



samk

Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

HENRIK MARKKANEN

Selvitys paineilman tuotannon nykykulutuksesta sekä säästöpotentiaalista

ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN
KOULUTUSOHJELMA
2020

Tekijä Markkanen, Henrik	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä joulukuu 2020
	Sivumäärä 28	Julkaisun kieli suomi
Julkaisun nimi Selvitys paineilman tuotannon nykykulutuksesta sekä säästöpotentiaalista		
Tutkinto-ohjelma Energia- ja ympäristötekniikka		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön aiheena oli selvittää Rauman Meriteollisuuskiinteistöt Oy:n hallinnoiman teollisuuspuiston, Seaside Industry Park Rauman, nykyisen paineilmajärjestelmän sähkönkulutus ja säästöpotentiaali. Teollisuuspuiston paineilmajärjestelmää oli päivittämässä ja haluttiin selvittää järjestelmän päivittämisellä saatavat säästöt.</p> <p>Työn tekemistä varten työn tilaaja toimitti mittausdataa nykyjärjestelmän kompresso-reista. Mittausdatasta saatiin selville kompressorien sähkönkulutus ja sen avulla myös arvioitiin kompressorien tuottamia ilmamääriä. Säästöpotentiaali selvitettiin uuden järjestelmän laitetietojen pohjalta. Nykyjärjestelmän kulutusta ja uuden järjestelmän arvi- oitua kulutusta vertailemalla saatiin laskettua syntyvät säästöt. Säästöjen perusteella myös selvitettiin investoinnin takaisinmaksuaika ja tarkasteltiin leasingvaihtoehdon kannattavuutta. Työn tekemisessä hyödynnettiin myös kirjallisuutta ja verkkojulkaisuja.</p> <p>Järjestelmän päivittäminen todettiin kannattavaksi.</p>		
Asiasanat paineilma, energiatehokkuus, kompressorit		

Author Markkanen, Henrik	Type of Publication Bachelor's thesis	Date December 2020
	Number of pages 28	Language of publication: Finnish
Title of publication A study of the current consumption of compressed air production and the potential savings		
Degree program Degree Programme in Energy and Environmental Engineering		
Abstract The subject of this thesis was to find out the electricity consumption and potential savings of the current compressed air system in the industrial park called Seaside Industry Park Rauma, managed by Rauman Meriteollisuuskiinteistöt Ltd. The compressed air system in the industrial park was being upgraded and the aim was to determine the amount of savings gained from upgrading the system. In order to do the work, the client provided measurement data from the compressors of the current system. The measurement data was used to find out the electricity consumption of the compressors and was also used to estimate the volume of air produced by the compressors. The potential savings were determined by using the equipment data of the new system. By comparing the consumption of the current system with the estimated consumption of the new system, the resulting savings were calculated. Based on the savings, the payback period of the investment was also calculated, and the profitability of the leasing option was examined. Literature and online publications were also used in the work. The system upgrade was found to be profitable.		
Key words compressed air, energy efficiency, compressors		

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 PAINEILMA.....	6
2.1 Paineilman käyttökohteet	7
2.2 Paineilmajärjestelmä	7
2.3 Kompessorit	7
2.4 Kompessorien ohjaus	10
2.5 Paineilman jälkikäsittely	11
2.5.1 Paineilman laatu	11
2.5.2 Kuivaus	12
2.5.3 Suodatus	14
2.6 Paineilman siirto	15
3 PAINEILMAJÄRJESTELMIEN ENERGIAATEHOKKUUS.....	16
3.1 Suunnittelu	16
3.2 Paineen alentaminen.....	17
3.3 Vuodot.....	17
3.4 Lämmöntalteenotto	17
4 NYKYJÄRJESTELMÄN KULUTUS	19
4.1 Järjestelmäkuvaus	19
4.2 Kulutus	20
5 SÄÄSTÖPOTENTIAALI.....	22
5.1 Uusien laitteiden tiedot	22
5.2 Syntyvät säästöt.....	22
5.3 Investoinnin takaisinmaksuaika	23
5.4 Leasing vai investointi	24
6 POHDINTA JA YHTEENVETO	25

LÄHTEET

LIITTEET

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehdään Seaside Industry Park Raumalle. Seaside Industry Park Rauma on nimensä mukaisesti Raumalla sijaitseva teollisuuspuisto ja sijaitsee meren rannalla lähellä Rauman satamaa. Teollisuuspuiston toimintaa hallinnoi Rauman Meriteollisuuskiinteistöt Oy. Teollisuuspuisto tarjoaa asiakkaille mm. tilat ja infrastruktuurin. Se myös huolehtii alueen ja laitteistojen kunnossapidosta. Tavoitteena on tarjota alueella toimiville yrityksille mahdollisimman hyvät edellytykset keskittyä varsinaiseen liiketoimintaansa. (Seaside Industry Park Rauma www-sivut 2020.)

Työn aiheena on selvittää teollisuuspuiston nykyisen paineilmajärjestelmän kompressorien sähkönkulutus ja selvittää säästöpotentiaali uuden järjestelmän laitetietojen pohjalta. Työssä tarkastellaan myös lämmöntalteenoton tuomaa säästöpotentiaalia, uuden järjestelmän investoinnin takaisinmaksuaikaa ja leasingvaihtoehdon kannattavuutta.

Tarve työlle on syntynyt, kun työn tilaaja on tehnyt päätöksen nykyisen paineilmajärjestelmän päivittämisestä ja halunnut selvittää säästöpotentiaalin. Vanhojen paineilmajärjestelmien huonompi energiatehokkuus yhdessä kasvavien energiakustannusten kanssa on alkanut motivoimaan yrityksiä päivittämään paineilmajärjestelmiään, tavoitteena saada aikaan säästöjä käyttökustannuksissa.

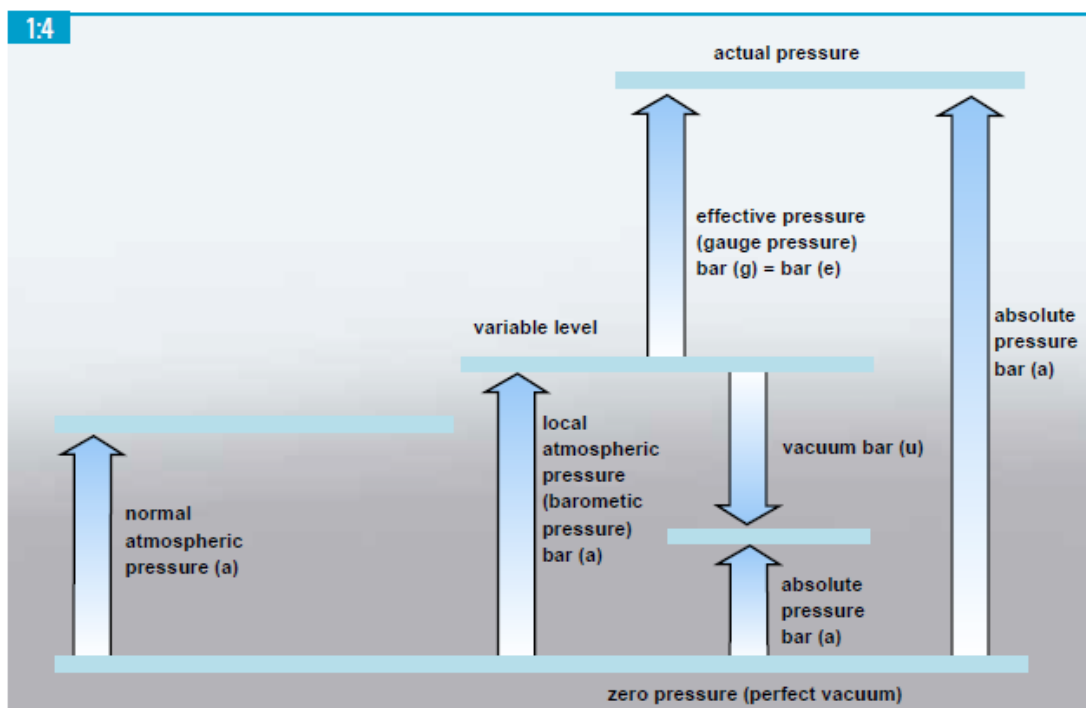
Työssä käydään ensin läpi teoriaa paineilmaan ja sen tuottamiseen liittyen. Käydään läpi myös paineilmajärjestelmien energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä mm. lämmöntalteenotto. Sen jälkeen käydään läpi nykyisen paineilmajärjestelmän kompressorien kulutus, uuden järjestelmän kulutus ja lasketaan syntyvien säästöjen suuruus. Lopuksi vielä lasketaan uuden järjestelmän investoinnille takaisinmaksuaika ja tarkastellaan leasingvaihtoehdon kannattavuutta.

2 PAINEILMA

Paineilman käyttöön perustuvaa tekniikkaa kutsutaan pneumatiikaksi (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 7).

Paineilmaksi kutsutaan ilmaa, jonka paine on puristamalla nostettu vähintään kaksinkertaiseksi alkupaineeseen verrattuna. Paineilma on siis ylipaineista. Ylipaineella tarkoitetaan ympäristön ilmanpainetta suurempaa painetta. Ilmakehän massan aiheuttama paine on merenpinnalta mitattuna 1,01325 bar, mitä kutsutaan ilmanpaineeksi. Ilmanpaine kuitenkin vaihtelee paikoittain maanpinnan korkeuserojen ja säätilojen vuoksi. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 17 & 43.)

Useimmat painemittarit ilmoittavat paineen järjestelmän paineen ja paikallisen ilmanpaineen erotuksena ns. mittaripaineena (eng. gauge pressure). Jos paine halutaan ilmoittaa absoluuttisena paineena, on mittatulokseen lisättävä paikallinen ilmanpaine (ks. kuva 1). (Atlas Copco Airpower NV 2015, 12.)



Kuva 1. Paineen rakenne (Atlas Copco Airpower NV 2015, 12)

Paineen SI- järjestelmän mukainen yksikkö on Pa (Pascal) = N/m². Paine osoittaa johonkin pintaan kohdistuvan kohtisuoran voiman suuruuden pinta-alayksikköä kohti. Pascalista käytetään usein sen kerrannaisia kPa ja MPa. Myös bar on yleisesti käytössä oleva paineen yksikkö (1 bar = 100 kPa = 0,1 MPa). (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 16.)

2.1 Paineilman käyttökohteet

Paineilman sovellusalue on hyvin laaja. Sitä voidaan esimerkiksi käyttää käsityökalujen voimanlähteenä, erilaisten aineiden siirtämiseen ja ohjaustekniikassa toimilaitteiden käyttöön. Paineilma on helppokäyttöinen väliaine ja sitä on lähes aina saatavissa, koska tehdasrakennukset varustetaan lähes poikkeuksetta paineilmaverkolla. Paineilman käytön laajuutta kuvaa arvio, jonka mukaan noin 5 % teollisuusmaiden sähkötehosta kuluu paineilman tuottamiseen. Paineilman etuja ovat sen yksinkertaisuus, edulliset hankintakustannukset, siisteys, varastoitavuus ja se on myös melko vaaratonta. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 7-9.)

2.2 Paineilmajärjestelmä

Paineilman tuotannosta vastaavien laitteiden muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan paineilmajärjestelmäksi. Tämä järjestelmä koostuu usein seuraavista laitteista: kompressorit, ilmasäiliöt, jälkijäähdyttimet, jäähdytyskuivaimet, suodattimet, puhaltimet, sähkökaapit ja lämmöntalteenottolaitteet. Tilaa, johon nämä laitteet on sijoitettu, kutsutaan paineilmakeskukseksi. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 41.)

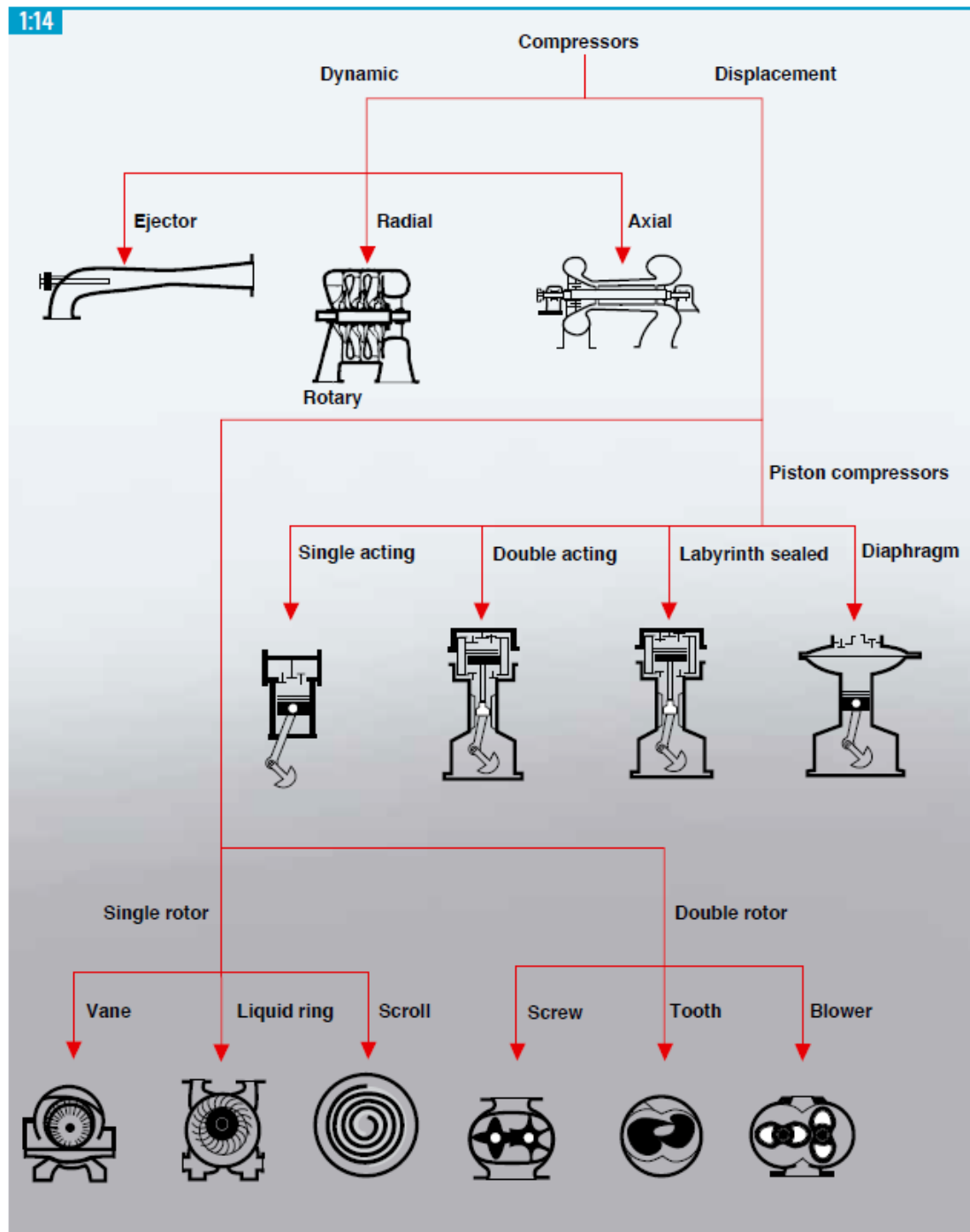
2.3 Kompressorit

Paineilman tuotantoa varten tarvittava puristustyö tuotetaan kompressoreilla. Kompressori nostaa väliaineen painetta, siten että loppupaine on vähintään kaksinkertainen alkupaineeseen verrattuna. Kompressorin voimanlähteenä on melkein aina sähkömoottori. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 43.)

Kompressorin käyttämä energia muuttuu lämmöksi. Tämän vuoksi kompressoria pitää jäähdyttää. Kompressorit ovat ilma- tai vesijäähdytteisiä. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 107.)

Kompressorin voi olla öljyvoideltu tai öljytön. Useimmissa kompressoreissa öljyä käytetään voitelemaan laakereita, tiivistämään välyksiä ruuvikompressoreissa ja kompressorin puristustilan jäähdytysaineena. (Tamrotor kompressorit Oy 2017.)

Kompressorit jaetaan kahteen eri ryhmään niiden toimintaperiaatteen mukaan: staattisesti puristaviin (eng. positive displacement compression) ja kineettisesti puristaviin (eng. dynamic compression). Kompressorien jaottelu on esitetty kuvassa 2. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 43.)



Kuva 2. Kompresorityypit (Atlas Copco Airpower NV 2015, 21)

Staattisesti puristavissa kompressoreissa ilma imetään yhteen tai useampaan kammi-
oon, jonka jälkeen kammion tilavuutta aletaan pienentää esimerkiksi männän liik-
keellä. Ilman puristuessa sen paine alkaa kasvaa. Kun paine saavuttaa halutun tason,
niin ilma ohjataan ulos kammiosta. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 20.)

Yleisimmät staattisesti puristavat kompressorityypit ovat mäntä- ja ruuvikompressorit (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 43).

Kineettisesti puristavissa kompressoreissa ilma imetään nopeasti pyörivän juoksupyörän siipien väliin, jossa ilman nopeus kiihtyy. Sitten ilma ohjataan johtolaitteeseen, missä sen kineettinen energia muutetaan staattiseksi paineeksi vastustamalla virtausta painetilassa. Imu- ja painetila ovat yhteydessä toisiinsa. Kineettisesti puristavia kompressoreita ovat radiaali- ja aksiaalikompressorit. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 43.)

Kompressorien tuotto ilmoitetaan usein ISO 1217- standardin mukaisesti. Tällöin kompressorin tuottaman ilman tilavuusvirta on mitattu koko kompressoripaketin jälkeän putkilinjasta, kun järjestelmän paine on ollut ilmoitetussa normaalityöpaineessa. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 51.)

2.4 Kompressorien ohjaus

Paineilmaa hyödyntävät käyttökohteet tarvitsevat painetta tietyllä painealueella toimakseen suunnitellusti. Paineilmajärjestelmän painetta säädetään ohjaamalla kompressorin ilman tuottoa. Hyvin suunniteltu ohjausjärjestelmä auttaa laskemaan käyttökustannuksia, kun kompressoreiden käyntiä ohjataan tehokkaasti. Kompressorien ohjaus on perinteisesti toteutettu kuormitus ja kevennys- säädöllä tai jatkuvalla tuoton säädöllä. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 52-53.)

Kuormitus ja kevennys- säätö on laajasti käytössä oleva kompressorien ohjausjärjestelmä. Siinä paineelle on asetettu ylä- ja alaraja. Kompressorit tuottaa tietyn suuruisen ilmavirran, niin kauan kunnes paineen yläraja saavutetaan, jolloin kompressorit siirtyy kevennykselle. Kevennyksessä kuormitusta poistetaan esim. sulkemalla kompressorin imuventtiili ja avaamalla paineenpoistovenktiili. Kompressorit ei tuota paineilmaa keventäessään. Kuormitus ja kevennys- säätöön usein lisätty mahdollisuus sammuttaa kompressorit, kun se on ollut tietyn ajan kevennyksellä. Tällöin välttyään kompressorin tyhjäkäynniltä. Kompressorit käynnistyy tai lopettaa kevennyksen, kun paine laskee alarajalle ja jatkaa normaalia käyntiään. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 53-55.)

Jatkuva tuoton säätö on yleensä toteutettu säätämällä kompressorin moottorin pyörimisnopeutta. Koska kompressorit on useimmiten varustettu sähkömoottorilla, niin pyörimisnopeuden säätö tehdään taajuusmuuttajalla. Paineen vaihtelut ovat vähäisiä koska tuottoa saadaan portaattomasti säädettyä. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 53-54.)

2.5 Paineilman jälkikäsitteily

Paineilman käyttäjälle on tärkeää, että paineilma on oikean laatuista koska epäpuhdas paineilma voi aiheuttaa vahinkoja käyttökohteissa. Yleisimpiä paineilman epäpuhtauksia ovat: vesi pisaroina tai höyrynä, öljy pisaroina tai sumuna ja kiinteät partikkelit (esim. pöly). Paineilman jälkikäsitteilyllä pyritään pääsemään eroon näistä epäpuhtauksista. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 72.)

2.5.1 Paineilman laatu

ISO-standardi 8573-1 määrittelee paineilman laatuluokituksen seuraavien tekijöiden mukaan: kiinteät partikkelit, kastepiste paineenalaisena ja öljypitoisuus. Kiinteiden partikkeleiden osalta on määritetty maksimi partikkelikoko ja maksimipitoisuus vapaassa ilmassa mg/m^3 . Kastepiste paineenalaisena tarkoittaa lämpötilaa, jossa paineilmassa oleva vesihöyry alkaa kondensoitumaan vedeksi vallitsevassa paineessa. Öljypitoisuus ilmoitetaan maksimipitoisuutena vapaassa ilmassa mg/m^3 . Edellä mainittujen asioiden vaikutus laatuluokitukseen on nähtävissä seuraavassa taulukossa (1). (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 52-53.)

Taulukko 1. Paineilman laatuluokitus, ISO 8573-1 (2010) (Atlas Copco Airpower NV 2015, 73)

3:10

Class	Maximum number of particles per m ³			Water	Oil
	for particle sizes, d(μm)			Max. pressure	Max. conc.
	0,1 < d ≤ 0,5	0,5 < d ≤ 1,0	1,0 < d ≤ 5,0	dew point (°C)	(mg/m ³)
0	As specified by the equipment user or supplier and more stringent than class 1				
1	≤20000	≤400	≤10	-70	0,01
2	≤400000	≤6000	≤100	-40	0,1
3	not specified	≤90000	≤1000	-20	1
4	not specified	not specified	≤10000	+3	5
5	not specified	not specified	≤100000	+7	>5
6	0 < c _p ≤ 5			+10	-

c_p = Mass concentration in mg/m³
 Oil = Total oil concentration (liquid, aerosol and vapor)

Taulukossa (1) laatuluokka 0 on paras ja laatuluokka 6 taas huonoin. Laatuluokka 0 paineilman arvot ovat tiukemmat kuin ensimmäisessä ja ne ovat paineilmajärjestelmän käyttäjän itse asettamia vaatimuksia paineilman laadulle. Laatuluokka 0 mukaista ilmaa käytetään mm. sairaaloissa ja lääkeaineteollisuudessa, missä paineilmalle on tiukat laatuvaatimukset. Se ei saa mm. sisältää öljyä ja sen pitää olla myös steriiliä eli se ei saa sisältää bakteereja. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 57.)

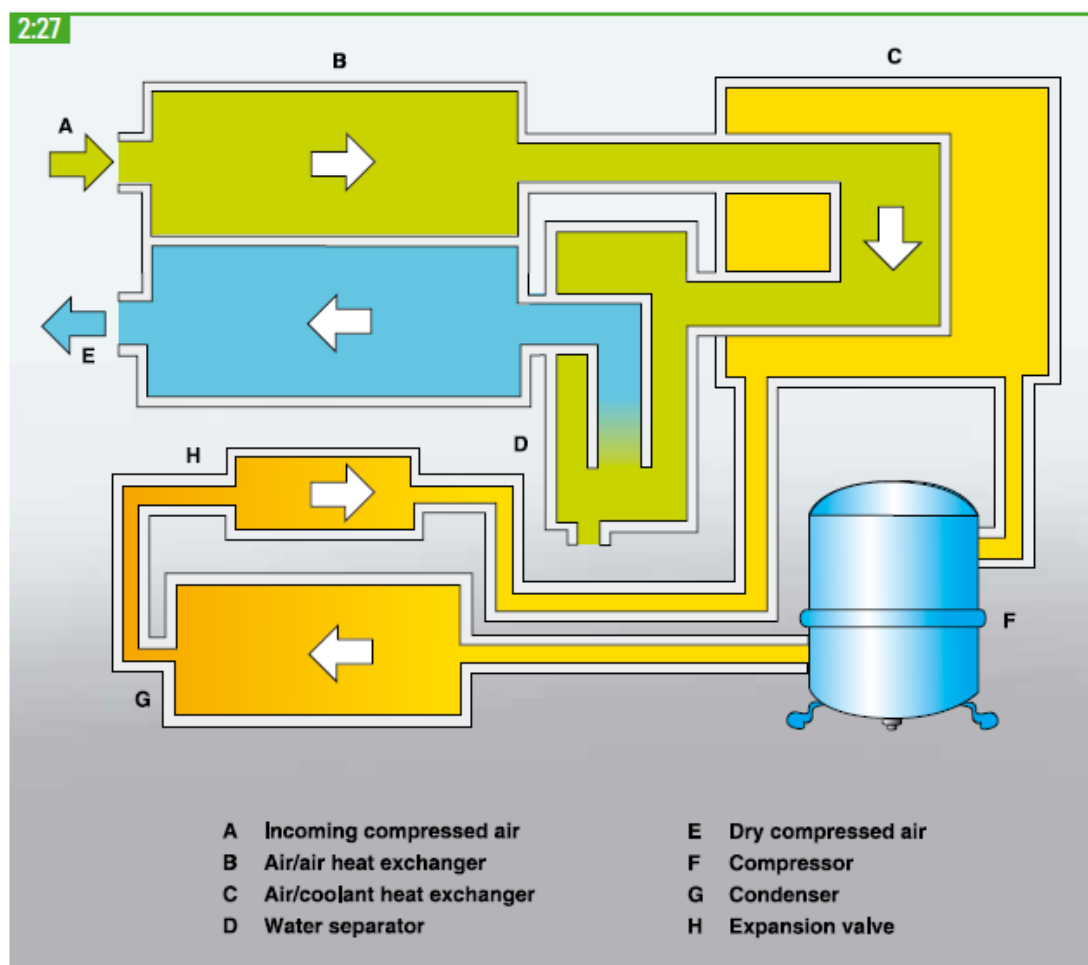
2.5.2 Kuivaus

Ilmakehän ilma sisältää aina vettä vesihöyryn muodossa. Mitä lämpimämpää ilma on, sitä suurempi on ilman vesipitoisuus. Ilman puristuessa sen vesipitoisuus lisääntyy. Esimerkiksi kompressori, jonka työpaine on 7 bar ja tuotto 200 l/s, vapauttaa vettä 10 litraa tunnissa, kun imuilman lämpötila on 20 °C ja suhteellinen kosteus 80%. Vettä poistetaan paineilmasta useimmiten jälkijäähdyttimillä, jäähdytyskuivaimilla ja adsorptiokuivaimilla. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 44.)

Jälkijäähdytintä on lämmönvaihdin, joka jäähdyttää kompressorilta tulevaa paineilmaa. Se on sijoitettu paineilmajärjestelmässä heti kompressorin jälkeen. Ilman jäähtyessä sen vesisisältö myös laskee, kun vesihöyry alkaa kondensoitumaan vedeksi lämpötilan laskiessa. Kondensoitunut vesi ohjataan ulos järjestelmästä. Jälkijäähdyttimellä pysytään poistamaan noin 80 – 90% paineilman vesisisällöstä. Jälkijäähdyttimeltä lähtevän paineilman lämpötila on noin 10 °C lämpimämpää kuin jäähdyttävän aineen

lämpötila. Jälkijäähdytintä voi olla ilma- tai vesijäähdytteinen. Jälkijäähdytintä löytyy nykyään melkein jokaisesta kiinteästi asennetusta paineilmajärjestelmästä ja usein se onkin jo kiinteä osa kompressoria. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 45.)

Jäähdytyskuivain on kahdesta kiertopiiristä muodostuva laite, joka jäähdyttää paineilmaa ja samalla poistaa siitä vettä. Ensimmäisessä piirissä kiertää jäähdytettävä paineilma ja toisessa jäähdyttävä kylmäaine (jäähdytyspiiri). Jäähdytyskuivaimen toiminta on selitetty seuraavassa kuvassa (3). (Atlas Copco Airpower NV 2015, 46-47.)



Kuva 3. Jälkijäähdyttimen toimintaperiaate (Atlas Copco Airpower NV 2015, 47)

Kuvassa (3) tuleva paineilma (A) luovuttaa lämpöä kuivalle paineilmalle (E) ensimmäisessä lämmönsiirtimessä (B). Paineilma (A) jatkaa matkaansa seuraavaan lämmönsiirtimeen (C), missä se jäähtyy toisessa kiertopiirissä kulkevan kylmäaineen toimesta. Tämän jälkeen jäähtynyt paineilma kulkee veden erottimen läpi (D) ja poistuu laitteesta kuivana paineilmalla (E) ensimmäisen lämmönsiirtimen (B) läpi.

Lämmittämällä kuivaa paineilmaa (E) huoneenlämpöiseksi tulevalla paineilmalla (A) saadaan vähennettyä mahdollisen kondenssin muodostumista putkien pinnalle. Myös jäähdytyspiiri voidaan tällöin mitoittaa pienemmäksi koska tuleva paineilma (A) jäähtyy hieman ensimmäisessä lämmönsiirtimessä (B). (Atlas Copco Airpower NV 2015, 46-47.)

Adsorptiokuivaimen toiminta perustuu hygroskooppisen materiaalin kykyyn sitoa itseensä kosteutta ilmasta. Käytettyjä kuivausaineita ovat esim. silikageeli ja aktivoitu alumiinioksidi. Kuivausaine kyllästyy ilmankosteudesta ja sen vuoksi sitä pitää säännöllisesti elvyttää ilmalla. Adsorptiokuivaimen rakenne koostuu kahdesta säiliöstä, jotka sisältävät kuivausainetta. Säiliöt vuorottelevat kuivaamisessa. Toisen säiliön kuivatessa paineilmaa toisen säiliön kuivausainetta elvytetään ilmapirralla. Adsorptiokuivaimilla saadaan tuotettua todella kuivaa ilmaa, minkä vuoksi sitä käytetään erittäin kuivaa ilmaa tarvitsevilla käyttökohteilla. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 47-48.)

2.5.3 Suodatus

Suodatuksella pyritään poistamaan paineilmasta epäpuhtauksia, kuten öljyä, kiinteitä partikkeleita ja bakteereja (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 56-57). Paineilmassa esiintyvä öljy on peräisin kompressorista. Öljyn määrä paineilmassa on riippuvainen kompressorin tyypistä, kunnosta ja käyttölämpötilasta. (Tamrotor kompressorit Oy 2017.)

Paineilmassa esiintyvät kiinteät partikkelit ja bakteerit kulkeutuvat paineilmajärjestelmään imuilman mukana ympäristöstä. Teräsputkisissa paineilmaverkoissa saattaa myös ilmetä ruostumista putken sisäpinnalla, mikä irrotessaan kulkeutuu paineilman mukana. Bakteerit voivat myös alkaa lisääntymään paineilmajärjestelmässä, jos olosuhteet ovat otolliset. (Tamrotor kompressorit Oy 2017.)

Öljyn suodattamiseen käytetään mekaanista suodatusta, yhdistymissuodatusta ja adsorptiosuodatusta. Öljyn höyrystyessä puristuksen yhteydessä saattaa syntyä hiiliveityjä, jolloin käytetään aktiivihiilisuodatusta. Kiinteiden partikkelien suodattamiseen

käytetään esisuodattimia, hienosuodattimia ja mikrosuodattimia. Steriilisuodattimia käytetään bakteerittoman ilman tuottamiseen. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 56-57.)

Adsorptiokuivainta käytettäessä tarvitaan pölysuodattimia kuivaimen jälkeen. Kuivausaineiden liikkeessa kuivaimen sisällä syntyy hienojakoista pölyä, joka voi olla käyttökohteelle haitallista. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 57.)

2.6 Paineilman siirto

Paineilma siirretään käyttökohteeseen putkista rakennetulla verkolla. Verkko voi olla rakenteeltaan suora verkko, rengasverkko ja edellisten yhdistelmä. Verkoston muita osia ovat paineilmasäiliöt ja käyttökohteen liitännät (esim. venttiilit ja liittimet). (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 59.)

Paineilmasäiliön käyttö on suositeltavaa ja sen olemassaololla on omat hyötynsä. Säiliö toimii paineilmavarastona, tasaa kulutushuippuja ja vaimentaa painevaihteluja. Säiliö ei kuitenkaan ole välttämätön, sillä putkiston tilavuus itsessään toimii säiliönä, joskaan ei yhtä hyvällä menestyksellä. Tällöin voi syntyä ongelmia mm. voimakkaista painevaihteluista verkossa ja niiden aiheuttamasta rasituksesta mm. kompressoreille. Säiliö on paineastiana merkittävä kustannustekijä mutta päätös sen pois jättämisestä on tehtävä järjestelmäkohtaisesti. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 61-62.)

Paineilmaverkon materiaali valitaan mm. sen korroosion keston ja paineen keston mukaan. Paineilmaverkot rakennetaan usein hitsaamalla teräsputkea, jolloin riskiksi muodostuu putkiston sisäpinnalle muodostuva ruoste. Toinen vaihtoehto on kierreltiimin kasattu sinkitty teräsputki. Korroosioalttiissa kohteissa käytetään haponkestävää terästä. Kupariputki on myös mahdollinen mutta sen käyttö suuressa mittakaavassa on kalliimpaa kuin teräksen. Muoviputkien käyttö on yleistynyt pienissä putkissa. Markkinoille on myös tullut modulaarisesti rakennettavia alumiiniprofiloituja putkistoja. (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 64.)

3 PAINEILMAJÄRJESTELMIEN ENERGIAATEHOKKUUS

Paineilman hyötysuhde on alle 10% (Motiva n.d.). Käyttökustannukset muodostavat suurimman kuluerän paineilmajärjestelmän elinkaaren aikana syntyvistä kustannuksista, arviolta noin 80% (Atlas Copco Airpower NV 2015, 102). Tämän vuoksi paineilmajärjestelmän suunnittelu ja kunnossapito on tärkeää hoitaa hyvin, että käyttökustannukset saadaan pidettyä mahdollisimman alhaisina (Tamrotor kompressorit Oy n.d.).

Useimmissa paineilmajärjestelmissä on monia mahdollisuuksia energiatehokkuuden parantamiseen, joihin kuuluu mm. lämmöntalteenotto, paineen alentaminen, vuotojen korjaus ja paineilman tuotannon optimointi kompressorin ohjauksella (Atlas Copco Airpower NV 2015, 102).

3.1 Suunnittelu

Paineilmajärjestelmää suunniteltaessa olisi hyvä selvittää seuraavat asiat: maksimikulutus, kulutuksen vaihtelu, verkoston paine, tarvittava minimipaine, vuotuinen käyttöaika, paineilman puhtaus, kastepiste, käyttöolosuhteet, kustannukset, lämmön hyödyntämismahdollisuudet ja automatiikka (Tamrotor kompressorit Oy n.d.).

Kompressorin osuus paineilmajärjestelmän energiankulutuksesta on yli 90%. Kompressorin koko olisi hyvä mitoittaa niin, että sen maksimituotto vastaisi paineilman maksimikulutusta. Liian suuri kompressori toimii alhaisella kuormitusasteella ja sen energiakustannukset kasvavat. Turhan suuri kompressori myös lisää pääomakustannuksia. Liian pieni kompressori taas aiheuttaa tarpeen toiselle kompressorilla, mikä myös lisää pääomakustannuksia. (Tamrotor kompressorit Oy n.d.)

Kompressorin ohjauksen suunnittelulla on tärkeä rooli käyttökustannusten alentamisessa. Jos paineilman kulutus on vaihtelevaa, niin taajuusmuuttajalla ohjattu kompressori on energiatehokkaampi ratkaisu (esimerkiksi työpajat). Jos paineilman kulutus on tasaista (esimerkiksi prosessi), niin perinteinen kiinteänopeuksinen kompressori

kuormitus ja kevennys- säädöllä voi olla energiatehokkuuden kannalta yhtä hyvä valinta. (Atlas Copcon www-sivut 2020.)

Hyvän suunnittelutyön tuloksena on energiatehokas ja käyttäjän tarpeisiin soveltuva paineilmajärjestelmä. Sitä hyödyntäen osataan hankkia kulutukseen sopivat kompressorit, niille soveltuva säätö, ohjaus ja oikea jälkikäsitteilytaso halutun paineilman puhtauden mukaan. (Motiva n.d.)

3.2 Paineen alentaminen

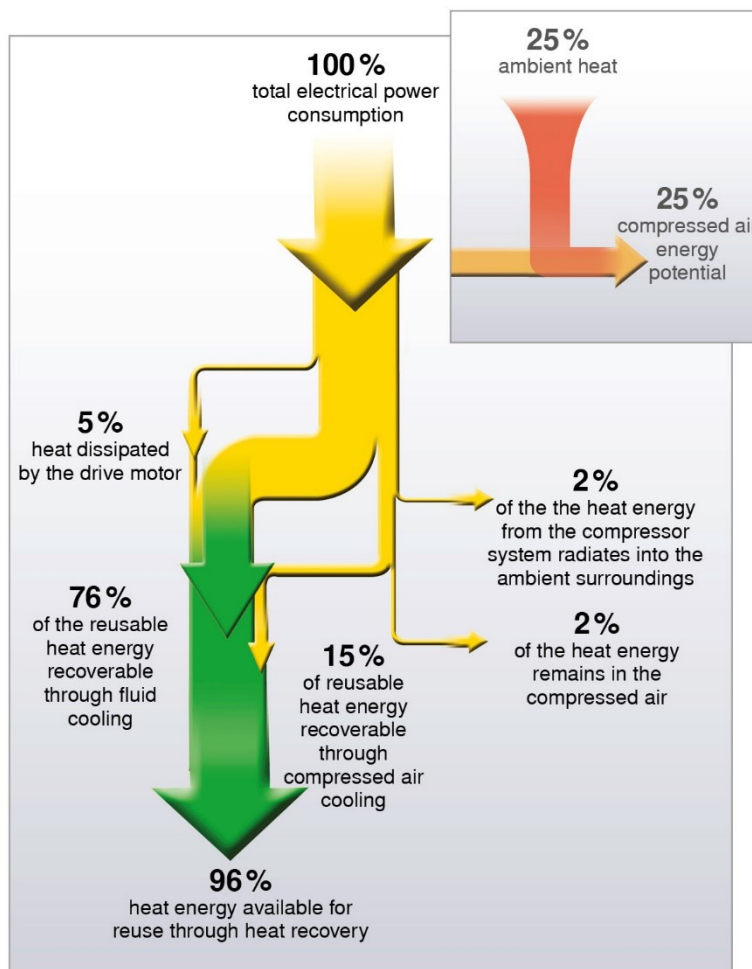
Paineen alentaminen on yksi keino parantaa paineilmajärjestelmän energiatehokkuutta. Sitä varten on selvitettävä paineilmaa käyttävien laitteiden minimipaine niiden halutun toiminnan jatkumisen takaamiseksi. Myös jälkikäsitteilyn ja verkoston aiheuttamat painehäviöt on selvitettävä. 1 bar paineenlaskulla saavutetaan noin 6-8% sähköenergiainsäästö. (Motiva n.d.)

3.3 Vuodot

Vuotoja ilmenee kaikissa paineilmajärjestelmissä. Vuotoihin varaudutaan jo yleensä suunnitteluvaiheessa ylimitoittamalla paineilmajärjestelmän tuotto, yleensä noin 10%. Kiinteät hitsaamalla rakennetut verkot vuotavat harvoin. Vuotojen aiheuttajia ovat tyypillisesti liittimet ja paineilmaa hyödyntävien laitteiden tiivisteet. Vuodot lisäävät paineilmajärjestelmän käyttökustannuksia, kun paineilmaa joudutaan tuottamaan enemmän vuotojen aiheuttamien häviöiden kattamiseksi. Vuotoja voidaan vähentää huolehtimalla liittimien ja laitteiden kunnosta ja oikeaoppisesta käytöstä. (Hagner n.d. 6-7.)

3.4 Lämmöntalteenotto

Kompressorin sähkömoottorin kuluttama sähkö muuttuu 100-prosenttisesti lämpöenergiaksi, kuten nähdään seuraavassa kuvassa (4) (Kaeser Kompressorit www-sivut 2020).



Heat flow diagram

Kuva 4. Hyödynnettävä lämpö (Kaeser Kompressorit 2020)

Kuvan (4) mukainen 96-prosenttinen lämmöntalteenotto on mahdollista ilmajäähdytteisellä öljyvoidellulla ruuvikompressorilla. Noin 76% käytetystä energiasta saadaan talteen öljystä öljynjäähdyttimessä (ilmajäähdytys) ja 15% saadaan talteen jälkijäähdyttimestä, kun paineilmaa kompressorin jälkeen kuivataan/jäähdytetään. 5% käytetystä energiasta kuluu lämpöhäviöinä sähkömoottorissa mutta koteloituissa ruuvikompressoreissa myös sen talteenotto on mahdollista. Lopusta 4% noin 2% häviää lämpösäteilynä ympäristöön ja toinen 2% jää lämpösisältönä paineilmaan. (Kaeser Kompressorit www-sivut 2020.)

Hyödynnettävän lämpöenergian määrää riippuu kompressorista ja sen jäähdytyksestä. Lämmöntalteenotto auttaa parantamaan paineilmajärjestelmän energiatehokkuutta.

Ilmajäähdytteisissä järjestelmissä lämmin jäähdytysilma voidaan hyödyntää sellaisenaan esimerkiksi tilojen lämmitykseen. Vesijäähdytteisten järjestelmien lämmintä jäähdytysvettä voidaan hyödyntää esimerkiksi lämmintä vettä käyttävässä prosessissa, avustamaan lämpimän käyttöveden tuotossa tai vesikiertoisten patterien lämmittämiseen. (Atlas Copco Airpower NV 2015, 79-82.)

Lämpö voidaan ottaa myös talteen lämpöpumpulla, jolloin paineilmajärjestelmän hukkalämmön lämpötila saadaan nostettua korkeammalle tasolle. Tällöin hukkalämpöä voidaan syöttää esimerkiksi kaukolämmitysverkkoon, jos hukkalämmölle ei ole itselle tarvetta. Hukkalämmön syöttäminen kaukolämpöverkkoon on vielä nykyään melko harvinaista, vain 2% kaukolämmöstä tuotetaan teollisuuden hukkalämmöllä. Hukkalämmön hyödyntäminen tulee kuitenkin yleistymään lainsäädännön ja asenteiden muuttuessa, kun pyritään vähentämään saastuttavampien energialähteiden osuutta lämmöntuotannossa ja parantamaan energiatehokkuutta. Esimerkiksi Nordkalk Oy Ab toimittaa vuodessa keskimäärin 45 GWh lämpöä Lappeenrannan, Lohjan, Paraisten kaukolämpöverkkoihin, mitä se ottaa talteen savukaasujen jäähdytyksen yhteydessä. (Motiva 2013.)

4 NYKYJÄRJESTELMÄN KULUTUS

4.1 Järjestelmäkuvaus

Paineilmajärjestelmän paineilmaa käytetään mm. työkalujen voimanlähteenä. Kulutus ajoittuu yleensä kello 6 – 22 väliselle ajalle.

Paineilmaverkon muoto ja kompressorien sijainnit ovat nähtävissä liitteessä 1. Nykyinen järjestelmä tuottaa paineilmaa kolmella ilmajäähdytteisellä mäntäkompressorilla. Kompressorit on sijoitettu kahteen eri paikkaan. Verkkoon kuuluu neljä 10 m³ paineilmasäiliötä. Paineilmasäiliöt on sijoiteltu niin että kummankin kompressoritilan läheisyydessä on kaksi säiliötä.

Kompressorien sähkömoottorien teho on 250 kW. Yhden kompressorin ilman tuotto on 35,8 m³/min, 9 bar (ISO 1217). Suurin työpaine on 11 bar. Kompressorin tehon tarve akselilla on kuormitettuna 236 kW, 9 bar.

Kompressorien ohjaus on hoidettu kuormitus ja kevennys- säädöllä. Järjestelmän paineen asetusarvo on 6,2 bar (+/- 0,25 bar). Kompressori 5B on järjestelmän pääkompressori. Kompressorit 7B 1 ja/tai 2 käynnistyvät, jos 5B ei kykene yksin tuottamaan riittävää painetta verkkoon. Tyypillisesti vain toinen 7B kompressoreista käy yhdessä 5B kompressorin kanssa, minkä pohjalta voidaan arvioida, että paineilman kulutus-huippu on 35,8 – 71,6 m³/min.

Kompressorit on varustettu Tamrotorin ilmajäähdytteisillä Air Module- jäähdytynyksiköillä. Ne ovat tyypiltään jälkijäähdyttimiä. Jäähdyttimistä poistuvan paineilman lämpötila on 9 °C korkeampi kuin jäähdytysilman lämpötila.

4.2 Kulutus

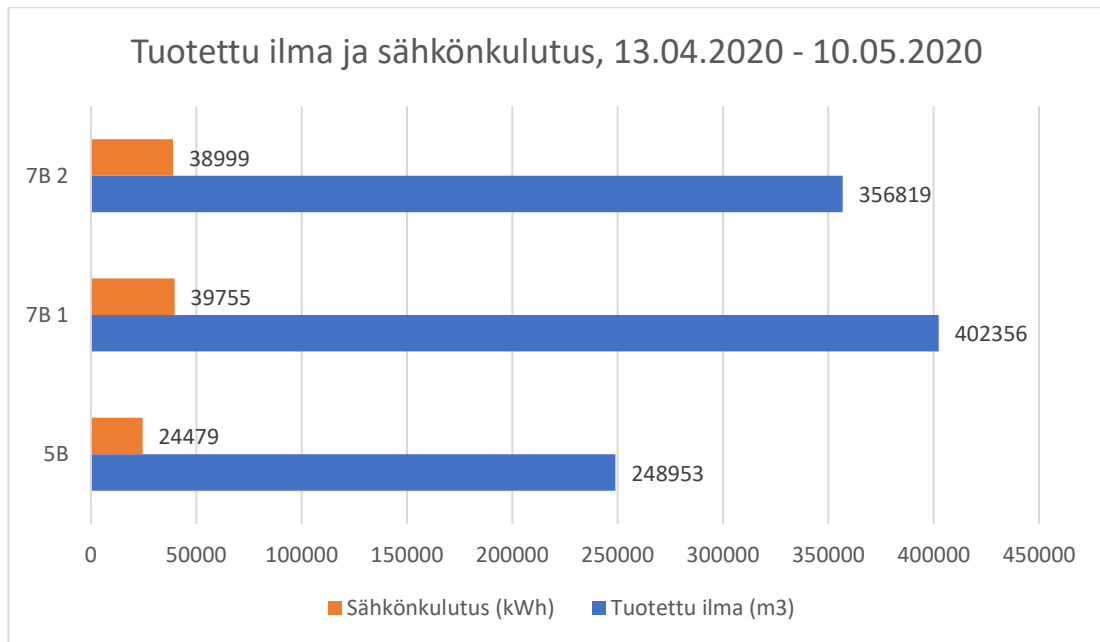
Nykyisen järjestelmän kompressorien käyntiajan (kuormitus ja kevennys eritelty), tuotetun ilmamäärän (m³) ja sähkönkulutuksen (kWh) määrittämiseen on käytetty työn tilaajan toimittamaa mittausdataa seuraavalta ajanjaksolta: 13.04.2020 – 10.05.2020. Taulukko 2 sisältää nykyisten kompressorien käyntiajat, tuotot ja sähkönkulutukset. Taulukko 3 sisältää vastaavat tiedot kuin taulukko 2 mutta tulokset on jaettu mittausajanjakson päivien lukumäärällä (28). Kuviot 1 ja 2 vertailevat kompressorien ilman tuottoa ja sähkönkulusta.

Taulukko 2. Kompressorien mittausdata, 13.04.2020 – 10.05.2020.

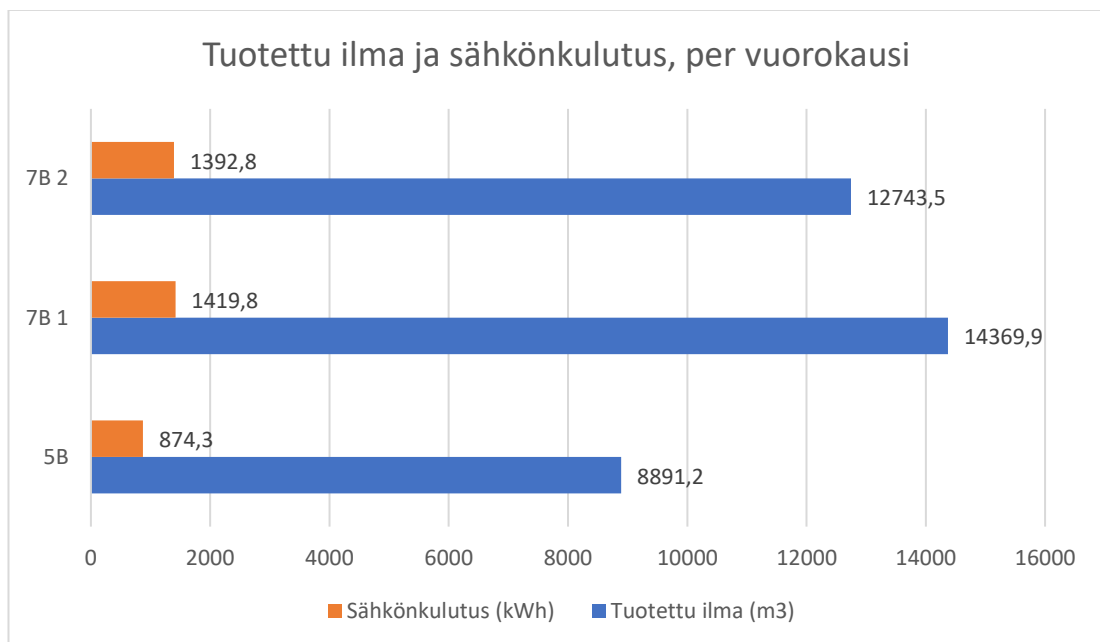
Kompressori	5B	7B1	7B 2	Yhteensä
Kuormitettuna (h)	116	187	166	-
Kevennetyinä (h)	122	38	57	-
Tuotettu ilma (m ³)	248 953	402 356	356 819	1 008 128
Sähkönkulutus (kWh)	24 479	39 755	38 999	103 233

Taulukko 3. Kompressorien mittausdata, per vuorokausi.

Kompressor	5B	7B1	7B 2	Yhteensä
Kuormitettuna (h)	4,1	6,7	5,9	-
Kevennettynä (h)	4,4	1,4	2,0	-
Tuotettu ilma (m ³)	8 891,2	14 369,9	12 743,5	36 004,6
Sähkönkulutus (kWh)	874,3	1 419,8	1 392,8	3 686,9



Kuvio 1. Kompressorien tuottama ilma ja sähkönkulutus, 13.04.2020 – 10.05.2020.



Kuvio 2. Kompressorien tuottama ilma ja sähkönkulutus, per vuorokausi.

5 SÄÄSTÖPOTENTIAALI

5.1 Uusien laitteiden tiedot

Seaside Industry Park Rauman suunnitelmana on päivittää nykyistä paineilmajärjestelmää. Tavoitteena on parantaa järjestelmän energiatehokkuutta ja alentaa käyttökustannuksia. Päivityspakettiin kuuluvat mm. kompressorit, ohjausjärjestelmä, kuivaimet ja lämmöntalteenotto. Päivityksen yhteydessä on myös tarkoitus keskittää uusi paineilmajärjestelmä nykyjärjestelmän 5B- kompressorin sijaintiin.

Tätä opinnäytetyötä varten toimitetun hankintasuunnitelman mukaan vanhat ilmajäähdytteiset mäntäkompressorit korvataan neljällä ilmajäähdytteisellä ruuvikompressorilla. Kompressorien sähkömoottorien teho on 90 kW. Yhden kompressorin ilman tuotto on 16,25 m³/min, 6 bar (ISO 1217). Maksimiylipaine 8,5 bar. Koko laitteiston sähköinen ottoteho on 91,5 kW, 6 bar. Uusien kompressorien ohjaus hoidetaan kuormitus ja kevennys- säädöllä.

Jokainen kompressori varustetaan omalla lämmöntalteenotolla, joka kykenee ottamaan talteen jopa 76% kompressorin kuluttamasta sähköstä lämpönä. Tarkoituksena on alkaa toimittamaan talteen saatua lämpöä kaukolämpöverkkoon. Vaihtoehtoina olisi esim. esilämmittää kaukolämpöverkon paluuvettä ennen sen paluuta voimalaitokselle tai tuottaa lämmintä vettä kaukolämpöverkkoon lämpöpumpuilla.

Uuden paineilmajärjestelmän kokonaishinta on 117 825 € (alv 0%). Hinta sisältää uudet laitteet, kompressorihuoneen CAD-suunnittelun, asennuksen ja käyttöönotonopastuksen. Hinta ei sisällä huoltosopimusta uudelle järjestelmälle.

5.2 Syntyvät säästöt

Uuden järjestelmän kompressorien yhteenlaskettu ilman tuotto on 65 m³/min, 6 bar. Koko laitteiston yhteenlaskettu sähköinen ottoteho on tällöin 366 kW, 6 bar. Laskeaan, että kuinka paljon uusi järjestelmä kuluttaa sähköä, jos ilman tuotto olisi nykyjärjestelmän vuorokautisen tuoton mukainen 36 004,6 m³:

$$36\,004,6 \text{ m}^3 / 65 \text{ m}^3/\text{min} / 60 * 366 \text{ kW} = 3\,378,9 \text{ kWh}$$

Uuden järjestelmän vuorokautinen sähkönkulutus olisi 3 378,9 kWh. Jos tätä sähkönkulutusta verrataan nykyjärjestelmän kulutukseen, niin säästöjä syntyy:

$$3686,9 \text{ kWh} - 3\,378,9 \text{ kWh} = 308 \text{ kWh}$$

Vuorokautinen sähkönkulutus olisi uudella järjestelmällä siis noin 308 kWh pienempi. Prosentteina säästö olisi noin 8,4% verrattuna nykyjärjestelmän kulutukseen.

Suurin säästöjä tuova tekijä uudessa järjestelmässä on lämmöntalteenotto. Nykyjärjestelmän jäädytyksessä ja paineilman kuivauksessa syntyvää hukkalämpöä ei hyödynnetä. Uuden järjestelmän lämmöntalteenotto pystyy ottamaan 76% kompressorin käytämästä sähköenergiasta talteen lämpönä. Lasketaan talteen otetun lämmön määrä:

$$3\,378,9 \text{ kWh} * 0,76 = 2\,568 \text{ kWh}$$

Käytetystä sähköenergiasta saataisiin vuorokaudessa talteen 2 568 kWh lämpöenergiaa.

5.3 Investoinnin takaisinmaksuaika

Investoinnin takaisinmaksuajan määrittämisessä käytetään työn tilaajan toimittamaa sähkön hintaa 7,0 snt/kWh.

Takaisinmaksuajan määrittämisessä ei huomioida järjestelmien huoltokustannuksia koska niistä ei ole tietoa.

Lämmöntalteenottoa varten lasketaan, mitä maksaisi tuottaa 1 kWh lämpöenergiaa öljykattilalla, jonka hyötysuhde olisi 90%, lämmitysöljyn hinta 0,70 €/litra ja lämmitysöljyn lämpöarvo 10 kWh/litra:

$$1 \text{ kWh} / 0,9 / 10 \text{ kWh/litra} * 0,70 \text{ €/litra} = 0,078 \text{ €}$$

Oletetaan, että työn tilaajalle maksettaisiin 0,078 €/kWh kaukolämpöverkkoon syötetystä lämpöenergiasta.

Paineilmajärjestelmää käytetään vaihtelevasti viikon aikana. Laskentaa varten oletetaan, että paineilmajärjestelmä ei ole päällä sunnuntaisin. Järjestelmä on tällöin päällä noin 313 päivää vuodessa.

Lasketaan vuoden aikana syntyvät säästöt:

$$313 \text{ vrk} * 308 \text{ kWh} * 0,07 \text{ €/kWh} + 313 \text{ vrk} * 2\,568 \text{ kWh} * 0,078 \text{ €/kWh} = 69\,443 \text{ €}$$

Vuoden aikana säästöjä syntyy 69 443 €.

Lasketaan investoinnin takaisinmaksuaika:

$$117\,825 \text{ € (alv 0\%)} / 69\,443 \text{ €} = 1,7 \text{ vuotta}$$

Uuden paineilmajärjestelmän investointi maksaisi itsensä takaisin 1,7 vuodessa.

Lasketaan vielä takaisinmaksuaika huomioimalla pelkästään säästöt sähkönkulutuksessa:

$$117\,825 \text{ € (alv 0\%)} / (313 \text{ vrk} * 308 \text{ kWh} * 0,07 \text{ €/kWh}) = 17,5 \text{ vuotta}$$

Tällöin takaisinmaksuaika olisi 17,5 vuotta.

5.4 Leasing vai investointi

Uudesta paineilmajärjestelmästä on annettu myös leasingvaihtoehto, joka maksaisi vuodessa 21 460 € (alv 0%). Vuokrankausi olisi viiden vuoden mittainen, jolloin hinta koko vuokrakauden ajalta olisi 107 300 €. Jos laitteiden käyttö jatkuu pidempään kuin

5,5 vuotta, niin investointi omiin laitteisiin tulee kannattavammaksi. 5,5 vuoden vuokra vastaa investoinnin kokonaishintaa:

$$117\,825\text{ €} / 21\,460\text{ €/a} = 5,5\text{ vuotta}$$

6 POHDINTA JA YHTEENVETO

Nykyjärjestelmän sähkönkulutus saatiin selvitettyä hyödyntäen Seaside Industry Park Rauman toimittamaa mittausdataa nykyisten kompressorien sähkönkulutuksesta. Mittausdatan perusteella saatiin myös arvioitua kompressorien tuottamia ilmamääriä. Tuotettu ilmamäärä jouduttiin selvittämään koska siitä ei ollut olemassa mittausdataa ja sitä tarvittiin säästöpotentiaalin selvittämisessä. Arviot nykyjärjestelmän tuottamista ilmamääristä ovat kuitenkin melko karkeita, mutta niitä hyödyntäen saatiin säästöpotentiaali selvitettyä. Paremman laskentatarkkuuden takaamiseksi olisi ollut parempi, että sähkönkulutuksen lisäksi olisi myös mitattu tuotettuja ilmamääriä samalla mittausajanjaksolla. Suurin laskentatarkkuus olisi saavutettu, jos mittausajanjakso olisi ollut vuoden mittainen. Ilmamäärien mittaaminen olisi tosin vaatinut uusien mittauslaitteiden asentamista nykyjärjestelmään, joka olisi sinänsä ollut turha panostus, kun järjestelmä on kuitenkin tarkoitus korvata uudella järjestelmällä.

Uuden järjestelmän säästöpotentiaali selvitettiin uusien kompressorien laitetietojen pohjalta. Huomattiin, että uusien kompressorien sähkönkulutus on alhaisempi kuin nykyisten kompressoreiden, kun laskettiin niiden sähkönkulutus samalla tuotetulla ilmamäärällä. Lämmöntalteenotto on huomattava tekijä, kun puhutaan potentiaalisista säästöistä. Koska kompressorin käyttämä sähköenergia muuttuu kokonaisuudessaan lämpöenergiaksi, niin sen talteenotto ja hyödyntäminen on merkittävä energiatehokkuuden parantaja.

Takaisinmaksuaika laskettiin hyödyntäen työn tilaajan ilmoittamaa sähkön hintaa. Takaisinmaksuajan määrittämistä varten laskettiin öljykattilan käyttökustannukset. Oletettiin, että työn tilaajalle maksettaisiin öljykattilan käyttökustannuksia vastaava korvaus

kaukolämpöverkkoon toimitetusta lämmöstä. Laskelmissa oletettiin myös, että lämmön hyödyntämisessä ei tapahdu lämpöhäviöitä. Tähän ratkaisuun päädyttiin koska tiedossa ei vielä ollut, että miten lämpöä on tarkoitus syöttää kaukolämpöverkkoon. Oletuksena oli myös, että lämpöä syötetään ympärivuotisesti kaukolämpöverkkoon. Talvisin se tuo lisätehoa kaukolämpöverkkoon, kun kaukolämmön tarve on suurta. Kesäisin sillä saadaan katettua osa kaukolämmön tarpeesta, kun lämpöä kuluu verkon asiakkaille pääosin lämpimän käyttöveden tuottamiseen.

Uuden järjestelmän investoinnin takaisinmaksuajaksi saatiin 1,7 vuotta. Takaisinmaksuajaksi saatiin 17,5 vuotta, jos laskennassa huomioitiin pelkästään säästöt sähkönkulutuksessa. Investoinnin takaisinmaksuaika riippuu siis paljon kaukolämpöverkkoon syötetyn lämmön rahallisen korvauksen suuruudesta.

Leasing huomattiin myös kannattomaksi vaihtoehdoksi, jos laitteiden vuokraus jatkuisi samankaltaisena ensimmäisen viiden vuoden sopimusjakson jälkeen. Vertailussa ei kuitenkaan otettu huomioon huoltokustannuksia. Leasing vaihtoehto luontaisesti sisältää laitteiden kunnossapidon, kun taas investoitaessa omiin laitteisiin tarvitsee huolto hoitaa itse tai ulkoistaa, mikä taas aiheuttaa kustannuksia. Voidaan kuitenkin todeta, että jos paineilmalle on tarvetta vielä 5,5 vuoden jälkeen, niin investointi on kannattavampaa. Kyseessä on kuitenkin teollisuuspuisto, joten paineilmaa tarvitsevia tahoja löytyy luultavasti myös tulevaisuudessa.

Työn tavoitteet saavutettiin ja huomattiin, että paineilmajärjestelmän päivittämisellä saataisiin aikaan säästöjä käyttökustannuksissa. Uusi järjestelmä on energiatehokas ja nykyaikainen ratkaisu, mikä auttaa Seaside Industry Park Raumaa tuottamaan paineilmaa taloudellisemmin.

LÄHTEET

Atlas Copco Airpower NV 2015. Compressed air manual. 8.painos. Wilrijk: Atlas Copco Airpower NV. Viitattu 18.7.2020. <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/netherlands/documents/compressed-air-manual-8th-edition.pdf>

Atlas Copco www-sivut 2020. Viitattu 5.10.2020. <https://www.atlascopco.com/fi-fi/compressors/paineilman-perusteet/taajuusmuuttajavskuurmituskevennys>

Ellman, A., Hautanen, J., Järvinen, K. & Simpura, A. 2002. Pneumatiikka. Helsinki: Edita.

Hagner, B. n.d. Energiakatselmoijan käsikirja osa 3. Viitattu 6.10.2020. <http://www.motiva.fi/files/1720/kat-energiakatselmoijan-kasikirja-osa-3-2-A.pdf>

Kaeser Kompressorit www-sivut 2020. Viitattu 6.10.2020. <https://fi.kaeser.com/yri-tys/lehdistoe/lehdistoetiedotteet/e-wrg.aspx>

Motiva. n.d. Energiatehokas paineilmajärjestelmä osa ½. Viitattu 5.10.2020. https://www.motiva.fi/files/1568/Energiatehokas_paineilmajarjestelma_OSA1.pdf

Motiva. 2013. Tuotannon hukkalämpö hyödyksi. Viitattu 6.10.2020. https://www.motiva.fi/files/8501/Tuotannon_hukkalampo_hyodyksi.pdf

Seaside Industry Park Rauma www-sivut 2020. Viitattu 28.10.2020. <https://www.seasideindustry.com/fi/alueenesittely>

Tamrotor kompressorit Oy. 2017. Paineilman suodatus ja kuivaus. Viitattu 23.9.2020. <http://www.compressor.fi/media/EsitePDF/Suodatus%20ja%20kuivaus%202017.pdf>

Tamrotor kompressorit Oy. n.d. Paineilmajärjestelmän suunnittelu. Viitattu 20.7.2020. <http://www.compressor.fi/media/EsitePDF/Paineilmajaerjestelmaen%20suunnittelu.pdf>

