

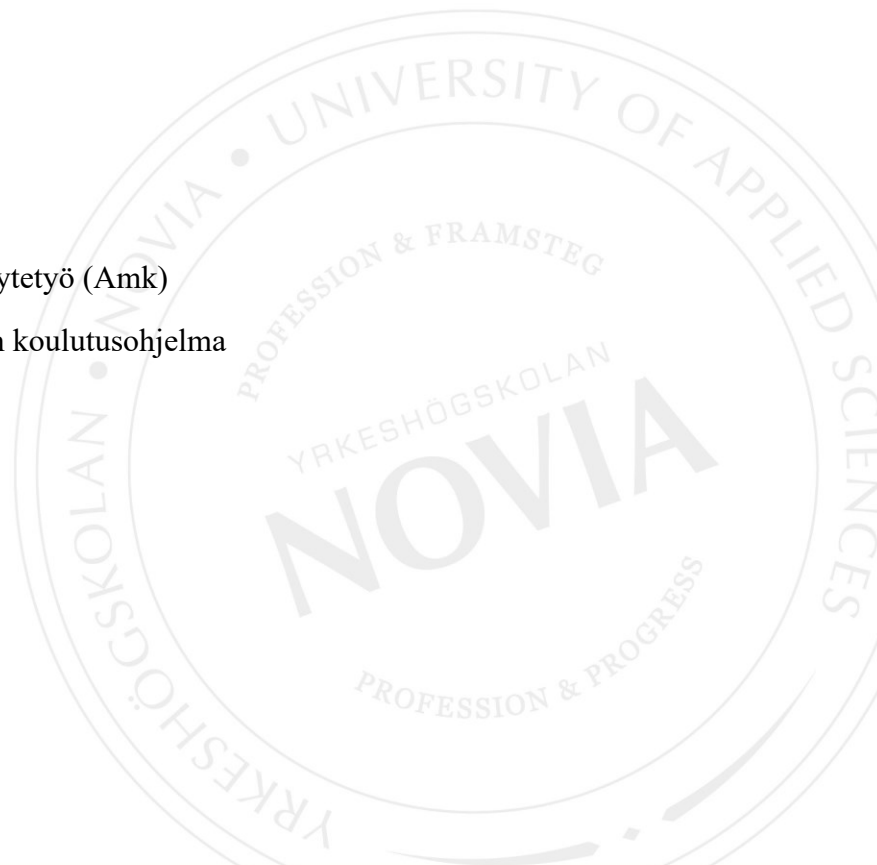
Paineilmatuotannon energiaoptimointi Metsä Board Kaskisten tehtaalla

Noah Lankoski

Insinööritutkinnon opinnäytetyö (Amk)

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Vaasa 2021



OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Noah Lankoski

Koulutus ja paikkakunta: Kone- ja tuotantotekniikka, Vaasa

Suuntautumisvaihtoehto: Käyttö- ja energiatekniikka

Ohjaajat: Kaj Rintanen ja Jari Viitasalo

Nimike: Paineilmatuotannon energiaoptimointi Metsä Board Kaskisten tehtaalla

Päivämäärä: 28.4.2021

Sivumäärä: 47

Liitteet: 1

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö on selvitys paineilmatuotannon energiaoptimoinnista Metsä Boardin Kaskisten tehtaalla, ja se toteutettiin, koska oli ajankohtaista uusia paineilmalaitoksen laitteisto. Kaikilla energiatehokkuuden edistämistoimenpiteillä paineilman tuotannossa on huomattavia taloudellisia ja ympäristöllisiä tuloksia. Yritykset voivat vähentää kokonaisenergiankulutustaan sekä pienentää hiilijalanjälkiään investoimalla uuteen teknologiaan ja optimoimalla olemassa olevia paineilmajärjestelmiä.

Työn tavoitteena oli selvittää järjestelmällisesti paineilmajärjestelmän nykytilannetta, sekä selvittää uuden kompressorin mitoitus ja mikä kompressoritekniikka parhaiten sopii tehtaan tarpeisiin. Pääasiassa verrattiin ruuvi- ja turbokompressoritekniikkaa. Tämän lisäksi selvitettiin mahdollisuudet energiatehokkuuden kehittämiseen ja energian talteenottoon. Lopuksi laadittiin paineilmaverkostolle ennakkohuolto-ohjelma.

Opinnäytetyö oli selvitystyö. Työ toteutettiin aineistoa keräämällä, kirjallisuustutkimuksilla, analysoimalla dokumentteja ja paineilman kulutusraporttia sekä laskelmia tekemällä. Saadakseen käsityksen aiheesta tutkittiin paineilman perusteet, puristusmenetelmät, paineilmajärjestelmä kokonaisuutena ja paineilman jälkikäsitely.

Selvitystyön tuloksiksi saatiin paineilmalaitoksen tämänhetkinen tilanne, valmisteleva esityö kompressorinvestointia varten, mahdollisuudet energian talteenottoon ja paineilmatuotannon energiatehokkuuden kehittämiseen. Samaan aikaan laadittiin ennakkohuolto-ohjelma.

Kieli: suomi

Avainsanat: paineilma, kompressoritekniikka, energiatehokkuus

EXAMENSARBETE

Författare: Noah Lankoski

Utbildning och ort: Maskin- och produktionsteknik, Vasa

Inriktningsalternativ: Drifts- och energiteknik

Handledare: Kaj Rintanen och Jari Viitasalo

Titel: Energioptimering av tryckluftsproduktionen vid Metsä Boards fabrik i Kaskö

Datum: 28.4.2021

Sidantal: 47

Bilagor: 1

Abstrakt

Detta examensarbete är en utredning av energioptimeringen av tryckluftsproduktionen i Metsä Boards fabrik i Kaskö och utfördes eftersom det var aktuellt att förnya tryckluftsanläggningens utrustning. I tryckluftsproduktionen har alla främjande åtgärder av energieffektiviteten märkbara ekonomiska och miljömässiga resultat. Företagen kan minska sin totala energiförbrukning samt minska på sina koldioxidavtryck genom att investera i ny teknik och optimera befintliga tryckluftssystem.

Arbetets syfte var att systematiskt utreda tryckluftsanläggningens nuvarande situation samt att ta reda på dimensioneringen av den nya kompressorn och vilken kompressorteknik som passar fabriken bäst. Huvudsakligen jämfördes skruv- och turbokompressortekniken. Utöver detta undersöktes möjligheter för utveckling av energieffektivitet och energiåtervinning. Till sist utformades det en förebyggande underhållsplan för tryckluftsnätverket.

Examensarbetet var ett forskningsarbete. Arbetet genomfördes genom att samla in material, litteraturstudier, analysera dokument och tryckluftsförbrukningsrapporter samt utföra beräkningar. För att få en uppfattning om ämnet, undersöktes grunderna i tryckluft, kompressionsmetoder, tryckluftsanläggningen som en helhet och efterbehandlingen av tryckluft.

Resultaten av forskningsarbetet erhöles av tryckluftsanläggningens nuvarande situation, förberedande utredning inför kompressorinvesteringen, möjligheterna för energiåtervinning och förbättring av energieffektiviteten i tryckluftsproduktionen. Samtidigt skapades en förebyggande underhållsplan.

Språk: finska

Nyckelord: tryckluft, kompressorteknik, energieffektivitet

BACHELOR'S THESIS

Author: Noah Lankoski

Degree Programme: Mechanical and Production Engineering, Vaasa

Specialization: Operational and Energy Technology

Supervisors: Kaj Rintanen and Jari Viitasalo

Title: Energy Optimization of Compressed Air Production at Metsä Board Kaskinen Mill

Date: 28.4.2021

Number of pages: 47

Appendices: 1

Abstract

This thesis researches the energy optimization of compressed air production at Metsä Board's pulp mill in Kaskinen and was carried out because it was time to replace the compressed air plant's equipment. In the compressed air production, any enhancements of energy efficiency produce noticeable positive economic and environmental results. Companies can reduce their total energy consumption as well as their carbon footprints by investing in new technology and optimizing compressed air systems that are already in use.

The main objective of this thesis was to systematically examine the compressed air plant's current state and find out which technology and what dimensions of the new compressor are best suited to the plant's needs. A comparison between screw compressor technology and turbo compressor technology was made. In addition, opportunities for energy efficiency development and energy recovery development were explored. Finally, a preventive maintenance plan was created.

The methodology of the research consisted of literature studies, collecting material, analyzing documents and reports on compressed air consumption as well as conducting a variety of calculations. As part of the background research, the basics of compressed air, the compression methods, the compressed air plant and after-treatment of compressed air were examined.

The results of this thesis were obtained by analyzing the compressed air plant's current situation, by preparatory investigation prior to the compressor investment, the opportunity for energy recovery and the improvement of energy efficiency in compressed air production. At the same time, a preventive maintenance plan was created.

Language: Finnish

Key Words: compressed air, compressor technology, energy efficiency

Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	1
1.1	Tausta.....	1
1.2	Tavoite	2
1.3	Rajaus.....	2
1.4	Yritysesittely	2
1.4.1	Metsä Group	2
1.4.2	Metsä Board.....	3
1.4.3	Metsä Board Kaskinen	4
1.5	Jäsentely.....	5
2	Teoria.....	6
2.1	Paineilman perusteet	6
2.1.1	Paineilman käyttökohteet	7
2.2	Kompressori.....	7
2.2.1	Kompressorien periaatteet	8
2.2.2	Ruuvikompressori.....	9
2.2.3	Turbokompressori.....	11
2.2.4	Ohjaus- ja säätöjärjestelmä.....	15
2.2.5	Etävalvonta	16
2.3	Paineilmajärjestelmä	16
2.3.1	Paineilman laatu	17
2.3.2	Paineilmasäiliö	18
2.3.3	Kuivaus ja jäähdytys.....	18
2.3.4	Jälkijäähdytin.....	20
2.3.5	Jäähdytyskuivain	20
2.3.6	Adsorptiokuivain	20
2.3.7	Suodattaminen	21
2.4	Energiätehokkuus paineilmatuotannossa	21
2.4.1	Energiätehokkaan paineilmajärjestelmän suunnittelu	21
2.4.2	Uusien paineilmalaitteiden hankinta	22
2.4.3	Kompressorin mitoitus	22
2.4.4	Energiätehokkuuden ylläpitäminen	23
2.5	Kunnossapito ja ennakkohuolto.....	24
2.5.1	Vuodot paineilmaverkostossa.....	24
2.5.2	Haittatekijöiden eliminoiminen	26
2.6	Lämmön talteenotto	26
2.6.1	Jäähdytysilman hyödyntäminen	28
2.6.2	Jäähdytysveden hyödyntäminen	28

2.7	Paineilman kulutusraportti	28
2.8	Energiatuki	29
3	Toteutus	30
3.1	Tehtävä.....	30
3.2	Toteuttaminen	30
4	Tulokset	32
4.1	Metsä Board Kaskisten paineilman tuotantolaitteisto	32
4.1.1	Paineilman laatu	33
4.1.2	Paineilmasäiliöt	33
4.1.3	Ohjaus- ja säätömenetelmät.....	33
4.1.4	Tehtaan paineilman kulutus.....	34
4.2	Kompressorin uusiminen	35
4.2.1	Kompressorin mitoitus	35
4.2.2	Ruuvi- ja turbokompressoritekniikan vertailu.....	36
4.2.3	Vaihtoehtojen analysointi.....	37
4.2.4	Kompressorin sijoituskohde	38
4.3	Mahdollisuudet energiatehokkuuden kehittämiseen.....	39
4.3.1	Lämmön talteenotto	39
4.3.2	Säätö- ja ohjausmenetelmän optimointi	40
4.3.3	Painetason alentaminen	40
4.3.4	Painehäviöt	41
4.3.5	Haittatekijöiden poistaminen.....	41
4.3.6	Energiatehokkuuden ylläpitäminen	41
4.4	Paineilmajärjestelmän ennakkohuolto-ohjelma.....	42
4.4.1	Säännöllinen vuotokartoitus	42
5	Keskustelu	44
	Lähdeluettelo	46

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö käsittelee Metsä Board Kaskisten tehtaan paineilmatuotantoa. Tehtaan kolme paineilmakompressoria on tarkoitus uusida yhdellä uudemalla laitteella, niin että laite vastaa paineilman kulutusta sekä tuottaa paineilmaa energiatehokkaammin ja korkeammalla hyötysuhteella nykyisiin kompressoreihin verrattuna.

Opinnäytetyön tarkoitus on selvittää kompressorin oikea mitoitus, käyttämällä saatavilla olevia ilmankulutuskartoituksia, ja vertailla eri kompressoritekniikoita. Teoria käsittelee paineilman perusteita, miten sitä tuotetaan, mihin sitä käytetään, laatuvaatimuksia ja jälkikäsitteilyä. Lisäksi kuvataan energiatehokkaan paineilmajärjestelmän suunnittelua, kunnossapitoa ja ennakkohuoltoa sekä lämmön talteenottoa. Työn ohella on suunnitelma kartoittaa mahdollisuudet energiatehokkuuden kehittämiseen, energian talteenotolle ja laatia paineilmaverkostolle ennakkohuolto-ohjelma. Työn lopussa esitellään paineilmatuotannon energiaoptimoinnin tulokset.

1.1 Tausta

Metsä Board Kaskisten tehtaalla on kolme paineilmakompressoria paineilman tuotantoon, kaksi sijaitsee tehtaan voimalaitoksella ja yksi hiertämöllä. Voimalaitoksella sijaitsevat ruuvikompressorit ovat vanhoja ja kuluneita, eli ne lähestyvät elinkaarensa loppua ja käyttö- ja huoltokustannukset ovat samanvertaisia kuin uuteen investointi. Hiertämöllä sijaitseva ruuvikompressori on uudempi, mutta ei ole mitoitettu koko tehtaan paineilman tarpeelle ja ilmankulutuksen vaihteluille, koska paineilmajärjestelmää on laajennettu vuosien varrella.

Toimeksiantaja haluaa korvata kompressorit uusilla laitteilla, jotka antaisivat lisäarvoa, käyttäisi energiaa tehokkaammin, hyvällä hyötysuhteella ja parhaalla käyttövarmuudella sekä käyttöiällä. Syksyllä 2020 on tehty paineilmajärjestelmän kulutusanalyysi, mistä on hyötyä, kun mitoitetaan kompressoria. Nykyisellä laitteistolla ei ole energian talteenottoa, joten oli myös mahdollisuutta selvittää sen kannattavuutta, ja miten ottaa hukkalämpöä talteen sivutuotteena sekä taloudellisella ja ympäristöllisellä näkemyksellä. Paineilmaverkostosta puuttui myös ennakkohuolto-ohjelma, mikä on myös tarkoitus laatia.

1.2 Tavoite

Opinnäytetyön päätavoite on taloudellisella ja ympäristön näkemyksellä mitoitaa uusi paineilmakompressori, niin että sen kapasiteetti vastaa tehtaan paineilmankulutusta ja selvittää mikä kompressoriteknikka sopii parhaiten tehtaan tarpeisiin. Työssä verrataan pääasiallisesti ruuvikompressoria ja turbokompressoria. Opinnäytetyön osatavoite on kartoittaa mahdollisuudet energiatehokkuuden kehittämiseksi, ja energian talteenottoon sekä laatia paineilmaverkostolle ennakkohuolto-ohjelma. Tavoitteena on alentaa energiakustannuksia ja säästää ympäristöä tehtaan paineilman tuotannossa energiatehokkaammalla järjestelmällä.

1.3 Rajaus

Painopiste on paineilman tuotantolaitteiden tekniikassa, mitoituksessa ja siihen kuuluvat osat sekä energiatehokkuuden kehittämisen mahdollisuuksien selvittämisessä. Paineilmaverkosto ja sen vuotokohtien kartoitus on jätetty pois tehtaan alueen suuruuden takia. Investointiprosessi ja energiaoptimoinnin toteuttaminen tapahtuisivat työn ulkopuolella. Tämä työ rajattiin selvitystyöhön.

1.4 Yritysesittely

Tässä luvussa esitellään Metsä Group konserni, Metsä Board ja Metsä Board Kaskisten tehdas. Käydään läpi Metsä Groupin liiketoiminta-alat, liikevaihto, henkilöstömäärä, ja Metsä Board yrityksenä sekä lyhyesti Kaskisten tehdas.

1.4.1 Metsä Group

Metsä Group on suomalainen metsäteollisuuskonserni, joka on vastuullisen bionalouden edelläkävijä. Konsernin tuotteet käyttävät pääraaka-aineena uusiutuvaa puuta pohjoisen kestävästi hoidetusta metsistä. Metsäliitto Osuuskunta on Metsä Groupin emoyhtiö, ja osuuskunnan omistaa noin 100 000 suomalaista metsänomistajaa. (Metsä Group, n.d.)

Metsä Groupiin kuuluu viisi tytäryhtiötä eri liiketoiminta-aloilta; Metsä Forest hoitaa puunhankinnat ja metsäpalvelut, Metsä Wood valmistaa puutuotteita, Metsä Fibre keskittyy sellu ja sahateollisuuteen, Metsä Tissue valmistaa pehmo ja ruoanlaittopapereita sekä Metsä Board tuottaa kartonkia. (Metsä Group, n.d.)

Vuonna 2020 Metsä Group ja sen tytäryhtiöt työllisti yhteensä 9200 henkilöä ja sen liikevaihto oli 5100 miljoonaa euroa (Metsä Group, n.d.). Alla olevasta kuvasta (Ks. Kuva 1) saadaan selville liikevaihdon ja henkilöstön jakautuma konsernissa sekä tytäryhtiöiden liiketoimialat.

METSÄ GROUP		Emoyhtiö Metsäliitto Osuuskunnan muodostaa noin 100 000 suomalaista metsänomistajaa		Liikevaihto*	Henkilöstö
				5,1 mrd. euroa	9 200
Puunhankinta ja metsäpalvelut	METSÄ WOOD Puutuotteet	METSÄ FIBRE Sellu ja sahatavara	METSÄ BOARD Kartonki	METSÄ TISSUE Pehmo- ja tiivispaperit	
OMISTUS Metsäliitto Osuuskunta 100 %	OMISTUS Metsäliitto Osuuskunta 100 %	OMISTUS Metsäliitto Osuuskunta 50,1 % Metsä Board 24,9 % Itochu Corporation 25,0 %	OMISTUS Metsäliitto Osuuskunta 48 % (67 % äänistä) Yhtiö on listattu Nasdaq Helsinkiin	OMISTUS Metsäliitto Osuuskunta 100 %	
LIIVEVAIHTO 1,8 mrd. euroa	LIIVEVAIHTO 0,4 mrd. euroa	LIIVEVAIHTO 1,8 mrd. euroa	LIIVEVAIHTO 1,9 mrd. euroa	LIIVEVAIHTO 1,0 mrd. euroa	
HENKILÖSTÖMÄÄRÄ 840	HENKILÖSTÖMÄÄRÄ 1 600	HENKILÖSTÖMÄÄRÄ 1 300	HENKILÖSTÖMÄÄRÄ 2 400	HENKILÖSTÖMÄÄRÄ 2 500	
METSÄ SPRING innovaatioyhtiö				* Ulkoinen liikevaihto	

Kuva 1. Metsä Group konsernina. (Metsä Group Esite 2020, 2021, s. 20).

1.4.2 Metsä Board

Metsä Board on johtava eurooppalainen ekologisen ja korkealaatuisten ensikuitukartonkien valmistaja ja kestävä kehityksen edelläkävijä. Yhtiö keskittyy valkoisiin kraftlainereihin ja taivekartonkiin. Kartongit voidaan käyttää tarjoilu-, myymälä- ja kuluttajapakkauksien valmistukseen. (Metsä Board, 2021, s. 2)

Yhtiö työskentelee yhdessä asiakkaitensa kanssa globaalissa mittakaavassa kehittääkseen innovatiivisia pakkausratkaisuja parempiin kuluttajakokemuksiin, joilla on vähemmän ympäristövaikutuksia. (Metsä Board, 2021, s. 9)

Metsä Boardin käyttämät puhtaat tuoreet kuidut ovat uusiutuva luonnonvara, joka voidaan jäljittää kestävästi hoidetuista pohjoisen metsistä. (Metsä Board, n.d.) Metsä Board kuuluu Metsä Group konserniin ja tämän takia Metsä Board hyötyy pohjoisen puun hyvästä saatavuudesta. Konserni hoitaa itse koko arvoketjun metsästä, valmiisiin tuotteisiin ja asiakkaille toimittaminen. Yhtiön arvoketju seuraa kestävä kehityksen periaatteita ja tukee kiertotaloutta. (Metsä Board, 2021, s. 2)

1.4.3 Metsä Board Kaskinen

Metsä Board Kaskisten tehdas aloitti toimintansa vuonna 2005 ja tuottaa valkaistua kemitermomekaanista massaa (BCTMP). Tehdas sijaitsee Kaskisissa Suomen länsirannikolla. (Metsä Board, n.d.)

Tuotantolaitos on yksi maailman moderneimmista ja suurimmista BCTMP-laitoksista (Metsä Board Oyj, 2018). Tehtaan tuotantokapasiteetti on 380 000 tonnia kemihierettä vuodessa ja se työllisti 82 henkilöä vuonna 2020 (Metsä Board, 2021, s. 40–41). Metsä Board Kaskisten tehdasalueeseen kuuluu hiertämö, paalaamo, kuorimo, biovoimalaitos, kemikaalin talteenottolaitos, vesilaitos ja jätevesilaitos. BCTMP-tehtaan massa valmistetaan pohjoisen puun raaka-aineesta, eli hyödynnetään kuitua koivusta, kuusesta ja haavasta. Puun kuoret hyödynnetään sivutuotteena bioenergiana kuorikattilassa. Kuvassa 2 esitellään Metsä Board Kaskisten tehdas.



Kuva 2. Metsä Board Kaskisten tehdas. (Metsä Group Databank, 2016).

1.5 Jäsentely

Opinnäytetyön luvut käydään läpi ja esitellään lyhyesti jäsentelyssä. Johdannossa esitellään tausta opinnäytetyön tekemiselle, opinnäytetyön tarkoitus, tavoite ja lopuksi lyhyt esittely yrityksestä ja sen emoyhtiöstä. Johdannossa kuvataan myös työn rajoitukset.

Teoriassa käydään läpi paineilman perusteet, kompressoritekniikat, paineilmajärjestelmän laitteet ja mitä pitää ottaa huomioon suunniteltaessa uutta hanketta paineilmajärjestelmään. Luvussa käsitellään myös energiatehokkuutta, lämmön talteenottoa ja paineilmajärjestelmän ennakkohuoltoa ja kunnossapitoa.

Kolmannessa luvussa käydään läpi menetelmä ja lähestymistapa selvitystyön toteuttamisessa. Tämän lisäksi esitellään työn tehtävä lyhyesti.

Neljännessä luvussa esitellään tutkimuksen tulokset, Metsä Board Kaskisten paineilmalaitteiston nykytilanne, vertailu eri kompressoritekniikoiden välillä, kompressorin mitoitus, vaihtoehtojen analysointi ja säästöpotentiaalit. Lopuksi käydään läpi mahdollisuudet energiatehokkuuden kehittämiseksi, sekä paineilmajärjestelmän ennakkohuolto-ohjelmaa.

Keskustelussa tiivistetään työtä keskustelun ja omien ajatuksien kautta. Pohditaan muun muassa työn kulku, tulokset ja tuloksien luotettavuutta, vaikeudet ja ehdotuksia jatkotutkimukselle.

2 Teoria

Tässä luvussa esitellään paineilman perusteet, kompressoritekniikat ja puristusmenetelmät, sekä syvennytään turbo- ja ruuvikompressoritekniikkaan. Käydään myös läpi paineilmajärjestelmän laitteet, paineilman laatuvaatimukset ja jälkikäsitteily. Tämän jälkeen käsitellään paineilmatuotannon energiatehokkuutta, sekä energiatehokkaan paineilmajärjestelmän suunnittelu. Lopuksi esitellään paineilmajärjestelmän kunnossapitoa ja ennakkohoitoa, lämmön talteenottoa ja paineilmajärjestelmän kulutusanalyysi raporttia.

2.1 Paineilman perusteet

Ilma on hajuton, väritön ja mauton kaasuseos. Se on monien eri kaasujen seos, mutta se koostuu pääasiassa hapesta 21 % ja typestä 78 %. Ilma ei ole puhdas kemiallinen aine, vain mekaanisesti sekoitettu aine siksi se voidaan jakaa sen ainesosiin esimerkiksi jäädyttämällä. Ilmakehän ilma on aina enemmän tai vähemmän saastunut kiinteillä hiukkasilla, kuten pölyä, nokea, hiekkaa ja suolakiteitä. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 19)

Ilma koostuu erilaisista ilmamolekyyleistä, joista kullakin on tietty määrä liike-energiaa. Ilman lämpötila on myös suoraan suhteellinen näiden molekyylin keskimääräiseen liike-energiaan ja tämä tarkoittaa, että jos liike-energia on suuri, niin ilman lämpötila on myös korkea. Liike-energian ollessa suuri, tarkoittaa että ilman molekyylit liikkuvat nopeammin. Lämpötila on alhainen, kun liike-energia on pieni. Kun ilma puristetaan, molekyylit liikkuvat nopeammin ja lämpötila nousee. Ilman puristus tarkoittaa, että se pakotetaan pienempään tilaan, jolloin molekyylit lähentyvät toisiaan. Ilman puristuksessa vapautuva energia on yhtä suuri kuin se energia, joka menee ilman pakottamiseen pienempään tilaan, täten energia varastoidaan tulevaa käyttöä varten. (Atlas Copco, n.d.)

Kun tietty määrä ilmaa puristetaan pienempään tilavuuteen, saadaan ilmanpainetta nostettua. Sen sijaan, kun sallitaan ilman paisuminen, paineilma tekee työtä ja paine laskee. Kompressorin puristetun ilman painesuhteella tarkoitetaan absoluuttisten sisään- ja ulosmenevän paineen suhdetta. (Fonselius, Korhonen, Pekkola, Saarineva, & Opetushallitus, 1993, s. 21–22).

2.1.1 Paineilman käyttökohteet

Paineilma on yksinkertainen ja helppokäyttöinen väliaine. (Ellman, Hautanen, Järvinen, & Simpura, 2002, s. 8) Paineilmaa käytetään laajasti teollisuudessa; paineilmaa voidaan käyttää esimerkiksi toimilaitteiden liikkeiden aikaansaamiseen, työkaluissa kuten Mutterivääntimet, leikkaamiseen ja hiomiseen. Teollisuusautomaatiossa paineilmaa käytetään tyypillisesti suoraan työn suorittamiseen, lineaari- ja pyörivän liikkeen toteuttamiseen ja nopeisiin liikkeisiin. Pyörivät liikkeet tehdään paineilmamoottoreilla ja lineaariset liikkeet tehdään sylinteripneumatiikalla. Turvallisuussyistä käytetään paineilmaa 4–10 baarin paineella, mikä voidaan myös pitää paineilman yhtenä rajoituksena. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 47) Pneumatiikan käytön edut ovat sen edullisuus, paloturvallisuus, puhtaus, yksinkertainen ylläpito ja nopeat liikkeet toimilaitteissa. (Ellman ym., 2002, s. 8–9)

2.2 Kompessorit

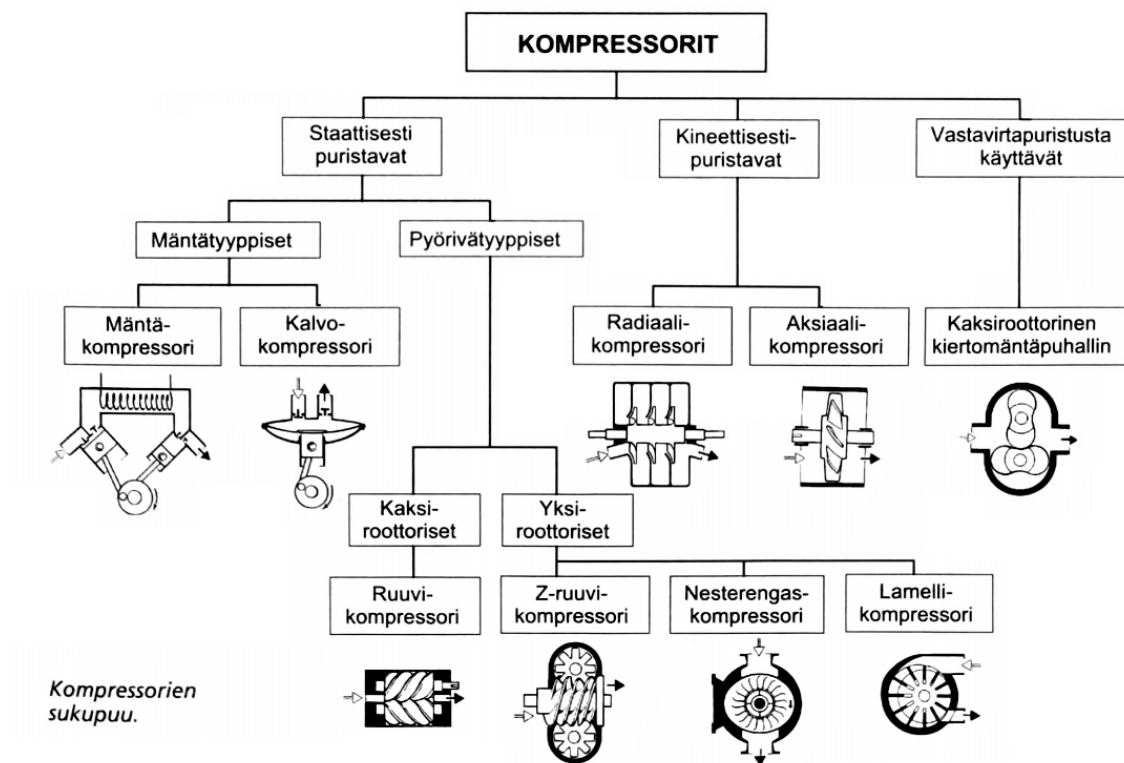
Kompessorit ovat laitteita, jotka on suunniteltu nostamaan kaasun painetta, näin ollen myös lisää kaasun tiheyttä (Alvarez, 2006, s. 673). Kompessoriksi kutsutaan laitteita, joilla on mahdollista nostaa kaasun painetta kaksinkertaiseksi verrattuna imupaineeseen. Teollisuudessa käytetään normaalisti paineilmaa 6–10 baarin paineella (Fonselius ym., 1993, s. 21–22). Ilmamäärät, jotka tuotetaan kompressoreilla vaihtelevat suuresti, tuotot voivat olla muutamia litroja minuutissa ja tuhatmäärin kuutiometrejä minuutissa. Paineilman tuotto ilmoitetaan tilavuusvirtana ja yksikköinä voidaan käyttää litraa minuutissa, kuutiometriä sekunnissa tai kuutiometriä tunnissa. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 26)

Yksivaiheisilla kompressoreilla tuotetaan pienempiä paineita sekä kaksi- ja kolmevaiheisilla kompressoreilla tuotetaan korkeimpia paineita, missä lämpörasitus on korkeampi. Yksivaiheisessa kompressorissa puristus suoritetaan kerralla ja kaksi- ja kolmivaiheinen puristus suoritetaan vaiheittain. Välijäähdyttimiä sijoitetaan vaiheiden väliin. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 26)

Kompressorin imuilman lämpötilalla on merkitystä. Mitä viileämpää imuilma on, sitä tiiviimpää se on. Tiiviimpää ilmaa tarvitsee puristaa vähemmän, jonka seurauksena on tuoton kasvu ja kompressorimoottorin suurempi energiankulutus. (Motiva Oy, n.d., s. 9)

2.2.1 Kompressorien periaatteet

Ilmaan tehdään työtä ilman puristusvaiheessa, ja puristus voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin; staattinen-, kineettinen- ja vastavirtausperiaate (Fonselius ym., 1993, s. 21). Kompressoritekniikoiden sukupuussa esitellään kineettisesti puristavat, staattisesti puristavat ja vastavirtapuristusta käyttävät kompressoreista (Ks. Kuva 3).



Kuva 3. Kompressorien sukupuu. (Keinänen & Kärkkäinen, 1997, s. 25).

Kineettisesti puristavissa kompressoreissa, on nopeasti pyörivä juoksupyörä mihin kaasu virtaa. Juoksupyörään osuessa kaasu kiihtyy suureen nopeuteen, ja tämän jälkeen kaasu johdetaan johtolaitteeseen, eli diffuusoriin. Kun virtausta jarrutetaan painetilassa, kineettinen energia muuttuu staattiseksi paineeksi. Tämäntyyppiset kompressorit soveltuvat suurien tilavuusvirtojen tuottoon. (Ellman ym., 2002, s. 43) Staattisesti puristavissa kompressoreissa kammioon virtaa kaasua, ja kammiossa kasvatetaan staattista painetta tilavuutta pienentämällä. Kaasu johdetaan paineliitintään puristuksen jälkeen. Vastavirtauspuristuksessa siirretään imupuolelta kaasua painepuolelle. Kaasun virtausta vastustaessa kaasun paine nousee. (Fonselius ym., 1993, s. 21)

Taulukossa 1 esitellään eri kompressoritekniikoiden tyypilliset toiminta-alueet. Mäntä- ja lamellikompressorit soveltuva pienemmille tilavuusvirroille, ja erityisesti mäntäkompressorit pystyvät tuottamaan korkeata käyttöpainetta. Ruuvi- ja turbokompressorit soveltuvat suurimmille tilavuusvirroille ja paineominaisuudet ovat keskialueella. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 26)

Taulukko 1. Kompressoritekniikoiden tyypilliset toiminta-alueet

Kompressorityyppi	Tuotettu paine (bar)	Tilavuusvirta (m ³ /min)
Mäntäkompressorit	1 – 1000	0,005 – 3
Ruuvikompressorit	0,8 – 30	0,25 – 10
Lamellikompressorit	0,2 – 8	0,08 – 2
Radiaalikompressorit	0,07 – 300	0,1 – 50
Aksiaalikompressorit	0,8 – 5	10 – 100

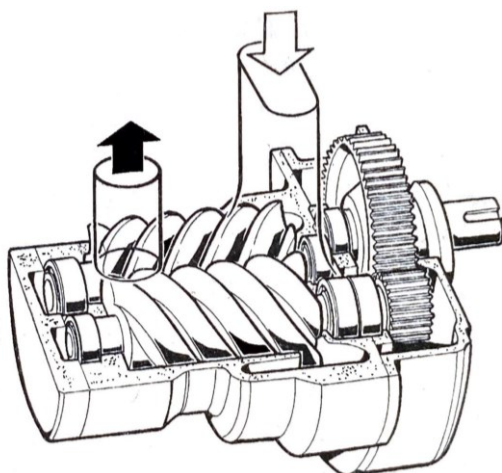
(mukailten Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 26)

Prosessipaineilman tuotannossa käytetään pääosin ruuvikompressoritekniikkaa, ja viime vuosikymmeninä ruuvikompressorit ovat lähes täysin syrjäyttäneet mäntäkoneet. Turbotekniikka tai toisin sanottuna kineettisesti puristava kompressori on yleistynyt viime vuosina prosessiteollisuuden paineilman tuotossa. (Backman & Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2017)

2.2.2 Ruuvikompressori

Kompressoreita, jotka luokitellaan staattisesti puristaviksi kompressoreiksi, joita on olemassa useita erilaisia. Yksi tunnetuimmista ja suosituimmista tyypeistä on ruuvikompressori. Ruuvielementin kaksi pääosaa ovat ruuvi- ja luistiroottori, jotka pyörivät toisiaan vasten, ja samalla roottorien ja pesän välinen tilavuus pienenee. (Atlas Copco, n.d.)

Kaasu kuljetetaan imuaukosta kierteiden välisessä tilassa (Ks. Kuva 4). Tämän tilan tilavuus pienenee painepuolella olevan päätyypinnan suuntaan, minkä vuoksi kaasu puristuu. Puristusprosessi päättyy, kun kierteiden välinen tila tulee yhteyteen painepuolen päätyaukkoon. (Alvarez, 2006, s. 693) Jokaisella ruuvielementillä on kiinteä sisäänrakennettu painesuhde, joka riippuu ruuvin pituudesta, noususta ja painepuolen päätyaukon muodosta. Maksimaalisen tehokkuuden saavuttamiseksi sisäänrakennettu painesuhde on sovitettava tarvittavaan käyttöpaineeseen. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 34)

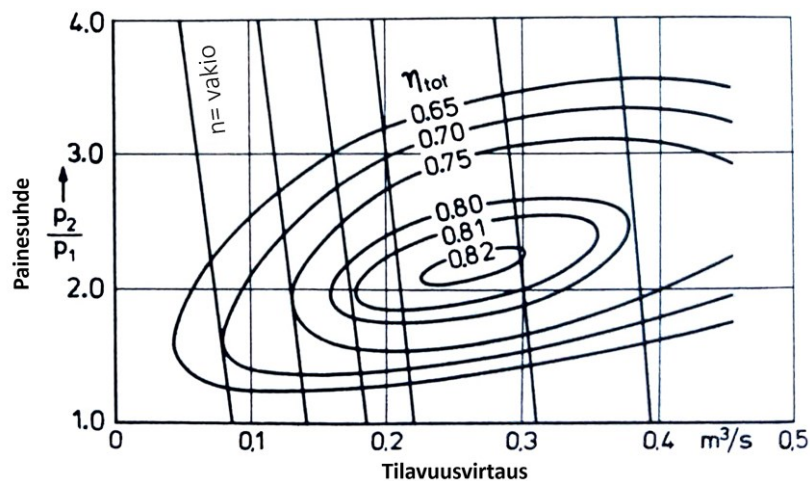


Kuva 4. Ilman virtaussuunta ruuvikompressoreissa. (Keinänen & Kärkkäinen, 1997, s. 27).

Ruuvikompressoreissa ei yleensä ole imu- tai paineventtiilejä, eikä siinä ole mekaanisia voimia, jotka aiheuttaisivat epätasapainoa. Siksi se voi toimia suurilla kierrosnopeuksilla ja suurilla virtausnopeuksilla pienistä ulkomitoista huolimatta. Sopivalla laakeroinnilla päästään eroon paine-eroista johtuvista aksiaalisista voimista. (Atlas Copco, n.d.) Tasaisen puristuksen ja ilmanvirtauksen vuoksi, ruuvikompressorien puristama ilma on sykkeetöntä (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 27).

Ruuvikompressoreissa missä roottorit koskettavat toisiaan, ovat öljyvoideltuja ja silloin päästään painesuhteeseen 13–15. Ruuvikompressorit missä roottorit eivät kosketa toisiaan ovat öljyttömiä koneita ja niillä päästään painesuhteeseen 3–5. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 27).

Ruuvikompressorien tyypilliset ominaisuudet ovat, että painesuhde on riippumaton pyörimisnopeudesta ja voidaan saavuttaa korkea painesuhde alhaisilla pyörimisnopeuksilla. Päinvastoin kuin turbokompressorit, ruuvikompressorilta puuttuu epävakaat ajoalue. Ruuvikompressorin likimääräinen huippuhuötysuhde on noin 67 %. Kuvassa 5 nähdään ruuvikompressorien ominaisuuksia kuten; tilavuusvirtaus on suunnilleen verrannollinen pyörimisnopeuteen ja jyrkät pyörimisnopeuslinjat, jolloin virtausmäärä on pienesti riippuvainen painesuhteesta. (Alvarez, 2006, s. 722–723)



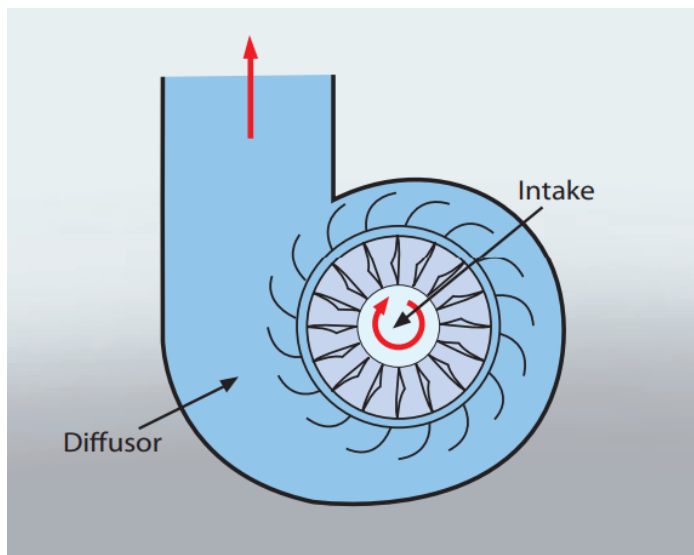
Kuva 5. Esimerkkejä ruuvikompressorien ominaisuuksista. (mukaillen Alvarez, 2006, s. 722).

Nykyaikaisissa, suurnopeuksisissa ja öljyttömissä ruuvikompressoreissa on epäsymmetriset ruuviprofiilit. Tämä parantaa huomattavasti energiatehokkuutta, koska sisäinen vuoto on vähäisempää. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 34)

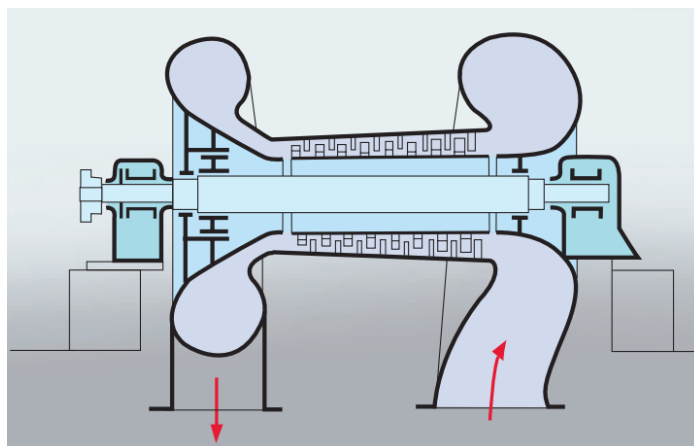
2.2.3 Turbokompressorit

Turbokompressorit toimivat toisella periaatteella kuin staattisesti puristavat kompressorit, eli ne puristavat kineettisesti. Kineettisesti puristavat kompressorit ovat yleensä aksiaalisia (Ks. Kuva 7) tai radiaalisia. Radiaalikompressoreita voi myös kutsua keskipakokompressoreiksi.

Aksiaalisissa turbokompressoreissa ilmanvirtauksen suunta on aksiaalinen ja radiaaliturbokompressoreissa ilmanvirtauksen suunta on radiaalinen. Kineettisessä puristuksessa ilmaa imetään nopeasti pyörivän juoksupyörän siipien väliin ja kiihdytetään suureen nopeuteen. Kaasu vapautuu sen jälkeen diffuusoriin, missä liike-energia muunnetaan staattiseksi paineeksi (Ks. Kuva 6). (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 22–23)



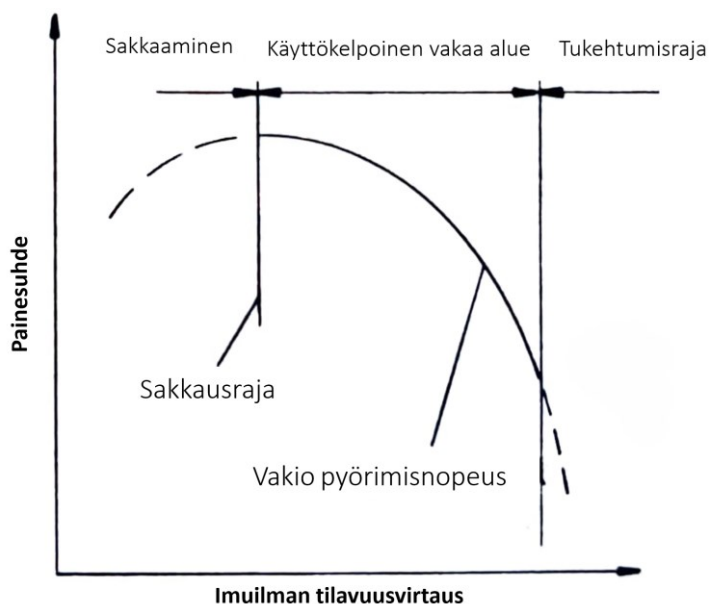
Kuva 6. Radiaaliturbokompressorin yleisrakenne. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 22).



Kuva 7. Aksiaalisen turbokompressorin yleisrakenne. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 42).

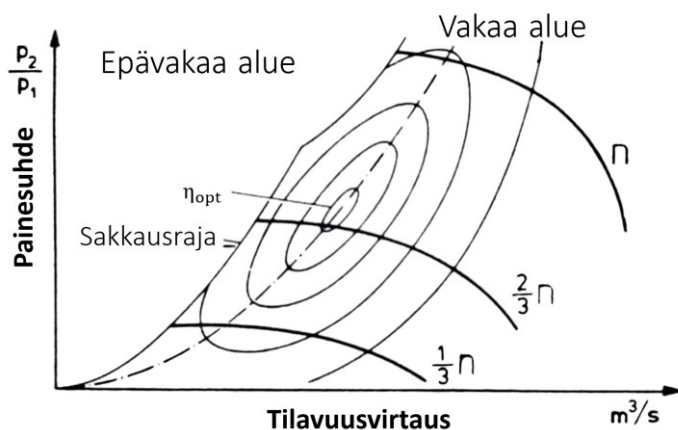
Jokainen vaihe nostattaa kompressoriyksikön kokonaispainetta. Teollisuuden radiaalikompressorien yhden vaiheen painesuhde on useimmiten korkeintaan kolme. Korkeammat painesuhdet vähentävät puristusvaiheen tehokkuutta. Sovelluksissa missä on useita vaiheita, mahdollistavat välijäähdytyksen tehontarpeen pienentämiseksi. Prosessiteollisuudessa käytetään tavallisesti monivaiheisia turbokompressoreita yhdellä matalanopeuksisella akselilla. Painesuhde on matala jokaisessa vaiheessa, mutta useilla vaiheilla sarjassa voidaan saavuttaa haluttu painetaso. Tavallisissa paineilma-asennuksissa käytetään yleisesti kaksi tai kolme välijäähdytettyä vaihetta. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 41)

Jokaisella juoksupyörällä on oma pyörimisnopeuden ylä- ja alaraja (Ks. kuva 8). Yläraja (tukehtumisraja) tarkoittaa sitä, että kaasun virtausnopeus saavuttaa äänen nopeuden. Kun taas alaraja (sakkausraja) tarkoittaa, että vastapaine on suurempi kuin kompressorin rakennettu paine, johon liittyy takaisinvirtaus kompressoriin. Tämä puolestaan johtaa pulssien meluun ja mekaanisten vaurioiden riskiin. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 23)



Kuva 8. Käytettävä osuus turbokompressorin ominaiskäyrästä. (mukaillen Alvarez, 2006, s. 713).

Turbokompressorilla on vaihteleva tilavuusvirran kapasiteetti ja vaihteleva paineominaisuus (Ks. kuva 9), staattisissa kompressoreissa on sen sijaan vakio tilavuusvirran kapasiteetti ja vaihteleva paine. Turbokompressorit sopivat hyvin suurille ilmavirroille. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 23) Turbokompressorin suorituskykyyn vaikuttavat ulkoiset olosuhteet, kuten imuilman lämpötilan vaihtelut johtavat tuotantokapasiteetin muutokseen. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 41) Kuvassa 9 käy ilmi, että kierrosnopeuden käyrät jyrkentyvät tilavuusvirtausmäärän noustessa ja painesuhde nousee pyörimisnopeuden mukana. Käyrän vasemmalla puolella on epävakaata toiminta-alue. (Alvarez, 2006, s. 724)



Kuva 9. Radiaaliturbokompressorin tyypillisiä ominaiskäyriä. (mukaillen Alvarez, 2006, s. 724).

Turbokompressorin laakeroinnissa voidaan käyttää aktiivimagneettilaakereita, jolloin saadaan täysin öljytön laite (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 42) Aktiivimagneettilaakeroinnin takia kompressorin pyörivät osat leijuvat magneetikentässä, mikä johtaa kitkattomaan pyörimisliikkeeseen, eli ei tapahdu mitään mekaanista kosketusta. Tämän takia laitteisto ei kulu, eikä rikkoudu ja liikkuvat osat ei tarvitse voitelua. Näin ollen laitteisto ei tarvitse perinteistä kunnostusta tai ylläpitoa. Magneettilaakerointi säästää samalla energiaa, koska energia ei kulu kitkana laakeroinnissa ja energiankulutus pysyy samalla tasolla ikääntymisen myötä. (Tamturbo Oyj, n.d.)

Ajanmukaisen radiaaliturbokompressorin kokoonpanossa käytetään suurnopeus-sähkömoottoreita, jotka ajavat juoksupyörää suoravetoisesti. Tämä tekniikka luo kompaktin kompressorirakenteen, joka toimii ilman vaihteistoa ja siihen liittyvää öljyvoitelujärjestelmää, mikä tekee siitä täysin öljyttömän kompressorin. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 42) Turbokompressorin etu on, että sen huoltokustannukset ovat alhaisia. Radiaaliturbokompressorin likimääräinen huippuhyötysuhde on noin 80 % ja aksiaalisen turbokompressorin noin 89 %. (Alvarez, 2006, s. 723)

Kun mitoitetaan turbokompressorია, on tärkeätä ottaa huomioon tarvittava säätöalue, paineilman tuottopaine, jäähdytysveden lämpötila ja kompressorin ympäristö. Kompressorin ympäristöllä tarkoitetaan esimerkiksi imuilman lämpötila ja puhtaus. (Palenius, 2020) Turbokompressorია säädetään tavallisesti seuraavilla tavoilla; kierrosnopeuden säätäminen, imuilman kuristus, juoksupyörän säätäminen tai siipien kulman muuntaminen. Pyörimisnopeuden säätäminen on taloudellisin tapa säätää kompressorია, koska sillä voidaan kattaa koko vakaa kuormitusalue. Sitä voidaan soveltaa, että vaihtelevalla kaasuvirralla

säilytetään vakio paine, tai muutetaan ulosmenevää painetta tietyllä ilman vakiovirtausmäärällä. (Alvarez, 2006, s. 715)

2.2.4 Ohjaus- ja säätöjärjestelmä

Säätöjärjestelmillä ohjataan kompressorien tuotto paineilman tarpeen mukaan, ja samalla minimoidaan kompressorien tehontarve (Ellman ym., 2002, s. 48). Käytettävissä on useita virtauksen säätelymenetelmiä, riippuen kompressorin tyypistä, hyväksyttävistä energiahäviöistä, ilmankulutuksen vaihteluista ja hyväksyttävistä paineenvaihteluista. Energiankulutus on noin 80 prosenttia paineilman kokonaislinkaarikustannuksista, mikä tarkoittaa, että säätöjärjestelmän valinta on tehtävä huolellisesti. Tämä riippuu pääasiassa kompressorityyppien tai valmistajien suorituskyvystä. Ihanteellisessa tapauksessa kompressorin koko kapasiteetti voitaisiin täsmällisesti sovittaa ilmankulutukseen. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 52)

Tavallisia säätömenetelmiä ovat kuormitus/kevennyssäätö, imuilman kuristus, ulospuhallus ja sähkömoottorin pyörimisnopeuden säätäminen taajuusmuuntajalla (VSD, eng. variable speed drive) (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 53–58). Kevennettyä kompressori voi kuluttaa jopa 25 % kuormitetun kompressorin energiantarpeesta (Atlas Copco Compressors UK, n.d.). Taajuusmuuntajalla säädetty kompressori, mukautuu vaihtelevan ilmantarpeen mukaan säätämällä sähkömoottorin kierroslukua (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 58). Kompressoriasennuksen on oltava joustava, koska paineilman kulutus on harvoin tasainen. Joustavuutta voi lisätä käyttämällä useamman erillisen kompressorin yhdistelmää, missä kompressoreilla on eri kapasiteetti ja nopeussäätöisillä moottoreilla. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 108)

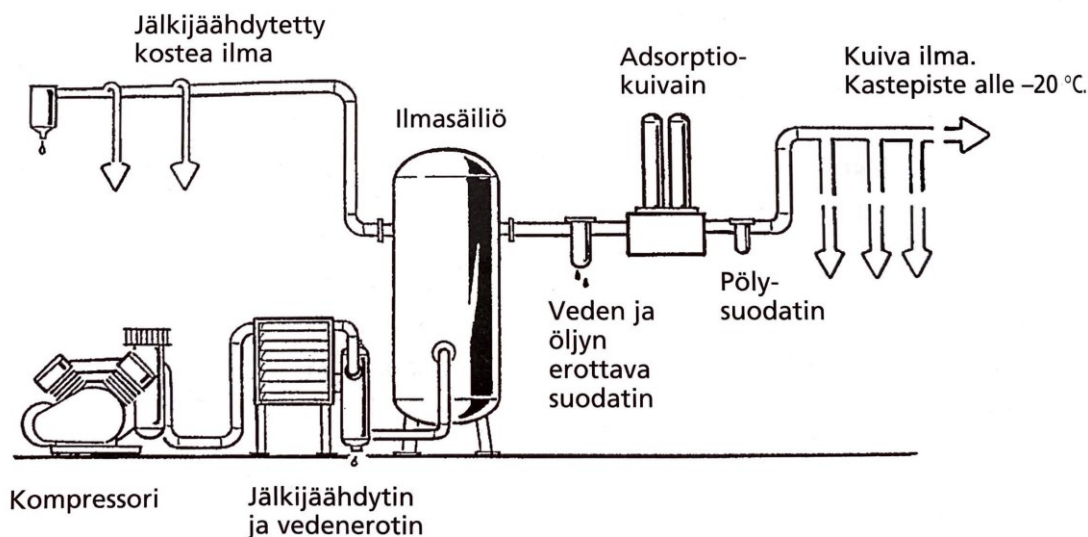
Kompressorien ohjausjärjestelmänä voidaan käyttää keskusohjausta. Keskusohjauksella pystytään ohjaamaan useita kompressoreita samanaikaisesti. Keskusohjaus pyrkii pitämään ennalta määrätyn paineen tiukoissa rajoissa. Keskusohjaus pystyy ohjaamaan kompressorien käyntiä ja kuormitusta, ja valita energiatehokkaamman kompressorin käyttötilanteen mukaan. Käyttöastetta voidaan parantaa ja kevennyškäyntiä minimoida. Keskusohjaus pystyy myös automaattisesti alentamaan paineilmajärjestelmän painetasoa, kun ilmantarve on alhaisempi. Kattavalla ohjausjärjestelmällä on mahdollista yhdistää vanhemmat koneet järjestelmään ja siten suhteellisen helposti modernisoida koko paineilmajärjestelmä. Näin käytettävyys lisääntyy ja käyttökustannukset ovat taloudellisemmat. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 61)

2.2.5 Etävalvonta

Paineilmajärjestelmän kompressoriasennuksia voidaan ohjata, sekä seurata etänä. Asennuksiin voidaan helposti kytkeä kompressorin käyttökohtaiset ilmaisimet, hälytykset ja toimintatilanne. Yleensä voidaan myös toteuttaa kompressorin etäkäynnistys ja sammuttaminen. Valvontajärjestelmä voi koostua jatkuvasta yleiskuvasta järjestelmästä, laitteiden yksityiskohtien hallinta ja parametrien säätö, kuten painetasot ja lämpötilat. Seurantajärjestelmän muistia käyttämällä voidaan saada aikaan loki viimeisen vuorokauden tapahtumista. Lokia voidaan analysoida, ja tulostaa trendikäyriä. Trendikäyristä tunnistetaan oletusarvoista poikkeavat arvot. Järjestelmästä nähdään usein päivitettyjä tilanneraportteja, koneiden kokonaiskatsaus ja yksittäinen tilanne. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 61–62)

2.3 Paineilmajärjestelmä

Paineilmajärjestelmä koostuu useista komponenteista ja yleensä niihin kuuluu kompressor, laitteet paineilman jälkikäsittelyyn, paineilmaverkosto, paineilmasäiliö, venttiilit ja erilaiset toimilaitteet (Ks. Kuva 10). (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 23) Paineilman jälkikäsittelylle kuuluvat jälkijäähdyttimet, kuivaimet ja suodattimet. (Ellman ym., 2002, s. 42–43)



Kuva 10. Yleiskuva paineilmajärjestelmästä. (Keinänen & Kärkkäinen, 1997, s. 32).

2.3.1 Paineilman laatu

Jälkikäsittelyn tarkoitus on muuttaa paineilman laatu, niin että sitä voidaan käyttää tarkoitettuihin käyttökohteisiin. Jälkikäsittely on tärkeää, koska paineilma voi sisältää epäpuhtauksia ja haitallisia aineita, jotka voivat vaikuttaa ratkaisevasti laatuun, kustannuksiin ja tuotantotuloksiin. Näihin epäpuhtauksiin kuuluvat; vesi, pölyhiukkaset ja öljy. Esimerkiksi vesi höyrynä, joka kulkeutuu paineilman mukana, voi saada aikaan suuria kustannuksia. Paineilmajärjestelmän putkistot voivat syöpyä ja alkavat ruostua, tehon laskua toimilaitteissa, toimilaitteiden käyttöikä lyhentyä ja kunnossapitokulut nousevat. Seurauksena ovat myös vuotojen esiintyminen. Nämä kaikki tekijät vaikuttavat ylimääräisiin kustannuksiin. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 33)

Teollisuudessa käytetään kansainvälistä paineilman laatustandardia; ISO 8573-1:2010 joka määrittelee paineilman laatuluokkaa ja miten paljon on hyväksyttävä määrä epäpuhtauksia (Ks. taulukko 2). Eri laatuluokkia määritellään partikkeleiden, öljyn ja veden suhteen. Näiden perusteella voidaan selvittää, minkälaisen laitteiston tarvitset paineilmajärjestelmässä. (Atlas Copco, n.d.)

Taulukko 2. Paineilman laatustandardi - ISO 8573-1:2010

Paineilman laatuluokka	Kiinteät partikkelit			Massapitoisuus mg/m ³	Vesi		Öljyneste, -sumu ja -höyry mg/m ³
	Partikkeleiden maks. määrä/m ³				Paineenalainen kastepiste	Neste g/m ³	
	0,1 - 0,5 µm	0,5 - 1 µm	1-5 µm				
0	Toimittajan tai laitteiden käyttäjän määrittelemä ja tiukempi kuin luokka 1						
1	≤ 20 000	≤ 400	≤ 10		≤ -70 °C	-	0,01
2	≤ 400 000	≤ 6000	≤ 100		≤ -40 °C	-	0,1
3	-	≤ 90 000	≤ 1000		≤ -20 °C	-	1
4	-	-	≤ 10 000		≤ +3 °C	-	5
5	-	-	≤ 100 000		≤ 7 °C	-	-
6	-	-	-	≤ 5	≤ +10 °C	-	-
7	-	-	-	5 ... 10	-	≤ 0,5	-
8	-	-	-	-	-	0,5 ... 5	-
9	-	-	-	-	-	5 ... 10	-
x	-	-	-	> 10	-	> 10	> 10

(mukaillen Atlas Copco, n.d.)

2.3.2 Paineilmasäiliö

Paineilmasäiliön tehtävä paineilmajärjestelmässä on varastoida paineilmaa. Etenkin pienissä järjestelmissä paineilmasäiliö toimii varastona. Paineilmavarastoinnin ohella säiliöt tasaavat kulutushuippuja, vaimentavat painevaihteluja, jäädyttävät ilmaa sekä toimivat vedenerottimina. (Ellman ym., 2002, s. 61) Paineilmasäiliöt auttavat myös kompressorien automatiikassa, kun säiliö toimii painelähteenä, kompressorien käynninsäädössä kuten pysäytys- ja käynnistyssäätö. Käyttöturvallisuutta voidaan myös lisätä, koska paineilmasäiliö sopii varoventtiilin sijoituskohteeksi. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 35)

Kun valitaan kompressoria, siihen kuuluu myös paineilmasäiliön osuus paineilmajärjestelmässä. Paineilmasäiliö ei ole aina tarpeellinen, eli järjestelmää voidaan myös suunnitella ilman säiliötä. Säiliön käyttö on kuitenkin suositeltavaa. (Ellman ym., 2002, s. 62)

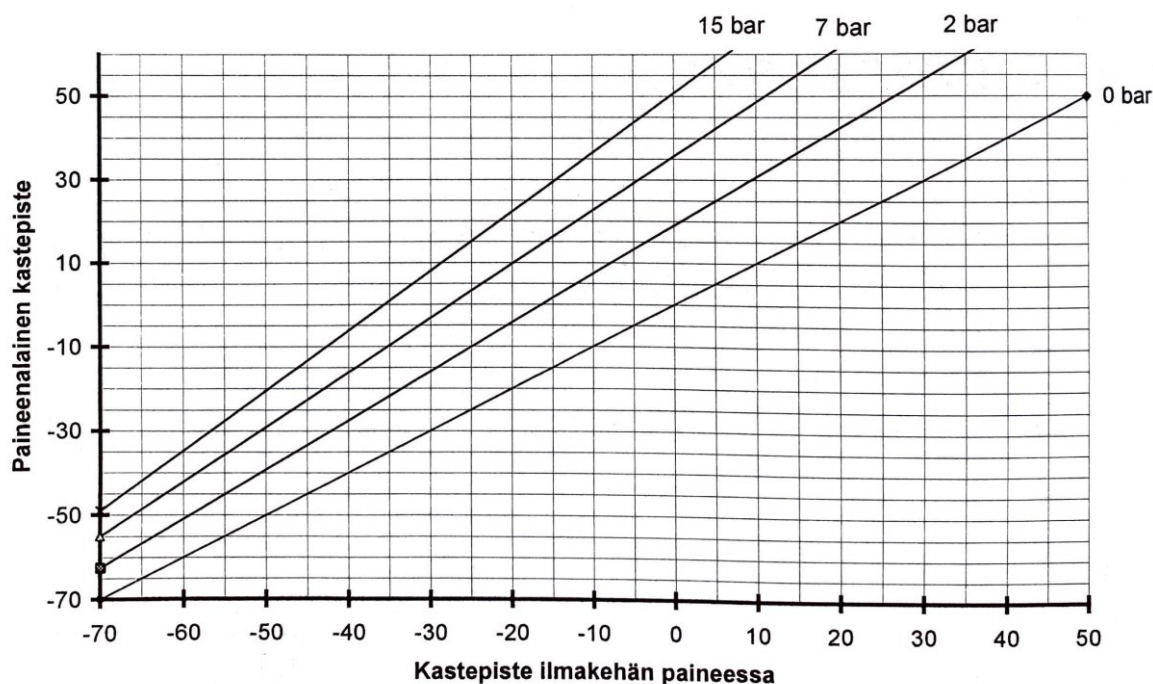
Kun mitoitetaan paineilmasäiliötä, siihen vaikuttavat monta eri tekijöitä. Ellman ym. (2002, s. 61) luettelevat näitä tekijöitä seuraavasti:

- Kompressorityyppi
- Kompressorin tuotto, useamman kompressorin järjestelmässä aina suurimman kompressorin tuotto
- Säätojärjestelmän ja automatiikan vaatimukset
- Kulutuksen suuruus

2.3.3 Kuivaus ja jäädytys

Ilmakehän ilma sisältää kosteutta vesihöyryn muodossa ja ilman jäähtyessä vesi kondensoituu. Tämä tapahtuu myös kompressorien puristuksen jälkeen. Tämä kosteus on poistettava paineilmajärjestelmästä, sen takia ympäristöystävällinen ja edullinen kuivaaminen on merkittävä osa paineilman jälkikäsitelyssä. Tietty määrä vesihöyryä seuraa paineilman mukana ja aiheuttaa ongelmia paineilmajärjestelmässä. Esimerkkejä ongelmista ovat; korkeat kunnossapitokustannukset, lyhennetyt käyttöiät, heikentyneet suorituskyvyt työkaluilla, lisääntyneet vuodot, häiriöitä ohjausjärjestelmissä ja instrumenteissa sekä lyhyempi käyttöikä putkijärjestelmissä korroosion takia. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 34–37)

Kastepiste on se lämpötila, kun ilma on kyllästynyt vesihöyryllä. Jos lämpötila laskee edelleen, vesi kondensoituu. Paineilman vesipitoisuuden kuvaamiseen käytetään termiä paineenalainen kastepiste ja termillä tarkoitetaan lämpötila, jolloin vesihöyry tiivistyy vedeksi nykyisellä paineella. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 44) Alla olevassa kaaviossa nähdään ilman kastepisteet riippuen paineesta ja lämpötilasta Celsius asteina (Ks. Kuva 11).



Kuva 11. Lämpötilan ja paineen vaikutus kastepisteeseen. (Ellman ym., 2002, s. 40).

Tarpeettomien korjausten ja mahdollisten tuotantoseisokkien välttämiseksi on toimittava ennakoivasti ja toteutettava tarvittavat toimenpiteet paineilman pitämiseksi kuivana, puhtana ja käyttökelpoisena. Vikojen ja käyttöhäiriöiden ehkäisemiseksi tämä vesi on poistettava paineilmajärjestelmästä. Vesi voidaan erottaa käyttämällä lisävarusteita, kuten jälkijäähdyttimiä, kondensaatioerottimia, jäähdytyskuivaimia ja adsorptiokuivaimia. Kuivauslaitteen voi valita paineenalaisen kastepisteen avulla. Mitä alhaisempaa kastepistettä tarvitsee, sitä suuremmat ovat ilmakehän investointi- ja käyttökustannukset. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 44–45)

2.3.4 Jälkijäähdytin

Lämpötilan laskemiseen voidaan käyttää jälkijäähdytintä, mikä myös laskee paineilman vesipitoisuutta. Nykyään jälkijäähdytin sisältyy usein vakiona kompressoriasennuksissa (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 45). Laite sijoitetaan heti kompressorin jälkeen ja on normaalisti integroitu kompressoriyksikköön. Jälkijäähdytin on lämmönvaihdin, joka jäähdyttää lämpimän paineilman heti puristuksen jälkeen ja samalla erottaa osan paineilman sisältämän veden. Jälkijäähdyttimellä saadaan tulevan ilman absoluuttisesta kosteudesta poistettua noin 80–90 prosenttia. Se on vesijäähdytteinen tai ilmajäähdytteinen. Paineilman lämpötila on tavallisesti noin 10 °C korkeampi kuin jäähdytysaineen, kuljettuaan jälkijäähdyttimen läpi. (Ellman ym., 2002, s. 53)

2.3.5 Jäähdytyskuivain

Jäähdytyskuivaus tarkoittaa, että jäähdytetään paineilma, jolloin suuri osa vedestä kondensoituu ja se voidaan erottaa paineilmasta. Jäähdytyksen ja kondensoinnin jälkeen paineilma lämmitetään uudelleen lähelle huoneenlämpöä. Näin estetään veden kondensoituminen paineilmaverkostossa. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 46)

Tämä lämmönvaihto saapuvan ja lähtevän paineilman välillä alentaa myös saapuvan paineilman lämpötilaa, mikä vähentää jäähdytyspiirin jäähdytyskapasiteetin tarvetta. Paineilman jäähdytys tapahtuu suljetun kylmäainejärjestelmän kautta. Jäähdytyskuivaimilla saavutetaan kastepisteitä +2 °C ja +10 °C välillä. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 46)

2.3.6 Adsorptiokuivain

Adsorptiokuivaus perustuu prosessiin, jossa vesihöyry sitoutuu imukykyiseen aineeseen. Adsorptioaine voi olla joko kiinteä tai nestemäinen. Adsorptiokuivainten yleinen periaate on yksinkertainen, eli kostea ilma virtaa kuivausaineen läpi ja siten kuivataan. Kosteaa paineilman vesihöyry aiheuttaa kuivausaineen asteittaisen kyllästymisen adsorboidulla vedellä. Tämän takia kuivausaineen on elvytettävä säännöllisesti kuivauskapasiteetin palauttamiseksi. Adsorptiokuivaimet koostuvat tavallisesti kahdesta kuivausainesäiliöstä, missä ensimmäinen säiliö kuivaa tulevan paineilman, kun taas toinen säiliö elvytetään. Joka säiliö vuorottelee tehtäviään, kun toinen on täysin elvytetty. Adsorptiokuivaimet soveltuvat käyttökohteisiin, missä tarvitaan erittäin kuivaa paineilmaa. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 47–48) Näillä kuivaimilla saavutetaan kastepisteitä jopa -30 °C ja -90 °C välillä (Ellman ym., 2002, s. 55).

2.3.7 Suodattaminen

Kompressorin tulevan ilman mukana tulevat eri epäpuhtaudet, jotka täytyy suodattaa käyttötarkoituksen ja laatuvaatimusten mukaan. Epäpuhtaudet voivat olla bakteereja, viruksia, hiilivetyjä ja likahiukkasia sekä öljyä jos kompressorin on öljyvoideltu. Öljy voi olla öljyhöyryinä, aerosolina ja nesteinä. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 38)

Paineilma puhdistetaan eri suodattamilla, joilla on eri tehtävänsä sekä määräytyvät eri puhtausasteen mukaan. Eri laatuvaatimusten mukaan voidaan käyttää paineilmajärjestelmässä seuraavia suodattimia; esisuodatin, jälkisuodatin, mikro-suodatin, steriilisuodatin sekä aktiivihiilisuodattimen ja mikro-suodattimen yhdistelmä. Öljyn poistoon käytetään kolme eri suodatusmenetelmää, eli adsorptiota, mekaanista suodatusta ja yhdistymissuodatusta. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 38)

2.4 Energiatehokkuus paineilmatuotannossa

Sähköenergia on vallitseva energialähde teollisen paineilman tuotannolle ja monessa paineilman tuotantolaitoksessa on merkittäviä ja usein käyttämättömiä mahdollisuuksia energiansäästöön. Esimerkkejä mahdollisuuksista ovat; käyttöpaineen alentaminen, energian talteenotto, vuotojen vähentäminen, kompressorin oikean koon valinta sekä käytön optimointi ohjaus- ja säätöjärjestelmillä. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 104)

2.4.1 Energiatehokkaan paineilmajärjestelmän suunnittelu

Uutta investointia suunniteltaessa on parasta katsoa mahdollisimman pitkälle tulevaisuuteen ja pyrkiä arvioimaan uusien tilanteiden ja vaatimusten vaikutuksia, jotka saattavat vaikuttaa paineilma-asennukseen. Tyypillisiä esimerkkejä ovat energiansäästövaatimukset, ympäristövaatimukset, ja tuotannon lisääntyneet laatuvaatimukset sekä tulevat tuotannon laajennusinvestoinnit. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 104)

Optimoidut kompressoritoiminnot ovat yhä tärkeämpiä erityisesti suuremmille, paineilma-riippuvaisille teollisuudenaloille. Tuotanto muuttuu ajan myötä kehittyvällä teollisuudella, ja näin myös kompressorin toimintaolosuhteet. Siksi on tärkeää, että paineilman jakelu perustuu sekä nykyisiin vaatimuksiin että tulevaisuuden kehittämissuunnitelmiin. Kokemukset osoittavat, että laaja ja puolueeton toimintatilanteen analysointi johtaa lähes aina kokonaistalouden paranemiseen. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 104)

Paineilmalaitteistojen päivittäminen tai vaihtaminen uusimpaan teknologiaan voi vähentää energiankulutusta jopa neljänneksellä. Jos korvataan vanhan tai tehottoman kompressorin, uuden investoinnin hinta on usein alhaisempi kuin vanhemman kompressorin käyttökustannukset. Moderni kompressoriyksikkö, joissa on uusimmat säätöjärjestelmät ja energiatehokkaat sähkömoottorit, edistävät taloudelliset tulokset alusta alkaen, mikä tarkoittaa lyhyttä takaisinmaksuaikaa. Kaikki mahdolliset paineilman energiataloudelliset toimenpiteet vaikuttavat merkittävästi kokonaisenergiankulutukseen ja CO²-päästöihin. (Atlas Copco Compressors UK, n.d.)

2.4.2 Uusien paineilmalaitteiden hankinta

Kun harkitaan uusia tai suunnitellaan uutta paineilmajärjestelmää, kannattaa lähtökohtaisesti ottaa huomioon kulutuskohteiden asettamat vaatimukset. Paineilma-aseman laitteiden valinnassa vaatimukset ovat seuraavat; paineilman kulutus sekä tuotto, järjestelmän käytettävä työpaine, paineilman laatuvaatimukset, onko suunnitelmia järjestelmän laajentamiseen ja käyttövarmuus. Vaatimusten selvitettyä, määritellään minkälaisia ja mitkä laitteet toimivat taloudellisesti kokonaisuutena. On myös otettava huomioon muita kustannuksia, kuten paineilmajärjestelmän käyttökustannukset ja huolto- sekä varaosakulut. Toimintahäiriöt voivat aiheuttaa edelleen kustannuksia tuotannonmenetyksien takia. (Ellman ym., 2002, s. 41)

Muita huomioitavia tekijöitä ovat tehtaan paineilman vuotuinen käyttöaika sekä kulutuksen vaihtelu. Kompressorien säätö- ja ohjausjärjestelmän valinta on tehtävä, kun paineilman tarve ja vaihtelu on selvillä. (Energiatehokas paineilmajärjestelmä Osa 1/2, n.d.) Valitsemalla oikean kokoisen tai mitoitetun kompressorin tuotantolaitokselle vältetään turhia kustannuksia, häiriötä tuotannossa sekä energiaa ei mene hukkaan. (Atlas Copco Compressors UK, n.d.)

2.4.3 Kompressorin mitoitus

Kun määritetään kompressorin tuottoa, käytetään hyväksi kokemuksia, mittauksia ja laskentaan pohjautuvia valintoja (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 84). Kompressorin mitoituksessa tarkistetaan paineilman kokonaiskulutusta. Kun otetaan huomioon mahdolliset muutokset suunnitelluissa ilmankulutustiedoissa ja paineilmajärjestelmän tulevaisuuden asteittainen laajeneminen, on lisättävä noin 10–20 prosentin turvamarginaali. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 116–118) Tulevaisuuden lisämarginaaliin kuuluvat myös kulumiset ja vuodot (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 84).

Paineilman nimellinen tarve lasketaan (1) Mukaan:

$$\text{Nimellinen paineilman tarve} = \text{kaikki koneet} \times \text{maks. ilmankulutus} \times \text{käyttöaste} \quad (1)$$

Käyttökohteiden vaaditun paineen mukaan valitaan kompressoria. Kun painehäviöt ovat selvillä, voidaan selvittää kompressorin painekapasiteetti. Kompressorin suurin käyttöpainetta pitää olla vähintään painehäviöiden ja kulutuskohteiden vaaditun paineen summa. Painehäviöihin kuuluvat esimerkiksi kuivaimien, suodattimien ja paineilman jakeluputkiston painehäviöt. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 116–118)

2.4.4 Energiatehokkuuden ylläpitäminen

Paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden ylläpitäminen on jatkuvatoimista seuranta. Tämä toteutetaan jatkuvatoimisilla määramittareilla. Merkittävät mittaukset ovat kompressorien energiankulutus (kWh), tuottomäärä (m³/min), painetaso (bar) sekä rinnakkain erillisen määramittarin, kuten tehtaan tuotanto. Erillistä määramittaria tarvitaan seuranta varten, koska kompressorien tuotannon seuranta ei yksistään riitä, eli seurataan samalla tuotannon toimintaolosuhteet sekä tehtaan tuotannon vaihtelut. Näin voidaan vertailla tehtaan tuotanto ja paineilman kulutusarvot keskenään. (Energiatehokas paineilmajärjestelmä Osa 1/2, n.d.)

Kun paineilmajärjestelmän energiatehokkuus on optimoitu ja tuotanto sekä kulutusarvot ovat kirjattu vuoden aikana, voidaan pitää tätä referenssivuotena. Arvot kirjataan jatkossa ja verrataan referenssivuoteen, näin voidaan todentaa energiatehokkuuden tila. Vertailujen perusteella voidaan toteuttaa paineilmajärjestelmän tarvittavat korjaustyöt. (Energiatehokas paineilmajärjestelmä Osa 1/2, n.d.)

Energiatehokkuutta voidaan hyvin mitata laskemalla paineilmatuotannon ominaisteho. Ominaisteho lasketaan paineilmajärjestelmän kuluttama sähköteho suhteutettuna tuotettuun paineilmamäärään. Ominaistehon yksikkö on (kW/m³/min). Suositellaan, että paineilmatuotannon ominaistehon ei tule ylittää 7 kW/m³/min. (Motiva Oy, 2006, s. 30)

2.5 Kunnossapito ja ennakkohuolto

Paineilman käyttövarmuuden varmistamiseksi, paras tapa on paineilmavarusteiden ylläpito. Panostamalla säännölliseen ennaltaehkäisevään huoltoon, voidaan ylläpitää energiatehokkuuden, jonka on saavuttanut kompressori investoinnilla tai parantaa vanhemman laitteiston suorituskykyä. (Atlas Copco Compressors UK, n.d.)

Kuten kaikki laitteistot, paineilmajärjestelmä vaatii jonkinlaista huoltoa. Ylläpitokustannukset ovat kuitenkin alhaiset verrattuna muihin kustannuksiin, ja niitä voidaan edelleen alentaa huolellisen suunnittelun ja ennakkohuollon avulla. Kunnossapidon tason päättää paineilmajärjestelmän vaadittavan käyttövarmuuden ja tehokkuuden. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 110)

Paineilmajärjestelmän kunnossapitoon ja ennakkohuoltoon kuuluvat koko verkosto, käyttölaitteet, kompressori ja jälkikäsitteilyn laitteet. Säännölliseen huolto-ohjelmaan on ratkaisevaa sisältää vuotojen kartoitus ja korjaus. Tehtaan paineilmajärjestelmän kunnossapidolle on myös hyvä nimetä vastuuhenkilö. Yksi tehokas toimenpide on käyttöhenkilöstön kouluttaminen paineilman käytöstä, vuodoista ja miten vähentää omatoimisesti turhat käyttökohteet. (Energiatehokas paineilmajärjestelmä Osa 2/2, n.d.)

2.5.1 Vuodot paineilmaverkostossa

Paineilmajärjestelmissä vuodot ovat varteenotettava häviötekijä. Vuotoja esiintyy aina, kun järjestelmä on paineistettu paineilmalla, eli vuotoja ei voi välttää. Vuotojen suuruus riippuu järjestelmän painetasosta ja vuotokohtien muodosta. Vuotokohdat esiintyvät yleisesti venttiileissä, putkiliitoksissa, liitetyissä työkaluissa ja vuotavissa tai huonosti suljetuissa suluissa. (Ellman ym., 2002, s. 67)

Pitkällä aikavälillä vuodoilla on taloudellinen ja piilevä merkitys. Vuositasolla vuotojen aiheuttamat turhat energiakustannukset voivat muodostaa huomattavia taloudellisia kustannuksia (Ks. kuva 12). (Ellman ym., 2002, s. 67)

Vuotoreiän halkaisija mm		Vuotomäärä 8 bar l/min	Kustannukset euroa/vuosi
1	●	75	290
1,5	●	150	580
2	●	260	1 000
3	●	600	2 320
4	●	1 100	4 260
5	●	1 700	6 580

Kuva 12. Suuntaa antava erikokoisten vuotoreikien aiheuttamat vuotuiset kustannukset. (Motiva, 2012).

Useimmissa paineilma-asennuksissa on jonkinasteista vuotoa, joka edustaa puhdasta energianmenetystä, tämän takia vuodot ovat minimoitava. Yleensä vuodot voivat olla jopa 10–15 % tuotetusta paineilmasta. Vuodot ovat myös verrannollisia käyttöpaineeseen, minkä vuoksi yksi tapa vähentää vuotoa on korjata vuotavia varusteita ja siten alentaa työpainetta. Esimerkiksi jos työpainetta alennetaan 0,3 baarilla, voidaan vähentää vuotoa 4 prosentilla. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 106–107)

Epätaloudellinen kulutus, joka yleensä tarkoittaa kuluneita laitteita, vuotoja, huonosti konfiguroituja prosesseja tai paineilman virheellistä käyttöä korjataan parhaiten lisäämällä yleistä tietoisuutta paineilmasta (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 106). Yleisperiaatteena on, ettei ole ollenkaan vuotoja järjestelmässä, mutta kohtuullinen vuotomäärä on alle viiden prosentin tasolla. (Ellman ym., 2002, s. 67)

Vuotojen paikallistaminen ja etsintä on useasti vaikeata. Jos vuodot ovat suurikokoisia, niitä voi todeta kuulon avulla. Pienempiä vuotoja, jotka ovat vaikeampia havaita, voidaan etsiä käyttämällä ruiskuttavia, vaahtoavia aineita sekä ultraäänivuotomittaria. (Ellman ym., 2002, s. 67) On kannattavaa suorittaa vuotokartoitus vuosittain ja paineilmajärjestelmän laajempi kartoitus muutaman vuoden välein (Öster & Motiva, 2012).

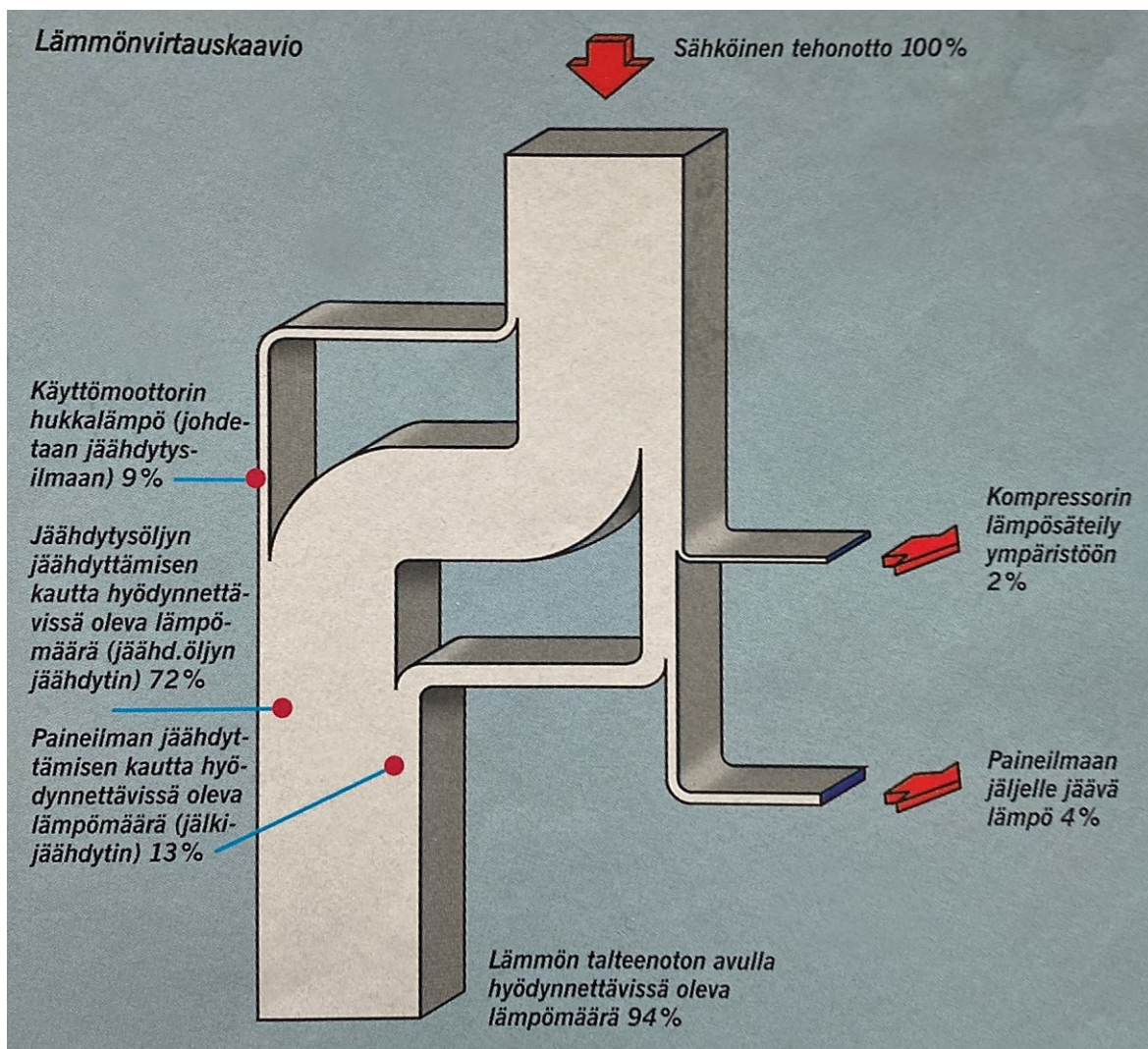
2.5.2 Haittatekijöiden eliminoiminen

Paineilmanjakelussa halutaan mahdollisimman pienet painehäviöt paineilman tuotannon ja käyttöpaikan välillä. Paineilmajärjestelmän käytön aikana kannattaa eliminoida seuraavia haittatekijöitä; paineilmakoneet on pidettävä käyttökunnossa ja huollettava säännöllisesti, vuotojen säännöllinen tarkkailu ja välitön korjaus, työajan päättyessä on suljettava venttiilit ja turhat puhallukset on lopetettava. Kompressorikapasiteetin on myös olla tarpeeksi tyydyttämään ilman kokonaistarpeen. Varusteilla on myös merkitystä, eli on käytettävä sopivia venttiilejä, liittimiä ja putkikokoja. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 21–22)

2.6 Lämmön talteenotto

Kun ilmaa puristetaan, muodostuu lämpöä (ks. kuva 13). Kompressorin kuluttamasta sähköenergiasta 100 % muuttuu lämmöksi. Suurteollisuudessa paineilman tuotannon energiakustannukset voivat olla jopa 80 prosenttia kokonaiskustannuksista. Hyvin suunnitellun lämmön talteenoton investoinnin takaisinmaksu on yleensä vain 1–3 vuotta. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 79–80)

Suurin osa käytetystä sekä hyödynnettävissä olevasta lämmöstä kulkeutuu jäähdytysnesteen mukana, eli öljyjäähdytteisessä ja jäähdytysnestejäähdytteisissä kompressoreissa siirtyy jopa 72 % lämpöenergiasta väliaineeseen. Paineilman jäähdyttämisestä voidaan hyödyntää 13 % ja sähkömoottorin hukkalämmöstä 9 %. Öljy- tai jäähdytysnestejäähdytteisissä ruuvikompressoreissa, jotka ovat täysin koteloituneet ja käyttävät täysin kohdistetun jäähdytyksen, voivat hyödyntää sähkömoottorin tuottaman lämpöenergian. Itse paineilmaan jäävä lämpö noin 4 % ja pienin osa lämpöenergiasta 2 % häviää lämpösäteilynä. Kokonaisuudessa voidaan hyödyntää yhteensä noin 94 % kompressorin tuottamasta lämpöenergiasta. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 44–45)



Kuva 13. Lämmönvirtauskaavio paineilman tuotannossa. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 45).

Lämmön talteenotto paineilmaasta vähentää energian hankintatarvetta esimerkiksi lämmenteen jäähdytysilman käyttämisen tilalämmitykseen tai kuuman veden lämmittämiseen. Tämä energiankulutuksen vähentäminen johtaa alhaisempiin käyttökustannuksiin ja hiilidioksidipäästöihin, mikä myös pienentää hiilijalanjälkeä. (Atlas Copco Compressors UK, n.d.)

Kompressorin lämmön talteenotto ei kuitenkaan tuota aina lämpöä, kun sitä tarvitaan tai useasti ei ole riittävästi lämpöä. Energian talteenotto on suuresti riippuvainen kompressorin kuormituksesta ja jos kompressorin kuormitus on vaihteleva, siten on energian talteenotto vaihteleva. Jotta lämmön talteenotto olisi toteuttamiskelpoinen, tarvitaan vastaavaa energiantarve, joka on suhteellisen vakaa. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 82)

2.6.1 Jäähdytysilman hyödyntäminen

Yksinkertaisin vaihtoehto hyödyntää hukkalämmön on lämmentyneen jäähdytysilman käyttäminen välittömästi tilojen lämmittämiseksi. Toisia kohteita ovat polttoilman esilämmityksessä, kuivausprosessissa ja tuulikaappien lämmityksessä. Kun lämmintä ilmaa ei tarvita, sitä johdetaan ulkoilmaan. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 45)

2.6.2 Jäähdytysveden hyödyntäminen

Vesijäähdytteisestä kompressorista, voidaan hyödyntää lämmentyneen jäähdytysveden lämpöä veden lämmittämiseen lämmönvaihtimilla. Lämmin vesi voidaan käyttää tuotantoprosesseissa, pesuprosesseissa ja suihkuveden lämmittämiseen. (Keinänen & Kärkkäinen, 2005, s. 45) Käytännön esimerkkejä mihin lämpö on hyödyntävissä ovat; höyrykattilan lisäveden lämmittäminen, kaukolämmön paluueden lämmittäminen ja prosessin käyttöveden kuumentaminen (Energiakatselmoijan käsikirja, n.d., s. 19).

Edellytykset energian talteenottoon vaihtelevat osittain kompressoritekniikan muukaan. Yleismalliset öljyttömät kompressorit on helppo muokata energian talteenottoon ja tämäntyyppiset kompressorit voivat tuottaa jopa 90 °C lämpöistä vettä, jota voidaan käyttää integroituna kuumavesilämmitysjärjestelmään. Öljyvoideltujen kompressorien kohdalla öljy on tekijä, joka rajoittaa mahdollisuudet korkeisiin jäähdytysveden lämpötiloihin. Radiaaliturbokompressoreissa painesuhde on alhaisempi puristusvaihetta kohti, tämän takia lämpötasot ovat yleensä alhaisemmat, mikä rajoittaa energian talteenottomäärää. (Atlas Copco Airpower NV, 2019, s. 83–84)

2.7 Paineilman kulutusraportti

Metsä Board Kaskisten tehtaalla oli suoritettu tilauksesta paineilmajärjestelmän analyysi syksyllä 2020. Kartoituksen suoritti ulkopuolinen toimittaja, joka on erityisasiantuntija paineilma-asennuksissa. Mittaukset oli suoritettu 27–28 lokakuuta ja mittausajanjakso oli yksi vuorokausi. (Metsä Board Kaskinen, 2020)

Paineilman analyysiraportti sisältää tietoa asennetusta laitteistosta, paineilman keskivertokulutus mittausajanjaksolla, kompressoreiden ilmantuotto, energiankulutus, ja käyttöasteet sekä painetasot. Tuottopainetta mitataan jälkikäsitteilyn jälkeen, joten ei voi arvioida kuivamien tilaa. Raportissa keskitytään koko paineilmajärjestelmän toimivuuteen. Analyysiraportin tietoa voidaan käyttää, kun suunnitellaan paineilman tuotantolaitteiden investointia. Kulustietoja käytetään päätöksien pohjana. (Metsä Board Kaskinen, 2020)

Raportissa käy ilmi, että ensisijainen paineilman tuotanto sujui yhdellä ruuvikompressorilla ja tukeva säätävä ruuvikompressorikävi isoimman ajan kevennyksellä sekä satunnaisesti kuormitukselle. Tämä aiheutti heikon ominaistehonkulutuksen $8,67 \text{ kW/m}^3/\text{min}$. Kompressorien keskiporto energiankulutus oli 387,6 kW. Raportissa on myös huomioitu, että paineilman siirrossa tehtaalla kuorimolle on havaittu painehäviötä putkistossa. (Metsä Board Kaskinen, 2020) Liitteenä ote paineilmajärjestelmän analyysistä.

2.8 Energiatuki

Suomessa voidaan hakea energiataukea, ja energiatauen keskeinen tavoite on edistää innovatiivisten ja uusien ratkaisujen kehittämistä. Energiataukea myönnetään kaikenkokoisille yrityksille. Energiatukea ja energiansäästöä edistävät investoinnit, jotka tehdään vuonna 2021, on energiataukeussopimukseen liittyneille yrityksillä mahdollisuus hakea 20 % investointitukea. Energiatauen hakemusta tulee tehdä ennen hankkeen toteuttamista. (Business Finland, n.d.)

3 Toteutus

Tässä luvussa esitellään selvitystyön tehtävä lyhyesti, menetelmä sekä lähestymistapa opinnäytetyön toteuttamisessa. Paineilmatuotannon energiaoptimointi toteutetaan aineistoa keräämällä, kirjallisuustutkimuksilla, analysoimalla dokumentteja ja paineilman kulutusraporttia sekä laskelmia tekemällä. Saadakseen käsityksen aiheesta tutkitaan paineilman perusteet, puristusmenetelmät, paineilmajärjestelmä kokonaisuutena ja paineilman jälkikäsitteily.

3.1 Tehtävä

Opinnäytetyön tehtävä oli pääasiallisesti tehdä selvitystyö paineilman tuotantolaitteiston tulevaa investointia varten. Tehtävänä oli selvittää kompressorin oikean mitoituksen, käyttämällä saatavilla olevilla ilmentulokartoituksilla ja vertailla eri kompressoritekniikoita. Työssä vertailtiin ruuvikompressoria ja turbokompressoria. Sen lisäksi selvitettiin mahdollisuudet energian talteenottoon sekä energiatehokkuuden parantamiseen. Lopuksi laadittiin paineilmajärjestelmälle ennakkohuolto-ohjelma.

3.2 Toteuttaminen

Työ aloitettiin Teams-tapaamisella koulun sekä toimeksiantajan ohjaajien kanssa. Tapaamisen aikana keskustelimme paineilmajärjestelmän nykytilanteesta, ja miten voisi kehittää paineilmatuotannon energiatehokkuutta. Käytiin myös läpi paineilmalaitteiston tämänhetkiset ongelmat ja puutteet. Oli ajankohtaista uusia paineilman tuotantolaitteisto. Haluttiin vertailla ruuvikompressoria ja turbokompressoria, selvittää tekniikoiden hyödyt ja haitat ja tärkeämmät ominaisuudet. Oli myös tärkeää, että tekniikka soveltuisi tehtaan paineilmankulutukseen ja kulutusvaihteluihin. Kävi myös ilmi, että paineilmajärjestelmän verkostolle puuttui ennakkohuolto-ohjelma.

Päätettiin että työn menetelmänä olisi tutkimustyö missä selvitetään kyseiset asiat aineistoa keräämällä. Työn aineeseen syvennyttiin kirjallisuutta, verkkolähteitä ja tehtaan tietolähteitä hyödyntäen. Saadakseen käsityksen aiheesta tutkittiin paineilman perusteet, puristusmenetelmät, paineilmajärjestelmä kokonaisuutena ja paineilman jälkikäsitteily. Erityisesti syvennettiin tekijöihin, kun mitoitetaan paineilmakompressoria ja mitä pitää ottaa huomioon suunniteltaessa uutta investointia. Tämän aineiston pohjalta luotiin ratkaisuja ja ehdotuksia paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden kehittämiseksi. Toimeksiantajan

4 Tulokset

Tässä luvussa esitellään selvitystyön saavutetut tulokset. Ensin käydään läpi Metsä Board Kaskisten nykyinen laitteisto paineilman tuotantoon ja sen nykyinen tilanne. Tämän jälkeen käsitellään kompressorin investointia; kompressoriteknikoiden vertailu, kompressorin mitoitus ja vaihtoehtojen analysointi. Lopuksi käydään läpi mahdollisuudet energiatehokkuuden kehittämiseksi, sekä paineilmajärjestelmän ennakkohuolto-ohjelmaa.

4.1 Metsä Board Kaskisten paineilman tuotantolaitteisto

Metsä Board Kaskisten tehtaalla paineilman tuotanto tapahtui kolmella kaksivaiheisella öljyttömällä ruuvikompressorilla. Kompressorien tekniset tiedot ovat esiteltyinä taulukossa 3. Tehdasalueella on kaksi erillistä paineilma-asemaa, joista kaksi paineilmakompressoria sijaitsevat voimalaitoksella ja yksi hiertämöllä. Voimalaitoksella sijaitsevan paineilma-aseman laitteisto on 1970-luvulta, joten ne ovat iäkkäitä ja lähestyvät elinkaarensa loppua. Tämän aseman kompressorit toimivat varalla, ja vuorottelevat yksi kerrallaan tukevina kompressorina tasaamalla käyntitunteja. Hiertämön paineilma-aseman kompressorit on uudempaa vuosimallia ja pääasiallinen paineilman tuotanto sujui tällä kompressorilla.

Kompressorit ovat säännöllisesti huollettuja ja peruskunnostettuja, ja toimivat edelleen melko hyvällä hyötysuhteella. Kompressoit, K2 ja K3 ovat reilusti vanhempia kuin K4 sekä niillä on paljon käyttötunteja, eli on kannattavampaa hankkia uusia laitteita uudemmalla tekniikalla koska peruskunnostukset ja huollot maksavat melkein yhtä paljon kuin uusi laitteisto. Paineilma-asemien sisätiloista ei ole saatavilla lämpötilamittausta. Paineilmakompressorien imuilma otetaan tehtaan sisätiloista molemmilla kompressoriasemilla. Nykyisillä paineilman tuotantolaitteistolla ei ole lämmön talteenottoa.

Taulukko 3. Tämänhetkinen paineilman tuotantolaitteisto

Kompressorit	K2	K3	K4
Valmistaja	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco
Malli	ZR4-A	ZR4-A	ZR250FF
Tyyppi	Ruuvi	Ruuvi	Ruuvi
Vuosimalli	1977	1977	2005
Peruskunnostettu	-	2020	2019
Nimellisteho (kW)	250	250	250
FAD @7bar (m ³ /min)	35	35	43,4
Maks. käyttöpaine (bar)	8	8	7,5
Jäähdytys	Vesi	Vesi	Vesi

Voimalaitoksen ZR4-A kompressorien paineilman kuivaus suoritetaan laitekohtaisilla Atlas Copcon MD600-adsorptiokuivaimilla. Kuivaimien tilavuudet ovat 350 litraa, ja korkein sallittu työpaine 13,7 baaria sekä kuivaimella saavutetaan työpaineessa -30 °C kastepisteen. Hiertämön ZR250-FF kompressorin paineilman kuivaus suoritetaan koteloon yhdistetyllä Atlas Copcon IMD600-adsorptiokuivaimella. Kuivaimen tilavuus on 350 litraa ja korkein sallittu työpaine 10 baaria. Kuivaimella saavutetaan työpaineessa -30 °C kastepisteen.

4.1.1 Paineilman laatu

Paineilman laatuvaatimukset ovat määritettynä ISO 8573-1:2010 standardin mukaan luokkaan [1:2:0]. Kiinteiden partikkeleiden laatu luokka on yksi, vesipitoisuuden laatu luokka on kaksi ja öljynpitoisuus laatu luokka nolla. Metsä Board Kaskisten BCTMP-tehtaalla on elintarviketurvallisuuden ISO 22000 sertifiointi. Paineilman laatuvaatimukset täyttävät elintarviketurvallisuuden standardin suositukset. Paineilman jakelu käy välillä rakennuksien ulkopuolella pitkin putkisiltaa, eli talviaikaan on kondenssin jäätyminen riski putkistossa. Tämän takia vaaditaan tarpeeksi kuivaa ilmaa jäätyminen estämiseksi. Instrumentti-ilma suodatetaan aktiivihilisuodattimella.

4.1.2 Paineilmasäiliöt

Paineilmasäiliöiden kokonainen kapasiteetti on 55 m³, josta 50 m³ on käytössä. Paineilmajärjestelmässä on yhteensä neljä paineilmasäiliötä hajautettuna, mistä kolme on käytössä. Voimalaitoksella on kaksi 20 m³ paineilmasäiliötä ja hiertämöllä on yksi 10 m³ säiliö. Vesilaitoksella on 5 m³ säiliö, joka on poissa käytöstä sekä säilötty.

4.1.3 Ohjaus- ja säätömenetelmät

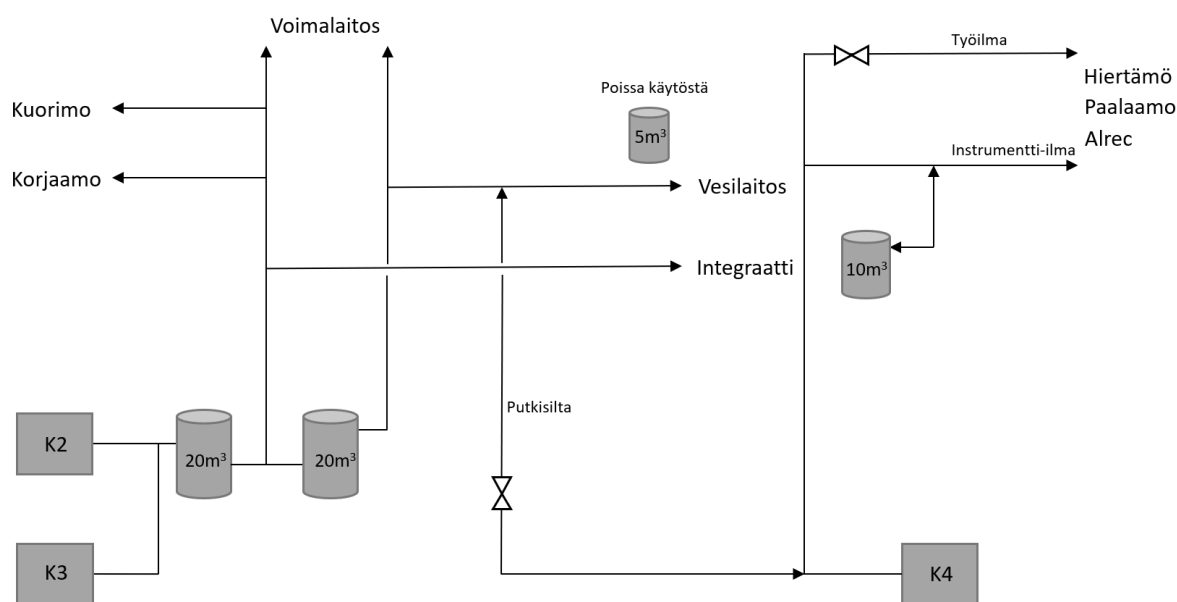
Kompressorit ohjataan LAN-ohjauksella, ja valvonta tehdään etänä Valmet DNAuse ohjelmiston avulla. LAN-ohjauksessa on ollut ongelmia, niin ohjaus suoritettiin paikallisohjauksella. Paineilmakompressorit säädetään painekytkimellä porrastusmenetelmällä, jolloin kompressorin säätö perustuu paineen ylä- ja alarajoihin. Paineen ollessa ylärajalla kompressorin keventää määrätyn ajan, kunnes se pysähtyy. Paineen laskiessa alarajalle kompressorin käynnistyy uudelleen. Paineilman seurannassa käytetään mittareina virtausmäärää, virtausuunta, painetasoja ja paineilman kastepistettä. Paineilmakompressorien erillistä energiankulutusta ei seurata. Virtausmäärää mitataan viidessä kohteessa; voimalaitoksella, hiertämöllä, kuorimolla ja kaksi työilmaverkostossa.

4.1.4 Tehtaan paineilman kulutus

Paineilman kulutusarvot ovat yhden vuorokauden mittausajanjaksolta. Metsä Boardin tehtaalla ilmankulutus vaihteli arviolta 15–58 m³/min välillä, keskiarvokulutus on 44,7 m³/min ja maksimi kulutushuippu 78,6 m³/min. Tehdas käy jatkuvalla 5/5 vuorotyöllä ja paineilmakompressorien käyttötunnit ovat 8760 tuntia vuodessa. Kompressorin mitoituksen selvityksessä oli mahdollista käyttää paineilmakulutuksen keskiarvoa, koska tehdas käy jatkuvasti seisokkeja lukuun ottamatta, jolloin paineilman tarve on samaa tasoa.

Tehtaan kompressorit tuottavat paineilmaa 6,5 baarin työpaineella. Hiertämön kompressorin tuottopaine on $6,5 \pm 0,15$ baaria, missä 6,45 on kuormitusraja ja 6,65 baarin kevennysraja. Voimalaitoksen kompressorien tuottopaine on asetettu $6,45 \pm 0,1$ baaria. Suurin osa käyttölaitteista käyttää 6 baarin työpainetta. Paineen säätö putkihaarojen välillä suoritettiin säätöventtiilillä työilmaverkon putkisillan kohdalla.

Kuvassa 14 nähdään yksinkertaistetun kaavion paineilmajärjestelmästä. Kuvasta saadaan selville paineilman kulutuskohteet. Integraattiin kuuluu jätevesilaitos. Näistä suurimmat kulutuskohteet ovat paalaamo, kuorimo ja hiertämö.



Kuva 14. Yksinkertaistettu kaavio paineilmajärjestelmästä.

4.2 Kompressorin uusiminen

Kompressorin mitoituksessa on suurta merkitystä, kompressorin ei saa olla yli- tai alimitoitettu, ja mitoitukseen tulee myös ottaa huomioon mahdolliset vuodot ja paineilmajärjestelmän tulevaisuuden laajennussuunnitelmat. Metsä Board Kaskisten paineilmankulutukseen sopivat parhaiten ruuvi- ja turbokompressorit niiden ominaisuuksien vuoksi. Edellä mainituilla kompressoriteknikoilla on silti erottuvia ominaisuuksia, hyödyt ja haitat eri tarpeisiin. Luvun lopussa käydään läpi kompressorin suunniteltu sijoituskohde. Kompressori-investoinnille on myönnetty 20 % energiatukea, ja energia-anomuksessa painotettiin sähkö- ja lämpöenergiesästöä.

4.2.1 Kompressorin mitoitus

Uuden kompressorin tulisi toimia pääkompressorina, ja tuottaisi pääosan paineilmasta. Paineilmakompressorin säätöominaisuudet tulisi olla tarpeeksi joustavat vastaamaan tehtaan paineilmankulutusta. Mitoituksen tavoitteena on myös, että kompressorin tuotto tapahtuisi kompressorin tehokkaammalla alueella. Paineilman tarve ei vaihtele vuorojen välillä, mikäli tuotanto sujuu samalla tasolla. Paineilmajärjestelmän laajentamisessa ei ole suunnitelmia tällä hetkellä, mutta prosessiteollisuus uudistuu jatkuvasti ja on otettava huomioon tulevaisuuden investoinnit turvamarginaalilla. Paineilmakompressorin mitoitukseen lisätään 10–20 % (luku 2.4.3). Tässä tapauksessa lisättiin 15 prosentin turvamarginaali kompressorin mitoitukseen.

Turbokompressorin mitoituksessa luovutetaan hieman hyötysuhteesta, saadakseen laajemman säätöalueen. Kun mitoitetaan turbokompressorin maksimi tuotantopainetta korkeammalle, saadaan alemmalla työpaineella laajempi vakaa ajoalue. Mikä tarkoittaa laajempaa säätöaluetta. Kompressorin mitoitukseen käytettävä paineilman tarve on esitettyinä taulukossa 4. Paineilman tarve perustuu paineilmajärjestelmän analyysiraporttiin.

Taulukko 4. Nimellinen paineilmankulutus lisämarginaalilla

Paineilman kulutus ka (m ³ /min)	44,7
Maks. kulutus (m ³ /min)	78,6
Turvamarginaali	15 %
Paineilman tarve yhteensä (m ³ /min)	51,4

4.2.2 Ruuvi- ja turbokompressoritekniikan vertailu

Kompressoritekniikoiden vertailussa painotettiin ruuvi- ja turbokompressorin keskeiset ominaisuudet. Tarkasteltiin molempien tekniikoiden hyödyt ja haitat. Vertailussa tärkein oli ruuvi- ja turbotekniikan sopivuus tehtaan paineilman tarpeisiin. Esimerkiksi mikä tekniikka sopii parhaiten paineilmakulutukseen, paras hyötysuhde kuormitusalueella, säätöominaisuudet ilmankulutusvaihteluihin ja kompressorin käyttövarmuus sekä ylläpitokustannukset. Elinkaarikustannukset ovat tärkeä painopiste kompressorinvestoinneissa.

Ruuvikompressor on varmatoiminen, ja normaalisti kiinteänopeuksinen, mutta taajuusmuuntajalla voidaan toteuttaa kierrosnopeussäätöisen ruuvikompressorin. Ruuvikompressorilla ei ole epävakaata ajoaluetta, ja koko ajoaluetta voidaan hyödyntää. Ruuvikompressorien roottorielementit kuluvat ajan mittaan, ja peruskunnostuksia tulee tehdä. Nämä peruskunnostukset lisäävät kompressorin elinkaarikustannuksia. Ruuvikompressoreilla tilavuusvirtauksen määrä on pienesti riippuvainen painesuhteesta.

Turbokompressorin etuina ovat vähäinen kunnossapidon tarve, laajat säätöalueet ja niillä voidaan tuottaa suuria ilmamääriä. Vähäisen kunnossapidon tarpeen ansiosta voidaan säästää kunnossapitokustannuksissa kompressorin elinkaarella. Radiaaliturbotekniikalla on hieman parempi hyötysuhde verrattuna ruuvikompressorin. Turbokompressorin rajoituksina ovat epävakaat ajoalueet, kuten sakkausraja ja tukehtumisraja. Turbokompressorin vakaa alue kaventuu, kun lähestytään kompressorin mitoituksen maksimipainetta. Jos kompressorin kapasiteettia mitoitetaan suuremmaksi, saadaan säätöaluetta laajennettua. Kompressorin tuottama painesuhde vaihtelee tilavuusvirtauksen mukana. Turbotekniikalla voidaan myös toteuttaa kokonaan öljyttömän kompressorin.

Metsä Board Kaskisten tehtaalle sopisi hyvin turbokompressoritekniikka. Turbokompressorin merkittävin hyöty tulee esiin elinkaarikustannuksissa. Tekniikan tuoton joustavuus ja säätömahdollisuudet olisivat hyödyksi tehtaan vaihtelevaan paineilman kulutukseen. Turbotekniikka mahdollistaisi energiatehokkaamman paineilmatuotannon hyvän hyötysuhteen ansiosta. Tekniikalla on myös vähäinen huoltotarve, jolla on merkitystä kompressorin elinkaarikustannuksiin. Tehtaalla on myös tärkeätä, että ei öljyä pääse paineilmajärjestelmään. Turbotekniikalla voidaan toteuttaa kokonaan öljyttömän paineilmakompressorin.

4.2.3 Vaihtoehtojen analysointi

Taulukossa 5. esitellään kompressorivaihtoehtoja ja säästöpotentiaalit (julkisesta versiosta on otettu pois kompressorien tekniset tiedot, nimellisteho, tuottoarvot, säätöalueet sekä investointihinnat luottamuksellisuuteen liittyvistä syistä). Kun investoidaan uuteen kompressoriin, voidaan saada säästöpotentiaalia kunnossapitokustannuksissa, energiatehokkuudessa ja lämmön talteenotossa (LTO). Säästöpotentiaalien laskelmat ovat karkeasti laskettuja, eivätkä ota huomioon vaikutukset nykyisten ruuvikompressorien huoltotarpeisiin käyttöasteen muuttuessa. Tuottoarvot ovat annettu olosuhteissa, missä imuilman lämpötila on 20 °C ja imuilman absoluuttinen paine on 1 baari. Energian hinnaksi on käytetty 35 €/MWh. Lämmön talteenoton hyötysuhteeksi on käytetty 90 % arvoa. Investointihinnassa ei oteta huomioon lisäkustannuksia kuten putkisto-, automaatio-, rakennus-, sähköistys- ja suunnittelutyöt. Kaikki kompressorivaihtoehdot ovat öljyttömiä, ja niitä luokitellaan ISO 8573-1:2010 standardin mukaan luokkaan nolla paineilman öljyngpitoisuudessa.

Taulukko 5. Kompressorivaihtoehtoja

Kompressori	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
kompressoritekniikka	VSD-Ruuvi	Turbo	VSD-Turbo
Määrä (kpl)	1	1	1
Energian säästöpotentiaali (€/a)	30 476	35 995	35 382
Huolto säästöpotentiaali (€/a)	3 590	6 000	7 500
LTO:n säästöpotentiaali (€/a)	79 471	74 504	75 056
Vuosisäästöt yhteensä (€/a)	113 537	116 499	117 937
Arvioitu takaisinmaksuaika (a)	1,6	1,8	2,3

Ensimmäinen vaihtoehto on kaksivaiheinen taajuusmuuntajalla ohjattu VSD-ruuvikompressori. Kompressorilla on laajin säätöalue, mutta pienin maksimituotto. Kompressori kattaisi paineilman keskikulutuksen, mutta kulutushuippujen tuottamiseen tarvitaan tukevaa kompressoria. Tukevana kompressorina toimisi yksi nykyisistä kiinteänopeuksisista ruuvikompressoreista. Erilliseen kuivaimeen ei tarvitse investoida, koska kuivain tulee integroituna kompressorikoteloon. Adsorptiokuivain saavuttaa työpaineessa noin -30 °C kastepisteen ja kuivainta elvytetään käyttämällä kompressorin hukkalämpöä. Tämän kompressorin arvioitu vuotuinen säästöpotentiaali on pienin, mutta takaisinmaksuaika on yksi lyhyimmistä, koska investointihinta on edullisin.

Toisen vaihtoehdon kompressorin on suuri kolmivaiheinen radiaaliturbokompressorin. Kompressorilla on laaja säätöalue, ja tuottaisi pohjakuormaa sekä toimisi säätävänä kompressorina. Kompressorin säädetään johtosiipisäädöllä ja epätaloudellisella ulospuhalluksella. Kompressorin investoimiseen tarvitaan myös erillisen kuivaimen. Tämän vaihtoehdon adsorptiokuivain tuottaa hieman kuivempaa ilmaa kuin nykyinen asennus. Adsorptiokuivain saavuttaa työpaineessa -40 °C kastepisteen, ja kuivempaa ilmaa on hinnakkampaa tuottaa. Kuivain elvytetään lämmöttä käyttäen paineilma-akapiteettia. Kuivaimella on kastepisteohjaus. Kompressorin teknisistä tiedoista ei ollut saatavilla energiankulutustietoja eri kuormitusasteilla, joten jouduttiin tekemään arvioita. Tämän kompressorin arvioitu vuotuinen säästöpotentiaali on toiseksi suurin, ja takaisinmaksuaika on yksi lyhyimmistä, vaikka investointihinta on toisin hinnakkain.

Kolmannen vaihtoehdon kompressorin on kolmivaiheinen taajuusmuuntajasäätöinen VSD-radiaaliturbokompressorin. Muista kompressoreista poiketen, tämän kompressorin säästöpotentiaali kunnossapitokuluissa on merkittävin. Tämä johtuu kompressorin tekniikasta. Kompressorin on täysin öljytön ja voimansiirto toimii ilman vaihteistoa. Tuotto kattaisi paineilman keskimääräisen paineilman kulutuksen. Kaikkiin kulutustilanteihin tarvitaan lisäksi yksi tukeva kompressorin. Samoin kuin edellisen vaihtoehdon kompressorin, tämä tarvitsee myös erillisen adsorptiokuivaimen. Kuivaimella on kastepisteohjaus. Kuivain saavuttaa paineenalaisen -40 °C kastepisteen, mikä on hieman kuivempaa kuin nykyinen asennus. Kuivaimen elvytykseen käytetään lämpöä sähkövastuksilla ja jonkin verran paineilmaa, jolloin kompressorin maksimi tuottomäärä on hieman alempi. Tämän kompressorin arvioitu vuotuinen säästöpotentiaali on suurin, mutta takaisinmaksuaika on pisin, koska investointi on hinnakkain.

4.2.4 Kompressorin sijoituskohte

Kompressorin suunniteltu sijoituskohte on vesilaitos. Vesilaitoksella on keskeinen sijainti tehdasalueella, joten paineilman jakelu on optimaalinen. Tämä tarkoittaa myös, että kaikki kompressorit ovat hajautettuna kolmella eri osastolla, mikä parantaa tehtaan paineilmajärjestelmän käytinvarmuutta. Kohteen vieressä sijaitsee 5 m^3 paineilmasäiliö ja säiliötä on tarkoitus ottaa käyttöön.

Vesilaitoksella on hyvin avonainen sisätila, mistä on hyvät yhteydet vesilinjoille ja paineilma-verkoston runkoverkkoon. Avonainen tila tekee myös kompressorin ympäristön

huoltoystävälliseksi. Kompressorin jäähdytysvesi on heti saatavilla, ja lämmön talteenoton edellytykset ovat hyvät. Paineilmakompressorin sijoitusta on tarkasteltu 3D-ohjelmasta.

Paineilmakompressorin imuilma on suunnitelma ottaa ulkoilmasta. Lämpöistä poistoilmaa johdetaan ulos. Talvisin käytettäisiin lämmintä poistoilmaa sisätilojen lämmittämiseksi. Imuilman vuodenajan lämpötilan vaihtelut on otettu huomioon ja talvisin on tarkoitettu ottaa imuilma sisätiloista. Imuilma otetaan länsiseinaltä, missä on varjoisa sijainti. Sijainnin lähistöllä ei ole liikennettä. Paineilma-asemalla olisi lämpötilan mittausta ulkoilman ottoaukosta sekä sisätilasta.

4.3 Mahdollisuudet energiatehokkuuden kehittämiseen

Metsä Board Kaskisten tehtaalla on mahdollista kehittää paineilmatuotannon energiatehokkuutta. Esimerkkejä mahdollisuuksista ovat; lämmön talteenotolla, säätö- ja ohjausmenetelmän optimoinnilla, painetason alentamisella, painehäviöiden korjaamisella ja mahdollisten haittatekijöiden eliminoiminen. Paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden kehittämisen jälkeen on tärkeätä jatkuvatoimisesti ylläpitää saavutun energiatehokkuuden.

4.3.1 Lämmön talteenotto

Mahdollisuudet paineilmakompressorin lämmön talteenottoon ovat hyvät, koska kompressorit käyttävät vesijäähdytystä ja BCTMP-tehtaan integraatin vesilaitoksella valmistetaan edullista prosessivettä. Lämmön talteenoton kannattavuutta tarkasteltaessa täytyy käydä läpi mahdolliset käyttökohteet. Hukkalämmön saatavuus riippuu suorasti kompressorin kuormituksesta. Uuden kompressorin sijoittamisessa harkittiin, miten voidaan hyötyä lämmön talteenotosta ja helpoin tapa johtaa lämpöenergia käyttökohteeseen. Kompressoria suunniteltiin sijoittaa vesilaitokselle, koska lämmön talteenottoa voidaan hyödyntää suoraan vesilaitokselta moneen mahdolliseen käyttökohteeseen. Jäähdytysvesi olisi lähellä käytettävissä, koska vesilaitoksella valmistetaan mekaanisesti puhdistettua raakavettä. Tehtaan omalla biovoimalaitoksella tuotetaan lämpöenergiana prosessihöyryä.

Yksi mahdollinen käyttökohde olisi kuorimon vesikierto. Puunkäsittelyssä käytetään lämmintä vettä kuorinnassa, ja lämpöisen veden käyttötarve on jatkuvaa. Toinen mahdollinen käyttökohde olisi veden valmistukseen. Näiden kohdalla voidaan korvata höyryn käyttöä. Automatisointi toteutettaisiin niin, että kompressorin lämmin paluuvesi johdetaan käyttökohteisiin tarpeen mukaan. Tapauksissa, kun ei ole tarvetta lämmölle, johdetaan lämmin vesi takaisin kierrätykseen.

Lämmön talteenottoa voisi myös hyödyntää voimalaitoksen lisäveden käsittelyssä. Lämpöenergia siirrettäisiin lämmönvaihtimella lisäveteen, jolloin lämmitetään lisävesi ennen kuorikattilan syöttövesisäiliötä. Nykyisin esilämmitetään syöttövesi tuorehöyryllä. Kompressorin hukkalämmöllä voidaan korvata osan höyryn lämpöenergiasta.

4.3.2 Sääto- ja ohjausmenetelmän optimointi

Staattisesti puristavien ruuvikompressorien säätötapana ovat yleensä painekeytkimellä kuormitus/kevennys menetelmä. Nykyisellä laitteistolla ja säätömenetelmällä yksi kompressor on pääasiallisesti kuormitettuna, mutta tukeva kompressor on kevennettynä suurimman osan ajasta ja käy satunnaisesti kuormitukselle. Tukevan kompressorin aikaväli kevennettynä ei ole tarpeeksi pitkä, jotta kompressor sammuisi. Tämä tarkoittaa, että suurin osuus tukevan kompressorin energiankulutuksesta on kevennettynä. Kevennettynä kompressor ei tuota lainkaan ilmaa.

Mikäli päätetään investoida jatkuvasäätöiseen kompressorin laajalla säätöalueella, pystytään tuottamaan joustavasti peruskuormaa. Näin voidaan saavuttaa energiatehokkaamman säätömenetelmän ja siten energiatehokkaampaa paineilman tuotantoa. Nykyiset ruuvikompressorit olisivat varalla, ja tukevana kompressoreina. Muulloin on selvitettävä parempaa ratkaisua nykyisten ruuvikompressorien säätöön sekä ohjaukseen.

4.3.3 Painetason alentaminen

Metsä Board Kaskisten tehtaalla on yritetty aikaisemmin alentaa painetasoa, mutta tuloksetta. Painetason laskeminen on aiheuttanut toimintahäiriötä käyttölaitteissa. Mahdollisuudet ovat kuitenkin toiset uudella jatkuvasäätöisellä kompressorilla, koska painetason käyttäytyminen tulee muuttumaan tasaisemmaksi. Painetason vaihtelut tulevat olemaan kapeammat, ja siten voidaan tavoittaa nykyisen tuottopaineen alarajaa. Painetason laskemista tulee kokeilla hitaasti, pienin askelein. Painetason alentamien vähentää kompressorien kuormitusta ja samalla vuotoja. Tämä johtaa myös paineilmatuotannon energiakulutuksen alentamiseen.

4.3.4 Painehäviöt

Paineilmajärjestelmässä ilmenee jonkin verran painehäviötä kuorimon paineilmaverkostossa. Kuorimon verkostoon on kaukaisin matka hiertämön paineilman tuotantolaitteistosta paineilman jakelussa. Painehäviöiden aiheuttajat voivat olla vuodot, tai likaantuneiden ja ahtaiden putkijohtojen takia. Ongelman voisi ratkaista uusimalla kuorimon jakeluputkisto, korjaamalla mahdolliset vuodot ja verkoston yksinkertaistaminen. Käyttämättömät haarat verkostosta voidaan sulkea venttiileillä.

4.3.5 Haittatekijöiden poistaminen

Helpoin tapa eliminoida haittatekijöitä on lisätä henkilökunnan paineilmatietoutta. Paineilman käyttäjät ovat vastuussa, miten paineilmaa käytetään. Näin voidaan omatoimisesti vähentää turhat käyttökohteet. Kaikki turhat puhallukset on vältettävä, esimerkiksi vaatteiden puhaltamien ja siivoukseen tarkoitettu puhaltaminen. Paineilmaa on käytettävä säästeliäästi. Kun paineilmaa on käytetty, ja työtehtävä on suoritettu, suljetaan venttiilit. Paineilmakoneet pidetään käyttökunnossa. Operaattorit suorittavat yleistä kunnonvalvontaa ja tarkistavat paineilmajärjestelmän käyttölaitteet kuten liittimet, venttiilit, työkalut ja toimilaitteet. Häiriöilmoitusta tehdään tarvittaessa ja korjaavia toimenpiteitä tehdään välittömästi.

4.3.6 Energiatehokkuuden ylläpitäminen

Metsä Board Kaskisten paineilmatuotannossa seurataan paineilman virtausmäärää, painetasoa ja kuivatun ilman kastepistettä. Toiminnanohjausjärjestelmä pitää lokia mittausarvoista ja luo trendejä. Paineilman tuoton seurantaan voisi lisätä paineilmakompressorien energiankulutus, jolloin saadaan laajempaa kulutustietoa. Sen lisäksi voisi paineilman kulutustietoja verrata rinnakkaiseen määrämittariin, kuten tehtaan tuotanto. Näin voidaan seurata kompressorin kulutusarvoja sekä ominaistehonkulutusta. Paineilman kulutusarvoja ja tehtaan tuotantoa vertailtaessa, saadaan käsitystä paineilman ja tuotannon vaihteluiden vaikutuksista.

Kun paineilmatuotannon energiatehokkuus on optimoitu; paineilmajärjestelmän tuotantolaitteisto uusitaan, ja tehdään energiatehokkuuden edistäviä toimenpiteitä. On tärkeätä luoda referenssivuosi. Kulutusarvoja ja tuotantoa seurataan sekä kirjataan vuoden aikana, jolloin tätä vuotta voidaan pitää referenssivuotena. Tämän jälkeen jatketaan seuraamista ja voidaan verrata referenssivuoteen. Referenssivuoteen vertaamalla

todennetaan energiatehokkuuden tila. Paineilmatuotannon seuranta tulee olla jatkuvatoimista.

4.4 Paineilmajärjestelmän ennakkohuolto-ohjelma

Metsä Board Kaskisella oli jo hyvin toimiva kunnossapito paineilman tuotantolaitteistolla, mutta paineilmajärjestelmästä puuttui paineilmaverkoston ennakkohuolto-suunnitelma. Paineilma-asemien tuotantolaitteistolla on säännöllinen huolto-ohjelma, joka suoritetaan kompressoritoimittajan toimesta vuosihuoltosopimuksella, jonka sisältö on laitevalmistajan määrittelemä käyttötuntien mukaan. Kompessori antaa huoltopyynnön saavuttuaan kyseisiin käyttötuntiin. Pienempiä vuotokartoituksia on peritty tekemään vuosittain ja laajempi vuotokartoitus on tehty noin 5 vuoden välein laitevalmistajan huollon puolesta. Paineilmakompressorien päivittäistä kunnonvalvontaa tekevät operaattorit työviikkolistan mukaan.

Paineilmaverkoston kunnossapidon osuus on tärkeä energiatehokkuuden sekä parantamisessa että säilyttämisessä. Ennakoiva kunnossapito parantaa turvallisuutta ja käyttövarmuutta. Tämän takia laadittiin paineilmaverkostolle säännöllisen ennakkohuolto-ohjelman. Tehtaan paineilmajärjestelmän kunnossapidolla oli jo olemassa oleva vastuuhenkilö. Paineilmajärjestelmän kunnossapito kuului mekaaniseen kunnossapitoon. Paineilmasäiliöille ja adsorptiokuivaimille oli jo ennestään ennakkohuolto-ohjelma, ja niitä tarkistetaan paineastioiden direktiivien mukaisesti.

4.4.1 Säännöllinen vuotokartoitus

Säännölliseen ennakkoliseen huolto-ohjelmaan on hyvä sisältää vuotojen tarkastelu ja kartoitus kunnonvalvonnan ohella sekä vuotojen välitön korjaus. Käynnissäpito-operaattorien tehtävä kenttäkierroksilla olisi kuunnella ja havainnoida vuotoja. Vuotojen havainnoitua niistä tehdään kunnossapitoilmoitus SAP-järjestelmään. Vuodot merkitään paikan päällä ja ilmoitukseen laitetaan lähin sijaintitieto. Vuotojen kunnossapitoilmoitukset korjataan välittömästi. Kunnossapitohenkilöstö kuittaa kyseiset vuodot huoltotoimenpiteen tehtyä.

Ennakkohuoltotoimenpiteinä tehdään vuoden välein vuotokartoitus. Kartoituksen voi tehdä yrityksen henkilökunta tai ulkopuolinen yritys. Neljän vuoden välein suoritetaan laajempi paineilmajärjestelmän kartoitus. On tärkeätä, että kaikkiin vuotoihin puututaan, koska kaikki vuodot johtavat painetasen laskemiseen sekä paineilmakompressorin energiankulutuksen lisääntymiseen. Taulukossa 6 esitellään paineilmaverkoston ennakkohuolto-ohjelman sisältö.

Taulukko 6. Paineilmaverkoston säännöllinen ennakkohuolto-ohjelma

Kategoria	Tarkenne	Toimenpiteet	Säännöllinen huoltoväli
Paineilman jakelu (vuodot)	Putkiverkosto	Tarkistetaan säännöllisesti vuotojen varalta. Häiriöilmoitus tehdään tarvittaessa. Korjataan välittömästi.	Vuotokartoitus 1 kertaa vuodessa Laajempi kartoitus 4 vuoden välein
	Letkut		
	Liittimet		
	Venttiilit		
	Työkalut		
	Toimilaitteet		

5 Keskustelu

Tämän selvitystyön tavoitteena oli analysoida ja tutkia Metsä Board Kaskisten paineilman tuotantoa, koska oli ajankohtaista uusia paineilman tuotantolaitteisto. Työn tarkoitus oli selvittää kompressorin oikean mitoituksen, ja sopivamman kompressoritekniikan tehtaan paineilman tarpeille. Työn ohella oli tarkoitus selvittää mahdollisuudet paineilmatuotannon energiatehokkuuden kehittämiseksi, mahdollisuus lämmön talteenotolle ja laatia paineilmaverkostolle ennakkohoito-ohjelma. Tavoitteena oli alentaa energiakustannuksia ja säästää ympäristöä tehtaan paineilman tuotannossa energiatehokkaammalla järjestelmällä.

Selvitystyö tehtiin aineistoa keräämällä, dokumenttien ja paineilmankulutusraporttia analysoimalla ja laskelmia tekemällä. Selvitystyö toimisi esityönä tulevaa investointia varten. Investointiprosessi tapahtuisi työn ulkopuolella. Paineilmatuotannon energioptimoinnin selvitystyö toteutui suunnitellusti ja olen tyytyväinen lopputuloksiin. Uskon myös täyttäneeni toimeksiantajan toivomuksia. Projektin aikana myönnettiin Business Finlandin 20 % energiatukea kompressori-investointiin.

Selvitystyön tekeminen on ollut hyvin kiinnostavaa, ja opettavaista, olen perehtynyt paineilman tuotantoon prosessiteollisuudessa ja paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden merkityksellisyyteen. Kiinnostus aiheeseen auttoi huomattavasti. Vallitseva epidemia on aiheuttanut haasteita opinnäytetyön tekemiseen, tämän takia kaikki tapaamiset järjestettiin etänä. Tapaamisien kautta sain hyvin asiantuntevaa apua tehtaan henkilökunnalta, kehitysinsinööritä, kunnossapitopäälliköltä, pääsuunnittelijalta, ja ohjaajalta sekä Metsä Boardin energiatehokkuuspäälliköltä. Työn tekemiseen auttoi aiempi työkokemus tehtaalla, koska olin perehtynyt tuotantolaitoksen toimintatapoihin, työturvallisuuteen ja kunnossapidon toiminnanohjausjärjestelmään. Minulla oli hyvä kuva tehtaan eri osastoilta ja osastojen sijainneista.

Radiaaliturbokompressorit ovat yleistyneet viime aikoina, ja teknologia on kehittynyt huomattavasti eri innovaatioilla. Tämän takia oli vaikeampaa löytää uudempaa kirjallisuutta edellä mainitusta kompressoritekniikasta. Ruuvikompressorit ovat olleet pidemmän aikaa prosessiteollisuuden paineilman tuoton peruskoneita, ja tekniikasta löytyi enemmän kirjallisuutta. Paineilma-analyysin luotettavuutta voisi lisätä, jos paineilmankulutuksen mittausajanjakso olisi pidempi. Silloin saisi paremman keskiarvon paineilman kulutuksesta. Säästöpotentiaalien laskemisessa on käytetty karkeita arvoja ja yleistyksiä, jotka voivat heikentää laskelmien luotettavuutta. Luotettavuutta voisi parantaa, jos olisi ollut enemmän

teknistä tietoa saatavilla, ja laskelmia voisi tehdä niiden perusteella. Laskelmia vertailtiin Metsä Groupin Espoon pääkonttorin laskelmiin luotettavuuden varmistamiseksi.

Jatkotutkimukseksi voisi tehdä paineilmajärjestelmän analyysi, missä tarkkaillaan kriittisesti paineilman käyttökohteet. Tutkimuksessa voisi kartoittaa tuotantolaitoksen eri osastojen käyttökohteet, ja systemaattisesti käydä läpi, voiko paineilman korvata muulla tavoin. Tämä ei ollut mahdollista tässä työssä, koska työ tehtiin etänä. Kaikki paineilmanjärjestelmien optimoinnit ovat kuitenkin tapauskohtaisia.

Lähdeluettelo

- Alvarez, H. (2006). *Energiteknik: Del 2*. Lund: Studentlitteratur.
- Atlas Copco Airpower NV. (2019). *Compressed Air Manual*. (9. painos). Wilrijk, Belgium. Haettu 1.1.2021. <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/united-kingdom/documents/Compressed%20Air%20Manual%209th%20edition.pdf>
- Atlas Copco Compressors UK. (n.d.). *10 ways to make your compressor installation energy efficient*. Haettu 17.3.2021. <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/united-kingdom/documents/10%20ways%20to%20save%20energy%20on%20compressor.pdf>
- Atlas Copco. (n.d.). *Paineilman laatustandardi - ISO 8573-1:2010*. Haettu. 15.2.2021. Atlas Copco: <https://www.atlascopco.com/fi-fi/compressors/paineilman-perusteet/paineilman-laatustandardit>
- Atlas Copco. (n.d.). *Skruvkompessorer*. Haettu. 15.2.2021. <https://www.atlascopco.com/sv-se/compressors/wiki/compressed-air-articles/twin-screw-compressors>
- Atlas Copco. (n.d.). *Vad är tryckluft?* Haettu 14.1.2021. <https://www.atlascopco.com/sv-se/compressors/wiki/compressed-air-articles/what-is-compressed-air>
- Backman, J., & Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT. (2017, Syyskuu 8). *Turbokompressori puristaa ilman hyvällä hyötysuhteella*. Sarlin Oy. Haettu 14.1.2021. <https://www.sarlin.com/blogi/turbokompressori-puristaa-ilman-hyv%C3%A4ll%C3%A4-hy%C3%B6tysuhteella/>
- Business Finland. (n.d.) *Energiatuki*. Haettu 27.4.2021. <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/energiatuki>
- Ellman, A., Hautanen, J., Järvinen, K., & Simpura, A. (2002). *Pneumatiikka*. Helsinki: Edita.
- Fonselius, J., Korhonen, J., Pekkola, K., Saarineva, J., & Opetushallitus. (1993). *Koneautomaatio: Pneumatiikka*. Helsinki: Painatuskeskus.
- Keinänen, T., & Kärkkäinen, P. (2005). *Automaatiojärjestelmien hydrauliiikka ja pneumatiikka*. Helsinki: WSOY.
- Metsä Board. (2021). *Vuosikertomus 2020*. Haettu 28.2.2021. <https://www.metsaboard.com/MaterialArchive/Annual-reports-and-summaries/Metsa-Boardin-vuosikertomus-2020.pdf>
- Metsä Board. (n.d.). *Kaskinen pulp mill*. Haettu 10.3.2021. <https://www.metsaboard.com/About-Us/Kaskinen-pulp-mill/Pages/default.aspx>
- Metsä Board Oyj. (2018, Marraskuu 14). *Metsä Board investoi kapasiteetin kasvattamiseen Kaskisten kemihierretehtaalla*. Haettu 5.1.2021. <https://www.metsaboard.com/Media/Porssi-ja-lehdistotiedotteet/Pages/tiedote.aspx?EncryptedId=3856FC7F4736E6BD&Title=MetsaBoardinvestoikapasiteetinkasvattamiseenKaskistenkemihierretehtaalla>

- Metsä Board Kaskinen. (2020). *Paineilmajärjestelmän analyysi*. Sisäinen raportti.
- Metsä Group. (n.d.). *Metsän vuosi 2020*. Haettu 5.3.2021.
<https://www.metsagroup.com/fi/yhtio/metsan-vuosi/Pages/default.aspx>
- Motiva. (n.d.). *Energiatehokas paineilmajärjestelmä Osa 1/2*. Haettu 10.2.2021.
https://www.motiva.fi/files/1568/Energiatehokas_paineilmajarjestelma_OSA1.pdf
- Motiva. (n.d.). *Energiatehokas paineilmajärjestelmä Osa 2/2*. Haettu 10.2.2021.
https://www.motiva.fi/files/1569/Energiatehokas_paineilmajarjestelma_OSA2.pdf
- Motiva Oy. (2006, Tammikuu 25). *PATE-analyysi – Paineilman energia-analyysimalli*. Helsinki. Haettu 10.2.2021. https://www.motiva.fi/files/7890/PATE-analyysi_Paineilman_energia-analyysimalli.pdf
- Motiva Oy. (n.d.). *Energiakatselmoijan käsikirja*. Haettu 16.3.2021.
<http://www.motiva.fi/files/1720/kat-energiakatselmoijan-kasikirja-osa-3-2-A.pdf>
- Palenius, P. (2020, Joulukuu 28). *Kompressorin valinta - mikä on oikea kompressori mihinkin käyttötärpeeseen?* Haettu 16.3.2021.
<https://www.sarlin.com/blogi/kompressorin-valinta-mik%C3%A4-on-oikea-kompressori-mihinkin-k%C3%A4ytt%C3%B6tarpeeseen/>
- Tamturbo Oyj. (n.d.). *Touch-Free. Oil-Free. Care-Free*. Haettu 9.3.2021.
https://www.tamturbo.com/app/uploads/tamturbo_brochure_FIN_12-31.pdf
- Öster, H., & Motiva. (2012). *Paineilma-analyysi tuo säästöjä*. Haettu 10.2.2021.
https://www.motiva.fi/files/6017/Paineilma-analyysi_tuo_saastoja.pdf

Litteet

Liite 1. Ote paineilmajärjestelmän analyysistä

Compressor	Atlas Copco - ZR4 - K2	Atlas Copco - ZR4 - K3	Atlas Copco - ZR250FF - K4	Total
Nominal Power	250	250	250	750
Measurement Period	24:00:00	24:00:00	24:00:00	
Running Time	23:57:12	0:08:30	24:00:00	
Load Time	2:34:03	0:00:09	22:34:03	
Unload Time	21:23:09	0:08:21	1:25:57	
Stop Time	0:02:48	23:51:30	0:00:00	
Power Min. (1min avg)	0	0	161.5	
Power Max. (1min avg)	251.2	170	260.2	
Power Avg. (1min avg)	140.7	0.9	246	387.6
Output Min. (1min avg)	0	0	18.7	
Output Max. (1min avg)	26.7	5	43.6	
Output Avg. (1min avg)	3.7	0	41	44.7
In Use %	10.70 %	0.00 %	94.00 %	
Load time %	10.70 %	0.00 %	94.00 %	
Running time %	99.80 %	0.60 %	100.00 %	
Total energy kWh	3376	21.5	5903	
Total energy kWh(integrated)	3376.08	21.55	5903.21	
Unload energy kWh	2634.72	20.88	131.41	
Power Avg / Output Avg	37.58	246.23	6	8.67

ON RESERVE