

Metropolia
Ammattikorkeakoulu

Insinööriytyö

Matti Kuukka

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Kemiantekniikan koulutusohjelma

Matti Kuukka

**Kirkniemen paperitehtaan paineilmanjärjestelmän
energiatehokkuus**

Insinööriyö 22.3.2010

Ohjaajat: käyttöpäällikkö Matti Muurinen
apulaisjohtaja Matti Korhonen
Ohjaava opettaja: lehtori Timo Meros

Tekijä Otsikko	Matti Kuukka Kirkniemen paperitehtaan paineilmaverkon energiatehokkuus
Sivumäärä Aika	76 sivua 22.3.2010
Koulutusohjelma	Kemiantekniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaajat Ohjaava opettaja	käyttöpäällikkö Matti Muurinen apulaisjohtaja Matti Korhonen lehtori Timo Meros
<p>Tämä insinöörityö on tehty Sappi Fine Paper Europe Kirkniemen paperitehtaalle. Insinöörityön aiheena oli Kirkniemen paperitehtaan paineilmajärjestelmän energiatehokkuus. Insinöörityön tarkoituksena oli tutkia paineilmaverkoston toimintaa. Painopiste työssä oli selvittää paineilmaverkoston painetasoa ja paineilman suuria kulutuskohteita. Työn tavoitteena oli saavuttaa säästöjä pienentämällä paineilmaverkoston painetta ja vähentämällä suurien kulutuskohteiden paineilman kulutusta.</p> <p>Insinöörityön tekeminen aloitettiin tutustumalla paineilman ja paineilman tuottamisen teoriaan. Teoriaosuuden jälkeen tutustuttiin Kirkniemen paperitehtaan paineilmalaitteisiin. Työssä tarkasteltiin tehtaan paineilmaverkoston nykytila ja etsittiin säästöjä paineilmaverkon paineenalentamisella ja yksittäisten kohteiden paineilman kulutusta vähentämällä.</p> <p>Insinöörityössä käytettiin apuna tehtaan omia seurantajärjestelmiä, joilla pyrittiin havainnoimaan paineilmanverkon painetasojen vaihtelua ja paineilman kulutusta. Suoritettujen koeajojen ja kokeiden tuloksia analysoitiin taulukkolaskentaohjelmalla, jolla laskettiin paineilman tuotannon energiankulutuksen prosentuaalinen säästö.</p> <p>Insinöörityötä tehdessä ilmeni erilaisia puutteita paineilmajärjestelmän seurannassa, paineilmantuotannon hallinnassa ja paineilmaverkon dokumentoinnissa. Tämän insinöörityön tulokset ja havaitut puutteet ovat hyvä lähtökohta Kirkniemen paperitehtaan paineilmajärjestelmän kokonaisvaltaiselle parantamiselle.</p>	
Hakusanat	paineilma, energiatehokkuus, selvitystyö, ilmapuhallukset

Author	Matti Kuukka
Title	Energy efficiency of compressed air in Kirkniemi paper mill
Number of Pages	76
Date	22 March 2010
Degree Programme	Degree Programme in Chemical Engineering
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor	Matti Muurinen, operations Manager PM3
Supervisor	Matti Korhonen, assistant Manager PQM Timo Meros, lecturer
<p>This Bachelor's thesis was commissioned by Sappi Fine Paper Europe Kirkniemi paper mill. The subject of this Bachelor's thesis was the energy efficiency of compressed air of the Kirkniemi paper mill. The purpose of this Bachelor's thesis was to investigate how the pressured air net is working. The main point was to investigate the pressure level of the pressured air net and the big consumers of the pressured air. The main focus of this Bachelor's thesis was to achieve energy savings by lowering the level of pressured air and reducing the usage of the compressed air.</p> <p>The theoretical part of this Bachelor's thesis focused on the fundamentals of the compressed air and the compressed air system. In practice part of this thesis focused the pressured air system of the Kirkniemi paper mill. The starting point of investigations was to examine present stage of the pressured air system. The aim was also to lower the level of the pressured air and reducing the usage of the pressured air in the big consuming points. For controlling the changes of the pressured air levels and consuming of the pressured air the factory's own control system were used. The results of the trial runs and the other experiments were analyzed with the spreadsheet program.</p> <p>During this thesis there were found many weakness in the measuring of the pressured air system, controlling the produce of the pressured air and documentation of pressured air system. The results of this Bachelor's thesis is a good starting point for the improving the consumption of compressed air in Kirkniemi paper mill.</p>	
Keywords	compressed air, energy efficiency, research, air blows

Sisällys

Tiivistelmä

Abstracts

1	Johdanto	7
2	Paineilman perusteet	9
2.1	Paineilman käyttötavat	10
2.1.1	Sylinteripneumatikka	10
2.1.2	Pyörivät liikkeet	10
2.1.3	Paineilman itsensä tekemä työ	11
2.2	Paineilman yleisiä ominaisuuksia	11
2.3	Paineilmajärjestelmä	13
3	Paineilman tuotto	13
3.1	Dynaamiset kompressorit	14
3.2	Staattiset kompressorit	14
3.3	Jälkijäähdytys	16
3.4	Paineilman laatuvaatimukset	16
3.4.1	Vesi paineilmassa	17
3.4.2	Öljy paineilmassa	18
3.4.3	Kiinteät epäpuhtaudet paineilmassa	18
3.5	Kompressorityyppien työkierröt	19
3.5.1	Mäntätyyppisen kompressorin työkierto	21
3.5.2	Ruuvi- ja lamellikompressorin työkierto	21
4	Paineilmajärjestelmä Kirknien paperitehtaalla	22
4.1	H-tehtaan paineilmalaitteet	24
4.2	A-tehtaan paineilmalaitteet	27

4.3 Paineilmajärjestelmän toiminta	28
5 Paineilman kulutuskohteet	29
5.1 Paineilman kulutuskohteet H-tehdas	30
5.2 Paineilman kulutuskohteet A-tehdas	31
6 Paineilmaverkon toiminnan tarkastelu	32
6.1 H-tehtaan paineilmaverkosto	34
6.2 A-tehtaan paineilmaverkosto	36
6.3 Paineilmaverkoston muut osastot	37
7 Koeajot	37
7.1 Käytetyt laitteet ja menetelmät	37
7.2 Verkoston paineenalennus koeajot	38
8 Muut tutkimukset	43
8.1 PK 1:n päällystysasemien puhallusputket	44
8.2 PK 3:n rehupuhallus	44
8.3 PPK 3:n aukirullainsaumaustapahtuma	45
8.4 PPK 3:n kiinnirullainkonerullan vaihtotapahtuma	46
8.5 Yhdysventtiilin toiminta	47
9 Tulokset	48
9.1 Paineilmaverkoston paineen alentaminen	49
9.2 Yksittäiset suuret kulutuskohteet	54
9.2.1 PK 1:n päällystysasemien puhallusputket	55
9.2.2 PK 3:n rehupuhallus	56
9.2.3 PPK 3:n aukirullaimen saumaustapahtuma	57
9.2.4 PPK 3:n kiinnirullaimen konerullan vaihtotapahtuma	59
10 Tulosten tarkastelu	61

10.1 Yhdysventtiilin toiminta	61
10.2 Verkoston paineenalennus	61
10.3 Yksittäiset suuret kulutuskohteet	63
10.4 Paineilmaverkoston toimivuus	64
11 Yhteenveto	66
Lähteet	67
Liitteet	
Liite 1: Kuvakaappaus pieni trendi 7,5 min	68
Liite 2: Tehot ennen paineenalennusta	69
Liite 3: Tehot paineen alennuksen jälkeen	70
Liite 4: Tehot ennen paineenalennusta 2 vrk	71
Liite 5: Tehot paineen alennuksen jälkeen 2 vrk	73
Liite 6: PPK3:n rehupuhallus Ar 5,8 bar	75
Liite 7: PPK3:n rehupuhallus Kr 5,8 bar	76

1 Johdanto

Sappi Ltd on maailmanlaajuinen paperia ja paperinvalmistusmassaa tuottava yritys. Yrityksen vuotuinen liikevaihto on noin 5 miljardia USD, ja yrityksen palveluksessa on noin 17400 ihmistä eri puolilla maailmaa.

Lohjalla sijaitseva Kirkniemen paperitehdas kuuluu Sappi Fine Paper Europe -divisioonaan. Kirkniemessä on kolme paperikonetta, joista paperikone 1 (PK 1) ja paperikone 2 (PK 2) tuottavat aikakauslehti paperia noin 370 000 t/a. Paperikone 3 (PK 3) valmistaa hienopaperia noin 370 000 t/a. PK 1 ja 2 muodostavat A-tehtaan ja PK 3 H-tehtaan.

Tehdasalueella sijaitsee myös voimalaitos, joka tuottaa mm. maakaasua ja puunkuorijätettä polttamalla paperinvalmistuksessa tarvittavaa sähköä ja höyryä. Voimalaitoksen toiminnan yhteydessä on tehtaan vesihuolto, joka sisältää tuoreveden toimittamisen eri konelinjoille ja jäteveden käsittelyn.

Paperikonelinjojen yhteydessä sijaitsee kaksi hiomolaitosta, joissa valmistetaan paperikoneiden tarvitsema mekaaninen massa. Kemiallinen massa (sellu) ja monet muut raaka-aineet toimitetaan tehtaalle juna- tai autokuljetuksella.

Paineilma on hyödyke, jota käytetään paljon paperinvalmistusteollisuudessa. Paineilmaa tuotetaan kompressoreilla, jotka saavat käyttövoimansa sähkömoottoreilta. Nykypäivänä teollisuus on alkanut tiedostaa energiansäästön ja energiatehokkuuden merkityksen. Yleisesti teollisuuden aloilla paineilman tuotannon kustannuksista 75 - 80 % on sähkön käytöstä johtuvia energiakustannuksia.

Erinäisissä tutkimuksissa on todettu, että paineilmaa käytetään teollisuudessa melko huolettomasti. Energiatehokkuudet ovat matalia, käyttökohteissa tuhlataan ilmaa, pienistä vuodoista ei piitata ja paineilmajärjestelmän paine pidetään korkealla ”varmuuden vuoksi”. (7,s.3).

Paineilmajärjestelmän energiatehokkuuden parantamiseksi voidaan suorittaa verkoston toimintaa tarkasteleva mittaus, jolla luodaan kokonaiskuva energiankulutuksesta ja toiminnan tehokkuudesta. Kirkniemen paperitehtaalla on suoritettu useita paineilmaan liittyviä tutkimuksia, joiden johdosta energian kulutusta on saatu pienennettyä kymmeniä prosentteja.

Tämä insinööriyö on tutkimus- ja kehitystyö, jonka tarkoituksena on parantaa Kirkniemen paperitehtaan paineilmajärjestelmän energiatehokkuutta. Tavoitteena olisi saavuttaa huomattava energiankulutuksen aleneminen paineilman tuotannossa sekä lisätä tehtaassa työskentelevien ihmisten tietoisuutta paineilman energiatehokkaasta käytöstä.

2 Paineilman perusteet

Paineilma on ylipaineista ilmaa, jota käytetään laajasti eri tarkoituksiin. Tunnetuin sovellus paineilmasta lienee ilman pumppaaminen polkupyörän renkaaseen. Rengasta täytettäessä pumpun avulla normaalipaineinen ilma muutetaan paineilmaksi ja samalla lihasenergia muutetaan pneumaattiseksi energiaksi.

Täytettäessä rengasta pumpulla tai tehtäessä kompressorin avulla paineilmaa pienennetään tietyn ilmamäärän normaalia tilavuutta, jolloin molekyylien väliset vetovoimat muuttuvat työntövoimiksi eli paineeksi. Työntövoiman määrä kuvaa paineilmaan varastoitunutta energiaa. Energian määrä on sitä suurempi, mitä suurempia ovat ilmatilavuus ja paine. (7,s.2).

Paineistetun ilman käyttämistä tehonsiirtoon kutsutaan pneumatiikaksi. Pneumatiikkaa käytetään lähes kaikilla teollisuuden aloilla, kuten metalli-, auto-, lentokone-, kaivos-, puhelin-, sähkö-, puunjalostus-, muovi-, kumi-, elintarvike-, tekstiili- ja lääketeollisuudessa sekä avaruustekniikassa. Vanhimpia pneumatiikan sovellutuksia on noin 2000 vuotta sitten rakennettu paineilmalla toimivat katapultti. Paineilman teollinen käyttö alkoi 1800-luvulla, jolloin kaivostoiminnassa ryhdyttiin hyödyntämään paineilmaa. (7,s.4).

Nykyisin teollisuudessa käytettävä pneumatiikka on hyvin nuori tekniikan ala. Suomessa pneumaattiset komponentit tulivat yleiseen käyttöön 1950-luvulla. Mekanisoinnin ja automatisoinnin yleistyessä on pneumatiikan käyttö lisääntynyt huomattavasti. Moni ihmiselle raskas, vaarallinen sekä vaarallisessa tai epämiellyttävässä ympäristössä tapahtuva ja toistoja vaativa työ voidaan suorittaa pneumatiikan avulla. (7,s.2).

2.1 Paineilman käyttötavat

Paineilman käyttö voidaan jakaa kolmeen ryhmään: sylinteripneumatiikkaan, pyörivien liikkeiden aikaansaamiseen ja paineilman itsensä suorittamaan työhön (ilmapuhalluksiin) (7,s.2).

2.1.1 Sylinteripneumatiikka

Sylinteripneumatiikkaa käytetään yleensä suoraviivaisten liikkeiden aikaansaamiseen. Se on hyvin laaja pneumatiikan osa, ja sitä voidaan soveltaa monilla teollisuuden aloilla mitä erilaisimpiin tehtäviin. Sylinteripneumatiikan käyttösovellukset ovat melko yksilöllisiä, joten tarvittavia koneita ja laitteita ei ole valmiina. Jokaista tapausta varten rakennetaan vakiokomponentteja hyväksi käyttäen toimiva kokonaisuus.

2.1.2 Pyörivät liikkeet

Pyörivien liikkeiden aikaansaamiseen tarvitaan erilaisia paineilmamoottoreita. Paineilmamoottoreille ominaista on niiden valmis käyttösovellus. Tarvitsee vain liittää kone paineilmaverkostoon ja kääntää käyttökytkimestä, niin liike alkaa tai pysähtyy. Yleisimpiä sovelluksia ovat paineilmalla toimivat työkalut, esimerkiksi mutterin- ja ruuvinvääntimet sekä pora- ja hiomakoneet.

2.1.3 Paineilman itsensä tekemä työ

Paineistetun ilman itse tekemiä töitä ovat ruiskumaalaus, sekä hiekka-, puhdistus- ja jäähdytyspuhallukset. Aineensiirtotekniikassa voidaan esimerkiksi jauhemainen aine siirtää paineilman avulla kuljetusautosta varastosiiloon. Paineilmaa voidaan käyttää kumisen renkaan tai palkeen sisällä vaimentimena, esimerkkinä autonrenkas.

2.2 Paineilman yleisiä ominaisuuksia

Paineilma on erittäin helppokäyttöinen väliaine, ja sillä on monia hyviä ominaisuuksia, joiden ansiosta sitä kannattaa käyttää moniin käytännön sovelluksiin. Paineilmajärjestelmän parhaat hyödyt ovat yksinkertaisuus ja edullinen hankintahinta. Pneumaattisen energian ja voimansiirron merkittävimminä etuina muihin energiamuotoihin (mekaaninen, sähköinen ja hydraulinen) verrattuna ovat varastoimisen helppous ja voimansiirron hyvät välitysominaisuudet. Suurimpana heikkoutena voidaan pitää huonoa hyötysuhdetta. (7,s.4).

Paineilman siirtäminen putkistoja pitkin on helppoa. Ilmalla on hyvät välitysominaisuudet, koska sen dynaaminen viskositeetti on pieni. Tämä virtauksessa syntyvä sisäinen kitka pysyy pienenä, vaikka käytettäisiin suuriakin virtausnopeuksia ja pitkiä siirtoetäisyyksiä. Pitkiä siirtoetäisyyksiä voidaan käyttää myös paluuputkiston tarpeettomuuden vuoksi, koska koneen tekemään työhön käytetty paineilma on käytön jälkeen pelkkää ilmaa.

2.3 Paineilmajärjestelmä

Paineilmajärjestelmä koostuu kompressorista, jälkikäsittelylaitteista, paineilmasäiliöstä, paineilmaverkostosta, toimintaa ohjaavista venttiileistä ja toimilaitteista. Paineilmajärjestelmä on kokonaisuus, jonka jokainen komponentti on mitoitettu vastaamaan toisiaan. Hyvin suunnitellun järjestelmän tavoitteena on tuottaa mahdollisimman taloudellisesti paineilmaa, joka vastaa laadultaan kulloisiakin tarpeita. (8,s.10).

Paineilmajärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon tarvittavan ilman tai muun kaasun parametrit. Kyseisiä parametreja ovat verkostonpaine, kulutuksen määrä, kulutuksen vaihtelu, käyttövarmuus ja paineilman laatu. Paineilman laatuvaatimuksissa kiinnitetään huomio kosteuden määrään, kokonaisöljymäärään ja kiinteisiin epäpuhtauksiin.

3 Paineilman tuotto

Paineilman tuottamiseen käytetään kompressoria, jonka avulla nostetaan kaasumaisen väliaineen (fluidi) painetta vähintään kaksinkertaiseksi kompressorin imupaineeseen verrattuna. Kompressorin on tuotettava käyttötarkoitukseen sopivaa ilmaa. Käyttötarve voi vaihdella paineen osalta muutamasta baarista jopa 200 baariin ja tarvittava ilmamäärä voi vaihdella muutamasta litran minuuttituotannosta kymmenien kuutioiden sekuntituotannoksi. Tämän johdosta ei ole olemassa yhtä kompressorityyppiä, jolla voitaisiin tuottaa tehokkaasti ilmaa erilaisiin käyttötarpeisiin. Kompressorit jaetaan toiminta tapansa mukaan dynaamisiksi ja staattisiksi kompressoreiksi. (5;10,s.1).

Kompressorin todellinen ilmantuottomäärä on aina pienempi kuin työtä tekevän sylinterin tai roottorin siipien välin tilavuuden iskutilavuusvirta. Syynä häviöihin ovat jäännöstilavuuden vaikutus, sisäiset kaasuvuodot, ulkoiset kaasuvuodot, imuilman kuristus imukanavissa ja imuilman lämpeneminen imukanavissa. Kompressorin tuottosuhte määritellään todellisen ilmantuoton ja iskutilavuusvirran suhteeksi. Kompressorin vaatima akseliteho on aina suurempi kuin isentrooppisen tai isotermisen puristusprosessin mukaan laskettu tehontarve. (11,s.5).

Kompressorissa syntyvät tehohäviöt jaetaan puristustyön häviöihin ja mekaanisiin häviöihin, jotka ilmenevät lisääntyvänä lämmönkehityksenä. Puristustyön häviöt johtuvat paineaukon tai paineventtiilien virtausvastuksista, imuvirtauksen kuristuksesta ja lämpenemisestä, kaasuvuodoista sekä puristuksen poikkeamisesta isotermisestä ihanneprosessista. Mekaaniset häviöt syntyvät kompressorin liikkuvien osien kitkasta. (5;11,s.5).

Hyötysuhteen parantamisen, tuottosuhteen nostamisen, lämpötilojen hallinnan ja suuren loppupaineen vuoksi puristusprosessi jaetaan useisiin vaiheisiin. Puristusvaiheiden välillä ilma jäähdytetään ja yhdessä puristusvaiheessa paine voidaan nostaa 2,5–3,5-kertaiseksi. (5;11,s.5).

3.1 Dynaamiset kompressorit

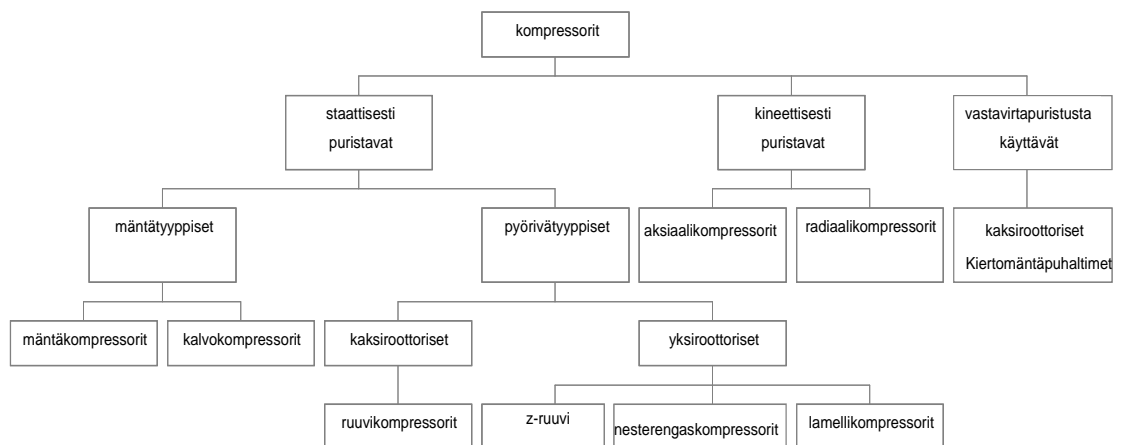
Dynaamisessa kompressorissa ilma virtaa siivistöllä varustetun pyörivän juoksupyörän läpi, joka kiihdyttää ilman suureen nopeuteen. Seuraavaksi ilma ohjataan johtolaitteeseen, joka muuttaa ilman liike-energian paine-energiaksi. Dynaamiset kompressorit tunnetaan myös nimellä turbo-kompressorit, jotka soveltuvat suurten tilavuusvirtojen tuottamiseen suhteellisen pienellä paineella. Toimintatapansa mukaan turbo-kompressorit jaetaan aksiaali- ja radiaalikompressoreiksi. (10,s.2).

3.2 Staattiset kompressorit

Staattinen kompressori on ilmapirtaa syrjäyttävä kompressori, jossa ilma virtaa kammioon, jonka tilavuutta pienentämällä ilman staattinen paine kasvaa. Puristusvaiheen jälkeen ilma ohjataan paineliitäntään. Staattiset kompressorit jaetaan toimintatapansa mukaan oskiloiviksi ja pyöriväroottorisiksi kompressoreiksi. Oskiloivia kompressoreita ovat esimerkiksi yksi- ja kaksivaiheinen mäntäkompressori ja kalvotyyppinen mäntäkompressori. Pyöriväroottorisia kompressoreita ovat ruuvikompressori, lamellikompressori, nesterengaskompressori ja siipityyppinen roots-kompressori (10,s.3-6).

Staattiset kompressorit tuottavat korkean paineen pienellä tilavuusvirralla, joten ne soveltuvat useimmiten parhaiten teollisuuden tarpeisiin.

Kuvassa 1 on esitetty kompressoreiden jako eri luokkiin toimintatapansa mukaan (8,s.12).



Kuva 1. Kompressorien jako eri luokkiin toimintatavan mukaan (8,s.12).

3.3 Jälkijäähdytys

Paineilmajärjestelmässä on kompressorin jälkeen kompressoriin integroitu tai erillinen jälkijäähdytin. Jälkijäähdyttimen tarkoituksena on lämmönvaihtimen avulla jäähdyttää paineilman puristuksessa nousutta lämpötilaa. Samalla jälkijäähdytin toimii paineilmaan sitoutuneen veden esierottelijana.

Kompressorissa tapahtuvan puristusvaiheen aiheuttaman paineen nousun jälkeen paineilman lämpötila on noin 80 °C ja suhteellinen kosteus lähes 100 %. Jälkijäähdyttimellä voidaan paineilman lämpötila laskea lähelle imuilman lämpötilaa (yleensä noin 20 °C). Energiatalouden kannalta jäähdyttäminen ei olisi järkevää, koska paineilmasta saatava työ on suoraan verrannollinen paineilmaan sitoutuneeseen lämpötilaan. Jäähdytys on kuitenkin yleensä välttämätöntä paineilman kuivauksen kannalta. Useissa kohteissa jälkijäähdyttimessä käytetään lämmönsiirtoaineena raakavettä, joka usein vastoin energiatehokkuutta johdetaan lämpimänä viemäriin. (1).

3.4 Paineilman laatuvaatimukset

Kompressorin jälkeen paineilmassa on aina epäpuhtauksia, jotka johtuvat kompressorin imuilmanotto paikasta ja kompressorista itsestään. Haitallisimpia epäpuhtauksia ovat vesi, öljy, kiinteät epäpuhtaudet (pöly), ympäristön kaasut sekä bakteerit, virukset ja organismit. Paineilman käyttötarkoitus ratkaisee, mitkä näistä epäpuhtauksista tulee poistaa. Paineilmassa olevat epäpuhtaudet voivat aiheuttaa toimilaitteisiin häiriöitä tai jopa suoranaisia laiterikkoja. (5;9,s.1).

Paineilma kannattaa käsitellä siihen laatutasoon, jonka toimilaitteet ja käyttötarkoitus vaativat. Puhdistaminen ja varsinkin ylipuhdistaminen aiheuttaa aina paineilmajärjestelmässä paineen alenemisen, minkä johdosta paineilman tuottaminen on kalliimpaa. Paineilma on jaoteltu laatuluokkiin paineenalaisen

kastepisteen (veden määrä), kokonaisöljymäärän ja kiinteiden epäpuhtauksien mukaan.

3.4.1 Vesi paineilmassa

Vesi on paineilmajärjestelmän pahin vihollinen. Imuilman mukana tullut vesihöyry tiivistyy paineilmaputkistossa lämpötilan alentuessa ja aiheuttaa ongelmia paineilmajärjestelmässä. Paineilmassa oleva vesi aiheuttaa korroosiota, toimintahäiriöitä ja ulkotiloissa jäätymisvaaran toimilaitteisiin. Paineilmassa olevan veden määrää ilmaistaan kastepisteellä. Mitä alhaisempi kastepiste (esim. -35 °C), sitä vedettömämpää on paineilma. (2;5).

Paineilmassa oleva vesi voidaan poistaa erilaisilla kuivausmenetelmillä. Jälkijäähdytyksessä puristuksen jälkeen osa vedestä kondensoituu. Kondensoitunut vesi erotetaan veden erottimissa. Jäähdytyskuivauksessa paineilman lämpötilaa lasketaan ja tiivistyvä vesi poistetaan, minkä jälkeen paineilman annetaan lämmitä takaisin käyttölämpötilaan. Ylipuristuksessa paineilma puristetaan käyttöpainetta korkeampaan paineeseen ja jäähdytetään, jolloin vesi tiivistyy ja se voidaan poistaa. Tämän jälkeen paineilman annetaan laajentua käyttöpaineeseensa. Ylipuristus on erittäin epäedullinen kuivatustapa, jota käytetäänkin vain hyvin pienissä paineilmalaitoksissa.

Absorptiokuivauksessa vesi imeytetään suoloihin tai glykoliin. Suolan kanssa syntynyt liuos poistetaan paineilmajärjestelmästä ja glykoliin imeytynyt kosteus poistetaan lämmittämällä. Adsorptiokuivauksessa paineilmassa oleva vesi imeytetään esimerkiksi silikageeliin. Silikageeli regeneroidaan kuivaimessa lämmön ja kuivan ilman avulla, jolloin osa silikageelistä on käytössä kuivaimena ja osa puhdistumassa imeytyneestä vedestä. Adsorptiokuivauksella saavutetaan hyvin matala kastepiste, jolloin paineilma sopii jäätymättä ulkokäyttöön.

3.4.2 Öljy paineilmassa

Voidelluissa kompressoreissa osa voiteluöljystä siirtyy paineilman joukkoon. Paineilmassa pisaroina, sumuna tai kaasuna ilmenevä öljy voidaan poistaa mekaanisesti suodattamalla, coalescing-suodattimella tai adsorptiolla.

Mekaanisessa suodatuksessa paineilma johdatetaan verkko- tai reikäsuodattimen läpi, johon öljypisarot sitoutuvat. Coalescing-suodatuksessa paineilman öljysumu törmää ohuista kuiduista valmistettuun suodattimeen. Kuiduissa öljyhiukkaset yhdistyvät suuremmiksi ja valuvat alaspäin.

Adsorptiosuodatuksessa paineilmassa oleva kaasumainen öljy sitoutetaan aktiivihiiisuodattimeen. Aktiivihiiisuodattimella voidaan poistaa myös muita hiilivety-yhdisteitä. Öljyttömät kompressorit valitaan, kun tarvitaan suuria ilmamääriä tai paineilmaverkko on suuri ja korkeapaineinen.

3.4.3 Kiinteät epäpuhtaudet paineilmassa

Kiinteät epäpuhtaudet poistetaan erilaisilla mekaanisilla suodattimilla. Suodattimet voidaan sijoittaa imuilman ja puristetun ilman puolelle.

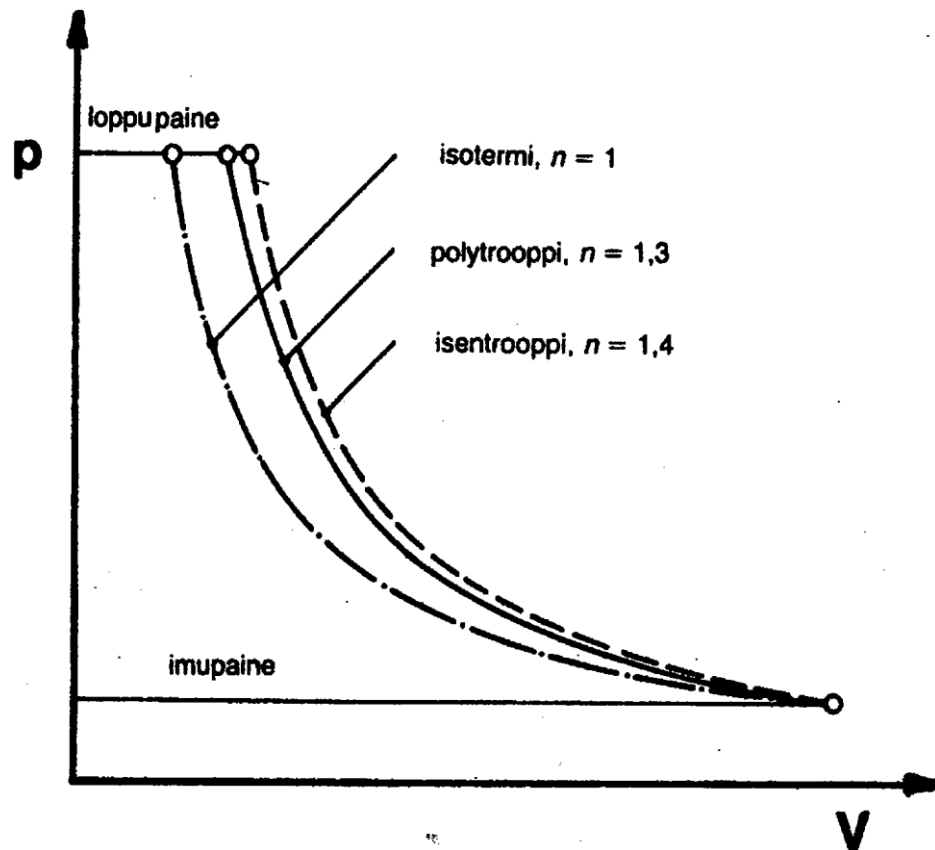
Ympäristön kaasut (esim. saasteet) pyritään välttämään sijoittamalla imuilman otto mahdollisimman puhtaaseen paikkaan. Kriittisissä kohteissa voidaan käyttää imuilmassa eriasteisia kaasupesureita. Poistamattomat kaasut voivat aiheuttaa paineilmajärjestelmässä korroosiovaurioita.

Bakteerit, virukset ja organismit poistetaan paineilmasta steriilisuodattimilla. Kyseisen tasoista paineilmaa käytetään lähinnä sairaaloissa ja lääkelaitoksissa. Steriili suodatus on melko hankalaa ja kallista, koska laitteistot on puhdistettava ja sterilisoitava lähes päivittäin.

3.5 Kompressorityyppien työkierrot

Kaasun puristamisessa käytetään kolmea perusmenetelmää, jotka ovat staattinen puristus, kineettinen puristus ja vastavirtapuristus. Puristuksen luonne voi olla isoterminen, isentrooppinen eli adiaapaattinen tai polytrooppinen. Isotermisessä puristuksessa ilmaa jäähdytetään puristuksen aikana poistamalla yhtä suuri lämpömäärä kuin tehty puristustyö. Isentrooppisessa puristuksessa ilmaa ei jäähdytetä puristuksen aikana, jolloin kaikki puristustyön energia jää paineilmaan. Tällöin paineenalainen ilma lämpenee eikä ympäristöön siirry lämpöä. Polytrooppisessa puristuksessa ilmaa jäähdytetään puristuksen aikana, mutta poistettu lämpömäärä on pienempi kuin tehty puristustyö. (5;10,s.9).

Kuvan 2 mukaista työnkiertoa voidaan soveltaa kaikille kompressorityypeille, Kuvasta saadaan karkeahko käsitys kompressorin toiminnasta. (10,s.10).



Kuva 2. Kompressorin työkiertokäyrä paine-tilavuuskoordinaatistossa (10,s.10).

Kuvassa 2 näkyvän polytrooppikäyrän voidaan katsoa parhaiten kuvaavan kompressorin työkiertoa. Teoriassa isentrooppinen prosessi on häviötön, palautuva ja ideaalinen. Todellisuudessa kaikissa prosesseissa on häviöitä ja ne ovat palautumattomia, mikä aiheuttaa entropian kasvua ja vaatii prosessiin tuotua ulkopuolista energiaa. Kuvan 2 käyrän ja y-akselin sisälle jäävän alueen pinta-ala kuvaa puristukseen käytettävää energian määrää. (5;6,s.204–210).

Todellisessa kompressorissa puristuskäyrät jäävät hyvinkin kauas isotermisestä puristuksesta. Isentrooppisen puristustyöhön käytetyn energian määrän suhde kasvaa sen mukaan, mitä suurempiin paineisiin mennään. Suuret painesuhteet

ovat epätaloudellisia, ellei puristettavaa ilmaa pystytä jäähdyttämään puristustapahtumassa (polytrooppikäyrä). Hyötysuhteen parantamiseksi kannattaa paineennosto suorittaa useammassa vaiheessa. Kaksivaiheisen puristuksen laskennallinen säästö verrattuna yksivaiheiseen on noin 15 %. Energiatalouden kannalta on edullisinta valita kaikkien puristusvaiheiden painesuhteet yhtä suuriksi. Painesuhteiden ollessa samat on puristusvaiheessa tehty työn määrä sama ja kokonaistyö minimissään. (5;6,s.204–210;10,s.15).

3.5.1 Mäntätyyppisen kompressorin työkierto

Mäntätyyppisten kompressoreiden venttiilit ovat automaattiventtiileitä, joiden toiminta perustuu paine-eroon. Venttiililevyt tai venttiililamellit painautuvat jousivoimalla kiinni. Kiinni olevan venttiilin eripuolille syntyy paine-ero, joka riittävän suurena voittaa jousivoiman ja avaa venttiilin. Avautumispaine-eron tulee vallita sekä imu- että poistovaiheissa. Tämä näkyy työkierrossa, joskin suurin syy paine-eroihin on venttiileissä tapahtuva kuristus. Männän tai kalvon ollessa yläkuolokohdassa sylinterin ja männän väliin jää pieni tilavuus, josta paineenalaista ilmaa ei saada talteen poistoventtiilin kautta. Jäännöstilavuus on yleensä noin 3-10 % sylinterin tilavuudesta. (5).

3.5.2 Ruuvi- ja lamellikompressorien työkierto

Ruuvi- ja lamellikompressoreiden työkiertoon vaikuttavat kaasunvaihtohäviöt ja sisäiset vuodot. Imuvaiheessa roottoreiden välinen tila täyttyy lievän alipaineen vallitessa. Imuaukon sulkeutumishetkellä paineaukko avautuu, jolloin paineenalainen ilma puristuu roottoreiden välisessä tilassa. Pyörivätyyppisten kompressoreiden työnkierrossa on imu- ja siirtovaiheessa samantapaiset kuristus- ja paine-erot kuin mäntätyyppisessä kompressorissa. Puristus- ja siirtovaiheessa paineenalainen ilma pyrkii virtaamaan välysten kautta kohti

imupuolta. Jäännöstilavuutta ruuvi- ja lamellikompressoreiden puristustilaan ei merkittävästi jää. (10,s.15–16).

4 Paineilmajärjestelmä Kirkniemen paperitehtaalla

Paineilmaa tuotetaan seitsemällä kompressorilla A- ja H-tehtaan paineilmaverkkoihin. Kompressoreista kolme sijaitsee PK 3:n alakerrassa, ja ne tuottavat tehdas- ja instrumentti-ilmaa PK 3:n ja EMT:n tarpeisiin. Loput neljä kompressoria sijaitsevat voimalaitoksella, ja ne tuottavat tehdasilmaa (puhallusilmaa) ja instrumentti-ilmaa (säätöilmaa) voimalaitoksen, PK 1:n, PK 2:n ja hiomon tarpeisiin. Nämä eri paineilmaverkot on liitetty toisiinsa yhdysventtiilillä, joka sijaitsee EMT:n alakerrassa. Yhdysventtiili mahdollistaa esimerkiksi huoltotapauksissa yhden tai useamman kompressorin irtikytkemisen paineilmaverkosta sallien paineilman kulkeutumisen verkosta toiseen.

Jokaisella paperikonelinjalla paineilma on jaettu kahteen rengasverkkoon. Toinen verkko on tehdasilma (puhallusilma) -verkko, josta otettavaa ilmaa käytetään erilaisiin puhalluksiin. Toinen rengasverkko on instrumentti-ilma (säätöilma) -verkko josta otettavaa ilmaa käytetään pneumaattisiin toimilaitteisiin. Paineilmaverkko on pääsääntöisesti rakennettu ruostumattomasta teräsputkesta, mutta vanhemmissa tehtaan osissa, jotka on rakennettu jo 1960-luvulla, löytyy myös mustasta raudasta ja jopa kupariputkesta tehtyjä verkon osia.

Paineilmaa tuotetaan Atlas Copcon valmistamilla kompressoreilla. Taulukkoon 1 on koottu seitsemän paineilmakompressorin tekniset tiedot, joista ilmenee kompressoreiden tuottaman paineilman määrä ja kompressoreiden käyttämän sähkötehon määrä (1;3;4).

Taulukko 1. Taulukossa on esitetty Kirkniemen paperitehtaan kompressoreiden tekniset tiedot.

Kompressorit PK 3
(H-tehdas)

Kompressori	K1	K2	K3
Valmistaja	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco
Tuotto l/s	1022	1022	1022
Tuotto m ³ /min	61,3	61,3	61,3
Teho kuormitettuna kW	347	347	347
Teho kevennettynä kW	54	54	54
Max. Käyttöpaine bar	8,5	8,5	8,5

Kompressorit voimalaitos
(A-tehdas)

Kompressori	K4	K5	K6	K7
Valmistaja	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco	Atlas Copco
Tuotto l/s	940	940	1022	1049
Tuotto m ³ /min	56,4	56,4	61,3	62,9
Teho kuormitettuna kW	346	346	347	379
Teho kevennettynä kW	51	51	54	67
Max. Käyttöpaine bar	8,5	8,5	8,6	7,5

Taulukossa 1 esitettyjen kompressoreiden teho kuormitettuna arvo on laitevalmistajan ilmoittama teho maksimipaineella (8,5 bar).

4.1 H-tehtaan paineilmalaitteet

H- tehtaan PK 3:n alakerrassa sijaitsevien kompressoreiden (K1, K2 ja K3) ohjaus on toteutettu Atlas Copcon ES 100 -vuorottelijalla, joka vaihtaa kompressoreiden käyntijärjestystä yhden vuorokauden välein, jolloin kompressoreiden käyntitunnit saadaan tasattua. Järjestelmä käynnistää ja pysäyttää kompressoreita ennalta määrätyn järjestyksen mukaan asetellun verkkopaineen vaihteluvälillä. Ohjainyksikkö on paikallisohjain, joka sijaitsee kompressoreiden välittömässä läheisyydessä.

H-tehtaalla sijaitsevat kompressorit on sijoitettu tehtaan alakertaan ulkoseinän viereen, jolloin imuilman ottaminen ulkoa on tarvittaessa helppoa. Imuilma voidaan ottaa myös tehdashallista, jonka lämpötila on ympäri vuoden noin 20 °C. Kompressoreiden imuilman maksimilämpötila on 40 °C ja minimilämpötila on 0 °C. Imuilman valinta suoritetaan käsin säätöpellillä. (1).

Kompressorit ovat kaksivaiheisia vesijäähdytteisiä sähkömoottorikäyttöisiä ruuvikompressoreita, jotka tuottavat öljytöntä ja sykkimätöntä paineilmaa. Kompressori ja sähkömoottori on sijoitettu samaan rakenteelliseen runkoon (kuva 3).



Kuva 3. Kompessori ja sähkömoottorikokonaisuus PK 3:n alakerrassa.

Haluttuun käyttöpaineeseen puristettu ilma johdetaan adsorptiokuivaimeen (kuva 4). Kuivaimen pääkomponenttina on roottori, joka on valmistettu vettä imevästä aineesta. Roottori pyörii hitaasti, ja sen läpi kulkee kaksi vastakkaista ilmavirtaa: märkä kuivattava paineilma ja kuuma paineilma, joka elvyttää kuivausaineen. Märkä puristettu ilma kulkee roottorin kolmen neljänneksen läpi ja kuuma jälkijähdyttämätön ilma puhalletaan roottorin yhden neljänneksen läpi. Roottori pyörii noin 7 kierrosta tunnissa. Jokaisella kolmella kompressorilla on oma kuivainyksikkö. (2).



Kuva 4. Pyörivärumpuinen adsorptiokuivain.

Kuivauksen jälkeen paineilma johdetaan suodatukseen. Jokaisen kompressorin kuivaimen jälkeen on oma korityyppinen esisuodatin (kuva 5), jonka suodinpatruunan tiheys on 10 μ . Esisuodatuksen jälkeen painelinjat yhdistyvät ja paineilma johdetaan yhteiseen jälkisuodatukseen. Jälkisuodinpatruunan tiheys on 1 μ , jolla saavutetaan tavoiteltu instrumentti-ilman puhtaustaso.



Kuva 5. Paineilmaesisuodatin.

Suodatuksen jälkeen paineilma jaetaan tehdas- ja instrumentti-ilmaksi, jotka toimitetaan kulutuskohteisiin.

4.2 A-tehtaan paineilmalaitteet

A-tehtaan voimalaitoksella sijaitsevien kompressoreiden (K4, K5, K6 ja K7) ohjaus on liitetty osaksi voimalaitoksen Alcont-automaatiojärjestelmää.

Kompressoreiden vuorottelun valintaa voidaan ohjata voimalaitoksen valvomosta operaattoreiden toimesta.

A-tehtaan kompressorit on sijoitettu voimalaitoksen alakertaan lähelle ulkoseinää, jolloin imuilman ottaminen onnistuu joko ulkoa tai sisältä, samoin kuin H- tehtaalla.

A-tehtaan kompressorit, kuivaimet ja suodattimet ovat toiminnaltaan yhtenevät H-tehtaan laitteiden kanssa.

A-tehtaan kompressoreista K6:lla ja K7:llä on yhteinen jälkisuodatin sekä kompressoreilla K4 ja K5 yhteinen jälkisuodatin. Esisuodattimien arvot on 10 μ ja jälkisuodattimien arvo 1 μ .

Suodatuksen jälkeen paineilma jaetaan puhallusilmaksi ja instrumentti-ilmaksi ja toimitetaan kulutuskohteisiin.

4.3 Paineilmajärjestelmän toiminta

Paineilmajärjestelmää ohjataan kolmesta paikasta: PK 3:n alakerrasta, voimalaitoksen valvomosta ja erikoismassatehtaan valvomosta. PK 3:n alakerrassa sijaitsevasta ES 100 -ohjauspaneelistä asetellaan kompressoreille K1, K2 ja K3 kuormitus- ja kevennysrajat, joiden välissä verkoston paine vaihtelee. Yleisesti käytössä on ollut 0,4 bar:n suuruinen vaihteluväli. (1).

Voimalaitoksen valvomosta asetellaan Alcont-automaatiojärjestelmään haluttu paineilmaverkoston paine, joka ohjailee kompressoreita K4, K5, K6 ja K7. Kun verkostonpaine laskee 0,15 bar alle asetusarvon käynnistyy ja kuormittuu pysähdyksissä oleva kompressori. Paineen laskun jatkuessa edelleen alle 0,25 bar asetusarvosta käynnistyy ja kuormittuu seuraava kompressori. Seuraavat kaksi kompressoria käynnistyvät verkostopaineen ollessa 0,35 ja 0,45 bar alle asetusarvon. Automaatiojärjestelmään asetellut kuormitus- ja kevennysrajat käynnistävät ja pysäyttävät tarvittavan määrän kompressoreita asetellun painetason ylläpitämiseksi.

Erikoismassatehtaan valvomosta hallitaan Alcont- automaatiojärjestelmän avulla A- ja H-tehtaan paineilmaverkkoja yhdistävän linjan säätöventtiiliä. Venttiili on yleensä automaatti-tilassa, jolloin se avautuu ja sulkeutuu venttiilin eri puolilta mitatun paine-eron mukaisesti. Poikkeustilanteessa venttiili ohjautuu automaattisesti kiinni.

5 Paineilman kulutuskohteet

Paineilmaa käytetään koko tehdasalueella lukuisissa kohteissa. Suuri yksittäinen kokonaisuus on pneumaattisesti toimivat laitteet, jotka ottavat käyttövoimansa instrumentti-ilmaverkosta. Suurimpina instrumentti-ilman kulutusta aiheuttavina ryhminä voidaan mainita venttiilien ohjaukset ja pneumaattiset toimilaitteet. Huomioitavaa on, että kyseiset toiminnot kuluttavat yhtä paljon paineilmaa riippumatta siitä, ovatko paperikoneet tuotannolla vai ei. Erilaisissa puhalluksissa käytettävän tehdasilmanverkon paineessa on normaalin tuotannon aikanakin kulutuksessa suuria vaihteluita, jotka huojuttavat koko paineilmaverkoston paineta. Tämän johdosta paineilman kulutuksen tarkastelussa keskityttiin puhallusilmaverkon suuriin yksittäisiin kulutuskohteisiin.

5.1 Paineilman kulutuskohteet H-tehdas

Tarkastelussa keskityttiin suurimpiin yksittäisiin hetkellisiin paineilman kulutuskohteisiin, joiden tiedettiin vaikuttavan eniten paineilmaverkon paineeseen ja vakauteen.

Paperikoneen alueella suurimpia paineilman kulutuskohteita ovat seisokin tai ratakatkon jälkeinen päänvientitapahtuma ja valmistuneen konerullan vaihto.

Paperikoneen radan päänvienti kuivatusosan läpi tapahtuu kapeana nauhana ilmapuhalluksien avulla. Kuivatusosa on noin 80 metriä pitkä kokonaisuus, joka käsittää 31 kuivatussylinteriä ja 30 vac-sylinteriä. Paperiraina on saatava kuivatusosan läpi päänviennin yhteydessä.

Paperikoneen valmistuvan konerullan poistossa käytetään radan katkaisuun paineilmapuhalluksia. Radan katkaisun jälkeen paineilmalla suoritetaan automaattinen rehupuhallus, jonka avulla pyritään poistamaan radankatkaisusta seuranneet paperisilput.

Päällystyskoneella suurimmat hetkelliset kulutushuiput ovat ajoon lähtevän konerullan saumaustapahtuma aukirullaimella ja valmistuvan konerullan vaihtotapahtuma kiinnirullaimella.

Aukirullaimella saumaustapahtumassa saumaustelan ja katkaisuterän liike aikaansaadaan paineilman avulla. Radankatkaisun jälkeen paineilmalla suoritetaan automaattinen rehupuhallus, jolla pyritään estämään syntyneen paperisilpun mahdollisesti aiheuttamat ratakatkot.

Kiinnirullaimella konerullan vaihtotapahtumasta syntynyttä paperisilppua poistetaan automaattisilla ja operaattorin toimesta ohjailtavilla kiinteillä rei'itetyillä puhallusputkilla.

Ratakatkotilanteissa syntyneen paperisilpun siivoamiseen (paperikone, päällystyskone, superkalanterit ja pituusleikkurit) käytetään puhalluspistooleita. Yhtäaikaisesti käytettävien pistoolien lukumäärä ja puhallusten pituus määräävät onko katkosiivouksella paineilmailmaverkkoa huojuttava vaikutus. Yleensä katkosiivoukset eivät laske niin paljon paineilmailmaverkoston painetta, että ylimääräisiä kompressoreita käynnistyisi.

5.2 Paineilman kulutuskohteet A-tehdas

Tarkastelussa keskityttiin suurimpiin yksittäisiin hetkellisiin paineilman kulutuskohteisiin, joiden tiedettiin vaikuttavan eniten paineilmailmaverkon paineeseen ja vakauteen.

A-tehtaan puolella sijaitsevat paperikoneet PK 1 ja PK 2 ovat toiminnoiltaan lähes samanlaiset kuin PK 3.

Paperikoneilla konerullan vaihtotapahtumat rehupuhalluksineen ovat hieman erilaiset kuin H-tehtaan PK 3:lla. Paperirata on kapeampi ja katkaistava paperilaatu ohuempaa, minkä seurauksena puhallusilmaa tarvitsee huomattavasti vähemmän.

Päällystyskone 2:n aukirullaimella saumaustapahtuma ja kiinnirullaimella konerullanvaihtotapahtuma ovat päällystyskone 3:n vastaaviin verrattuna

pienempiä paineilman kulutushetkiä, joten ne eivät vaikuta paineilma-verkon vakauteen.

Paperikone 1:n päällystysasemilla on päällystyksessä käytettävän ylätelan puhdistuskaavauksessa jatkuvatoimiset ilmapuhallukset. Ilmaa puhalletaan päällystysaseman ollessa käytössä kahdesta 16 mm reiästä paperiradan keskeltä reunoja kohden. Ilmapuhalluksella pidetään kaavinterän alapuolinen osuus puhtaana, jolla pyritään välttämään ratakatkot.

6 Paineilmaverkon toiminnan tarkastelu

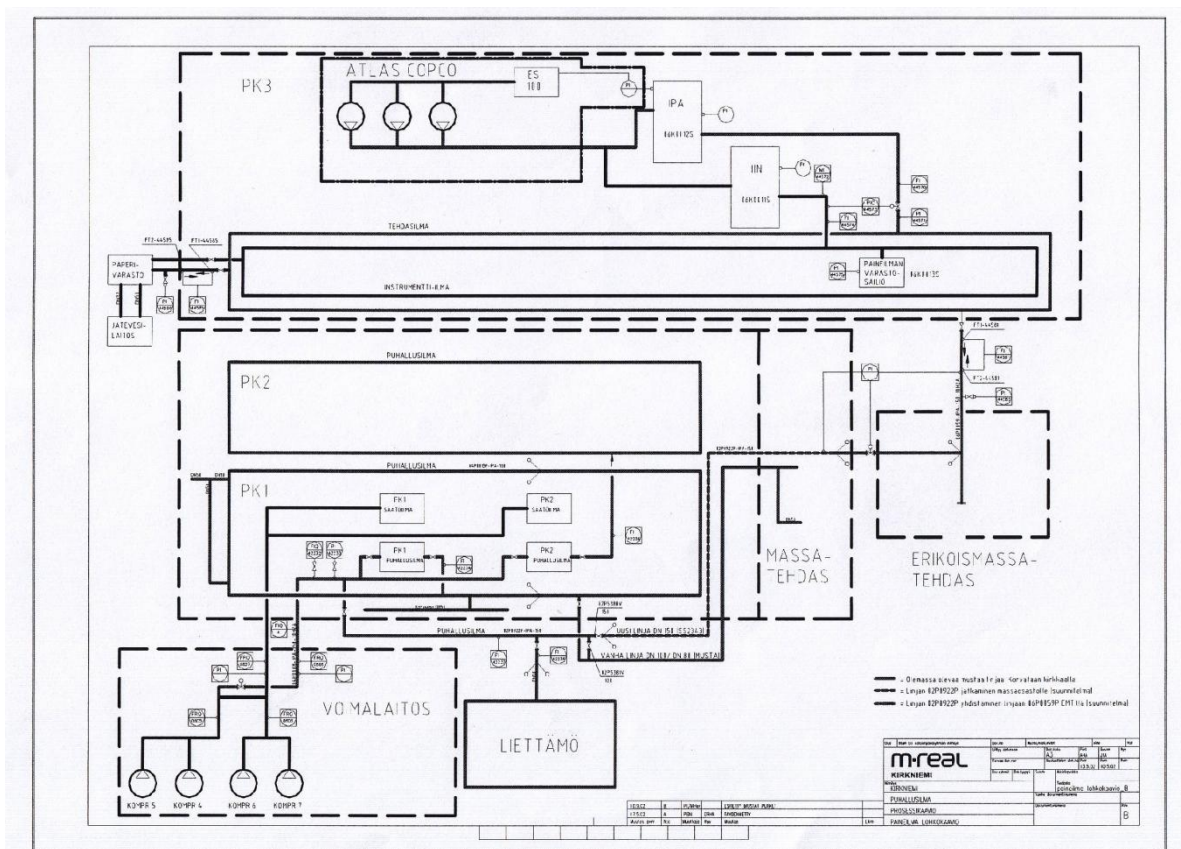
Koeajoja suunniteltaessa ja tavoitteita tälle insinööriyölle määriteltäessä tutustuttiin tehtaalla aikaisemmin suoritettuihin paineilmaan liittyviin koeajoihin ja projekteihin. Kompressoriteknikka oli uusittu vuonna 1996, ja sen jälkeen on tehty muutamia paineilman kulutuksen energiansäästöön tähdänneitä investointeja.

Uusimmat tutkimukset ovat ulkopuolisten yritysten tekemiä syyni-tarkastuksia, joissa tarkasteltiin tehtaan paineilmajärjestelmän senhetkistä tilannetta sekä esitettiin mahdollisuuksia pienentää järjestelmän energiankulutusta. Sarlin Hydor oli käynyt suorittamassa mittauksia vuonna 2002 (päivämäärät eivät tiedossa) ja 2006 (25.–26.5.). Paineilmakompressoreiden huoltaja Atlas Copco suoritti omat mittaukset vuonna 2008 (22.8–28.8.). Huomionarvoista mittaustuloksissa on vuorokauden aikana mitattu keskimääräinen kompressoreiden kokonaistuotto, josta voi arvioida mittausajankohtien välillä suoritettujen säästötoimenpiteiden onnistuneisuuden.

Vuonna 2002 kompressoreiden keskimääräinen kokonaistuotanto oli 286 m³/min. Onnistuneiden projektien ansiosta oli vuonna 2006 kompressoreiden keskimääräinen kokonaistuotanto 217 m³/min. Seuraavien kahden vuoden aikana on ollut havaittavissa kulutuksen kasvua lisääntyneiden kulutuskohteiden ja vuotojen ansiosta. Vuoden 2008 mittauksissa kompressoreiden keskimääräinen kokonaistuotanto oli 240 m³/min. Saadut arvot ovat vertailukelpoisia keskenään, sillä mittausten aikana oli tehdas ns. normaalituotannolla eli kaikki kolme paperikonelinjaa käynnissä. Näitä kolmea mittausraporttia ja niiden tuloksia on käytetty lähtökohtana koeajojen suunnittelussa.

Säiliökapasiteetin ja verkoston tilavuuden tarkasteluun käytettiin olemassa olevia PI- kaavioita, Atlas Copcon kompressorien käyttöohjekirjasta saatua laskentakaavaa ja kenttätutkimuksia.

Suurimmat vaikeudet tutkittaessa A- ja H-tehtaan puhallus- ja instrumentti-ilmaverkkoja oli ajan tasalla olevien PI- kaavioiden puuttuminen. Puhallusilman lohkokaavio (kuva 6) antaa mielikuvan alueen laajuudesta ja paineilmaverkoston koosta. Fyysisesti matkaa kertyy putkilinjoja pitkin PK 3:n ja voimalaitoksen kompressoreiden välille noin kilometri.



Kuva 6. Lohkokaavio Kirkniemen paperitehtaan puhallusilmaverkosta.

6.1.1 H-tehtaan paineilmaverkosto

H-tehtaalla suodatuksen jälkeen paineilma johdetaan kahteen paineilmasäiliöön. Toinen säiliöistä on tehdasilmasäiliö tilavuudeltaan 15 m^3 ja toinen säiliö on instrumentti-ilmasäiliö tilavuudeltaan 15 m^3 . Säiliöistä kumpikin ilma johdetaan omaan rengaslinjaansa, josta paineilma jaetaan kulutuskohteisiinsa. Ennen rengaslinjaa on tehdasilmaputkessa säätöventtiili, joka sulkeutuu kun instrumentti-ilman paine laskeutuu alle 550 kPa . Tällä pyritään turvamaan vikatilanteissa (esim. suuri putki- tai laiterikko) instrumentti-ilman riittävyys.

Tehdasilmalinjana on tehtaan alakerran katossa kiertävä rengaslinja, jonka putken nimelliskoko on 200 mm. Vastaavan instrumentti-ilma linjan nimelliskoko on 150 mm. Molemmista rengaslinjoista putkivedot kulutuskohteisiin on tehty pääsääntöisesti nimelliskooltaan 50 mm:n putkella. Kohteen paineilman kulutuksen ollessa suuri sinne on johdettu useampi syöttöputki rengaslinjan eri kohdista. Instrumentti-ilmalinjaan on lisätty paperikoneen alueelle 6 m³ lisäsäiliö, jolla varmistetaan instrumentti-ilman paineen tasaisuus paperikoneen säätöjen turvaamiseksi.

Paineilman riittävyden takaamiseksi on paineilma järjestelmän kokonaistilavuuden oltava riittävän suuri. Kokonaistilavuus käsittää säiliökapasiteetin ja koko paineilmaputkiston tilavuuden. Atlas Copcon kompressorien käyttöopissa olevan laskukaavan (kaava 1) mukaan saadaan järjestelmän nimellistilavuudeksi noin 46 m³. Kun tästä vähennetään säiliötilavuus 36 m³, saadaan paperikone 3:n ja erikoismassatehtaan paineilmaputkiston tilavuudeksi noin 10 m³.

$$V = \frac{30 \times C \times p \times Q}{\Delta p} \quad (1)$$

V = suositeltu verkon nettotilavuus

Δp = kevennys- ja kuormituspaineen ero

p = imuilman paine

Q = kompressorin vapaa ilmamäärä

C = korjauskerroin

$$V = \frac{30 \times 0,2 \times 1,0 \text{ bar} \times 3065 \text{ l/s}}{(6,0 - 5,6) \text{ bar}} = 45975 \text{ l} \quad (1)$$

Kyseistä laskukaavaa (kaava 1) voidaan käyttää ilmaverkon likimääräiseen tilavuuden arviointiin. Tässä tapauksessa saatiin laskettua putkiston minimi tilavuus keskimääräisellä paineilman kulutuksella. Käytännössä putkiston tilavuus on moninkertainen laskettuun arvoon verrattuna.

6.1.2 A-tehtaan paineilmaverkosto

Suodatuksen jälkeen paineilma johdetaan erillisiin puhallus- ja instrumentti-ilmaverkkoihin. Voimalaitoksella on 4 kappaletta 6 m³:n säätöilmäsäiliötä tasaamaan verkoston painevaihteluita.

A-tehtaan paperikoneet 1 ja 2 sijaitsevat eri rakennuksessa kuin kompressorit, joten paineilma johdetaan toiseen rakennukseen maanalaista putkitunnelia pitkin. Puhallusilmalle käytetään nimelliskooltaan 200 mm ruostumatonta teräsputkea. Instrumentti-ilmalle käytettävä putkikoko on sama.

PK 1:n alakerrassa on puhallusilmalle ja instrumentti-ilmalle omat 15 m³ säiliöt, sekä 4 m³ säätöilmäsäiliö. Instrumentti- ja säätöilmäsäiliöt ovat yhteydessä toisiinsa, koska nykyään käyttökohde on sama. PK 1:n alakerran katossa kiertää puhallusilmanrengaslinja nimelliskooltaan 100 mm. Toisiinsa yhteydessä olevat säätö- ja instrumentti-ilma rengaslinjat ovat nimelliskooltaan 100 mm. Vanhempi säätöilmarengaslinja on osan matkastaan nimelliskooltaan 80 mm. Rengaslinjoista kulutuskohteisiin lähtevien putkien nimelliskoko on 50 mm.

PK 2:n alakerrassa on vastaava säiliökapasiteetti ja samanlaiset rengaslinjat. Kuitenkin vanha säätöilman rengaslinja on koko matkaltaan 100 mm putkea.

6.1.3 Paineilmaverkko muut osastot

Voimalaitos, hiomo ja erikoismassatehdas saavat puhallusilman nimelliskooltaan 150 mm syöttöputkella, josta paineilma jaetaan kulutuskohteisiin. Instrumentti-ilma johdetaan kyseisille alueille 100 mm syöttöputkella.

Erikoismassatehtaan alakertaan on vuonna 2002 aikaisempien energiasäästöohjelmien yhteydessä rakennettu A- ja H-tehtaan puhallusilmaverkkoja yhdistävä yhdyslinja. Linja on nimelliskooltaan 150 mm ruostumatonta teräsputkea. Linjassa on suodatus molempiin suuntiin ja paineeron mukaan toimiva säätöventtiili.

7 Koeajot

Paineilmaverkoston koeajot ajoittuivat ajalle 11.5.–31.12.2009.

7.1 Käytetyt laitteet ja menetelmät

Koeajoissa tarkkailtiin paineilmaverkon painetasojen muutoksia, paineilman virtausmääriä ja kompressoreiden kuluttamaa sähkötehoa (MW).

Paineilmaverkon painetasojen ja virtausmäärien seurannassa käytettiin apuna tehtaan TIPS-järjestelmää. TIPS-järjestelmän Info Viewerillä voidaan

muodostaa trendiseuranta lähes mille tahansa automaatiojärjestelmästä löytyvälle positiolle. Alussa pyrittiin luomaan riittävä määrä trendinäyttöjä, joilla pystyttäisiin seuraamaan A- ja H-tehtaan painetasojen vaihteluja ja paineilman virtausmääriä. Seurantaan pyrittiin ottamaan kaikki automaatiojärjestelmissä olemassa olevat mittauspisteet. Kompessoreiden käyntitiedoista luotiin omat trendisivut, joista näkee onko kompressori kuormituksella, kevennyksellä vai pysähdyksissä.

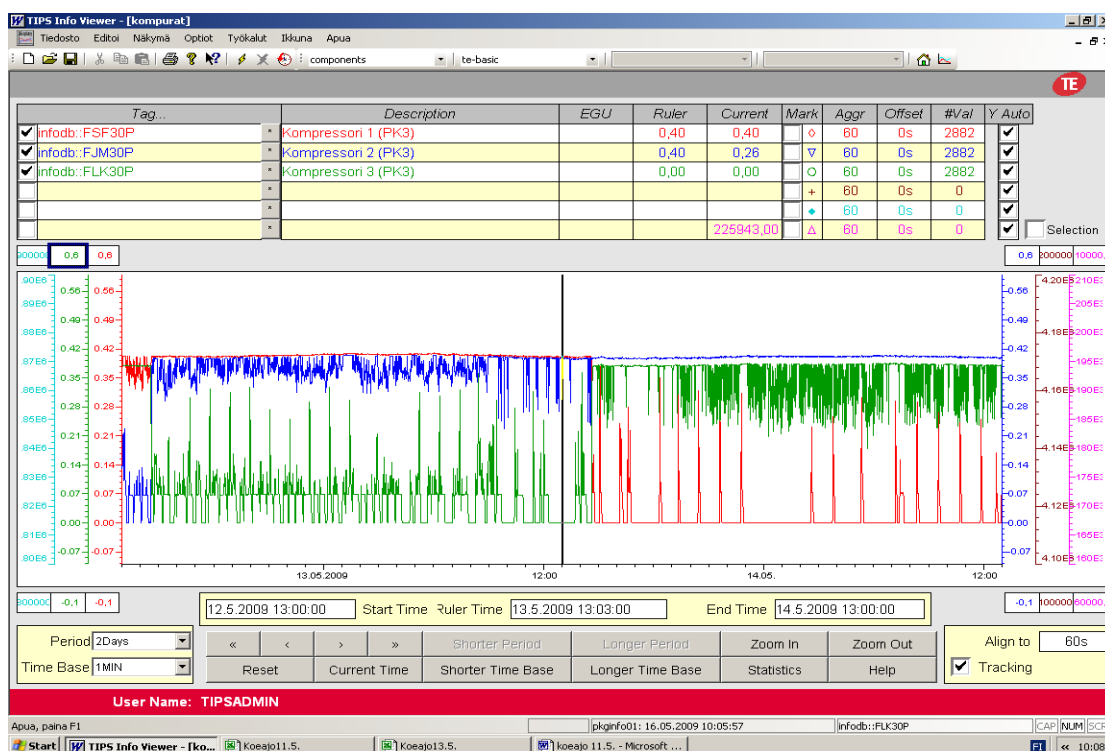
Kompressoreiden sähkömoottoreiden käyttämää tehoa pystytään seuraamaan tehtaan energianhallintajärjestelmällä (EHJ). EHJ:llä voidaan seurata yksittäisen sähkömoottorin käyttämä sähkömäärä megawatteina (MW). EHJ:stä voidaan kerätä tunti- tai minuuttipohjaista tietoa Excel-taulukkolaskentaohjelmaan, jonka avulla kerättyä tietoa pystyttiin analysoimaan.

PK 3:n ja voimalaitoksen automaatiojärjestelmistä pystyttiin seuraamaan tilapäisillä lyhyillä trendeillä nopeita paineilman paineenvaihteluita sekä suuria ja nopeita paineilman kulutuksen muutoksia. Esimerkiksi PK 3-linjalla paperikoneen konerullanvaihdon ja päällystyskoneen saumauksen paineilman yhteiskulutukseen ei päässyt muuten kiinni kuin luomalla 7,5 minuutin trendi DNA-automaatiojärjestelmään (liite 1).

7.2 Verkoston paineenalennus koeajot

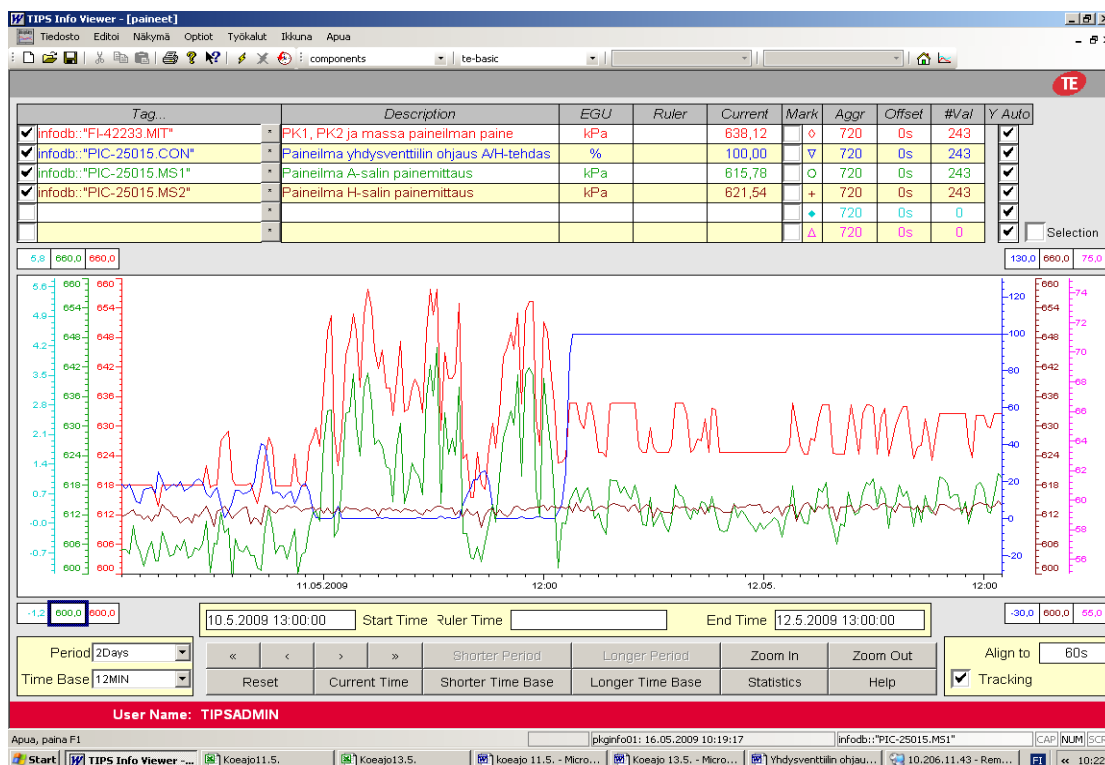
Ensimmäinen suunniteltu koeajo 11.5. koski A- ja H- tehtaan välillä olevaa yhdysventtiiliä (pv-25015). Venttiili on toiminnaltaan automaattitoiminen lautasventtiili, joka säätyy venttiilin eripuolella olevan paine-eron mukaisesti. Koska edellä mainituissa syyniraporteissa oli epäilty kyseisen venttiilin toimintaa energiansäästön kannalta tai peräti koko tarpeellisuutta, niin päätettiin laittaa venttiili manuaali tilaan ja avata se 100 % auki.

Yhdysventtiilin avaamisen jälkeen TIPS Info Viewer -järjestelmää seuraamalla havaittiin H-tehtaan kompressoreiden turhien käynnistysten vähentyneen (kuva 7). Tämä johtui suuremman yhtenäisen paineverkon kyvystä tasata kulutuspiikkien aiheuttaman painetason laskua, jolloin lepovuorossa olevan kompressorin kuormitusrajaa ei saavutettu. Näin ollen kompressor ei turhaan käynnistynyt muutaman sekunnin paineenkorotustarpeen vuoksi. Painetaso tässä vaiheessa oli A- ja H-tehtaan puolella aseteltu 6,2 baariin. Voimalaitoksella olevien kompressoreiden käyntiaikoja ei pystytty analysoimaan, koska TIPS Info Viewer -järjestelmä oli siltä osin viallinen.



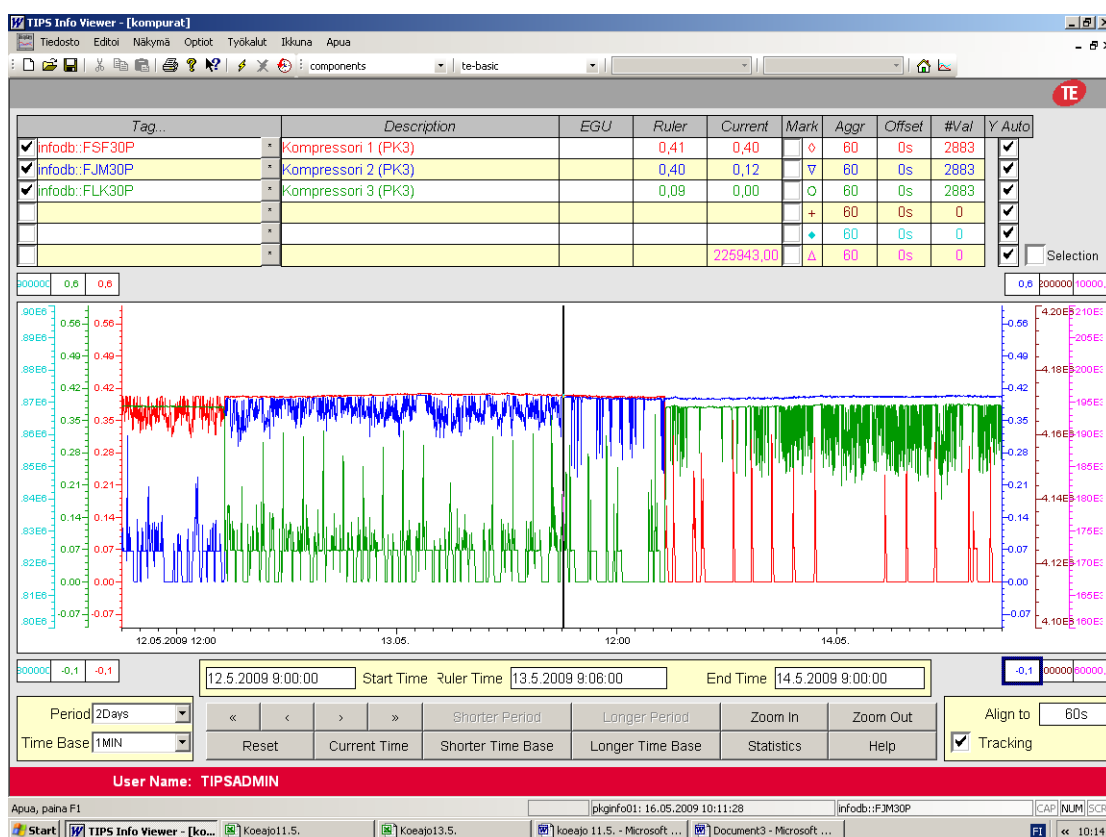
Kuva 7. PK 3:n kompressorien käyntitiedot TIPS Info Viewer -järjestelmässä.

Samassa koeajossa kuitenkin havaittiin painetasojen vaihteluiden pienentyneen A- tehtaan osalta, josta pääteltiin kompressoreiden kuormituksen vähentyneen (kuva 8). Kuvassa 8 näkyvä sininen käyrä kuvaa yhdysventtiilin avaamista 100 % auki. Venttiilin avaamisen jälkeen on havaittavissa A-tehtaan paineilmailmaverkon paineen tasaantuminen (punainen ja vihreä käyrä).



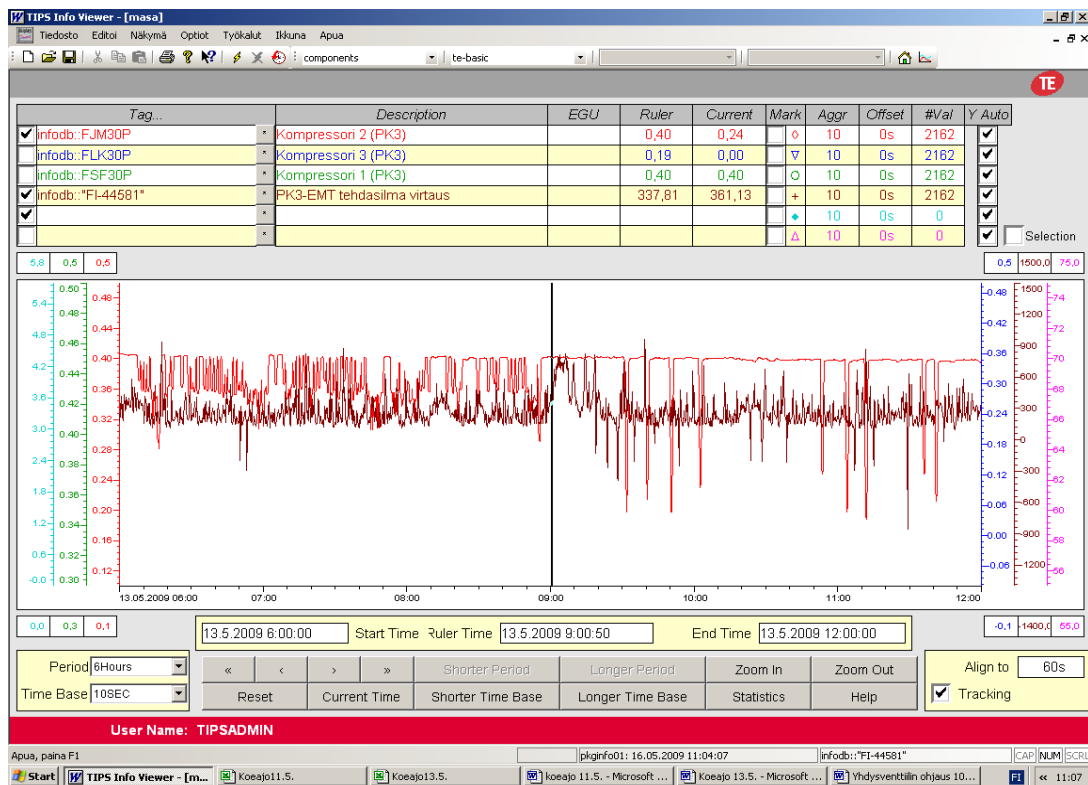
Kuva 8. Painetasojen muutokset TIPS Info Viewer -järjestelmästä.

Seuraava koeajo suoritettiin kahden vuorokauden kuluttua (13.5.2009). Tässä koeajossa muutettiin paineilma-verkon painetaso $6,2 \rightarrow 6,0$ bar. Painetaso muutettiin voimalaitoksella Alcont-automaatiojärjestelmästä asetusarvoa ($6,2 \rightarrow 6,0$ bar) muuttamalla ja PK3:n alakerrasta ES 100 -ohjauspaneelista muuttamalla kevennysraja $6,2$ bar:iin ja kuormitusraja $5,8$ bar:iin. Kuvasta 9 voidaan havaita PK 3:n kompressoreiden lepoaikojen kasvun. Keskellä kuvaa sijaitsevan kursorin kohdalla tehtiin muutos, jonka jälkeen aluksi punainen ja myöhemmin vihreä käyrä osoittaa pysähdyksissä olevan kompressorin lepoajan pidentyneen.



Kuva 9. PK 3:n kompressorien käyttötiedot TIPS Info Viewer -järjestelmässä.

Samassa koeajossa havaittiin muutos PK 3:n ja EMT:n osastojen välisessä paineilman kulutuksessa ja kulkusuunnassa (kuva 10). Muutoksesta pystyttiin päättämään, että PK 3:n kompressoreiden kuormitus- ja kevennysrajojen muutoksen jälkeen saadaan A-tehtaan puolelta paineilmaa H-tehtaan suuriin kulutuspiikkeihin. Asia voitiin todeta kuvan 10 tummanpunaisesta käyrästä, joka kertoo paineilman suunnan ja määrän.



Kuva 10. Paineilman virtaus välillä PK 3 – EMT.

Seuraavassa koeajossa 29.5. pyrittiin laskemaan H-tehtaan paineilma-verkon painetta 0,2 bar (6,0 → 5,8 bar). EMT:n alakerrassa sijaitseva yhdysventtiili suljettiin ja yritettiin muuttaa kuormitus- ja kevennysrajoja, siinä kuitenkin onnistumatta. Kompressoreille oli aseteltu ohjelmalliset lukitukset, joita ei voinut itse poistaa. Atlas Copcon asentaja kävi muuttamassa paineen lukitusrajan 5,0 bar:iin, jonka jälkeen 2.6. suoritettiin paineenalennus 6,0 → 5,8 Bar. Paineilman verkostopainetta kuitenkin nostettiin organisaation käskystä 5,9 baariin, minkä jälkeen koeajo keskeytettiin.

Seuraava koeajo suoritettiin H-tehtaalla 6.10. Edellisen koeajon jälkeen oli joku (Atlas Copco?) nostanut painetasoa korkeammalle. Jälleen suunniteltiin painetasoa laskua ja lisäksi kuormitus- ja kevennysrajojen välistä painekaistan laajentamista. Yhdysventtiili jälleen suljettiin, että pystyttäisiin tutkimaan H-tehtaan paineilman kulutusta ja paineenvaihtelua omana osastonaan.

19.10. H-tehtaalla sijaitseva kompressori K3 kuitenkin hajosi, jolloin koeajo keskeytettiin ja palautettiin painetasot ja yhdysventtiilin toiminta ”normaaliksi”.

Seuraavaksi yritettiin 17.11. koeajoa A-tehtaan paineilma-verkossa. Voimalaitokselta pudotettiin paineilman asetusta 6,0 → 5,8 Bar. Asetukset kuitenkin palautettiin ”normaaliksi”, koska A-tehtaan paineilman paineessa ilmeni suuria vaihteluita.

Seuraava varsinainen onnistunut koeajo, josta saatiin tuloksia, suoritettiin 2.12.2009. Koeajossa muutettiin paineasetusta 6,0 → 5,8 bar. Paineenalennus suoritettiin muuttamalla voimalaitoksella paineen asetusarvo 6,0 → 5,8 bar. PK 3:n alakerrasta muutettiin ES 100 -ohjauspaneelilta kompressoreiden kuormitusraja 5,8 → 5,6 bar ja kevennysraja 6,2 → 6,0 bar. Koeajon onnistumista pystyttiin tällä kertaa seuraamaan tehtaan energianhallintajärjestelmällä (EHJ). Koeajossa EHJ:llä oli kerätty tuntipohjaista dataa ajalta 18.11.–9.12.2009. EHJ:llä saatu data oli kuitenkin joiltakin osin puutteellista tai viallista, joten aluksi valittiin yhden vuorokauden tarkastelujaksot ennen paineenalennusta (1.12.) ja paineenalennuksen jälkeen (4.12.) (liitteet 2 ja 3). Tarkempien ja luotettavimpien tuloksien saamiseksi valittiin toinen tarkastelujakso kahden vuorokauden mittaiseksi. Ajanjaksoiksi valitsimme ennen paineenalennusta 30.11.–1.12. ja paineenalennuksen jälkeen 4.–5.12.2009 (liitteet 4 ja 5).

8 Muut tutkimukset

Tehdasalueen koosta ja paineilma-verkon laajuudesta johtuen keskityttiin tutkimaan yksittäisiä suuria paineilmankulutuskohteita, joiden havaittiin kuluttavan paljon tai nopeasti paineilmaa. Yksittäisen kohteen paineilman kulutusta tarkasteltiin SMC Pneumatics Finland OY:n Energy Saving Program

Ver. 3.1 -ohjelman avulla. Kyseisellä ohjelmalla pystyttiin laskemaan putkessa olevan reiän kuluttama ilmamäärä tietyllä painetasolla. Samalla ohjelmalla pystyttiin havainnollistamaan esimerkiksi puhallusputkien ja suuttimien reikäkoon vaikutuksen käytettyyn paineilman määrään.

8.1 PK 1:n päällystysasemien puhallusputket

PK 1:n päällystysasemien ylätelan kaavaimen puhallusputket puhaltavat koko ajan koneen ollessa tuotannolla. Puhallusputkissa on 4 kpl 16 mm halkaisijalla olevia reikiä, jotka käyttävät suuren määrän ilmaa. Puhallusputkien tarpeellisuus ratakatkojen estämiseksi on kiistaton. Vastaavanlaiset päällystysasemat PK 3:lla on varustettu kaksoiskaapimilla, jotka estävät kaavinterän alle muodostuvan kuivan pastan kertymisen ja vähentävät ratakatkoriskiä. Vaihtoehtoisesti puhallusputket kannattaisi varustaa edes jonkinlaisilla puhallussuuttimilla. Mikä tahansa suutinvaihtoehto antaa paremman hyötysuhteen kuin pelkkä puhallusputki.

8.2 PK 3:n rehupuhallus

PK 3:n konerullan vaihtotapahtuman yhteydessä syntyvän paperisilpun poispuhalluksessa (rehupuhallus) käytetään neljästä erikohdasta puhaltavaa puhallusputkea. Rehupuhallus on automaattinen tapahtuma konerullan valmistumisen yhteydessä. Ilmaa puhalletaan paperiradan molemmista reunoista halkaisijaltaan 17,75 mm rei'istä ja radan keskeltä reunoja kohden halkaisijaltaan 11,75 mm rei'istä. Puhallukset on suunnattu siten, että ne eivät kumoa toisiaan. Automaattisen puhalluksen pituus on 60 sekuntia. Konerullia valmistuu keskimäärin 75 minuutin välein, ja lähes aina konerullan vaihdon yhteydessä käynnistyy lepovuorossa oleva kompressori tasaamaan paineilman kulutuspiikkiä.

Vaihtotapahtumaa seurattaessa huomattiin, että usein rehupuhallusaika oli aivan liian pitkä ja joskus jopa täysin tarpeeton. Päätettiin muuttaa rehupuhalluksen aika 60:stä 30:een sekuntia, jolla saatiin puolitetuksi paineilman kulutus konerullan vaihtotapahtumassa. Lisäksi lisättiin koneen raameihin kaksi painonappia, toinen koneen hoitopuolelle ja toinen koneen käyttöpuolelle, joista voi katkaista tai käynnistää rehupuhalluksen uudelleen. Painonappeja käyttämällä voi tarvittaessa keskeyttää automaattisen 30 sekunnin mittaisen rehupuhalluksen vaikka jo 5 sekunnin kohdalla. Erilaisia suutinvaihtoehtoja kyseisiin puhalluksiin ei harkittu.

8.3 PPK 3:n aukirullain saumaustapahtuma

PPK 3:n saumaustapahtumassa syntyvän paperisilpun poispuhalluksiin käytetään runsaasti paineilmaa. Jäljelle jäävän konerullan pohjan ja ajoon lähtevän uuden konerullan välissä on kaksi hieman paperiradan leveyttä (9 m) pidempää putkea, joihin on porattu tietyin välein halkaisijaltaan 2,5 mm reikiä. Ylemmässä putkessa on 35 reikää ja alemmassa putkessa 70 reikää. Ajoon lähtevän konerullan alapuolella lattiassa on radanlevyinen puhallusputki, johon on porattu 3 mm reikiä 40 kpl. Aukirullaimen hoitopuolella on kaksi tarkoin suunnattua puhallussuutinta, joiden halkaisija on 15 mm. Puhallussuuttimista toinen on ollut käytössä. Aukirullaimen käyttöpuolella on 10 mm reiällä varustettu kiinteä puhallussuutin. Saumauksen yhteydessä olevan rehupuhalluksen pituus on 90 sekuntia. Puhalluksen voi halutessaan pysäyttää aukirullaimen yhteydessä sijaitsevasta painonapista.

Kaikki edellä mainitut puhallukset ovat tarpeellisia ehkäisemään ratakatkoja, mutta silti on syytä epäillä niiden käyttämän ilmamäärän tarpeellisuutta. SMC:n säästöohjelmalla laskettiin erilaisia vaihtoehtoja puhallusputkien reikäkooksi ja niiden vaikutusta käytettyyn ilmamäärään. Samalla etsittiin vaihtoehtoja koneen sivulla olevien puhallussuuttimien korvaamiseksi pienemmillä rei'illä ja

uudelleen sijoittelulla. Käytännön toteutuksiin on kuitenkin lähdetty varovaisin askelin, koska jokainen rehupuhalluksen puutteesta aiheutunut ratakatko aiheuttaa noin tunnin mittaisen tuotannon keskeytymisen ja heikentää paperilinjan pituushyötysuhdetta PPK:n ylösajohylyn eli noin 5000 metrin verran.

8.4 PPK 3:n kiinnirullain konerullan vaihtotapahtuma

PPK 3:n konerullan vaihtotapahtumassa syntyvä paperisilpun poispuhallukseen käytetään paineilmaa. Valmistuneen konerullan hidastaessa vauhtiaan syntyy huomattava määrä paperisilppua, joka helposti tunkeutuu ajossa olevan konerullan sisään aiheuttaen seuraavassa konevaiheessa ratakatkoja ja tuotannon menetystä. Paperisilpun joutumista väärään paikkaan pyritään estämään valmistuneen konerullan ja ajossa olevan rullan yläpuolella olevalla puhallusputkella. Puhallusputki on noin 9 m pitkä putki, johon on porattu halkaisijaltaan 4 mm reikiä 82 kpl. Puhallusputken puhallusaika on käyttäjän aseteltavissa automaatiojärjestelmästä. Puhallusajan pituus on yleisesti pidetty 60 sekunnissa, joka vastaa suunnilleen valmistuneen konerullan pysähtymisaikaa.

Valmistuvan konerullan pinnasta syntyvän paperisilpun siivoukseen on lattialla kaksi paperiradan levyistä puhallusputkea. Toista puhallusputkea käytetään käsiventtiilillä, jossa on halkaisijaltaan 3 mm reikiä 56 kpl. Toinen puhallusputki on painonappitoiminen, jossa on halkaisijaltaan 2,5 mm reikiä 57 kpl.

SMC:n säästöohjelmalla laskettiin pienemmillä reikävaihtoehdoilla varustettujen puhallusputkien tuomaa paineilman säästöä. Lattiapuhallusputkien käyttöön tehtiin toiminnan muutoksia. Käsiventtiilillä toimiva puhallus muutetaan painonappitoimiseksi, siten että ilmaa tulee niin kauan kuin nappia painaa.

Ennen muutosta käsiventtiilin on voinut kääntää auki ja jättää puhalluksen puhaltamaan, kun on tehnyt muita töitä. Painonapilla toimiva puhallus muutettiin samanlaiseksi toiminnaltaan kuin toinen edellä mainittu lattiapuhallus. Ennen muutosta painonapista sai puhalluksen päälle 60 sekunnin ajaksi tai pystyi itse sammuttamaan puhalluksen painamalla nappia uudestaan.

8.5 Yhdysventtiilin toiminta

A - ja H-tehtaan paineilmaverkot yhdistävässä linjassa on kaksisuuntainen suodatus, takaiskuventtiilit sekä paine- ja virtausmittaus. Keväällä 2009 aloitettujen koeajojen ajan on yhdysventtiili ollut lähes koko ajan manuaalilla ja 100 % auki. Ollessaan automaattilla venttiilin toiminta on ollut hidasta nopeiden kulutuspiikkien ja paineen alenemisen korjaamiseen.

Pääasiallisesti PK 3:n ja EMT:n välillä tapahtuva paineilman siirtyminen on vaikuttanut yhdysventtiilin toimintaan. Kun H-tehtaan puolella on ollut samaan aikaan paperikoneella konerullanvaihto ja päällystyskoneella saumaus, niin H-tehtaan oma paineilman tuotanto ei ole riittävä korvaamaan hetkellistä kulutusta. A-tehtaan puolelta saatava paineilma on saattanut olla sillä hetkellä suljettuna olevan yhdysventtiilin takana. Sillä aikaa kun yhdysventtiili on lähtenyt hitaasti avautumaan, on kulutuspiikki saanut H-tehtaan paineilmaverkon paineen putoamaan huomattavan alas. Matala paineilmaverkon paine voi aiheuttaa esimerkiksi rullapakkaamossa alipainetoimisten rullan pätylappujen kuljetustoiminnossa vaikeuksia. Myöhemmin kun paine on molemmilla puolilla yhdysventtiiliä tasaantunut, saattaa yhdysventtiili jäädä auki asentoon pitkäksi aikaa, mistä ei kuitenkaan ole haittaa.

Aluksi mietittiin yhdysventtiilin toiminnan nopeuttamista, jolloin vaste paineilman tarpeeseen olisi nopeampi. Kuitenkin päädyttiin siihen vaihtoehtoon, että pidetään venttiili 100 % auki ja suunnitellaan jonkinlainen hätätoiminto venttiilin kiinniohjaamiseksi. Yhdysventtiilin hätäkiinniohjausen tulisi toimia jos A- tai H-tehtaan puolella sattuisi jokin suuri laiterikko, joka laskisi paineilma-verkon paineen niin alas, että koneet olisivat vaarassa pysähtyä. Näin toimien pystyttäisiin pelastamaan jommankumman tehtaan tuotanto.

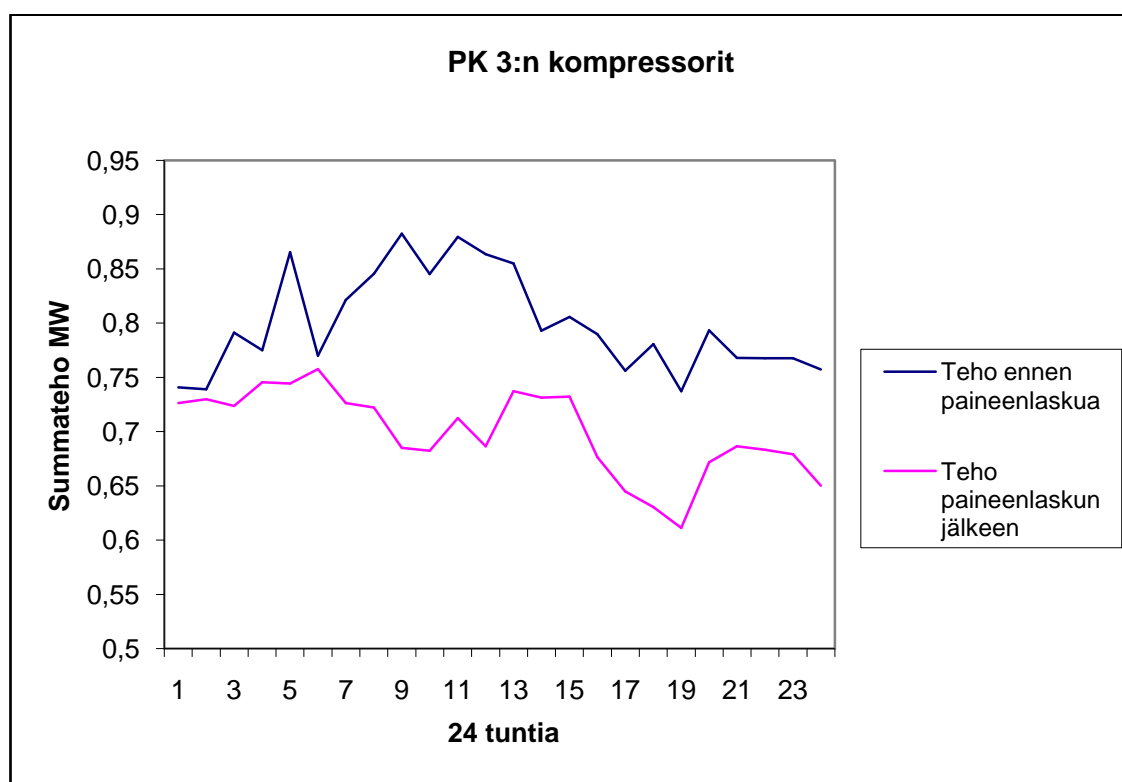
A - tai H-tehtaan puolella tuotettu paineilma on samanlaista öljytöntä, kuivattua ja suodatettua paineilmaa. Paineilman ollessa samanlaista päätettiin rakentaa yhdysventtiilin läheisyyteen ohituslinja, joka ohittaa suodattimet ja takaiskuventtiilit. Tällä toimenpiteellä saadaan suuressa ilman tarpeessa ja virtauksessa poistettua suodatuksen ja takaiskujen aiheuttamat painehäviöt.

9 Tulokset

Saatuja tuloksia tarkasteltiin paineilma-verkoston paineenalentamisen ja yksittäisten suurten kulutuskohteiden paineilman käytön tehostamisen kannalta.

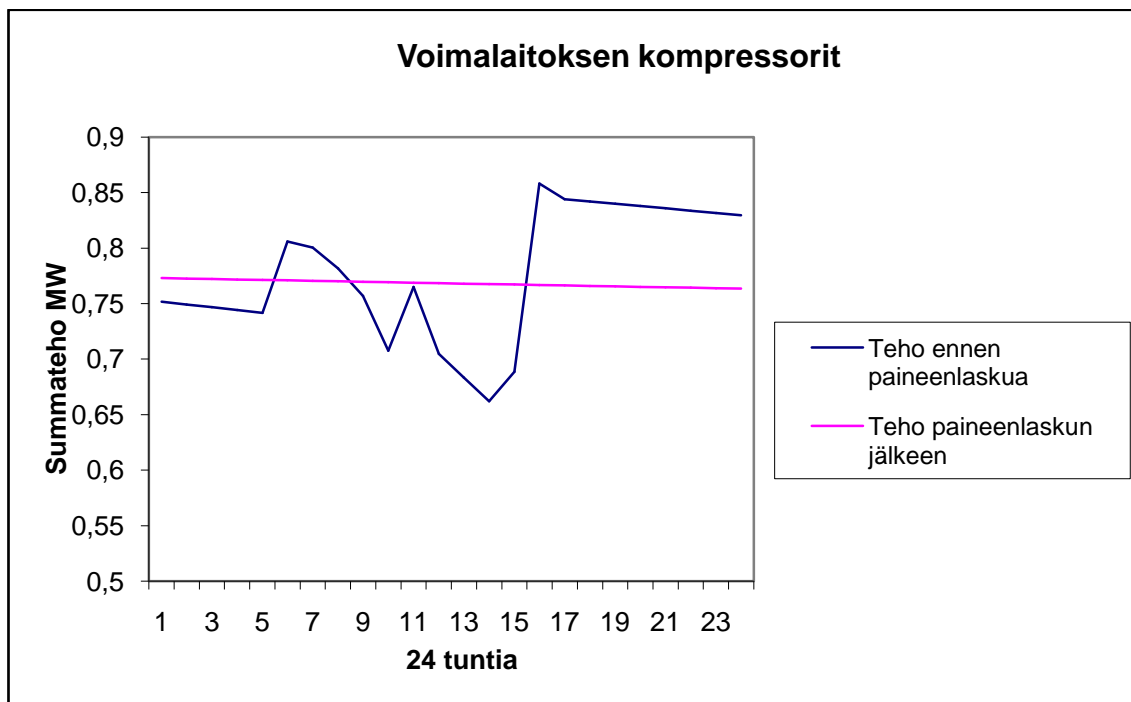
9.1 Paineilmaverkoston paineen alentaminen

2.12.2009 suoritetusta verkostopaineen alennuksen (6,0 → 5,8 bar) koeajosta saatiin EHJ-järjestelmällä talteen tuntipohjaista dataa ajalta 18.11.–9.12.2009 (liite 2). Ajanjaksolta valittiin ensimmäiseen tarkasteluun vuorokausi ennen koeajoa (1.12.) ja vuorokausi sen alkamisajan kohdan jälkeen (4.12.). Kuva 11 on PK 3:n kompressoreiden tehot ennen paineenalennusta ja sen jälkeen.



Kuva 11. PK 3:n kompressoreiden käyttämä teho.

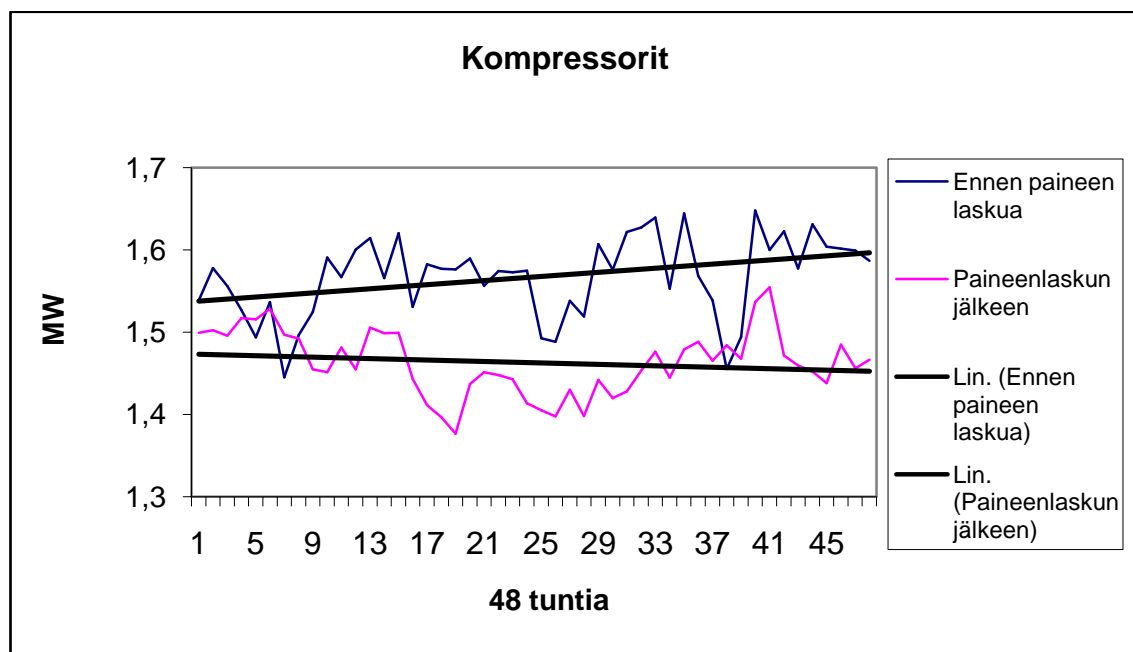
Kuvassa 12 on voimalaitoksen kompressoreiden käyttämä teho ennen paineenlaskua ja sen jälkeen.



Kuva 12. Voimalaitoksen kompressoreiden käyttämä teho.

Kuvasta 11 voidaan selkeästi havaita kompressoreiden käyttämän tehon lasku, mutta kuvassa 12 tehon tarkastelu vaatii lineaarisen trendiviivan lisäämisen muutoksen havaitsemiseen.

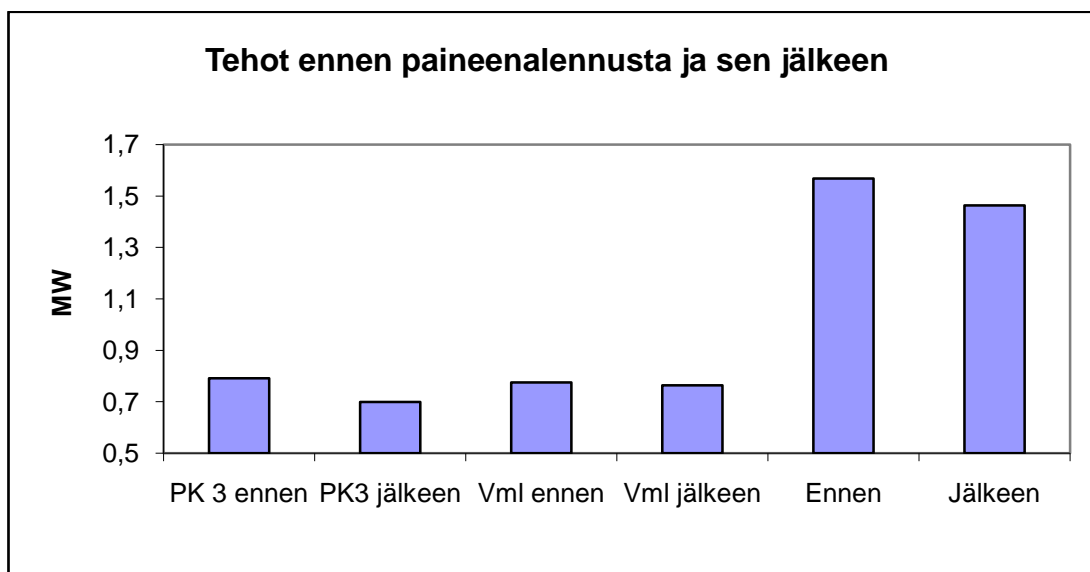
Paineenalennuksesta saatavan hyödyn varmistamiseksi tarkastettiin vielä kahden vuorokauden jaksot ennen paineenalennusta (30.11–1.12.) ja sen jälkeen (4.–5.12.). Tällä kertaa yhdistettiin PK 3:n ja voimalaitoksen kompressoreiden tehot yhteiseen taulukkoon, josta tehtiin kuvaaja (kuva 13) paineenalennuksen kokonaisvaikutuksen näkemiseksi.



Kuva 13. Kompressoreiden summateho kahden vuorokauden ajalta.

Kuvassa 13 ovat mukana myös lineaariset trendikäyrät havainnollistamaan paineenlaskusta aiheutuvaa tehon säästöä.

Kahden vuorokauden mittausjaksoista muodostettiin kaavio keskiarvotehonkulutukselle, joka on nähtävissä kuvassa 14.



Kuva 14. Kompressoreiden tehojen keskiarvot kahden vuorokauden ajalta.

Saavutetun energiansäästön laskemiseksi käytettiin Excel-
taulukkolaskentaohjelmaa, jolla laskettiin PK 3:n ja voimalaitoksen
kompressoreiden käyttämän tehon yhteen joka tunnilta. Kompressoreiden
summatehot laskettiin yhteen kahden vuorokauden ajalta, josta saatiin käytetty
kokonaisteho ennen paineenalennusta ja sen jälkeen.

PK 3 ennen paineenalennusta: 38,001 MW

PK 3 paineenalennuksen jälkeen: 33,576 MW

Voimalaitos ennen paineenalennusta: 37,220 MW

Voimalaitos paineenalennuksen jälkeen: 36,637 MW

Kokonaistehoista laskettiin keskiarvokulutus ennen paineenalennusta ja sen jälkeen.

PK 3 ennen paineenalennusta:

$$\frac{38,000 \text{ MWh}}{48 \text{ h}} = 0,792 \text{ MW}$$

PK 3 paineenalennuksen jälkeen:

$$\frac{33,576 \text{ MWh}}{48 \text{ h}} = 0,700 \text{ MW}$$

Voimalaitos ennen paineenalennusta:

$$\frac{37,220 \text{ MWh}}{48 \text{ h}} = 0,775 \text{ MW}$$

Voimalaitos paineenalennuksen jälkeen:

$$\frac{36,637 \text{ MWh}}{48 \text{ h}} = 0,763 \text{ MW}$$

Tehonkulutus yhteensä ennen paineenalennusta:

$$0,792 \text{ MW} + 0,775 \text{ MW} = 1,567 \text{ MW}$$

Tehonkulutus paineenalennuksen jälkeen:

$$0,700 \text{ MW} + 0,763 \text{ MW} = 1,463 \text{ MW}$$

Saaduista arvoista laskettiin tehokulutuksessa (MW) syntynyt säästö prosentteina:

$$1,00 - \frac{1,463 \text{ MW}}{1,567 \text{ MW}} \times 100 = 6,64 \%$$

9.2 Yksittäiset suuret kulutuskohteet

Valituissa yksittäisissä suurissa kulutuskohteissa tarkasteltiin paineilman kulutusta ajallisesti ja vertailtiin olemassa olevien ilmapuhalluksien reikäkokoa. Näkökulman laajentamiseksi laskettiin vertailun vuoksi jokaisessa kulutuskohteessa myös verkostonpaineen laskemisen aikaansaaman paineilman kulutuksen säästö. Yksittäisen reiän tai puhallusputken kuluttama ilmamäärä laskettiin SMC:n energiansäästöohjelmalla.

9.2.1 PK 1:n päällystysasemien puhallusputket

PK 1:n päällystysasemien ylätehojen kaapimien alustan puhtaanapitopuhalluksien ilmankulutukseksi 6,0 bar verkostopaineella saatiin taulukon 2 mukaisesti 60,8 m³/min.

Taulukko 2. PK 1:n päällystysasemien kaavaimien ilmapuhallukset

Kaavaripuhallus	Reikä Ø mm	Kpl	m ³ /min/reikä	m ³ /min	m ³ /s
1. asema	16	2	15,2	30,4	0,507
2. asema	16	2	15,2	30,4	0,507
yhteensä				60,8	1,013

Muutettaessa verkostopainetta 6,0:sta → 5,8:aan baaria muuttuu yhden reiän kulutus 15,200 → 14,766 m³/min. Kokonaiskulutus muuttuu 60,800 → 59,064 m³/min.

Jos puhalluksien reikäkoko muutettaisiin halkaisijaltaan 16:sta → 10:een mm, muuttuisi paineilman kulutus 6 bar verkostopaineella taulukon 3 mukaisesti 23,752 m³/min.

Taulukko 3. PK 1:n päällystysasemien kaavaimien ilmapuhallukset, reikäkoko 10 mm.

Kaavaripuhallus	Reikä Ø mm	Kpl	m ³ /min/reikä	m ³ /min	m ³ /s
1. asema	10	2	5,938	11,876	0,198
2. asema	10	2	5,938	11,876	0,198
yhteensä			11,876	23,752	0,396

Kaavaimien aluspuhallusten käyttämä ilmamäärä pienenesi seuraavasti:

$$1 - \frac{23,752 \frac{m^3}{min}}{60,800 \frac{m^3}{min}} \times 100 = 60,93\%$$

9.2.2 PK 3:n rehupuhallus

PK 3 konerullan vaihdon yhteydessä olevan 60 sekunnin pituisen rehupuhalluksen paineilman kulutukseksi saatiin taulukon 4 mukaisesti 54,444 m³.

Taulukko 4. PK 3:n rehupuhalluksen käyttämä ilmamäärä.

	60 s	6,0 Bar			
	Reikä Ø mm	kpl	m ³ /min/reikä	m ³ /min	m ³ /s
Puhallus Hp+Kp	17,85	2	19,024	38,048	0,634
Keskellä	11,75	2	8,198	16,396	0,273
Yhteensä			27,222	54,444	0,907

Rehupuhallusaikaa muutettiin automaatiojärjestelmässä 60:stä 30:een sekuntiin, jolloin saatiin paineilman kulutukseksi:

$$\frac{30s}{60s} \times 54,444m^3 = 27,222m^3$$

Rehupuhalluksen puhallusajan lyhentäminen pienensi kohteen paineilman kulutusta 50 %.

Jos rehupuhallus katkaistaan painonapista heti sen alkaessa, on ilman kulutus 0 m³.

9.2.3 PPK 3:n aukirullaimen saumaustapahtuma

PPK 3 aukirullaimen saumaustapahtuman rehupuhallusten käyttämäksi kokonaisilma määräksi saatiin taulukon 5 mukaisesti 79,613 m³/min.

Taulukko 5. PPK 3:n aukirullaimen käyttämä ilmamäärä saumauksen rehupuhalluksissa.

	Aika 90 s	6,0 bar			
	Reikä Ø mm	kpl	m ³ /min/reikä	m ³ /min	m ³ /s
Puhallusputki ylä	2,5	35	0,371	12,985	0,216
Puhallusputki ala	2,5	70	0,371	25,970	0,433
Lattiapuhallus	3	40	0,534	21,360	0,356
Sivupuhallus Kp	10	1	5,938	5,9380	0,099
Sivupuhallus Hp	15	1	13,36	13,360	0,223
Yhteensä				79,613	1,327

Koko käytetty ilmamäärä on:

$$\frac{1,5 \text{ min}}{1,0 \text{ min}} \times 79,613 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} = 119,420 \text{ m}^3$$

Jos puhallusaikaa tilanteiden niin salliessa pystyttäisiin pudottamaan 60 sekuntiin, saitaisiin rehupuhalluksen ilman kulutukseksi taulukon 5 mukaan 79,613 m³.

Paineilmaverkoston paineen alennus (6,0 → 5,8 bar) pienentäisi 60 sekunnin rehupuhalluksen ilman kulutuksen 77,411 m³:iin (liite 6).

Taulukossa 6 on pohdittu puhallusputkien reikäkoon pienentämistä sekä sivupuhallussuuttimien korvaamista pienemmillä uudelleen paremmin sijoitetuilla puhalluksilla. Samassa taulukossa on rehupuhalluksen aika 60 sekuntia ja paineilman verkoston paine tavoitteellinen 5,5 bar.

Taulukko 6. Optimiarvot aukirullaimen rehupuhallukselle.

	Aika 60 s	5,5 Bar			
	Reikä Ø mm	kpl	m ³ /min/reikä	m ³ /min	m ³ /s
Puhallusputki ylä	2	35	0,221	7,735	0,129
Puhallusputki ala	2	70	0,221	15,470	0,258
Lattiapuhallus	2	40	0,221	8,840	0,147
Sivupuhallus Kp	4	3	0,882	2,646	0,044
Sivupuhallus Hp	4	3	0,882	2,646	0,044
Yhteensä				37,337	0,622

Taulukon 6 mukaan PPK 3:n aukirullaimen rehupuhalluksen ilmankulutuksen pystyisi vähentämään 37,337 m³:iin. Ilmankulutukseen säästöä syntyisi:

$$1 - \frac{37,337m^3}{119,420m^3} \times 100 = 68,73\%$$

9.2.4 PPK 3:n kiinnirullaimen konerullan vaihtotapahtuma

PPK 3:n kiinnirullaimen konerullan vaihtotapahtuman automaattisen rehupuhalluksen eli ns. peltipuhalluksen ilmankulutukseksi saatiin taulukon 7 mukaisesti 77,900 m³.

Taulukko 7. PPK 3:n kiinnirullain puhallusputket.

	6,0 Bar				
	Reikä Ø mm	kpl	m ³ /min/reikä	m ³ /min	m ³ /s
Lattiapuhallus pn	2,5	57	0,371	21,147	0,352
Lattiapuhallus kv	3,0	56	0,534	29,904	0,498
Peltipuhallus	4,0	82	0,950	77,900	1,298
Yhteensä				128,951	2,149

Lattiapuhalluksien ilmankulutukseksi saatiin taulukko 7 mukaan käsiventtiilille (kv) 29,904 m³/min ja painonapille (pn) 21,147 m³/min.

Paineilmaverkoston paineen alennus (6,0 → 5,8 bar) pienentäisi 60 sekunnin peltipuhalluksen ilman kulutuksen 75,686 m³:iin (liite 7).

Taulukossa 8 laskettiin kiinnirullaimen puhalluksien ilmankulutukset tavoitteellisella 5,5 bar paineella. Taulukon alemmassa osassa on laskettuna ilman kulutukset vaihtoehtoisella 2 mm reiän halkaisijalla.

Taulukko 8. PPK 3:n kiinnirullain puhallukset optimitapauksessa.

	5,5 Bar				
	Reikä Ø mm	kpl	m ³ /min/reikä	m ³ /min	m ³ /s
Lattiapuhallus pn	2,5	57	0,345	19,665	0,328
Lattiapuhallus kv	3,0	56	0,496	27,776	0,463
Peltipuhallus	4,0	82	0,882	72,324	1,205
Yhteensä				119,765	1,996
Lattiapuhallus pn	2	57	0,221	12,597	0,210
Lattiapuhallus kv	2	56	0,221	12,376	0,206
Peltipuhallus	2	82	0,221	18,122	0,302
Yhteensä				43,095	0,718

Taulukon 8 mukaan PPK 3:n kiinnirullaimen ilmankulutuksen pystyisi vähentämään maksimitapauksesta 119,765 → 43,095 m³ / min.

Ilmankulutukseen säästöä syntyisi:

$$1,00 - \frac{43,095 \frac{m^3}{min}}{119,765 \frac{m^3}{min}} \times 100 = 62,02 \%$$

10 Tulosten tarkastelu

Saatuja tuloksia verrattiin aikaisempiin tutkimuksiin, mistä havaittiin tulosten tarkkuuden olevan vaaditulla aikaisemmin hyväksi havaitulla tasolla.

Trendinäytöistä ja Excel-taulukoista luetuilla arvoilla on katsottu oleva riittävä tarkkuus aikaansaattujen säästöjen havainnoimiseksi. Yksittäisten suuttimien tai reikien ilmamäärien laskennassa käytetty SMC:n energiatehokkuusohjelman tarkkuutta ei tiedetty, mutta ohjelman toimittajan mukaan se on riittävän tarkka osoittamaan säästön kokoluokan.

10.1 Yhdysventtiilin toiminta

Useampi suoritettu koeajo osoittaa A- ja H-tehtaan välisen yhdysventtiilin tarpeellisuuden. TIPS Info Viewerin trendinäytöistä katsottuna venttiilin olleessa täysin auki on painetasojen vaihtelu A- ja H-tehtaalla vähäisintä. Yhdysventtiilin yhteyteen rakennettava suodatuksen ja takaiskun ohittava linja vähentää osastojen välillä kulkevan ilman häviöitä. Atlas Copcolta saadun tiedon mukaan jokainen paineilmajärjestelmässä oleva suodatus pienentää verkostopainetta 0,1 bar. Takaiskuventtiilien virtausvastuksen vaikutuksen paineenalennemisen voimme arvioida olevan 0,05 bar. Tarkempia laskelmia yhdysventtiilin ohitukselle ei voitu laskea, koska linjassa olevan virtausmittauksen tietoja ei saatu kerätyksi talteen.

10.2 Verkoston paineenalennus

Toukokuussa 2009 paineilmaverkoston paine oli 6,2 bar ja A- ja H-tehtaan välinen yhdysventtiili oli automaattilla. Painetasoa alentamalla 6,2 → 6,0 bar ja avaamalla yhdysventtiili 100 % auki pystyttiin Tips Info Viewer trendeillä osoittamaan kompressorien turhien käynnistymisien vähentyneen.

Seuraavissa koeajoissa pyrittiin laskemaan verkoston painetta osastokohtaisesti, jolloin nähtäisiin, toimisivatko A- ja H-tehdas omalla paineilman tuotannolla. Yhdysventtiilin ollessa kiinni ei yksikään paineenalennuskoeajo onnistunut. Yhden kerran syynä epäonnistumiseen oli kompressoririkko, mutta muilla kerroilla oli syynä verkostopaineen heiluminen. Syytä verkostopaineen heilahteluille ei ehditty tutkia, koska paineen heilahtelu olisi saattanut aiheuttaa ongelmia tuotannolle, joten organisaatio ilmoitti paineen nostettavaksi entiselle tasolle.

Joulukuun alussa suoritetussa tuloksellisesti onnistuneessa koeajossa saatiin kerätyn tiedon avulla paineilmanverkoston paineenalennukselle tulokseksi 6,64 %:n säästö. Tehtaalla aikaisemmin suoritettujen tutkimusten mukaan 0,1 bar paineenalennus vastaa kompressorien käyttämässä tehossa 30 kW laskua. Luvussa 6 sivulla 27 kerrotuissa syyniraporteissa kompressorien keskimääräinen tehonkulutus on noin 1400 kW. Näillä tiedoilla laskettuna 0,2 bar paineenalennus tuottaisi noin 4,3 %:n säästön. Suunnilleen 2 %:n suuruista eroa mitatussa ja laskennallisessa säästössä voidaan selittää mitatun ajanjakson lyhyydellä (2 vrk). Pidempi ajanjakso ja minuuttipohjaisen EHV:stä saatavan datan käyttö voisi antaa hieman poikkeavan tuloksen suuntaan tai toiseen. Minuuttipohjainen data sisälsi enemmän mittausvirheitä kuin tuntipohjainen data, siksi mittauksissa käytettiin tuntipohjaista dataa.

10.3 Yksittäiset suuret kulutuskohteet

PK 1:n päällystysasemien ylätelojen kaapimien alustan puhtaanapitopuhallukset kuluttavat ilmaa todella paljon. Neljä halkaisijaltaan 16 mm reikää kuluttaa ilmaa yhtä paljon kuin yksi kompressorin tuottaa eli noin 60 m³/min. Laskennallista paineilman kulutusta on syytä epäillä, koska silmämääräisesti tarkasteltuna voimalaitoksella ei ole kuin yksi kompressorin jatkuvalla kuormituksella ja toinen käy kuormituksella tarvittaessa. Paineilman kulutusta kohteessa saattaa rajoittaa ohut syöttöputki tai linjassa jossain kohtaa sijaitseva kuristusventtiili.

Verkostopaineen muutoksella ei kyseiseen kohteeseen saa kovinkaan suurta säästöä.

PK 3:n kiinnirullaimen rehupuhalluksessa puhallusajan lyhentäminen puoleen alkuperäisestä vähensi paineilman ja energian kulutuksen puoleen. Lisättyjen painonappien oikealla käytöllä voidaan kulutusta pienentää entisestään, väärällä käytöllä paineilman kulutus voi lisääntyä. Kohteen oman kulutusmittauksen puuttuessa vuotuisen säästön toteaminen jää näiden laskelmien varaan.

PPK 3:n aukirullaimen saumaustapahtumien rehupuhalluksissa olisi suuri säästöpotentiaali. Eri reikäkokojen kokeilulla, puhallusajan pituudella ja puhallussuutinten käytöllä pystyttäisiin kulutetun paineilman ja energian määrä puolittamaan. Se vaatisi organisaation heittäytymistä koeajoihin, punnittuaan saavutettavissa olevien säästöjen suhdetta tuotannon tunnuslukujen hyödyllisyyteen. Kyseinen kohde on myös suurin yksittäinen paineilmaverkon paineenalennuksen este. Saumaustapahtumassa saumaustelan ja katkaisuterän liike aikaansaadaan paineilman avulla. Paineilman paineen ollessa liian matala ei saumaus mahdollisesti onnistu, mistä seuraa noin tunnin pituinen ratakatko ja ylösajohylyn verran menetettyä tuotantoa.

PPK 3:n kiinnirullaimen konerullan vaihtotapahtuman rehupuhalluksessa on suurin yksittäinen kulutuskohde, peltipuhallus, poistettu käytöstä. Jäljellä olevat lattiapuhallukset muutetaan painonappitoimisiksi puhallusaikojen lyhentämiseksi. Näillä toimenpiteillä saadaan pienennettyä paineilman ja energian kulutus murto-osaan suurimmasta mahdollisesta vaihtoehdosta. Paineilmaverkon paineenalennus ei tuo yksistään tässä kohteessa kovinkaan suuria säästöjä.

10.4 Paineilmaverkoston toimivuus

Suurin ongelma paineilmaverkoston toimivuudessa on ohjauksen hajanaisuus. Verkoston eri päissä sijaitsevat kompressorikeskukset eivät pysty energiatehokkaalla tavalla ylläpitämään verkoston painetta. H-tehtaalla tapahtuva suuri kulutuspiikki saattaa käynnistää PK 3:n ja voimalaitoksen lepovuorossa olevan kompressorin. Kompressorien yhtenäisellä ja ennakoivalla ohjauksella pystyttäisiin hillitsemään yksittäisien kompressorien turhia hetkellisiä käynnistyksiä. Viisi sekuntia kuormituksella ollut kompressorikäynnistyksellä 20 minuuttia, jolloin kompressorikäynnistyksellä 20 % kuormitustehostaan.

Koeajoja suunniteltaessa ilmeni paineilmaverkon PI-kaavioiden huono taso. Vuonna 1996 suoritettujen kompressoreiden uusinnan jälkeen PI-kaavioita on päivitetty satunnaisesti. Paineilmaverkostolla ja sen toimivuudella ei ole ketään vastuuhenkilöä, joka pitäisi kaaviot ajan tasalla, vaan jokaisen osaston kunnossapidon ja tuotannon työnjohto päivittää PI-kaaviota silloin kuin ehtii. Tähän työhön liittyen PI-kaaviosta katsottiin olemassa olevia virtaus- ja painemittauksia trendiseurantaa varten. Osa mittauksista oli PI-kaavioissa vanhentuneilla positiotunnuksilla, ilmeisesti jäänteinä jostain aiemmasta ohjausjärjestelmästä.

TIPS Info Viewer -järjestelmällä periaatteessa pystyttiin seuraamaan paineilmaverkoston toiminnallista tasoa. Ne positiot jotka oli laitettu seurantaan toukokuussa 2009, pysyivät siellä pieniä katkoksia lukuun ottamatta. Myöhemmin olisi haluttu lisätä seurantaan useita paineilman paineeseen ja virtaukseen liittyviä positioita, mutta se ei onnistunut koko konsernin tasoisen päätöksen vuoksi. Kesäkuusta 2009 maalikuuhun 2010 välisellä ajalla TIPS Info Viewer -järjestelmään ei ole voinut lisätä haluttuja positioita, vaikka kyseinen järjestelmä olisi erinomainen pitkäaikaiseen paineilman kulutuksen seurantaan.

Voimalaitoksella sijaitsevat neljä kompressoria ovat Alcont-automaatiojärjestelmän ohjauksessa. Alcont-automaatiojärjestelmästä ei pystytä luomaan toimivia yhteyksiä minkäänlaiseen seurantajärjestelmään. Esimerkiksi TIPS Info Viewer- ja EHJ-järjestelmät eivät onnistu käsittelemään luotettavasti voimalaitoksen kompressorien sähkömoottoreiden tehotietoja. EHJ-järjestelmään pystyttäisiin luomaan paineilman seuranta sivu, josta voidaan reaaliajassa nähdä paineilman energiankulutus, jos yhteydet joskus tulisivat kuntoon.

Paineilman paine- ja virtausmittaukset ovat kohtalaisen hyvällä tasolla. Painehäviöitä aiheuttavia kuristusvirtausmittauksia ei paineilmailmaverkossa ilmennyt. Tarkemman osastokohtaisen kulutuksen seurannan parantamiseksi termistori-tyyppisten virtausmittareiden lisääminen paineilmailmaverkoston olisi suotavaa.

11 Yhteenveto

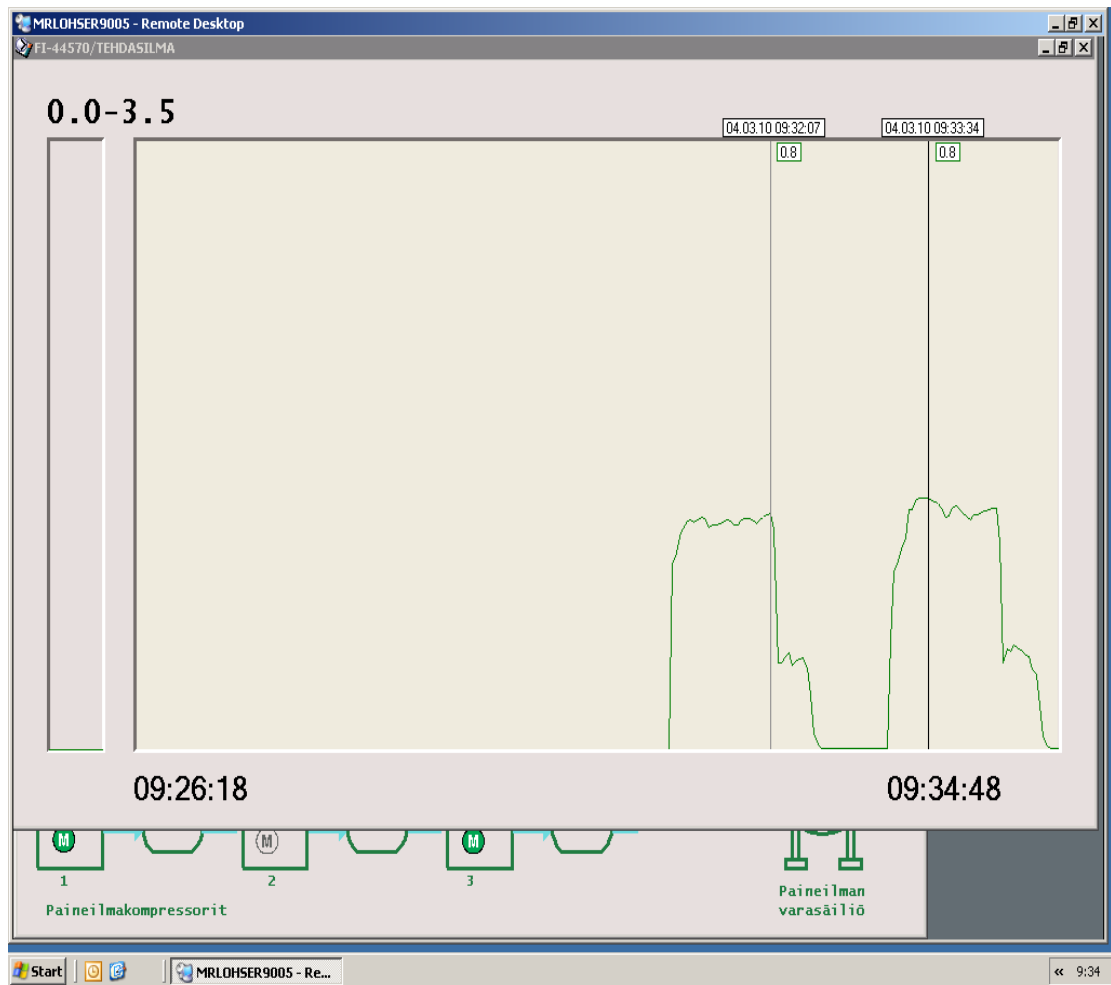
Insinööriyön tekeminen paljasti sen tosiasian, että paineilmaverkoston ylläpito ja energiatehokkuuden vaaliminen on jäänyt Kirkniemen paperitehtaassa hieman taka-alalle. Pienilläkin panostuksilla ja toiminnan muutoksilla aikaansaatiin ja saataisiin huomattavia paineilman kulutuksen säästöjä. Paineilmaverkoston paineenalennus tuo suoraan nähtäväksi tietyn säästöpotentiaalin, mutta toisaalta paineilman osastokohtaiset kulutuskohteet voivat vuositasolla olla todella huomattavia energiasyöppöjä. Huolestuttavaa oli havaita H-tehtaalla paineilman kulutuksen lisääntyneen muutaman viime vuoden aikana niin paljon, että sen omat kompressorit eivät riittäneet kattamaan kulutushuippuja. Kirkniemen paperitehtaan paineilmajärjestelmälle kannattaisi tehdä ulkopuolisen mittajaan toimesta täydellinen syynitarkastus, jossa koko paineilmaverkon kunto tarkastetaan.

Paineilmaverkon kunto, kulutuskohteiden hallinta ja paineilmailmakompressoreiden ohjausten tehostaminen ovat pääkohdat Kirkniemen paperitehtaan paineilmajärjestelmän energiatehokkuuteen.

Lähteet

- 1 Atlas Copco. Ohjekirja kiinteille kompressoreille. Belgia 1996.
- 2 Atlas Copco. Ohjekirja kiinteille ilmankuivaimille. Belgia.
- 3 Sarlin Hydor. Syyni-järjestelmäanalyysi M-real Kirkniemi 25.-26.05.2006. Helsinki: 2006.
- 4 Oy Atlas Copco Kompressorit Ab. Raportti paineilmaverkoston virtausmittauksesta Sappi Finland Oy Kirkniemi 22.-28.08.2008. Helsinki: 2008.
- 5 Huttu, Marja-Terttu. Virtaustekniikka. Opetusmateriaali. EVTEK-ammattikorkeakoulu. 2004.
- 6 McCabe, Warren L., Smith, Julian C., & Harriot, Peter. Unit Operations of Chemical Engineering. Fifth Edition. McGraw-Hill International Editions. 1993.
- 7 Hulkkonen, Veli. Pneumatiikan perusteet Fluid Finland. Fluid klinikka No.13. 2005.
- 8 Pneumatiikka ja hydraulikka. <http://kehittaminen.turkuamk.fi/metso/x-files/pneumatiikka> 31.5.2009
- 9 Paineilman laatustandardit. www.sarlin.com/paineilmanlaatuvaatimukset [13.9.2009](http://www.sarlin.com/paineilmanlaatuvaatimukset)
- 10 Kompressorit. <http://skeggis.1g.fi/stuff/energiatekniikka/Luennot/Kompressorit.pdf> [1.10.2009](http://skeggis.1g.fi/stuff/energiatekniikka/Luennot/Kompressorit.pdf)
- 11 Pneumatiikka <http://www.kolumbus.fi/pentti.mattila/Sivut/Pneumatiikka.htm> 6.2. 2009

Liite 1: Kuvakaappaus pieni trendi 7,5 min



Liite 2: Tehot ennen paineenalennusta

Kompressoreiden tehotiedot ennen paineenalennusta

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
1.12.2009 0:04	0,335080789	0,032816256	0,373015656	0,340228354	0,01477757	0,39002523	0,006631744
1.12.2009 1:04	0,357144396	0,008984037	0,372777336	0,340228353	0,011853993	0,390064453	0,007048983
1.12.2009 2:04	0,367622067	0,050689358	0,373016218	0,340228353	0,008930416	0,390103675	0,007466222
1.12.2009 3:04	0,383665861	0,018668222	0,37256914	0,340228352	0,006006839	0,390142897	0,007883461
1.12.2009 4:04	0,388762759	0,103845641	0,372703268	0,340228352	0,003083262	0,39018212	0,0083007
1.12.2009 5:04	0,362342644	0,034393287	0,37335042	0,340228352	0,066664531	0,390221342	0,008717939
1.12.2009 6:04	0,372822896	0,075596644	0,372940381	0,336791713	0,064225079	0,390260564	0,009135178
1.12.2009 7:04	0,372747631	0,100557831	0,372150644	0,31899131	0,063002155	0,390299786	0,009552417
1.12.2009 8:04	0,37758354	0,132972003	0,371842247	0,299604249	0,057120293	0,390339009	0,009969655
1.12.2009 9:04	0,379212347	0,186407076	0,279483176	0,280217187	0,026673069	0,390378231	0,010386894
1.12.2009 10:04	0,389627948	0,34612897	0,143571686	0,260830126	0,1029969	0,390417453	0,010804133
1.12.2009 11:04	0,390349234	0,366920828	0,106361455	0,241443065	0,061615233	0,390456676	0,011221372
1.12.2009 12:04	0,38980559	0,371752571	0,093282079	0,222056004	0,059290396	0,390495898	0,011638611
1.12.2009 13:04	0,38991642	0,361541463	0,041589854	0,202668943	0,056965559	0,39053512	0,01205585
1.12.2009 14:04	0,391039297	0,347455912	0,067062821	0,177681038	0,054640722	0,390574343	0,065637285
1.12.2009 15:04	0,39089777	0,36726611	0,031658606	0,298365346	0,052315885	0,139795585	0,367600656
1.12.2009 16:04	0,391634617	0,357492639	0,006890045	0,352827734	0,049991049	0,075103481	0,36615356
1.12.2009 17:04	0,39202442	0,363407424	0,025268037	0,352826444	0,047666212	0,074704943	0,366813411
1.12.2009 18:04	0,393046463	0,343663712	0,000667582	0,352825154	0,045341375	0,074306405	0,367473262
1.12.2009 19:04	0,392735322	0,358607615	0,041933516	0,352823864	0,043016538	0,073907868	0,368133113
1.12.2009 20:04	0,393116228	0,340175863	0,034724815	0,352822575	0,040691701	0,07350933	0,368792964
1.12.2009 21:04	0,392824193	0,343352571	0,031544349	0,352821285	0,038366865	0,073110792	0,369452814
1.12.2009 22:04	0,393651416	0,354480933	0,019373824	0,352819995	0,036042028	0,072712255	0,370112665
1.12.2009 23:04	0,394175393	0,344900312	0,018115453	0,352818705	0,033717191	0,072313717	0,370772516

Liite 3: Tehot paineen alennuksen jälkeen

Kompressoreiden tehotiedot paineenalennuksen jälkeen

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
4.12.2009 0:04	0,335030369	0,019391099	0,371940367	0	0,351958779	0,052785371	0,36823383
4.12.2009 1:04	0,34393568	0,013862842	0,372058574	0	0,351870212	0,052386833	0,368307804
4.12.2009 2:04	0,338779728	0,012849756	0,37194604	0	0,351781646	0,051988295	0,368381778
4.12.2009 3:04	0,36114428	0,012785269	0,371512054	0	0,351693079	0,051589758	0,368455752
4.12.2009 4:04	0,354792516	0,017705618	0,371862934	0	0,351604513	0,05119122	0,368529726
4.12.2009 5:04	0,362577305	0,022156012	0,372796195	0	0,351515946	0,050792682	0,3686037
4.12.2009 6:04	0,338046394	0,016069523	0,372188105	0	0,35142738	0,050394145	0,368677674
4.12.2009 7:04	0,33132452	0,018845552	0,371915459	0	0,351338813	0,049995607	0,368751648
4.12.2009 8:04	0,301426964	0,011793945	0,371900269	0	0,351250246	0,049597069	0,368825622
4.12.2009 9:04	0,299105605	0,041629342	0,341510505	0	0,35116168	0,049198532	0,368899596
4.12.2009 10:04	0,334884887	0,076802952	0,300848933	0	0,351073113	0,048799994	0,368973569
4.12.2009 11:04	0,387941074	0,297740029	0,000797193	0	0,350984547	0,048401456	0,369047543
4.12.2009 12:04	0,387478057	0,349027429	0,000700548	0	0,35089598	0,048002919	0,369121517
4.12.2009 13:04	0,387951693	0,342793831	0,000603903	0	0,350807414	0,047604381	0,369195491
4.12.2009 14:04	0,378308289	0,24367179	0,110183758	0	0,350718847	0,047205843	0,369269465
4.12.2009 15:04	0,286351869	0,016430022	0,373676759	0	0,350630281	0,046807306	0,369343439
4.12.2009 16:04	0,259653326	0,011662044	0,373700535	0	0,350541714	0,046408768	0,369417413
4.12.2009 17:04	0,255105979	0,001049058	0,374138955	0	0,350453148	0,04601023	0,369491387
4.12.2009 18:04	0,235964683	0,001049058	0,374126696	0	0,350364581	0,045611693	0,369565361
4.12.2009 19:04	0,28597505	0,011616937	0,374169506	0	0,350276015	0,045213155	0,369639335
4.12.2009 20:04	0,299987845	0,012845008	0,373708434	0	0,350187448	0,044814617	0,369713309
4.12.2009 21:04	0,29764942	0,011752116	0,373930427	0	0,350098882	0,04441608	0,369787283
4.12.2009 22:04	0,303545308	0,001049058	0,374405844	0	0,350010315	0,044017542	0,369861257
4.12.2009 23:04	0,27542931	0,001049058	0,373786433	0	0,349921748	0,043619004	0,36993523

Liite 4: Tehot ennen paineenalennusta 2 vrk

Kompressorit MWh	Ennen paineen laskua 2 vrk						
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
30.11.2009 0:04	0,041517	0,373712	0,328323	0,34943	0,054578	0,389084	0,002051
30.11.2009 1:04	0,058702	0,37326	0,350993	0,351548	0,0522	0,389123	0,00179
30.11.2009 2:04	0,028262	0,373609	0,362806	0,350671	0,049822	0,389162	0,001529
30.11.2009 3:04	0,029453	0,373735	0,340361	0,345338	0,047444	0,389202	0,001268
30.11.2009 4:04	0,014225	0,373163	0,332208	0,33887	0,045066	0,389241	0,001007
30.11.2009 5:04	0,032707	0,373469	0,370851	0,326883	0,042688	0,38928	0,000746
30.11.2009 6:04	0,003074	0,374142	0,323562	0,314129	0,04031	0,389319	0,000485
30.11.2009 7:04	0,009828	0,373949	0,333806	0,301375	0,087778	0,389358	0,000223
30.11.2009 8:04	0,014919	0,373743	0,350796	0,286809	0,061572	0,389398	0,047301
30.11.2009 9:04	0,18356	0,242476	0,375909	0,340229	0,058631	0,389437	0,000373
30.11.2009 10:04	0,358659	0,046982	0,374906	0,340229	0,055708	0,389476	0,00079
30.11.2009 11:04	0,36423	0,077958	0,374273	0,340229	0,052784	0,389515	0,001208
30.11.2009 12:04	0,379632	0,078716	0,374754	0,340229	0,04986	0,389555	0,001625
30.11.2009 13:04	0,375135	0,037195	0,374712	0,340229	0,046937	0,389594	0,002042
30.11.2009 14:04	0,372671	0,097475	0,37393	0,34023	0,044013	0,389633	0,002459
30.11.2009 15:04	0,354014	0,029152	0,373654	0,34023	0,04109	0,389672	0,002877
30.11.2009 16:04	0,353544	0,083451	0,374267	0,34023	0,038166	0,389711	0,003294
30.11.2009 17:04	0,384477	0,04952	0,374228	0,34023	0,035243	0,389751	0,003711
30.11.2009 18:04	0,385283	0,049701	0,374646	0,34023	0,032319	0,38979	0,004128
30.11.2009 19:04	0,385353	0,065741	0,374581	0,34023	0,029395	0,389829	0,004546
30.11.2009 20:04	0,374499	0,045935	0,374526	0,34023	0,026472	0,389868	0,004963
30.11.2009 21:04	0,362552	0,078861	0,373875	0,340229	0,023548	0,389908	0,00538
30.11.2009 22:04	0,373988	0,068607	0,373613	0,340228	0,020625	0,389947	0,005797
30.11.2009 23:04	0,371148	0,074936	0,374461	0,340228	0,017701	0,389986	0,006215
1.12.2009 0:04	0,335081	0,032816	0,373016	0,340228	0,014778	0,390025	0,006632
1.12.2009 1:04	0,357144	0,008984	0,372777	0,340228	0,011854	0,390064	0,007049
1.12.2009 2:04	0,367622	0,050689	0,373016	0,340228	0,00893	0,390104	0,007466
1.12.2009 3:04	0,383666	0,018668	0,372569	0,340228	0,006007	0,390143	0,007883
1.12.2009 4:04	0,388763	0,103846	0,372703	0,340228	0,003083	0,390182	0,008301
1.12.2009 5:04	0,362343	0,034393	0,37335	0,340228	0,066665	0,390221	0,008718

1.12.2009 6:04	0,372823	0,075597	0,37294	0,336792	0,064225	0,390261	0,009135
1.12.2009 7:04	0,372748	0,100558	0,372151	0,318991	0,063002	0,3903	0,009552
1.12.2009 8:04	0,377584	0,132972	0,371842	0,299604	0,05712	0,390339	0,00997
1.12.2009 9:04	0,379212	0,186407	0,279483	0,280217	0,026673	0,390378	0,010387
1.12.2009 10:04	0,389628	0,346129	0,143572	0,26083	0,102997	0,390417	0,010804
1.12.2009 11:04	0,390349	0,366921	0,106361	0,241443	0,061615	0,390457	0,011221
1.12.2009 12:04	0,389806	0,371753	0,093282	0,222056	0,05929	0,390496	0,011639
1.12.2009 13:04	0,389916	0,361541	0,04159	0,202669	0,056966	0,390535	0,012056
1.12.2009 14:04	0,391039	0,347456	0,067063	0,177681	0,054641	0,390574	0,065637
1.12.2009 15:04	0,390898	0,367266	0,031659	0,298365	0,052316	0,139796	0,367601
1.12.2009 16:04	0,391635	0,357493	0,00689	0,352828	0,049991	0,075103	0,366154
1.12.2009 17:04	0,392024	0,363407	0,025268	0,352826	0,047666	0,074705	0,366813
1.12.2009 18:04	0,393046	0,343664	0,000668	0,352825	0,045341	0,074306	0,367473
1.12.2009 19:04	0,392735	0,358608	0,041934	0,352824	0,043017	0,073908	0,368133
1.12.2009 20:04	0,393116	0,340176	0,034725	0,352823	0,040692	0,073509	0,368793
1.12.2009 21:04	0,392824	0,343353	0,031544	0,352821	0,038367	0,073111	0,369453
1.12.2009 22:04	0,393651	0,354481	0,019374	0,35282	0,036042	0,072712	0,370113
1.12.2009 23:04	0,394175	0,3449	0,018115	0,352819	0,033717	0,072314	0,370773

Liite 5: Tehot paineen alennuksen jälkeen 2 vrk

Kompressorit MWh	Paineen laskun jälkeen 2 vrk						
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7
4.12.2009 0:04	0,33503	0,019391	0,37194	0	0,351959	0,052785	0,368234
4.12.2009 1:04	0,343936	0,013863	0,372059	0	0,35187	0,052387	0,368308
4.12.2009 2:04	0,33878	0,01285	0,371946	0	0,351782	0,051988	0,368382
4.12.2009 3:04	0,361144	0,012785	0,371512	0	0,351693	0,05159	0,368456
4.12.2009 4:04	0,354793	0,017706	0,371863	0	0,351605	0,051191	0,36853
4.12.2009 5:04	0,362577	0,022156	0,372796	0	0,351516	0,050793	0,368604
4.12.2009 6:04	0,338046	0,01607	0,372188	0	0,351427	0,050394	0,368678
4.12.2009 7:04	0,331325	0,018846	0,371915	0	0,351339	0,049996	0,368752
4.12.2009 8:04	0,301427	0,011794	0,3719	0	0,35125	0,049597	0,368826
4.12.2009 9:04	0,299106	0,041629	0,341511	0	0,351162	0,049199	0,3689
4.12.2009 10:04	0,334885	0,076803	0,300849	0	0,351073	0,0488	0,368974
4.12.2009 11:04	0,387941	0,29774	0,000797	0	0,350985	0,048401	0,369048
4.12.2009 12:04	0,387478	0,349027	0,000701	0	0,350896	0,048003	0,369122
4.12.2009 13:04	0,387952	0,342794	0,000604	0	0,350807	0,047604	0,369195
4.12.2009 14:04	0,378308	0,243672	0,110184	0	0,350719	0,047206	0,369269
4.12.2009 15:04	0,286352	0,01643	0,373677	0	0,35063	0,046807	0,369343
4.12.2009 16:04	0,259653	0,011662	0,373701	0	0,350542	0,046409	0,369417
4.12.2009 17:04	0,255106	0,001049	0,374139	0	0,350453	0,04601	0,369491
4.12.2009 18:04	0,235965	0,001049	0,374127	0	0,350365	0,045612	0,369565
4.12.2009 19:04	0,285975	0,011617	0,37417	0	0,350276	0,045213	0,369639
4.12.2009 20:04	0,299988	0,012845	0,373708	0	0,350187	0,044815	0,369713
4.12.2009 21:04	0,297649	0,011752	0,37393	0	0,350099	0,044416	0,369787
4.12.2009 22:04	0,303545	0,001049	0,374406	0	0,35001	0,044018	0,369861
4.12.2009 23:04	0,275429	0,001049	0,373786	0	0,349922	0,043619	0,369935
5.12.2009 0:04	0,267388	0,001049	0,373447	0	0,349833	0,04322	0,370009
5.12.2009 1:04	0,260162	0,001049	0,373732	0	0,349745	0,042822	0,370083

5.12.2009 2:04	0,2933	0,001049	0,373338	0	0,349656	0,042423	0,370157
5.12.2009 3:04	0,261914	0,001049	0,373196	0	0,349567	0,042025	0,370231
5.12.2009 4:04	0,305803	0,001049	0,373877	0	0,349479	0,041626	0,370305
5.12.2009 5:04	0,283687	0,001049	0,374154	0	0,34939	0,041228	0,370379
5.12.2009 6:04	0,29221	0,001049	0,37407	0	0,349302	0,040829	0,370453
5.12.2009 7:04	0,307271	0,01284	0,373019	0	0,349213	0,040431	0,370527
5.12.2009 8:04	0,331964	0,011732	0,372669	0	0,349125	0,040032	0,370601
5.12.2009 9:04	0,301721	0,0116	0,372027	0	0,349036	0,039634	0,370675
5.12.2009 10:04	0,328821	0,07571	0,315677	0	0,348948	0,039235	0,370749
5.12.2009 11:04	0,387499	0,315784	0,02668	0	0,348859	0,038837	0,370823
5.12.2009 12:04	0,388027	0,305969	0,013055	0	0,34877	0,038438	0,370897
5.12.2009 13:04	0,388422	0,324883	0,012868	0	0,348682	0,038039	0,370971
5.12.2009 14:04	0,388248	0,3215	0,00058	0	0,348593	0,037641	0,371045
5.12.2009 15:04	0,388785	0,338831	0,052104	0	0,348505	0,037242	0,371119
5.12.2009 16:04	0,388875	0,358368	0,050708	0	0,348416	0,036844	0,371193
5.12.2009 17:04	0,38907	0,318477	0,008153	0	0,348328	0,036445	0,371267
5.12.2009 18:04	0,388454	0,303577	0,011813	0	0,348239	0,036047	0,371341
5.12.2009 19:04	0,388408	0,307969	0,000668	0	0,34815	0,035648	0,371415
5.12.2009 20:04	0,388314	0,294441	0,000668	0	0,348062	0,03525	0,371489
5.12.2009 21:04	0,388759	0,329556	0,012255	0	0,347973	0,034851	0,371563
5.12.2009 22:04	0,389174	0,310217	0,002778	0	0,347885	0,034453	0,371637
5.12.2009 23:04	0,388976	0,305818	0,018062	0	0,347796	0,034054	0,371711

Liite 6: PPK3:n rehupuhallus Ar 5,8 bar

PPK 3 Ar	Puhallusaika 60 s	5,8 bar			
	Reikä Ø mm	kpl	m ³ /min/reikä	m ³ /min	m ³ /s
Puhallusputki ylä	2,5	35	0,361	12,635	0,211
Puhallusputki ala	2,5	70	0,361	25,270	0,421
Lattiapuhallus	3	40	0,519	20,760	0,346
Sivupuhallus Kp	10	1	5,768	5,768	0,096
Sivupuhallus Hp	15	1	12,978	12,978	0,216
Yhteensä				77,411	1,290

Liite 7: PPK 3:n rehupuhallus Kr 5,8 bar

PPK3 Kr	5,8 bar				
	Reikä Ø mm	kpl	m ³ /min/reikä	m ³ /min	m ³ /s
Lattiapuhallus pn	2,5	57	0,361	20,577	0,343
Lattiapuhallus kv	3,0	56	0,519	29,064	0,484
Peltipuhallus	4,0	82	0,923	75,686	1,261