjestelmissä. [7, s.16]

Pisteessä D vallitsevassa ilman virtausnopeudessa kaikki kiinteät materiaalit, jotka ylipäättään voidaan seosvirtauksessa kuljettaa, on vielä mahdollista seoksena kuljettaa. Jos ilman virtausnopeus laskee, tippuu materiaalia merkittävästi pois seosvirtauksesta ja painehäviö kasvaa pisteeseen E. Pistettä D vastaava ilman virtausnopeus on siis eräänlainen rajanopeus kahden eri virtaustavan välillä. Kuvan 2.17 tilakaaviosta nähdään, että pyrittäessä kuljettamaan materiaalia seosvirtauksessa tehokkaasti kannattaa ilman virtausnopeus asettaa hieman rajapisteessä vallitsevaa nopeutta suuremmaksi. [7, s.16-18]

Ilman virtausnopeuden yhä laskiessa pisteessä E vallitsevasta nopeudesta muuttuu virtaus yhä sakeammaksi. Materiaalia kulkee aaltomaisesti putken alaosassa ja mahdollisesti osittain samanaikaisesti seosvirtauksessa putken yläosassa. Vähitellen materiaali täyttää putken lähes kokonaan, jolloin materiaali kulkeutuu putkessa liikkuvana petinä tai tulppina. [7, s.17-18]

Kuvan 2.17 tilakaaviossa on esitetty virtausnopeuden ja painehäviön riippuvuus usealla materiaalin massavirralla. Käyrät vastaavat muodoltaan toisiaan, mutta suurempi materiaalin massavirta nostaa painehäviötä. Tilakaaviosta nähdään, että kaikilla materiaalin massavirroilla on olemassa ilmapvirtauksen rajanopeus, mutta mitä suurempi materiaalin massavirta sitä suurempi on myös rajanopeus. [7, s.18]

2.5.6. Pystysuuntainen ja vaakasuuntainen virtaus

Virtaukset pystysuuntaisissa ja vaakasuuntaisissa putkissa eroavat toisistaan. Vaakasuuntaisessa kuljetuksessa käytetään seosvirtauksessa tarvittavalle ilman miniminopeudelle käsitettä rajanopeus. Pystysuuntaiselle kuljetukselle on olemassa rajanopeutta vastaava termi tukehtumispiste, joka määrittelee pienimmän mahdollisen ilman virtausnopeuden, jotta materiaalia voitaisiin kuljettaa seosvirtauksessa. [7, s.18]

Hienojen partikkelien kuljetuksessa ilman virtausnopeuden täytyy olla monissa tapauksissa kolmesta viiteen kertaa suurempi vaakasuorassa kuljetuksessa kuin vastaavassa pystysuorassa kuljetuksessa, mutta kookkaampien partikkelien kuljetuksessa virtausnopeuksien ero kuljetussuuntien välillä on paljon pienempi. [7, s.18-19]

2.5.7. Alipainejärjestelmien yhteydessä huomioitavaa

Vaikka monet tutkijat haluaisivat kuvata materiaalien kuljetusmekanismeja alipainejärjestelmissä ja ylipainejärjestelmissä samanlaisiksi, ovat ne käytännössä

todettu eroavaisiksi toisistaan. Molempia virtaustapoja voidaan kyllä pitää yhtäläillä seosvirtauksina. [9, s.18-19]

Jotkin kirjailijat ovat kuvailleet alipainejärjestelmissä tapahtuvan materiaalivirtauksen olevan niin sanottua ydinvirtausta, jossa materiaali imetään putken läpi keskiosassa, jolloin materiaalipartikkeleiden pilkkoutuminen ja kuluminen on vähäisempää kuin vastaavassa materiaalivirtauksessa ylipainejärjestelmässä johtuen partikkelien ja putkiseinämän vähäisemmästä vuorovaikutuksesta. [9, s.19]

Koska ilman tiheys on eri ali- ja ylipainejärjestelmissä, on myös ilman turvallinen virtausnopeus alipainejärjestelmässä eri kuin vastaavassa ylipainejärjestelmässä. Kuvassa 2.18 esitetyssä taulukossa on esitetty sopivia ilman virtausnopeuksia tiheydeltään erilaisille materiaaleille yli- ja alipainejärjestelmissä.

Material	Bulk density (kg/m ³)	Velocity pressure system (m/s)	Velocity vacuum system (m/s)
Alum	800	19.8	33.5
Calcium carbonate	440	19.8	33.5
Coffee beans	672	13.7	22.9
Hydrated lime	480	12.2	27.4
Malt	449	16.8	30.5
Oats	400	16.8	30.5
Salt	1440	25.3	36.6
Starch	640	16.8	27.4
Sugar	800	18.3	33.5
Wheat	769	16.8	32.0

Kuva 2.18. Turvalliset ilman virtausnopeudet ali- ja ylipainejärjestelmissä eri materiaaleilla [7, s.20].

Kuvan 2.18 taulukosta huomataan, että tarvittava virtausnopeus alipainejärjestelmässä on selkeästi suurempi kuin vastaavassa seosvirtauksessa ylipainejärjestelmässä. [9, s.19-20]

Kuten aikaisemmin luvussa 2.5.5 mainittiin, alipaineen tapauksessa on kiinnitettävä erityisesti huomiota myös siihen, ettei virtausnopeus ole liian suuri. Koska alipainejärjestelmissä saatavilla oleva paine-ero on maksimissaan yhden ilmakehän paineen suuruinen, liian suuri painehäviö putkistossa aiheuttaa helposti tukoksen putkistoon.

3. KULJETTIMET ELINTARVIKETEOLLISUUDESSA

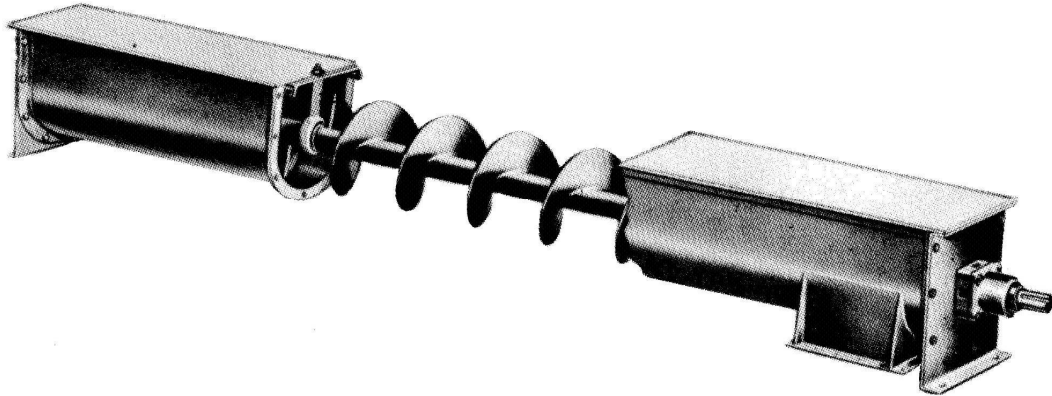
Tässä luvussa esitellään erilaisia mekaanisia ja pneumaattisia (elintarvike)teollisuudessa käytettäviä kuljetinjärjestelmätyyppejä ja niiden toimintaperiaatteita sekä energiankulutusta. Lisäksi käydään läpi pneumaattisen kuljettimen pääkomponentit.

3.1. Mekaaniset kuljettimet

3.1.1. Kuljetintyypit ja niiden toimintaperiaatteet

Teollisuudessa yleisesti käytettäviä kuljetintyyppejä jauhemaisen ja rakeisen irtotavaran kuljettamiseksi ovat ruuvikuljettimet, ketjukuljettimet, hihnakuljettimet ja tärykuljettimet sekä näiden sovellukset. Näitä kaikkia tyyppieä voidaan käyttää myös elintarviketeollisuudessa, kunhan kuljettimen suunnittelussa on huomioitu elintarviketeollisuuden erikoisvaatimukset. Useimmat kuljetintyypit toimivat myös syöttiminä. Kuljetin suunnitellaan ja valitaan aina tapauskohtaisesti muun muassa tarvittavan kapasiteetin, kuljetusetäisyyden, kuljetettavan materiaalin ominaisuuksien ja saatavilla olevan tilan mukaan. Sopivaa kuljetintyyppiä valitessa tulee vertailla sopivien tyyppien tehokkuutta ja sopeutuvuutta sekä hankinta-, käyttö- ja hoitokustannuksia. [15]

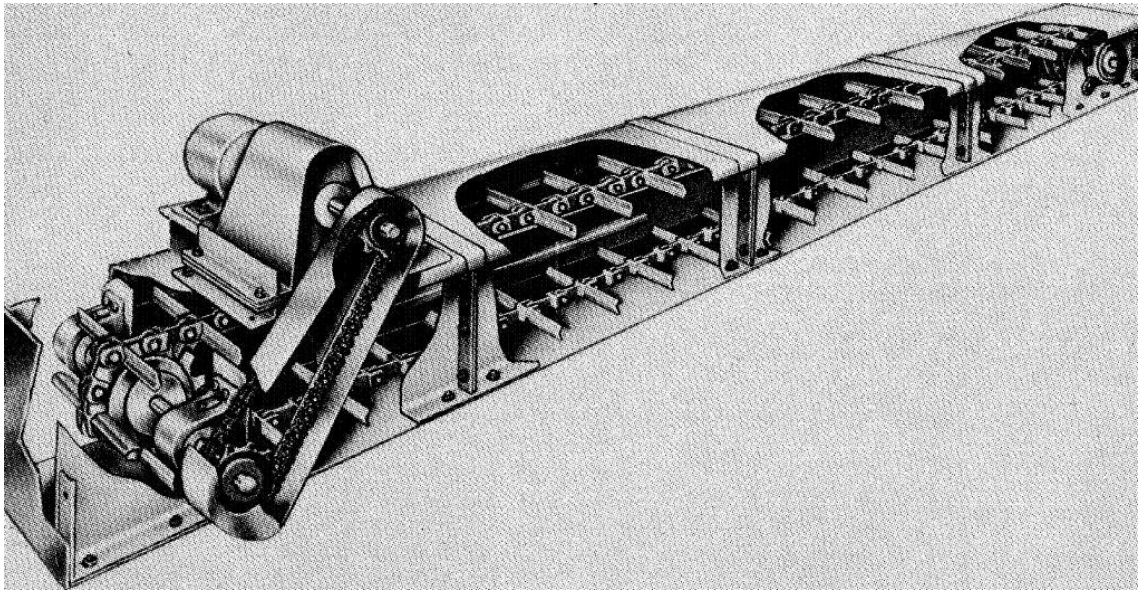
Ruuvikuljettimessa materiaalia siirretään pyörivän ruuvin avulla suljetussa kotelossa usein suhteellisen lyhyitä matkoja (normaalisti alle 20m). Kuljettaminen on mahdollista vaaka- ja pystysuoraan sekä vinossa kulmassa ja ruuvin muotoiluja on useita erilaisia käyttökohteita ja materiaaleja varten. Ruuvikuljettimella voidaan kuljettaa useita erityyppisiä materiaaleja, joilla on suhteellisen hyvä valuvuus. Kuljettimen rakenteesta voidaan tehdä riittävän tiivis materiaalin kuljettamiseksi pölyttömästi ja pitämään haitalliset aineet kuljettimen ulkopuolella. Ruuvikuljettimet ovatkin hyvin yleisiä jauhemaisen aineiden kuljetuksessa teollisuudessa ja ruuvikuljetin sopii kuljetintyyppinä hyvin elintarviketeollisuuden käyttöön. Ruuvikuljettimen kapasiteetti riippuu paljon materiaalista, vapaasti virtaavia materiaaleja saadaan kuljetettua halkaisijaltaan 600 mm ruuvilla useita satoja m³/h ja suurilla ruuveilla yleisesti yli 100 t/h tunnissa. Kuvassa 3.1 on esitetty ruuvikuljettimen perusrakenne. [15, s.110-120; 16; 17]



Kuva 2.1. Perinteisen ruuvikuljettimen rakenne [15, s.112].

Spiraalikuljetin on eräs ruuvikuljetinsovellus, jossa taipuisan kulutuskestävän polyamidiputken sisällä pyörii kierrejousi. Tämän johdosta spiraalikuljetin voidaan asentaa myös kaarelle, mutta runsas käyttö voi aiheuttaa tällöin kulumista kaarteissa. Spiraalikuljetin toimii parhaiten helposti virtaavien materiaalien kuljettamiseen ja kuljettimen kapasiteetti on pieni. Yhdellä kuljetinyksiköllä suurin kuljetusetäisyys on noin 20 metriä. Spiraalikuljettimet ovat kevytrakenteisia sekä hinnaltaan ja käyttökustannuksiltaan edullisia [15, s.166-167, 18]

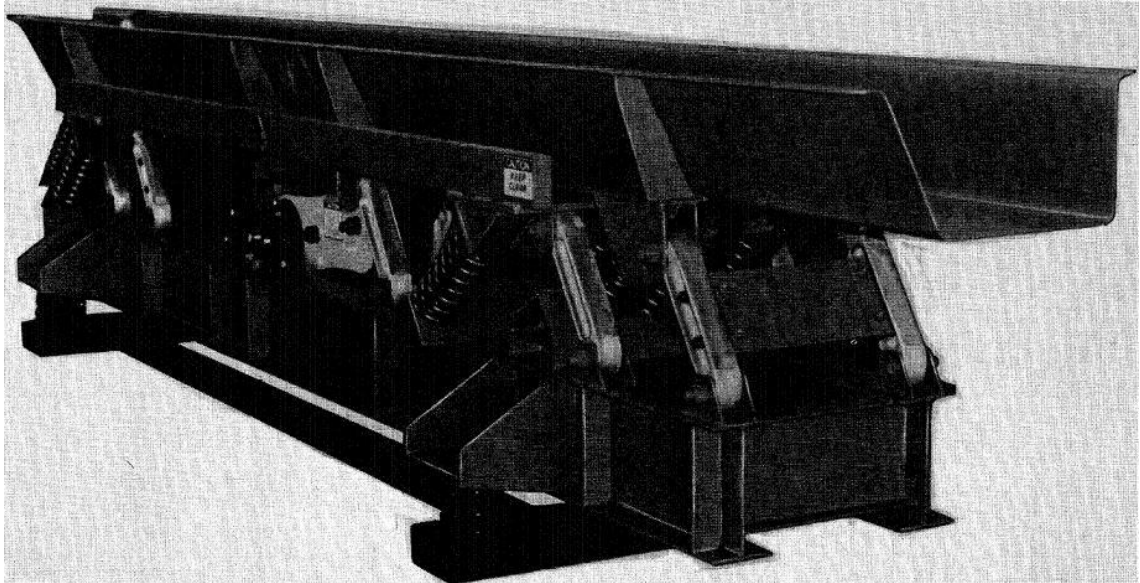
Ketjukuljettimen toiminta perustuu kuljettimessa kiertävään ketjuun. Erilaisia ketjutyyppejä on lukuisia, karkeasti ketjutyypit voidaan jakaa liukuviin ja rullaaviin ketjuihin. Lisäksi ketjuun voi olla liitetty erilaisia kuljetusta edistäviä lisäosia. Esimerkiksi ketjutoimiset kolakuljettimet ovat yksi ketjukuljettimen sovellus. Ketjukuljettimet ovat suljettuja ja pölyttömiä ja sopivat erityisen hyvin järjestelmiin, joissa vaaditaan muun muassa puhtautta ja mahdollisuutta materiaalin monipisteiseen täyttöön ja -purkuun sekä hyvää laitosturvallisuutta. Ketjukuljettimilla on mahdollista kuljettaa materiaalia pystysuuntaisesti ja vaakasuuntaisesti sekä kaltevassa tasossa. Kuljetusmatkat voivat olla suhteellisen pitkiä. Ketjukuljettimien ongelmat johtuvat lähinnä huonosta suunnittelusta ja halvoista komponenteista, hyvin suunniteltu ketjukuljetinjärjestelmä laadukkailla komponenteilla ja seosteräksestä valmistettuna ei ole missään tapauksessa halpa, mutta luotettava ja kestävä. Yleiset ketjun leveydet ovat 100 mm - 1000 mm ja kapasiteetti satoja t/h. Kuvassa 3.2 on esitetty kaapimilla varustettu ketjukuljetin. [15, s.169-234; 17]



Kuva 3.2. Kaapimilla varustettu ketjukuljetin [15, s.216].

Hihnakuljettimen toiminta perustuu kuljettimessa kiertävään hihnaan, jonka avulla materiaalia siirretään. Hihnakuljetin on yleensä avoin, mutta on saatavilla muun muassa suljettuja lokerohihnakuljettimia. Hihnalla voidaan kuljettaa lähes kaikkia jauhemaisia, rakeisia ja kokkaremaisia materiaaleja. Hihnalla voidaan kuljettaa vaakasuoraan sekä vinossa kulmassa, kunhan varmistetaan, että nousun tai laskun kulma on riittävän pieni materiaalin luistamisen estämiseksi. Hihnatyyppejä on useita eri olosuhteisiin ja käyttötilanteisiin. Lisäksi hihna voidaan varustaa esimerkiksi hihnakaavareilla. Hihnakuljettimet sopivat pitkille kuljetusetäisyyksille ja suhteellisen suurille kapasiteeteille [15, s.28-109; 17; 19].

Tärykuljettimissa hyödynnetään värähtelyliikettä materiaalin kuljettamisessa. Tärykuljettimilla pystytään kuljettamaan pääsääntöisesti kaikkia jauhemaisia ja raemaisia materiaaleja. Elintarviketeollisuuden näkökulmasta tärykuljettimen etuina ovat laitteiden itsepuhdistuvuus ja mahdollisuus pölynpitävään rakenteeseen. Tärykuljettimet ovat lisäksi rakenteeltaan yksinkertaisia. Tärykuljettimen maksimi kuljetusetäisyys on melko lyhyt (noin 60m) ja kuljetuskapasiteetti rajoittunut (350 t/h 30m kuljetusetäisyydellä). Kuvassa 3.3 on esitetty tyypillinen tasapainotettu tärykuljetinjärjestelmä. [15, s.236-328]



Kuva 3.3. Tasapainotettu tärykuljetin [15, s.246].

Monilla normaaleilla kuljettimilla on rajalliset mahdollisuudet kuljettaa materiaalia yli 20° kulmassa vaakatasoon nähden. Muun muassa tietynlaisilla ketjukuljettimilla ja ruuvikuljettimilla on mahdollista kuljettaa materiaalia pystysuorasti, mutta on olemassa erityisesti pystysuoraan kuljetukseen tarkoitettuja kuljettimia, joita kutsutaan yleisesti elevaattoreiksi. Yleensä kuljetus tapahtuu elevaattoreissa kuppien avulla, jotka on kiinnitetty kuljettimessa pyörivään hihnaan tai ketjuun. [15, s.329-402; 17]

3.1.2. Mekaanisten kuljettimien energiankulutus

Mekaanisten kuljettimien vaatima energiankulutus riippuu kuljetintyyppistä. Kaikkien kuljetintyyppien tehontarpeeseen vaikuttaa kuitenkin ratkaisevasti kuljetettavan materiaalin ominaisuudet, kuten materiaalin tiheys, kapasiteettivaatimukset ja kuljettimen fyysiset dimensiot ja kuljetusetäisyys. Lisäksi tehonkulutukseen vaikuttaa ratkaisevasti kuljetussuunta. Vaakasuurassa kuljetuksessa tarvittava teho on yleensä huomattavasti pienempi kuin materiaalin kuljettaminen vinossa kulmassa ylöspäin. [15, s.44-47, 139-144, 230, 278-283]

3.2. Pneumaattiset kuljettimet

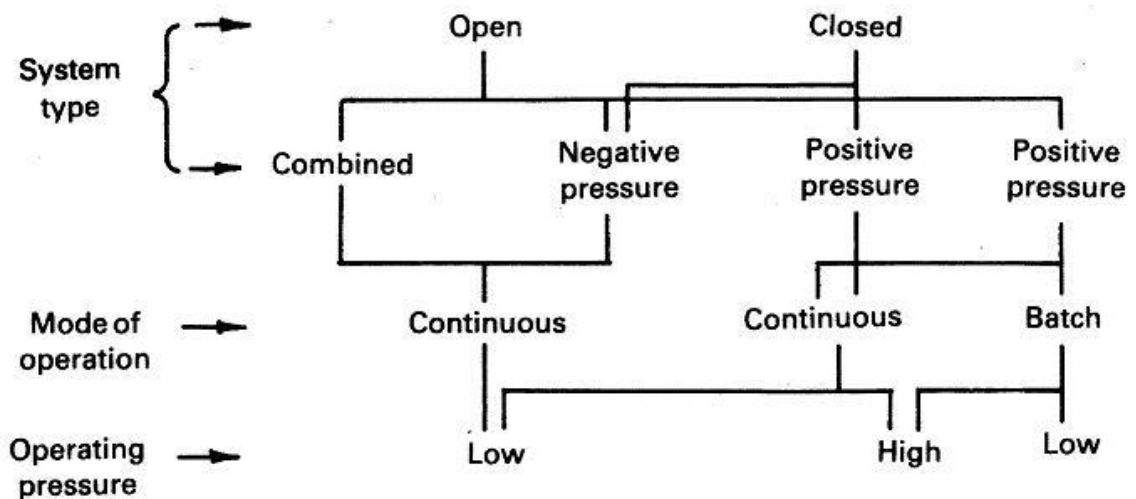
Pneumaattisiin kuljettimiin lasketaan tässä diplomityössä kaikki paineistettua kaasua tai ympäröivän ilmakehän painetta materiaalin kuljettamiseksi hyväksikäyttävät kuljetintyyppit. Käytettävä kaasu on pääsääntöisesti ilmaa, mutta tietyissä erikoistapauksissa voidaan käyttää myös muita kaasuja. Tarkemmassa käsittelyssä ovat teollisuudessa yleisesti käytettävät kuljettimet, harvinaisemmat kuljetintyyppit esitellään lyhyemmin.

Yleisesti pneumaattisten kuljettimien etuina ovat vaihtelevien tuotteiden pölytön kuljetus helposti myös hankaliin paikkoihin putkistosuunnittelun joustavuuden ansiosta, materiaalin jakaminen usealle eri alueelle ja materiaalin syöttö järjestelmään useasta eri

pisteestä, matalat huolto- ja työvoimakustannukset sekä automaation ja ohjauksen helppous. Lisäksi putkiston monikäyttöisyydestä ja suojaavuudesta johtuen voidaan kuljettaa yhdessä putkistossa useita eri materiaaleja ja myös arvokkaita tuotteita. [7, s.2]

Pneumaattisten kuljettimien huonoja puolia ovat yleisesti niiden korkea energiankulutus, laitteiston osien kuluminen ja rajoittunut kuljetusetäisyys. Pneumaattisen kuljetinjärjestelmän suunnittelu on lisäksi järjestelmässä vallitsevien virtausilmiöiden monimutkaisuuden ansiosta hankalaa ja vaatii asiantuntevuutta, suunnitteluvirheet voivat aiheuttaa vakavia ongelmia. [7, s.2]

Pneumaattiset kuljettimet voidaan luokitella avoimiin ja suljettuihin järjestelmiin, jatkuvatoimisiin ja annoksina kuljettaviin kuljettimiin sekä ylipainekuljettimiin ja alipainekuljettimiin sekä näiden yhdistelmiin. Lisäksi on olemassa uudentyyppisiä innovatiivisia kuljetinjärjestelmiä, joita esitellään luvussa 3.2.5.

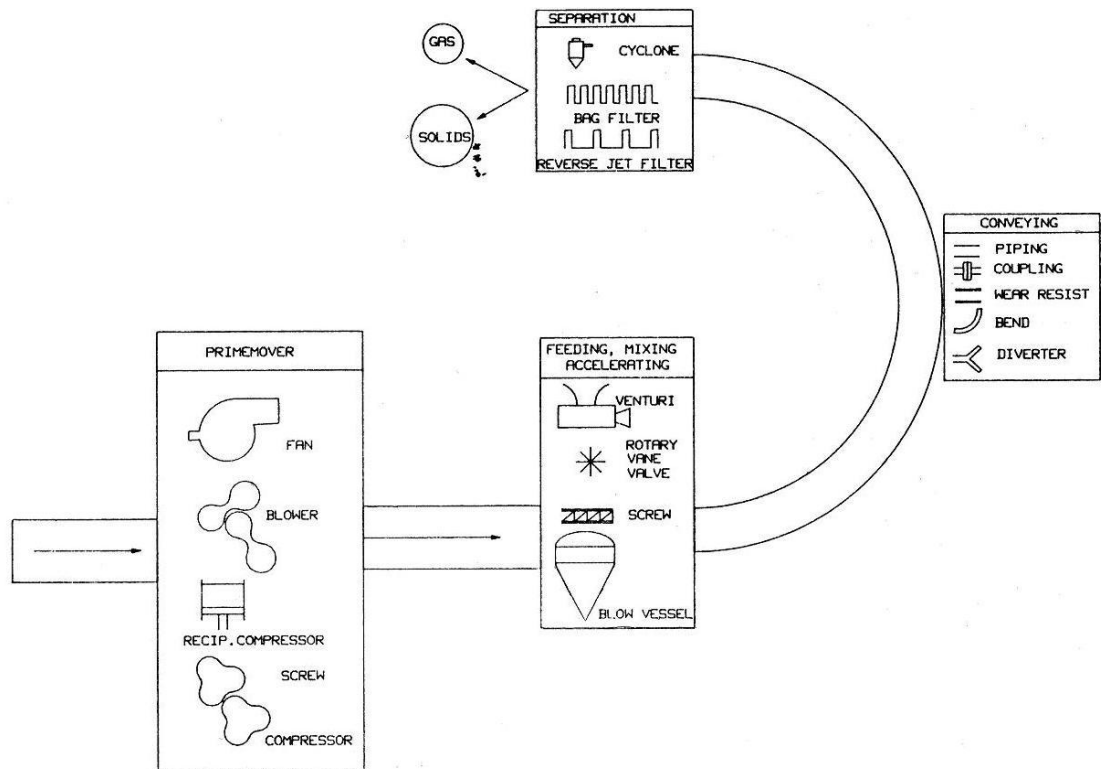


Kuva 3.4. Kaavio erilaisista järjestelmävaihtoehdoista [9, s.314].

Kuvassa 3.4 on havainnollistettu kuljetinjärjestelmävaihtoehtojen suurta määrää.

3.2.1. Pneumaattisen kuljettimen toiminta ja pääkomponentit

Perinteinen pneumaattinen kuljetinjärjestelmä koostuu olennaisesti neljästä erillisestä alueesta, joista jokaisessa on tarvittava erikoiskalusto työvaiheen suorittamiseksi. Nämä alueet ovat paineenkehitin, materiaalin syöttö-, sekoitus ja kiihdytysalue, materiaalin kuljetusalue ja materiaalin erotusalue. Kuvassa 3.5 on esitetty pneumaattisen kuljettimen periaatekuva pääalueineen. [7, s.6]



Kuva 3.5. Pneumaattisen kuljettimen pääalueet [7, s.7].

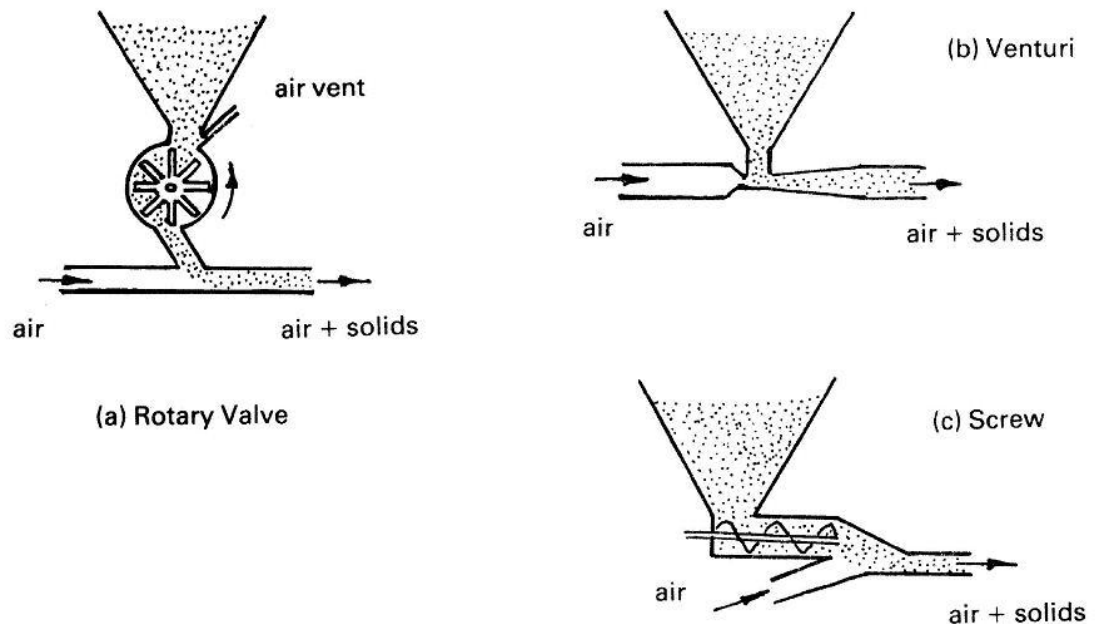
Paineenkehitin on ensiarvoisen tärkeä osa pneumaattisessa kuljetinjärjestelmässä. Paineenkehitin on puhallin, ahdin, kompressori tai pumppu, joka tuottaa tarvittavan energian materiaalin kuljettamiseksi järjestelmässä. Paineenkehittämiä on käsitelty tarkemmin luvuissa 2.2.1 Kompressorit ja 2.3.2 Alipaineen tuottaminen. [7, s.6]

Materiaalin syöttö-, sekoitus- ja kiihdytysalueella materiaali syötetään syöttölaitteella eli syöttimellä ilmavirtaukseen, jossa se tempautuu ilmavirtauksen mukaan ja sekoittuu ilman kanssa. Koska materiaali lähtee virtaukseen useimmiten levosta, vaatii materiaali tietyn kiihdytysmatkan, jotta se saavuttaa tietyn tasaisen kuljetusnopeuden. [7, s.6]

Kuljettimen tehokkaan toiminnan kannalta on tärkeää, että järjestelmään valitaan oikeanlainen materiaalin syötin. Syötintä valittaessa on huomioitava sekä materiaalin vaatimukset että järjestelmän vaatimukset. Ydinongelma materiaalin syöttämisessä kuljetuslinjaan on kuljetuslinjassa vallitseva paine. Syöttimet luokitellaankin aiheellisesti rakenteen ja tiivistyksen paineenkestosta riippuen matalapaine-, keskipaine- ja korkeapainesyöttimiin. Syöttimen lopullinen valinta tehdään huomioiden järjestelmän ja tuotteen vaatimusten lisäksi tilan riittävyys ja laitteen hinta. Lisäksi on aina huomioitava, onko tarvetta jatkuvalle syötölle vai voidaanko materiaalia syöttää annoksissa. [7, s.6, 239; 9, s.26]

Matalapainesyöttimet ovat tarkoitettu käytettäväksi alipainejärjestelmistä ylipainejärjestelmiin, joiden painetaso on enintään 100 kPa. Rakenteeltaan yksinkertaisin syötin on Venturi-ilmiötä hyödyntävä venturisyötin. Syötin sopii painetasoltaan vaatimattomiin ylipainejärjestelmiin, eikä sitä voida käyttää alipainejärjestelmissä. Oletettavasti eniten käytetty syötintyyppi on sulkusyötin, joka

koostuu kiinteässä kotelorakenteessa pyörivästä siipipyörästä. Siipipyörä siirtää pyöriessään materiaalia säiliöstä kuljetuslinjaan. Sulkusyötin toimii parhaiten vapaasti virtaavien ja hankaamattomien materiaalin syöttämiseen. Sulkusyötin ja venturisyötin on esitetty kuvassa 3.6 (a) ja (b). [7, s.239-240; 9, s.42]



Kuva 3.6. Pneumaattisissa kuljetinjärjestelmissä käytettyjä syöttimiä [9, s.318].

Keskipainesyöttimiin lukeutuvat syöttimet, joita käytetään painetasoltaan enintään 300 kPa järjestelmissä. Keskipainesyöttimenä voidaan käyttää esimerkiksi ruuvisyötintä, joka pyörivän ruuvin avulla kuljettaa materiaalia säiliöstä kuljetuslinjaan. Ruuvisyöttimen toiminta on esitetty kuvassa 3.6 (c). Jos kuljetinjärjestelmän painetaso ylittää 300 kPa, käytetään materiaalin syöttämiseen korkeapainesyötintä. Puhallussäiliö on yleinen korkeapainejärjestelmissä käytetty syötin, joka koostuu syöttimenä toimivasta paineistetusta säiliöstä apulaitteineen. Koska säiliö toimii syöttimenä, puhallussäiliötä käytettäessä ei kuljetuslinjassa vallitseva paine aiheuta ongelmia materiaalin syöttöön. Lisäksi puhallussäiliössä ei ole liikkuvia osia, minkä vuoksi se sopii hyvin hiovien ja hauraiden materiaalien syöttimeksi sekä korkeapainejärjestelmiin että matalampaa painetta käyttäviin kuljettimiin. [7, s.239; 9, s.45,48]

Kuvan 3.7 taulukossa on esitetty eri syöttimille sopivia painetason ylä- ja alarajoja. Paineet on ilmoitettu mittaripaineina.

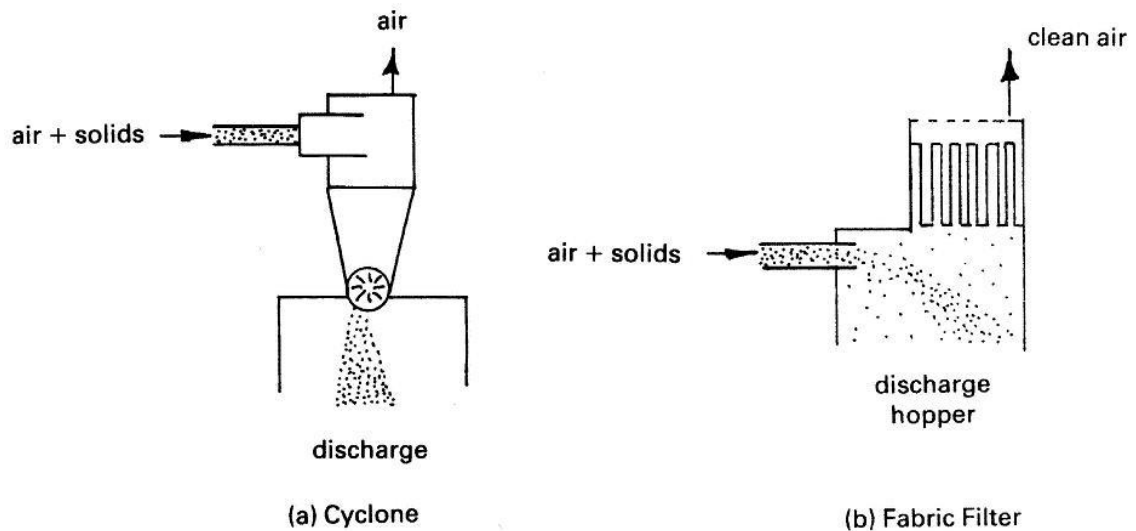
<i>Feeding device</i>	<i>System pressure range (bar gauge)</i>
Blow tank	+0.4 to +5.5 +
Screw	-0.5 to +2.5
Rotary valves	-0.5 to +1.0
Venturi	0.0 to +0.2
Gate valves	-0.5 to +0.5
Gate valves	-0.5 to +0.5
Suction nozzle	-0.6 to 0.0

Kuva 3.7. Eri syöttimille sopivat järjestelmän painealueet [9, s.42].

Kun materiaali on kiihdytetty kiihdytysalueella vakioon kuljetusnopeuteen, siirtyy materiaali kuljetusalueelle, joka koostuu putkistosta. Putkistossa on monesti mutkia ja haaroja, joissa materiaalin virtaussuunta muuttuu. Putkimutkien ja muiden putkiston komponenttien valinta on osa putkiston suunnittelua, joka on tehtävä huolellisesti. Putkimutkissa materiaalin virtausnopeus hidastuu, joten yleensä putkimutkan jälkeen on kiihdytysalue, jossa virtausnopeuden on tarkoitus kiihtyä normaaliksi. [7, s.8]

Ilma-materiaaliseoksen erotusalueella materiaali erotetaan ilmavirrasta, jonka mukana materiaali on kulkeutunut. Erottimella voi olla hyvin suuri vaikutus järjestelmän suorituskykyyn, kriittisesti matalapaine- ja alipainejärjestelmissä. Erityisesti erottimella on vaikutus järjestelmässä tapahtuvaan kokonaispainehäviöön, materiaalihäviöön, partikkelien erotteluun ja ryhmittelyyn sekä järjestelmän hintaan. [7, s.8,361]

Materiaalin ja ilman erottamiseen tarkoitettuja erottimia on olemassa useita erityyppisiä, joista yleisimmin käytettyjä ovat pyörre-erottimet ja erityyppiset suodattimet. Separaattorilla on kaksi merkittävää tehtävää. Erottaa mahdollisimman paljon materiaalia materiaali-ilmaseoksesta ja minimoida ympäristön saastuminen materiaalin johdosta. Erottimen valintaa ohjaa ensisijaisesti erotettavien materiaalipartikkelin koko ja näin ollen suodatusasteen tarpeellisuus sekä materiaalin vaarallisuus ympäristölle. Isommille partikkeleille riittää pelkästään pyörre-erotin, mutta hienojen jauheiden kanssa tarvitaan mahdollisesti suodatinjärjestelmää. Jos materiaali sisältää sekä isompia partikkeleita että pienikokoista jauhetta, voidaan isommat partikkelit erottaa ensin pyörre-erottamisessa ja tämän jälkeen johtaa pölyinen ilma suodattimen lävitse. Pyörre-erotin ja tehdassuodatin on esitetty kuvassa 3.8. [7, s.361; 9, s.27,183]



Kuva 3.8. Pneumaattisissa kuljetinjärjestelmissä käytettäviä suodattimia [9, s.335].

Edellä mainittujen asioiden lisäksi erottimen valintaan vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa järjestelmän toimintatapa ja virtauskapasiteetti, tarvittava erotustehokkuus, materiaalin konsentraatio virtauksessa, lämpötila ja kosteus sekä partikkelien kemialliset ominaisuudet. Näiden lisäksi erotinta valittaessa pitää huomioida esimerkiksi lainsäädännölliset vaatimukset, tuotteen laatu ja laitteistolle käytettävissä oleva tila sekä pääoma- ja käyttökustannukset [7, s.361-362; 9, s.183]

3.2.2. Suljettu ja avoin järjestelmä

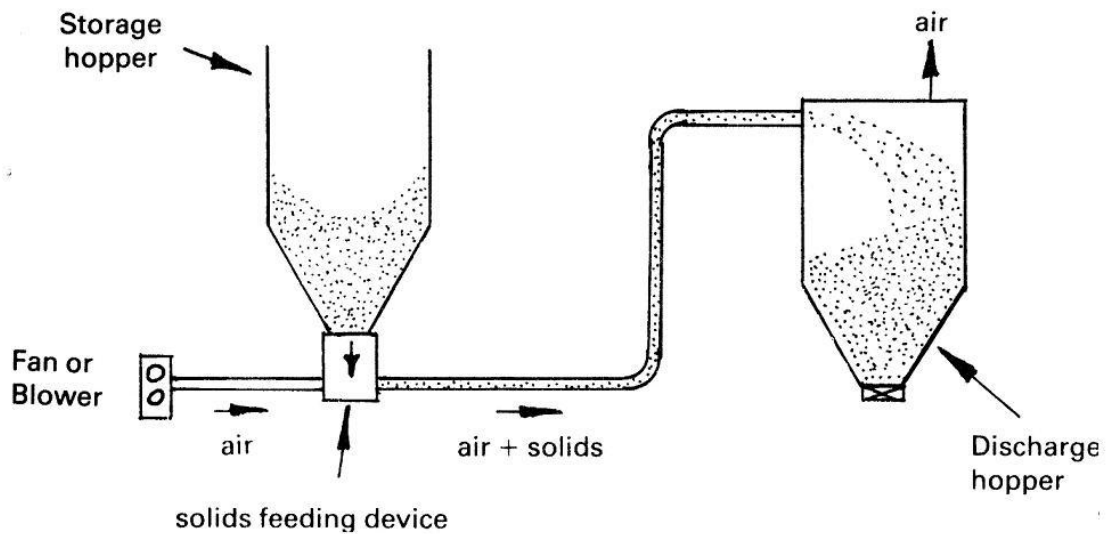
Suljettu järjestelmä eroaa perinteisestä avoimesta järjestelmästä melko vähän. Avoimessa järjestelmässä kuljetusilma johdetaan separaattorin jälkeen suodatettuna ulos järjestelmästä, mutta suljetussa järjestelmässä suodatettu ilma siirtyy takaisin paineenkehittimen imupuolelle. [7, s.15]

Joissain kuljetustilanteissa on tarvetta kuljettaa materiaalia ympäristösuojatusti. Jos esimerkiksi järjestelmästä ulospääsevä materiaali on hyvin räjähdysaltista, voidaan materiaalin kuljettamiseen käyttää ilman sijasta typpeä tai jotakin jalokaasua. Avoimessa järjestelmässä typpikaasun tai vastaavan kaasun käyttö tulisi hyvin kalliiksi, mutta suljetussa järjestelmässä kaasu ei pääse pois järjestelmästä ja se voidaan näin ollen käyttää uudestaan sitä järjestelmään jatkuvasti lisäämättä. Suljettu järjestelmä soveltuu hyvin myös myrkyllisten ja radioaktiivisten materiaalien kuljettamiseen. [9, s.34]

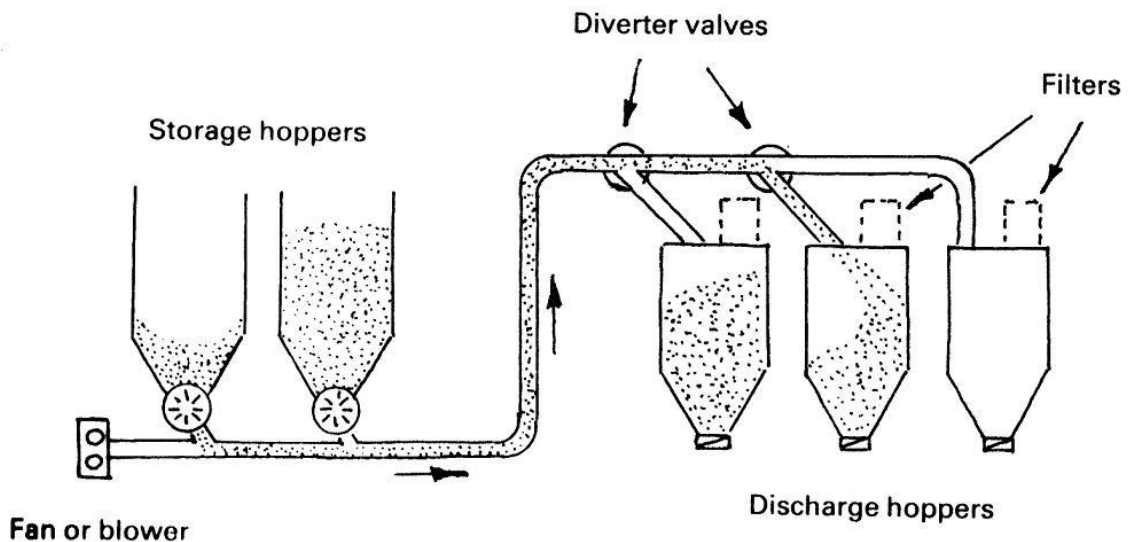
3.2.3. Ylipainekuljettimet

Ylipainekuljetinjärjestelmissä materiaali kuljetetaan paineenkehittimien tuottaman, yli ympäröivän ilmakehän paineen olevan paineilman avulla. Ylipainekuljettimet voidaan luokitella käytettävästä painetasosta riippuen matala-, keski- ja korkeapainekuljetinjärjestelmiin. Lisäksi materiaalia voidaan kuljettaa katkeamattomasti tai erissä. [9, s.30]

Yksinkertaisin ja yleisin kaikista järjestelmistä on matalapainejärjestelmä, jossa on yleensä yksi puhallin tai ahdin ja järjestelmän paine alle yhden normaali-ilmankehän paineen (101,3 kPa). Tällaisia järjestelmiä käytetään yleisimmin sovelluksissa, joissa materiaalia kuljetetaan seosvirtauksena (dilute phase) keskipitkiä etäisyyksiä tai erillisvirtauksena (dense phase) lyhyitä etäisyyksiä. Materiaali syötetään yksinkertaisissa järjestelmissä yhdestä pisteestä, mutta monipuolisemmassa järjestelmissä voidaan materiaalia syöttää useammalla syöttimellä useammasta pisteestä. Syöttimien määrän kasvaessa pitää huomioida myös paineenkehittimen sopivuus järjestelmään. Kuvassa 3.9 on esitetty yksinkertainen ja kuvassa 3.10 monipuolisempi ylipainejärjestelmä. [9, s.25-27]



Kuva 3.9. Yksinkertainen pneumaattinen ylipainejärjestelmä [9, s.315].



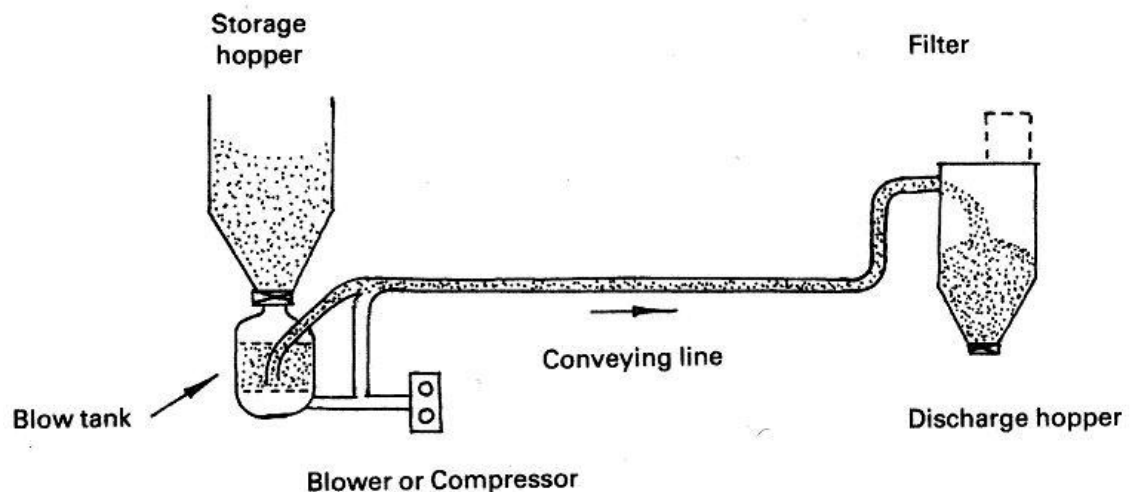
Kuva 3.10. Monipuolinen pneumaattinen ylipainejärjestelmä [9, s.315].

Matalapainejärjestelmien etuina ovat mahdollisuus jatkuvaan materiaalivirtaukseen sekä laitteiston ja materiaalin vähäinen kuluminen. Matalapainejärjestelmissä, kuten ylipainejärjestelmissä yleisesti, on vaarana materiaalin vuotaminen järjestelmästä.

Matalapainejärjestelmissä lisäksi kuljetusetäisyys on melko rajoittunut ja melkein poikkeuksetta tarvitaan materiaalin syöttämiseen erillinen syötin. Luonnollisesti paineenkehittimen tuoton kasvaessa ja korvattaessa puhallin tai ahdin kompressorilla paranee järjestelmän kuljetusominaisuudet, mutta samalla järjestelmän kustannukset ja kuluminen kasvavat. [3, s.44]

Yksivaiheista kompressoria käytetään yleisesti noin 2,5 bar (250 kPa) järjestelmäpaineeseen saakka. Useampivaiheisia kompressoreita käytetään yleisesti aina 7 bar (700kPa) järjestelmäpaineeseen asti. Puhallussäiliötä voidaan käyttää jopa 8 bar (800 kPa) järjestelmäpaineisiin saakka, mutta puhallussäiliötä käytettäessä ei normaalisti materiaalin jatkuva kuljetus ole mahdollista vaan kuljetus on mahdollista yleisesti vain annoksissa. Suurempi paine mahdollistaa kuitenkin pitkän kuljetusetäisyyden tai materiaalin kuljettamisen hyvin rikkaalla seossuhteella. [7, s.16; 9, s.28-29]

Kuvassa 3.11 on esitetty puhallussäiliöllä toteutettu kuljetinjärjestelmä.

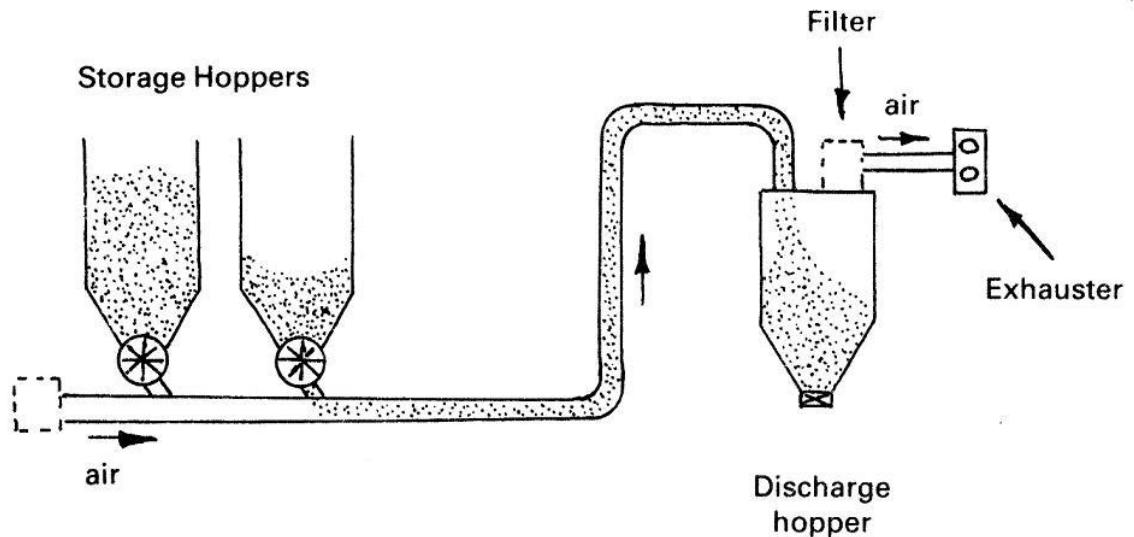


Kuva 3.11. Korkeapainejärjestelmä puhallussäiliöllä [9, s.316].

Puhallussäiliön etuna on sen toiminta myös syöttimenä, joten erillistä syötintä ei tarvita. Lisäksi, kuten aikaisemmin mainittiin, puhallussäiliö sopii hyvin hauraiden ja hiovien materiaalien kuljettamiseen myös matalapainejärjestelmissä. Puhallussäiliön huonona puolena on sen viemä tila erityisesti korkeussuunnassa. [9, s.28-29]

3.2.4. Alipainekuljettimet

Alipainekuljetinjärjestelmissä kehitetään järjestelmään alipaine, jolloin ympäröivän ilmakehän paineesta saadaan energianlähde materiaalin kuljettamiseksi. Alipainejärjestelmissä kuljetuslinjastossa saatavilla oleva paine-ero on rajoitettu, joten alipainejärjestelmissä ei päästä suuriin kuljetuskapasiteetteihin tai pitkiin kuljetusetäisyyksiin. Kuvassa 3.12 on esitetty alipainejärjestelmän periaatekuva. [9, s.27]



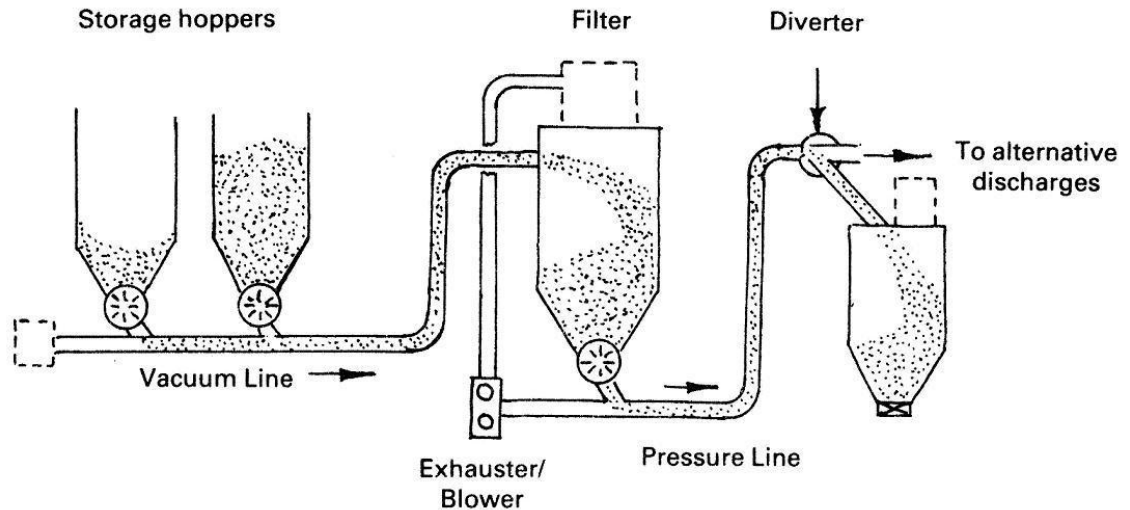
Kuva 3.12. Yksinkertainen alipainejärjestelmä [9, s.316].

Alipainejärjestelmiä käytetään useimmiten sovelluksissa, joissa materiaalia siirretään monesta pisteestä yhteen pisteeseen. Alipainejärjestelmät sopivat teollisuudessa hyvin lastinpurkusovelluksiin ja jalostuslaitoksissa kuljettamaan valmistusaineita useammasta säiliöstä valmistuslinjastolle. Syöttäjiksi järjestelmiin sopivat erityisesti sulkusyöttimet, koska paine-ero syöttimen yli on pieni. Lisäksi ylipainejärjestelmään verrattuna sulkusyöttimen ei alipainejärjestelmässä tarvitse toimia ilmasulkuna, joten syöttimen hinta on edullinen. Syöttimistä myös muun muassa ruuvisyöttimet ja imusuuttimet sopivat käytettäväksi alipainejärjestelmissä. [9, s.27-28]

Alipainejärjestelmien kuljetusetaisyys ja -kapasiteetti ovat rajoitetut ja monesti alipainejärjestelmät toimivat jaksottaisesti. Alipainejärjestelmien etuina ovat ohjauksen ja laitteiston asennuksen yksinkertaisuus. Erityisesti elintarviketeollisuutta ajatellen alipainejärjestelmien suurin etu on niiden pölyttömyys, koska kaikki virtaus on järjestelmässä sisäänpäin. Pölyttömyys on tärkeää lisäksi käsiteltäessä terveydelle vaarallisia tai räjähdysherkkiä materiaaleja. Virtauksen suunnasta johtuen ei alipainejärjestelmissä tapahdu myöskään materiaalihukkaa. [9, s.28; 3, s.44]

3.2.5. Yhdistelmäkuljettimet

Ylipaine- ja alipainejärjestelmät on mahdollista yhdistää. Tällöin materiaalia kuljetetaan sekä paineenkehittimen imupuolella luodun alipaineen että painepuolella tuotetun ylipaineen avulla. Vaikka tiettyjen materiaalien kuljettaminen joidenkin puhaltimien läpi on mahdollista, materiaalin pilkkoutumisen ja yleisen kulumisen takia läpikuljetus ei ole suositeltavaa. Kuvassa 3.13 on esitetty yhdistelmäjärjestelmän periaatekuva.



Kuva 3.13. Välisäiliöllä varustettu yhdistelmäkuljetin [9, s.316].

Kuvasta 3.13 nähdään, että paineenkehitin voidaan eristää materiaalivirrasta erillisen syöjällä varustetun välisäiliön ja suodattimen avulla, jolloin vältetään läpisyötön aiheuttamilta mahdollisilta ongelmilta. [9, s.28]

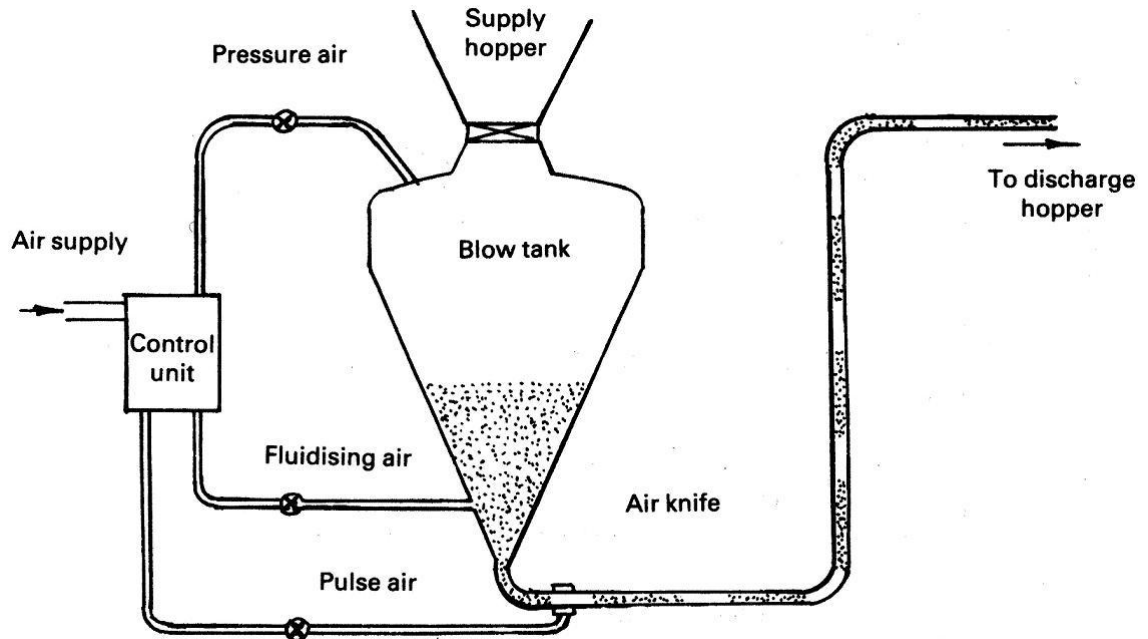
3.2.6. Erikoiskuljettimet

Perinteiset korkeapainejärjestelmät ovat kykeneviä kuljettamaan vain tiettyjä materiaaleja erilliskuljetuksena (dense phase) ja monia huonosti virtaavia hienoja jauheita pitää kuljettaa hyvin suurilla nopeuksilla ja näin ollen myös huonolla hyötysuhteella. Putkistotukokset ovat monen materiaalin tapauksessa suuri ongelma. Usein on tarve pysäyttää ja käynnistää järjestelmä uudestaan kuljetuksen aikana, mikä ei tavanomaisilla kuljetinjärjestelmillä onnistu. Tässä aliluvussa esitellään muutama kehitystyön tulos, kun tavoite on ollut kehittää hitaan kuljetusnopeuden omaava järjestelmä. [9, s.35]

Kehitetyt järjestelmät perustuvat lähinnä puhallussäiliön hyödyntämiseen materiaalin kuljettamiseksi. Yksittäistulppajärjestelmässä tietty annos materiaalia syötetään puhallussäiliöön, joka on yleensä paineistettu yläpäästä. Materiaali työnnetään putkiston läpi yhtenä tulppana ilman erillistä kuljetusilmaa. Useimmiten käytetään pieniä puhallussäiliöitä, joiden tilavuus on noin $0,5\text{m}^3$. Ilmanpaine puhallussäiliössä on normaalisti noin 6 bar (600 kPa) ja tyypillinen materiaalitulppa 150mm halkaisijaltaan olevassa putkessa on noin 15 metriä pitkä, jolloin materiaalitulpan tilavuus on noin $0,27\text{m}^3$. [9, s.35]

Tavanomaisilla korkeapainejärjestelmillä päästään yleisesti huomattavasti suurempiin materiaalivirtauksiin kuin yksittäistulppajärjestelmillä, mutta tulppakuljetuksena voidaan kuljettaa materiaaleja, joiden kuljettaminen perinteisillä kuljetinjärjestelmillä vaatisi hyvin korkean virtausnopeuden seosvirtauksessa, hyvin hitaalla kuljetusnopeudella. [9, s.35-36]

Pulssijärjestelmässä puhallussäilöstä syötetään kuljetuslinjaan jatkuvasti materiaalia. Aivan kuljetuslinjan alussa materiaalivirtaa katkotaan ilmakaapimella ja materiaali kuljetetaan erillisinä tietynmittaisina tulppina, joiden välissä on ilmatila. Pulssijärjestelmä on kehitetty erityisesti tavanomaisilla kuljettimilla vaikeasti kuljetettavien materiaalien, kuten hienojen ja tahmeiden materiaalien, kuljettamiseen. Kuvassa 3.14 on esitetty pulssijärjestelmän periaatekuva. [9, s.36]



Kuva 3.14. Pulssijärjestelmä [9, s.332].

Hitaassa tulppakuljetuksessa kuljetettavien materiaalien määrää on pyritty kasvattamaan ja samalla laajentamaan kuljetustapaa jatkuvatoimisiin sulkusyöttimellä tai ruuvisyöttimellä varustettuihin järjestelmiin. Kehitystyön tuloksena on syntynyt järjestelmiä, jotka perustuvat paineen ja materiaalitulpan sijainnin tunnusteluun putkistossa joko ilmankiertoputkien tai rinnakkaisten ilmansyöttöputkien avulla. [9, s.37]

Ilmankiertojärjestelmiä käytetään yleensä ilmaa huonosti läpäisevien materiaalien, jotka muodostavat helposti hitaassa kuljetuksessa kiinteitä epätoivottuja tulppia, kuljetusta helpottamaan. Ilmankiertoputket mahdollistavat ilman kuljettamiseen pisteeseen, jossa ilmalla voidaan jakaa tukoksen aiheuttanut tulppa pienempiin osiin ja mahdollistaa kuljetuksen jatkuminen. Käytännössä tukoksen ilmetessä järjestelmässä kulkeutuu ilma kiertoputkea pitkin pisteeseen, jossa ilman voima voittaa tulpan vastusvoiman. Pitkä tulppa jaetaan näin ollen pienempiin erillisiin tulppiin, jotka ovat helpompia saada kulkeutumaan. Kiertoputki voi olla joko kuljetusputken sisällä kulkeva putki tai ulkoinen putki, josta on säännöllisin välein liitäntä kuljetusputkeen. [9, s.36]

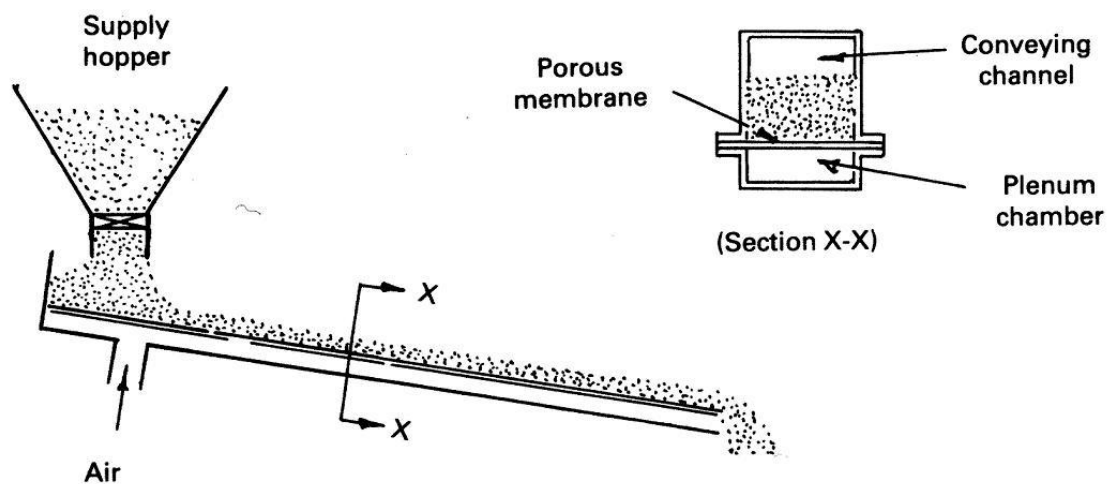
Kuljetuksen tehostimien tehtävä on helpottaa materiaalin kulkeutumista putkistossa. Joissakin järjestelmissä tehostimia on asennettu muutamisiin strategisiin paikkoihin kuljetuslinjassa, kuten jokaisen putkimutkan ja putkivarusteiden jälkeen. Toisissa

järjestelmissä tehostimet on asennettu putkistoon säännöllisin välein koko putken pituudelle, kuljetettavasta materiaalista riippuen 3-15 metrin välein. Joissakin järjestelmissä käytetään tehostimena pientä rei'itettyä putkea, joka on sijoitettu kuljetusputkeen ja on kuljetusputken mittainen. Tarvittava lisäilma tehostimille saadaan normaalisti joko haaroitettua paineenkehittimeltä tai erillisestä ilmalähteestä. [9, s.36-37]

Kuljetusputkeen asennetut tehostimet tunnustelevat painetta jokaisessa pisteessä. Tehostimien painetta säädellään siten, että materiaali virtaa jatkuvasti eikä järjestelmään pääse syntymään vastapainetta. Toisin kuin ilmankiertojärjestelmissä, tehostimet lisäävät ilmaa kuljetusjärjestelmään ja näin ollen lisäävät kuljetusnopeutta. Toisaalta tehostimet pääasiallisesti päästävät ilman vain tarvittavaan paikkaan ja aikaan. [9, s.38]

Leijupedit ovat yksinkertaisia kuljettimia, jotka hyödyntävät ilmastetun materiaalin valuvuusominaisuuksia kaltevalla tasolla. Toimintaperiaate on yksinkertainen. Kuljetin koostuu kahdesta kourusta ja niiden välisestä kalvosta, jonka päällä materiaali kuljetetaan. Kun matalapaineista ilmaa puhalletaan alapuolelta kalvon läpi, kalvon päällä olevan materiaalin partikkelien välinen ja partikkelien ja seinämän välinen kitka vähenee ja materiaali käyttäytyy lähes nesteen tavoin. Jos kuljetin asetetaan pieneen kulmaan, valuu materiaali kevyesti alaspäin kalvon päällä. Optimaalinen kulma on 3-5 astetta. [9, s.38]

Leijupetikuljettimet ovat 100-600 mm leveitä ja kykeneviä kuljettamaan materiaalia yli 100 metrin etäisyydelle. Leijupedit ovat sopivia noin 3000 t/h materiaalivirtauksiin saakka. Leijupedeillä kuljetettavaksi sopivien materiaalien skaala on hyvin laaja. Helpoiten kuljetettavia ovat yleensä keskimääräiseltä partikkelikooltaan 40-500 μ m ja tiheydeltään 1400-4000 kg/m³ olevat materiaalit. Suuremmat ja tiheimmät materiaalit vaativat yleensä hieman suuremman puhallusnopeuden. Joidenkin vaikeasti ilmastettavien kuljettaminen ei ole mahdollista leijupetikuljettimella, mutta monien huonosti virtaavienkin materiaalien kuljetus on usein mahdollista, kunhan kuljettimen kallistuskulma on riittävä. Kuvassa 3.15 on esitetty leijupetikuljettimen rakenne. [9, s.38]



Kuva 3.15. Leijupetikuljetin [9, s.334].

Leijupedit ovat edullisia hankkia ja käyttää. Tavanomaisiin järjestelmiin nähden pääomakustannukset voivat olla paljon pienemmät ja käyttökustannukset merkittävästi pienemmät. Leijupedeillä pystytään kuljettamaan monia eri materiaaleja hyvin hitaalla kuljetusnopeudella. [9, s.38]

3.2.7. Pneumaattisten kuljettimien energiankulutus

Pneumaattisten kuljettimien energiankulutus on yleisesti suhteellisen korkea. Pääsääntöisesti energiankulutus on suoraan riippuvainen kuljetettavan materiaalin koosta ja tiheydestä sekä materiaalin kuljettamiseen tarvittavan ilman virtausnopeudesta. Energian kulutukseen vaikuttaa loppujen lopuksi kuitenkin hyvin moni tekijä. Pääosa käytössä olevissa pneumaattisista kuljetinjärjestelmistä kuuluu luokaan, jossa kuljetusetäisyys on alle 1000 metriä ja kapasiteetti 1-400 t/h sekä keskimääräinen materiaalin partikkelikoko alle 10 mm. [7, s.2,6]

Rajoitukset kuljetuksessa johtuvat yleensä enemmän taloudellisista kuin teknisistä syistä. Kehityksen myötä pneumaattisten kuljettimien energiatehokkuutta on kuitenkin pyritty parantamaan muun muassa kehittämällä uudentyyppisiä kuljettimia. Energiankulutus siis riippuu hyvin paljon myös sekä kuljetintyyppistä että käytetystä paineenkehittimestä. Paineenkehittimien hyötysuhde vaihtelee tyyppistä riippuen eikä energiankulutusta voida yksiselitteisesti määritellä yhdellä keinolla etukäteen kaikille eri tyypeille. Esimerkiksi ruuvikompressori tarvitsee keskimäärin 10 % enemmän tehoa kuin mäntäkompressori tuottaakseen saman ilmamäärän tietyssä paineessa. [7, s.2; 9, s.73]

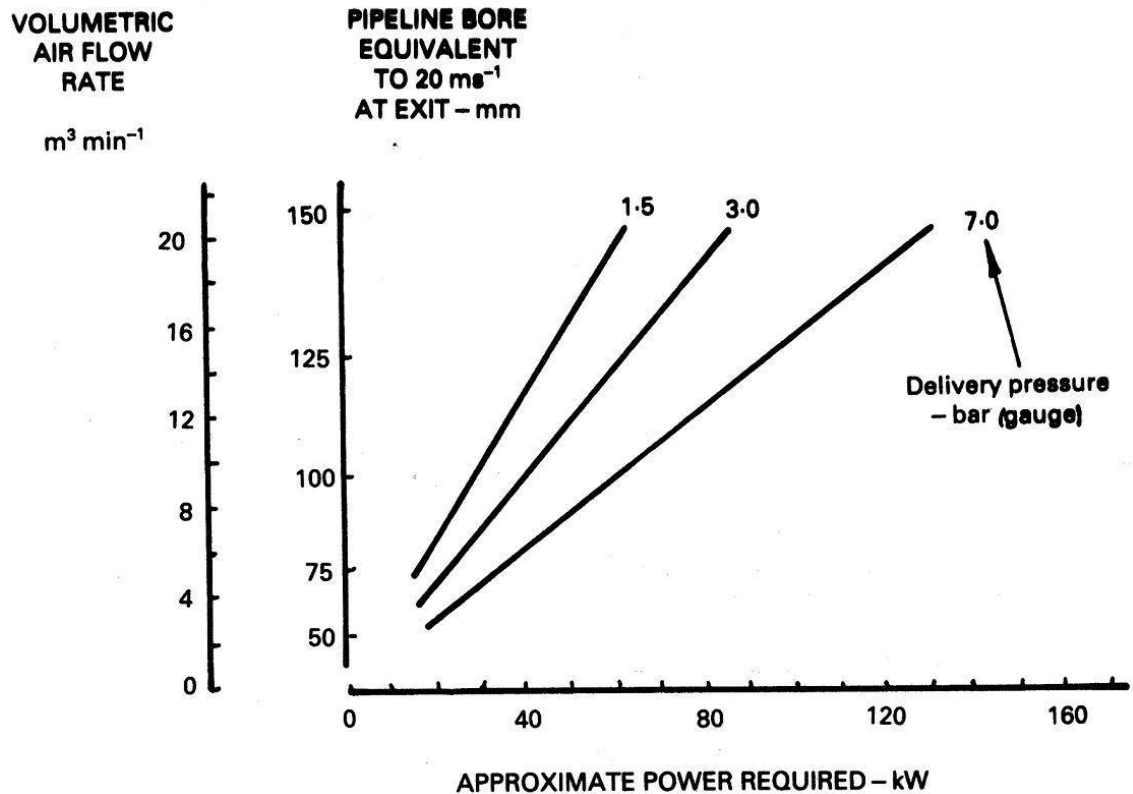
Alipaineen kehittämiseen käytetään yleensä joko alipainepumppua tai ejektoria. Alipainepumppujen energiankulutus riippuu kompressoreiden tapaan pumpputyypistä. Ejektoreita on perinteisesti käytetty imukupeissa, mutta niiden käyttö on yleistynyt viime vuosina myös kuljettimissa. Erityisesti ejektoritekniikkaan keskittyneet valmistajat kehuvat ejektorin taloudellisuutta käytössä. Ejektoreissa ei ole liikkuvia osia ja ne eivät kuluta energiaa kuin tarvittaessa. Ejektoreille suotuisia kohteita ovat siis erityisesti laitteistot, joissa kuljetustarve on hetkellistä. [11, 12]

Paineenkehittimien tehontarvetta ja näin ollen myös kuljettimen energiankulutusta voidaan arvioida karkeasti isotermisen puristuksen tehontarpeen yhtälön (2.9) avulla. Isotermisen puristus on kuitenkin ideaaliprosessi eikä ota huomioon esimerkiksi termodynaamisia ja voimansiirrossa tapahtuvia häviöitä. Häviöt voidaan ottaa huomioon kertomalla yhtälö (2.9) sopivalla vakiolla. Sopivaksi kertoimeksi on määriteltävä 2, joka sopii käytettäväksi useamman eri paineenkehittimen yhteydessä. Näin ollen tehontarvetta voidaan arvioida yhtälön (3.1) avulla

$$P = 2\dot{m}_a RT \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \quad (3.1)$$

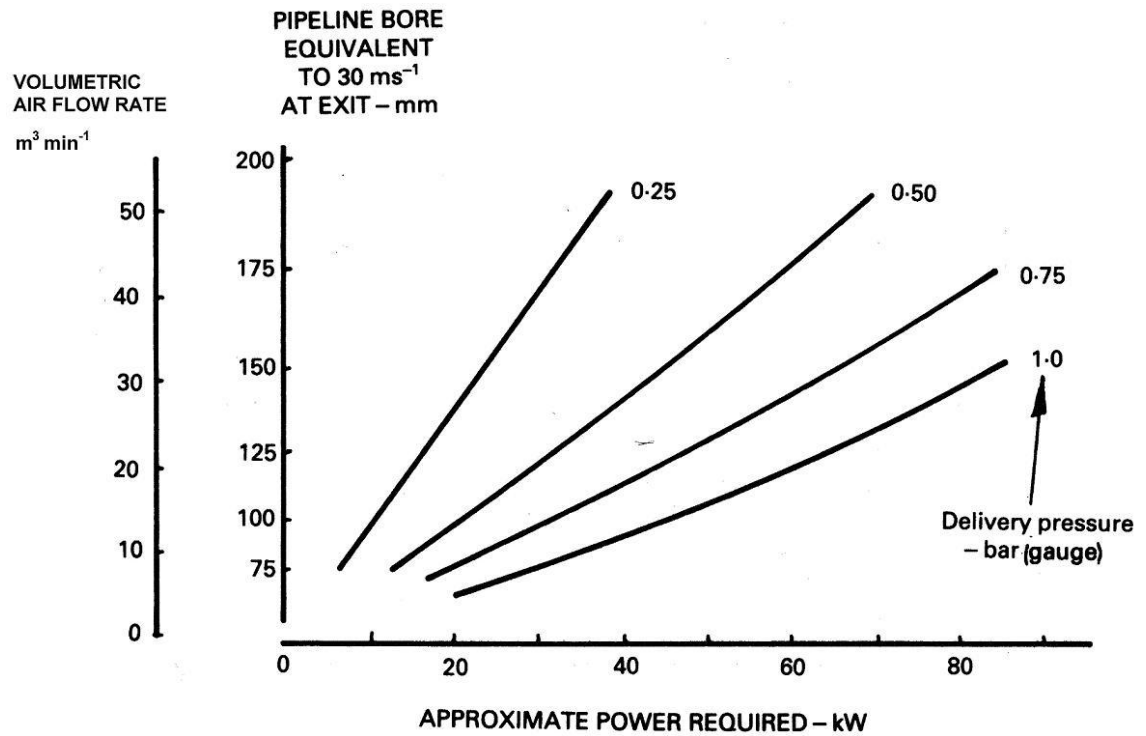
jossa P = tehontarve [kW]. [9, s.73,88]

Yhtälöstä (3.1) nähdään, että kaksi tehontarpeeseen vaikuttavaa päätekijää ovat ilman massavirta ja putkistossa ja järjestelmässä syntyvä paine-ero. Kuvassa 3.16 on esitetty tilavuusvirran ja syöttöpaineen vaikutus tarvittavaan tehoon mäntäkompressorin tapauksessa. Tilavuusvirta-akselin vierellä on lisäksi asteikko, joka kuvaa suuntaa-antavasti tilavuusvirran suhdetta putken halkaisijaan nähden. Tätä tarkoitusta varten on oletettu ulostulevan kuljetusilman nopeudeksi 20 m/s.



Kuva 3.16. Ilman tilavuusvirran ja syöttöpaineen vaikutus tarvittavaan tehoon mäntäkompressorin tapauksessa [9, s.352].

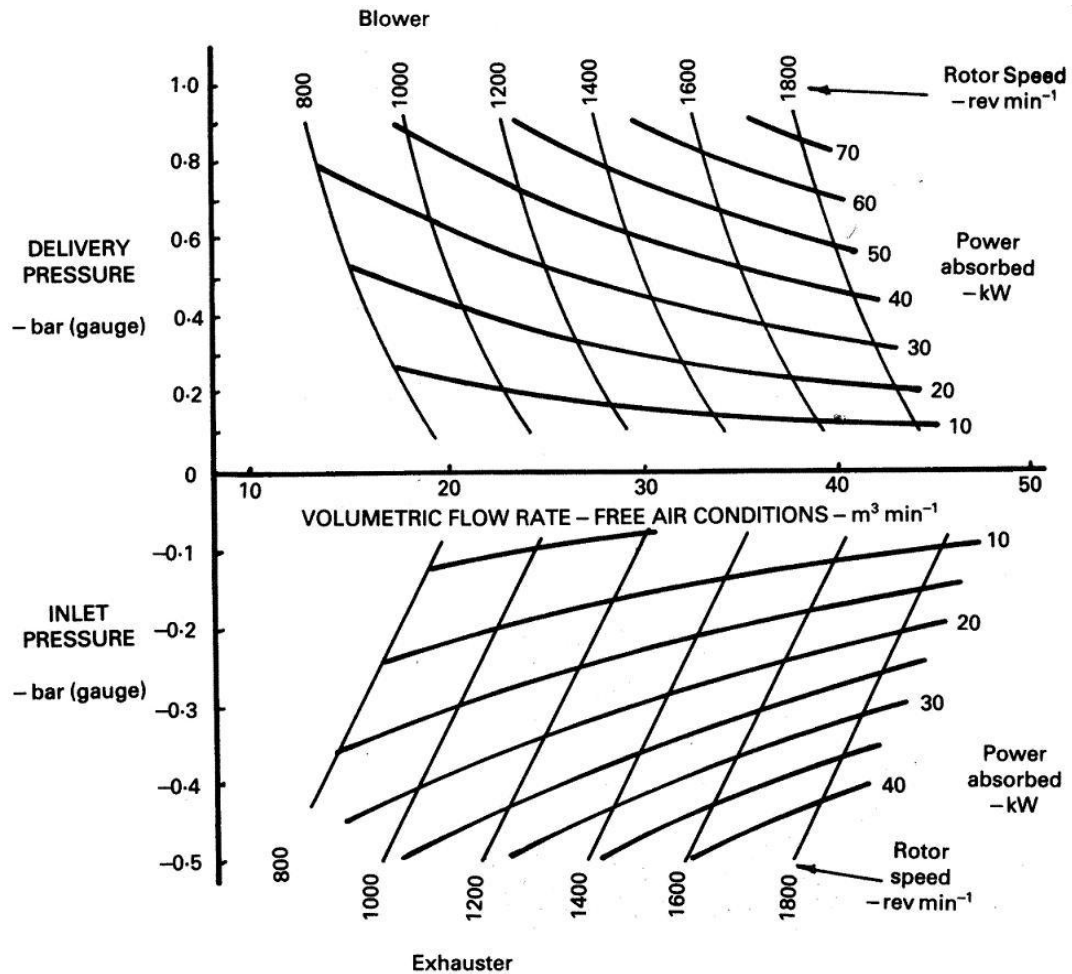
Kuvien 3.16 ja 3.18 tarkoitus on havainnollistaa, miten ilman tilavuusvirta (x-akseli) ja näin ollen siis myös massavirta vaikuttaa eri syöttöpaineella (jannat) tarvittavaan keskimääräiseen tehoon (y-akseli). Toisella x-akselilla olevaan putken sisähalkaisija-asteikkoa ei tässä tapauksessa tarvitse huomioida.



Kuva 3.17. Ilman tilavuusvirran ja syöttöpaineen vaikutus tarvittavaan tehoon Rootin puhaltimen tapauksessa [9, s.351].

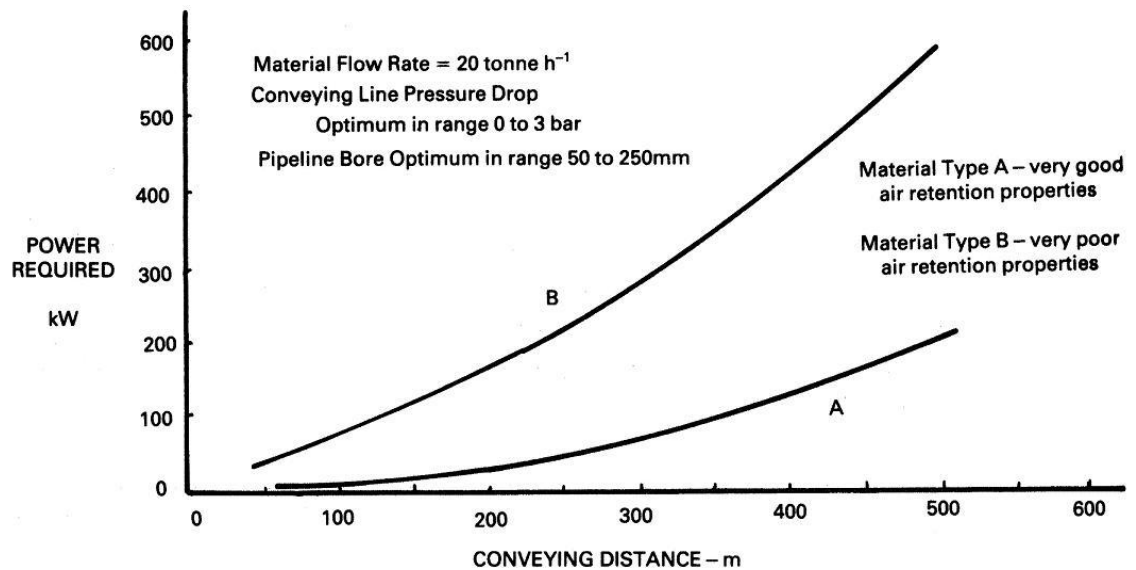
Kuvassa 3.17 on esitetty vastaava tilavuusvirran ja syöttöpaineen vaikutus tarvittavaan tehoon kuin kuvassa 3.16, mutta Rootin puhaltimen tapauksessa, jolloin ulostulevan kuljetusilman nopeudeksi on oletettu 30 m/s. [9, s.73,122]

Kuvassa 3.18 on esitetty Rootin puhaltimen valmistajan tarjoama käyttöominaisuuskäyrä. Ominaiskäyrä on mitattu normaali-ilman paineessa ja lämpötilassa. Käyrästä nähdään Rootin puhaltimen tarvitsema teho riippuen painetasosta (x-akseli) ja tuotosta (y-akseli). Käyrästä on merkitty myös roottorin pyörimisnopeus riippuen paineesta ja tuottotarpeesta. Valmistajien ominaisuuksikäyrissä ei aina huomioida voimansiirron häviöitä eikä muitakaan häviöitä. Nämä häviöt tulee huomioida kuitenkin valitessa paineenkehittimelle käyttömootoria. [9, s.122]

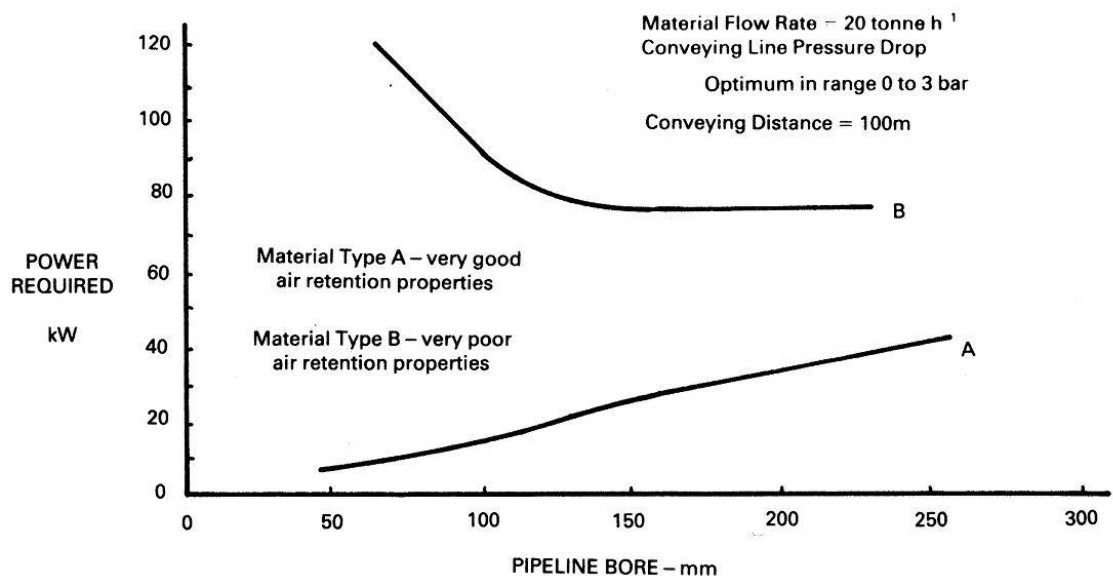


Kuva 3.18. Tyypillinen Rootin puhaltimen/pumpun ominaiskäyrästä sen toimiessa ahtimena ja alipainepumppuna. [9, s.350]

Energiankulutukseen vaikuttaa epäsuorasti monet tekijät kuten esimerkiksi kuljetusetäisyys ja kuljetusputken sisähalkaisija. Kuvassa 3.19 on esitetty vaadittu teho materiaalien A (hyvä leijumisominaisuus) ja B (huono leijumisominaisuus) kuljettamiseksi, kun kuljetusetäisyys muuttuu. Kuvassa 3.20 on vastaavasti esitetty vaadittu teho materiaalin kuljettamiseksi 100 metrin putkessa, kun putken sisähalkaisija muuttuu. Molemmissa tapauksissa materiaalin massavirta on 20 t/h ja säilyy vakiona. [9, s.74-75]



Kuva 3.19. Materiaalien A ja B kuljettamiseksi vaadittava teho kuljetusetäisyydestä riippuen [9, s.370].



Kuva 3.20. Materiaalien A ja B kuljettamiseksi vaadittu teho putkihalkaisijasta riippuen [9, s.372].

Kuvasta 3.19 nähdään, että kuljetusetäisyyden kasvaessa myös vaadittu teho kasvaa molempien materiaalien tapauksessa. Kuvasta 3.20 nähdään, että hyvän leijumisominaisuuden omaava materiaali kulkeutuu energiataloudellisimmin halkaisijaltaan pienessä putkessa, vaikka kuljettamiseen tarvitaan korkeampi paine kuin halkaisijaltaan suuremmissa putkissa. Kuljetettavan materiaalin suhde seoksessa on kuitenkin kyseisellä materiaalin massavirralla hyvin suuri ja näin ollen kuljetusnopeus saadaan pysymään suhteellisen pienenä. Huonon leijumisominaisuuden omaava materiaali kulkeutuu energiaystävällisemmin halkaisijaltaan suuremmissa putkissa, kuten kuvasta 3.20 nähdään. Koska materiaalin kuljettaminen yhtä suurella materiaalin seossuhteella ei ole mahdollista kuin paremmin leijuvan materiaalin tapauksessa, vaatii

huonon leijumisominaisuuden omaava materiaali suuren kuljetusnopeuden ja näin ollen putkistossa syntyvä paine-ero kasvaa aiheuttaen suuremman tehontarpeen. [9, s.74-75]

Kuvista 3.19 ja 3.20 nähdään, että materiaalin leijumisominaisuudella on ratkaiseva vaikutus kuljettamiseen tarvittavaan tehoon ja energiankulutukseen. Kuten kuvasta 3.20 pääteltiin, kuljettamisen energiatehokkuuden kannalta on myös suotuisaa käyttää mahdollisimman hidasta kuljetusnopeutta ja suurta materiaalin seossuhdetta. Erikoiskuljettimia, joita käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.6., kehitettäessä on pyritty juuri mahdollisimman monen eri materiaalin kuljettamiseen energiataloudellisesti edellä mainituissa suotuisissa kuljetusolosuhteissa. [9, s.74-75]

Pneumaattisissa kuljetinjärjestelmissä suurimman osan järjestelmän tarvitsemasta kokonaistehosta tarvitsee pääasiassa järjestelmän paineenkehitin. Myös järjestelmän muut laitteet, kuten esimerkiksi syöttimet ja suodattimet, kuluttavat energiaa. Erityisesti ruuvisyöttimet voivat kuluttaa merkittävän osan järjestelmän ottamasta kokonaistehosta, mutta suodattimien tehonkulutus on kokonaiskulutuksesta lähes nimellinen. [9, s.278]

Pneumaattisten ja mekaanisten kuljettimien energiankulutusvertailu ei ole aivan yksinkertaista, koska kuljettimien energiankulutus on riippuvainen hyvin paljon muun muassa kuljetettavasta materiaalista ja muista tekijöistä. Pneumaattisten ja mekaanisten yhteisiä energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat kuljetettavan materiaalin ominaisuuksien lisäksi kuljetusetäisyys ja kapasiteettivaatimukset. Energiankulutusvertailua hankaloittaa myös energiankulutuksen riippuvuus käytettävästä kuljetintyypistä.

4. ERIKOISVAATIMUKSET ELINTARVIKETEOLLISUUDESSA

Tässä luvussa käsitellään elintarviketeollisuuden laitteiston suosituksia ja erikoisvaatimuksia, joita muun muassa alan standardit asettavat. Lisäksi käsitellään järjestelmissä käytettäviä rakennemateriaaleja ja niiden ominaisuuksia sekä rakenteiden suunnittelussa huomioitavia asioita. Lähteenä tässä luvussa on käytetty standardeja SFS-EN-2: 1997 ”Elintarvikelineet. Perusteet. Osa 2: Hygieniavaatimukset” ja ISO 14159 ”Safety of machinery – hygiene requirements for the design of machinery”. Lisäksi lähteenä on käytetty laitehygieniajärjestön European Hygienic Engineering and Design Group (EHEDG) laatimaa yleisohjetta 8 ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) laatimaa hygieniiohjetta ”Laitehygieniä elintarviketeollisuudessa”.

4.1. Yleistä

4.1.1. Käsitteitä

Elintarvikkeella tarkoitetaan mitä tahansa tuotetta, ainesta tai materiaalia, joka on tarkoitettu suun kautta nauttivaksi. Elintarviketeollisuudessa käytettävien koneiden ja laitteiden täytyy täyttää tietyt erikoisvaatimukset muihin teollisuuden aloihin nähden. Elintarviketeollisuuden laitteen alueet jaetaan standardissa SFS-EN-2:1997 elintarvikealueeseen, roiskealueeseen ja elintarvikkeeseen koskemattomaan alueeseen. Vastaavaa jakoa käytetään myös tässä diplomityössä. [20, s.6]

Elintarvikealue on alue, joka koostuu elintarvikkeen kanssa kosketuksissa olevista pinnoista ja lisäksi pinnoista, joista elintarvike palautuu mahdollisesti uudelleen takaisin muun elintarvikkeen joukkoon. Roiskealue koostuu niistä pinnoista, joihin elintarviketta voi roiskua tai joita pitkin elintarvike voi valua palautumatta enää takaisin muun elintarvikkeen joukkoon. Elintarvikkeeseen koskemattomaan alueeseen kuuluu kaikki muut alueet, jotka eivät kuulu elintarvike- tai roiskealueeseen. [20, s.6]

4.1.2. Yleisiä ja toiminnallisia vaatimuksia

Käytettävien materiaalien, pesuaineiden, desinfiointiaineiden ja voiteluaineiden tulee yleisesti olla elintarvikkeeseen sopivia ja hyväksytyjä. Järjestelmien ja laitteiden suunnittelussa on kaikin puolin huomioitava alan vaatimukset.

Vaaratekijöitä, jotka voivat aiheuttaa riskin epäpuhtauksien elintarvikkeeseen pääsemiseen tai kuluttajaan kohdistuvan terveystarvian, ovat mikrobiologiset vaaratekijät, kemialliset vaaratekijät ja vieraat esineet. Mikrobiologisia

vaaranaiheuttajia ovat esimerkiksi taudinaiheuttajat, pilaantumista aiheuttavat mikro-organismit ja myrkyt. Vieraat esineet/materiaalit saattavat olla peräisin raaka-aineesta, laitteistosta tai muusta lähteestä. [20, s.8]

Vaaratekijät on poistettava tai niihin liittyvät riskit on pyrittävä pitämään mahdollisimman pienenä laitteiston huolellisen suunnittelun ja rakentamisen avulla. Laitteiden pitää olla asianmukaisesti asennettavissa, käytettävissä, puhdistettavissa ja kunnossapidettävissä. Laitteen tulee olla helposti purettavissa puhdistusta varten ja koottavissa takaisin kokoon tai puhdistettavissa ilman purkamista. [1, s.57; 20, s.8]

Hygieniavaatimukset tulisi huomioida jo heti prosessisuunnittelun alussa, koska vaatimusten täyttäminen voi kasvattaa laitteen elinikää, vähentää kunnossapitoa ja johtaa tuotantokustannusten alenemiseen. Hygieniavaatimukset ovat joskus ristiriidassa toiminnallisten vaatimusten kanssa, jolloin on yleensä löydettävissä hyväksyttävä kompromissi. Jos kompromissiin ei päästä ja tuoteturvallisuuden takia hygieniavaatimukset täytyminen on välttämätöntä, täytyy laitteen toimintavaatimuksista tinkiä. [1, s.45; 21, s.10]

Kuljettimia on käytössä useimmissa eri elintarviketeollisuuden aloilla ja ne ovat merkittäviä ympäristöpatogeenien pesiytymispaikkoja. Kuljettimet voivat lisäksi kulkea lähes koko tuotantoalueen halki ja ne voivat siten levittää epäpuhtauksia. Laitteistojen tulee olla sijoitettu siten, että niiden huolto, kunnossapito ja tarkastus ovat helposti suoritettavissa. Laitteiden pitää olla helposti puhdistettavissa ja ne on suojattava epäpuhtauksilta. Liian korkealle tai liian lähelle seinää sijoitettu kuljetin on vaikea puhdistaa, mutta liian alhaalle sijoitettu kuljetin altistuu helpommin epäpuhtauksille. [1, s.25,36,58, 21, s.10]

Paitsi kuljettimen sijoituspaikka, myös elintarviketeollisuuden muiden tilaratkaisujen merkitys laitehygieniassa on huomattava. Hygieenisten periaatteiden mukaan suunniteltu laite ei toimi parhaalla mahdollisella, ellei se ole sijoitettu järkevästi ja samalla koko laitoksen asemapiirustus suunniteltu hygienianäkökulma huomioiden. Laitosta suunniteltaessa eri osastojen, taukotupien ja wc-tilojen sijoittelu tuotantorakennuksissa sekä rakennusten ulkoisten puitteiden, ovet, ikkunat, lattiat ja katot ovat tärkeitä suunnittelukohteita. Lisäksi myös valaistus, ilmanvaihto sekä puhdistus- ja desinfiointimenetelmät pitää huomioida suunnittelussa. [1, s.22,25-26]

Henkilöstön koulutus, jonka keskeisenä osana on tuotantohygienian periaatteiden opettaminen, on myös tärkeää hygienian kannalta ja koulutus tulisikin suorittaa heti laitoksen käyttöönoton yhteydessä ja jatkua koko laitoksen käytön ajan. [1, s.23]

4.2. Rakennemateriaalit

4.2.1. Materiaaleista yleisesti

Rakennemateriaalien tulee yleisesti soveltua tarkoitettuun käyttöön. Materiaalin pinnan ja pinnoitteiden tulee olla kestäviä, puhdistettavissa ja tarvittaessa desinfioitavissa

olevia. Materiaalien tulee kestää tarkoitettuun käytössä eikä niistä saa irrota mitään ei-toivottua ainesta. [1, s.8; 22, s.7]

Yleisten vaatimusten lisäksi käytettävien materiaalien on tarkoitetuissa käyttöolosuhteissa oltava korroosionkestäviä ja myrkyttömiä. Lisäksi materiaalien pitää olla imemättömiä, ellei se ole teknisesti tai toiminnallisesti mahdotonta. Imemättömyydellä tarkoitetaan, ettei materiaali pidätä itseensä aineita, joiden kanssa se joutuu kosketukseen, ja näin vaikuta haitallisesti elintarvikkeeseen. Materiaalien tulee kestää kaikissa prosessissa vallitsevilla lämpötiloilla. Materiaalit eivät myöskään saa aiheuttaa elintarvikkeeseen ei-toivottuja haju-, väri- tai makumuutoksia eikä myötävaikuttaa millään tavoin epäpuhtauksien olomassaoloon ja syntymiseen. Käytännössä teollisuudessa kustannuksilla on hyvin suuri painoarvo valintoja tehdessä, laitteissa käytettävien materiaalien tulisivin olla verraten edullisia ja helposti saatavilla. [1, s.6-8; 20, s.63; 22, s.7]

4.2.2. Materiaalien ominaisuudet ja käyttö

Metalleista ja muistakin materiaaleista austeniittinen ruostumaton teräs on elintarvikelaiteissa tavallisin rakennemateriaali. Austeniittiset teräkset sisältävät hyvin vähän hiiltä, mutta suuria määriä joitakin muita metalleja, kuten kromia ja nikkeliä. Korroosionkestävyys johtuu juuri teräksen sisältämästä suuresta kromipitoisuudesta, joka on vähintään 12 %. Hyvän korroosionkeston lisäksi teräkset ovat suosittuja rakennusmateriaaleja, koska ne ovat halpoja, helposti muokattavissa ja koneistettavissa sekä kovia. Elintarvikelaiteisiin sellaisenaan sopivia teräslevyjä ja putkia on saatavissa runsaasti. Mikäli pinta ei prosessoinnissa vaurioidu, ei tällaista pintaa tarvitse käsitellä lainkaan. Jos käytetty teräslaatu on sopimaton tai laitteessa on esimerkiksi hitsaussaumoja, voidaan pinta hioa, kiillottaa, painekiillottaa tai lasikuulapuhaltaa sen saamiseksi sileäksi. [1, s.64, 21, s.6-7]

Elintarvikkekoneiden rakenteisiin soveltuvia teräksiä on löydettävissä AISI (American Iron and Steel Institute), DIN (Deutsches Institut für Normung) ja ACI (Alloy Designations for Cast Stainless Steels) -luetteloista. Tarjolla on paljon erilaisia ruostumattomia teräslaatuja. Tyypillisesti käytetään teräslaatuja, jotka sisältävät 15 % kromia ja 8 % nikkeliä. Tähän ryhmään kuuluvat myös 300-sarjan teräkset, jotka sisältävät nikkeliä, molybdeenia tai titaania kestävyuden ja korroosionkestävyyden parantamiseksi. Yleensä ruostumattomat terästyypit AISI-304, AISI-316 ja AISI-316L tarjoavat riittävän ruostesuojan elintarvikkekoneissa. Elintarvikkekonesovelluksissa, joissa ei käsitellä korkeita klooripitoisuuksia, AISI-304 on käytetyin teräslaatu. Paremmiin klorideja kestävä molybdeenia sisältävä AISI-316 tai titaania sisältävä vaihtoehto. AISI-316 sopii käytettäväksi esimerkiksi venttiileissä, roottoreissa ja akseleissa, kun taas AISI-316L sopii hitsattavuutensa ansiosta paremmin muun muassa putkistojen ja tankkien valmistusmateriaaliksi. Teräsladun valinta erilaisiin sovelluksiin riippuu yleisesti prosessin ja käytettyjen puhdistusmenetelmien korrodoivuudesta. [1, s.64-65; 21, s.6-7]

Musta- ja valurautaa sekä seostamatonta vähähiilistä terästä käytetään lähinnä tukirakenteissa, mutta ruostumisongelmien niitä ei käytetä elintarvikealueella. Korroosiota voidaan hieman estää maalaamalla tai galvanoimalla. [1, s.66]

Kupari ja sen seokset messinki ja pronssi ovat suhteellisen korroosiokestäviä, mutta johtuen mahdollisesta reagoimisen tuotteiden kanssa ne eivät ole kovinkaan hyviä rakennemateriaaleja. Myös alumiini on korroosiokestävä, mutta sen käyttömahdollisuudet materiaalin reaktiivisuudesta johtuen ovat rajalliset, samoin tinan. Sinkki, kadmium, antimoni, elohopea ja lyijy ovat myrkyllisiä metalleja eikä niitä tule käyttää elintarviketeollisuuden laitteissa. Titaani on korroosionkesto-ominaisuuksiltaan parempaa kuin teräs. Se on myös kevyempää ja puhdistuu hyvin. Titaani on kuitenkin myös kallista, mikä rajoittaa sen käyttöä. [1, s.66]

Muoveja käytetään runsaasti elintarviketeollisuuden laitteissa. Elintarvikekäyttöön sopivia muoveja ovat muun muassa polypropyleeni (PP), polyvinyylidikloridi eli kovamuovi (PVC), asetaalikopolymeeri, polykarbonaatti (PC), HDPE (High Density Polyethylene) ja polyeetteri-eetteri-ketoni (PEEK). Lisäksi käytetään esimerkiksi nylonia eli polyamidia ja teflonia (PTFE, polytetrafluorietyyleeni). Muovien etuja ovat edullinen hinta, keveys, myrkyttömyys, värjäämättömyys ja hyvä korroosionkesto. Muoveista saadaan tarpeen vaatiessa yleensä läpinäkyviä ja monet muovit kestävät hyvin happoja, emäksiä sekä pesu- ja desinfiointiaineita. Muovien huonoina puolina on rajallinen korkeiden lämpötilojen kesto. Muovit kestävät myös metalleja huonommin kulumista, mikä vaikeuttaa myös niiden puhdistusta. [1, s.67; 21, s.7-8]

Elastomeereja ja kumeja käytetään elintarviketeollisuudessa lähinnä erilaisissa tiivistimissä. Sopivia materiaaleja ovat etyleenipropylenidienimonomeeri (EPDM), joka ei ole öljyn- ja rasvankestävää, luonnon kumi (NR) ja nitrili/butyylimuovit (HNBR/NBR). Lisäksi sopivia ovat Fluoroelastomeeri (FKM) ja silikonikumi (VMQ), jotka kestävät aina 180 °C lämpötilaan saakka ja perfluoroelastomeeri (FFKM), joka kestää jopa 300 °C lämpötilaan asti. Elastomeerit vaativat säännöllistä valvontaa, koska liian kovassa puristuksessa elastomeerit voivat vaurioitua ja niitä voi joutua tuotteeseen tai tuotteen kanssa kosketuksissa oleville pinnoille vaikeuttaen puhdistuvuutta. Myös elastomeerien lämpölaajeneminen pitää huomioida. [1, s.68; 21, s.9]

Lasin ja keraamisten materiaalien käyttö elintarviketeollisuudessa on hyvin vähäistä. Laseja käytetään lähinnä joissakin erityissovelluksissa, kuten näkö- ja valolaseina. Keraamisia materiaaleja käytetään myös lähinnä erityissovelluksissa esimerkiksi laakerien pinnoituksissa. [1, s.68-69]

Puuta ja muita imeviä materiaaleja ei tulisi käyttää elintarviketeollisuudessa. Kertakäyttöisissä suodattimissa ja tiivistimissä voidaan käyttää esimerkiksi puuvillaa, pellavaa, silkkiä tai synteettisiä kuituja, mutta materiaalit eivät saa olla myrkyllisiä eikä niistä saa liiaksi irrota kuituja. Lisäksi edellä mainittuja materiaaleja saa käyttää vain kohteissa, jotka pystytään purkamaan osiin puhdistusta varten. [1, s.69]

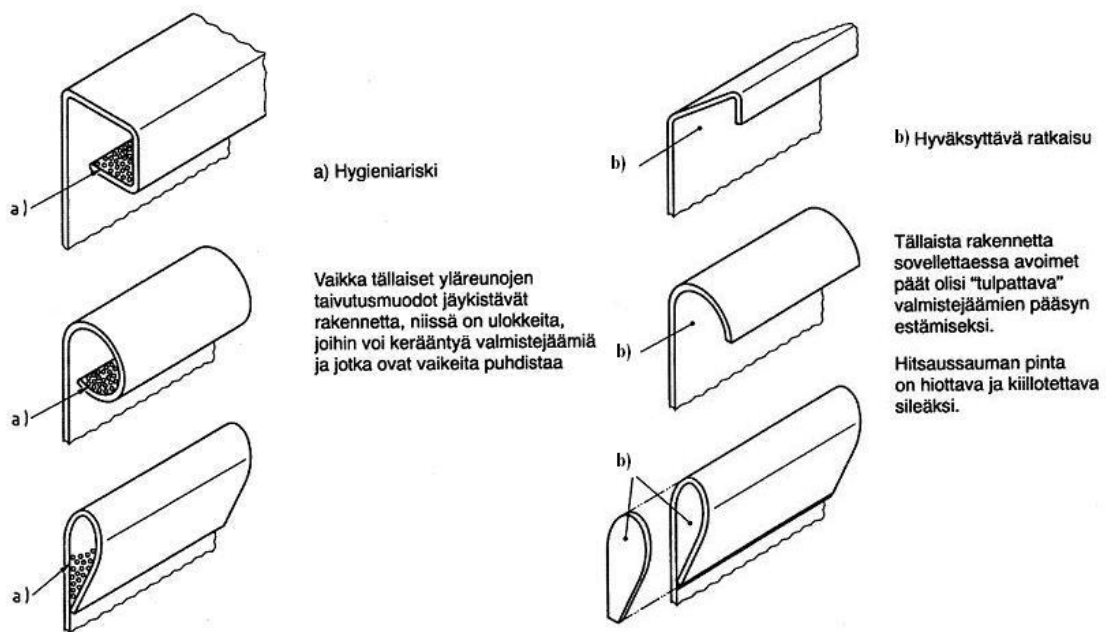
Elintarviketeollisuudessa on yleistynyt erilaisten antimikrobiaalisten materiaalien, kuten triclosan, käyttö esimerkiksi polymeerien seassa. Antimikrobiaalisten

materiaalien pitkäaikaisvaikutuksista ei kuitenkaan ole olemassa toistaiseksi kovinkaan paljon tietoa. [1, s.69]

4.3. Rakenteiden vaatimuksia

4.3.1. Elintarvikealue

Rakenteiden pintojen tulee elintarvikealueella olla puhdistettavia ja tarvittaessa desinfioitavissa. Tästä syystä pintojen on oltava sileitä, yhtäjaksoisia ja tiiviitä. Kuvassa 4.1 on esitetty hygienian kannalta huonoja ja hyväksytyjä ratkaisuja reunataitosten osalta. Pintojen tulee olla muotoiltuja ja viimeistelyä siten, että valmisteen joutuminen vahingossa elintarvikealueen ulkopuolelle estetään mahdollisimman hyvin. Lisäksi pitää varmistaa, ettei ulkopuolelle joutunut valmiste pääse palautumaan elintarvikealueelle, jos palautumisesta olisi haittaa käsiteltävälle elintarvikkeelle. Pintojen pitää olla riittävän hyvin viimeistely, jotta materiaalia ei pääse kerääntymään pieniin rakoihin ja näin vaikeuttamaan puhdistusta. Pinnanlaadun tulee olla standardin ISO 468 mukainen ja C-tyypin konekohtaisien standardien mukainen R_z ja R_a mittausten osalta. [20, s.10; 22, s.8]



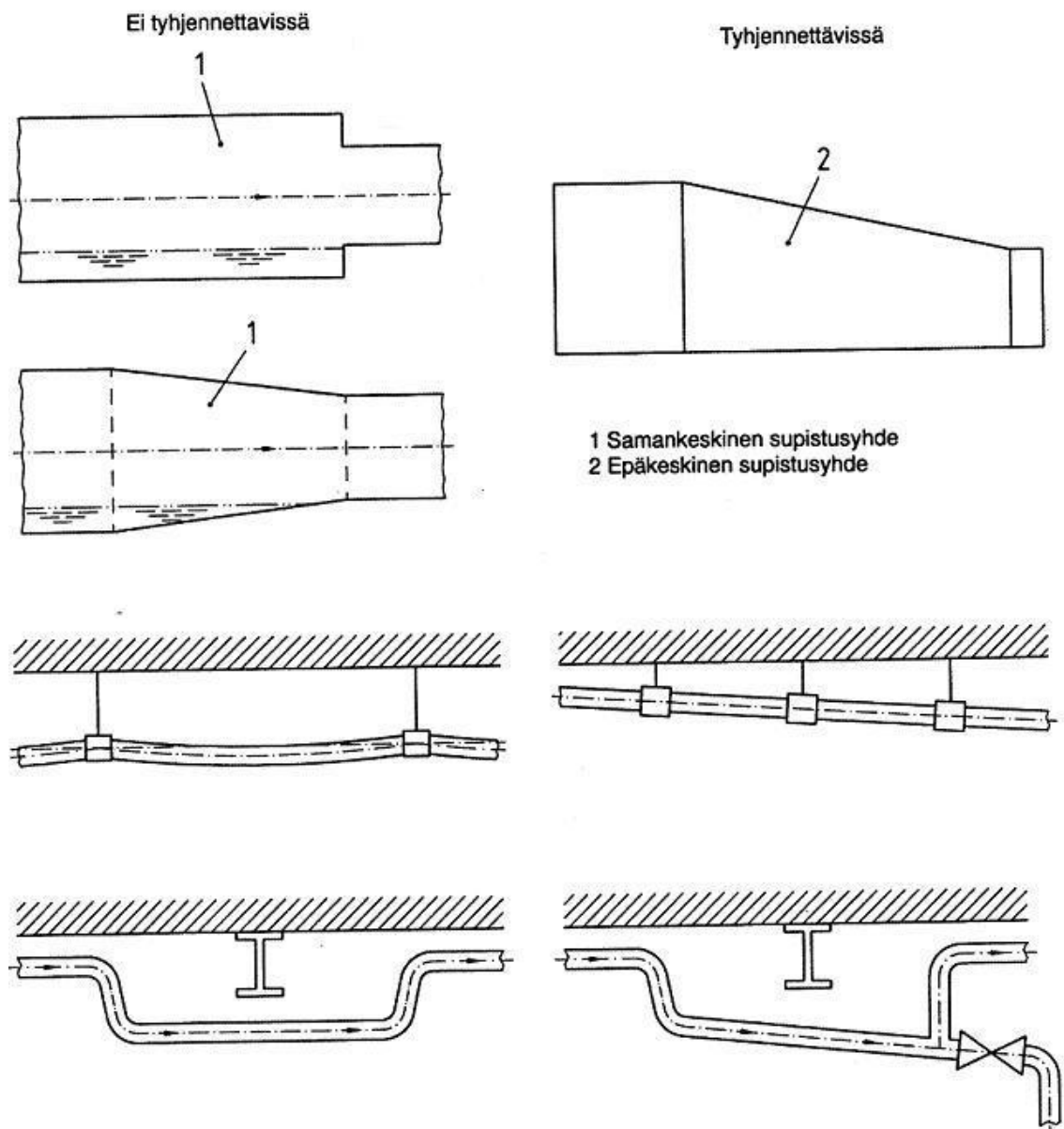
Kuva 4.1. Reunataivutusten puhdistettavuus [20, s.22] (muokattu).

Elintarvikealueella olevien pysyvien liitosten on oltava tiiviitä ja hygieenisia. Liitoksissa tulisi välttää syvennyksiä, rakoja, aukkoja, ulkonemia, sisäpuolisia olakkeita ja katvealueita. Jos liitos on avattavissa olevaa tyyppiä, pitää varmistaa liitosten tarkka yhteensopivuus ja hygieenisuus. [20, s.10; 22, s.8]

Kiinnittimiä, kuten ruuveja, muttereita ja niittejä, tulee välttää. Jos ne ovat kuitenkin teknisesti välttämättömiä, tulee niiden olla puhdistettavissa ja tarvittaessa

desinfiotavissa. Rakenteissa ei saa olla avonaisia ruuvikierteitä tai upotuksia. [20, s.10; 22, s.9]

Elintarvikemachineiden tulee olla ensisijaisesti itsetyhjentyviä. Tarvittaessa tyhjennys voidaan suorittaa muillakin tavoilla, mutta joka tapauksessa nestejäämien poistomahdollisuus pitää varmistaa. Säiliöiden tyhjennysputki tulisi sijoittaa säiliön alimpaan kohtaan eikä tyhjennysputki saa tunkeutua säiliön sisälle. Putkien tulee olla hieman kallistettuja nesteen kulkusuuntaan, jotta niihin ei jää elintarvikkeita tai pesuliuosia. Putkistojen tulee lisäksi olla riittävästi tuettuja, jotta niiden taipuminen mutkalle estyy ja näin mutkiin ei pääse kertymään elintarviketta tai pesuliuosia. Kuvassa 4.2 on esitetty sekä huonoja että hyviä esimerkkiratkaisuja putkiston tyhjennettävyyden kannalta. [1, s.61; 20, s.10; 22, s.8]



Kuva 4.2. Putkiston tyhjennettävyydessä huomioitavia asioita [20, s.38] (muokattu).

Sisäkulmat ja -nurkat tulee olla rakenteeltaan sellaisia, että ne ovat tehokkaasti puhdistettavissa ja tarvittaessa desinfioitavissa. Sisäkulmien ja -nurkkien on myös täytettävä C-tyyppin konekohtaisissa standardeissa määritellyt tekniset vaatimukset. [20, s.10; 22, s.9]

Rakenteissa tulisi ensisijaisesti välttää katvealueiden käyttöä. Jos katvealue kuitenkin on välttämätön, on katvealue rakennettava siten, että ne ovat tyhjennettävissä tai puhdistettavissa ja tarvittaessa desinfioitavissa. [20, s.10; 22, s.8]

Laakerit on sijoitettava elintarvikealueiden ulkopuolelle, ellei se ole teknisesti mahdotonta. Elintarvikealueen sisäpuolella olevien laakerien pitää olla voideltuja elintarvikekäyttöön soveltuvalla voiteluaineella. Elintarvikealueella olevien akselitiivisteiden ja liikkuvien akseleiden on oltava itsevoitelevia, käsiteltävän aineen voitelemia tai elintarvikekäyttöön soveltuvalla voiteluaineella voideltuja. Laakerien, akselitiivisteiden ja liikkuvien akseleiden pitää olla puhdistettavissa olevia ja tarvittaessa desinfioitavissa. [20, s.10; 22, s.9]

Instrumentoinnissa tulee huomioida tässä luvussa esitellyt vaatimukset sovelletuin osin. Antureista ja muista liitettävistä ei saa olla haittaa elintarvikkeelle. Esimerkiksi anturia varten ei putkistoon saa jäädä ylimääräistä liian suurta katvealuetta. [20, s.10; 22, s.10]

Kotelot, kannet ja ovet on suunniteltava siten, että vältetään mahdolliset haitalliset vaikutukset, kuten epäpuhtauksien kerääntyminen. On myös varmistettava puhdistettavuus ja tarvittaessa mahdollisuus desinfiointiin. [20, s.10; 22, s.10]

4.3.2. Roiskealue

Roiskealueen suunnittelussa ja rakennuksessa sovelletaan pääsääntöisesti samoja periaatteita kuin elintarvikealueen suunnittelussa. Tekniset suunnittelu- ja rakennevaatimukset voivat kuitenkin olla vähemmän vaativia tietyillä alueilla, koska elintarvike ei palaudu elintarvikealueella. Vaikka vaatimukset ovat lievemmat tietyillä alueilla, elintarvikkeeseen ei saa olla haitallisia vaikutuksia lievennysten johdosta. [20, s.10]

Pintojen viimeistely ja materiaalia koskevat tekniset vaatimukset voivat olla roiskealueella elintarvikealuetta vaatimattomampia ja niille voidaan sallia suuremmat R_z - ja R_a -arvot. Lisäksi sisäkulmissa ja -nurkissa sallitaan elintarvikealueelle määriteltyä pienempi pyörityssäde, mutta kulmien ja nurkkien pitää kuitenkin olla puhdistettavissa ja tarvittaessa desinfioitavissa. Roiskealueella olevat laakerit, tiivisteet, liikkuvat akselit jne. voidaan voidella muillakin kuin elintarvikekäyttöön soveltuvilla voiteluaineilla edellyttäen, ettei tällä ole haitallista vaikutusta elintarvikkeeseen. [20, s.12]

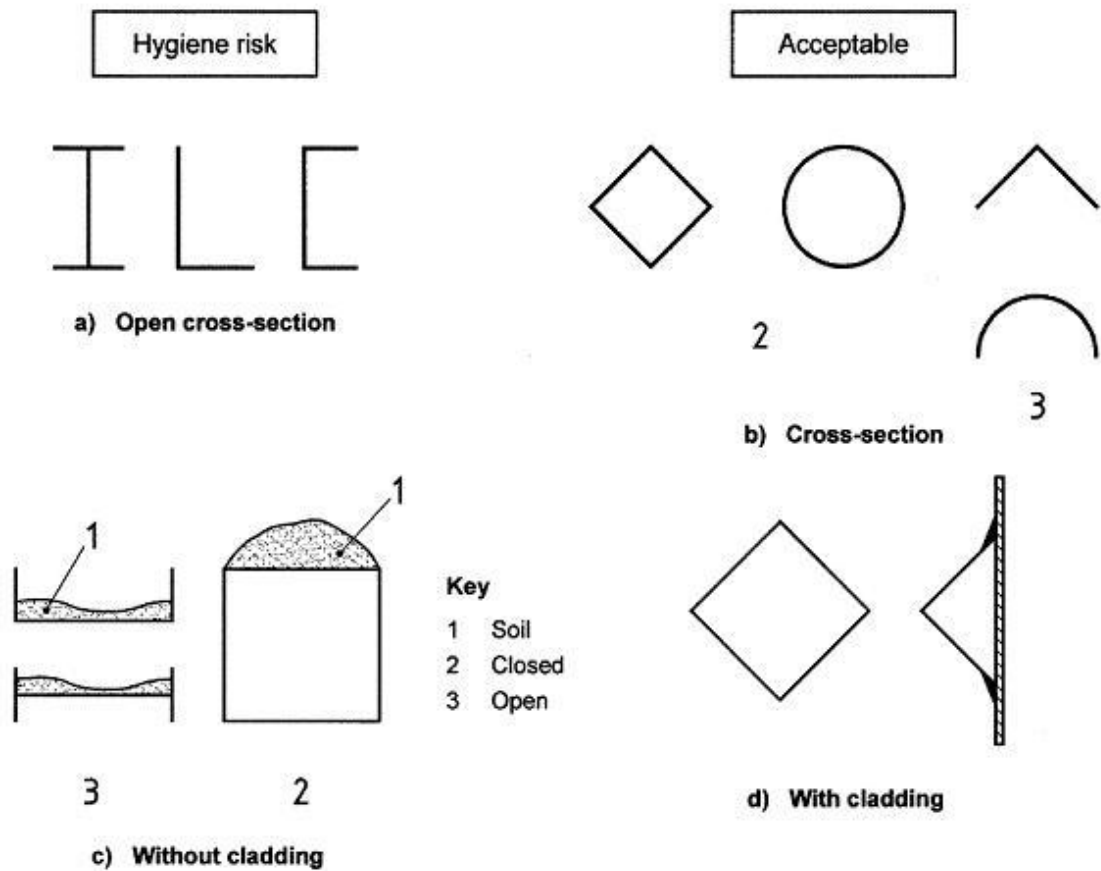
4.3.3. Elintarvikkeeseen koskematon alue

Myös elintarvikkeeseen koskemattoman alueen pintojen pitää olla yleisesti käyttöön soveltuvia. Paljaana olevien pintojen on oltava korroosionkestävää materiaalia tai käsitelty esimerkiksi pinnoittamalla metallilla tai maalilla niin, ettei korroosiosta ole

vaaraa. Pintojen on oltava puhdistettavissa ja tarvittaessa desinfioitavissa eivätkä pinnoilla saa olla haitallisia vaikutuksia elintarvikkeeseen. [20, s.12; 22, s.10]

Kosteuden kertymisen, tuholaisen sisäänkäsyn ja oleskelun ja epäpuhtauksien kertymisen estäminen pitää ottaa huomioon laitteita suunniteltaessa ja rakennettaessa. Lisäksi pitää huomioida, että tarkastaminen, huolto, kunnossapito, puhdistus ja tarvittaessa desinfiointi on mahdollista. [20, s.12,10]

Rakenteiden ja tukien runkojen pitää olla suunniteltu siten, ettei niihin pääse kerääntymään vettä tai likaa. Ne on myös oltava helposti puhdistettavissa ja tarkastettavissa. Kuvassa 4.3 on esitetty hygieenisesti huonoja ja hyviä rungon rakennemalleja. [22, s.10]



Kuva 4.3. Hygieenisesti huonoja ja hyväksyttäviä runkorakenteita [22, s.26] (muokattu).

5. JÄRJESTELMIEN SUUNNITTELU JA SUUNNITTELUN VAIHEET

Tässä luvussa käsitellään pneumaattisten kuljetinjärjestelmien suunnittelua. Luvussa perehdytään David Millsin teoksessa [9] esiteltyihin suunnitteluprosessikaavioihin ja kokonaisen kuljetinjärjestelmän suunnittelun vaiheisiin ja niissä tehtäviin valintoihin. Tässä luvussa käsiteltävät suunnittelumenetelmät ovat ainoastaan yksi näkemys järjestelmän suunnittelusta ja erilaisia menetelmiä on olemassa useita. Koska materiaalin ominaisuudet ovat ratkaisevassa asemassa pneumaattisia kuljetinjärjestelmiä suunniteltaessa, on materiaalin ominaisuuksia käsitelty erikseen omassa aliluvussaan.

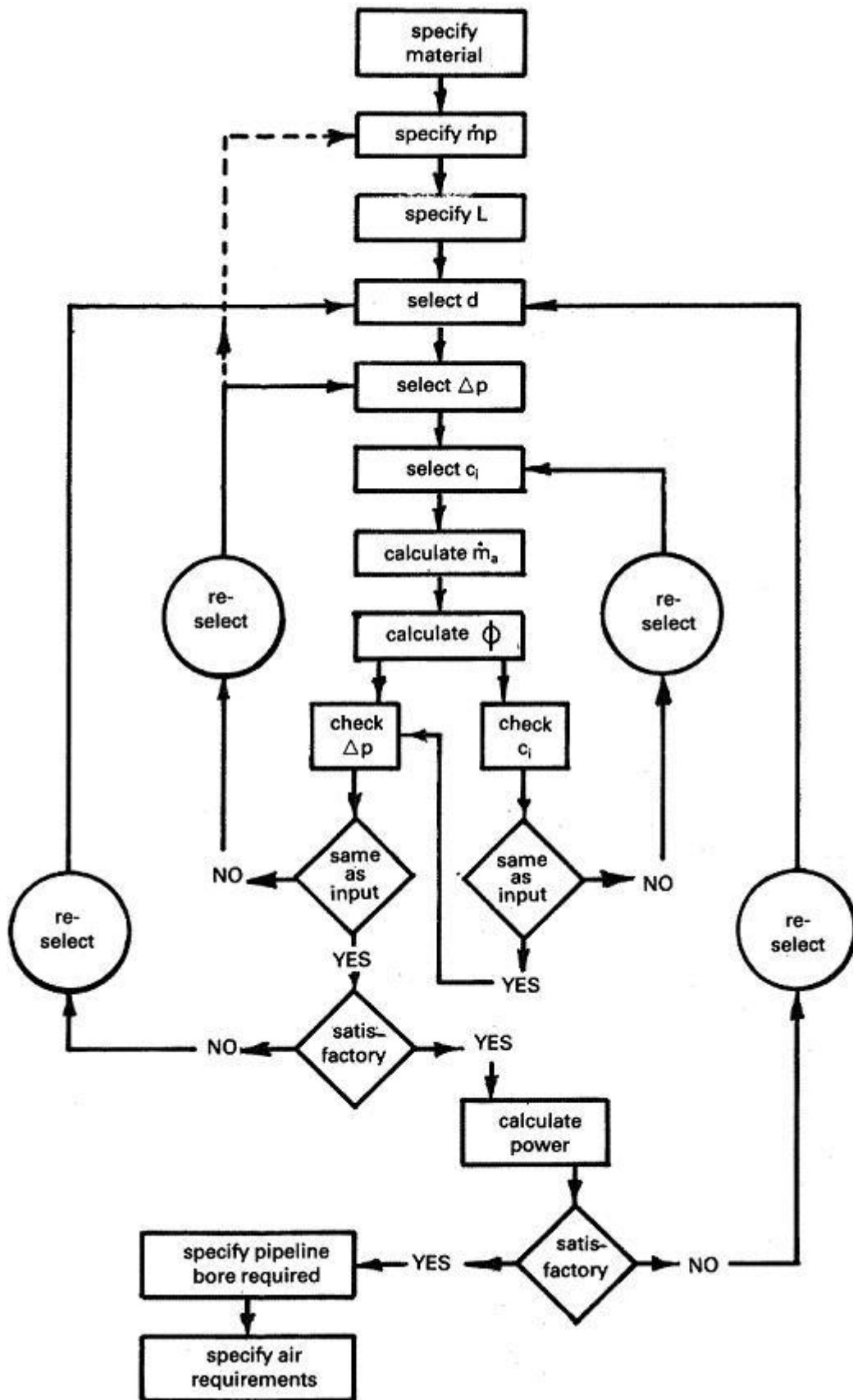
5.1. Suunnitteluprosessikaaviot

Pneumaattinen kuljetinjärjestelmä voidaan suunnitella käyttämällä matemaattisia malleja, saatavilla olevia mittaustuloksia tai molempien yhdistelmää. Matemaattisia malleja käytettäessä pitää varmistaa niiden sopivuudesta kyseiseen tilanteeseen ja olosuhteisiin. Tapauksissa, joissa matemaattiset yhtälöt eivät ole luotettavia, käytetään apuna materiaalitesteistä saatuja mittaustuloksia.[9, s.82]

5.1.1. Matemaattisiin yhtälöihin perustuva suunnitteluprosessi

Matemaattisten yhtälöiden käyttö on suunnittelutavoista yleensä mieluisampana pidetty. On olemassa kuitenkin vain rajallinen määrä luotettavia yhtälöitä, jotka ovat käyttökelpoisia suhteellisen useissa eri kuljetusolosuhteissa. Yhtälöitä käytetään yleensä tapauksissa, joissa kuljetettavan materiaalin ominaisuudet tunnetaan entuudestaan ja materiaalin kuljettamisesta on aikaisempia kokemuksia. [9, s.83]

Kuvassa 5.1 on esitetty pneumaattisen kuljetinjärjestelmän matemaattisiin yhtälöihin perustuvan suunnitteluprosessin logiikkakaavio.



Kuva 5.1. Matemaattisiin malleihin perustuvan suunnittelun logiikkakaavio [9, s.343] (muokattu).

Kuvan 5.1 mukaan ensimmäisenä tehtävänä suunnitteluprosessissa on kuljetettavan materiaalin tai materiaalien ominaisuuksien selvittäminen. Materiaalien ominaisuuksia käsitellään tarkemmin luvussa 5.3. Materiaaliominaisuuksien selvittäminen on tärkeää, koska ne vaikuttavat ratkaisevasti koko järjestelmän suunnitteluun. Materiaalista tulisi selvittää muutamia tai kaikki seuraavista ominaisuuksista:

Materiaalin nimi

Materiaalin (massa-aines) ominaisuudet

tiheys

partikkelien kokojakauma

kosteus

permeabiliteetti

leijumiskyky

Materiaalipartikkelin ominaisuudet

tiheys

muoto

kovuus

hauraus [9, s.83-84]

Materiaaliominaisuuksien selvittämisen jälkeen selvitetään vaadittu materiaalin massavirta ja kokonaiskuljetusetäisyys. Seuraavaksi valitaan kaavion mukaan putken sisähalkaisija ja putkiston painehäviö sekä ilman virtausnopeus kuljetuslinjaston alkupäässä materiaalin syöttökohdassa. Valinnat ovat useimmiten alkuvaiheessa vain arvioita ja suuntaa-antavia. Rajoituksen esimerkiksi putkiston painehäviössä ali- tai matalapainejärjestelmää suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon. Virtausnopeutta valittaessa ei ole suositeltavaa valita pienintä mahdollista hyväksyttävissä olevaa nopeutta vaan jättää noin 20 prosentin varmuusvara. [9, s.85-86]

Edellisten valintojen jälkeen lasketaan kaavion mukaan ilman massavirta. Luvussa 2.4.3 saatiin yhtälö ilman virtausnopeuden laskemiseksi putkivirtauksessa yhtälöistä (2.35) ja (2.36). Vastaavasti samoista yhtälöistä voidaan johtaa yhtälö ilman massavirralle, jolloin saadaan

$$\dot{m}_a = \frac{pv_g \pi d^2}{4RT} \quad (5.1)$$

jossa \dot{m}_a = ilman massavirta [kg/s]

p = kuljetuslinjan paine materiaalin syöttökohdassa (abs) [kPa]

v_g = ilman virtausnopeus kuljetuslinjassa [m/s]

d = valittu putken sisähalkaisija [m]

R = kaasuvakio (ilmalle 0,287) [kJ/kgK]

ja T = lämpötila [K] [9, s.86-87]

Massavirran laskemisen jälkeen lasketaan kaavion mukaan materiaali-ilmaseoksen seossuhde (phase density) (katso luku 2.5.2 yhtälö (2.45)).

Kuvasta 5.1 nähdään, että sopivien parametrien löytäminen vaatii todennäköisesti usean iterointikierron. Riippuen seossuhteesta täytyy ilman virtausnopeuden olla sopivalla alueella (katso kuva 5.5). Vastaavasti tarkastetaan, että putkiston painehäviön arvo vastaa aikaisemmin valittua arvoa. Painehäviön tarkastamiseen voidaan käyttää yksinkertaista yhtälöä, jota käytetään yleisesti seosvirtaus tapauksissa (dilute phase, suspension flow) järjestelmän suunnittelussa:

$$\Delta p = (1 + \varphi)\Delta p_a \quad (5.2)$$

jossa Δp = putkiston painehäviö [bar]

φ = seossuhde

ja Δp_a = putkiston painehäviö pelkällä ilmavirtauksella [bar] [9, s.87,92-93]

Yhtälö (5.2) on hyvin yksinkertaistettu eikä siinä huomioida materiaalityyppejä, joten sen tarkkuus ei ole kovinkaan hyvä. Se tarjoaa kuitenkin helpon tavan kuljetuslinjan painehäviön tarkastamiseen. Painehäviötä putkivirtauksessa on käsitelty luvussa 2.4.2. Jos yhtälöä (5.2) käytetään järjestelmissä, joissa putken enintään 100 mm, täytyy yhtälöön lisätä kerroin K:

$$\Delta p = K(1 + \phi)\Delta p \quad (5.3)$$

jossa $K = 25d^{1,5}$

ja d = putken sisähalkaisija [m] [9, s.93]

Jos painehäviön arvoilla on pieni ero, riittää pelkästään uuden painehäviön arvon valitseminen. Jos ero on ja pysyy suurena, täytyy mahdollisesti määrittellä materiaalin massavirta uudestaan tai harkita toisenlaista kuljetusjärjestelmää. Vaikka painehäviön valittu ja tarkistettu arvo vastaisivatkin toisiaan, pitää painehäviön olla lisäksi hyväksyttävissä olevalla alueella. Jos painehäviö ei ole hyväksyttävä, pitää putkiston sisähalkaisijaa muuttaa. Yleensä painehäviö on liian suuri, jolloin putkiston sisähalkaisijaa tulee kasvattaa. [9, s.87-88]

Kun kaikki parametrit on saatu kohdalleen, lasketaan kuvan 5.1 kaavion mukaan järjestelmän tehontarve (katso luku 3.2.7 yhtälö (3.1)). Yhtälön (3.1) avulla laskettu tehontarve on suuntaa-antava ja laskettuun arvoon on kannattavaa lisätä pieni varmuusvara. [9, s.89]

Järjestelmän tarvitseman tehon laskemisen jälkeen suoritetaan kaavion mukaan järjestelmän uudelleenarviointi. Uudelleenarvioinnissa varmistetaan, että valittujen parametrien yhdistelmä on paras mahdollinen. Mitä useampi iterointikierron suoritetaan, sitä tarkemmin saadaan valittua juuri oikeat parametrit. [9, s.89]

Suunnitteluprosessin viimeiset vaatimukset ovat kaavion mukaan uudelleenarvioinnin tuloksena saadun tarvittavan putkihalkaisijan ja ilman tilavuusvirtavaatimuksen täsmentäminen. Jos samalla järjestelmällä on tarkoituksena kuljettaa useampaa eri materiaalia, on mahdollisesti tehtävä kompromisseja sekä tarvittavan putkihalkaisijan että ilmavaatimusten suhteen, mutta järjestelmän on kuitenkin täytettävä kaikkien materiaalien vaatimukset. Ilmavaatimusten määrityksen jälkeen voidaan valita järjestelmään sopiva paineenkehitin ja muut laitteet. Tilavuusvirta voidaan laskea yhtälöstä (2.35) normaali-ilman olosuhteisiin johdetun yhtälön avulla:

$$\dot{V} = 0,816\dot{m}_a \quad (5.4)$$

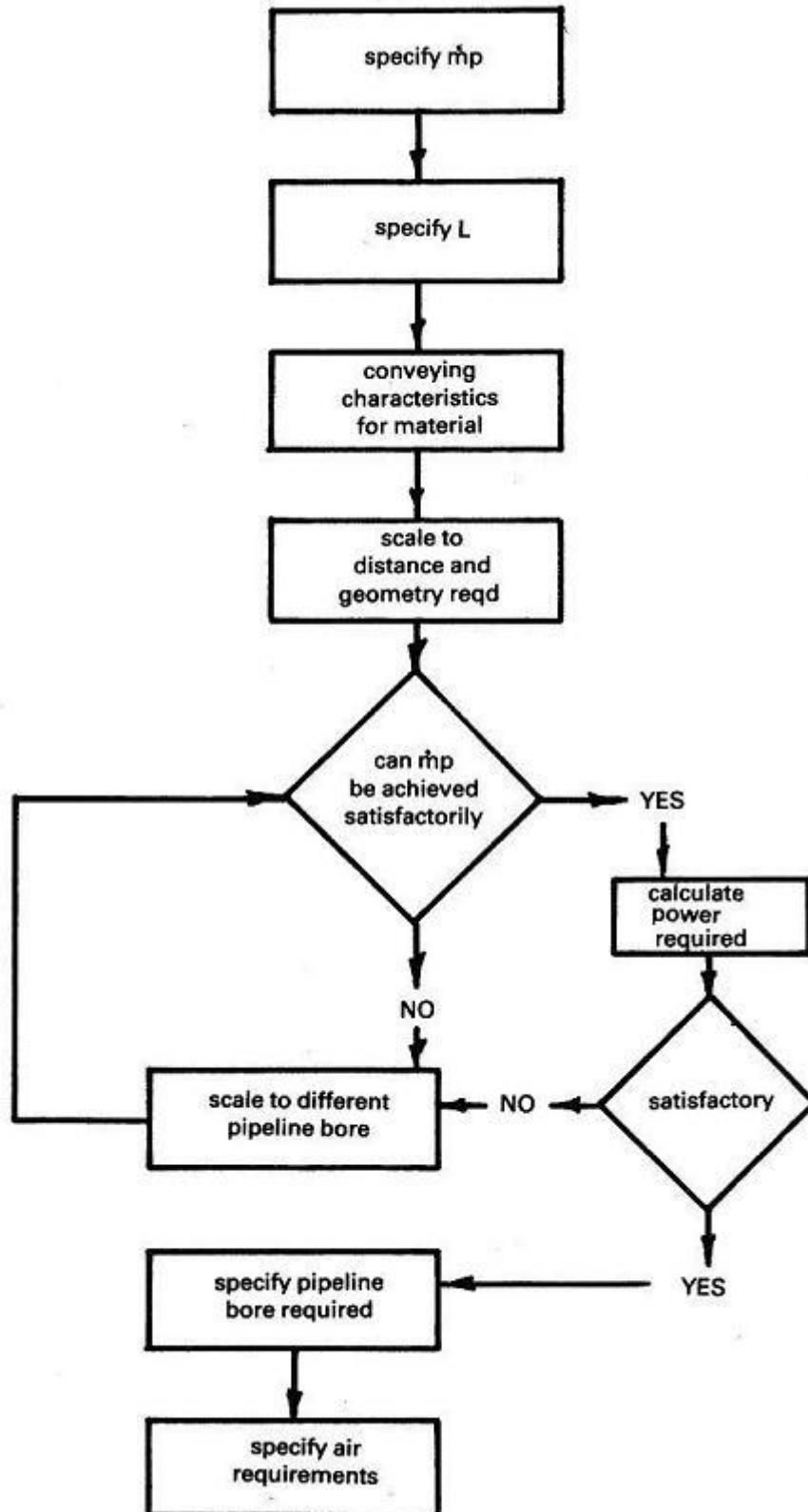
jossa \dot{V} = ilman tilavuusvirta [m^3/s]

ja \dot{m}_a = ilman massavirta [kg/s] [9, s.89-90]

5.1.2. Mittaustuloksiin perustuva suunnitteluprosessi

Jos ei ole olemassa aikaisempaa kokemusta tietyn materiaalin kuljettamisesta, matemaattiset yhtälöt ovat epäluotettavia. Normaali käytäntö on tällöin hankkia mittaustuloksia järjestelmäsuunnittelua varten materiaalitestien avulla. [9, s.93]

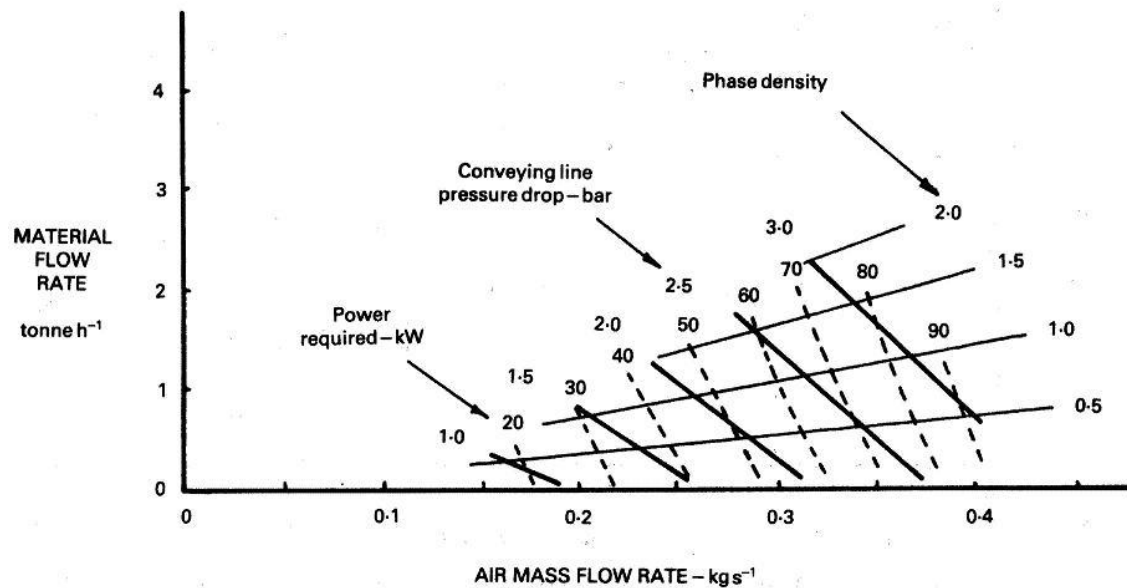
Kuvassa 5.2 on esitetty pneumaattisen kuljetinjärjestelmän mittaustuloksiin perustuvan suunnitteluprosessin logiikkakaavio.



Kuva 5.2. Mittaustuloksiin perustuvan suunnittelun logiikkakaavio [9, s.345] (muokattu).

Mittaustuloksiin perustuvan kaavion mukaan ensimmäisenä selvitetään järjestelmässä vaadittu materiaalin massavirta ja kuljetusetäisyys. Kun edellä mainitut vaatimukset ovat selvillä, luodaan materiaalille kuljetuskokeiden tulosten perusteella

kuljetusominaiskäyrät. Ominaiskäyrästöistä nähdään eri materiaaleille sopivat kuljetusnopeudet ja massavirrat tietyissä olosuhteissa sekä paineenlaskukäyrät. Kuvassa 5.2 on esitetty esimerkkinä huonon leijumisominaisuuden omaavan materiaalin ominaiskäyrä, kun materiaali kuljetetaan 500 m pitkän ja sisähalkaisijaltaan 75 mm putken läpi. Kuvan 5.3 ominaiskäyrästä nähdään eri parametrien yhteys toisiinsa. Lisäksi eri materiaalien ominaiskäyriä vertaamalla voidaan tutkia parametrien, kuten kuljetusilman minimi nopeuden, materiaalivirran ja putken painehäviökäyrien kulmakertoimien, eroja materiaalista riippuen. [9, s.94]



Kuva 5.3. Leijumisominaisuudeltaan huonon materiaalin kuljetusominaiskäyrä 500m pitkässä, sisähalkaisijaltaan 75mm putkessa [9, s.397].

Kun materiaali on testattu ja sen ominaisuudet selvillä, skaalataan kaavion mukaan koeolosuhteissa saadut ominaiskäyrät todellisen järjestelmän olosuhteisiin. Käytännössä skaalataan putkisto testilaitteiston koosta todelliseen kokoon. Skaalaus on paras suorittaa kahdessa vaiheessa. Ensiksi skaalataan todellisen järjestelmän pituuteen putkimutkat ja pystysuorat osuudet mukaan lukien. Toisessa vaiheessa skaalataan putkiston todelliseen sisähalkaisijaan. Skaalaus on mittaustuloksiin perustuvan prosessin kriittisin osuus. Skaalauksen tarkkuus on yleisesti sitä parempi mitä lähempänä testilaitteiston mitat ovat todellista järjestelmää. Skaalausprosessi, erityisesti skaalaus pituuteen nähden, on suhteellisen monimutkainen prosessi eikä sitä tässä diplomityössä käsitellä yksityiskohtaisesti. [9, s.94]

Skaalauksen jälkeen kaavion mukaan tarkistetaan voidaanko todellisella järjestelmällä saavuttaa vaadittu materiaalin massavirta. Putkiston pituus on yleensä muuttumaton, mutta massavirtavaatimus voi täytyä useammalla eri putken sisähalkaisijan arvolla, jos kuljetusominaisuuskäyrät on määritelty laajalle kuljetuslinjan painehäviöalueelle. Jos massavirtavaatimus ei toteudu, täytyy skaalata toiseen putkihalkaisijaan, kunnes vaatimukset täyttävä halkaisija löytyy. [9, s.94-95]

Tarvittavan tehon likimääräiseen laskemiseen voidaan käyttää luvussa 5.5.1 käytettyä yhtälöä (3.1). Yhtälössä tarvittava ilman massavirran arvo saadaan materiaalin ominaiskäyrästä. Arvoon on järkevää lisätä noin 20 prosentin varmuusvara. Kaavion mukaan parhaat mahdolliset parametrit voidaan selvittää iteroimisprosessin avulla, eri putken sisähalkaisijan arvoilla kokeilemalla ja laskemalla.

Mittaustuloksiin perustuvan suunnitteluprosessin viimeisinä vaiheina ovat sopivan putkihalkaisijan ja ilmavaatimuksen täsmentäminen. Tilavuusvirta voidaan laskea vastaavasti kuin luvussa 5.1.1 yhtälön (5.4) avulla.

5.2. Järjestelmän kokonaissuunnittelu

Putkisto on kokonaisuudessaan yksi tärkeimmistä pneumaattisen kuljetinjärjestelmän osista ja usein melko haastava suunnitella, joten se tulee suunnitella huolellisesti. Normaalisti kuljetusetäisyys ja haluttu materiaalivirta ovat järjestelmävaatimuksia, joiden täytyy toteutua. Putkistossa on usein kuitenkin usein putkimutkia, pystysuoria osuuksia ja erilaisia laitteita, jotka tulee huomioida suunnittelussa. Luvuissa 5.1.1 ja 5.1.2 esitetyt kaaviot (kuvat 5.1 ja 5.2) käsittelevät pneumaattisen kuljetinjärjestelmän suunnitteluprosessin etenemistä, kun putkiston layout on selvillä. Suunnitteluprosessin tuloksena saadaan sopiva putkihalkaisija ja ilman tilavuusvirtavaatimus, joiden perusteella voidaan valita järjestelmään laitteistoa. [9, s.152,172]

Koska putkisto on tärkeä osa kokonaisjärjestelmää, on tärkeää, että putkisto integroituu hyvin myös muuhun järjestelmään. Pneumaattisen kuljetinjärjestelmän suunnittelussa tulee huomioida myös erilaiset järjestelmään kuuluvien laitteiden mitoittaminen, valinta ja yhteensopivuus. [9, s.172]

Yleisenä ongelmana järjestelmän suunnittelussa on erilaisten järjestelmätyyppivaihtojen suuri määrä, kuten kuvasta 3.4 nähdään. Kuljetettavan materiaalin ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus useimpiin valintoihin, joita suunnittelun eri vaiheissa tehdään. Materiaalin lisäksi rajoituksia valintojen määrään tuovat aikaisemmat kokemukset ja kustannusrajoitukset sekä yksinkertaisen järjestelmän tavoittelemisen. [9, s.172-173]

5.2.1. Suunnittelun eteneminen ja laitteiston valinta

Kokonaisen pneumaattisen kuljetinjärjestelmän suunnittelu voidaan jakaa kuuteen vaiheeseen:

- Järjestelmätyypin valinta
- Putkiston suunnittelu
- Toimintatavan valinta
- Syöttimen valinta
- Paineenkehittimen valinta
- Erottimen valinta

Järjestys ei ole määrätty, vaan suositeltu järjestys, kun komponenttien valinnoilla ei ole rajoituksia. Jos on ennustettavissa, että järjestelmässä tarvitaan esimerkiksi sulkusyötintä, puhallussäiliötä tai Rootin pumppua, mahdollisten järjestelmien määrä on rajoitettu ja vaiheiden järjestys erilainen. [9, s.173]

Järjestelmätyypin valinnassa tehdään valinta avoimen ja suljetun järjestelmän väliltä (katso luku 3.2.2). Lisäksi valitaan käytetäänkö yli- vai alipainejärjestelmää tai näiden yhdistelmää (katso luvut 3.2.3, 3.2.4, 3.2.5 ja 3.2.6). [9, s.173-175]

Kuten mainittu, putkiston suunnittelu on monimutkainen ja kenties tärkein vaihe järjestelmän suunnittelussa. Putkiston suunnittelua on käsitelty luvuissa 5.1.1 ja 5.1.2 sekä tämän luvun alussa. Lisäksi kaas- ja materiaalivirtausta on käsitelty luvuissa 2.4 ja 2.5. [9, s.175-176]

Toimintatavan valinnassa valitaan joko jatkuvatoiminen tai ei-jatkuvatoiminen annoksittain kuljettava kuljetintyyppi. Materiaalivirtauksen suhteen toimintatavalla ei ole oleellista merkitystä millään seossuhteen arvolla. Suurin osa annoksittain kuljettavista järjestelmistä perustuu puhallussäiliöön ja puhallussäiliö on usein valittu järjestelmään sen kuljetusominaisuuksien vuoksi korkeapainejärjestelmissä tai kuljetettavan materiaalin ominaisuuksien takia. Annoksittain kuljettavien kuljettimien yhteydessä pitää huomioida, että jatkuvatoimisiin kuljettimiin nähden annoksittain kuljettavan kuljettimen materiaalin massavirran täytyy olla hetkellisesti selvästi suurempi, jotta pidemmällä aikavälillä saavutettaisiin yhtä suuret materiaalivirtaukset. Putkistoa suunniteltaessa pitää siis huomioida, että käytetään materiaalivirran suurinta arvoa. [9, s.176]

Syöttimen valinnassa pyritään valitsemaan järjestelmään sopivin syötintyyppi. Valinnassa kiinnitetään huomiota paineluokkaan, tiiviyteen, painehäviöön, virtauksen säätöön ja yhteensopivuuteen kuljettavan materiaalin kanssa. Syöttimiä on käsitelty luvussa 3.2.1. [9, s.177]

Paineenkehittimen valinta on ratkaisevan tärkeä vaihe järjestelmäsuunnittelussa. Se on oleellisesti suurin yksittäinen pääomameno ja koko järjestelmän suunnittelun mukainen toiminta on kiinni sopivan paineenkehittimen valinnasta. Paineenkehittimen valinta voidaan suorittaa, kun ilmavaatimukset on selvitetty putkiston suunnitteluvaiheessa, kuten myös kaikki, esimerkiksi järjestelmäkomponenteista aiheutuvat, mahdolliset ilmahäviöt ja järjestelmässä syntyvät ylimääräiset painehäviöt. Paineenkehittäjiä ja niiden sopivuutta erilaisiin järjestelmiin on käsitelty luvuissa 2.2.1, 2.2.5, 2.3.2, 2.3.3 ja 3.2.1 sekä energiankulutusta luvussa 3.2.7. Paineenkehittäjä valittaessa sopivista vaihtoehdoista tärkeitä asioita ovat luotettavuus, hinta, tehontarve ja järjestelmään sopivan mallin saatavuus. Lisäksi pitää huomioida eri paineenkehittäjillä saavutettavissa oleva säätöaste [9, s.104,180-181]

Erotin valitaan järjestelmään vasta loppuvaiheessa. Erottimia ja niiden valintaa on käsitelty luvussa 3.2.1. [9, s.183]

5.3. Materiaalien ominaisuuksista

5.3.1. Yleistä

Kuljetettavan materiaalin ominaisuudet vaikuttavat ratkaisevasti pneumaattisen kuljettimen suunnitteluun. Järjestelmän suunnittelussa onkin tärkeää selvittää kuljetettavan materiaalin ominaisuudet ennen muun järjestelmän suunnittelua. Joistakin materiaaleista on olemassa valmiita ominaisuustaulukoita aikaisempien testien pohjalta, mutta kuljettavaksi suunnitellun materiaalien ominaisuuksien tarkka selvittäminen vaatii materiaalin testaamista. [9, s.140-141]

Pneumaattisilla kuljettimilla voidaan kuljettaa suuri määrä erilaisia materiaaleja. Lähes kaikki jauhemaiset ja rakeiset irtomateriaalit soveltuvat kuljetettavaksi pneumaattisesti. Pneumaattisesti on kuljetettu myös esimerkiksi halkaisijaltaan 70mm kiviä ja eläviä kanoja, tässä diplomityössä keskitytään kuitenkin edellä mainittujen irtomateriaalien kuljettamiseen. [7, s.2]

Pneumaattisesti kuljetettavaksi soveltuvat parhaiten materiaalit, jotka ovat vapaasti virtaavia eivätkä aiheuta putkiston kulumista. Kuitenkin kehittyneissä kuljettimissa, joissa virtausnopeus pysyy alhaisena, voidaan kuljettaa myös tahmeita, hiovia ja hauraita materiaaleja. [7, s.6]

5.3.2. Materiaalipartikkelien ominaisuuksista (particle properties)

Partikkelikoko (particle size) on ominaisuus, joka voi liittyä sekä yksittäisen materiaalipartikkelin kokoon että materiaalipartikkeleista koostuvan irtomateriaalin kokoon. Pallomaisen partikkelin koko ilmaistaan partikkelin läpimittana, joka on merkitsevä parametri. Partikkelin läpimitan ilmoittaminen ei ole kuitenkaan selkeästi määritelty, vaan läpimitta voidaan määrittää useammalla eri tavalla. Kolmiulotteiseen vastaavuuteen perustuvassa määrittelyssä partikkelikoko voidaan määrittää pallopinta-alan ja partikkelin pinta-alan vastaavuuden tai pallon tilavuuden ja partikkelin tilavuuden vastaavuuden avulla. Kaksiulotteiseen vastaavuuteen perustuvassa määrittelyssä partikkelikoko voidaan määrittää partikkelin sisälle mahtuvan suurimman mahdollisen ympyrän tai pienimmän ulkopuolelle mahtuvan ympyrän mukaan sekä partikkelin ympäröimän omaavan ympyrän avulla. Partikkelikoon määrittelyyn voidaan käyttää myös tiettyjä tilastollisia määrittelytapoja. [9, s.286]

Joissakin tapauksissa materiaalin määrittämiseksi riittää, että partikkelikoko määritellään yhden lineaarisen dimension avulla. Joissakin tapauksissa tarvitaan kuitenkin tarkempaa tietoa materiaalin partikkelikokojakaumasta. [9, s.286]

Partikkelin muoto (particle shape) on yksi materiaalipartikkelin ominaisuuksista. Muotoa voidaan kuvailla erilaisilla havainnollisilla termeillä, jotka pyrkivät kuvailemaan partikkelin ulkomuotoa, joka voidaan havaita paljaalla silmällä tai mikroskoopilla. A British Standard, BS2955, määrittelee terminologian, jota käytetään halkaisijaltaan alle 1000 μ m partikkelien muodon kuvailemiseksi. Standardin määrittelemä terminologia on esitetty kuvassa 5.4.[9, s.289]

<i>Term</i>	<i>Definition</i>
Acicular	Needle-shaped
Angular	Sharp-edged or having roughly polyhedral shape
Crystalline	Of geometric shape, freely developed in a fluid medium
Dendritic	Having a branched crystalline shape
Fibrous	Regularly or irregular thread-like
Flaky	Plate-like
Granular	Having an approximately equidimensional but irregular shape
Irregular	Lacking any symmetry
Nodular	Having a rounded irregular shape
Spherical	Globule shaped

Kuva 5.4. Standardin BS2955 määrittelemiä termejä partikkelin erilaisille muodoille [9, s.289].

Muotoa kuvailevien termien käytössä on ongelmana, etteivät termit ole yksiselitteisiä vaan ne ovat riippuvaisia arvioijan omakohtaisesta näkemyksestä. Ongelman poistamiseksi on kehitetty useita muotokertoimia, jotka ovat riippumattomia henkilökohtaisista näkemyksistä. Yksi merkittävä muotokerroin on pallomaisuus, joka määritellään suhdelukuna: partikkelin kanssa tilavuudeltaan yhtä suuren pallon pinta-ala jaettuna partikkelin pinta-alalla. Partikkelin tilavuuden ja pinta-alan määrittäminen on vaikeaa, mikä tekee pallomaisuuden määrittämisestä haastavaa. [9, s.189-290]

Partikkelin yleinen muoto ja rakenne ovat tärkeitä ominaisuuksia suunniteltaessa pneumaattista kuljetinta. Jos rakenne vaikuttaa hauraalta, voi materiaali pilkkoutua kuljetuksen aikana. Säikeiset materiaalit voivat sen sijaan kiinnittyä toisiinsa ja aiheuttaa siten ongelmia materiaalin kulkeutumisessa. Kidemäisen materiaalin terävät kulmat saattavat aiheuttaa muun muassa eroosiota ja kulumista järjestelmän komponenteissa. [9, s.290]

Materiaalin hauraus (friability) on tärkeä huomioonotettava ominaisuus järjestelmää suunniteltaessa. Hauras materiaali on herkkä särkymään useampiin osiin ja siitä aiheutuva materiaalipartikkelien koko- ja muotomuutokset aiheuttavat ongelmia järjestelmän toiminnassa, erityisesti jollei materiaalin haurautta ole huomioitu suunnittelussa. [9, s.213]

Materiaalin kovuus (hardness) on myös tärkeä suunnittelussa huomioitava materiaaliominaisuus, koska sillä on vaikutus erityisesti järjestelmässä tapahtuvaan eroosioon. [9, s.217]

Materiaalin tiheydestä puhuttaessa tarkoitetaan joko materiaalipartikkelin tiheyttä (particle density) tai massa-aineksen tiheyttä (bulk density). Partikkelin tiheydellä tarkoitetaan yksittäisen materiaalipartikkelin tiheyttä ja se määritellään jakamalla partikkelin massa partikkelin tilavuudella. Massa-aineen tiheys on massa-aineen ominaisuus, eikä materiaalin koostumusta tarvitse huomioida. Massa-aineen tila on kuitenkin huomioitava, ilmastetun ja kokoon puristetun massa-aineen tiheydet poikkeavat toisistaan. Massa-aineen tiheys määritellään jakamalla materiaalin massa materiaalin tilavuudella. Käytännössä massa-aineen tiheys määritellään yleensä

täyttämällä tilavuudeltaan tunnettu astia materiaalilla ja punnitsemalla astia. [9, s.291-292]

5.3.3. Materiaalin virtausominaisuuksista (flow properties)

Materiaalia on karkeasti kategorisoituna kahta tyyppiä: vapaasti virtaavaa (free flowing) ja hyvin tahmeaa ja huonosti virtaavaa (very cohesive). Näiden kahden ääripään välillä on lukuisia virtaavuudeltaan erilaisia materiaaleja. Materiaalin virtaavuus ei kuitenkaan ole yksiselitteisesti vakio vaan materiaalista riippuen virtaavuus voi eri virtausolosuhteissa vaihdella merkittävästi. Järjestelmän suunnittelussa on hyvin tärkeää olla tietoinen mahdollisimman tarkkaan heti alkuvaiheessa, minkälaiset ovat materiaalin virtausominaisuudet eri virtausolosuhteissa. [9, s.294]

Valuvuus (flowability) on yksi tärkeimmistä materiaalin ominaisuuksista, kun selvitetään materiaalin kuljetusmahdollisuuksia järjestelmässä. Ensisijaisesti valuvuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat partikkelien koko ja muoto, sähköstaattiset varaukset sekä kosteus (moisture). Mikään tekijä yksinään ei normaalisti ole syynä materiaalin huonoihin virtausominaisuuksiin vaan päinvastoin virtausominaisuudet riippuvat yleensä edellä mainittujen tekijöiden yhdistelmästä. [3, s.52; 9, s.296]

Valuvuutta voidaan tarkastella asettumiskulman avulla (angle of repose). Asettumiskulma on luonnollinen kulma, joka muodostuu vaakasuoran alustan ja materiaalikeon välille kaadettaessa materiaalia alustalle tasaisesti pieneltä korkeudelta. Mitä pienempi asettumiskulma, sitä parempi valuvuus materiaalilla on. Asettumiskulman mittaamiseen ei ole olemassa standardoitua käytäntöä, mutta asettumiskulman testaus on suoritettava samoissa olosuhteissa kuin materiaalia tullaan käytännössä kuljettamaan. Joillakin materiaaleilla materiaalin muodostaman kasan kulma ei ole vakio, minkä takia vaaditaan asiantuntemusta, jotta voidaan päättää tilanteeseen parhaiten soveltuva asettumiskulma. [3, s.52; 9, s.296; 14, s.31]

5.3.4. Materiaalin ilmastusominaisuuksista (aeration properties)

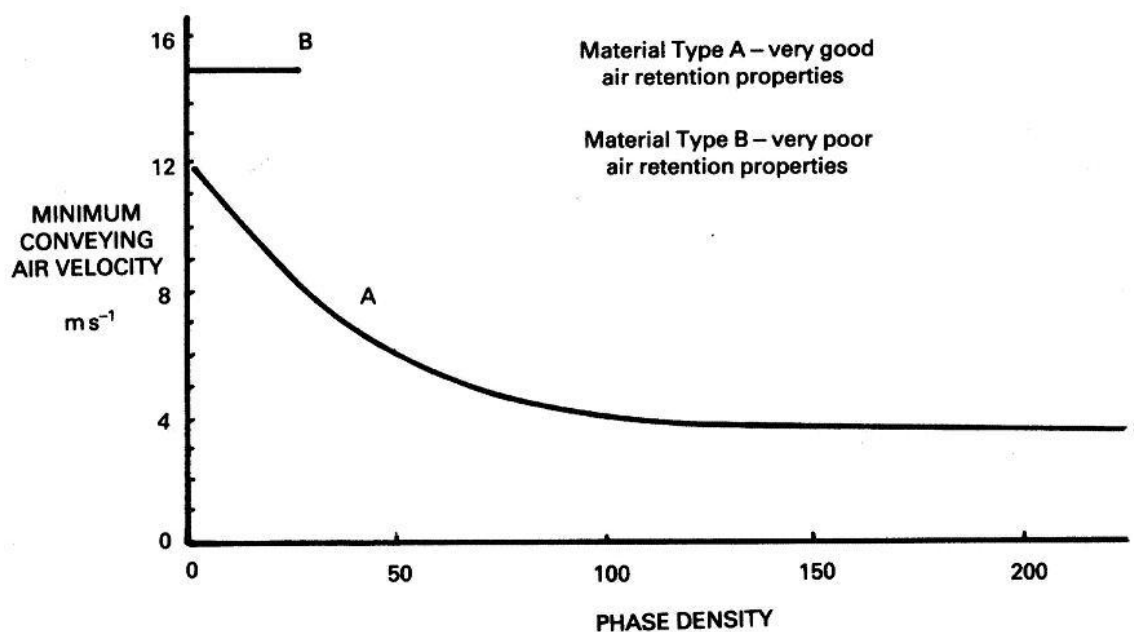
Ilmastuksella (aeration) kuvataan tilaa, joka saavutetaan, kun materiaalia jollakin tavalla sekoittamalla massa-aineen partikkelit erotetaan toisistaan ilmakalvolla. Käytännössä ilmastus on mahdollista lähinnä jauheille ja hienoille raemaisille materiaaleille, mutta myös kookkaampia partikkeleita sisältäviä materiaaleja voidaan ilmastaa, jos materiaalin tiheys on riittävän pieni. Yksinkertaisella testillä voidaan saada viitteitä materiaalin ilmastuspotentiaalista. Testissä materiaalia pistetään läpinäkyvään astiaan ja astiaa käännettäessä muutamia kerran ympäri. Jos materiaalin tilavuus kasvaa, saattaa materiaalin ilmastus olla mahdollista. [9, s.297-298]

Fluidisaatio (fluidisation) on ilmastuksen erikoistapaus, jossa riittävällä ilmastuksella saadaan massa-ainekselle nesteen kaltaisia ominaisuuksia. Fluidisoitu materiaali muun muassa virtaa kuin neste vain muutaman asteen kulmassa olevalla tasolla. Tätä ominaisuutta hyödynnetään esimerkiksi leijupedeissä. Fluidisaatio saadaan yleisesti aikaiseksi puhaltamalla ilmaa materiaalin läpi. Ilman puhallusnopeus on

fluidisaation onnistumisen kannalta oltava riittävä. Pienintä mahdollista ilman virtausnopeutta kutsutaan minimi fluidisointivirtaukseksi. [9, s.298,300]

Permeabiliteetiksi (permeability) kutsutaan virtauksen ja painehäviön suhdetta. Permeabiliteetti voidaan siis ajatella olevan materiaalin ilman läpäisevyys. [PCD299]

Joillakin materiaaleilla on taipumus esimerkiksi ilmastuksen jälkeen pysyä ilmassa jonkin aikaa. Tällaisilla materiaaleilla on hyvä leijumisominaisuus (air retention). Materiaalit, joilla on huono leijumisominaisuus, putoavat nopeasti heti ilmastuksen loputtua. Leijumisominaisuus vaikuttaa huomattavasti materiaalin kuljetusominaisuuksiin. Hyvin leijuvaan materiaalin kuljetus on selvästi huonosti leijuvaa materiaalia helpompaa ja energiataloudellisempaa. Seossuhteen vaikutusta tarvittavan ilman minimivirtausnopeuteen on havainnollistettu kuvassa 5.5. [9, s.302]



Kuva 5.5. Seossuhteen vaikutus ilman minimivirtausnopeuteen materiaalityypeillä A ja B [9, s.381].

Kuvasta 5.5 nähdään, että materiaalin A, jonka leijumisominaisuus on hyvä, kuljettamiseksi tarvittava ilman virtausnopeus on huomattavasti pienempi kuin materiaalin B, jonka leijumisominaisuus on huono. Lisäksi kuvasta 5.5 nähdään, että materiaalin B kuljettaminen on mahdollista vain hyvin rajoitetulla seossuhteella (tavanomaisilla järjestelmillä).

Derek Geldart on osoittanut, että bulk-materiaalit voidaan ilmastusominaisuuksien perusteella luokitella neljään ryhmään (The Geldart Classification). Pelkästään tietämällä mihin ryhmään materiaali kuuluu, voidaan päätellä suhteellisen hyvin, miten se kulkeutuu tietyissä kuljetusolosuhteissa. [9, s.301]

Ryhmän A materiaaleilla on hyvä leijumisominaisuus, fluidisoinnissa tilavuuden kasvu on suuri ja fluidisoinnin päätyttyä tilavuus pienenee hyvin hitaasti. [9, s.301]

Ryhmän B materiaalit fluidisoituvat helposti, mutta fluidisoinnissa tilavuuden muutos jää pieneksi ja lähellä minimi fluidisointivirtausta tapahtuu helposti kuplimista.

Fluidisoinnin päätyttyä materiaali kasautuu nopeasti alkuperäiseen tilavuuteen. [9, s.301]

Ryhmään C kuuluvat tahmeat materiaalit, joita on hyvin vaikea fluidisoida materiaalipartikkelien välisten voimien takia. Voimat johtuvat joko hyvin pienestä partikkelikoosta, sähköstaattisista vaikutuksista tai suuresta kosteuspitoisuudesta. [9, s.301]

Ryhmään D kuuluu materiaalit, joiden partikkelikoko on suuri ja/tai joiden partikkelitiheys on. Fluidisoitaessa materiaalit käyttäytyvät yleensä vastaavasti kuin B ryhmään kuuluvat materiaalit, mutta fluidisointivirtauksen tulee yleensä olla melko suuri. [9, s.301]

6. YHTEENVETO

Tässä diplomityössä käsiteltiin elintarviketeollisuudessa käytettäviä automaattisia kuljettimia ja niiden toimintaa ja järjestelmän suunnittelua. Lisäksi käsiteltiin elintarviketeollisuuden erityisvaatimuksia. Työn alussa käsiteltiin yli- ja alipainetekniikkaa ja esiteltiin paineen kehittämisen teoriaa sekä erilaisia paineenkehittämiä, erityisesti kuljettimissa käytettäviä paineenkehitystyyppisiä. Lisäksi käsiteltiin pelkän ilman (kaasun) sekä materiaalin ja ilman seoksen virtausta putkessa.

Elintarviketeollisuudessa käytettäviä mekaanisia kuljetinjärjestelmiä esiteltiin työssä lyhyesti, pääpainon ollessa pneumaattisissa kuljetinjärjestelmissä. Diplomityössä pyrittiin vertailemaan pneumaattisten ja mekaanisten energiankulutuksia, joka osoittautui melko hankalaksi, koska energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä monet ovat kuljetintyyppikohtaisia. Yhteisiäkin energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä löytyi, joista merkittävin tekijä on ehdottomasti kuljetettava materiaali ja sen ominaisuudet. Koska kuljetettavalla materiaalilla on suuri vaikutus energiankulutukseen ja muun muassa ratkaiseva vaikutus pneumaattisten kuljettimien suunnitteluun, käsiteltiin materiaalin merkittävimmät materiaaliominaisuudet omassa luvussaan työn lopussa.

Hygieenisuus on elintarvikealalla tärkeä asia. Tässä diplomityössä käsiteltiin yleisiä ja toiminnallisia vaatimuksia sekä rakenteiden suunnittelua ja käytettäviä materiaaleja hygienian näkökulmasta. Oikeita ja vääriä ratkaisuja rakenteissa pyrittiin esittämään myös kuvien avulla. Työn lähteenä käytetyissä standardeissa runsaasti lisää tutustumisen arvoisia kuvia liittyen hygieenisten rakenteiden suunnitteluun.

Ympäristöystävällisyys ja kustannustehokkuus ovat ajankohtaisia asioita teollisuudessa. Tämän takia on pyritty kehittämään yhä vähemmän energiaa kuluttavia kuljetintyyppisiä ja paineenkehittämiä. Pneumaattisia kuljettimia ei ole perinteisesti pidetty kovinkaan energiataloudellisina, mutta energiankulutusta on pyritty vähentämään kehittämällä uudentyyppisiä kuljetintyyppisiä, jotka eivät tarvitse kuljettamiseen suurta ilmapirtausta. Alipainekuljettimissa kehittyneistä moniasteisista energiatehokkaista ejektoreista on tullut hyvin varteenotettava kilpailija alipainepumpuille.

Työssä selvitettiin pneumaattisen kuljetinjärjestelmän suunnitteluprosessin eteneminen ja järjestelmän suunnittelun vaiheita ja niissä tehtäviä valintoja. Työssä tuotiin esille, että yksi kuljetustehtävä voidaan suorittaa monilla erilaisilla ja eri komponenteista koostuvilla kuljetinjärjestelmätyypeillä. Työn lähteenä käytetyissä teoksissa käsitellään työssä esiteltyjen menetelmien lisäksi useita erilaisia menetelmiä alipainekuljetinjärjestelmien sekä seosvirtauksena ja erillisvirtauksena kuljettavien

ylipainejärjestelmien suunnittelussa käytettäväksi. Eri menetelmillä saavutetut tulokset saattavat poiketa toisistaan selvästi.

Työtä kirjoittaessa ja lähdeaineistoa tutkiessa hyvin nopeasti selvisi, ettei pneumaattisten kuljettimien suunnittelu ja järjestelmään sopivien kuljettimen komponenttien valitseminen ole kovinkaan yksioikoista. Parhaiden ja toimivimpien menetelmien ja järjestelmäkomponenttien valitseminen vaatii asiaan perehtyneen ja kokeneen asiantuntijan.

LÄHTEET

- [1] Curiel, G. J. & al. Hygienic equipment design criteria. EHEDG Doc. 8. 2. painos [PDF-tiedosto]. [viitattu 1.3.2010]. 2004, EHEDG. 16 s. Saatavilla PDF-tiedostona: http://www.ehedg.org/uploads/DOC_08_E_2004.pdf.
- [2] Fonselius, J. & al. Koneautomaatio pneumatiikka. 8. uudistettu painos. Helsinki 1997, Edita. 166 s. ISBN 951-37-2225-2.
- [3] Mäkinen, E. Tyhjiötekniikka. Tampere 2003, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentokalvot: 26231 Pneumatiikka luento 14/s-2003, ei-julkinen PDF-dokumentti. 52 s.
- [4] Karvinen, R. Termodynamiikan perusteet. Tampere 2004, Tampereen teknillinen yliopisto. Luentomoniste: 2501010 Termodynamiikan perusteet (2004). 76 s. + liitt. 6s.
- [5] Airila, M. & al. Hydor: Kompressorikirja. Vantaa 1983, Korpivaara Hydor. 203 s. ISBN 951-99433-8-2.
- [6] Airila, M. Paineilman kehittäminen teollisuudessa, Osa 1: Paineilman kehittämisen teoria. Konepajamies n:o 6 (29. vuosikerta 1976). s. 31-38.
- [7] Marcus, R. D. & al. Pneumatic Conveying of Solids. London, New York, Tokyo, Melbourne, Madras 1990, Chapman and Hall. 596 s. ISBN 0-412-21490-3.
- [8] Ellman, A. & al. Pneumatiikka. Helsinki 2002, Edita. 189 s. ISBN 951-37-3736-5.
- [9] Mills, D. Pneumatic Conveying Design Guide. London 1990, Butterworths. 526 s. ISBN 0-408-04719-4.
- [10] Fontell, A. & al. Tyhjiötekniikka. Helsinki 1986, Suomen tyhjiöseura ry. 295 s. ISBN 951-794-422-5.
- [11] MariMatic [yrityksen WWW-sivut]. Ejektorit [viitattu 1.3.2010]. Saatavissa: <http://www.marimatic.com/fi/index.php?k=12003>.
- [12] The COAX principle - What is it? [WWW-sivu]. [viitattu 1.3.2010]. Saatavissa: <http://www.coaxtechnology.com/Templates/Normal.aspx?id=103>.

- [13] MariMatic. Taifun water ejector [PDF-tiedosto]. [viitattu 1.3.2010]. 2 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.marimatic.com/doc/MariMatic_water_ejector.pdf.
- [14] Kallio, M., Kirjalainen, T. Pellettisiilot ja pellettien pneumaattinen syöttö siiloon [PDF-tiedosto]. [viitattu 1.3.2010]. Jyväskylä 2004, VTT Prosessit 929/320/01 59 s. + liitt. 14 s. Saatavissa PDF-tiedostona: http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Puuenergia/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Julkaisut/PROJEKTIT/Pellettisiilot_ja_pellettien_pneumaattinen.pdf.
- [15] Colijn, H. Studies in mechanical engineering Volume 4: Mechanical Conveyors for Bulk Solids. Amsterdam 1985, Elsevier. 512 s. ISBN 0-444-42403-2.
- [16] Jauhetechnikka Oy [yrityksen WWW-sivut]. Tuotteet - Jauhekuljettimet - Ruuvikuljettimet. [viitattu 1.3.2010]. Saatavissa: <http://www.jauhetechnikka.fi/ruuvikuljettimet.php>.
- [17] Antti-Teollisuus. Varastointi ja siirto: Tehoa materiaalivirtojen hallintaan [PDF-tiedosto]. [viitattu 1.3.2010]. 11 s. saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.antti-teollisuus.fi/data/File/Antti%20teollisuusesite.pdf>.
- [18] Jauhetechnikka Oy [yrityksen WWW-sivut]. Tuotteet - Jauhekuljettimet - Spiraalikuljettimet. [viitattu 1.3.2010]. Saatavissa: <http://www.jauhetechnikka.fi/spiraalikuljettimet.php>.
- [19] Algor Technics [yrityksen WWW-sivut]. Hygieniakuljettimet RST. [viitattu 1.3.2010]. Saatavissa: <http://www.algortechnics.fi/tuote?ala=01&id=01.01.04&tuote=11238712>
- [20] SFS-EN 1672-2. Elintarvikekoneet. Perusteet. Osa 2: Hygieniavaatimukset. Helsinki 1997, Suomen standardisoimisliitto SFS. 1 + 59 s.
- [21] Wirtanen, G. Laitehygienia elintarviketeollisuudessa. Hygieniaongelmien ja Listeria monocytogeneksen hallintakeinot [PDF-tiedosto]. [viitattu 1.3.2010]. Espoo 2002, VTT Biotekniikka, VTT Publications: 480. 183 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2002/P480.pdf>.
- [22] ISO 14159. Safety of machinery – hygiene requirements for the design of machinery. Geneve 2002, International Organization for Standardization. iv + 30 s.