



**PNEUMAATTISEN MATERIAALINKÄSITTELYN TESTAUSLAITTEISTON
KEHITTÄMINEN JA ESISUUNNITTELU**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2024

Onni Pitkänen

Tarkastajat: Professori Heikki Handroos

DI Tuomas Purtonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Onni Pitkänen

Pneumaattisen materiaalinkäsittelyn testauslaitteiston kehittäminen ja esisuunnittelu

Konetekniikan diplomityö

2024

71 sivua, 33 kuvaa, 1 taulukko ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori Heikki Handroos, DI Tuomas Purtonen

Avainsanat: Pneumaattinen materiaalinkäsittely, pneumasiirto, tulppakuljetus, matalapaine-siirto, testauslaitteisto

Tämän diplomityön aiheena on tutustua pneumaattisen materiaalinkäsittelyn teknologioihin ja komponentteihin sekä esisuunnitella pneumaattisen materiaalinsiirron testauslaitteisto, jota voidaan hyödyntää kaupallisten laitesovellusten suunnittelussa ja kehityksessä. Työn teoriaosuus on yhdistelmä akateemisten tutkimuskirjallisuuslähteiden tietoja sekä työn kohdeyrityksen asiantuntijoiden käytännön kokemusten kautta saamaa tietoa aiheesta.

Tätä diplomityötä on tarkoitus käyttää kohdeyrityksen henkilöstön perehdytyksessä pneumaattisen materiaalinkäsittelyn periaatteisiin sekä ensisijaisesti lähtötietoina tulevassa testauslaitteiston suunnittelussa, kehityksessä ja sen toteutusprosessissa. Työn pohjalta voidaan kehittää edelleen yksityiskohtaisempia ja rajatumpia jatkotutkimuksia, joita ei ole vielä akateemisessa tutkimusympäristössä laajemmin tunnistettu.

Työn tuloksena on esisuunnitteluaineisto, joka antaa raamit testauslaitteiston varsinaisen suunnittelutyön aloittamiselle. Esisuunnitteluaineistossa määritellään laitteistoon liittyvät ominaisuudet, komponenttien tyypit, koot ja lukumäärät sekä mitattavat ja havainnoitavat suureet.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Onni Pitkänen

Development and preliminary design for pneumatic material handling test equipment

Master's thesis

2024

71 pages, 33 figures, 1 table and 2 appendices

Examiners: Professor Heikki Handroos, M.Sc. (tech.) Tuomas Purtonen

Keywords: Pneumatic material handling, pneumatic conveying, dense phase, dilute phase, test unit

The subject of this master's thesis is to get acquainted with the technologies and components of pneumatic material handling and create a preliminary design for a pneumatic conveying testing unit, which could be utilized in designing and developing commercial equipment for pneumatic conveying. The theoretical section of this thesis is a combination of information gathered from academic literature resources and gained practical knowledge from the specialists representing the target company.

This thesis is meant to be utilized for introducing the principals of pneumatic conveying to the personnel working for the target company, and primarily as a preliminary design guidance in the becoming design, development, and implementation process of a pneumatic conveying test unit. More detailed and defined further studies, not widely recognized in the field of academic research can be done based on this thesis.

The result of this thesis is a preliminary design material package, which will hand out guidelines for initiating the actual design of the test unit. The material package defines the features, types, sizes, and quantities of the components to be used in the equipment, and the variables to be measured and observed in the tests.

KIITOKSET

Tämän diplomityön myötä päättyy toistaiseksi noin 20-vuotias koulutaipaleeni. Tunnen liikutusta ja helpotusta voidessani siirtyä elämässä eteenpäin kaikkien näiden kokemusten rikastamana ja vahvistamana.

Kiitos työnantajalleni Laitex Oy:lle diplomityön tekemisen mahdollistamisesta sekä oppimis- ja kehittymismahdollisuuksista työ- ja opiskeluelämän välimaastossa viimeisten kolmen vuoden aikana.

Kiitos puolisolleni Sandralle tuesta ja avusta, joita ilman tämä korkeakoulutaipaleeni ei olisi ikinä tullut onnistuneeseen päätökseensä. Kiitos perheelleni kaikesta tuesta, joka on vakauttanut opiskelijan elämää ja mahdollistanut merkittäviin asioihin keskittymisen.

Kiitos ystävät, Koneenrakennuskilta ja LUT-korkeakouluyhteisö. Ilman teitä olisi ollut todella onnetonta ja tylsää. Never stop the madness.

” You have to have fun, life is very short.” – Craig Breen, the Mayor of Brattby

Espoo, 12.04.2024

Onni Pitkänen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

1	Johdanto.....	7
1.1	Tutkimuksen tavoitteet	7
1.2	Laitex Oy	8
2	Teoria.....	9
2.1	Pneumasiirto	9
2.2	Siirtotyypit	10
2.3	Järjestelmä	11
2.3.1	Ylipainejärjestelmät	12
2.3.2	Alipainejärjestelmät	13
2.3.3	Annossiirtojärjestelmät	13
2.3.4	Suljetut järjestelmät	15
2.3.5	Mobiilit järjestelmät.....	15
2.4	Materiaalit	17
2.5	Materiaaliominaisuuksien vaikutus	19
2.6	Järjestelmän komponentit	22
2.6.1	Materiaalinsyöttö	22
2.6.2	Venttiilit	33
2.6.3	Siirtoputkisto.....	36
2.6.4	Materiaalin vastaanotto	38
2.6.5	Järjestelmän paineistus	40
3	Toteutus	43
3.1	Testauslaitteiston rakenne	44
3.1.1	Materiaalin syöttö	44
3.1.2	Putkisto ja mutkat	46
3.1.3	Materiaalin vastaanotto	47
3.1.4	Kantokaasun paineistus.....	47

3.1.5	Mittalaitteet	48
3.2	Suunnittelu	48
3.3	Kustannuslaskenta	60
4	Tulokset	62
5	Johtopäätökset	67
	Lähteet	69

Liitteet

Liite 1. Erätoimisen pneumasiirtolaitteiston lähetinrakenteen toiminnankuvaus

Liite 2. Diplomityössä käytetyt kaaviosymbolit

1 Johdanto

Materiaalin käsittely ja siirtäminen ovat oleellisia osia lukuisten eri tuotantoympäristöjen toimintaa, ja oleellisuutensa vuoksi niiden huolellinen optimointi voi edesauttaa paremman kannattavuuden saavuttamista. Halu vähentää eri prosesseista aiheutuvia negatiivisia ympäristövaikutuksia on 2020-luvulla kasvanut merkittäväksi aiheeksi, johon pyritään vastaamaan konkreettisin muutoksin. Energiatehokkuuden kehittäminen ja fossiilisia polttoaineita hyödyntävien prosessien konversiot biopolttoainepohjaisiksi ovat yleisiä toimia ympäristötietoisen tuotannon tehostamisessa.

Useat teollisuudessa käytettävät raaka-aineet ovat jauhemaisia tai rakeisia, ja näiden aineiden siirtäminen mekaanisilla kuljettimilla voi tapauskohtaisesti muodostua haasteelliseksi. Näihin haasteisiin ratkaisua voidaan hakea pneumaattisen siirtotekniikan kautta, jossa materiaalia siirretään paine-eron avulla suljetussa systeemissä. Käytettäessä yhtenä materiaalin siirtoalustana putkistoa, voidaan materiaalin siirtomatkat muodostaa suhteellisen pitkiksi. Tällöin varastointiin ja prosessointiin käytettävien laitteistokokonaisuuksien sijainti, pinta-ala ja rakenne voidaan optimoida toimintaan parhaimmin soveltuvaksi.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän diplomityön tarkoituksena on tutustua pneumaattiseen materiaalin siirtoon eri raaka-aineiden kuljetustyyppinä ja pneumaattisiin kuljetinjärjestelmäkokonaisuuksiin, esisuunnitella testauslaitteisto kiintoaineiden pneumaattiseen siirtoon ja käsittelyyn sekä tutkia erilaisia ominaisuuksia testauslaitteiston perusrakenteen täydentämiseksi. Testauslaitteiston suunnittelussa on otettava huomioon materiaalinkäsittelyn tulevaisuus, sillä materiaaleja käsittelevät teollisuuden alat eivät toimi koko elinikänsä yksin periaattein. Vaikka erilaisia pneumaattisen siirron testauslaitteistoja on maailmanlaajuisesti kehitetty jo lukuisia, pyrkii tämä tutkimus erottumaan laitteiston yksilöllisyyden ja sen yhteyteen kehiteltävien erilaisten lisäominaisuuksien kautta. Myöhemmin, kun testauslaitteisto toteutetaan käytännössä, sen avulla pyritään vastaamaan Laitex Oy:n tuleviin tuotekehityspyrkimyksiin mahdollisimman arvoa tuottavasti, etenkin tapauksissa, joissa potentiaalisen asiakkaan määrittämän

materiaalin pneumasiirtomahdollisuuksista ei ole aiempaa tutkimuksen tai käytännön kokemuksen kautta saatua tietoa.

1.2 Laitex Oy

Laitex Oy on vuonna 1986 perustettu perheyritys ja teknologiatalo, jonka ydinosamisalueena ovat materiaalinkäsittelyjärjestelmien kokonaisuudet. Yhtiön pääkonttori ja omavalmistusyksiköt sijaitsevat Lappeenrannassa, joiden lisäksi yhtiöllä on toinen toimipiste Helsinki-Vantaan lentoaseman läheisyydessä. Osa yrityksen laitekokoonpanon tiloista on esitelty kuvassa 1. (Laitex Way, 2024.)

Laitex on kasvanut merkittävästi koko historiansa ajan, ja yhtiön strategiassa tavoitellaan seuraavan toimintatason saavuttamista vuonna 2025. Strategiassa määriteltyjä kehitettäviä avainasioita ovat liikevaihdon lisäksi erityinen keskittyminen tuotehallinnan ja tuotekehityksen, myynnin, service-liiketoiminnan, projektitoiminnan sekä työssä käytettävien prosessien ja tietojärjestelmien osa-alueisiin. Kansainvälisten pörssi-yhtiöiden luottokumppanina Laitex pyrkii jatkuvasti kehittymään ja kasvamaan orgaanisesti, ja yhtenä osa-alueena toimintaa vauhdittamaan perustettiin pneumaattisten kuljetinjärjestelmien liiketoimintaosasto kesällä 2022, joka laajentaa yhtiön tuoteportfolion vastaamaan paremmin asiakkaiden toimituskokonaisuuksien tarpeita. (Rinkinen, 2021.; Laitex Oy, 2022.)



Kuva 1. Osa Laitex Oy:n kokoonpanon tiloista Lappeenrannassa (Laitex, 2024).

2 Teoria

Tässä kappaleessa esitellään pneumaattisen materiaalin siirron teoriaa akateemisten kirjallisuuslähteiden tukemana. Peruseriaatteiltaan yksinkertaisen tekniikan taustalta löytyy monitahoisia huomioon otettavia asioita, joiden ymmärtäminen on prosessin toimintojen kannalta hyödyllistä.

2.1 Pneumasiirto

Pneumasiirto eli paineperustainen materiaalinkuljetus on yleinen teknologia eri prosessiympäristöissä, joissa käsitellään rakeisia tai jauhemaisia aineita. Pneumasiirtotekniikan perusvaatimukset materiaalin siirtämiseksi ovat paineistettu kaasu, materiaalin syöttölaitteisto, siirtoputkisto ja materiaalin vastaanottoyksikkö. Rakeinen tai jauhemainen kiintoaine annostellaan siirtoputkistoon syöttölaitteiston avulla, ja materiaali siirtyy putkistoa pitkin pisteestä toiseen paineistetun kaasun aiheuttaman paine-eron avulla. Materiaalin vastaanottoyksikössä kuljettavana väliaineena toiminut paineistettu kaasu erotetaan kuljetettavasta aineksestä, jolloin pneumasiirto on peruseriaatteiltaan toteutunut. (Shah 2017, s. 32.)

Pneumasiirrossa on useita etuja, joiden ansiosta se on teknologiana sopivassa kohteessa mahdollisimman kannattava ja hyödyllinen. Yleensä järjestelmät ovat verrokkikuljetintyyppejänsä pienikokoisempia, joka mahdollistaa ahtaissakin tiloissa toimimisen. Käytettäessä putkistoa materiaalin siirtämiseen, voidaan päästä kustannustehokkaasti pitkiin, äärimmillään jopa yli kilometrin mittaisiin materiaalin siirtomatkoihin. Tavanomaisimpien materiaalinkäsittelytoimintoja vaativien toimintaympäristöjen layout-suunnittelussa pneumaattiset kuljetinputkistolinjat on helpompi sijoitella ja suunnitella toteutettavaksi maltillisen tilankäyttönsä ja joustavuutensa vuoksi, verrattuna yleensä runsaasti tehtaan lattiapinta-alaa käyttäviin mekaanisiin kuljettimiin. Pneumasiirtolaitteiston suunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon järjestelmän optimaaliseen toimintaan vaikuttavat tekijät, sillä esimerkiksi useiden mutkien lisääminen putkistolinjaan lisää laitteiston kokonaisresistanssia ja näin vaikeuttaa materiaalin siirron sujuvuutta. Suurimmat tilankäytölliset vaatimukset pneumasiirtolaitteiston kohdalla syntyvät materiaalin syötön eli lähettimen sekä vastaanoton sijainteihin. (Mills 2016, s. 6; Molerus 1996, s. 309.)

Yhtenä paineilmaperustaisen kuljetinteknologian etuna on myös sen turvallisuus; siirrettävän materiaalin ei ole tarkoitus missään siirron vaiheessa päästä kosketuksiin järjestelmän ulkoisen ympäristön kanssa, vaan järjestelmän on tarkoitus pysyä suljettuna koko materiaalin siirtomatkan. Tästä syystä pneumasiirto soveltuu erityisen hyvin vaarallisten aineiden siirtoon, esimerkiksi lääke- ja kemianteollisuudessa. Järjestelmän tiiveyden takia myös vaarallisilta pölyräjähdyksiltä voidaan välttyä, vaikka putkistossa virtaava materiaali olisikin erityisen herkästi pölyävää. Turvallisuutensa vuoksi pneumasiirtolaitteiston hankintaprosessin eteneminen on viranomaisvaatimusten näkökulmasta mutkattomampaa kuin esimerkiksi pölyräjähdysalttiiden avointen kuljettimien kohdalla. Toisaalta painelaitedirektiivien huomiointi ja noudattaminen tulee useammin näiden järjestelmien kohdalla kyseeseen, kuin yleisimpien mekaanisten kuljettimien kanssa. (Kuang, Zhou & Yu 2019, s. 2; Kalman & Rawat 2019, s. 1.)

2.2 Siirtotyypit

Pneumasiirtotekniikassa on olemassa useita eri muuttujia, joita optimoimalla ja huomioimalla siirto voidaan saada kullekin materiaalille ja kuhunkin prosessiympäristöön sopivaksi. Useiden muuttujien hienosäädöstä huolimatta, jopa saman materiaalin kahden eri laadun pneumasiirrot saattavat olla käytökseltään hyvin erilaisia. Siksi teoriassa tietyillä asetuksilla tietylle materiaalilaadulle toimiva paine-eroon perustuva siirto ei välttämättä sovellu lainkaan toiselle materiaalille. (Mills 2016, s. 13; Jones 2005, s. 151.)

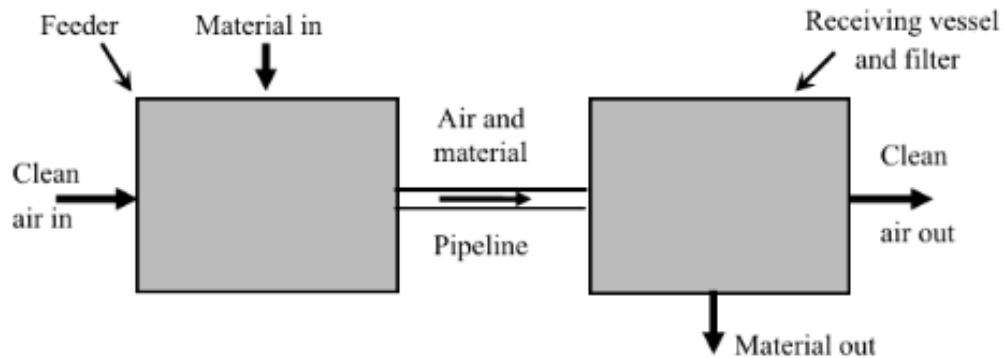
Pneumasiirto jaotellaan yleisesti kahteen eri siirtotyyppiin, jotka eroavat toisistaan merkittävästi. Lähes kaikki rakeiset ja jauhemaiset materiaalit soveltuvat harvasiirtoon, jota kutsutaan englanniksi termillä ”dilute phase conveying”. Toisia englanninkielisiä nimityksiä tälle samalle siirtotavalle ovat ”lean phase conveying” ja ”suspension flow”. Tässä laihan seoksen materiaalinsiirtotavassa kiintoainepartikkelit kulkeutuvat joko yli- tai alipaineisen virtauksen aiheuttaman paine-eron välityksellä lähettimeltä vastaanottoon, virtauksen kannattelemana. Tässä jatkuvassa pneumasiirtotavassa käytettävän kaasuvirtauksen nopeus on huomattavasti suurempi kuin muilla siirtotavoilla, tavallisimmillaan n. 10–16 m/s, riippuen siirrettävästä materiaalista. Tiheimmillä tai rakkooltaan suurimmilla aineilla siirtonopeus voi olla jopa 40–50 m/s. (Mills 2016, s. 9; Bhatia 2008, s. 1–3; Shah 2017, s. 33.)

Materiaalin pneumaattista harvasiirtotekniikkaa ei kannata käyttää hankaavien tai murenevien materiaalien siirtoon, sillä siinä materiaali on kosketuksissa putkiston sisäpinnan kanssa, erityisesti putkiston mutkissa, joissa kuljetettava materiaali vaikuttaa merkittävästi putkiston kulumiseen. Karkeat ja raskaat aineet kuluttavat tällä tavoin siirrettynä putkistoa enneaikaisesti ja näin laitteiston kunnossapitokustannukset kasvavat. Myös painovoimalla on oma vaikutuksensa raskaiden partikkelien harvasiirrossa, etenkin horisontaalisuuntaisissa putkistojen osissa. (Mills 2016, s. 9.)

Vaihtoehtoinen pneumasiirtotekniikka edellä esitellylle harvasiirrolle on nimeltään tiheäsiirto, ”dense phase conveying” tai ”non-suspension flow”, jossa siirrettävä materiaalierä siirtyy putkistoon joko putken alapinnalla liikkuvana petinä tai useina kuljetuskaasun erottelemina, koko putken sisäpinta-alan täyttävinä tulppina rikkaassa seossuhteessa kantokaasun määrään nähden. Jälkimmäisessä tapauksessa voidaan puhua tulppakuljetuksesta, joka soveltuu tavanomaisessa pneumasiirtojärjestelmässä ainoastaan hyvän kaasuläpäisykyvyn omaaville raekooltaan homogeenisille kiintoaineille. Tällaisia materiaalityyppejä ovat esimerkiksi pelletit ja siemenet. Ensin mainitussa kuljetusmuodossa, jossa materiaali siirtyy patjana putkiston alapinnalla, materiaalilla on oltava erinomaiset paineistuksen säilytysominaisuudet eli sen on oltava hyvin hienojakoista. Partikkelikoossa tämä tarkoittaa maksimissaan noin 60 mikrometriä. Tiheäsiirrossa materiaali koskettaa putkiston sisäpintaa koko siirtoajan ajan, mutta kuljetusnopeuksien ollessa pienimmillään 3 m/s ja alle, pysyvät sekä putkiston kulumisen suhteellisen vähäisenä, että kuljetettavat materiaalit koossa ja vahingoittumattomina. (Mills 2016, s. 9; Bhatia 2008, s. 29–33.)

2.3 Järjestelmä

Pneumasiirtolaitteistoja on olemassa monenlaisia, mutta kaikki järjestelmät koostuvat toimintaperiaatteiltaan samankaltaisista elementeistä. Sekä yli- että alipaineperustainen siirto alkaa materiaalin syöttämisestä kaasuvirtaukseen, siirto jatkuu laitteiston putkilinjassa ja päättyy virtaavan kaasun ja materiaalin erotteluun vastaanotossa. Yksinkertaisimmillaan laitteisto koostuu pneumalähtimestä, putkistosta ja vastaanottoasemasta. Yksinkertaistettu malli pneumasiirtolaitteiston perustoiminnoista on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Pneumasiirtolaitteiston toimintaperiaate (Mills 2016).

Valtaosa maailmanlaajuisessa käytössä olevista pneumasiirtolaitteistoista ovat ns. avoimia järjestelmiä, joissa ympäristölle turvallisen materiaalin ja sitä siirtävän kantokaasun erottelu on toimivasti toteutettu. Näissä järjestelmissä kantokaasuna toimii useimmin paineistettu ilma, joka vapautetaan ympäristöön perusteellisen suodatuksen jälkeen. Palo- ja räjähdysalttiiden materiaalien siirto voidaan myös toteuttaa avoimessa järjestelmässä, kun laitteiston paloturvallisuutta edistäviin lisälaitteisiin on riittävästi panostettu.

2.3.1 Ylipainejärjestelmät

Yleisimmät pneumaattiset materiaalinkäsittelyjärjestelmät toimivat ylipaineella. Niissä materiaalin syöttö putkistoon tapahtuu yleensä yhdessä lokaatiossa, kun taas vastaanottoasemia voi olla useampia. Ylipaineiset pneumasiirtojärjestelmät vaativat materiaalille erillisen syöttölaitteiston, jonka yhteydessä kuljetettava materiaali ja kuljetusväliaineena toimiva kaasu yhdistyvät. Siirtoon käytettävän kaasun paine voidaan ylipainejärjestelmissä tapauskohtaisesti nostaa jopa 1000 kilopascalin eli 10 barin suuruiseksi. Yleisimmät järjestelmät toimivat kuitenkin alle 10 barin paineistuksella eli tavallisella kompressoripainealueella. Ylipainejärjestelmissä on mahdollista käyttää myös useampaa materiaalin syöttölokaatiota samanaikaisesti, mutta tällaiset järjestelmät vaativat monimutkaisempaa suunnittelua. Tämä johtuu siitä, että useat materiaalin syötöt toimivat yleisesti sulkusyöttimien avulla ja näiden komponenttien rakenteet voivat hankaloittaa paineistetun järjestelmän perusteellisen tiiveyden tavoittelua. (Mills 2016, s. 62; Klinzing, Rizk, Marcus & Leung 2010, s. 10–11.)

Maailmanlaajuisesti käytössä olevat pneumaattiset materiaalin siirtojärjestelmät toimivat yleisimmin maksimissaan 5 barin paineessa, kun materiaalin vastaanotto on standardissa ilmakehän paineessa (atm). (Mills 2016, s. 13.)

2.3.2 Alipainejärjestelmät

Negatiivisen paineistuksen pneumasiirtojärjestelmissä on usein useampia materiaalin syöttölokaatioita, joista materiaali siirretään yhteen vastaanottoon. Alipainejärjestelmien materiaalin syöttö on usein rakenteeltaan ja kustannuksiltaan yksinkertaisempi kuin ylipainejärjestelmissä, sillä materiaali voidaan syöttää järjestelmään avoimista varastoista tai kasoista, materiaalin yläpuolelta alkaen. Paineistuslaitteiston sijainti muualla kuin materiaalin syötössä yksinkertaistaa tätä toimintatapaa. Yhtenä yleisimmistä käytännön esimerkeistä ovat esimerkiksi erilaisten liikennevälineiden, laivojen tai kuorma-autojen avoimet varastointirakenteet, joista materiaali siirretään alipaineen avulla putkilinjaan. Toisaalta alipaineinen pneumasiirtolaitteisto voi olla paljon kuvattua yksinkertaisempikin, kuten esimerkiksi teollisuudessa toimivat pölyn- tai purunpoistojärjestelmät. (Mills 2016, s. 62–63; Klinzing et al. 2010, s. 11.)

Alipaineista pneumasiirtoa voidaan hyödyntää pölyävien tai vaarallisten aineiden siirtoon, sillä sitä käytettäessä materiaalin syötön pölyäminen järjestelmän ulkopuolella estyy käytännössä kokonaan. Kun materiaalin siirron paineistus tapahtuu alipaineisena, vuotokohtaan ei synny järjestelmästä ulospäin suuntautuvaa virtausta, jolloin kaikki mahdolliset vuodot siirtyvät materiaalin mukana eteenpäin tiiviiseen siirtojärjestelmärakenteeseen. (Bhatia 2008, s. 6.)

2.3.3 Annossiirtojärjestelmät

Annoksittain tapahtuva pneumasiirto on yleistä tiheäsiirrossa, jossa materiaali siirtyy lähetyksestä vastaanottoon yksi materiaali kerrallaan. Tämä teknologia toteutetaan usein pneumalähtimellä, jossa on paineistettava lähetyssäiliö. Vaikka pneumasiirto voidaan toteuttaa jatkuvan siirron teknologioilla ilman erillistä materiaaliannostelua, on annoksittain tapahtuvalla siirrolla omat etunsa tietyissä tuotantoympäristöissä. Esimerkiksi kuluttavien materiaalien siirto alhaisilla kuljetusnopeuksilla erä kerrallaan vähentää putkistolinjan

kulumista sekä helpottaa siirron kontrollointia, kuljetusparametrien säätöä ja materiaalin varastoinnin hallintaa. Annoksittaisessa kuljetustavassa tiedetään tarkasti materiaalierien siirtosekvenssi, jonka myötä erilaisiin muutostarpeisiin voidaan reagoida niiden vaatimalla tavalla. Vaikka annossiirto toteutetaan useimmin tiheäsiirtotekniikalla, sitä voidaan käyttää myös harvasiirrossa. (Mills 2016, s. 65.)

Asteittain tapahtuvan annoserän siirtäminen paineistetun lähetyssäiliön avulla on yksi yleisimmistä pneumasiirtotavoista, joka voidaan toteuttaa joko tiheä- tai harvasiirtomenetelmällä. Näissä järjestelmissä lähetyssäiliöiden koot vaihtelevat 1–20 m³ välillä, riippuen kuljetettavasta materiaalista ja siirrossa tavoiteltavasta tilavuusvirtaamasta. Tätä tapaa voidaan hyödyntää etenkin kohteissa, joissa kuljetettavaa materiaalia hyödyntävä prosessi on myös paineistettu. Kun yksisäiliöisen järjestelmän tiiveysominaisuudet mahdollistetaan oikeanlaisilla venttiilirakenteilla, voi putkistossa liikkua materiaalia samaan aikaan kun lähetyssäiliö täytetään jo seuraavalla siirrettävällä materiaalierällä. Tämä edesauttaa materiaalinsiirron tehokkuutta, varsinkin verrattuna jatkuvan siirron järjestelmiin, joissa materiaalin on teoriassa mahdollista siirtyä eri lokaatioiden välillä pysähdyksittä. (Mills 2016, s. 66.)

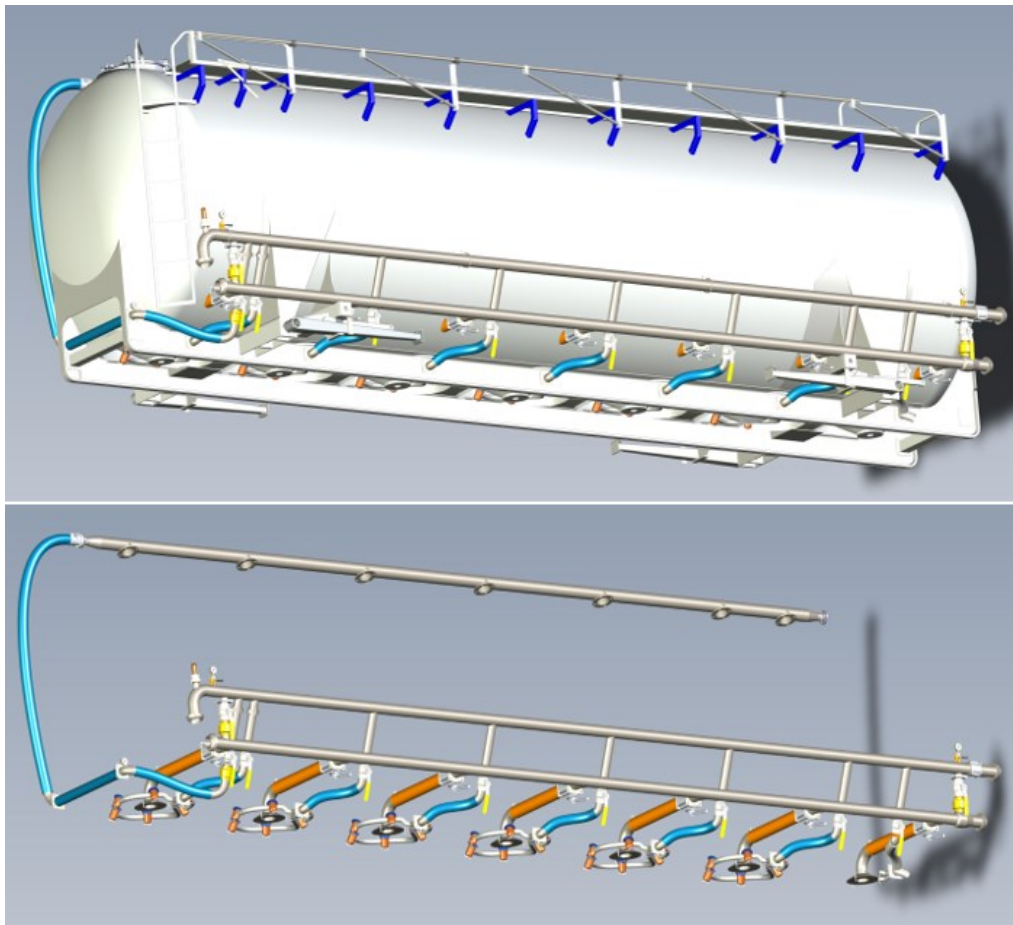
Annossiirto voidaan toteuttaa myös yhtenä tulppana, jonka tilavuus on sama kuin lähetyssäiliöön annosteltu materiaalierä. Tyypillisesti tämä tarkoittaa n. 10 metrin mittaista tulppaa, joka siirtyy putkistossa lähetyksestä vastaanottoon. Tällaisen järjestelmän toimintataajuuden vakioiminen vaatii käynnistyksen jälkeen muutaman materiaalin kiertosyklin, sillä seuraava tulppa edesauttaa aina edellisen siirtymistä kohti vastaanottoa. Erityisesti karkeat ja kuluttavat materiaalit soveltuvat yhden tulpan siirtoon, etenkin mikäli siirrettävälle materiaalille on hankala käyttää perinteisiä pneumasiirtotekniikoita. Materiaalierän siirto yhtenä tulppana toteutetaan alhaisella siirtonopeudella, ja käytettävän paineen on saavutettava taso, jolla tulpan ja putkiston välinen materiaalin liikettä estävä sisäinen kitka saadaan eliminoitua, ja vaadittu siirtonopeus saavutettua. Jotta vaadittava paine pysyy kohtuullisella tasolla, on laitteiston suunnittelussa keskityttävä erityisesti putkiston sisähalkaisijan oikeaan mitoittamiseen, mainitut parametrit huomioiden. (Mills 2016, s. 67; Raoufat & Clarke 1998, s. 363.)

2.3.4 Suljetut järjestelmät

Vaarallisten aineiden pneumasiirrossa voidaan käyttää avoimen järjestelmän sijaan suljettua järjestelmää, jossa kantokaasua ei vapauteta ulkoiseen ympäristöön siirtotapahtuman jälkeen, vaan se päätyy uudelleen kiertoon. Suljetussa järjestelmässä kantokaasuna voidaan käyttää ilman sijaan esimerkiksi typpeä, argonia tai hiilidioksidia. Koska suljettu järjestelmä vaatii toimiakseen tilavuudeltaan merkittävästi pienemmän määrän kantokaasua kuin avoin järjestelmä, jossa siirrossa käytetty kantokaasu vapautetaan pois järjestelmästä, eivät vähähappisten kaasujen käytön kustannukset pääse kohoamaan suhteettoman korkeiksi. (Mills 2016, s. 69.)

2.3.5 Mobiilit järjestelmät

Edellä esiteltyjen kiinteiden pneumasiirtoteknologioiden lisäksi mobiilit pneumaattiset materiaalinkäsittelyjärjestelmät ovat yleisiä, etenkin materiaalien rahtikuljetuksissa. Tieliikenteen kuljetuskalustoissa voidaan käyttää paineistettua putkistosiiirtoa kuorman purkamiseen siten, että sen mahdollistava laitteisto on integroituna itse kuljetusvälineeseen, esimerkiksi jauhemaisia aineita kuljettavaan säiliökuorma-ajoneuvoon. Ajoneuvon rakenteessa on usein integroitu kompressori, ja tällöin kuorma puretaan makaavasta säiliöstä kompressorin tuottaman paineilman avulla autosäiliön rakenteeseen kuuluvan putkiston kautta tuotantolaitoksen materiaalin vastaanottoon. Esimerkki autosäiliön putkistorakenteesta on havainnollistettu kuvassa 3. Kippaavassa päällirakenteessa materiaalin purun annostelu vastaanottoase- man putkistoon voidaan toteuttaa ajoneuvon perässä olevan päätykartion paineistuksen tai sulkusyöttimen avulla. Tällöin tarvittava materiaalivirta suunnataan sulkusyöttimelle tai päätykartiolle painovoimaa hyödyntäen, kun päällirakenteen hetkellistä kaltevuutta maan ta- soon nähden muutetaan kippisylinterin avulla. (Mills 2016, s. 68.)



Kuva 3. Vaihtosäiliön paineilmatoiminen purkuputkistorakenne (Tank Pro Oy, 2020).

Raideliikenteen materiaalinkuljetuksessa käytetään myös pneumaattisia kuljetinjärjestelmiä, materiaalin purkamiseksi kuljetusvaunuista. Raideliikenteen materiaalinkuljetusten vastaanotot ovat yleensä toimitusvarastoja, joissa hyödynnetään useita samanaikaisia purkupaikkoja, sillä tavarajunat ovat usein pitkiä, jolloin yhden vaunun purkaminen kerrallaan olisi toiminnan kokonaistehokkuuden kannalta haastavaa. Raidekaluston purussa voidaan hyödyntää sulkusyötintä samoin kuin maantiekuljetuskalustossa tai mikäli raideliikenteen pällirakenne on tiivis, voidaan se paineistaa kiinteän järjestelmän lähetys säiliön tavoin. (Mills 2016, s. 68.)

Merikuljetusten alalla yleisiä ovat aiemmin mainitut alipaineiset siirtojärjestelmät, jotka on toteutettu joko kiinteärakenteisina laitteistoina tai mobiilien purkuajoneuvojen avulla materiaalia vastaanottavissa satamissa. Keskikokoiset ja sitä pienemmät rahtialukset voidaan kuitenkin varustaa omalla pneumaattisella materiaalinkäsittelyjärjestelmällä, joiden avulla

materiaali voidaan siirtää esimerkiksi satamien tai avomeren porauslauttojen materiaalivastaanottoihin. Tällaisissa järjestelmissä käytetään sekä painovoimaa hyödyntäviä mekaanisia kuljettimia, että aluksessa sijaitsevia paineistettavia lähetyssäiliöitä, joista materiaali siirretään ylipaineen avulla joustavia letkuja pitkin materiaalin vastaanottoon. Joustavia rakenteita käytetään erityisesti veden aiheuttaman liikkeen ja vuorovesi-ilmiön aiheuttamien ongelmien eliminoimiseksi. (Mills 2016, s. 68.)

2.4 Materiaalit

Yksi maailmanlaajuisesti yleisimpiä paine-eron avulla siirrettäviä kiintoaineita on tuhka, jota syntyy voimalaitoksissa eri polttoaineiden palamisreaktioiden yhtenä lopputuotteena. Lento- ja pohjatuhka ovat äärimmäisen kevyitä ja hankalasti hallittavia ainetta materiaalinkäsittelyn näkökulmasta, joten pneumaattinen siirto sopii niiden kuljettamiseen erityisesti suljetun systeemin ansiosta. Materiaalinkäsittelyn laitteistokokonaisuuksille on kuvatussa kaltaisissa laitoksissa merkittävä tarve, sillä palamisprosessissa syntyy eri kokoisia tuhka- hiukkasia prosessin eri lokaatioissa. Prosessin eri kohteiden kautta kulkevat materiaalivirrat voivat luoda tarpeen monitahoisillekin putkistosiirotjärjestelmille. (Mills 2016, s. 7–8; Martinussen 1996, s. 26.)

Toinen yleinen pneumasiirtomateriaali on hiekka, jota käytetään erityisesti lasiteollisuudessa lasin raaka-aineena, valimoteollisuudessa valettavien kappaleiden muotti- ja sideainemateriaalina sekä lämpövoimaloissa leijupetipolton mahdollistajana ja tehostajana. Hiekka on käsiteltävänä materiaalina hyvin kuluttavaa, ja samalla itsekin kuluva, joten sen siirrotteknikkana toimii useimmin matalanopeuksinen tulppakuljetus. Hitailta materiaalivirtauksilla vähennetään kuljetinputkistoon aiheutuvaa kulumista, verrattuna nopeaan harvasiirtoon. (Mills 2016, s. 6–7; Martinussen 1996, s. 14.)

Kemianteollisuudessa pneumaattisen kuljetinjärjestelmän tiiveys ja suljettu rakenne muodostuvat eduksi, kun käsiteltävänä voi olla ihmiselle vaarallisia raaka-aineita. Tunnettuja pneumaattisesti siirrettäviä aineita ovat esimerkiksi sooda, polyetyleni, polypropyleeni ja polyvinyylidikloridi eli PVC. Myös farmasian alan teollisuudessa järjestelmän tiiveys luo etua, kun lääkeaineiden kontaminoituminen ilmenee yhtenä materiaalinkäsittelyn riskitekijänä. Farmasian alalla siirrettäviä materiaaleja ovat erilaiset aktiiviset ja passiiviset lääkeaineet,

tablettien valmistuksessa käytettävät raekooltaan pienet lääkeainegranaulatit ja jopa valmiit tabletit ja kapselit. (Mills 2016, s. 6–7.)

Maatalous on yksi maailman merkittävimmistä tuotantoaloista, jossa monenlaiset materiaalinkäsittelyjärjestelmät ovat tarpeen. Maatalousympäristöissä pneumasiirtoa voidaan hyödyntää esimerkiksi eri viljojen, riisin, maissin tai eläinten rehujen siirtämiseen. Näiden lisäksi myös erilaiset lannoiteaineet ovat usein ainerakenteeltaan sopivia putkistossa siirrettäväksi. (Mills 2016, s. 6–7.)

Luonnollisena jatkumona maataloudelle toimii elintarviketeollisuus, jossa pneumasiirtoa käytetään esimerkiksi jauhojen, sokereiden, mausteiden, kahvipapujen ja teen siirtämiseen. Elintarviketeollisuuden tiukkojen hygieniavaatimusten myötä pneumasiirtojärjestelmän mahdollistama kontaminaatoriskin minimointi nousee merkittäväksi eduksi toiminnan sujuvuuden kannalta. Näissä ympäristöissä laitteiston suunnittelussa on otettava erityisesti huomioon kahden tai useamman materiaalin yhdenaikainen siirto yhteisessä putkilinjassa, sillä yksittäinen raaka-aine ei välttämättä usein riitä, kun valmistetaan elintarviketeollisuuden lopputuotteita. (Mills 2016, s. 6–7 & 505; Güner 2006, s. 904.)

Öllyntuotannossa pneumasiirtoa käytetään hienojakoisten jauheiden, kuten bariitin, semen-tin ja bentoniitin käsittelyyn. Näitä aineita hyödynnetään öljyteollisuudessa porausta tehos-tavina lisäaineina eri muodoissa. Pneumasiirtoa voidaan hyödyntää myös metallin jalostuk-sessa, esimerkiksi eri seosaineiden käsittelyssä ja prosessiin tuonnissa (Mills 2016, s. 6–7.)

Kaivosteollisuuden ja louhinnan alalla pneumasiirtoa hyödynnetään usein kivihiilen, mal-mien ja mineraalien käsittelyssä. Näissä sovelluksissa huomioitaviksi asioiksi nousevat pit-kät siirtomatkat kaivoksista maan pinnalle, tästä johtuva merkittävä energiankulutus sekä putkistoa herkästi kuluttavat materiaalit. (Mills 2016, s. 6–7; Klinzing et al. 2010, s. 344 & 454.)

Sähköistäminen on noussut 2000-luvulla globaalisti merkittäväksi aiheeksi, ja tämän myötä erilaiset siihen liittyvät teolliset prosessit ovat kehittyneet ja kehittyvät edelleen. Akkuteol-lisuudessa käytetään monia materiaaleja, jotka rakenteensa puolesta voisivat sopia pneumaattisesti siirrettäväksi, mutta tutkimustietoa aiheesta vaikuttaa olevan vielä niukasti. Erilaiset akkuteollisuuden litiumia sisältävät mineraalit kuten spodumeeni tai petaliitti, voi-sivat olla potentiaalisia pneumasiirrettäviä materiaaleja, mutta niiden käyttäytymisessä ja

soveltavuudessa pneumasiirtoon on ensin tehtävä tutkimusta ja testausta, ennen kaupallista käyttöönottoa.

2.5 Materiaaliominaisuuksien vaikutus

Yhtenä merkittävänä tekijänä pneumasiirtolaitteiston suunnittelussa tulee ottaa huomioon siirrettävän materiaalin ominaisuudet, jotka vaikuttavat sopivan pneumasiirtotekniikan valintaan. Käsiteltävistä materiaaleista esimerkiksi erityyppisten hiilimateriaalien siirrossa voi korostua tyyppistä riippuen useita erilaisia materiaaliominaisuuksia, jotka vaativat tapauskohtaista reagointia.

Paineistettuna herkästi syttyvät aineet kuten sokeri, jauhot, polymeerit, kemianteollisuuden jauhemaiset aineet, metallit, puu tai hiili voivat palaa ja aiheuttaa pölyräjähdysten. Suljetussa järjestelmässä syttymisriskiä voidaan minimoida käyttämällä vähähappista kantokaasua, esimerkiksi typpeä, argonia tai hiilidioksidia. Avoimessa järjestelmässä riskienhallintakeinoja ovat paineenalennusventtiilien, tukahdutusjärjestelmien tai muiden paloturvallisuutta edistävien turvallisuuslaitteiden hyödyntäminen. (Mills 2016, s. 78 & 206.)

Kosteat tai märät aineet voivat kiinnittyä järjestelmän rakenteiden sisäpintoihin asteittain, joka lopulta aiheuttaa tukoksen. Tällaisia materiaaleja voivat olla esimerkiksi kivihiili, ruskohiili, sokeri, hiekka, kalkki, sementti, grafiitti ja asfalteeni. Märkien materiaalien kohdalla voidaan käyttää yksitulppaista annossiirtotekniikkaa, ja kosteiden tai kohesiivisten materiaalien siirrossa kantokaasua voidaan kuumentaa ennen siirtotapahtumaa, jolloin siirrettävän materiaalin kosteutta saadaan haihdutettua. (Mills 2016, s. 78; Jones 2005, s. 154–155.)

Sähköstaattinen varautuminen materiaalin ja siirtojärjestelmän rakenteiden kosketuksessa voi aiheuttaa kipinän, joka voi johtaa suurempaan palamisreaktioon ja pölyräjähdykseen. Sähköisesti varautuvia materiaaleja ovat mm. polymeerit, kemianteollisuuden jauhemaiset aineet, metallit, mineraalit ja puu. Sähköisen varautumisen aiheuttamia haittoja pneumasiirrossa voidaan vähentää kostuttamalla kantokaasua ennen siirtotapahtumaa, etenkin tiheäsiirrossa, jossa käsiteltävän kaasun määrä on pienempi suhteessa harvasiirtoon. Pneumasiirtolaitteisto kannattaa maadoittaa huolellisesti sähköstaattisia aineita käsiteltäessä. Järjestelmän sisäisten rakenteiden käsittely sähköä johtavalla pinnoitteella vähentää merkittävästi aineiden varautumista siirrossa, mutta pinnoitteen kulumisen toistuvien siirtosykliden myötä

synnyttää tarpeen tiheämmille kunnossapitoinvestoinneille. (Mills 2016, s. 78–79; Fathollahi & Ahmadi & Hosseini 2019, s. 2.)

Kuluttavat materiaalit kuluttavat pneumasiirrossa sekä itse itseään, että järjestelmän sisäisiä rakenteita. Esimerkiksi hiekka, metallit, mineraalit ja hiili ovat kuvatuunlaisia erosiivisiä aineita. Materiaalin siirtonopeuden alentaminen on merkittävin tekijä kulumisen vähentämisessä. Harvasiirtojärjestelmissä kannattaa välttää syöttölaitteiston liikkuvien osien, kuten sulku- tai ruuvisyöttimien käyttöä kuluttavien materiaalien kanssa. Laitteiston rakenteiden kestävyyttä voidaan edesauttaa tekemällä niihin harkittuja ja oikeita materiaalivalintoja. (Mills 2016, s. 79.)

Materiaalin halutun raekoon säilyttäminen hankaloituu, jos hauras materiaali hajoaa liian kuormittavan siirron takia. Hiili, kemianteollisuuden jauhemaiset aineet, natriumkarbonaatti tai sokeri ovat aineita, joiden siirrossa kannattaa käyttää alhaisia nopeuksia. Myös materiaalin törmäysriskin pienentäminen on hyödyllistä haluttua raekokoa tavoiteltaessa, esimerkiksi putkistossa olevien mutkien määrää vähentämällä. Materiaalia rikkovien syöttölaitteiston osien, kuten ruuvisyöttimien käyttöä kannattaa välttää. (Mills 2016, s. 79; Jones 2005, s. 152.)

Tyypillisesti suurin osa pneumaattisesti siirrettävistä aineista on rakeisia, ja ne voivat tukkia pneumasiirtojärjestelmän, liian suureksi muodostuvan virtausläpäisyn takia. Rakeiset aineet ovat usein myös hauraita, joten niiden annostelussa kannattaa välttää repiviä syöttölaitteiston osia. Hiekka, mineraalit, riisi, kahvi, maissi tai kemialliset aineet ovat usein rakeisia, jolloin niiden annostelu kannattaa harvasiirtojärjestelmässä toteuttaa aineen hajottamista välttävän offset-sulkusyöttimen avulla. Käytettäessä tiheäsiirtoa, kannattaa se toteuttaa yksitulppaista annossiirtotekniikkaa hyödyntäen. (Mills 2016, s. 79.)

Hygroskooppisten materiaalien kyky absorboida siirrossa käytettävästä kantokaasusta kosteutta itseensä tekee niistä tahmeita, josta voi aiheutua tukoksia järjestelmään. Näitä materiaaleja voivat olla mm. polymeerit, sokeri, suolat, puu ja kemianteollisuuden jauhemaiset aineet. Merkittävästi hygroskooppisten aineiden siirrossa käytettävää kantokaasua voidaan kuivata siirron edesauttamiseksi. Vähähygroskooppisille aineille suositellaan tiheäsiirtoa, koska siinä vaadittava kaasutilavuus on määrältään pienempi kuin harvasiirrossa. (Mills 2016, s. 79; Klinzing et al. 2010, s. 517.)

Nylon, polyeteeni ja polyesterit ovat aineita, joiden voimakas kosketus järjestelmän sisäisten rakenteiden kanssa saattaa aiheuttaa niin paljon kitkaa, että siirrettävä aine kuumenee yli sen sulamislämpötilan. Tämän ongelman välttämiseksi kannattaa käyttää tiheäsiirtotekniikkaa, jossa siirtonopeudet pysyvät alhaisina. Harvasiirtotekniikkaa käytettäessä siirtoputkiston sisäpintojen karhennukset vähentävät materiaalin pitkäjaksoista kulkeutumista kosketuksissa putkiston sisäpinnan kanssa. (Mills 2016, s. 79; Taghavivand, Elchamaa, Sowinski & Mehrani 2019, s. 242–244.)

Radioaktiivisten aineiden, kuten uraani- ja toriumyhdisteiden pneumasiirtoprosessi on pysyttävä toteuttamaan täysin tiiviisti ilman mitään kontaktia ulkoiseen ympäristöön. Tämä pätee sekä materiaaliin, että siirrossa käytettävään kantokaasuun, myös siirtotapahtuman toteutumisen jälkeen. Myrkyllisten aineiden, kuten useiden pölyvien materiaalien, kemianteollisuuden jauhemaisten aineiden tai lyijyn siirtoon pätee sama logiikka, sillä erotuksella että siirrossa käytettävä kaasu voidaan ei-radioaktiivisten aineiden kohdalla vapauttaa ympäristöön, mikäli se pystytään tekemään turvallisesti, perusteellisen suodatuksen jälkeen. Molemmilla tapauksissa pyritään käyttämään alipainejärjestelmää, jossa putkiston mahdollinen puhki kulumisen ei aiheuta maksimaalista materiaalivuotoa sille kuulumattomaan ympäristöön. Työympäristön ja turvallisuusasioiden tarkkaan kontrollointiin on syytä panostaa myrkyllisten ja radioaktiivisten aineiden käsittelyssä. (Mills 2016, s. 80.)

Hienojakoisten materiaalien, kuten kimröökkin, titaanioksidin, kemianteollisuuden jauhemaisten aineiden, jauhojen, kalkin ja tuhkan siirrossa materiaali voi kiinnittyä asteittain järjestelmän sisäisiin rakenteisiin aiheuttaen tukoksen. Tätä voidaan välttää käyttämällä joustavaa putkistoratkaisua, esimerkiksi tekstiili- tai teräsvahvisteisia kumiputkia, joihin kohdistettavalla säännöllisellä liikkeellä estetään aineen pakkautuminen sitä siirrettäessä. Myös jäykkää putkistoa voidaan harkita, jos sen rakenne suunnitellaan mahdollistamaan materiaalin ajoittainen fluidisointi. (Mills 2016, s. 80.)

Diplomityön kohdeyrityksen markkinointimateriaali sisältää tiedon yleisimmistä aineista, joiden kanssa pneumaattista materiaalinkäsittelyä voidaan yrityksen mukaan hyödyntää. Nämä kiintoaineet on listattu kuvassa 4.



Kuva 4. Pneumaattiseen materiaalinkäsittelyyn soveltuvat yleisimmät kiintoaineet (Laitex Oy, 2022).

2.6 Järjestelmän komponentit

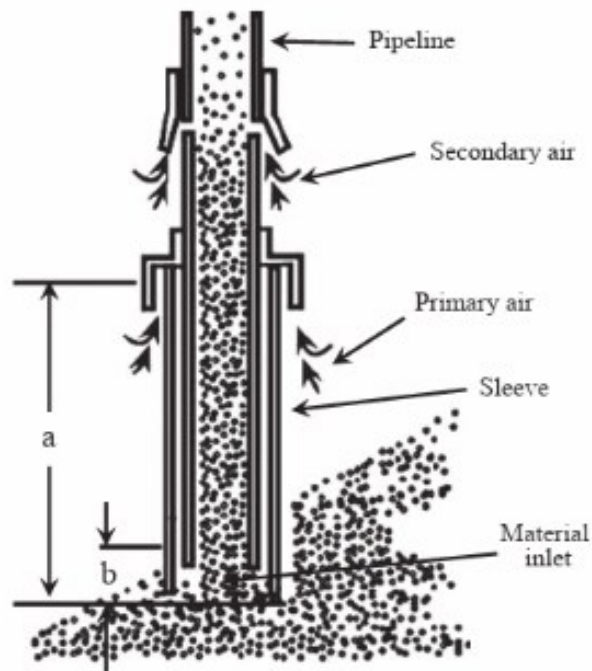
Kuvassa 2. esitellyn yksinkertaistetun kaavion perusteella pneumasiirto vaikuttaisi olevan peruseriaatteiltaan melko yksiselitteinen materiaalinkäsittelytekniikan laji, mutta käytännössä toteutettuna sen toimintatapaan ja laitteistorakenteisiin löytyy monia erilaisia vaihtoehtoisia toteutuskonfiguraatioita. Laitteiston rakenne alkaa materiaalin syötöstä, jossa siirrettävä materiaali yhdistetään käytettävän kantokaasun kanssa. Käytettävä kantokaasu painistetaan erillisen laitteiston avulla ennen sen siirtymistä järjestelmään. Materiaalin ja kantokaasun seos siirtyy siirtoputkistoa pitkin vastaanottoon, jossa materiaali ja kantokaasu yleensä erotetaan toisistaan. Siirretty materiaali jää vastaanotossa sille kuuluvaan lokaatioon ja käytetty kantokaasu vapautuu ilmaan tai suljetun järjestelmän kohdalla se jatkaa kiertoaan systeemissä.

2.6.1 Materiaalinsyöttö

Materiaalin syöttöjärjestelmä on oleellinen osa pneumasiirtolaitteistoa, koska sen avulla tehdään pääasiallinen käsiteltävän aineen annostelu siirtoputkistoon määritellyllä sekvenssillä.

Aine yhdistetään syöttöjärjestelmän avulla käytettävään kantokaasuun, joka mahdollistaa aineen siirtymisen pisteestä toiseen. Syöttöjärjestelmät voidaan jakaa käytettävän paineistustason mukaan kolmeen eri kategoriaan eli matala-, keski- ja korkeapaineisiin järjestelmiin.

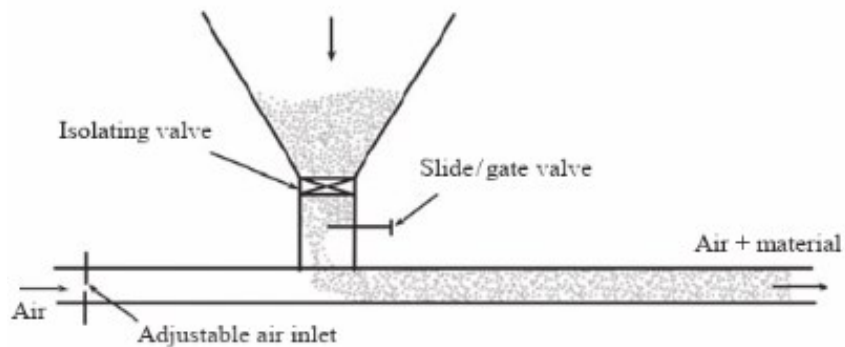
Matalapaineiset materiaalin syöttölaitteistot soveltuvat järjestelmiin, jotka operoivat alipaineen ja n. 1 bar ylipaineen välillä. Alipaineisissa pneumasiirtojärjestelmissä materiaalin syöttö siirtoputkistoon voidaan toteuttaa erilaisten imusuulakkeiden avulla, kun materiaalia siirretään avoimesta varastosta, jossa materiaalikerrostuman pinta on näkyvillä. Yksinkertaisin esimerkki mainitun kaltaisesta alipaineisesta pneumasiirtolaitteesta on normaali kotitalousimuri. Materiaalivirtauksen optimoimiseksi imusuulakkeen rakenteen on mahdollistettava prosessin ongelmaton toiminta, vaikka suulake olisi syvällä materiaalikerrostuman sisässä. Alipaineisen pneumasiirtojärjestelmän imusuulakkeen rakenne ja toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 5. (Mills 2016, s. 124.)



Kuva 5. Alipaineisen pneumasiirtolaitteiston imusuulake (Mills 2016).

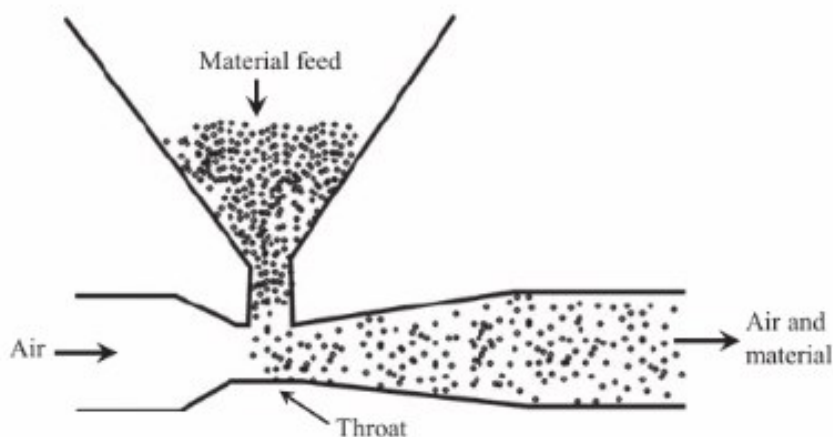
Riittävän paineistuksen saavuttamiseksi imusuulakkeessa on erilliset primääri- ja sekundaari-ilmantuonnit, joilla varmistetaan sujuva materiaalivirtaus ja vältetään ylimääräisten virtauspulssien syntyminen, kun materiaalia on jatkuvasti syötettävissä. (Mills 2016, s. 124.)

Alipaineisessa harvasiirtojärjestelmässä voidaan käyttää yhtenä materiaalin syöttötekniikan vaihtoehtona annosteluventtiiliä, joka annostelee materiaalin syöttösuppilosta alipaineistettuun siirtoputkistoon ilman niiden välissä sijaitsevia erityiskomponentteja. Tätä rakennetta käytettäessä annostelun tarkka kontrollointi on haastavaa, mutta rakenteensa yksinkertaisuuden vuoksi se toimii kustannustehokkaana vaihtoehtona esimerkiksi hiilivoimaloissa, joissa palamisen lopputuotteena syntynyttä tuhkaa täytyy siirtää useista eri kohteista yhteen lokaatioon. Annosteluventtiilisyysteemi on havainnollistettu kuvassa 6. (Mills 2016, s. 127.)



Kuva 6. Alipaineisen pneumasiirtojärjestelmän materiaalin annostelu venttiilin avulla (Mills 2016).

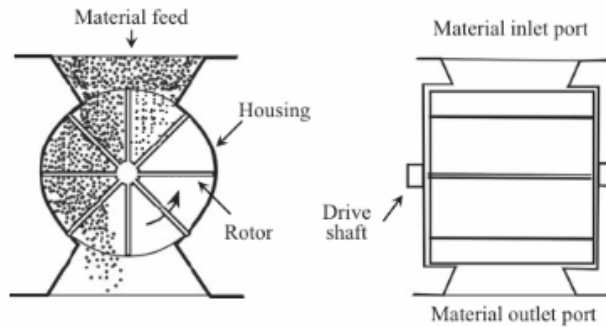
Bernoullin lain venturi-ilmiöön perustuvaa venturisyötintä eli ejektoria, jossa paine-ero syntyy kaasun nopeuden kiihtyessä ja sen paineen laskiessa kapenevassa putkessa käytetään yleisesti pneumaattisessa materiaalin harvasiirrossa. Kuva 7. havainnollistaa venturisyöttimen toimintaperiaatteen.



Kuva 7. Venturisyöttimen toimintaperiaate ja yksinkertaistettu rakennemalli (Mills 2016).

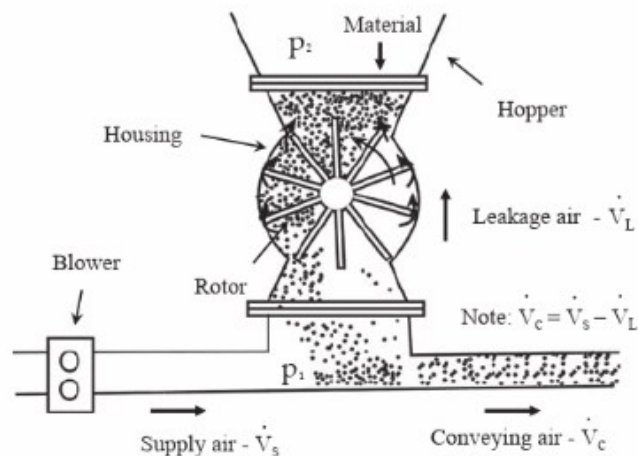
Venturisyöttimen käyttö soveltuu erityisesti jatkuvatoimiseen harvasiirtoon, ja sitä hyödynnettäessä vältetään käyttämästä materiaalia repiviä syöttölaitteiston osia, kuten sulku- tai ruuvisyöttimiä. Tämän takia venturisyötin sopii herkästi hajoaville materiaaleille, joiden käsittelyssä pyritään halutun raekoon säilyttämiseen. Yksinkertaisen perusrakenteensa vuoksi se on myös kustannustehokkaampi vaihtoehto kuin edellä mainitut erilliset liikkuvia osia sisältävät syöttimet, mutta toisaalta sitä käytettäessä materiaalin annostelun säätäminen ja kontrollointi vaikeutuvat. Materiaalivirtaus syöttösuppilosta venturisyöttimelle aiheutuu lähinnä painovoiman ja mahdollisten fluidisointirakenteiden avulla, joten käsiteltävän aineen on oltava ominaisuuksiltaan riittävän juoksevaa. Kohesiivisten tai kosteiden materiaalien käyttäminen venturitekniikkaan pohjautuvassa materiaalinsyötössä muodostuu haasteelliseksi, aineen pakkautumisen aiheuttaessa tukoksen järjestelmään.

Matalapaineisissa järjestelmissä materiaalia syöttävänä rakenteena voidaan käyttää myös sulkusyöttintä, jossa teräsrungon sisällä oleva roottori syöttää materiaalia siirtoputkistoon annoksittain aksiaalirotaation avulla. Sulkusyöttintä voidaan käyttää myös yhdessä venturisyöttimen kanssa. Sulkusyöttimen perusrakenne on esitelty kuvassa 8.



Kuva 8. Sulkusyöttimen rakenne ja toimintaperiaate (Mills 2016).

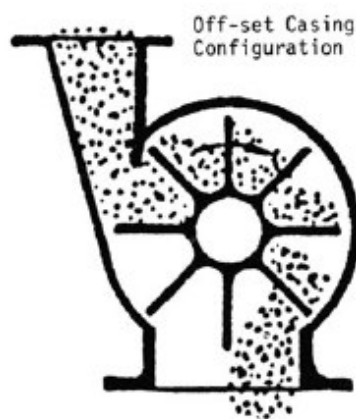
Sulkusyötinperustainen materiaalinsyöttö sopii erityisesti aineille, jotka eivät ole erityisen kuluttavia. Abrasiivisiä materiaaleja käytettäessä sulkusyöttimen osat voivat kulua nopeasti, sen rakenteesta ja materiaalia kierrättävästä toimintaperiaatteesta johtuen. Sulkusyöttimestä käytetään myös englannin kielistä nimitystä ”air lock” eli se toimii useissa järjestelmissä materiaalinsyötön lisäksi järjestelmän tiivistävänä ilmalukkona. Ylipainejärjestelmissä, joissa järjestelmän paineistus tapahtuu ennen sulkusyötintä, sen ylä- ja alapuolen välillä vallitsee paine-ero, ja jos sulkusyöttimen rakenteet eivät pysy tiiviinä, aiheutuu rakenteisiin abrasiivisen kulumisen lisäksi myös eroosiivista kulumista. Ylipaineisen harvasiirtojärjestelmän materiaalinsyöttö sulkusyöttimellä, ja virtauksen suunnat järjestelmässä on havainnollistettu kuvassa 9. (Mills 2016, s. 109; Shah 2017, s. 79–82.)



Kuva 9. Ylipaineisen harvasiirtojärjestelmän materiaalinsyöttö sulkusyöttimellä (Mills 2016).

Käytettäessä sulkusyötintä pneumaattisen kuljetinjärjestelmän syöttävänä komponenttina, on varmistuttava sen maksimaalisesta tiiveydestä. Mikään sulkusyötin ei ole täysin tiivis, joten tiiveyden maksimointi on tehtävä mahdollisimman huolellisesti. Laitteen rakenteeseen voidaan suunnitella suodattimilla varustettuja yhteitä, joista roottorin tyhjiä taskujen mukana kulkeutuva kaasu voidaan ohjata ulos järjestelmästä. Roottorin akseleiden laakeroinnit sulkusyöttimen päädyissä tulee toteuttaa perusteellisella tiivistyksellä. Aksiaali- ja päittäisvälykset roottorin ja rungon välillä tulee toteuttaa mahdollisimman pienenä niin, että sulkusyöttimen ongelmattomalle toiminnalle ei synny estettä. (Klinzing et al. 2010, s. 246.)

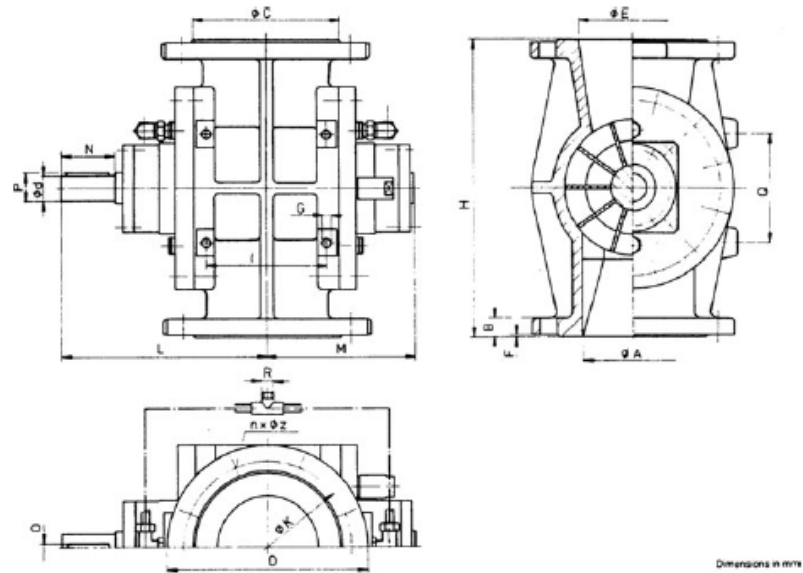
Herkästi hajoavia materiaaleja käsitellessä voidaan käyttää syöttölaitteiston komponenttina ns. offset-sulkusyötintä, jossa ylä- ja alapuoliset laipat eivät ole kohtisuorassa toisiinsa nähden. Tällöin materiaali syötetään sulkusyöttimen rakenteessa epäkeskeisesti sijaitsevaan syöttölokeroon, jolloin materiaaliin ei kohdistu niin herkästi sulkusyöttimen repivien osien aiheuttamaa rasiutusta, syötön tullessa enemmän horisontaalisuuntaisena. Offset-sulkusyöttimen rakenne on havainnollistettu kuvassa 10. (Mills 2016, s. 110.)



Kuva 10. Offset-sulkusyöttimen rakenne (Klinzing et al. 2010).

Koska sulkusyötin on yksi yleisimmistä syöttävistä komponenteista pneumaattisessa materiaalinsiirrossa, jossa tavoitteena on järjestelmän tiiveys, on sulkusyöttinten tuotekehityksessä saavutettu useita erilaisia kaupallistettuja konfiguraatioita. Keskipaineiseen pneumaattiin siirtoteknologiaan on kehitetty myös korkeapainesulkusyötin, jonka käytön matala energiankulutus nousee eduksi verrattaessa muihin keskipaineisten järjestelmien

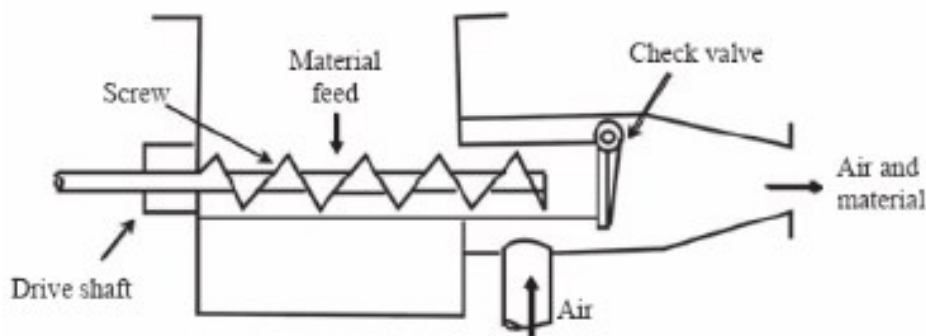
syöttölaitteistoihin. Korkeapainesulkusyöttimen rakenne on havainnollistettu kuvassa 11. (Mills 2016, s. 117; Klinzing et al. 2010, s. 263.)



Kuva 11. Korkeapainesulkusyöttimen rakenne (Klinzing et al. 2010).

Korkeapainesulkusyöttimellä voidaan korvata perinteinen sulkusyötin myös matalapaineisissa järjestelmissä, koska sen tiiveysominaisuudet ovat verrokkiaan paremmat. Käytettäessä lokhopperia eli paineistettua tiivistä materiaalinsyöttösuppiloa, voidaan korkeapainesulkusyötintä käyttää yli 4 barin paineella operoivissa järjestelmissä, ja ilman lokhopperia käytettäessä paineet voivat korkeimmillaan olla 3–4 barin välillä. (Mills 2016, s. 117.)

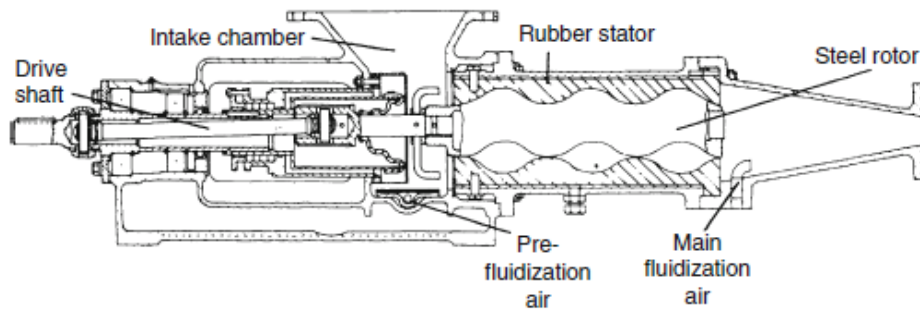
Sulkusyöttimen ohella toinen matalapaineisiin pneumasiirtojärjestelmiin soveltuva materiaalinsyöttölaite on ruuvisyötin, joka toimii tavanomaisen ruuvikuljettimen tavoin, sillä erolla, että ruuvisyöttimessä vain siirtokairan ensiöpään akseli on tuettu laakeroinnilla, ja materiaalia järjestelmään syöttävä pää on vapaana järjestelmän sisäisissä rakenteissa. Tyypillinen ruuvisyöttimen rakenne pneumaattisessa materiaalinsiirtojärjestelmässä on havainnollistettu kuvassa 12. (Mills 2016, s. 119.)



Kuva 12. Ruuvisyötin pneumasiirtojärjestelmän syöttävänä komponenttina (Mills 2016).

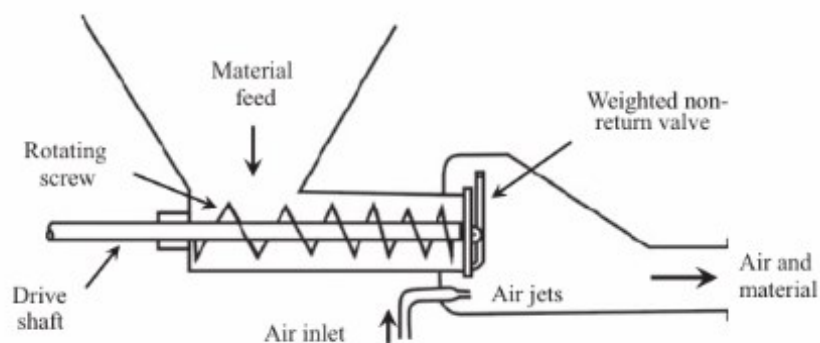
Ruuvisyötin etuna kuvatussa käyttöympäristössä on mahdollisuus suhteellisen tarkkaan materiaalin annosteluun. Ruuvisyötintä käytetään useimmin vain alipaineisissa pneumasiirtojärjestelmissä, sillä sen tiiveysominaisuuksien puute voi muodostua haasteeksi ylipaineisissa järjestelmissä. Lokhopperin kanssa käytettäessä, sitä voidaan hyödyntää myös ylipaineisissa järjestelmissä, ja tietyin rakennemuutoksinkin jopa korkeapaineisissa ympäristöissä. (Mills 2016, s. 119.)

Keskipaineisissa pneumasiirtojärjestelmissä, jotka operoivat yleisesti maksimissaan 3 barin paineella, materiaalin syöttö voidaan toteuttaa korkeapainesulkusyötin lisäksi materiaalin syrjäyttämiseen perustuvalla epäkeskoruuvipumpulla eli mohnopumpulla. Mohnopumppu soveltuu erityisesti hienojakoisten jauheiden jatkuvaan pneumasiirtoon, sillä ne eivät ole aineina erityisen hajoavia repivien syöttölaitekomponenttien käsittelyssä, ja niillä on yleensä hyvät paineensäilytysominaisuudet eli niitä käytettäessä järjestelmä pysyy mahdollisimman tiiviinä. Mohnopumpussa materiaali esifluidisoidaan ennen sen syöttämistä teräksisen epäkeskoruuvin siirrettäväksi. Ruuvisyötön jälkeen materiaali fluidisoidaan uudelleen järjestelmän kantokaasulla, josta materiaalin ja kaasun sekoitus jatkaa matkaansa siirtoputkistoa pitkin vastaanottoon. Mohnopumpun rakenne ja toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 13. (Klinzing et al. 2010, s. 261–262.)



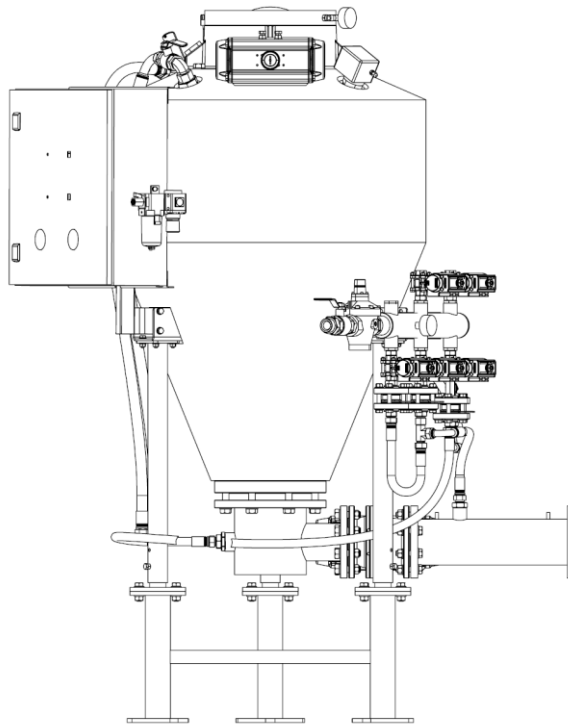
Kuva 13. Epäkeskoruuvipumppu eli Mohnopumppu (Klinzing et al. 2010).

Kolmas keskipaineisessa pneumasiirtojärjestelmässä käytetty materiaalin syöttölaite on Fuller-Kinyon pumppu, josta on kehitetty monia erilaisia versioita. Heikon energiatehokkuutensa takia sen käytöstä on kuitenkin nykypäivänä enenevässä määrin luovuttu. Fuller-Kinyon pumpussa materiaali siirretään siirtoputkistoon ruuvin avulla, jonka kierretiheys pienenee ruuvin edetessä. Kierretihenemän avulla jauhemaisesta materiaalista saadaan tiivistä, joka edesauttaa järjestelmän kokonaistiiveyttä. Ruuvin syöttöpäässä materiaali siirtyy yksisuuntaisen venttiilin läpi paineistettuun putkistoon, jota pitkin materiaali siirtyy vastaanottoon. Kuva 14 havainnollistaa Fuller-Kinyon-tyyppisen syöttölaitteiston rakenteen ja toimintaperiaatteen. (Mills 2016, s. 119.)



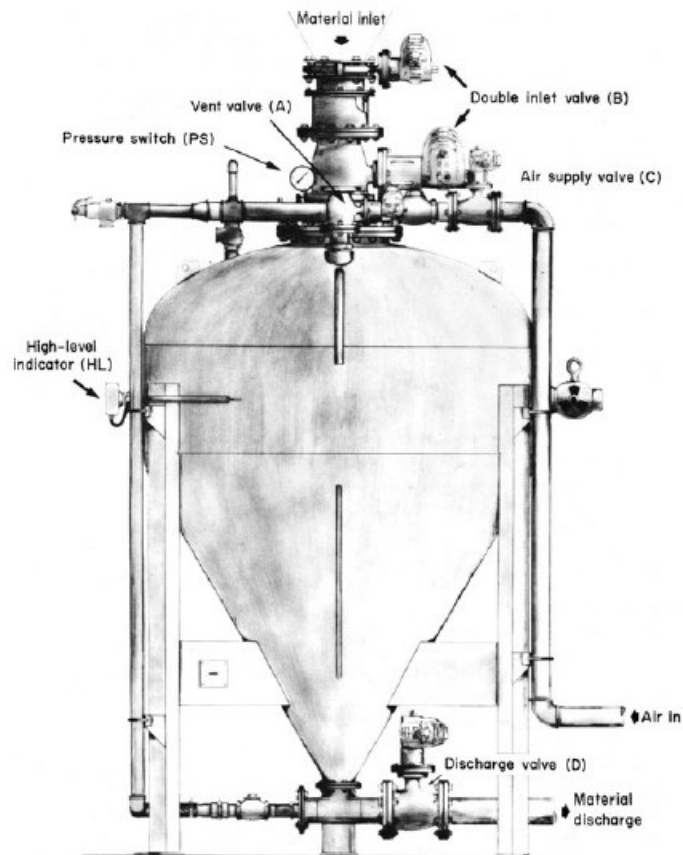
Kuva 14. Fuller-Kinyon pumpun rakenne ja toimintaperiaate (Mills 2016).

Siirryttäessä keskipaineisista pneumasiirtojärjestelmistä korkeapaineisiin eli yleisimmin 4–14 barin paineistuksella operoiviin laitteistoihin, käytetään materiaalin syöttämiseen erillistä paineistettavaa lähetyssäiliötä. Kuvassa 15. on paineistettuun lähetyssäiliöön perustuva pneunalähetin varusteluineen.



Kuva 15. Paineistettavaan lähetyssäiliöön perustuva pohjalta purkava pneunalähetin (Laitex Oy 2023).

Paineistettava lähetyssäiliö sopii erityisesti korkeapaineisiin tiheäsiirtojärjestelmiin, joissa siirtomatkat muodostuvat pitkiksi. Se on yleensä rakenteeltaan kuvan 15. mukaisesti kartiomaisen pohjan ja pallomaisen yläosan muodostama painesäiliö, jossa on materiaalin siirron kontrolloinnin mahdollistavat virtaustuonnit, fluidisointirakenteet ja venttiilit. Käsiteltävä materiaali voidaan syöttää lähetyssäiliöstä putkistoon sen pohjasta tai yläpinnalta, joista pohjasta syöttävät versiot ovat yleisimmin käytettyjä. Paineistetun pneunalähtetimen toimintaperiaate on esitelty kuvassa 16. (Klinzing et al. 2010, s. 269; Shah 2017, s. 83–85.)



Kuva 16. Paineistettava lähetyssäiliö pneumasiirron materiaalinsyöttöjärjestelmänä (Klinzing et al. 2010).

Kuvan 16 paineistettava lähetyssäiliö on suunniteltu toimimaan täysin automaattisesti tietyn syklin mukaan. Siirtosykli alkaa säiliön paineistuksen poistamisella, joka tapahtuu ilmaventtiilin (A) kautta. Tämän jälkeen siirrettävä materiaali syötetään syöttösuppilosta järjestelmään materiaalia annostelevan venttiilin (B) avulla niin kauan, kunnes materiaalin pinnan tasoa mittaava anturi (HL) antaa järjestelmälle tiedon lähetyssäiliön riittävästä täyttöasteesta. Kun haluttu materiaalierä on siirretty säiliöön ja kaikki venttiilit on suljettu, säiliö paineistetaan määrättyyn paineeseen kantokaasun eli kuvan tapauksessa paineistetun ilman avulla ilmayhteen (C) kautta. Paineenilmaisinanturin saadessa tiedon riittävästä paineistuksesta, purkuventtiili (D) aukeaa ja materiaali siirtyy paineistettuna siirtoputkistoon. Järjestelmän ilmantuontia jatketaan edelleen siirtotapahtuman edetessä. Kun järjestelmän paine laskee siirtotapahtuman toteutumisen myötä, alkaa edellä kuvattu toimintasykli jälleen alusta, toteuttaen materiaalin korkeapaineisen annossiirron lokaatiosta toiseen. (Klinzing et al. 2010, s. 270.)

2.6.2 Venttiilit

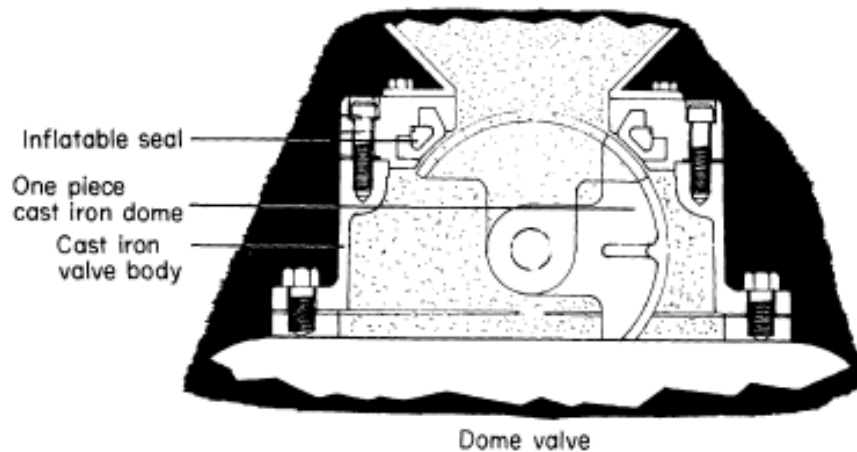
Pyrittäessä pneumasiirtolaitteiston tiiveyteen, on erilaisilla venttiileillä merkittävä rooli järjestelmän toiminnan kannalta. Erilaisia venttiileitä käytetään esimerkiksi materiaalin annostelussa laitteiston lähetyjärjestelmään, materiaalivirtauksen ohjaamisessa tai materiaalin vapauttamisessa lähetyksestä siirtoputkistoon.

Pneumasiirtolaitteiston putkilinjassa on yleensä materiaalivirtauksen vapauttamiseen tai pysäyttämiseen tarkoitettu linjaventtiili. Palloventtiili on yleinen vaihtoehto mainittuun tarkoitukseen, kun käsitellään herkästi hajoavia tai kuumia materiaaleja. Rakenteensa ansiosta sillä mahdollistetaan venttiilin sisähalkaisijan tarkka mitoitus putkiston sisähalkaisijan kanssa yhteneväiseksi. Tämä edesauttaa materiaalivirtauksen sujuvuutta putkistossa. (Klinzing et al. 2010, s. 445.)

Palloventtiili ei sovellu erityisen hyvin hienojakoisten kuluttavien aineiden, kuten esimerkiksi hiekan siirtoon, sillä venttiilin rungon ja sen sisällä olevan liikkuvan pallon väliin pääsee kuluttavaa pölyä, joka aiheuttaa vaurioita ja venttiili menettää tiiveysominaisuutensa. Ratkaisuna mainittuun ongelmaan voidaan käyttää puristusventtiiliä, jonka sisällä olevaa kumi- tai polyuretaaniputkea supistetaan paineilman avulla niin, että putken sisäpinnat koskettavat toisiaan ja näin toimiessaan venttiili on suljettu. Puristusventtiilin rakenne ei mahdollista kuluttavan pölyn pääsemistä sen toiminnan kannalta kriittisiin kohteisiin, kuten palloventtiilissä. Toisaalta puristusventtiilin sisäosat ovat herkemmin kuluvia, joka lisää vaadittavan kunnossapidon määrää niiden osalta. Tästä syystä ne on sijoitettava järjestelmässä helposti saavutettaviin sijainteihin. (Mills 2016, s. 190.)

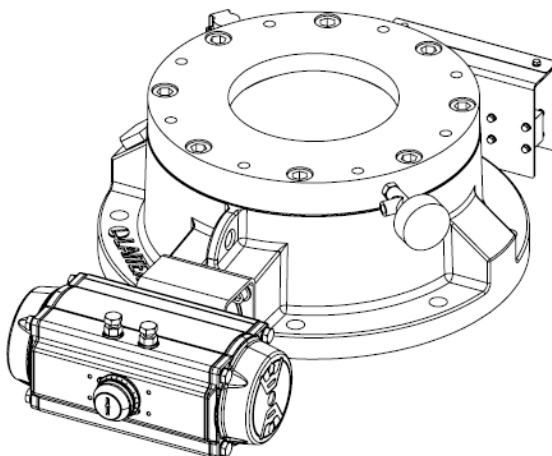
Materiaalin annostelussa ja virtauksen kontrolloinnissa voidaan käyttää iirisventtiiliä, jonka aukon kokoa voidaan mekaanisesti säätää haluttuun suuruuteen. Iirisventtiilin sisäosat eivät ole materiaalivirtauksen kanssa kosketuksissa, kun venttiili on täysin avattu, jolloin sitä voidaan käyttää myös kuluttavien materiaalien käsittelyssä. Sisäisinä komponentteina venttiilissä käytetään useita erilaisia kangas- tai muovivuorauksia, jotka ovat kuluvia erityisesti silloin, kun venttiiliä käytetään vain osittain avattuna. Toisaalta iirisventtiilin kunnossapito on yksinkertaista ja kustannustehokasta, verrattuna muihin verrokkeihinsa. (Klinzing et al. 2010, s. 446.)

Yksi yleisistä pneumasiirtolaitteiston osista on venttiili, joka annostelee materiaalin pneuma-lähettimelle, esimerkiksi paineistettuun pneuma-lähetinsäiliöön. Kun järjestelmältä vaaditaan tiiveyttä korkeita kuljetuspaineita käytettäessä, on paineistettavan lähetys-säiliön ja syötösuppilon välissä useimmin kupoliventtiili, jonka rakenne on havainnollistettu kuvassa 17.



Kuva 17. Kupoliventtiilin rakenne (Klinzing et al. 2010).

Kupoliventtiilin luisti on nimensä mukaisesti kupolimainen, puolipallon muotoinen, kulu-tusta kestävästä materiaalista valmistettu teräväreunainen komponentti, joka liikkuu venttii-lin rungon sisällä aksiaalirotaation avulla, yleensä 0–90 asteen kääntökulman välillä. Sen teräväreunainen rakenne ja liikerata mahdollistavat materiaalivirtauksen leikkaamisen ja su-juvan keskeyttämisen kesken virtauksen. Kun kupoliventtiili on suljettu ja materiaalin läpi-virtaus on keskeytynyt, käytetään venttiilin tiivistämiseksi paineilman avulla toimivaa pai-suvaa tiivistystä. Venttiilin kupolissa voidaan hyödyntää myös sisäisiä nestejäähdytyska-navia, jotka mahdollistavat kuumien aineiden käytön sen kanssa. Kuvassa 18 on esimerkki Laitex-kupoliventtiilistä, toimilaitteineen ja varusteluineen. (Shah 2017, s. 73.)



Kuva 18. Laitex DN200-kupoliventtiilikokoonpano Laitex PCL-pneumalähttimelle (Laitex Oy 2023).

Kustannustehokkaampi venttiilivaihtoehto materiaalin annostelulle pneumaattisen kuljetinjärjestelmän syöttölaitteistoon on kooltaan kompakti perhos- eli läppäventtiili, jossa venttiilin rungon sisällä oleva laippa on akseloitu keskikohdastaan siten, että akselin käännöllä laippa aukeaa ja materiaalivirtaus venttiilin läpi mahdollistuu. Perhosventtiilin käyttö ei sovellu kuluttaville aineille, sillä virtausta kontrolloiva laippa jää aina materiaalivirran kanssa samaan tilaan, jolloin niiden keskinäinen kontakti on väistämätön. Laipan sijainnin takia, täysin vapaa materiaalivirtaus venttiilin läpi ei ole mahdollista. (Mills 2016, s. 191.)

Kiekkovaihtoehto eli lautasventtiili toimii myös kustannustehokkaana ja kompaktimpana vaihtoehtona kupoliventtiilille pneumaattisen materiaalin siirron järjestelmissä. Lautasventtiilin rungon sisällä oleva laippa on tuettu akselilla, jota radiaalisesti kääntämällä laippa siirtyy sivuun venttiilin rungon aukolta, jolloin venttiili on auki. Toisin kuin läppäventtiilin kohdalla, lautasventtiilin laippa siirtyy kokonaan pois materiaalivirtauksesta eli se ei altistu suoraan kontaktiin siirrettävän aineen kanssa. Lautasventtiili suljetaan kääntämällä akselilla oleva lautanen takaisin venttiilin rungon suuaukolle, jossa se painuu tiivistettä vasten, tiivistäen venttiilirakenteen. (Klinzing et al. 2010, s. 449.)

Levyluistiventtiiliä voidaan käyttää korkeapaineisissa pneumasiirtosovelluksissa sen tiiveysominaisuuksien ansiosta. Levyluistiventtiili sopii myös kuluttavien aineiden käsittelyyn. Venttiilin rungon sisällä on veitsen tavoin materiaalivirtausta leikkaava ja säätelevä

luistilevy, jonka asemaa venttiilin aukkojen suhteen voidaan muuttaa venttiilin avaamiseksi tai sulkemiseksi. (Klinzing et al. 2010, s. 449.)

Pneumaattisen materiaalinsiirtojärjestelmän kantokaasun tuontia ja siirron virtausta säädetään usein venttiilien avulla, etenkin paineistettua lähetyssäiliötä käytettäessä. Kaasuvirtauksen avulla materiaali saadaan liikkumaan putkistossa, mutta sen avulla voidaan myös optimoida siirtotapahtumaa halutunlaiseksi ja estää materiaalin pakkautuminen järjestelmän rakenteisiin käyttämällä fluidisointiyhteitä. Tätä ilmavirtausten optimointia tehdään usein pneumaattisin toimilaittein ohjatuilla pallo- tai läppäventtiileillä, joiden kontrollointi tapahtuu erillisen systeemin ohjausyksikön kautta. Esimerkki erilaisten venttiilien käytöstä pneumasiirtolaitteiston paineistettavassa lähettimessä on havainnollistettu liitteessä 1.

2.6.3 Siirtoputkisto

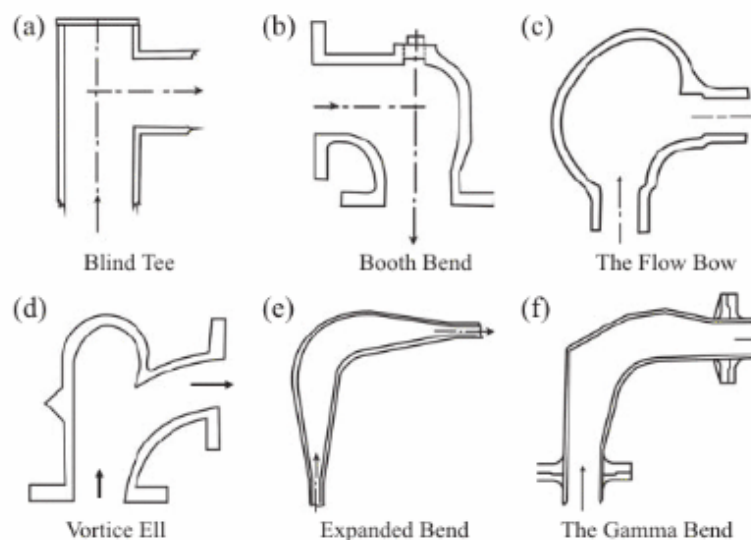
Pneumasiirrosta kiintoaine siirtyy lähetyksestä vastaanottoon siirtoputkistoa pitkin, johon liittyvillä valinnoilla on merkittävä rooli siirron onnistumisen kannalta. Putkiston valinta vaikuttaa oleellisesti esimerkiksi materiaalinsyöttölaitteiston mitoittamiseen. Putkilinjat koostuvat usein suorista horisontaali- tai vertikaalisuuntaisista putkista sekä niiden välisistä putkikäyristä, joiden avulla siirtosuuntaa voidaan muuttaa. Putkistossa voidaan käyttää myös erilaisia virtausta jakavia venttiileitä, esimerkiksi yhden putkilinjan järjestelmissä, joissa on useita materiaalin vastaanottoja. (Klinzing et al. 2010, s. 8.)

Pneumasiirtolaitteiston putkistot valmistetaan usein erilaisista teräsmateriaaleista, joita voidaan muokata tai käsitellä käyttökohteen mukaan. Elintarvike- ja kemianteollisuudessa putket valmistetaan usein ruostumattomasta teräksestä, jolla estetään mahdollinen korroosion aiheuttama siirrettävien aineiden kontaminoituminen. Siirrettäessä aineita, jotka eivät ole erityisen kuluttavia, voidaan käyttää ohutseinäisiä putkia, joiden avulla järjestelmän kokonaiskustannukset jäävät pienemmiksi kuin raskarakenteisemmilla putkilla, joissa seinämän ainevahvuus on suurempi. Ohuen ainevahvuuden täyttäessä järjestelmän vaatimukset, voidaan käyttää esimerkiksi alumiiniputkia, jotka ovat tiheydeltään teräsputkistojen pienempiä, ja näin ollen keveytensä vuoksi helpompia käsitellä järjestelmän kokoonpanossa tai kunnossapidollisissa tilanteissa. (Mills 2016, s. 185.)

Pneumasiirtojärjestelmän putkilinjan ensimmäisen horisontaalisen putken on oltava riittävän pitkä, jotta siirrettävän aineen nopeus saadaan kiihdytettyä siirtotapahtuman onnistumisen kannalta riittävälle tasolle. Vaikka putkistoon sijoitettavilla mutkilla saadaan järjestelmän toimintaan erityistä joustavuutta, on mutkilla merkittävä vaikutus materiaalinsiirron tehokkuuteen. Jokainen siirrosta käytettävä mutka aiheuttaa paineistuksen laskua ja lisää järjestelmän kokonaisresistanssia, ja nämä vaikutukset voivat epäsuorasti johtaa järjestelmän tukkeutumiseen. (Klinzing et al. 2010, s. 18; Mills 2016, s. 186–187.)

Putkiston kulumisessa mutkat ovat erityisasemassa, sillä niissä materiaali käyttäytyy erityisen kuluttavasti. Tästä syystä mutkien käyrät valmistetaan usein paremmin kulutusta kestävästä materiaalista suuremmin ainevahvuuksin, vaikka käyrän sisähalkaisija pysyisikin yhdenmukaisena putkilinjan sisähalkaisijan kanssa. Myös käyrien sisäiset pinnoitukset esimerkiksi basaltti-, valurauta-, kumi- tai alumiinioksidimateriaaleilla ovat yleisiä kulutuksenkestoa lisääviä toimia pneumasiirtoteknologiassa. (Mills 2016, s. 188.)

Kuluttavien aineiden siirroissa voidaan käyttää myös geometrialtaan erityisiä käyriä, joissa yleisenä toimintaperiaatteena on siirrettävän aineen kerääntyminen mutkan kulutuskuormitettuihin kohtiin siten, että itse siirrettävä materiaali toimii ikään kuin mutkan pinnoitteena ottaen vastaan siirtyvän materiaalivirtauksen. Kuvatun kaltaisten erikoiskäyrien rakenteita on esitelty kuvassa 19. (Mills 2016, s. 188; Dhodapkar, Solt & Klinzing 2009, s. 54–55.)



Kuva 19. Pneumasiirtoputkiston erikoiskäyriä (Mills, 2016).

Materiaalin liian korkea siirtonopeus voi muodostua ongelmaksi pitkien siirtomatkojen korkeapainejärjestelmissä, joissa putkilinjat pysyvät sisähalkaisijaltaan samana koko siirtomatkan. Bernoullin lakiin perustuen, siirrossa tapahtuva virtauksen painealenema aiheuttaa kasvua fluidin aineen virtausnopeudelle. Ongelman ratkaisemiseksi pitkien siirtomatkojen järjestelmissä suositetaan asteittaisesti sisähalkaisijaltaan suurenevaa putkistoa, jossa kaasun painetta saadaan putken sisähalkaisijan muutoksella kasvatettua siten, että virtausnopeus pienenee sopivaksi siirtotapahtuman onnistumisen kannalta. Asteittain sisähalkaisijaltaan kasvavan putkiston sijaan voidaan käyttää myös erityistä virtaus-ekonomaiseria, jonka rakenteessa olevan sisäisen sylinterin ja paineenalennusyhteiden avulla putkiston virtaamaa saadaan paikallisesti hidastettua. (Mills 2016, s. 189; Klinzing et al. 2010, s. 352.)

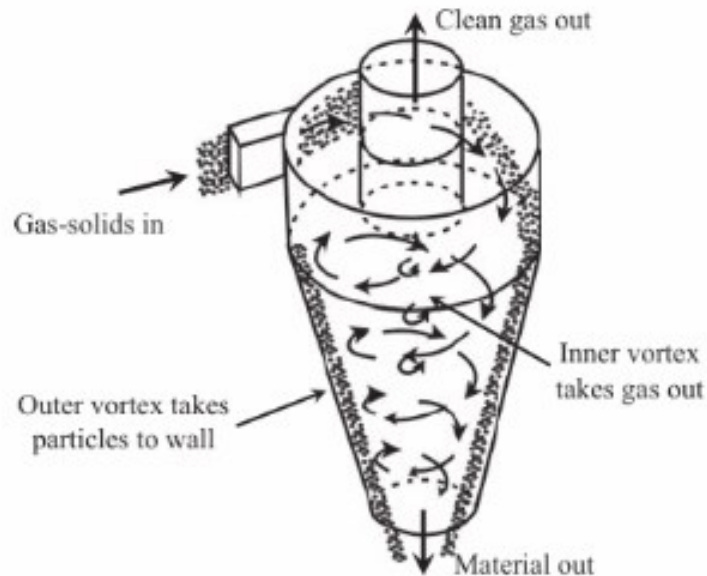
2.6.4 Materiaalin vastaanotto

Materiaalin vastaanotolla on pneumaattisessa siirtojärjestelmässä oleellinen rooli, sillä sen avulla siirrettävä kiintoaine ja kantokaasu erotellaan toisistaan. Erottelun on toimittava sujuvasti, jotta mahdollisimman suuri määrä siirretystä materiaalista saadaan varastoitua seuraavaa käyttökohdetta varten. Materiaalin vastaanoton on myös estettävä putkilinjasta purkautuvan aineen pölyäminen järjestelmän ulkopuolella, etenkin myrkyllisiä tai radioaktiivisia aineita käsiteltäessä. (Mills 2016, s. 170.)

Pneumasiirtolaitteistojen toiminnassa ilmenee aina painehäviöitä, joten materiaalin vastaanotto tulee suunnitella siten että sillä ei ole liian suurta kasvattavaa vaikutusta painehäviöiden kokonaismäärään. Myös kunnossapitofrekvenssillä on oma vaikutuksensa painehäviöiden syntymiseen, sillä esimerkiksi erilaisten suodatuslaitteiden kulutusosien heikko kunto voi vaikuttaa merkittävästi syntyvän painehäviön suuruuteen. (Mills 2016 s. 171.)

Suurten raekokojen kiintoaineilla materiaalin erottelu kantokaasusta voidaan toteuttaa yksinkertaisimmillaan painovoimaisena, jolloin vastaanottoon saapuva kantokaasuvirtaus siirtyy suodatukseen, ja siirretty kiintoaine tippuu vastaanottosäiliöön. Pienemmän raekoon kiintoaineilla tämä ei välttämättä ole mahdollista, sillä kevyet partikkelit siirtyvät herkästi kantokaasun mukana edelleen putkilinjan päättymisen jälkeen. Näissä tapauksissa materiaalin erotteluun kaasusta voidaan käyttää sykklonia, ja sen yhteydessä olevaa

kiintoainepartikkelisuodatinta. Syklonin toimintaperiaate on havainnollistettu kuvassa 20. (Mills 2016, s. 170; Shah 2017, s. 97.)

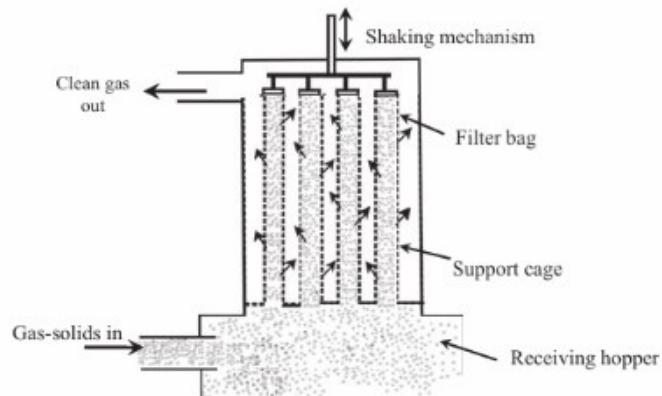


Kuva 20. Syklonin rakenne ja toimintaperiaate (Mills 2016).

Jos siirrettävä materiaali on raekooltaan erityisen hienojakoista, voidaan sitä erotella kanto-kaasusta erillisten erottelulaitteiden, kuten sähkösuodattimen tai kaasupesurin avulla. Näiden järjestelmien mukanaan tuomat kokonaiskustannukset ovat kuitenkin merkittäviä, joten ensisijaisesti kannattaa panostaa siirtotekniikan suunnitteluun ja optimointiin siten, että siirrettävä aine hajoaa ja pölyää mahdollisimman vähän. Materiaalin vastaanoton pölynkäsittelyn haasteisiin voidaan etsiä ratkaisukeinoja testauksen kautta, kun käytössä on siihen soveltuva testauslaitteisto. (Mills 2016, s. 170–172.)

Kantokaasun ja siirrettävän aineen erottelussa käytetään usein suodatusta, joka toteutetaan erilaisilla suodatinmateriaaleilla. Näitä materiaaleja ovat villat, lasikuitu tai erilaiset synteettiset kuidut, riippuen suodatettavasta aineesta ja sen ominaisuuksista. Myös kantokaasun lämpötilalla on oma vaikutuksensa suodatinmateriaalin valintaan, sillä kaikki kuidut eivät välttämättä kestä korkeita lämpötiloja. (Mills 2016, s. 177.)

Yksi tyypillisimmistä kantokaasun ja aineen erottelussa käytettävistä suodatuslaitteista on siilosuodatin, jonka sisällä on useita patruuna- tai pussisuodatinelementtejä. Pussielementti-perustainen siilosuodatin on esitelty kuvassa 21. (Mills 2016, s. 177.)



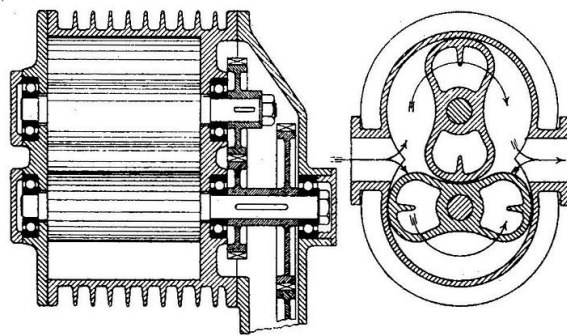
Kuva 21. Siilosuodattimen toimintaperiaate (Mills 2016).

Siilosuodattimen suodatinelementtien toimintaa voidaan tehostaa kohdistamalla niihin erilaisia voimia, esimerkiksi erillisen ravistusmekanismin tai erillisten ilmasuuttimien kautta tulevalle paineistetulle virtaukselle, joka on järjestelmän kaasuvirtaukseen nähden vastakkaisuuntainen. Näiden tekniikoiden avulla edistetään suodattimiin kerääntyneen materiaalin tippumista vastaanottosäiliöön. Materiaalin vastaanotossa voidaan käyttää myös erillisiä komponentteja tuottamaan korkean taajuuden ääniaaltoja, jotka tehostavat hienojakoisten ainepartikkelien erottelua kantokaasusta. (Mills 2016, s. 179; Klinzing et al. 2010, s. 399.)

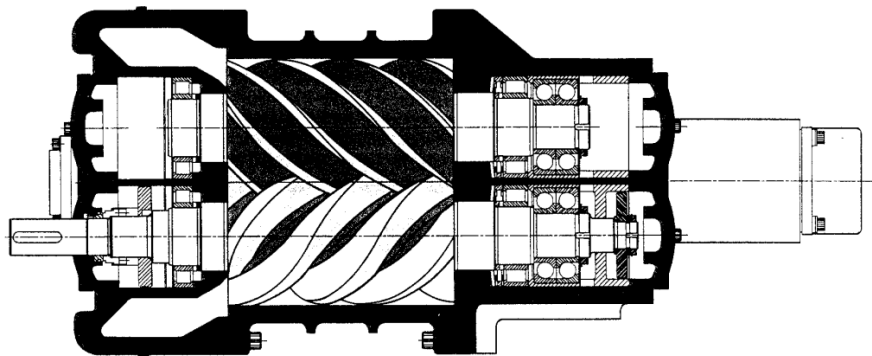
2.6.5 Järjestelmän paineistus

Kaasuvirtauksen synnyttäminen järjestelmään on pneumasiirtolaitteiston toiminnan ehto. Järjestelmän paineistukseen voidaan käyttää erilaisia kompressoreita, puhaltimia tai pumppuja sekä yli-, että alipaineen muodostuksessa. Näiden järjestelmien kanssa käytetään usein myös erilaisia kantokaasun kuivausmenetelmiä, sillä useiden siirrettävien kiintoainesten tapauksissa kosteudella voi olla haitallisia vaikutuksia siirtotapahtuman sujuvuuteen. (Klinzing et al. 2010, s. 6 & 37; Raksha, Bohomaz, Shcheka, Stefanov & Nesterenko 2018, s. 2.)

Yleisimmin käytettäviä pneumasiirtojärjestelmän paineistuslaitteita ovat erilaiset syrjäytyskompressorit, kuten mäntä- ja ruuvikompressorit. Nämä laitteet kykenevät synnyttämään pneumasiirtoon riittävän paineistuksen, vaikka ne ovat yleensä kokoluokaltaan suhteellisen kompakteja. Kiertomäntä- eli roots-kompressorin rakenne on havainnollistettu kuvassa 22 ja ruuvikompressorin rakenne on havainnollistettu kuvassa 23. (Mills 2016, s. 150; Klinzing et al. 2010, s. 38.)



Kuva 22. Kiertomäntäkompressorin rakenne (Ilfie & Sons LTD, 1935).



Kuva 23. Ruuvikompressorin rakenne (Fleming, Tang & Cook, 1998).

Edellä esiteltyjen kompressorityyppien paineistus perustuu kaasutilavuusvirran pienentämisen aiheuttamaan paineennousuun. Ruuvi- ja mäntäkompressoreiden rotaatiota tai aksiaalisuuntaista liikettä hyödyntävien kaasua paineistavien komponenttien muodot voivat

vaihdella eri kompressorivalmistajilla. Ruuvien ja mäntien lisäksi esimerkiksi poikkileikkaukseltaan erilaiset kynsimäiset akselit ovat mahdollisia.

Useimmissa pneumaattisen materiaalinkäsittelyn sovelluksissa suositellaan käytettäväksi öljytöntä paineistusteknologiaa, sillä useimpien siirrettävien aineiden kontaminoitumisriskit on minimoitava. Kompressoreissa käytettävä voiteluöljy voi siirtyä käytettävään kantokaasuun ja siten aiheuttaa haasteita materiaalin siirron sujuvuuteen takertumalla putkiston seinämiin, vaikka materiaalin kontaminoitumisen välttäminen ei olisikaan ensisijainen huolenaihe. Edellä esitellyt kompressorityypit soveltuvat kehityksen myötä myös voiteluaineettomiin sovelluksiin, joiden käyttö on erittäin yleistä jauhemaisten kiintoaineiden käsittelyssä. (Mills 2016, s. 163.)

Kantokaasun paineistuslaitteiston valintaan vaikuttavat etenkin siirtoon vaadittavan paineen taso ja siirrettävän aineen haluttu tilavuusvirtaama. Matalapainesiirtoon soveltuva sivukanaavapuhallin on havainnollistettu kuvassa 24.



Kuva 24. Regeneroiva CL-sarjan teollisuuspuhallin (Mapro International S.p.A., 2020).

Alhaisilla paineilla ja nopeilla kaasun virtausnopeuksilla toimiviin yli- ja alipaineharvasiirtoon voi riittää yksinkertainen ilmavirtauksen synnyttävä puhallin, kun taas korkeilla paineilla ja hitailla siirtonopeuksilla toimivat tiheäsiirtomenetelmät vaativat usein raskasrakenteisemmän kaasua paineistavan kompressorin toimiakseen. Järjestelmän paineistuksen oikeilla laitevalinnoilla on näin ollen merkittävä vaikutus koko järjestelmän energiatehokkuuteen ja kustannuksiin.

3 Toteutus

Pneumaattisen materiaalin siirron suunnittelussa voidaan käyttää useita erilaisia matemaattisia mallinnuksia ja kaavoja, joiden avulla voidaan ennustaa esimerkiksi materiaalin käyttäytymistä siirtotapahtuman aikana. Pneumasiirtolaitteiston suunnittelussa oleellisinta on kuitenkin käytännön kautta hankittu kokemus eri aineiden käyttäytymisestä, koska matemaattiset kaavat eivät pysty välttämättä huomioimaan kantokaasun ja aineen seoksen muutoksista aiheutuvia ominaisuuksia. Useimmat kaupallisten pneumasiirtolaitteistojen toimittajat ovat kehittäneet käyttöönsä erilaisia testauslaitteistoja, joilla voidaan testata eri aineiden soveltuvuutta pneumaattiseen siirtoon ja optimoida siirtotapahtuman parametreja niin, että siirtokokeissa hankittua tietoa voidaan käyttää hyväksi asiakkaalle valmistettavan laitteiston suunnittelussa ja käytössä. Koska testauslaitteistot ovat usein valmistettavia lopputuotteita pienikokoisempia, täytyy testeistä saatua tietoa usein skaalata ja sovittaa valmistettavan järjestelmän ominaisuuksien mukaan. (Mills 2016, s. 372; Bridle, Woodhead & Reed 1999, s. 85.)

Testauslaitteistojen putkistoissa käytetään usein mutkia, sillä niissä materiaalin vaikutukset putkistoon ja päinvastoin ovat siirtotapahtuman näkyvimpiä ilmiöitä. Koska testauslaitteistot ovat usein pienikokoisia, putkilinjat suhteellisen lyhyitä ja mutkien määrä kaupalliseen järjestelmään verrattuna suurempi, siirron toteutumisen kokonaisenergiavaatimukset saattavat nousta merkittävästi korkeammiksi, kun taas pitkillä minimimutkaisilla putkilinjoilla nämä vaatimukset eivät välttämättä nouse merkittävän korkeiksi. Tähän tietoon perustuen, energiavaatimusten näkökohta on syytä ottaa huomioon testauslaitteiston suunnittelussa. (Klinzing 2018, s. 80.)

Testauslaitteiston suunnittelussa on otettava huomioon jokaisen sen eri rakenneosien toiminta yksikkönä sekä näiden yksikköjen yhteistoiminta kokonaisuutena, jotta laitteistosta saadaan kerralla mahdollisimman luotettava ja tunnistettuun tarpeeseen vastaava. Tässä työssä käsitellään ja esisuunnitellaan testauslaitteiston materiaalinsyöttörakenteet, putkilinja, materiaalin vastaanotto, kantokaasun paineistusjärjestelmät sekä siirtotapahtuman analysointiin tarvittava instrumentointi, joilla kullakin on merkittävä rooli pneumasiirtolaitteistossa. Tavoitteena on saada koottua ominaisuuksiltaan laaja-alainen testauslaitteistokokonaisuus, jonka käyttö voidaan toteuttaa mahdollisimman monella eri tavalla kuitenkin niin, että yksikään lisätty toiminto ei vähennä toisen toimivuutta ja luotettavuutta testauksia

suorittaessa. Kun järjestelmäkokonaisuus ja sen sisällä ilmenevät syy-seuraussuhteet ovat tiedostettuja, saavutettuja testituloksia voidaan pitää mahdollisimman luotettavina ja mahdollisten toiminnan katkaisevien ongelmien ratkaisemisessa on helpompaa löytää oikea kohde, johon tehdä korjauksia tai muutoksia.

3.1 Testauslaitteiston rakenne

Tämän diplomityön kohdeyrityksen pneumaattisten kuljettimien liiketoimintayksikön ensimmäisen toimintavuoden aikana myymät projektit osoittavat, että paineistettuun lähetyssäiliöön perustuvat pneumasiirtolaitteistot ovat tavoitettujen asiakkaiden tarpeisiin soveltuvimpia. Tämä ei kuitenkaan poissulje muiden pneumaattisten materiaalsiirtotekniikoiden huomioonottamista, sillä esimerkiksi jatkuvatoimiset materiaalin harvasiirtolaitteistot kuuluvat myös kohdeyrityksen tuotevalikoimaan, eikä vielä erikoisempienkaan laitteistojen kehittäminen ja valmistaminen ole missään tapauksessa poissuljettua. Tehokkuuden nimissä tehtävä esisuunnitteluprojekti suuntautuu kuitenkin ensisijaisesti ylipaineisen tiheä- ja harvasiirron teknologioihin, niiden ollessa kaupallisesti kysytyimmät pneumasiirtotekniikat.

Ensimmäisen toimintavuotensa aikana kohdeyrityksessä on jo kehitetty omia pneumasiirtolaitteiston komponentteja, joita pyritään hyödyntämään myös testauslaitteiston esisuunnittelussa. Näin testauksesta voidaan saada hyödyllistä tietoa myös yksittäisten komponenttien toiminnasta. Kohdeyrityksellä on myös merkittävä historia mekaanisten kuljettimien teknologioiden osaamisessa, joten jos testauslaitteistoon tarvitaan mekaanisia kuljettimia, pyritään silloin käyttämään hyödyksi yrityksen omia tuotteita. Toisaalta jos omien tuotteiden käytöstä aiheutuvat kustannukset nousevat hyötyään suuremmiksi, joudutaan selvittämään kustannustehokkaampien vaihtoehtojen käyttömahdollisuuksia. Kilpailijoiden tuotteita käytettäessä tutkimustieto omien kuljettimien toiminnasta jää kuitenkin saamatta, joten tätä vaihtoehtoa kannattaa siksi välttää mahdollisimman pitkälle.

3.1.1 Materiaalin syöttö

Pneumasiirron testauslaitteiston suunnittelussa on hyvä huomioida, että paineistettavaan lähetyssäiliöön perustuvaa teknologiaa voidaan oikein suunniteltuna hyödyntää myös paineistamattoman harvasiirtolähetyksen testaamiseen, mutta päinvastoin paineistamatonta

lähetyslaitteistorakennetta on hankalaa käyttää paineistetun annoslähetyksen tekniikalla. Tämä johtuu siitä, että harvasiirtolaitteisto ei ole riittävän tiivis korkeampaa paineistusta varten. Kohdeyrityksen lyhyen mutta tehokkaan pneumaattisten kuljettimien liiketoimintahistorian perusteella voidaan todeta, että paineistettuun lähetyssäiliöön perustuva materiaalin syöttö putkilinjaan on yksi yleisimmistä kaupallisesti käytetyistä tekniikoista, joten testauslaitteiston rakenteen on perusteltua noudattaa tätä alan trendiä. Paineistetun lähetyksen ollessa priorisoitu menetelmä, on testauslaitteiston rakenteessa kuitenkin huomioitava vaihtoehtoisetkin tekniikat, sillä materiaalinkäsittelyn kentältä löytyy lukuisia eri kiintoaineita ja prosesseja, joissa tarvitaan eri kuljetinteknologioita. Kuvassa 25 on esimerkki kohdeyrityksen suunnittelema jatkuvatoimisesta harvasiirtolaitteistosta, jossa materiaali syötetään syöttösuppilosta paineistettuun putkilinjaan sulkusyöttimen ja venturiputken eli ejektorin avulla. Tässä siirtotavassa materiaalia voidaan syöttää paineistettuun putkistoon jatkuvasti ilman taukoja, sillä kiintoaineen siirtoon tarvittava kantokaasun paineistus synnytetään kuvan oikeassa laidassa olevan kompressoriyksikön avulla.



Kuva 25. Jatkuvatoiminen matalapainesiirtolaitteisto (Laitex Oy, 2023).

Kustannusperustaisesti on harkittava, suunnitellaanko testauslaitteistoon kaksi erillistä materiaalin syöttölaitteistoa, joita voidaan vaihtaa käytettävän siirtotekniikan mukaan. Tällöin suunniteltuja rakenteita joudutaan vuorollaan varastoimaan ja siirtämään, joten päädyttäessä kahden eri syöttörakenteen käyttöön, on suunnittelussa huomioitava niiden vaatima pinta-ala ja käsiteltävyys. Toisaalta yhden lähetinrakenteen suunnittelu tukemaan molempia mainittuja materiaalin syöttötapoja voi lisätä kustannuksia, koska sen suunnittelussa ja valmistuksessa ei välttämättä voida käyttää kohdeyrityksen vakioimia komponentteja, sen ollessa kaupallisesti melko tuntematon ratkaisu. Toisaalta se voisi olla komponenttina innovatiivinen lisäys tulevaisuuden pneumasiirtolaitteistoihin. Paineastioiden viranomaisvaatimusten lisääntyminen lisää myös laitteiston kustannuksia, jos olemassa olevia vakioituja malleja ei hyödynnetä, kun taas olemassa oleville rakenteille tehtyjä sertifiointeja ja tarkastuksia voitaisiin jatkaa testauslaitteiston kohdalla, kun jo totutusta rakenteesta ei merkittävästi poiketa. Tämän pohdinnan perusteella voisi vaikuttaa siltä, että kaksi erillistä rakennetta, jotka koostuvat vakioiduista osista muodostuvat paremmaksi vaihtoehdoksi laitteiston kannalta, kuin yksi kustomoitu monitoiminen lähetinrakenne.

3.1.2 Putkisto ja mutkat

Testauslaitteiston putkiston suunnittelussa on valittava tehdäänkö laitteistosta pienelle alalle mahtuva lyhyen siirtomatkan testausyksikkö vai pidemmän putkilinjan pneumasiirtolaitteistokokonaisuus. Toisaalta pneumasiirron ketteruus syntyy useimmiten joustavista putkiston rakenne- ja linjausratkaisuista, joten putkisto on yksi helpoimmista jälkikäteen muokattavista osakokonaisuuksista testauslaitteistossa. Siksi putkiston esisuunnittelussa täydellisen detaljitason loppuratkaisun saavuttamista ei tarvitse priorisoida.

Käytännössä pidemmällä matkoilla voidaan käyttää vain korkeamman virtausnopeuden matalapainesiirtoa, sillä sitä käytettäessä syntyvät painehäviöt ovat suhteellisen pieniä. Tunnistettujen asiakkuustarpeiden painottuessa lähinnä korkeamman painetason siirtotekniikoihin, asettaa se rajoituksia putkilinjan pituudelle, sillä korkeapaineisissa tiheäsiirtosovelluksissa painehäviöt voisivat muodostua pitkällä siirtomatkoilla liian suuriksi. Painehäviön ollessa liian suuri, siirto keskeytyy ja kiintoaine jää siirtoputkistoon, saavuttamatta ikinä vastaanottoa. Lyhyeen testauslaitteistokokonaisuuteen voidaan suunnitella erilaisia vaihdettavia putkistoja, joissa mutkien määrä, putken sisä- ja seinämähalkaisija sekä ulko- ja sisäpintojen

materiaalit voivat vaihdella. Käyttämällä putkia eri seinämävahvuuksilla ja sisäpinnan materiaaleilla, voidaan tarkastella eri materiaalien putkiin aiheuttamaa abrasiivista kulumista. Myös eri materiaalien käyttäytyminen vaihtelee yhdessä ja samassa putkistossa, joten testattavalle aineelle soveltuvimman siirtotekniikan ja putkityypin valintaa voidaan perustella tekemällä yhden aineen testejä eri putkistoilla. Edellä mainittu laitteiston ketteryys pääsee oikeuksiinsa, kun eri putkistojen ja käyrien testaukset ja niihin vaadittavat toimenpiteet eivät edellytä valtavia resursseja tai raskaita rakennemuutoksia.

3.1.3 Materiaalin vastaanotto

Materiaalin vastaanotossa oleellisinta on saavutettava tutkimustieto kiintoaineen ja siirrossa käytettävän kantokaasun erottelusta, kantokaasun suodatuksesta ja sen oikeaoppisesta vapauttamisesta ympäristöön, sillä nämä osa-alueet ovat oleellisia sekä itse pneumasiirron toteutumisen kannalta, että yleisestä työskentely- ja käyttöturvallisuusnäkökulmasta. Vastaanoton toimintaan vaikuttavat erilaiset ominaisuudet voidaan yhdistää helpommin yhteen rakenteeseen kuin syöttölaitteistossa, sillä sen paineistamiselle ei yleisesti ole tarvetta, joten vastaanottorakenne on mahdollista toteuttaa kiinteänä yksikkönä. Kiinteään yksikköön lisättävät erilaiset modulaariset varustelut mahdollistavat eri testaustekniikoiden muutosvaatimuksiin vastaamisen, sillä vaikka vastaanottorakenteen tehtävä on ajatuksen tasolla yksinkertainen, on sen toimittava luotettavasti ja sitä voidaan moduloida monenlaisiksi kokonaisuuksiksi erilaisten lisäosien avulla. Nämä lisäosat liittyvät erityisesti pölynpoistoon ja sen hallintaan sekä kiintoaineen siirtämiseen pois vastaanotosta, eteenpäin prosessissa.

3.1.4 Kantokaasun paineistus

Testauslaitteistossa voidaan yleisellä tasolla käyttää samoja kantokaasuja kuin kaupallisissa pneumaattisissa siirtojärjestelmissä. Yleisimmät vaihtoehdot kiintoaineen kantokaasuksi ovat ilma, typpi, argon ja hiilidioksidi. Testauslaitteiston osalta oleellisinta on keskittyä paineistetun ilman käyttömahdollisuuksiin, ilman ollessa yleisin käytetty kantokaasu pneumasiirron sovelluksissa. Vähähappisten kaasujen käyttömahdollisuutta testauslaitteistossa ei tule kuitenkaan sulkea kokonaan pois, sillä sen huomioiminen voi tuottaa yllättävääkin lisäarvoa tietynlaisten asiakkuustarpeiden täyttämässä.

Kantokaasun paineistuksessa itseisarvoltaan matalampien yli- tai alipainetasojen saavuttamiseksi riittää yksinkertainen puhallin, joka vaatii toimiakseen lähinnä imuilmaa ja sähkövirtaa. Kohdeyrityksen käyttämät puhaltimet ovat yleisimmin rakenteeltaan sivukanavapuhaltimia, joiden käyttöä myös testauslaitteistossa voidaan karttuneen kokemuksen myötä perustella. Korkeampien painetasojen saavuttamiseksi käytetään useimmin kompressoreita, jotka ovat järjestelminä tilankäyttö- ja energiavaatimuksiltaan suurempia, kuin yksinkertaiset puhaltimet. Testauslaitteiston suunnittelussa on hyvä ottaa huomioon, että on kustannustehokkaampaa ja joustavampaa rakentaa järjestelmä sinne, missä kompressorilla ympäristön muuhunkin käyttöön paineistettua ilmaa voidaan käyttää myös testauksessa mahdollisimman pienin rakenteellisin muutoksin. Laitteiston vaatimukseen vastaavan erillisen kompressorisyksikön hankinta muodostuisi edellä mainitussa tapauksessa ylimääräiseksi kustannuseräksi.

3.1.5 Mittalaitteet

Pneumasiirron testauksessa on oleellista saada kerättyä mahdollisimman kattavasti tietoa siirrosta tapahtuvista seikoista ja käytössä olevista parametreista, jotta testeistä voidaan saada konkreettista hyötyä valmistajan käyttöön. Prosessin eri toiminnoissa ilmenevistä tapahtumista voidaan kerätä tietoa erilaisten mittalaitteiden avulla, joita sijoitellaan laitteiston eri kohtiin. Testauksessa käytettävät mittalaitteet voivat olla myös sellaisia, joita ei yleisesti käytetä kaupallisissa pneumasiirron laitteistosovelluksissa, joten niiden käyttö voi vaatia suunnittelullisia erityishuomioita eli esimerkiksi mittalaitteiden käytöstä aiheutuvia vakioitujen putkistokomponenttien rakennemuutoksia. Oleellista on myös ottaa huomioon mittalaitteiden sijoittelun vaikutus pneumasiirtoon siten, että siirto voidaan toteuttaa testauslaitteistossa mahdollisimman pitkälle samanlaisena kuin kaupallisessa laitteistokokonaisuudessa. Näin voidaan varmistaa, että mittalaitteiden indikoidessa arvokasta tietoa testauksesta, ne eivät samanaikaisesti vaikuta siirtotapahtumaan ei-toivotulla tavalla.

3.2 Suunnittelu

Testauslaitteiston suunnittelu aloitetaan varaamalla laitteistolle pinta-alaltaan riittävä sijoituskohte valitusta tehdasympäristöstä. Kohteen määrittämiseen vaikuttavat käytettävissä

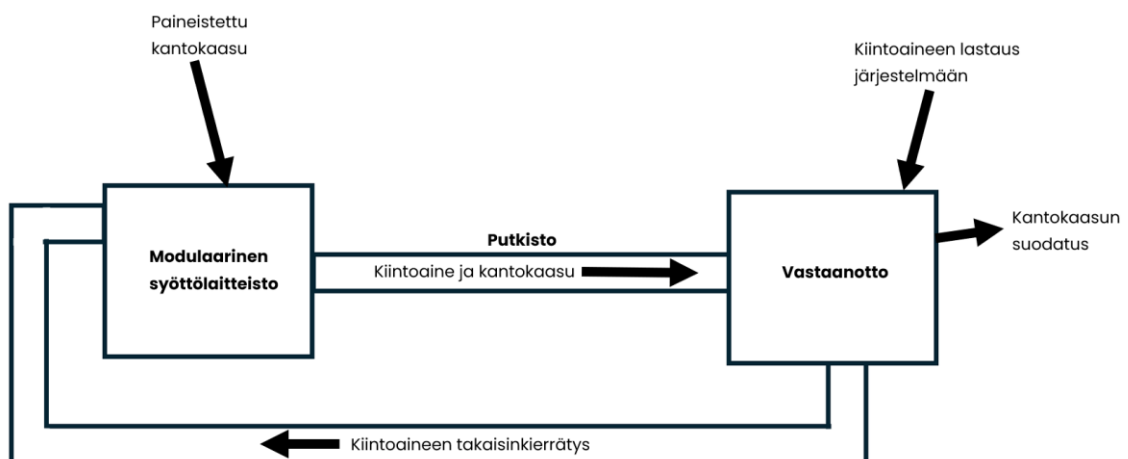
olevan pinta-alan lisäksi kohteessa olevat rakennukset, kulkuväylät, ja testausprosessin käytössä hyödynnettävät ulkoiset toiminnot, kuten paineistetun ilman tuonti järjestelmään. Testauslaitteisto voidaan sijoittaa tehdasrakennuksen ulkopuolelle tai sen sisälle, mutta tilankäytölliset haasteet kohoavat usein merkittäväksi tekijäksi jälkimmäisenä mainitussa tavassa, sillä siinä testauslaitteiston käyttämä pinta-ala pienentää kaupallisten laitteiden valmistuksessa käytettävää tehdasalaa.

Laitteiston sijoituspaikan ja käytettävissä olevan alan tunnistaminen mahdollistaa layout-suunnittelun aloittamisen, jossa laitteisto sijoitellaan käyttöön varatulle alueelle. Tässä kohtaa on oleellista, että kaikkien komponenttien tilankäytöllisiin vaatimuksiin vaikuttavat mitat vastaavat tulevaa toteutusta mahdollisimman tarkasti. Komponenttien ei kuitenkaan tässä suunnittelun vaiheessa tarvitse sisältää tarkkoja toiminnallisia ominaisuuksia, mikäli ne eivät vaikuta tilankäytöllisiin tekijöihin. Kohdeyrityksen testauslaitteistoprojektin layout-suunnittelu mahdollistuu viimeistään vuoden 2024 aikana, kun yhtiön uusi pneumaattisten kuljettimien toimipiste aloittaa toimintansa Sastamalassa. Tämän diplomityön tekovaiheessa tarkempi layout-suunnittelu ei ole vielä ajankohtaista, joten laitteiston käyttöön varatulle pinta-alalle ei tässä kohtaa ole tarkkoja rajoituksia.

Lähtökohtaisesti kohdeyrityksen testauslaitteisto tullaan sijoittamaan valmistusyksikön tehdasrakennuksen ulkopuolelle siten, että tehtaan toimintoihin käytettävää paineilmajärjestelmää voidaan hyödyntää myös testauslaitteiston käytössä. Tällöin järjestelmän paineistukseen liittyvät kustannukset pysyvät mahdollisimman pieninä. Laitteiston sijoittelun myötä sille tulee suunnitella riittävä suojaus sääolojen vaihteluille, jotta sen ympäristössä vallitsevat olosuhteet eivät olisi esteenä testien suorittamiselle tai eri rakenteiden toimivuudelle. Käytännössä tämä tarkoittaa erilaisten katosrakenteiden hyödyntämistä sekä laitteistokomponenttien lämmitys- ja eristysvuorauksia. Nämä ulkoisilta olosuhteilta suojaavat keinot ovat helposti toteutettavissa, sillä vastaavia rakenteita käytetään myös maailmanlaajuisesti kaupallisissa sovelluksissa, ja kyseisiä rakenneominaisuuksia on ehditty toteuttaa jo kohdeyrityksenkin tuotteissa.

Testauslaitteiston tarkoituksena on mahdollistaa erilaisten kiintoaineiden soveltumisen pneumaattisesti siirrettäväksi, oikeiden siirtotekniikoiden ja parametrien säätäminen kullekin kiintoaineelle sopivaksi sekä kohdeyrityksen käyttämien eri komponenttien toimivuuden ja kulumisominaisuuksien selvittäminen niin, että saavutettua tietoa voidaan käyttää kaupallisesti hyödyksi. Laitteisto tulee suunnitella niin, että siihen valittujen rakenteiden lisäksi

mahdollisesti myöhemmin ilmeneviin uusiin tarkoituksiin kehitettyjen komponenttien ja lisälaitteiden käyttö on ilman suuria rakenteellisia muutoksia mahdollista. Maailmanlaajuisesti pneumasiirron testauksessa käytetään usein laboratoriomaisiin olosuhteisiin kehitettyjä testausloopeja, joissa kiintoainetta siirretään lyhyitä kiertäviä siirtomatkoja. Näissä järjestelmissä eri kiintoaineiden siirtokäyttäytymisestä saadaan hyödyllisiä tutkimustuloksia, mutta kattavat pneumasiirron komponenttien ja siirtotapahtuman toimivuuden testaukset käytännön sovellusten omaisesti ei välttämättä ole mahdollista, ainakaan ilman perusteellista ymmärrystä tuloksista ja niiden skaalauksesta kaupallisen rakenteen toimintatapojen mukaiseksi. Tässä työssä käsiteltävän testauslaitteiston rakenteen tulee edellä mainituista perusteista johtuen mahdollistaa pneumasiirtotapahtuman tutkiminen siten, että siitä saatava tieto voidaan mahdollisimman perusteellisesti hyödyntää kaupallisia käytännön laitesovelluksia suunniteltaessa. Käytännössä tämä tarkoittaa, että testauslaitteisto sisältää materiaalin syöttölaitteiston, riittävän pitkän siirtoputkiston ja materiaalin vastaanoton siten, että tutkimustietoa voidaan saavuttaa riittävästi sekä prosessin yhteistoiminnasta, että yksittäisten osa-alueiden toiminnosta. Laitteistossa pyritään käyttämään mahdollisimman paljon kohdeyrityksen käytössä olevia tai omavalmisteisia osia, jolloin testaushyötyjä voidaan saavuttaa myös komponenttitasolla. Testauslaitteiston yksinkertaistettu toimintakaavio on havainnollistettu kuvassa 26.

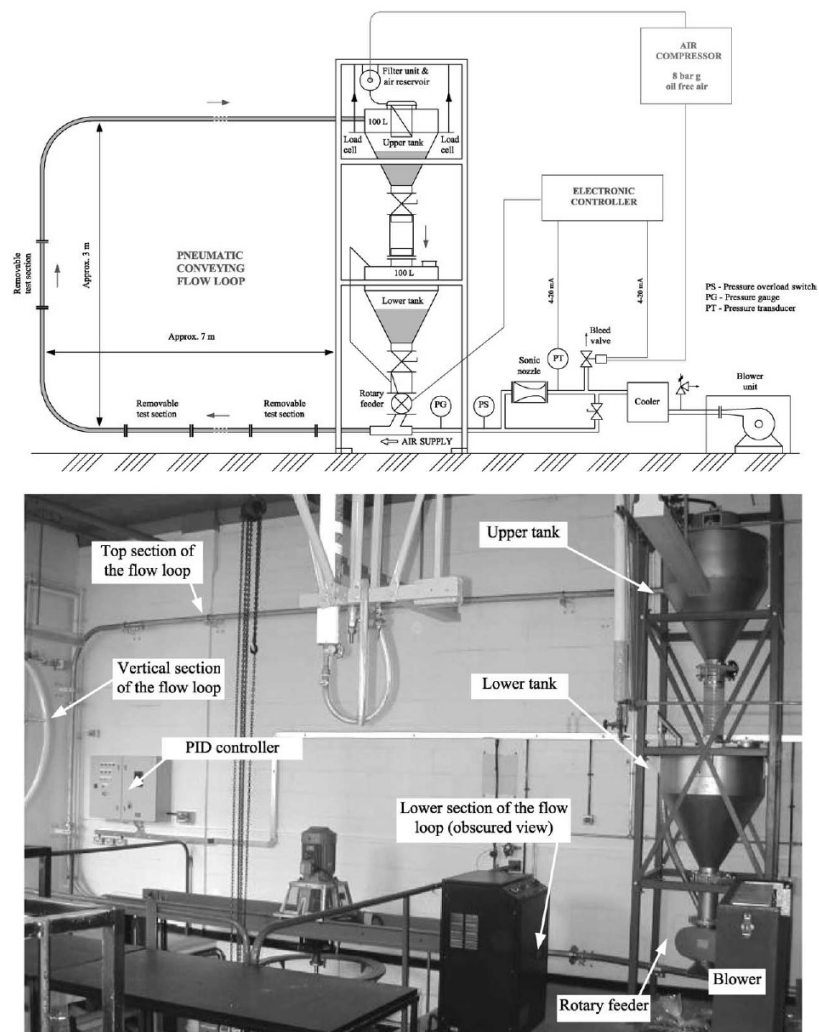


Kuva 26. Pneumasiirron testauslaitteiston toimintakaavio.

Pneumaattisen materiaalinkäsittelyn testauslaitteiston rakenne voidaan suunnitella suljetuksi tai avoimeksi. Suljetun rakenteen tekniikkaa voidaan perustella, kun siirron kantokaasuna käytetään merkittävästi enemmän vähähappisia kaasuja, kuten typpeä tai argonia, tai kun testattavana kiintoaineena on erityisen vaarallisia tai radioaktiivisia aineita. Kohdeyrityksen testauslaitteistorakenne tulee olemaan kuitenkin perusrakenteeltaan avoin, sillä täysin suljettujen järjestelmien kysyntä on merkittävästi pienempää kuin avoimien. Laitteistoon on kuitenkin mahdollista toteuttaa suljetun järjestelmän periaate siten, että esimerkiksi eri kantokaasujen käyttöä laitteistossa voidaan testata. Käytännön tehdasympäristössä muiden kaasujen kuin paineistetun ilman käyttö vaatii usein suljetun järjestelmän, sillä niissä hankintakustannuksiltaan huomattavasti suurempien kaasujen käyttö pyritään maksimoimaan, kierättämällä edelleen samaa kaasua suljetussa systeemissä. Suunniteltavassa testauslaitteistossa yksittäisiä testejä tehtäessä eri kantokaasujen käytön kustannukset eivät nouse samalla tavalla äärimmäisen korkeiksi, joten täysin suljettua järjestelmärakennetta ei kannata priorisoida avoimen järjestelmän edelle. Avoin järjestelmä, jonka vastaanottorakenteessa käytetty kantokaasu erotellaan siirrettävästä kiintoaineesta ja vapautetaan suodatuksen kautta ympäristöön, mahdollistaa erilaisten pölynhallinta- ja suodatusjärjestelmien testauksen ja niihin liittyvät koulutukset. Pölynpoistoon ja kantokaasun vapauttamiseen ympäristöön liittyy monia työ- ja ympäristöturvallisuuden liittyviä asioita, jotka testauslaitteistossa perusteellisesti huomioituna antavat hyvän käytännön esimerkin kaupallisten laitteistoprojektien toteutukseen. Näiden ympärille voidaan kehittää myös monenlaisia asiakkaiden koulutustilaisuuksia, jotka lisäävät testauslaitteistosovelluksen kaupallista merkittävyyttä.

Testauslaitteistossa kiintoaineen siirto lähetyksestä vastaanottoon on yksi loogisimmista toiminnoista, mutta suunniteltaessa materiaalin siirtämistä toiseen suuntaan vastaanotosta takaisin syöttöön voidaan harkita erilaisia lähestymistapoja. Testauksessa käytettävä kiintoainemäärä voidaan tyhjentää vastaanoton kautta ulos järjestelmästä, ja siirtää erilaisin mekaanisin keinoin takaisin materiaalin syöttöpäähän. Tämä toimintatapa on toteutukseltaan melko yksinkertainen, mutta se hidastaa testausprosessia merkittävästi koska sitä käytettäessä materiaalinkierroksen sujuvuus heikentyy. Toisaalta mekaaniseen siirtoon vaadittavat kustannukset nousisivat herkästi merkittävästi korkeammiksi kuin paineistetun paluulinjan tapauksessa, sillä vastaanoton ja materiaalin syötön etäisyyden ollessa kymmeniä metrejä, mekaanisten kuljettimien rakenteisiin kuluvat kustannukset nousevat huomattaviksi.

Suunniteltavaan testauslaitteistoon kehitetään kierrätysputkisto, jonka avulla testauksessa käytettävä kiintoaine voidaan siirtää vastaanotosta takaisin materiaalinsyöttöön. Kiintoaineen takaisinkierrätys on havainnollistettu kuvassa 26. Tämä rakenteellinen ominaisuus mahdollistaa sen, että testaukseen käytettävä kiintoaine voidaan purkaa astioista tai säkeistä järjestelmään ensisijaisesti vastaanoton kautta, jolloin syöttöpään laitteiden rakenteelliset tai tilankäytölliset rajoitteet eivät ole esteenä testaustapahtuman toteutumiselle. Vastaanoton rakenteen tulee myös mahdollistaa kiintoaineen purku ulos järjestelmästä testaustapahtuman päättymisen jälkeen niin, että järjestelmä saadaan mahdollisimman puhtaaksi seuraavaa testattavaa kiintoainetta varten. Esimerkki toteutetusta kierrätysputkiston sisältävästä testauslaitteistosta on esitelty kuvassa 27.



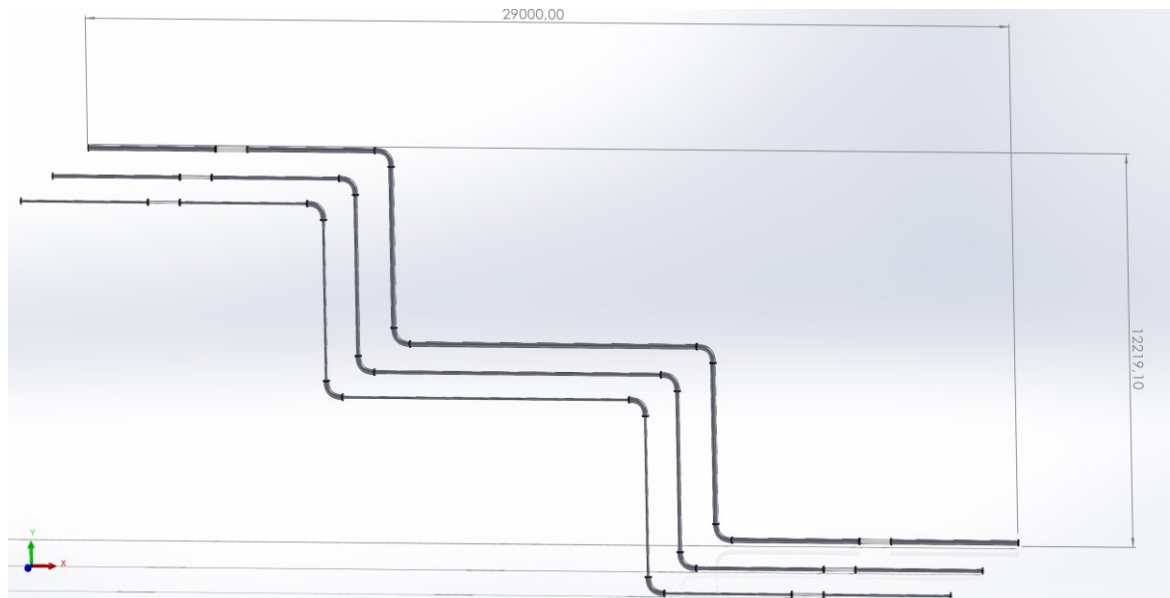
Kuva 27. Pneumasiirron testausyksikkö kierrätysputkistolla (Jaworski & Dykowski, 2002).

Pneumasiirrossa käytettävien erityyppisten materiaalinsyöttötekniologioiden olemassaolon takia testauslaitteistoon tulee sisällyttää sekä erätoiminen paineistettavaan lähetysväiliöön perustuva pneumaalähetin, että jatkuvatoimiseen harvasiirtoon soveltuva paineistamaton lähetinrakenne. Näiden rakenteiden yhdistäminen yhdeksi testauslaitteiston osakokonaisuudeksi olisi olemassa olevan tiedon valossa askel kohti uudenlaista teknologiaa, joten sellaisen suunnitteleminen voisi olla kehityspotentialiltaan hyödyllistä. Toteutettavassa testauslaitteistossa tullaan kuitenkin käyttämään toistaiseksi erillisiä lähetinrakenteita eri siirtotyypeille, joten suunnittelussa on ensisijaisesti keskityttävä eri rakenteiden modulaarisuuteen siten, että ne ovat joustavasti vaihdettavissa riippuen kullekin testille ennalta määritellystä testaustavasta. Erätoimisen lähetinrakenteen suunnitteluun on käytettävissä kohdeyrityksen kehittämiä ja käytännössä toteuttamia rakenteita, joten niitä on syytä käyttää esimerkkinä myös testauslaitteiston suunnittelussa. Jatkuvatoimisen lähetinrakenteen kohdalla merkittävää on toimivan perusrakenteen suunnittelun lisäksi erilaisten kiintoaineen syöttöön käytettävien mekaanisten kuljettimien modulaarinen testaus- ja käyttömahdollisuus lähetinrakenteen yhteydessä. Esimerkiksi hihna-, ruuvi- tai sulkusyöttimet ovat yleisiä mekaanisia kuljettimia, joita käytetään kiintoaineen syöttämisessä jatkuvatoimisen pneumasiirron lähetinrakenteisiin. Erilaiset syöttimet toimivat matalapaineisessa harvasiirrossa yleisesti ejektoriputken kanssa, joka on myös oleellinen osa testauslaitteiston rakennetta.

Pneumasiirtolaitteiston suunnittelussa putkistolla on merkittävä vaikutus muun laitteiston suunnitteluun ja mitoitukseen, jotta halutut siirtokapasiteetit voidaan saavuttaa. Kiintoaineen lähetys- ja vastaanottorakenteiden välille sijoitettava putkisto voisi olla irrotettava ja vaihdettava siten, että eri putkikokoja ja putkistogeometrioita voidaan testata. Ongelmaksi mainitun kaltaisessa laitteistossa muodostuu kuitenkin putkiston raskas rakenne, joka hankaloittaa putkistojen vaihtamista ja varastoimista. Näin ollen testauslaitteistoon tullaan suunnittelemaan kolme erillistä teräsputkistoa, jotka pysyvät kiinteästi testauslaitteistossa siten, että niillä on yhteinen tai erillinen kiinteä vastaanottoasema sekä modulaarisesti vaihdettavat syöttöyksikkörakenteet. Putkistot suunnitellaan siten, että testauksessa käytettävä kiintoaineen siirtomatka on alustavasti n. 40–50 metriä pitkä.

Putkistojen on jatkuttava kiintoaineen syöttöpäässä jonkin matkaa horisontaalisena, jotta testattavat kiintoaineet ehtivät kiihtyä riittävään siirtonopeuteen ennen ensimmäistä mutkaa, jossa siirto muutetaan vertikaalisuuntaiseksi. Mikäli kiintoaineella ei ole riittävää vertikaalisuuntaista matkaa, jossa se voi kiihtyä vaadittavaan siirtonopeuteen, se voi jäädä putkistoon

ja näin pneumasiirto ei toteudu. Laitteiston käytettävissä olevat siirtosuunnat ovat ainoastaan horisontaalisia tai vertikaalisia, sillä esimerkiksi 0–90 astekulman väliset vinot nousut eivät sovellu kaikissa pneumasiirron tekniikoissa käytettäväksi. Vinot nousut voisivat herkästi aiheuttaa kiintoaineen takaisinvalumaa ja sitä kautta heikkenevien kiintoaineen ilmatiiveysominaisuuksien myötä siirron keskeytymisen. Yksi laitteistolla toteutettava pitkää yhdensuuntaista putkilinjaa hyödyntävä esimerkkitestauslaji on siirrossa käytettävän materiaalitulpan pituuden variointi ja siitä syntyvien muutosten vaikutukset aineen siirrettävyyteen. Alustavasti määritellyt putkikoot ovat sisähalkaisijaltaan 65, 100 ja 150 mm, joiden koetaan palvelevan kaupallisten ratkaisujen vaatimuksia parhaimmin. Putkistoon tulee sijoittaa mutkia ja putkistorakenteen tulee sallia erilaisten mutkien ja erikoiskäyrien soveltuvuustestaukset eri kiintoaineiden siirrossa, sillä ne ovat merkittäviä komponentteja siirtotapahtuman kannalta. Testeissä voidaan havainnoida putkien, mutkien ja erikoiskäyrien kulumisominaisuuksia, vaikka ne eivät kaupallisessa mielessä ole kohdeyrityksen näkökulmasta ensisijaisia tutkittavia asioita. Putkistolinjaan kannattaa suunnitella myös näkölasiputkia, joita valmistetaan yleisimmin lämmönvaihteluita ja kulutusta kestävästä borosilikaatista. Lasiputket mahdollistavat siirtotestauksen visuaalisen tarkastelun, kun nähdään esimerkiksi materiaalin käyttäytymisen muutokset eri siirtoparametrejä muutettaessa. Esimerkki testauslaitteiston putkistojen geometrioista ja sijoittelusta on havainnollistettu kuvassa 28.



Kuva 28. Pneumasiirron testauslaitteiston esimerkkiputkistot.

Kuvassa 28 on kolme eri putkistoa, joiden sisähalkaisijat ovat edellä mainitut 65, 100 ja 150 mm. Putkistojen alkupäät ovat kuvassa oikealla alhaalla, josta kiintoaineen syöttö putkistoon alkaa. Ensimmäisen horisontaalisen putkilinjan keskikohdassa on sisähalkaisijaltaan putkiston kanssa yhdenmukainen näkölasiputki, jonka avulla voidaan arvioida visuaalisesti kiintoaineen käyttäytymistä putkiston alkupäässä. Siirron suunnan muutokset horisontaalisen ja vertikaalisen suunnan välillä on toteutettu yhteensä neljällä käyrällä yhtä putkilinjaa kohden, jotka ovat vaihdettavissa eri käyrien testausta varten. Esimerkkiputkisto ottaa tässä tapauksessa huomioon ainoastaan yhden käyrägeometrian, jossa säteen tulee olla aina sama. Tähän tulee kiinnittää huomiota testauslaitteiston varsinaisessa suunnittelussa siten, että geometrialtaan eroavien ja eri säteisien käyrien, erilaisten jakohaarojen ja fluidisoivien lisäilmalaitteiden toimivuutta voidaan testata ilman isoja kiinteän putkistorakenteen muutoksia. Putkiston viimeisen horisontaalisen osuuden keskikohdassa on samanlainen näkölasiputki kuin putkiston alkupäässä, jonka avulla saadaan jälleen visuaalista tietoa testattavan kiintoaineen käyttäytymisestä siirron loppuvaiheessa. Putkiston loppupää sijaitsee kuvassa vasemmalla ylhäällä, jossa putkisto tulee yhtymään vastaanottorakenteen kanssa. Kaikki putkiliitokset on toteutettu keskittävillä laippaliitoksilla, joiden avulla rakenteen kokoonpano saadaan mahdollisimman yksinkertaiseksi ilman putkiston tiiveyteen liittyviä ongelmia. Esimerkkiputkiston siirtomatka on 40,5 metriä, joka vastaa ennakkoon määriteltyyn n. 40–50 metrin siirtomatkaavaatimukseen.

Tilankäytölliset rajoitteet eivät ole vielä tarkasti tiedossa, joten putkiston pituus ja geometriat tulevat mahdollisesti kuvassa 28 esisuunnitellusta rakenteesta poikkeamaan. Koska putkistojen sisähalkaisijat ovat etukäteen mahdollisimman pitkälle määritellyt, lähetys- ja vastaanottorakenteiden käytettävissä oleva tila määrittää putkiston lopullisen muodon. Pneumaattisissa materiaalinkäsittelyjärjestelmissä tämä ei kuitenkaan muodostu ongelmaksi, sillä putkisto on usein tilankäytöltään laitteiston joustavin osakokonaisuus.

Järjestelmä tullaan sijoittamaan kohdeyrityksen pneumaattisten kuljettimien tuotantoyksikköön Sastamalaan siten, että tuotannossa käytettävää paineistettua ilmaa voidaan hyödyntää myös testauslaitteiston käytössä. Paineistettavaan lähetys säiliöön perustuva materiaalin syöttö vaatii toimintaansa erillisen, tilavuudeltaan vähintään 2–3 kuutiometrin puskurisäiliön, joka voidaan paineistaa tuotannon käytössä olevalla kompressoriyksiköllä ainoastaan testauslaitteiston käyttöön. Näin vältetään erillisen kompressoriyksikön hankinnalta, joka muodostuisi merkittävän suureksi kustannuseräksi testauslaitteiston koostamisessa.

Jatkuvatoimiseen materiaalinsyöttöön tarvittavat painemäärät ovat maltillisempia, joten niiden käyttöön hankitaan yksi yhteinen sivukanavapuhallin. Puhallin tulee mitoittaa siten, että se riittää kaikkien laitteistossa olevien putkistokokojen testausten tarpeisiin. Sivukanavapuhaltimen tulee mahdollisesti soveltua myös alipaineisen pneumasiirron testaukseen, jossa kiintoainetta siirretään negatiivisen paine-eron avulla syötöstä vastaanottoon. Alipaineisessa testauksessa vastaanottorakenteessa tulee olla kantokaasun ja siirrettävän kiintoaineen erotteleva syklonirakenne, joka voidaan sen yhteyteen sijoitettua venttiiliä käyttäen sulkea muun järjestelmän ulkopuolelle ylipaineisten siirtotekniikoiden testauksissa, sillä syklonin käyttö ei sovellu niiden asettamiin tiiveysvaatimuksiin. Alipaineinen testauslaitteistorakenne vaatii toimiakseen myös ylipaineen, sillä sen avulla testattava kiintoaine voidaan kierrättää takaisin syöttölaitteistoon, sillä vastaanottopäässä sijaitsevan alipaineen avulla se ei ole mahdollista. Tämä saattaa tehdä alipaineisesta pneumasiirtotestauksesta hidasta ja syklittäistä, kun ali- ja ylipainetta tarvittaessa siirtotapahtuma ei voi olla tauotta jatkuvaa.

Kantokaasun paineistuksessa ei ole välttämätöntä vaatia käytettävän kaasun olevan täysin öljytöntä, sillä vaikka testeissä siirrettäisiin esimerkiksi elintarviketeollisuuden raaka-aineita, eivät testattavat aineet koskaan päädy sellaiseen jatkokäyttöön, jossa niiden tulisi olla täydellisen puhtaita. Öljyn kulkeutuminen kantokaasun joukkoon ilmenee usein ainoastaan kompressoria käytettäessä, sillä matalapaineiset sivukanavapuhaltimet tuottavat lähes aina öljytöntä paineistettua ilmaa. Käytettävää kiintoaine-erää tulee tarvittaessa vaihtaa riittävän säännöllisesti testausten aikana, jotta paineilman mukana prosessiin tulevat voiteluaineet eivät ehdi vaikuttaa testattavan aineen materiaaliominaisuuksiin, tuloksiin virheitä tuottavalla tavalla.

Vähähappisten kaasujen, kuten typen käyttö testauslaitteistossa on otettava myös huomioon suunnittelussa. Vaikka paineistettu ilma toimiikin pääasiallisena käytettävänä kantokaasuna testauksissa, voivat testattavat kiintoaineet olla myös vaarallisia tai räjähdysalttiita, joiden kanssa hapekkaan paineilman käyttöä tulee välttää. Testattaessa edellä mainitun kaltaisia aineita, ilmaa kalliimpaa kaasua kierrätetään järjestelmässä, eikä sitä vapauteta samalla tavalla siirtosyklin loppuvaiheessa kuin paineilmaa. Siirtotestien päätyttyä on huolehdittava typen asianmukaisesta suodatuksesta ja kontrolloidusta vapauttamisesta tilavuudeltaan riittävän suureen ympäristöön, jossa sen aiheuttamat potentiaaliset riskitekijät saadaan minimoitua.

Testauslaitteiston vastaanottorakenteena toimii yksinkertainen kartiopohjainen siilo, joka sijoitetaan putkilinjan loppupäähän. Jokaiselle eri putkilinjalle voidaan käyttää omaa siiloa, tai vaihtoehtoisesti yksi ominaisuuksiltaan kattava siirrettävä vastaanottosiilorakenne voi olla kunkin putkilinjan käytössä modulaarisesti, kuten lähetinrakenteessa. Tarkennettuna tämä tarkoittaa, että vastaanottosiiloa siirretään sen putkilinjan käyttöön, jolla testejä kulloinkin suoritetaan. Vastaanottosiilossa ensisijaisen oleellista on sen tiiveys, ja perusteellinen paineistuksen poiston kontrollointi suodatinyksikön kautta. Erilaisten suodatinyksikköjen käyttömahdollisuus vastaanottosiilossa antaa mahdollisuuden sekä niiden testaukseen, että laitekoulutuksiin niitä tarvitseville instansseille. Vastaanottosiiloon on tarkoituksena suunnitella myös siitä lähtevä putkilinja, jota pitkin testeissä käytettävä kiintoaine voidaan kierrättää takaisin syöttölaitteistolle. Alipaineisessa testauksessa vastaanottosiilossa on oltava sykloni, jolla kiintoaine ja negatiivisen paine-eron aiheuttama virtaus saadaan eroteltua toisistaan. Syklonirakenne tulee olla erotettavissa järjestelmästä venttiilin avulla, silloin kun sen käytölle ei ole tarvetta, eli kaikissa ylipaineisia pneumasiirtotekniikoita hyödyntävissä testauksissa.

Yleisellä tasolla kiintoaineen kierrätys kannattaa toteuttaa laitteistoon mahdollisimman toimintavarmasti ja yksinkertaisesti ilman ylimääräisiä kustannuksia, sillä kaupallisissa soveluksissa kiintoaineen takaisinkierätykselle ei ole käytännössä lainkaan tarvetta, siirtotarpeen ilmetessä ainoastaan alku- ja loppupisteen välisellä yhdensuuntaisella matkalla. Testattavan aineen kierrättäminen takaisin syöttöpäähän toteutetaan alipaineisessakin testauksessa ylipaineen avulla, joten kompressorin käyttöä ei voida missään testaustyyppissä jättää täysin huomiotta, vaikka kaupallisessa alipainesovelluksessa ylipainetta ei välttämättä tarvita ollenkaan. Materiaalin kierrätys mahdollistaa testauksessa käytettävän kiintoaineen lastauksen järjestelmään vastaanottopäästä, joka on rakenteeltaan tilavampi ja yksinkertaisempi kuin yleisesti käytetyt syöttölaitteistot. Vastaanottosiiloon suunnitellaan tiivistetty manuaalinen lastausluukku tätä aineen lastaustarkoitusta varten.

Suurimman mahdollisen hyödyn saavuttamiseksi, on testauslaitteistossa oltava erilaisia antureita ja mittalaitteita. Yksi oleellisimmista tutkittavista asioista pneumasiirron testauksessa on siirtoon vaadittava kantokaasun määrä. Kaasun virtausmäärän optimointi siirrossa on yksi merkittävä tekijä laitteiston energiatehokkuuden kannalta, johon pyritään löytämään käytäntöön toimeenpantavia ratkaisuja. Laitteiston energiankulutuksesta aiheutuvat kustannukset ovat merkittävin kuluerä kaupallisten laitesovelluksien käyttäjille, joten sen optimointi on

yksi oleellisimmista monitoroitavista asioista myös testausmielessä. Kaasunkäytön mittaukset ja optimoinnit voidaan suorittaa laitteistoon sijoitettavilla massavirtausmittareilla, joita on laajasti saatavilla erilaisiin käyttökohteisiin erilaisin konfiguroinnein.

Lähetys- ja vastaanottorakenteissa tullaan käyttämään pinnanmittausinstrumentteja, joilla erilaisissa siilorakenteissa olevaa kiintoaineen määrää voidaan mitata. Pinnanmittauksesta saatava data on oleellista tietoa pneumasiirtosyklin toiminnan kannalta, sillä sen perusteella siirrytään esimerkiksi aineen annosteluun ja lähettimen paineistukseen. Yleisesti pneumasiirtolaitteissa käytetään lavallisia rotatiivisiä pintakytkimiä, jotka viestivät järjestelmälle riittävästä täyttöasteesta vasta aineen saavuttaessa tietyn tason säiliössä. Esimerkki rotatiivisestä pintakytkimestä on kuvassa 29.



Kuva 29. UWT Rotonivo RN3001 rotatiivinen pintakytkin (UWT GmbH, 2024).

Kuvassa 29. esitellyn kaltaisia rotatiivisiä pinnanmittausinstrumentteja käytetään yleisesti kaupallisissa pneumasiirtosovelluksissa. Testauslaitteistoon voidaan harkita käytettäväksi tarkempia, esimerkiksi optisia tai kapasitiivisiä pinnanmittausantureita, joilla eri täyttöasteista saadaan mahdollisimman reaaliaikaista ja tarkkaa tietoa, ja niiden lisääminen laitteistorakenteeseen jälkikäteen on myös mahdollista, jos tarvetta muutoksille ilmenee.

Putkiosien vahvuusmittauksia voidaan suorittaa tarvittaessa ultraäänellä toimivilla ainevahvuusmittareilla, jotka ovat kevytrakenteisia ja eivät vaadi järjestelmään erityisiä rakenne muutoksia niiden käytön mahdollistamiseksi. Kohdeyrityksen toiminnan näkökulmasta ainevahvuusmittaukset eivät ole testauslaitteiston tapauksessa kaupallisesti primäärisiä, joten niihin liittyvään instrumentointiin ei tarvitse tässä kohtaa oleellisesti keskittyä. Toisaalta ultraäänitoiminen ainevahvuusmittalaite on säännöllisesti käytössä kohdeyrityksen mekaanisten kuljettimien tarkistuksissa, joten sen käyttäminen pneumaattisten kuljettimien tapauksessa voisi olla myös perusteltua.

Pneumasiirtolaitteiston lähetinrakenteissa käytetään painekeytkimiä, jotka mittaavat järjestelmässä vaikuttavia painetasoja. Niiden tuottaman datan avulla voidaan ohjata järjestelmän toimintaa, kun voidaan varmistua riittävän painetason saavuttamisesta ja optimoinnista. Painetason mittausta käytetään myös lähetinrakenteen kupoliventtiilin tiivistykseen paisuvan tiivisteen avulla, jotta riittävä tiiveys voidaan saavuttaa. Esimerkki siirtotapahtumassa käytettävästä painelähtimestä on kuvassa 30.



Kuva 30. Aplisens PCE-28 painelähtin (Aplicens S.A., 2024).

Toissijaiseksi mittaustyyppiä luetaan käsiteltävän testauslaitteiston tapauksessa myös siirron aikaiset painehäviön mittaukset. Putkilinjan alku- ja loppupäässä voi olla myös painemittarit, joiden avulla voidaan tutkia siirrossa tapahtuvaa painehäviön määrää. Painemittareiden käyttö putkistossa vaatii rakenteellisia erityisominaisuuksia, jotka on syytä ottaa

huomioon suunnitteluvaiheessa. Toisaalta nyt esitellyn painemittarin käytön asettamat vaatimukset putkiston rakenteelle eivät ole kovin suuret, sillä sen kiinnittämiseksi putkeen tarvitaan ainoastaan oikean kokoinen kierteytetty yhde. Yhde on tulpattavissa tiiviiksi, jos painemittausta ei haluta käyttää.

Kuvan 30. painelähetin sopii tarvittaessa edellä mainittuun käyttöön, sillä sen avulla voidaan mitata eri siirtotyypeissä vallitsevia painetasoja millibareista aina 1000 bariin asti (Aplisens S.A. PCE-28 Datasheet. 2022).

3.3 Kustannuslaskenta

Esisuunnitteluvaiheessa toteutettava kustannuslaskenta antaa kohdeyritykselle lähinnä karkean budjetäräisen arvion testauslaitteiston suunnittelusta ja toteutuksesta aiheutuvista välittömistä kokonaiskustannuksista. Suunnittelu, komponenttien hankinta- ja valmistuskulut, sekä laitteiston kokoonpanosta ja käyttöönnotosta aiheutuvat kulut ovat kustannuslajeja, jotka otetaan tässä laskennan vaiheessa huomioon.

Esisuunnittelun tarkoituksena on antaa valmiudet varsinaisen suunnitteluprosessin tehokkaalle etenemiselle siten, että laitteiston pää- ja mekaniikkasuunnittelijoiden käytettävissä on mahdollisimman paljon aiemmin kerättyä perustietoa käytettävästä tekniikasta ja laitteistorakenteesta. Tämä näkyy osaltaan myös suunnittelukustannuksissa, jotka vähenevät esisuunnittelun ansiosta.

Merkittävin osa laitteistosta aiheutuvista välittömistä kustannuksista tulee toteutusvaiheessa eri komponenttien valmistukseen käytettävistä materiaalihankinnoista, valmistuskuluista ja osto-osista. Osakokonaisuuksiin liittyvät kustannukset ovat suurimpana kustannuseränä myös se kokonaisuus, jossa kustannuksia pystytään merkittävästi vähentämään tekemällä harkittuja valintoja ja optimointeja, joten suunnittelulla on tähän kustannusoptimointiin merkittävä vaikutus. Käytännöllisenä esimerkkinä tähän toimii aiemmin mainittu rakenteellinen valinta erillisten modulaaristen lähetinrakenteiden ja yhden kombinaation välillä, joka on vaikutuksiltaan yksi laitteiston merkittävimmistä kustannustekijöistä.

Testauslaitteiston kustannuslaskenta perustuu tässä vaiheessa kohdeyrityksen toteuttamien projektien kustannuksiin, joten kustannusarvio on kaikin puolin vain suuntaa antava arvio siitä, missä suuruusluokissa testauslaitteiston kustannukset tulevat olemaan. Taulukossa 1 on

eritelty eri kustannuslajeja ja aiempien toteutettujen projektien perusteella niille arvioituja summia.

Taulukko 1. Testauslaitteiston toteutuksen kustannusarvio

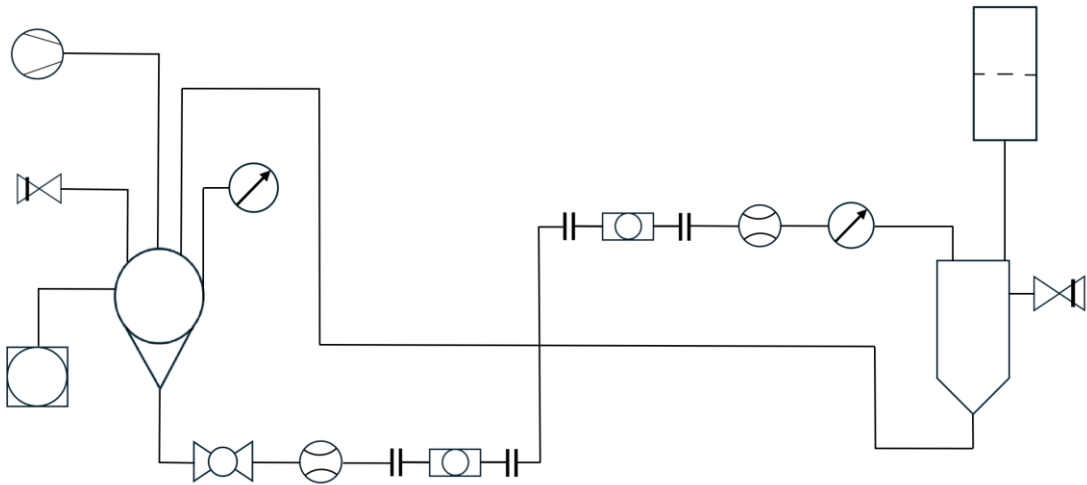
Kustannuslaji	Summa (€)
Projektin Johto	3600
Suunnittelu	4800
Teräkset	10000
Palkeet	2000
Pneumatiikka	24000
Sähköosat	10000
Pintakäsittely	3000
Alihankinta	25000
Liitostarvikkeet	1000
Terästyöt	28000
Toimitusketjun Rahdit	4000
Yhteensä	115400

Budjettivaiheen kustannusarvion perusteella voidaan todeta, että testauslaitteistosta aiheutuvat suunnittelu- ja toteutuskustannukset voivat nousta melko korkeiksi. Jotta investoinnilla voidaan saavuttaa merkittävää hyötyä, on sen ensisijaisesti vastattava osoitettuun tarpeeseen. Tämän vaatimuksen huomioimisen jälkeen laitteiston suunnittelulla ja siihen liittyvillä valinnoilla on merkittävin vaikutus aiheutuviin kustannuksiin ja niiden minimointiin. Toisaalta kokonaiskustannukset eivät koostu pelkästään itse laitteiston suunnittelusta ja toteutuksesta, joten esimerkiksi energiatehokkuudella on merkittävä vaikutus investoinnista aiheutuviin muuttuviin kustannuksiin sen elinkaaren aikana. Vaikka energiatehokkaampi ratkaisu olisi kalliimpi laitteiston toteutuksessa, se voi osoittaa edullisuutensa tulevaisuudessa.

4 Tulokset

Pneumasiirron testauslaitteiston esisuunniteltu perusrakenne voidaan havainnollistaa käyttämällä putkitus- ja instrumentointikaaviota, joka on yleisesti käytetty dokumenttityyppi myös kaupallisessa laitteistosuunnittelussa. PI-kaavion avulla saadaan selkeä kuva laitteiston rakenteesta ja toiminnoista.

Testauslaitteistoon on valittu käytettäväksi kolme erilaista toimintatapaa, joista ensimmäinen on kaupallisesti yleisin paineistettavaan lähetyssäiliöön perustuva tiheäsiirtomenetelmä. Sen peruseriaatteinen rakennekaavio on kuvassa 31. Rakennekaaviossa käytettyjen symbolien kuvaukset on esitelty liitteessä 2.



Kuva 31. Paineistettavaan lähetyssäiliöön perustuvan tiheän pneumasiirron testauslaitteiston rakennekaavio.

Paineistettava kartiopohjainen pneumaalähetin on kuvattu kaavion vasemmassa reunassa olevalla pneumaattisen kuljettimen piirrosmerkillä. Lähettimen toimintasykliin synkronoitavia komponentteja ovat pneumaattisen kuljettimen ohjaus- ja säätöjärjestelmä, määritellyn painetason ylittymisen estävä varoventtiili, järjestelmän käyttämän kantokaasun paineistava kompressorin sekä paineistuksen tasoa indikoiva painemittari. Siirtotapahtumassa

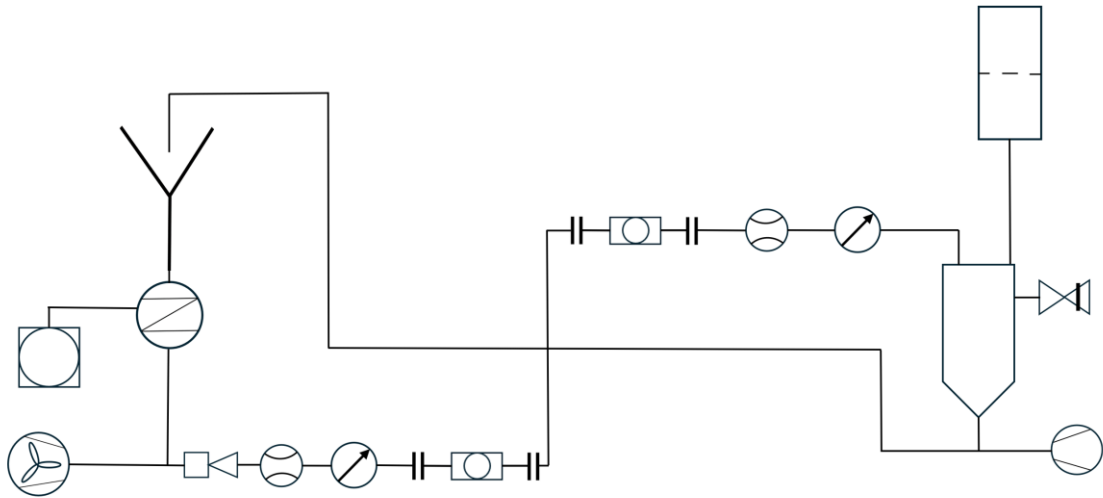
lähettimeen annosteltava kiintoaine siirtyy paineistetun kantokaasun avulla putkilinjaan, linjaventtiilin avaamisen jälkeen. Kiintoaineen ja kaasun virtausta mitataan virtausmittareiden avulla siten, että etenkin kaasunkäytöstä saadaan mahdollisimman hyödyttävää testaustietoa, energiatehokkuutta tavoiteltaessa. Kaasunkäytön mittauksessa oleellinen suure on kaasutilavuuden määrä jaettuna kuluneella ajalla eli hetkellisen käytön mittauksissa yleisesti m^3/min .

Putkilinjan alku- ja loppupäissä on keskittävin laippaliitoksin linjaan kiinnitettävät näkölasiputket, jotka antavat visuaalista tietoa kiintoaineen käyttäytymisestä pneumasiirron testauksessa. Visuaalisen tarkastelun perusteella voidaan päätellä, mitä parametreja voitaisiin säätää siirron parantamiseksi tai vaihtoehtoisesti parametrien säädön perusteella voidaan arvioida mitä muutoksia siirrossa tapahtuu kunkin parametrimuutoksen aiheuttamana. Putkistoon voidaan myös sisällyttää erilaisia väli-ilmantuontiyhteitä, joita käyttämällä voidaan vaihtaa siirtotapahtuman käyttäytymiseen.

Putkiston loppupäässä on virtaus- ja painemittausinstrumentointia, jotta siirrossa tapahtuvia häviöitä voidaan tarvittaessa tarkastella. Näiden mittausten tuottama tutkimustieto ei ole kohdeyritykselle kuitenkaan kaupallisessa mielessä primääristä, joten jos kustannussäästöjä halutaan hakea, on hyvä tarkastella putkiston loppupään mittausinstrumentoinnin laajuustarvetta tarkemmin.

Putkilinja yhtyy loppupäässä vastaanottosiilon kanssa, jossa on varoventtiili määritellyn painetaso ylittymisen estämiseksi. Vastaanotossa on myös suodatinyksikkö, jonka avulla kiintoaine ja käytetty kantokaasu voidaan erotella toisistaan hallitusti, ja kaasu voidaan edelleen vapauttaa turvallisuusmääräykset huomioiden laitteiston ulkoiseen ympäristöön. Vastaanottosiilosta alkaa uusi putkilinja, jota pitkin testattava kiintoaine-erä voidaan kantokaasua käyttämällä siirtää takaisin annossiirtoperiaatteisen pneumalähettimen annosteluun.

Vaihtoehtoinen toimintatapa testauksessa on jatkuvatoiminen harvasiirto ylipaineella eli positiivisen paine-eron avulla. Tähän tarkoitukseen kehitettävän testauslaitteiston rakennekaavio on kuvassa 32. Rakennekaaviossa käytettyjen symbolien kuvaukset on esitelty liitteessä 2.



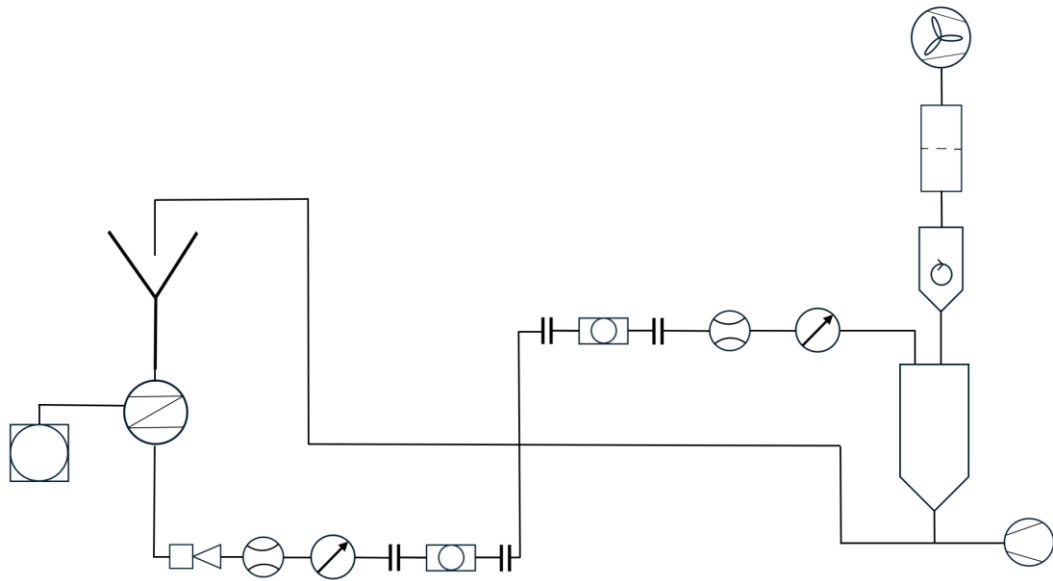
Kuva 32. Positiiviseen paine-eroon perustuvan matalapaineisen harvasiirron testauslaitteiston rakennekaavio.

Harvasiirtotekniikalle on tyypillistä, että kiintoaineen siirtonopeus on korkea ja käytettävä painetaso on matala, joten sitä käytettäessä kompressori korvataan putkilinjaan ennen syöttölaitteistoa sijoitettavalla sivukanavapuhaltimella. Käytettävä kiintoaine annostellaan suppilosta putkilinjaan erillisen syöttölaitteen avulla, jonka rakennetta ei kuvan 32 kaaviossa ole tarkemmin määritelty. Käytännössä yleisiä syöttölaitteita jatkuvatoimiseen matalapaineisiin siirtoon ovat erilaiset sulku- ja ruuvisyöttimet. Testauslaitteessa olisi hyvä olla mahdollisuus erilaisten syöttölaitteiden testaamiselle ilman suuria rakennemuutoksia.

Testauksessa käytettävä kiintoaine syötetään putkilinjassa olevaan ejektoriin, jonka avulla siirrettävän seoksen siirtonopeutta kiihdytetään riittävälle tasolle. Muilta osin putkilinjan perusrakenne on mahdollisimman pitkälle sama kuin muillakin testaustyypeillä.

Kiintoaineen kierrätys vastaanotosta takaisin lähetyksen syöttösuppiloon toteutuu samaa putkilinjaa pitkin kuin muillakin siirtotekniikoilla, mutta matalapaineisessa testauksessa kiintoaineen takaisinkierrätykseen voidaan käyttää esimerkiksi kompressorilla tuotettua paineilmaa, jos yhden puhaltimen käyttö sekä lähetyksen, että kierrätyksen tarpeisiin muodostuu haasteelliseksi.

Kolmas testauslaitteistorakenteeseen valittu siirtotekniikka on negatiiviseen paine-eroon perustuva pneumasiirto, jonka rakennekaavio on kuvassa 33. Rakennekaaviossa käytettyjen symbolien kuvaukset on esitelty liitteessä 2



Kuva 33. Negatiiviseen paine-eroon perustuvan matalapaineisen harvasiirron testauslaitteiston rakennekaavio.

Alipaineisessa pneumasiirron testauslaitteistorakenteessa käytetään samaa sivukanavapuhallinta kuin kuvan 32 ylipaineisessa järjestelmässä, mutta se sijoitetaan kuvan 33 rakenteen mukaisesti vastaanoton yhteyteen. Näin saadaan aikaiseksi siirtoon käytettävä kantokaasun alipaineistus. Alipaineinen kantokaasu ja siirrettävä kiintoaine erotellaan toisistaan vastaanoton yhteydessä olevan syklonirakenteen avulla, ennen kantokaasun suodatusyksikköä. Syklonirakenne on pystyttävä erottamaan järjestelmästä erillisen venttiilin avulla, käytettäessä laitteiston kahta muuta testaustekniikkaa, joissa syklonin käytölle ei ole tarvetta. Kiintoaineen annostelun, aineen takaisinkierätyksen ja putkistorakenteiden osalta negatiiviseen ja positiiviseen jatkuvaan paine-erosiirtoon perustuvat laitteistot eivät eroa merkittävästi toisistaan.

Koska järjestelmän toteuttamisesta aiheutuvat kokonaiskustannukset osoittautuvat esisuunnitteluvaiheessa olevan merkittävän korkeat, on oleellista punnita eri tekniikoiden, rakenteiden ja osavaihtojen tuottamaa arvoa niiden kustannuksiin nähden. Kohdeyrityksen näkökulmasta ylipaineiset tiheä- ja harvasiirtotekniikat ovat oleellimmat testauslaitteistoon liittyvät ominaisuudet. Annosperustainen tiheäsiirto voidaan toteuttaa jo suunniteltuja laiterakenteita hyödyntäen. Näitä valmiita rakennesuunnitelmia käytettäessä voidaan myös keskittyä eri ominaisuuksien arvon punnitsemiseen valmiissa rakenteessa. Jos laitteesta löytyy

ominaisuuksia, jotka ovat oleellisia vain kaupallisissa sovelluksissa mutta eivät tuota testaukseen välttämätöntä hyötyä, voidaan niiden karsintaan keskittyä, kun perussuunnittelu on jo tehty.

Annosperustaisen lähetinsäiliön alapohjassa on kuvien 15 ja 16 mukaisesti purkuputki, joka yhdistää lähetinrakenteen putkilinjan kanssa. Harvasiirtotekniikassa voidaan käyttää yhtä lähetinsuppiloa, joka on kiinnitettävissä sulkutai ruuvisyöttimeen. Syötinlaitteen jatkeena voidaan käyttää venturiputkea, joka taas yhdistää tämän toisenlaisen lähetinrakenteen putkilinjaan. Kun molemmissa lähetinrakenteissa on samankaltainen modulaarikiinnitys siirto-putkistojen alkupäähän, on niiden vaihtaminen eri testauksien välillä mahdollisimman vaivatonta.

Sisähalkaisijaltaan eroavia putkilinjoja on tässä vaiheessa valittu laitteistoon kolme kappaletta, jotka tulevat kiinteästi kannakoituna järjestelmän käyttöön. Tällöin putkilinjat pysyvät paikoillaan, ja lähetinrakenteita voidaan vaihtaa niiden välillä eri testausten asettamien vaatimusten mukaan.

Testauksissa käytettävät materiaalmäärät tulevat olemaan maltillisempia kuin kaupallisissa tarkoituksissa, joten laitteiston lähetin- ja vastaanottorakenteiden kapasiteettien ei tarvitse olla erityisen suuret. Tämän ansiosta käytettävien rakenteiden ei tarvitse olla erityisen raskaita tai kookkaita, joka helpottaa niiden siirtelyä ja modulaarisuutta. Eri siirtokapasiteettien testauksissa pitää käyttää hyödyksi saavutettujen tulosten skaalausta suunniteltavalle kaupalliselle laitteistolle soveltuvaksi, jos testauslaitteiston rakenne tai muut testauksen yksityiskohdat eivät ole sellaisenaan suoraan verrattavissa.

Vastaanotto voi olla rakenteeltaan erittäin yksinkertainen, kunhan se sisältää mahdollisuuden materiaalin takaisinkierrätykseen ja pölynpoistojärjestelmien käyttöön. Alipaineisen siirron testauksiin vaadittavat rakennemuutokset vastaanottopäässä tuovat aiemmin mainittuja kustannuksia, joiden arvoa tulee tarkastella tarkemmin. Vaikka vastaanotto tulee olemaan kiinteä, on sen suunnittelussa otettava huomioon erityisesti mahdollisuus lisätä tai muokata erilaisia järjestelmiä kiinteän rakenteen yhteyteen. Eri pölynpoistolaitteistot tai syk-lonit ovat esimerkkejä tämän kaltaisista lisäysmahdollisuuksista.

5 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutustua pneumaattisen materiaalinkäsittelyn eri teknologioihin ja esisuunnitella teoriaa apuna käyttäen pneumasiirron testauslaitteisto, jolla voidaan testata erilaisia laitteistokomponentteja ja eri kiintoaineiden käyttäytymistä pneumasiirrosta. Työn kirjallisuuskatsauksessa on tutustuttu akateemisten kirjallisuuslähteiden ja tarjolla olevien kaupallisten laitesovellustoimittajien materiaalien avulla pneumasiirtoon eri aineiden siirto- ja käsittelytekniikkana sekä komponentteihin, joilla tämä teknologia on mahdollistettu. Työn käytännön osuudessa on tutkittu ja vertailtu erilaisia vaihtoehtoja, joita testauslaitteistorakenteessa voidaan hyödyntää sekä tehty käytännön esisuunnittelua sekä rakennekokonaisuus-, että komponenttitasolla.

Esisuunnitteluprosessin tavoitteena oli edesauttaa varsinaisen laitesuunnitteluprosessin aloittamista ja siinä etenemistä. Työn sisältöä voidaan hyödyntää kohdeyrityksen sisäisenä pneumasiirron peruseriaatteiden perehdytysteoksena sekä lähtötietomateriaalina testauslaitteiston varsinaisessa suunnittelu- ja toteutusprosessissa.

Työn tuloksena saavutettiin kolmelle eri pneumasiirtotekniikalle omat prosessikaaviot, jotka tulee sisältyä tulevan testauslaitteiston rakenteeseen niin, että testauksia voidaan tehdä mahdollisimman kattavasti. Laitteiston putkistorakenteet on melko selkeästi määritelty ja mallinnettu esisuunnittelumateriaalissa, joten niiden osalta voidaan selvittää mahdollisimman pienin rakenteellisin muutoksia. Työssä osoitetaan, että laitteiston raskasrakenteisuuden perustuen, modulaarisuudelle suositellaan annettavan erityistä painoarvoa. Käytännön osuuden kirjalliset tulokset osoittavat selkeästi ja perustellusti esitellyistä vaihtoehdoista suositteluvimmat. Tähän kokonaisuuteen perustuen, esisuunnittelullisiin tavoitteisiin on päästy.

Tulokset pohjautuvat sekä akateemiseen kirjallisuuteen, että kohdeyrityksen pneumaattisten kuljettimien liiketoimintaosaston henkilöstön alalta kartuttamiin kokemuksiin ja tietoihin. Akateemiset kirjallisuuslähteet painottavat toistuvasti kokemuksen ja testausten merkitystä pneumasiirtolaitteiston suunnittelussa, joten tämän työn aihe ja siihen käytetyt lähteet ovat oikein yhdisteltyinä erinomainen kokonaisuus tukemaan testauslaitteiston kehitystyötä. Tämän esisuunnittelun pohjalta tehtävään testauslaitteiston varsinaiseen suunnitteluun ja toteutukseen tulee osallistumaan ammattitaitoisia henkilöitä, jotka osaavat hyödyntää työssä

olevia tietoja harkintansa mukaan sekä tekemään perusteltuja muutoksia, joita ei ole välttämättä osattu vielä huomioida tämän työn sisällössä.

Jatkotutkimusaiheena on mainittava erityisesti testauslaitteiston varsinainen suunnittelu- ja toteutus käytännössä sekä myöhemmin laitteistolla tehtävät eri kiintoaineiden tai komponenttien testaukset. Myös erilaisten lisälaitteiden, kuten seulonnan tai pölynhallinnan komponenttien kehittäminen testauslaitteiston avulla tai sen käyttöön on yksi aihepiiri, jossa erilaisille tutkimuksille on varmasti tarvetta. Laitteiston rakennevalinnassa esiin noussut ajatus kiintoaineen lähettimestä, jossa yhdistetään korkeapaineinen tiheäsiirto paineistetun lähetinsäiliön avulla ja matalapaineinen harvasiirto lähetinsäiliön toimiessa hopperina, voisi olla yksi mahdollinen tuotekehitysidea tulevaisuuden pneumasiirtolaitteistoteknologian hyödynnettäväksi.

Lähteet

- Aplicens S.A. 2024. Pressure transmitter PCE-28. <https://aplisens.com/pc-28.html>
- Bhatia, A. 2008. Pneumatic Conveying Systems. Continuing Education and Development engineering, Inc. 56 s.
- Bridle, I., Woodhead, S.R. & Reed, A.R. 1999. The analysis of particle degradation in pneumatic conveyors utilizing a pilot-sized test facility. *ImechE* 1999. S. 85–91
- Dhodapkar, S., Solt, P. & Klinzing, G. 2009. Understanding Bends In Pneumatic Conveying Systems. *Chemical Engineering: Solids Processing*. S. 53–60
- Fathollahi, M., Ahmadi, M.E. & Hosseini, S.M.J. 2019. Electrostatic Charge Generation in Pneumatic Conveying Process: Effect of Particle Properties. *Journal of Power and Energy Engineering* 2019. 11 s.
- Fleming, J.S., Tang, Y. & Cook, G. 1998. The Twin Helical Screw Compressor Part 1: Development, Applications and Competitive Position. *ImechE* 1998. S. 355–367
- Güner, M. 2006. Pneumatic conveying characteristics of some agricultural seeds. *Journal of Food Engineering* 80. S. 904–913
- Iliffe & Sons LTD. 1935. *Autocar Handbook*, 13th edition. 224 s.
- Jaworski, A. & Dyakowski, T. 2002. Investigations of flow instabilities within the dense pneumatic conveying system. *Powder Technology* 125. S. 279–291
- Jones, M. 2005. Characterisation for pneumatic conveyor design. *Characterisation of Bulk Solids*. Edited by Don McGlinchey. S. 151–180
- Kalman, H. & Rawat, A. 2019. Flow regime chart for pneumatic conveying. *Chemical Engineering Science* 211. 12 s.
- Klinzing, G.E., Rizk, F., Marcus, R. & Leung, L.S. 2010. *Pneumatic Conveying of Solids*, Third Edition. 568 s.

Kuang, S., Zhou, M. & Yu, A. 2019. CFD-DEM modelling and simulation of pneumatic conveying: A review. *Powder Technology*. 22 s.

Laitex Oy. 2022. Pneumaattisista kuljettimista Laitexille uusi tuote ja liiketoiminta. Saatavissa: <https://www.laitex.fi/fi/pneumaattisista-kuljettimista-laitexille-uusi-tuote-ja-liiketoiminta/>

Laitex Way. 2024. Verkkosivusto. Saatavissa: www.laitex.fi/fi/laitex-way

Mapro International S.p.A. 2020. Regenerative blowers and exhausters. CL Series and TBT Type.

Martinussen, S.E. 1996. The Influence of the Physical Characteristics of Particulate Materials on their Conveyability in Pneumatic Transport Systems. 215 s.

Mills, D. 2016. *Pneumatic Conveying Design Guide, Third Edition*. 783 s.

Molerus, O. 1996. Overview: Pneumatic transport of solids. *Powder Technology* 88. S. 309–321

Raksha, S., Bohomaz, V., Shcheka, I., Stefanov, V. & Nesterenko, A. 2018. Research of the dependence of pneumatic conveyor compressors power on project parameters of transport machines. *MATEC Web of Conferences* 230. 8 s.

Raoufat, M.H. & Clarke, B. 1998. Design and Development of a Packed-bed Continuous Pneumatic Conveyor. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71. 1998. S. 363–371

Rinkinen, A. 2021. Flow must go on! – Laitexin 35 ensimmäistä vuotta. 157 s.

Shah, K.P. 2017. *Fundamentals, Troubleshooting & Maintenance of Ash Handling Plants and Pneumatic Conveying Systems for Bulk Materials*. 124 s.

Taghavivand, M., Elchamaa, B., Sowinski, A. & Mehrani, P. 2019. Study of electrostatic charging of single particles during pneumatic conveying. *Powder Technology* 355. 2019. S. 242–250

Tank Pro Oy. 2020. Vaihtosäiliö. STEP-tiedosto.

















UWT GmbH. 2024. Rotary paddle level switch Rotonivo RN 3001.
www.uwtgroup.com/en/rotonivo-rn-3001.html

Liite 1. Erätoimisen pneumasiirtolaitteiston lähetinrakenteen toiminnankuvaus



Liite 2. Diplomityössä käytetyt kaaviosymbolit

Diplomityössä käytetyt kaaviosymbolit

SYMBOLI	KUVAUS
	Pneumaattinen kuljetin (Paineistettava <u>pneumalähetin</u> ylipaineiseen annossiirtoon)
	Kompressori
	Puhallin (Yli- ja alipaineiseen matalapainesiirtoon)
	Virtausmittari
	Painemittari
	Varoventtiili (Päästösuunta viivan puolella)
	Palloventtiili
	Ohjausjärjestelmä
	Näkölasi
	Laippaliitos
	Ejektori
	Suodatinyksikkö
	Syklonierotin
	Vastaanottosiilo
	Suppilo (Syöttösuppilo)
	Annostelija kiintoaineille