

Harri-Pekka Kasurinen

**Paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden parantaminen**

Insinööriö  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ala  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Kevät 2010



**Kajaanin  
ammattikorkeakoulu**

## OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikan ala	Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikka
Tekijä(t) Harri-Pekka Kasurinen	
Työn nimi Paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden parantaminen	
Vaihtoehtoiset ammattipinnot Kunnossapito	Ohjaaja(t) Pekka Juntunen  Toimeksiantaja Kajaanin Ammattikorkeakoulu
Aika Kevät 2010	Sivumäärä ja liitteet 29+1
<p>Tämän insinöörityön aiheena oli kajaanilaisen yrityksen paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden parantaminen. Työn tavoitteena oli miettiä tapoja paineilman käytön vähentämiseksi ja järjestelmän hyötysuhteen parantamiseksi. Koska paineilmaalla on hyvin huono hyötysuhde ja sitä käytetään laajalti, yritykset voivat säästää kustannuksia parantamalla paineilmajärjestelmiään. Työ aloitettiin tutkimalla, kuinka paineilmaa tuotetaan ja mihin sitä käytetään. Esille tulleita tapoja energiatehokkuuden parantamiselle oli verkoston osien sulkeminen yöaikaan, kompressorin hukkalämmön talteenotto ja paineilmaejektorien vaihto alipainepumpuiksi.</p> <p>Verkoston osien sulkeminen on halpa ja suhteellisen yksinkertainen tapa pienentää verkoston tilavuutta, ja siten parantaa energiatehokkuutta. Määräajoin suoritettava vuotojen kartoitus on vahvasti suositeltavaa, jotta vuodot pysyvät kurissa. Hukkalämpö ohjataan jo nykyisellään rakennuksen ilmanvaihtoon, jossa se vähentää talvella lämmitystarvetta. Ejektorien käyttö on energiataloudellisesti epäedullista, ja vaihtamista alipainepumppuihin suositellaan. Osana insinöörityötä oli testata SKF:n TMSU 1 ultraääni-ilmaisinta, jolla etsitään paineilma vuotoja. Ultraääni-ilmaisimella voidaan etsiä vuodot nopeasti ilmaan mitään kemikaaleja.</p>	
Kieli	suomi
Asiasanat	paineilma, energiatehokkuus
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Verkkokirjasto Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Mechanical and Production Engineering
Author(s) Harri-Pekka Kasurinen	
Title Improving the Energy Efficiency of a Compressed Air System	
Optional Professional Studies Maintenance	Instructor(s) Pekka Juntunen
	Commissioned by Kajaani University of Applied Sciences
Date Spring 2010	Total Number of Pages and Appendices 29+1
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to improve the compressed air energy efficiency of a Kajaani based technology company. The objective was to find ways to reduce the energy used by the compressed air system.</p> <p>Because compressed air is very inefficient and it is used widely, companies can save large amounts of money by improving their compressed air systems and reducing their use. The work started by studying how compressed air is produced, used and how the pressure drops in the network.</p> <p>The proposed ways of improving energy efficiency were to isolate parts of the network during the off-hours, including periodic leak detection to the maintenance program, recovering heat from the compressors and changing the vacuum generators.</p> <p>Cutting off part of the system during the weekends and nights was found out to be a comparatively cheap and easy way to reduce compressed air usage. Leak detection is strongly recommended for keeping the system losses as low as possible. Heat recovery is already used, air from the compressor room is guided to the ventilation system. Using pneumatic ejectors to generate vacuum was discovered to be inefficient, and it is recommended to change the ejectors to electrical vacuum pumps in the future. Part of this thesis was also to test leak detection with an ultrasonic leak detector. For this purpose an SKF TMSU 1 leak detector was borrowed from an industrial hardware supplier. The result was that this is a viable method to detect leaks quickly and without any chemicals.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	compressed air, energy efficiency
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Electronic library Theseus <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 PAINEILMAN KÄYTTÖ	2
2.1 Paineilma	2
2.2 Paineilman tuottaminen	3
2.2.1 Mäntäkompressori	3
2.2.2 Ruuvikompressori	4
2.2.3 Lamellikompressori	5
2.2.4 Muut kompressorityypit	5
2.3 Jälkikäsitteily	5
2.4 Paineilman siirto	6
2.4.1 Suora verkko	6
2.4.2 Rengasverkko	7
2.5 Laitteet	8
2.5.1 Alipaineen tuottaminen	8
2.5.2 Paineilman käyttökohteet	9
3 PAINEILMAN ENERGIATEHOKKUUS	10
3.1 Paineilmassa oleva energia	10
3.2 Hävikkikohteet	10
3.3 Vuodot	11
3.4 Hukkalämmön talteenotto	12
3.4.1 Tapoja käyttää hukkalämpöä	13
3.4.2 Kompressorin imuilma	14
4 SUORITETUT MITTAUKSET	15
4.1 Verkosto ja käyttökohteet	15
4.2 Vuotojen kartoitus	16
4.3 Kompressorin käynnin mittaus	17
5 TOIMENPITEITÄ ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMISEKSI	18
5.1 Verkoston osien sulkeminen	18
5.2 Kunnossapito	18
5.3 Alipaine	18

5.4 Mekaaniset liikkeet	20
5.4.1 Solenoidi	21
5.4.2 Servomoottori	21
5.4.3 Lineaarimoottori	21
5.5 Energiatohokkuuden arviointi	21
5.6 Lämmön talteenotto	23
6 TULOSTEN ANALYSOINTI	24
7 YHTEENVETO	25
LÄHTEET	26

## 1 JOHDANTO

Teollisuudessa käytetään kolmea tärkeää energianlähdettä: sähköä, vettä ja maakaasua. Nykyään jotkut nostavat näiden kolmen rinnalle neljännen, paineilman. Paineilmassa energiansiirron väliaineena käytetään kokoon puristettua ilmaa. Koska ilmaa on aina saatavilla. Se on vaaraton aine ja käytetään sitä lähes jokaisessa teollisuuslaitoksessa. [1, s. 2.]

Nykyisin, kun sähkö on kallista ja yritykset kiinnittävät huomiota ympäristönäkökohtiin, on myös paineilman energiatehokkuuden parantaminen tullut ajankohtaiseksi. Huono energiatehokkuus on paineilman käytön suurin haittapuoli. Koska paineilmaa käytetään paljon, voi hyötysuhdetta parantamalla säästää paljon rahaa.

Kajaanilainen teknologiayritys halusi parantaa paineilmajärjestelmän energiatehokkuutta osana laajempaa energiatehokkuuden parantamisohjelmaa. Tavoitteena on vähentää yrityksen hiilijalanjälkeä vähentämällä energiankulutusta. Toinen, ehkä tärkeämpi tekijä on kustannusten lasku energiakulujen pienentyessä. Insinööriyön tavoitteena oli saada ehdotuksia paineilman energiatehokkuuden parantamiseksi ja käytön vähentämiseksi.

## 2 PAINEILMAN KÄYTTÖ

### 2.1 Paineilma

Paineilma on kokoon puristettua ilmaa, jota käytetään energian siirrossa väliaineena. Koska ilma puristuu kasaan, on sen tarkastelu teoreettisesti vaikeampaa kuin nesteiden, jotka eivät puristu kokoon. Siksi teoreettiset tarkastelut tehdään usein likimääräismenettelyillä. Ilmalle voidaan soveltaa ideaalikaasun yhtälöitä normaaleissa lämpötiloissa ja alle 20...30 baarin paineissa. [2, s. 12.]

Paineilman käyttö alkoi jo esihistorian, noin 3000 eaa. aikana, jolloin palkeita hyödynnettiin raudan ja pronssin valmistuksessa. Ensimmäinen paineilmapumppu keksittiin vuonna 1650. Teollisuudessa paineilman käyttö alkoi 1800-luvulla, kun kaivoksissa alettiin käyttää paineilmalla toimivia poria ja vasaroita. Pariisissa rakennettiin 1880-luvulla paineilmaverkko, jota käytettiin esimerkiksi kellojen ja hissien voimalähteenä. [3, s. 3.] Ensimmäisen kerran pneumatiikkaa käytettiin automaatioon toisen maailmansodan jälkeen. Kehitettiin jopa paineilmalla toimiva logiikkakomponentti, fluidistori, joka jäi kuitenkin käytöstä elektroniikan kehityksessä nopeasti. [2, s. 7.]

Nykyään paineilmaa käytetään hyvin laajalti teollisuudessa. Lähes jokaisessa tehtaassa pienestä konepajasta sellutehtaisiin on paineilmaverkko. [4, s. 3.] Paineilma on helppokäyttöinen väliaine energian käytössä, ja sitä on helposti saatavilla. Jos työpaikalta ei löydy valmista paineilmaverkkoa, sitä voidaan valmistaa siirrettävillä kompressoreilla. [2, s. 8.]

Paineilmaa käytetään esimerkiksi puhdistukseen, jossa lika poistetaan nopean ilman liikkeen avulla sekä, hienojen aineiden kuljetukseen, jossa ilmaa käytetään väliaineena. Paineilmaa käytetään tyypillisimmillään kappaleautomaatiossa tehtäessä erilaisia liikkeitä, joita tuotetaan sylintereillä, paineilmamoottoreilla ja tarttujilla. Pneumatiikkaa käytetään automaatioissa vaadittaessa nopeita liikkeitä, käsiteltäessä keveitä kappaleita, liikkeiden tapahtuessa rajalta rajalle tai vaadittaessa pehmeää siirtoa. Koska paineilmavuoto ei aiheuta esimerkiksi hydrauliiikan tapaan sotkua, soveltuu se myös puhtaita oloja vaativaan teollisuuteen, kuten lääkkeiden ja elintarvikkeiden tuotantoon. Koska paineilma on yksinkertainen energian siirtotapa sekä sen hankintakustannukset ovat alhaiset, sitä käytetään laajalti huolimatta sen suurimmasta haitasta, pienestä hyötysuhteesta. [2, s. 8.]

## 2.2 Paineilman tuottaminen

Paineilmaa tuotetaan kompressoriksi kutsutulla laitteella. Kompressorin nostaa kaasun paineen vähintään kaksinkertaiseksi imupaineeseen verrattuna. [5, s. 26.] Kompressorit voidaan jaotella staattisen ja kineettisen puristuksen perusteella. Kineettisessä puristuksessa kaasu kiihdytetään suureen nopeuteen pyörivän juoksupyörän avulla. Tämän jälkeen ilma ohjataan johtolaitteeseen, jossa sen nopeus muuttuu staattiseksi paineeksi. Tämänkaltaiset kompressorit sopivat suurien tilavuusvirtojen tuottamiseen.

Staattisessa puristuksessa kaasu ohjataan tilaan, jonka tilavuutta pienentämällä saadaan kaasun painetta kasvatettua. [2, s. 43.] Kineettisiä kompressoreita rakenteensa perusteella ovat ainakin radiaalikompressorit ja aksiaalikompressorit. Staattisia kompressoreita ovat mäntäkompressorit ja ruuvikompressorit. Nykyään yleisimmät käytössä olevat kompressorit ovat mäntä-, ruuvi- ja lamellikompressorit. Taulukosta 1 nähdään niiden tuottamat paineet ja tilavuusvirrat. [5, s. 26.]

Taulukko 1. Yleisimpien kompressorien paineiden ja tilavuusvirtojen vertailu. [5, s. 26.]

Tyyppi:	Tuotettu paine [bar]:	Tilavuusvirta [m <sup>3</sup> /min]:
Mäntäkompressorit	1...1000	0,005...3
Ruuvikompressorit	0,8...30	0,25...10
Lamellikompressorit	0,2...8	0,08...2
Radiaalikompressorit	0,7...300	0,1...50
Aksiaalikompressorit	0,8...5	10...1000

### 2.2.1 Mäntäkompressorit

Mäntäkompressorit on staattinen kompressorit. Mäntäkompressorissa ilma vedetään tilaan eli sylinteriin, jonka tilavuutta männän liike sitten pienentää. Mäntäkompressorit on vanhin kompressorityyppi. Monivaiheisella mäntäkompressorilla saavutetaan hyvin korkeita paineita, jopa 1000 baaria. Yksivaiheisellakin kompressorilla päästään 10 baarin paineeseen.

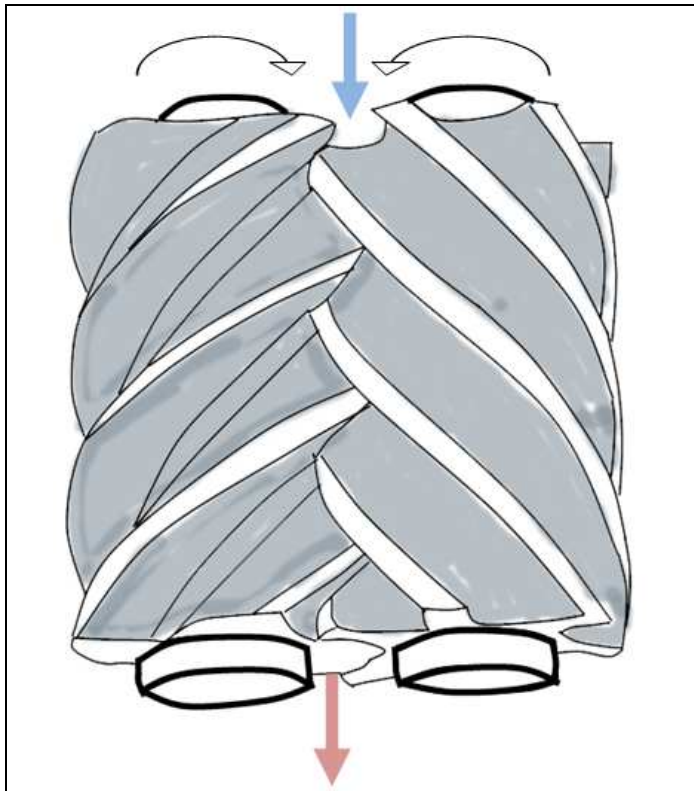


Mäntäkompressorin huonoina puolina on ylimääräinen tila, joka jää sylinterin kannen ja männän väliin työkierron yläosassa. Tämä tila on n. 3...10 % sylinterin iskunpituudesta, ja se huonontaa kompressorin hyötysuhdetta. Toinen huono puoli on paineilman sykkivyyys, jota voidaan kuitenkin tasoittaa painesäiliöllä. Huono puoli on myös kompressorin kova äänitaso. [5, s. 29.]

### 2.2.2 Ruuvikompressori

Ruuvikompressori on staattinen kompressori. Toimintaperiaatteessa roottorit imevät ilmaa uriin imuaukon kautta. Kun roottori pyörii, yhteys ilman imuaukkoon sulkeutuu. Samalla pesän ja roottorien välinen tila pienenee. Lopulta ilma ohjataan paineliitännään. Ruuvien mekaniikka nähdään kuvasta 1.

Jokaisella paineyksiköllä on kiinteä painesuhde, joka riippuu ruuvien noususta ja pituudesta sekä paineliitännän muodosta. Ruuvikompressorissa ei ole venttiileitä, eivätkä mekaaniset voimat aiheuta epätasapainoa. Tämän ansiosta pienillä kompressoreilla voidaan aikaansaada suuria tuottoja. Nykyään käytössä on epäsymmetrisiä ruuvien muotoja. Yleisin muoto neliharjaisen ruuvien ja kuusiuraisen luistin yhdistelmä. [2, s. 44.]



Kuva 1. Ruuvikompressorin ruuvit

### 2.2.3 Lamellikompressor

Lamelli- eli siipikompressor koostuu pyöreästä pesästä, jossa on epäkeskeisesti laakeroitu roottori. Roottorissa on säteittäiset urat, joissa olevien siipien väliin jää ilmatiloja. Kun roottori pyörii, näiden tilojen tilavuus pienenee ja samalla siinä olevan ilman paine kasvaa. Kompressor on siis rakenteeltaan staattinen kompressor [2, s. 44]. Kuten ruuvikompressorissa, lamellikompressorissakaan ei ole imu- eikä pakoventtiileitä. [5, s. 30.]

### 2.2.4 Muut kompressorityypit

Muita kompressorityyppejä ovat esimerkiksi kalvokompressorit ja nesterengaskompressorit. Kalvokompressorissa mäntä liikuttaa kalvoa. Kyseessä on siis staattinen kompressor. Kalvokompressorია käytetään kun tarvittavat ilmamäärät eivät ole isoja, ja tarvitaan öljytöntä ilmaa. Roottoripuhaltimilla saadaan suuria ilmamääriä, mutta paineet ovat pieniä. [5, s. 30.]

## 2.3 Jälkikäsittely

Kompressorin jälkeen verkostossa tulee eteen paineilman jälkikäsittely. Tämä koostuu paineilman jäähdyttämisestä, kuivaamisesta ja suodattamisesta. Suurin ongelma paineilmajärjestelmissä on vesi, sekä nesteinä että höyrynä. Se aiheuttaa muun muassa työkalujen käyttöiän lyhentymistä, työkalujen tehon laskua, ruostumista ja ohjausjärjestelmä- ja laitevaurioita. [4, s. 11.]

### Paineilmasäiliö

Usein paineilmajärjestelmissä on paineilmasäiliö. Säiliötä ei ole pakko olla, mutta yleensä niitä on yksi tai useampia. Säiliö tasaa kulutushuippuja, toimii vedenerottimena, vaimentaa paineenvaihteluita ja jäähdyttää ilmaa. Säiliön koko määräytyy kompressorin tyypin ja tuoton

sekä kulutuksen suuruuden mukaan. Lisäksi tulee ottaa huomioon säätöjärjestelmän ja automatiikan vaatimukset. Toinen huomioitava asia on paineastialainsäädäntö. [2, s. 61.]

## 2.4 Paineilman siirto

Paineilmaa siirretään putkista kootun verkoston avulla. Verkoston osat ovat paineilmasäiliö, putkisto ja käyttökohteiden liitännät. Verkoilla on kolme erilaista rakennetta: [2, s. 59]

- suora verkko
- rengasverkko
- edellisten yhdistelmä.

### 2.4.1 Suora verkko

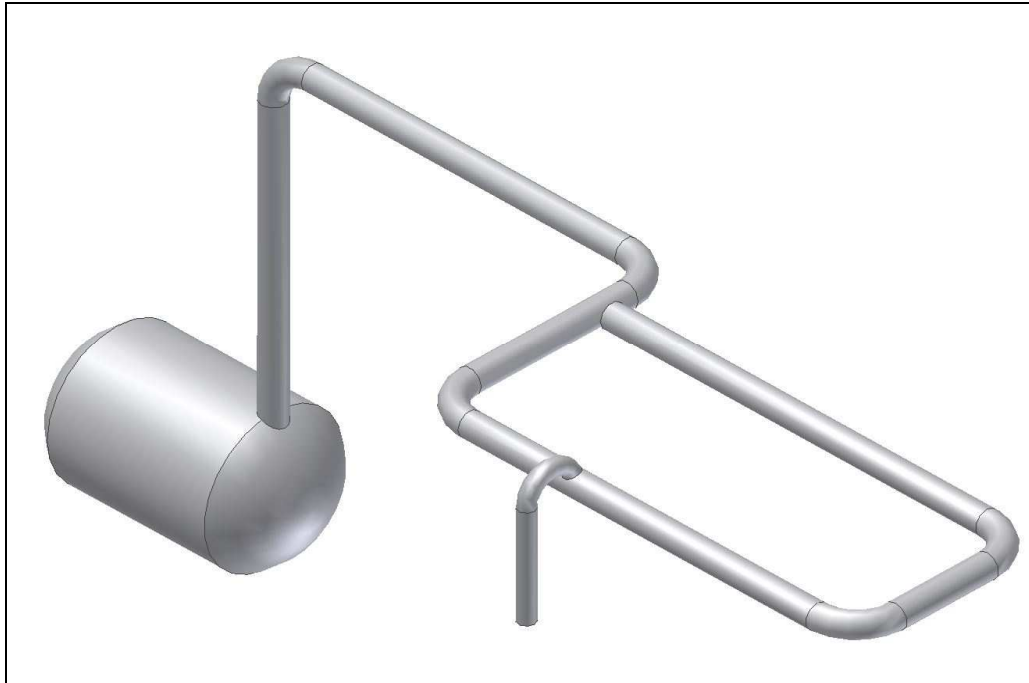
Suorassa verkossa (kuva 2) käytetään yhtä putkea, josta vedetään putket käyttökohteisiin. Verkon etuina on yksinkertainen rakenne, mistä seuraa halpuus. Haittana on se, että jos verkko suljetaan jostain kohtaa, koko loppuverkko jää ilman painetta. Putken kokoa voidaan pienentää loppupäässä. Suora verkko soveltuu käytettäväksi pienissä järjestelmissä, joissa ilman tarve on satunnaista. [2, s. 60.]



Kuva 2. Suora verkko

#### 2.4.2 Rengasverkko

Rengasverkkoa käytetään, kun paineilmaa tarvitaan jatkuvasti, ja erilaisia määriä eri kohteissa. Se on kalliimpi ratkaisu kuin suora verkko. Rengasverkko on nimensä mukaisesti rengasmaisen rakenteen, jossa paineilman virtaus tapahtuu aina vähintään kahta reittiä. Tämä lisää varmuutta ja vähentää painehäviöitä linjastossa. Putkikoko on yleensä pienempi kuin suorassa verkossa. [2, s. 60.] Yhdistelmäverkossa (kuva 3) perusrakenteeltaan rengasmaiseen verkkoon on lisätty suoria osuuksia kulutuskohteiden saavuttamiseksi tai verkon laajentamiseksi. [2, s. 60.] Kuvissa 2 ja 3 näkyy paineilman ulosotto, ns. joutsenkaula. Ulosotto otetaan putken päältä, jotta linjastossa mahdollisesti oleva vesi ei pääse valumaan käyttökohteeseen. [2, s. 61.]



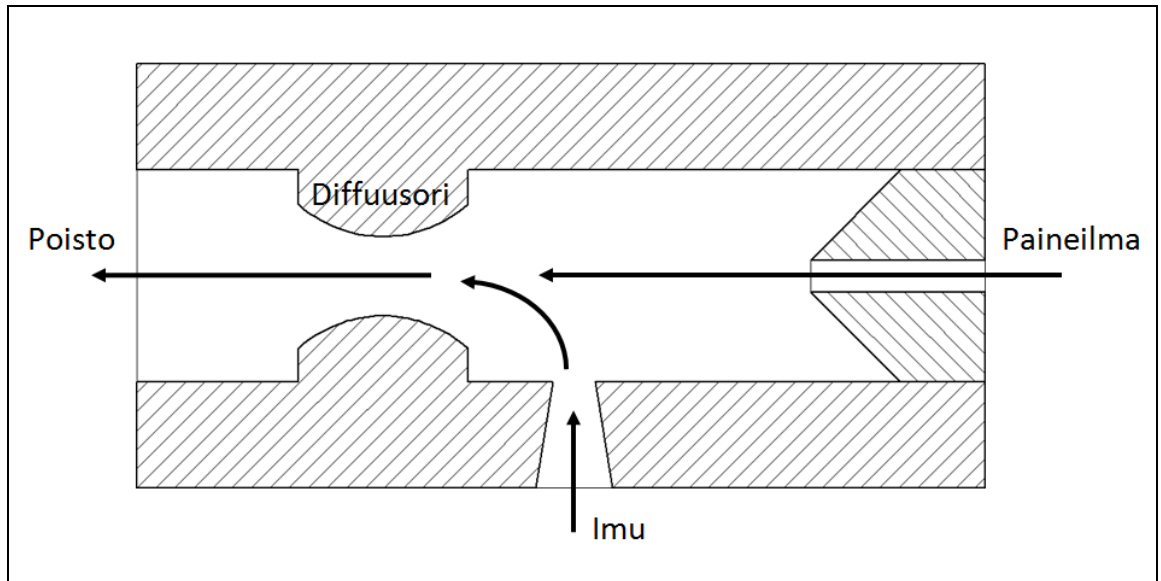
Kuva 3. Rengasverkon ja suoran verkon yhdistelmä

## 2.5 Laitteet

Paineilmaa käytetään muun muassa mekaanisiin liikkeisiin. Lineaariset liikkeet tehdään yleensä sylintereiden avulla. Jos halutaan pyörivää liikettä, voidaan käyttää paineilmamoottoreita.

### 2.5.1 Alipaineen tuottaminen

Alipainetta voidaan tehdä esimerkiksi tarttujia varten paineilmalla ejektorien avulla. Ejektori on laite, jonka läpi ohjataan nopea paineilmasuihku. Laitteen sisällä oleva diffuusori kuristaa putkea, jolloin paineilman nopeus kasvaa. Bernoullin yhtälön mukaisesti virtausnopeuden kasvaminen alentaa painetta, jolloin imuliittimeen syntyy alipaine. [2, s. 156.] Ejektorit ovat edullisia ja yksinkertaisia ja siksi niitä käytetään paljon. Erillisen venttiilin avulla ejektoriin saadaan helposti vielä ulospuhallus tarttujan irtoamista helpottamaan. Kuvassa 4 on esitetty ejektorin toimintaperiaate.



Kuva 4. Ejektorin toimintaperiaate

### 2.5.2 Paineilman käyttökohteet

Paineilma muutetaan mekaaniseksi liikkeeksi useimmiten sylinterien avulla. Sylintereillä saadaan aikaan lineaarinen liike. Paineilmasyylinterit ovat pneumatiikan yleisimpiä komponentteja [5, s. 75]. Vääntösyylintereillä saadaan aikaan pyörivä liike, kun käänkökulma on enintään 360°. Vääntösyylinterissä männässä on hammastus, joka männän edestakaisen liikkeen ansiosta pyörittää hammaspyörää. [5, s. 77.] Muutoin paineilmaa käytetään esimerkiksi puhdistamiseen, putkiposteissa, maalauksessa ja hiekkapuhalluksessa. Nämä tavat hyödyntävät paineilman suoraan. [5, s. 17.]

### 3 PAINEILMAN ENERGIATEHOKKUUS

Paineilman energiatehokkuus on hyvin matala, n. 5 % [2, s. 8]. Tämän takia se soveltuu huonosti kohteisiin, joissa vaaditaan suurta voimaa. Myös ilman kokoonpuristuminen heikentää käyttöä suurien voimien kanssa, koska liikkeiden tarkkuus kärsii. Paineilma soveltuukin parhaiten kohteisiin, jossa vaaditaan suhteellisen suurta nopeutta.

#### 3.1 Paineilmassa oleva energia

Paineilmajärjestelmien yhteydessä puhutaan paineilmaenergiasta. Paineilmalla ei kuitenkaan levossa ole kuin paineesta riippumaton sisäenergia. Sisäenergia riippuu ainoastaan ilman lämpötilasta. Eli sama massa ilmaa sisältää saman energian, olipa se sitten paineilmasäiliössä 8 baarin paineessa tai ulkoilmassa.

Paineilmalla voidaan kuitenkin tehdä työtä. Kompressorit muuttaakin imuilman entalpiaa. Entalpiian kaava on seuraava:

$$H = U + pV$$

$U$  on järjestelmän sisäenergia,  $pV$  on paineen ja tilavuuden tulo. Juuri tätä tuloa kompressorit muuttaa puristaessaan ilmaa kasaan. [2, s. 23.]

#### 3.2 Hävikkikohteet

Suurin paineilman hävikkä aiheuttava asia ovat vuodot. Joidenkin arvioiden mukaan jopa 25...40 % kaikesta tuotetusta paineilmaasta häviää vuotoihin. [3, s. 269.] Painehäviöitä aiheuttavat myös muun muassa putken karheus, vääränlaiset kuristimet ja muut esteet.

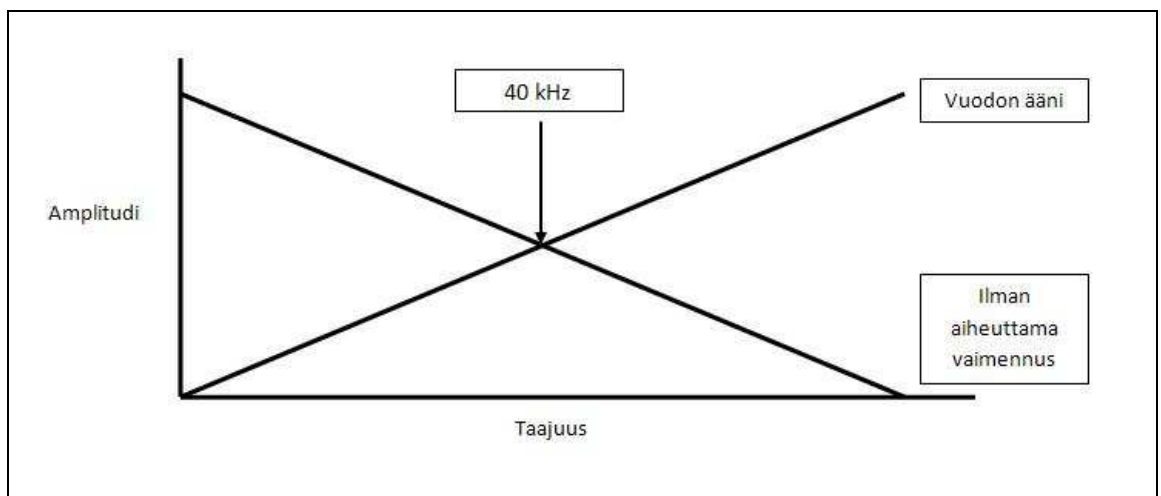
Tuottopuolella suuria hävikkikohteita voivat olla vedenerottimet, jälkijäähdyttimet, kuivaimet ja suodattimet. Käyttöpäässä suurimmat hävikit taas yleensä ovat vuotojen ohella liian pienet putket. Suurimmat häviöt tulevat, kun ilmavirta ja lämpötila ovat korkeimmillaan. [4, s. 31.]

### 3.3 Vuodot

Koska vuodot ovat pahin häviötä aiheuttava asia, niiden kartoitus ja poistaminen tulisi olla ensisijaisen tärkeää. Vuotojen poistamisen kanssa tulee kuitenkin olla tarkkana, sillä monissa tapauksissa vuotojen paikkauksen jälkeen paineilman kulutus palautuu entiselle tasolle muutamassa viikossa. Syytä tähän ovat käyttökohteet, joiden painetta ei säännellä. Tämän takia näiden kohteiden paine kasvaa, kun verkoston häviötä pienennetään. Kun paine nousee, pienistä korjaamattomista vuodoista vuotaa yhä enemmän ilmaa. Ilman mukana olevat pienhiukkaset toimivat kuin hiekkapuhallin, kasvattaen pienten vuotojen kokoa. [6.]

#### Vuotojen paikallistaminen

Vuotojen järjestelmälliseen paikallistamiseen on kaksi tapaa. Ensimmäinen tapa on perinteinen saippuaveden käyttö. Menetelmässä putkien liitoskohdat sivellään saippuvedellä käyttäen sivellintä. Jos liitos vuotaa, se puhaltaa nesteeseen saippuakuplan. Tämä menetelmä on yksinkertainen, eikä vaadi laitteistoinvestointeja. Toisaalta tapa on työläs ja mahdollisesti sotkuinen. Toinen tapa on käyttää ultraääni-ilmaisinta. Joidenkin mielestä tämä on paras työkalu vuotojen paikallistamiseen. [6.] Ultraääni-ilmaisin kuuntelee noin 40 kHz:n korkuista ääntä. Syy juuri tälle taajuudelle johtuu siitä, että piirretäessä käyrästä, jossa on äänen vaatima energia taajuuden suhteen, sekä ilman aiheuttama vaimeneminen taajuuden suhteen, käyrät leikkaavat 40 kHz:n kohdalla, kuten nähdään kuvasta 5. [7.]



Kuva 5. Ilman aiheuttama vaimentuminen taajuuden suhteen.

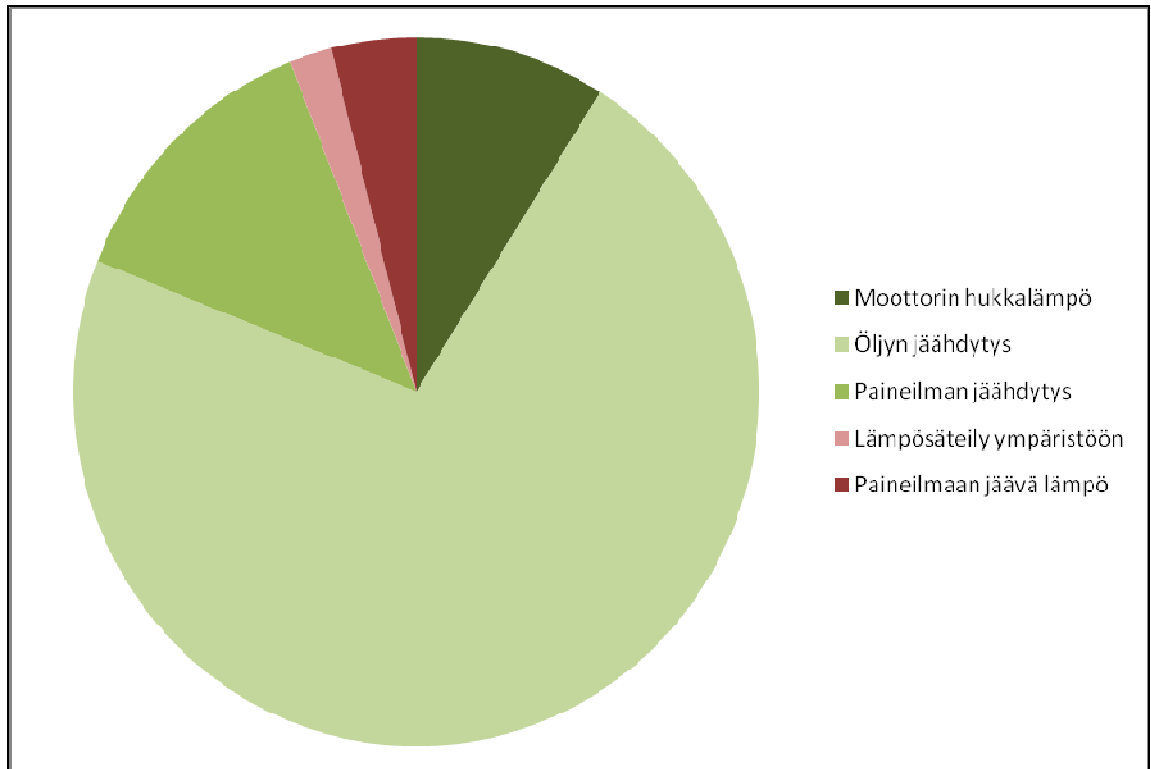


### 3.4 Hukkalämmön talteenotto

Yksi tapa, millä kompressorin käyttämää sähköenergiaa voidaan kompensoida, on hukkalämmön talteenotto. Kuten edellä todettiin, ilma sisältää aina saman määrän energiaa, olipa se missä paineessa tahansa. Tämän johdosta kaikki kompressoriin syötetty sähköenergia muuttuu lämmöksi.

Kun paineilma jäähdytetään samaan lämpötilaan kuin imuilma, se ei vie mukanaan yhtään energiaa kompressorihuoneesta. [2, s. 23.] Kompressorin viemästä energiasta voidaan hyödyntää 94 %, 2 % energiasta poistuu lämpösäteilynä ja 4 % jää paineilmaan. [5, s. 44]. Yleensä oikein suunniteltu talteenotto saavuttaa 50...90 %:n tehokkuuden [4, s. 59]. Lämmönlähteitä on monivaiheisen öljyttömän kompressorin väli- ja jälkijäähdyttimet [9, s. 39]. Kummankin osuus on noin 40 %. Loppu lämpö poistuu sylintereiden kautta.

Öljyjäähdytteisissä ruuvikompressoreissa suurin osa lämmöstä poistuu öljynjäähdyttimen kautta, osuus lämmöstä on noin 80 %. Suurin osa lopusta lämmöstä poistuu jälkijäähdyttimestä ja pieni osuus kompressorin koteloinnista ja öljynpoistajassa. [8.] Kuvasta 6 nähdään kompressorista tulevan lämmön lähteet. Punaisella on merkitty lähteet, joita ei saada hyödynnettyä, ainakaan suoraan. Vihreällä on merkattu lähteet, jotka voidaan hyödyntää. Toisaalta säteilevä lämpö kuitenkin lämmittää kompressorihuonetta, ja paineilman mukana lähtevä lämpö jää kiinteistöön, jolloin kaikki lämpö saadaan talteen. Tästä voi olla myös haittaa kesällä.



Kuva 6. Kompressorista tuleva lämpö [5.]

#### 3.4.1 Tapoja käyttää hukkalämpöä

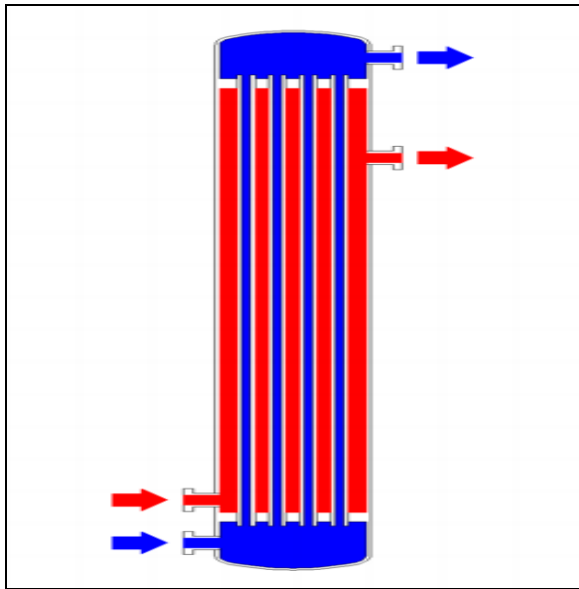
Imuilma tulisi ottaa mahdollisimman matalasta pisteestä, kuitenkin niin, ettei mukaan lähde hiekkaa tai pölyä. Joissain tapauksissa tarvitaan lisäpuhaltimia saamaan riittävä paine kompressorin imupuolelle. Liian suuri tai pieni paine huonontaa hyötysuhdetta.

Imuilma tulee ohjata kompressorin imuilman ottoon sekä jäähdytyspinnoille niiden suuntaisesti. Poistuva lämmin ilma poistetaan huoneesta kompressorin ja muiden ilmajäähdytteisten laitteiden tason yläpuolelta. Tulee myös varmistaa, ettei yhden laitteen lämmittämää ilmaa ohjata toisen laitteen ilmanottoon. [8.]

Kompressorin hukkalämpö käytetään yleensä kiinteistön lämmittämiseen. Tällöin kompressorihuoneesta poistettava lämpö johdetaan lämmitettäviin tiloihin kanavajärjestelmän kautta. Kun lämmitystarvetta ei ole, johdetaan lämpö läpän tai ritilän avulla ulos. Ritilää voidaan ohjata termostaatin avulla, jolloin voidaan lämmityskohteessa ylläpitää tasaista lämpötilaa. Jo alle 20 kW:n kompressorin tuottama lämpö riittää omakotitalon lämmitystarpeeseen. Hukka-

lämpöä käytetään myös muun muassa kuivausprosesseissa, tuulikaappien ja oviaukkojen lämmityksessä sekä polttoilman esilämmityksessä. [5, s. 45.]

Lämmönvaihtimen avulla voidaan myös lämmittää vettä. Kompressorien yhteydessä olevilla lämmönvaihtimilla saadaan 70 °C:n lämpöistä vettä. Tällä tavalla lämmitettyä vettä voi käyttää esimerkiksi talousvetenä. [5, s. 45.] Kuvassa 7 nähdään eräänlainen lämmönvaihdin. Kompressorin jäähdytysneste, joka esitetään punaisella, ympäröi kennoa johon ohjataan sinisellä esitettävä käyttövesi.



Kuva 7. Lämmönvaihdin [10.]

Ilmanvaihtimien avulla voidaan myös tuottaa molempia, sekä lämmintä ilmaa että vettä. Näiden suhdetta voidaan muuttaa jonkin verran.

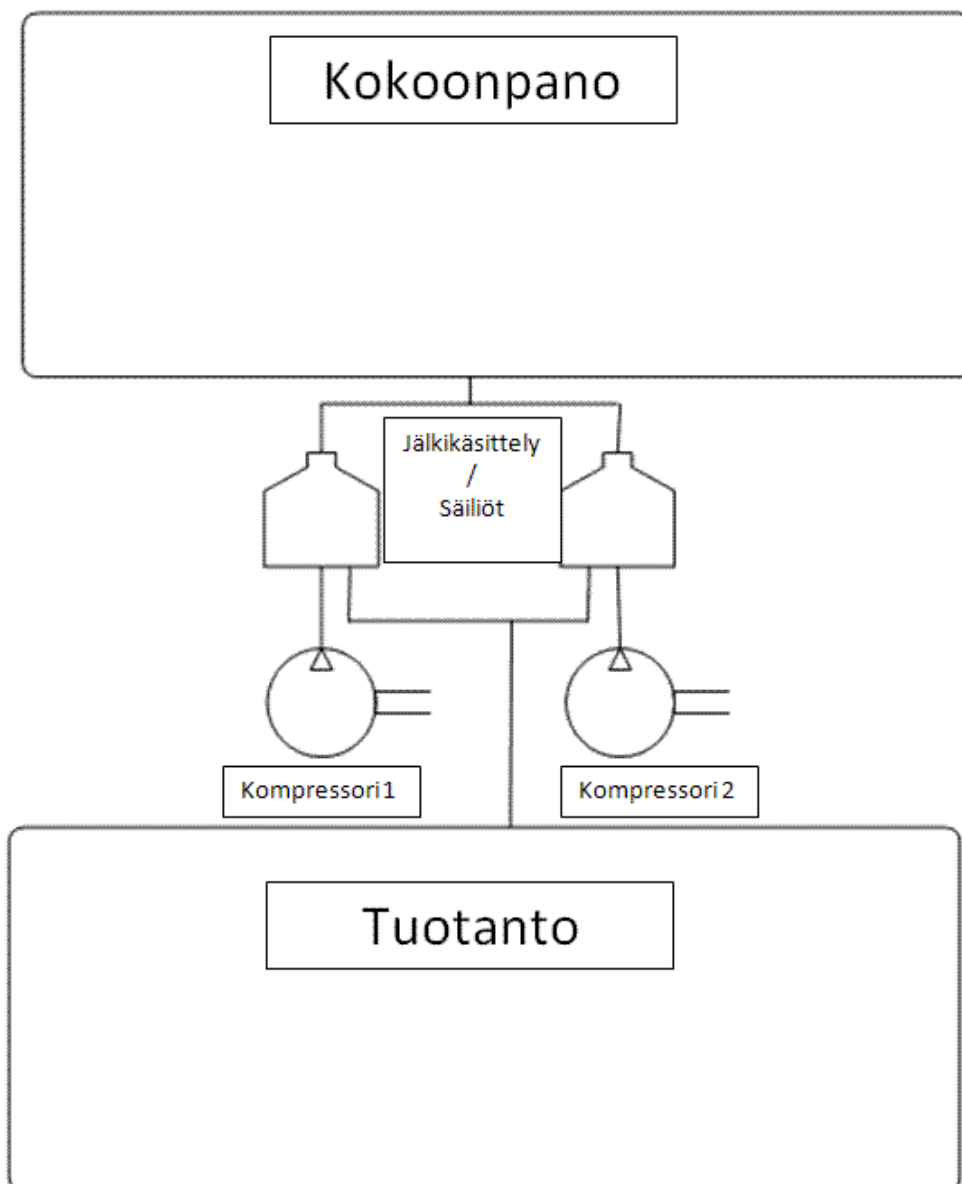
### 3.4.2 Kompressorin imuilma

Kompressorin imuilma tulisi ottaa käytännössä joka tilanteessa ulkoilmasta. Kompressorille tulisi tarjota mahdollisimman kylmää imuilmaa, koska se parantaa hyötysuhdetta. [9, s. 47.] Tämä johtuu siitä, että kylmempi ilma on tiheämpää. Siitä seuraa, että massavirta kasvaa, koska kompressorin imuilman tilavuus jaettuna ajalla pysyy vakiona. [11.] Kun paineilma sitten lämpenee puristuksen jälkeen, sen tilavuus pyrkii kasvamaan. Tästä seuraa että verkostossa on korkeampi paine kompressorin kuluttaessa yhtä paljon sähköä.

## 4 SUORITETUT MITTAUKSET

### 4.1 Verkosto ja käyttökohteet

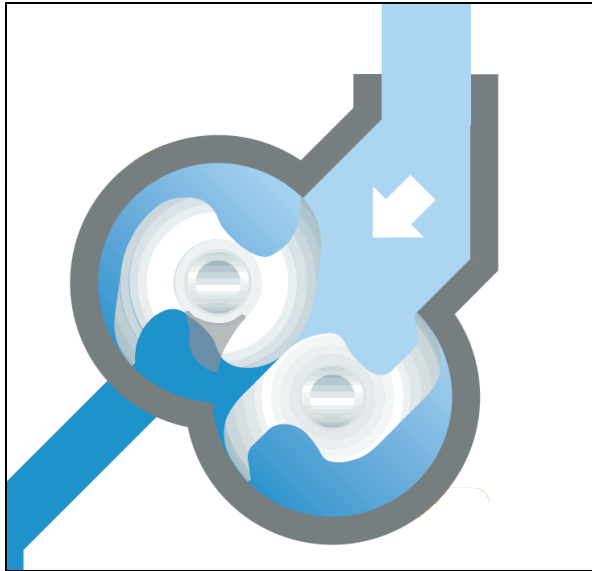
Verkosto jakautuu kahteen osaan, tuotantoon ja kokoonpanoon. Tuotannon paineilman kulutus on moninkertainen kokoonpanoon verrattuna. Viikonloppuisin kun kokoonpano on suljettu, kompressorin käyttöaste ei putoa kuin pari prosenttia. Periaatteellinen kuva verkostosta nähdään kuvassa 8.



Kuva 8. Paineilmaverkosto.

## Paineilman tuotto

Paineilman tuotosta huolehtii kaksi Atlas Copcon valmistamaa hammasroottorikompressoria, kompressoreissa on noin 35 kW:n moottorit. [12.]



Kuva 9. Hammaskompressorin toiminta. [12.]

Kompressoreissa on elektroniset ohjaukset, jolla voidaan säätää esimerkiksi kompressorien toimintarajoja, tuottopainetta sekä käyntiaikoja. Kompressorit on kytketty siten, että vuoroitellen kumpikin kompressori huolehtii verkoston paineesta. Jos paine putoaa, varalla oleva kompressorikin käynnistyy.

## 4.2 Vuotojen kartoitus

Työssä kartoitettiin verkoston vuodot käyttäen koekäyttöön lainattua ultraäänimittaria (kuva 10). Mittari on SKF:n valmistama TMSU 1. Testatulla ilmaisimella havainnointietäisyys oli vuodosta riippuen noin 50...100 mm.



Kuva 10. SKF TMSU 1 -ultraääni-ilmaisin

Vuotoja kartoitettiin sekä kokoonpanosta että tuotannosta. Kokoonpanosta löydettiin kaksi vuotokohtaa, kun käytiin läpi liitokset jotka pystyttiin testaamaan lattian tasolta. Vuotojen kartoitus sujui nopeasti ja vuoto oli löydettyäessä heti ilmeinen laitteen tuottaman äänen perusteella.

#### 4.3 Kompressorin käynnin mittaus

Kompressorien käyntiä seurattiin kompressorien ohjausjärjestelmässä olevien laskurien avulla. Ohjausjärjestelmästä nähdään kompressorin käyttötunnit eli tunnit, jolloin kompressori on käytössä. Nämä luvut ovat lähellä 24:ää tuntia vuorokaudessa. Järjestelmästä näkee myös erikseen tunnit jolloin kompressorin moottori on käytössä (kuormitustunnit). Näistä tiedoista voidaan laskea kompressorien keskimääräinen käyttöaste. Kompressorien käyntiaste oli noin kuukauden mittausjaksolla keskimäärin noin 60 %. Kompressorilla 1 käyntiaste oli hiukan korkeampi kuin kompressorilla 2. Viikonloppu ei pudottanut kuormitusta olennaisesti.

## 5 TOIMENPITEITÄ ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMISEKSI

### 5.1 Verkoston osien sulkeminen

Ultraäänimittarin koekäytön aikana kävi ilmi, että kokoonpanon puolella on paineilmajärjestelmässä vuotoja. Koska varmuutta kaikkien vuotojen löytämisestä ja paikkaamisesta ei ole, on suositeltavaa, että kokoonpanon verkkoon asennettaisiin sulkuventtiili, joka toimisi ajastimella tai työntekijät sulkisivat sen yöajaksi ja viikonlopuiksi. Tällä toimenpiteellä saataisiin vuotojen haittavaikutusta laskettua huomattavasti. Myös verkoston tilavuutta saadaan näin pudotettua huomattavasti, mikä vähentää kompressorin rasitusta.

### 5.2 Kunnossapito

Kunnossapidolla on tärkeä osuus paineilman energiatehokkuuden säilyttämisessä. Vuotoihin tulisi reagoida heti havaittaessa ja esimerkiksi aukinaiset venttiilit sulkea välittömästi.

Vuotojen kartoitus tulisi tehdä säännöllisesti, vähintään vuosittain. Tähän on syynä edellä mainittu vuotojen kasvaminen ajan myötä verkostossa olevien epäpuhtauksien takia. Vuotojen kartoituksen voisi hoitaa siten, että vuosittain joku tarkastaa kaikki liitokset ultraäänimittarin avulla, ja merkitsee vuotokohtat rakennuksen pohjapiirrokseen sekä asettaa vuodon kohdalle merkin. Tämän jälkeen katsotaan vuodot kartasta ja korjataan ne systemaattisesti. Myös laitteiden sisältä vuodot tulisi tarkastaa määräajoin.

Vedenerottimet tulisi tarkistaa noin kerran vuodessa [3, s. 272]. Tämä kannattanee ajoittaa samanaikaiseksi vuotojen kartoituksen kanssa. Ultraäänimittarin testauksen kanssa myös vedenerottimia katsottiin. Ne oli suljettu asianmukaisesti. Kompressorilla on huoltosopimus laitetoimittajan kanssa. Tämä takaa kompressorille säännölliset huollot.

### 5.3 Alipaine

Alipainepumppujen hyötysuhde on ainakin 6,5 kertaa parempi kuin paineilmaejektorien. [13, s. 3.] Kuitenkin jos käytetään alipainepumppuja ennakoivan kunnossapidon tarve kasvaa,

koska pumpun rikkoutuessa koko laite on pois käytöstä. Yksi mahdollisuus on käyttää useassa laitteessa samanlaisia pumppuja, jolloin varapumpun pitäminen varastossa voi olla rahallisesti kannattavaa.

Alipaineverkkoon soveltuu suurelta osin samat asiat kuin paineilmaverkkoonkin. Verkoston paine vain on ympäristön painetta pienempi, eikä suurempi. Alipaineverkon voi pienemmästä paine-erosta johtuen rakentaa kevyestä muoviputkesta.

Seuraavaksi on esitelty alipainepumpputyypit ja niiden periaatteet:

### Radiaalipumppu

Radiaalipumppu toimii siten, että pyörivät siivet kiihdyttävät ilmaa, joka sitten poistetaan ulkokehältä ilmaan. Imukanavaan syntyy alipaine. Toimintaperiaate on sama kuin auton turboahtimessa.

### Sivukanavapumppu

Sivukanavapumpun toiminta on samankaltaista radiaalipumpun kanssa. Ilma imetään pyörivään siipipyörään, jossa keskipakovoima puristaa ilmaa laitaa vasten nostaen ilman painetta.

### Nesterengaspumppu

Nesterengaspumppu toimii myös samalla peruseriaatteella, mutta siinä siipipyörän siivet eivät kosketa kanavan seiniin, vaan mukana pyörivät nesterengastiivisteet. Nestettä imetään ja poistetaan jatkuvasti pumpusta, tiivisteiden vakauden varmistamiseksi.

### Lamellipumppu

Lamellipumppu on periaatteessa lamellikompressori, jonka imukanavaan alipaineverkko on liitetty.

### Lohkoroottoripumppu



Pumpussa kaksi pyörivää mäntää ohjaa ilman imukanavasta poistokanavaan. Paine lasketaan kineettisesti.

#### Hammaspumppu

Hammaspumppu muistuttaa lohkoroottoripumppua. Myös hammaspumppussa on kaksi pyörivää mäntää, mutta siinä puristus tapahtuu tilavuutta pienentämällä.

#### Ruuvipumppu

Alipaineruuvipumppu on käänteinen ruuvikompressori. Kaksi pyörivää ruuvia puristaa ilman välissään pienentämällä ilmakammion tilavuutta. [14.]

Näistä pumpputyypeistä voi valita sopivimman analysoimalla ilmamäärän tarpeen, sekä vaaditun alipaineen määrän. Taulukossa 2 on esitetty tyyppien maksimipaineet ja -tuotot. Tiedot on otettu Elmo Rietschlen mallistosta. Kyseiset luvut ovat pumpputyypin maksimiluvut, ja ne eivät välttämättä ole samasta pumpusta. Paine on ilmoitettu absoluuttisena lukemana.

Taulukko 2. Erityyppisten pumppujen tunnuslukuja. (Elmo Rietschle)

	Radiaali	Sivukanava	Nesterengas	Lamelli	Lohkoroottori	Hammas	Ruuvi
Paine (mbar)	95	13	33	0,5	0,01	50	0,01
Tuotto (m <sup>3</sup> /h)	57	880	1200	1440	8850	1140	720

#### 5.4 Mekaaniset liikkeet

Mekaaniset liikkeet tuotetaan nykyisellään pienillä paineilmasylintereillä. Vaihtoehtoina tarkasteltiin liikkeiden tekemistä solenoideilla, servomoottoreilla ja lineaarimoottorilla. Vaihtoehdot ovat energiatehokkuudeltaan parempia kuin paineilma, mutta niissä on muita huonoja ominaisuuksia.

#### 5.4.1 Solenoidi

Solenoidi on sähkömagneetti, joka liikuttaa magneetin käämin sisällä olevaa rautasydäntä. Hyvänä puolena on nopea liike ja pieni energiantarve. Energia on lisäksi suoraan sähköä, joka minimoi hukkia. Solenoidista kaavailtiin korvaajaa pienille sylintereille.

Koska paineilman energiatehokkuus on matala, olisi sähkökäyttöinen solenoidi hyvä ratkaisu pieniin liikkeisiin energiatehokkuuden kannalta. Kuitenkin solenoidissa on eräs vakava ongelma. Kun liikuttava matka kasvaa, solenoidin voima putoaa merkittävästi. Tämän syystä solenoidit ovat huono vaihtoehto noin 10 millimetriä pidemmällä iskunpituuksilla.

#### 5.4.2 Servomoottori

Servomoottorilla tarkoitetaan tässä tapauksessa sähkömoottorin pyörittämää kierteitettyä tankoa, joka liikuttaa mutterin kaltaista osaa. Servomoottorilla saadaan aikaan pitkiä liikkeitä tasaisella voimalla. Lisäksi se voidaan pysäyttää väliasentoihin tarkasti. Servomoottorilla on hyvä hyötysuhde, koska energiaa ei hupene väliaineen vaihtoihin. Servomoottori on kuitenkin sähkömoottorin takia raskas sekä hidas. Tämän takia se ei sovellu käytännössä automaatioon, jossa vaaditaan nopeita liikkeitä ja kevyitä komponentteja.

#### 5.4.3 Lineaarimoottori

Lineaarimoottori on ikään kuin sähkömoottori käärittynä auki. Tällä tekniikalla saadaan nopea liike ja tarkka paikoitus väliasemissakin. Tämä voisi soveltua joihinkin mekaanisiin liikkeisiin, haittapuolena on korkeahko hinta.

### 5.5 Energiatehokkuuden arviointi

Energiatehokkuus tulisi arvioida käymällä läpi jokin siihen tarkoitettu ohjelma kohta kohdalta. Energiatehokkuuden arviointiohjelmia on muun muassa Motivalla, joskin sen PATE-ohjelma on tarkoitettu järjestelmiin jossa käytetään enemmän paineilmaa. PATE-ohjelmasta

voidaan kuitenkin ottaa mallia omaan energiatehokkuusohjelmaan, jolloin mitattavia kohteita olisi kompressorin sähköteho, toimintarajat, paineiden mittaus sekä ilmavirrat verkoston eri osiin.

### Kompressorin sähköteho

Kun mitataan kompressorin käyttämä sähköteho ja sen tuottama paine ja virtaus, voidaan laskea, kuinka paljon paineilmajärjestelmän hyötysuhde on. Tämän tiedon avulla voidaan tulevaisuudessa katsoa investoinneissa, kannattaako asioita tehdä paineilman avulla vai tuleeko tarkastella muita tapoja.

### Paineiden mittaus

Paineet tuottopäässä voidaan katsoa kompressorin ohjausjärjestelmästä. Kompressorin on ohjelmoitu siten, että se pyrkii pitämään jatkuvan 7,6 baarin paineen. Käyttökohteisiin tulisi asentaa painemittarit, jotta voidaan kartoittaa verkoston painehäviöt. Näitä seuraamalla voidaan myös osaltaan tarkkailla vuotoja.

### Ilmavirrat verkoston eri osiin

Verkoston ilmavirrat voidaan mitata paineilman ilmavirtamittarilla. Tämä toimenpide auttaa osaltaan selvittämään mahdollisia vuotokohtia sekä verkoston suurimpia kuluttajia, sekä pahimpia vuotoaikoja. Virtausmittausta tuskin tarvitaan kokoonpanon puolella, varsinkin jos verkoston se osa tullaan sulkemaan yöajaksi ja viikonlopuiksi.

### Tarvittavat laitteistoinvestoinnit

Laitteistoinvestoinnit tehtäessä kartoitus itse ovat virtausmittari sekä sähkövirtamittari. Virtausmittaria käytetään paineilman kulutuksen mittaamiseen yhdessä painemittarin kanssa. Sopiva virtausmittari löytyy esimerkiksi SMC:n valikoimista. Hinta on noin 600 euroa. [15.]

Virtamittaria käytetään kompressorin sähkönkulutuksen mittaukseen. Virtamittarin tulisi pystyä mittaamaan samanaikaisesti molempien kompressorien sähkötarve, jotta voidaan laskea kummankin kompressorin yhteinen energiankulutus. Virtamittarista pitäisi saada tieto vir-

rankulutuksesta eri ajankohtina jolloin nähdään kulutushuiput. Kun tämä tieto yhdistetään tietoon laitteiden käynnistä, nähdään mikä laite kuluttaa paljon paineilmaa.

Mitattavissa olevat kohteet

Ilman investointeja mittauskohteista voidaan tällä hetkellä mitata kompressorin toimintarajat, sekä kompressorin tuottama paine. Kumpikin tiedoista saadaan kunkin kompressorin ohjausjärjestelmän valikoista, ja kumpaakin voidaan myös säätää ohjausjärjestelmän avulla.

Energiatehokkuuden arviointi alihankintana

Myös erilaiset yritykset tarjoavat energiatehokkuuden arviointia. Tällöin yrityksen mittaajat tulevat paikalle ja mittaavat järjestelmän sekä laativat raportin paineilman hävikkikohteista sekä ratkaisuehdotuksista. Alihankintana palvelua saa muun muassa Atlas Copcolta. Kyseisten palvelujen nimet ovat AirScan ja AirOptimizer. Hintatietoja yritettiin kysyä, mutta vastusta ei saatu, vaikka palvelun pitäisi olla saatavilla myös Suomessa.

## 5.6 Lämmön talteenotto

Hukkalämmön talteenottoa tarkasteltaessa tuli esiin lämmön talteenotto ilmanvaihdon tai lämmönvaihtimen avulla. Lämmönvaihtimella olisi voitu lämmittää esimerkiksi kiinteistön tarvitsemaa talousvettä. Tuli kuitenkin ilmi, että tällä hetkellä kompressorihuoneen ilma johdetaan ilmanvaihtoon, jossa se lämmittää kiinteistöä talviaikaan.

Kompressorin imuilma

Kompressorin imuilma tulisi ottaa aina ulkoa. Koska ulkona on viileämpää ilmaa, se on tiheämpää, jolloin siitä saadaan enemmän energiaa samalla sähköenergian määrällä. Sopiva imuilman ottopaikka voisi olla katolta. Tosin tällöin kesällä nouseva lämpötila voi haitata kompressorin hyötysuhdetta.

## 6 TULOSTEN ANALYSOINTI

Tulokset vastaavat insinööriyön aihetta siltä osin, että tuloksena saatiin ehdotuksia paineil-majärjestelmän energiatehokkuuden parantamiseksi. Osa ehdotetuista toimenpiteistä vaatii investointeja, mutta jokainen ehdotettu tapa luultavasti maksaa itsensä takaisin hyvin lyhyes-sä ajassa.

Seuraavana vaiheena olisi ehdotusten ottaminen käyttöön kunnossapidon ja energiatehokkuuden arvioinnin osalta, jos se päätetään tehdä alihankintana. Muutoin tavat vaativat vielä tarkempaa suunnittelua.

Alipainepumppujen hankintakustannukset ovat selvästi ejektoreita suuremmat, mutta vastaa-vasti ejektorien energiankulutus on 6,5-kertainen. Tältä kantilta olisi järkevää käyttää ali-painepumppuja, joko paikallisesti tai jopa verkostona.

Mekaanisten liikkeiden tuottamiseen tutkittiin vaihtoehtoja, mutta paineilmasylinterien il-mankulutus ei ole niin suuri että niitä olisi järkevää korvata muilla keinoin. Kuitenkin hyvin suuriin liikkeisiin voitaisiin hyödyntää lineaarimoottoreita sekä hyvin pieniin liikkeisiin so-lenoideja.

Vuotojen kartoitus on erittäin tärkeää paineilmajärjestelmässä. Tämän pystyi päättämään siitä, etteivät kompressorien kuormitustunnit pudonneet juuri lainkaan vaikka ainoastaan tuotannossa oli toimintaa. Vuotoja voi vähentää pienentämällä verkoston tilavuutta. Tämä onnistuu verkoston osia sulkemalla. Aikaohjattu venttiili on todennäköisiin säästöihin näh-den todella halpa investointi.

## 7 YHTEENVETO

Energiatehokkuuden parantaminen koetaan nykyaikaisissa yrityksissä tärkeäksi asiaksi, ja sillä voidaanakin säästää merkittävästi rahaa. Erityisesti teollisuuden paineilmajärjestelmien energiatehokkuus vaatii parantamista, koska paineilmalla on hyvin huono hyötysuhde, ja sen käyttö on erittäin laajaa.

Työn alussa kartoitettiin kaikkia mahdollisia tapoja vähentää paineilman käyttöä, koska se on paras tapa parantaa energiatehokkuutta, tehdä asiat jollain muulla keinolla. Yrityksessä paineilma ei kuitenkaan näyttele suurta osaa tuotantoprosessista. Paineilman käyttökohteet ovat lisäksi sellaisia, että usein muuta vaihtoehtoa ei käytännössä ole. Suurin muutoksen aihe tulisi alipaineen käytössä, ejektorit korvattaisiin alipainepumpuilla. Hyötysuhdetta saadaan parannettua, mutta kyse on kuitenkin edelleen pneumatiikasta.

Seuraava vaihe oli miettiä tapoja jolla paineilman hävikkiä voidaan vähentää. Tärkeimpään osaan tässä nousee kunnossapidon osuus. Putkien vuodot aiheuttavat suurimman osan paineilman hävikistä. Ultraääni-ilmaisoin osoittautui hyväksi työkaluksi paineilma vuotojen kartoitukseen. Koska se on helppokäyttöinen laite, kynnys kartoituksen tekemiseen määrääjain on pienempi. Toinen konsti vähentää vuotoja on pienentää verkoston tilavuutta, tämä onnistuu helpoiten sulkemalla kokoonpanon viikonlopuiksi sekä yöajaksi.

## LÄHTEET

- [1] Lang, K. Directair Compressed Air Utility Service: Compressed Air Best Practices, October 2006. [www-dokumentti] <http://www.aircompressors.com/pdf/DirectAIR%20Best%20Practices%20Article.pdf> (Luettu 18.1.2010)
- [2] Ellman, Hautanen, Järvinen, Simpura. Pneumatiikka. Edita Prisma Oy, Helsinki, 2002. ISBN 951-37-3763-5.
- [3] Elliott, B. Compressed Air Operations Manual. McGraw-Hill Professional Publishing, 2006. ISBN 9780071475266 9780071491846.
- [4] Improving Compressed Air System Performance: A Sourcebook for Industry. U.S. Department of Energy, 2003. DOE/GO-102003-1822. [www-dokumentti] [http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/compressed\\_air\\_sourcebook.pdf](http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/compressed_air_sourcebook.pdf) (Luettu 17.1.2010)
- [5] Keinänen, T. Kärkkäinen, P. Automaatiojärjestelmien hydraulikka ja pneumatiikka. WSOY, 2005. ISBN 951-0-29881-6.
- [6] Smith, D. E. A Cost Effective Management Strategy For Controlling Leaks in Compressed Air Systems. [www-dokumentti] <http://www.danbottconsulting.com/technicalarticles> (Luettu 22.2.2010)
- [7] SDT Ultrawave 170: Sovelluksia - Paineilmavuodot. [www-dokumentti] [http://www.hantekno.com/Hantekno\\_tiedostot/Paineilmavuodot.pdf](http://www.hantekno.com/Hantekno_tiedostot/Paineilmavuodot.pdf) (Luettu 22.2.2010)
- [8] Scales, W. P.E. Air compressor heat recovery is a hot topic. [www-dokumentti] <http://www.plantservices.com/articles/2003/103.html> (Luettu 20.2.2010)
- [9] How to Save Energy and Money in Compressed Air Systems. University of Cape Town. [www-dokumentti] <http://www.3e.uct.ac.za/downloads/compressedair.pdf> (Luettu 18.1.2010)
- [10] Wikipedia. [www-dokumentti] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Heat\\_exc\\_1-1.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Heat_exc_1-1.png) (Luettu 8.4.2010)
- [11] Paresh, S. Parekh, P.E, PMP. Beyond Air Leaks - How to Do Compressed Air Systems Analysis? Principal Unicade Inc. [www-dokumentti] <http://www.unicade.com/Articles/AirComp.html> (Luettu 20.2.2010)
- [12] Atlas Copco Oil-free Rotary Tooth Compressors ZR/ZT 15-45 - ZR/ZT 37 & 50 VSD. Tuote-esite.
- [13] Bott, D. Compressed Air Is For Pushing, Not Pulling. [www-dokumentti] <http://www.danbottconsulting.com/technicalarticles.html> (Luettu 20.2.2010)

- [14] Elmo Rietschlen kotisivut. [www-dokumentti] <http://www.gd-elmorietschle.com/>  
(Luettu 21.2.2010)
- [15] Sähköpostikeskustelu SMC:n edustajan Marko Lipposen kanssa, 1.2.2010.



Kompressori 1				
Päivämäärä	Alkutilanne:			Viikonloppu
	11.1.2010	27.1.2010	19.2.2010	22.2.2010
Käyttötunnit	52872	53245	53785	53844
Kuormitustunnit	37338	37584	37900	37946
Kellonaika	9	10	16	6
Päivät		16	23	3
Käyttötunnit		373	540	59
Kuormitustunnit		246	316	46
Keskimääräinen/päivä				
Käyttötunnit		23,25	23,23	22,84
Kuormitustunnit		15,38	13,74	15,33
Kuormitusprosentti		66,12	59,15	67,14

Kompressori 2				
Päivämäärä	Alkutilanne:			
	11.1.2010	27.1.2010	19.2.2010	22.2.2010
Käyttötunnit	32065	32434	32949	32987
Kuormitustunnit	18271	18484	18751	18767
Kellonaika	9	10	16	17
Päivät		16	23	3
Käyttötunnit		369	515	38
Kuormitustunnit		213	267	16
Keskimääräinen/päivä				
Käyttötunnit		23,00	22,15	12,49
Kuormitustunnit		13,31	11,61	5,33
Kuormitusprosentti		57,87	52,41	42,69

Keskim.%		62,00	55,78	54,91
----------	--	-------	-------	-------