

Joonas Laikola

Ilman esikäsittely ilmakaasujen valmistuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

10.4.2014

Tekijä Otsikko	Joonas Laikola Ilman esikäsitteily ilmakaasujen valmistuksessa
Sivumäärä Aika	30 sivua + 1 liitettä 10.4.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaajat	Lehtori Jarmo Perttula Tuotantopäällikkö Martin Nyberg
<p>Tässä insinööriyössä perehdytään ilman esikäsitteilyprosessiin Oy AGA Ab:n ilmakaasutehtaalla. Työn tarkoituksena on tutkia koko esikäsitteilyprosessia, mutta tarkemmin perehdytään ilman kuivainten eli molekyyliseulojen toimintaan. Työn loppuosassa verrataan kuivainten nykyistä käyttöä ja toimittajan suosituksen mukaista käyttöä, sekä kuivainten käytön mahdollista tehostamista.</p> <p>Pääraaka-aine ilmakaasujen tuotannossa on ilmakehästä saatava ilma. Ilman esikäsitteilyllä tarkoitetaan ilman puhdistamista prosessille haitallisista ainesosista. Aluksi työssä kerrotaan ilmakaasuista ja tutustutaan ilman eri ominaisuuksiin, sekä sen sisältämiin epäpuhtauksiin. Tämän jälkeen kerrotaan esikäsitteilyprosessin eri vaiheista tarkemmin. Esikäsitteily on jaettu eri osiin, joita ovat ilman komprimointi, jäähdytys ja kuivaus.</p> <p>Ilman kuivauksella tarkoitetaan ilman puhdistamista kosteudesta ja hiilidioksidista. Ilman kuivaamiseen käytetään molekyyliseuloja, joiden toiminta perustuu zeoliitin kykyyn adsorboida kosteus ja hiilidioksidi prosessiin menevästä ilmasta. Työssä käydään läpi kuivainten ohjausekvenssin toimintaa, sekä tutkitaan niiden kapasiteettia adsorboida epäpuhtauksia. Ensiksi tutkitaan kuivainten nykyistä käyttöä, minkä jälkeen perehdytään kuivainmateriaalin toimittajan tekemään suunnitelmaan.</p>	
Avainsanat	Ilmakaasut, molekyyliseula

Author Title	Joonas Laikola Air Preparation in Air Gas Production
Number of Pages Date	30 pages + 1 appendices 10 April 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering and Production technology
Specialisation option	Energy and Environmental Technology
Instructors	Martin Nyberg, Production Manager Jarmo Perttula, Principal Lecturer
<p>This Bachelor's thesis was made to examine air preparation process at Oy AGA Ab air separation unit. The objective was to examine the whole preparation process and focus more closely on the function of air dryers or the so- called molecular sieves. At the end of the thesis the current use of air dryers is compared to the optimal use according to the suppliers' recommendations. Also increasing the effectiveness of the dryers is examined.</p> <p>The raw material in air gas production is normal air from the atmosphere. Air preparation includes the purification of contaminants which are hazardous for the process. At the beginning of the thesis, air gases and air qualities are explained. After that the different parts of the preparation process are explained more closely. The preparation process is divided into parts which are air compressing, precooling system and drying.</p> <p>Drying in the preparation process means removing water vapour and carbon dioxide from the incoming air. Air drying is carried out using molecular sieves. The function of molecular sieves is based on the capacity of zeolites to adsorb water and carbon dioxide molecules from air. This thesis examines the dryer's control sequence and dryer's capacity to absorb contaminants from the air.</p>	
Keywords	air gas, molecular sieve, preparation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ilma ja sen ominaisuudet	1
2.1	Ilmakaasut	1
2.2	Ilman epäpuhtaudet	2
2.3	Ilman koostumus	2
2.4	Hiilivedyt	4
2.5	Ilman kosteus	5
3	Ilman esikäsittely	7
3.1	Prosessin kuvaus	7
3.2	Ilman komprimointi	8
3.3	Jäähdytysyksikkö ja sen toiminta	8
3.4	Kosteuden poisto	10
3.5	Molekyylliseulat eli kuivaimet	10
3.5.1	Zeoliitti	10
3.5.2	Riskit	11
3.5.3	Adsorboitavat komponentit	13
4	Kuivaimien ohjausekvenssi	15
4.1	Ohjausekvenssin periaate	15
4.2	Ohjausekvenssin eteneminen	16
4.2.1	Ohjaustilat	16
4.2.2	Elvytyskaasuvirtaus ja -lämmitin	17
4.2.3	Tarkka sekvenssikuvaus	18

5	Kuivaimien käytön tehostaminen	23
5.1	Adsorptioaika	23
5.2	Ilmamäärä ja ilman virtaus	24
5.3	Kuivaimien käyttö	25
5.4	UOP:n suunnitelma	26
5.5	Kuivainsekvenssin muuttaminen	28
6	Yhteenveto	28
	Lähteet	30

Liite UOP Adsorbent design summary

Lyhenteet

atm normaali-ilmakehän paine

bara absoluuttinen paine

barg gage pressure, paine suhteessa ilmakehän paineeseen, $P_{\text{gage}} = P - P_{\text{atm}}$

Nm³ normaalikuutio, yksi kuutio normaali-ilmanpaineessa, 0 °C lämpötilassa

Ångström pituuden mittayksikkö, 1 Ångström (Å) = 0,1 nm

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä käsiteltävä ilmakaasujen valmistus tarkoittaa prosessia, jossa tislamalla erotellaan ilman sisältämiä kaasuja omiksi tuotteiksi. Työssä perehdytään ilman esikäsittelyn eri vaiheisiin, joka on tärkeä osa ilmakaasujen valmistusprosessia. Työ pohjautuu Oy AGA Ab:n ilmakaasutehtaan prosessiin Kilpilahdessa.

Ilmakaasut ovat ilmasta eroteltavia kaasuja, joista pitoisuuksiltaan suurimpia ovat typpi, happi ja argon. Nämä ovat tavallisimmat ilmakaasutehtailla tuotettavat kaasut. Ilma sisältää paljon myös prosessin kannalta haitallisia ainesosia. Ilman esikäsittelyn tehtävänä on puhdistaa ilmasta nämä haitalliset ainesosat. Esikäsittely koostuu eri vaiheista, joita ovat pölyn erotus, ilman komprimointi, jäähdytys ja kuivaus. Ilma sisältää paljon kosteutta, jonka määrä vaihtelee ulkoilman mukaan. Kosteuden poisto onkin tärkein osa ilman esikäsittelyä, sillä ilman on oltava täysin kuivaa ennen varsinaista tislusprosessia. Kosteuden poisto tapahtuu vaiheittain ensin komprimoimalla ja jäähdyttämällä ilma ja sen jälkeen adsorboimalla jäljelle jäänyt kosteus.

Tässä työssä käsitellään ilman ominaisuuksia ja sen koostumusta. Lisäksi käydään läpi AGA:n ilmakaasutehtaan esikäsittelyprosessi. Tarkemmin esikäsittelyprosessista perehdytään molekyyliuseulojen eli zeoliittikuivainten käyttöön ja niiden toiminnan mahdolliseen tehostamiseen. Kuivaimien tehtävänä on adsorboida ilman sisältämä kosteus ja hiilidioksidi. Seulamateriaalin toimittaja UOP Honeywell teki tätä insinööriyötä varten laskelman kuivainten optimaalista käyttöä varten. Työssä verrataan kuivainten nykyistä käyttöä ja tutkitaan niiden käytön mahdollista tehostamista UOP:n suunnitelman pohjalta.

2 Ilma ja sen ominaisuudet

2.1 Ilmakaasut

Ilmakaasutehtaat suunnitellaan yleensä siten, että niiden yhteydessä on jokin prosessiteollisuuden asiakas, jolle toimitetaan tehtaalta komprimoitua kaasua putkea pitkin, yleensä tyypeä tai happea. Kilpilahden ilmakaasutehdas sijaitsee Kilpilahden teollisuusalueella, jossa kaasumaista tyypeä toimitetaan eri asiakkaille, suurimpana Neste

Oilin öljynjalostamo. Loput kaasuista tuotetaan nestemäisenä, jolloin ne varastoidaan suuriin eristettyihin säiliöihin, joista ne viedään asiakkaille autoilla kuljetussäiliöissä. Nestemäiset kaasut varastoidaan asiakkaan varastosäiliöihin, joista ne saadaan ilmahöyrystimen avulla kaasumaiseksi, asiakkaan käyttöön sopivaksi. Nestemäinen kaasu on tilavuudeltaan erittäin vähäinen suhteessa kaasufaasissa olevaan kaasuun. Tämän vuoksi nesteytetystä kaasusta saadaan suuri määrä kaasua asiakkaan käyttöön.

2.2 Ilman epäpuhtaudet

Ilmakaasujen valmistuksessa käytettävä ilma on normaalia ilmakehästä saatavaa ilmaa, joka sisältää prosessin kannalta paljon erilaisia haitallisia ainesosia. Ilmakaasuprosessin kannalta haitallisimpia ilman sisältämiä epäpuhtauksia ovat

- pöly
- kosteus, pitoisuus riippuvainen sääolosuhteista
- hiilidioksidi, keskimääräinen pitoisuus noin 0,04 %
- hiilivedyt, esimerkiksi asetyleeni, pitoisuudet ppm-luokissa.

Ilma sisältää myös muita epäpuhtauksia, mutta pienempinä pitoisuuksina. Palamisesta syntyviä epäpuhtauksia ovat esimerkiksi rikkidioksidi ja typpidioksidi. Alueilla joilla on paljon teräs- tai kemianteollisuutta saattaa löytyä myös muita epäpuhtauksia. [1.]

2.3 Ilman koostumus

Ilman koostumusta voidaan kuvata seuraavasti:

Ilma on kaasua. Mutta ilma ei ole alkuaine, kuten happi tai typpi, eikä yhdiste, kuten hiilidioksidi. Ilma on kaasujen seos. [2.]

Taulukossa 1 on nähtävillä ilman kemiallinen koostumus. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa on kunkin kaasun pitoisuus ilmassa tilavuusprosentteina. Tilavuudeltaan suurin määrä ilmasta on typpeä. Tämän jälkeen suurimmat tilavuudet ovat hapella ja argonilla. Nämä kolme kaasua ovat ilmakaasuja, joiden valmistuksesta tässä työssä kerrotaan. Hiilidioksidin määrä vaihtelee sijainnin mukaan, sillä korkeimmat hiilidioksidipitoisuudet ovat yleensä suurissa kaupungeissa. [3.]

Taulukko 1. Kuivan ilman koostumus [3].

Kiehumispiste, 101.3 Kpa (1 atm)	-194.35 °C
Kuivan ilman koostumus meren pinnan tasolla (til.-%)	
typpi	78.084
happi	20.947
argon	0.934
hiilidioksidi	0.0325 - 0.1
neon	0.001818
helium	0.000524
metaani	0.0002
krypton	0.000114
typpioksiduuli	0.00002 - 0.00004
vety	0.00005
xenon	0.0000087
otsoni	0.000001 - 0.00005
radon	6×10^{-18}
hiilimonoksidi	0.000008 - 0.0001
rikkidioksidi	0.0000007 - 0.0001
typpioksidi	0.000001 - 0.0001
typpidioksidi	0.000001 - 0.0001
jodi	0 - 0.000001

Ilman kemiallisia ja fyysisiä ominaisuuksia voidaan usein pitää sen sisältämien ainesosien painotettuina keskiarvona. Ilmaa jäähdytettäessä normaali-ilmanpaineessa (1 atm) se alkaa nesteytymään noin -193 °C:ssa. Ensimmäisenä ilmasta kondensoituvat nestepisarat sisältävät jopa 40 % happea. Tämä johtuu siitä, että hapella on korkeampi kiehumispiste kuin typellä, joten se nesteytyy ensimmäisenä. Hapen määrän voi nähdä myös nesteytyvän ilman väristä. Ilma saa sinisen sävynsä hapesta, joten mitä enemmän happea sitä sinertävämpää nesteytynyt ilma on. Näin ollen viimeiset nesteytyvät pisarat sisältävät vain noin 7 % happea. [3.]

Taulukossa 2 näkyy eri kaasujen kiehumispisteet normaali-ilmanpaineessa (1 atm). Taulukosta nähdään, että ilmakaasuista hapella on korkein ja työllä alhaisin kiehumislämpötila.

Taulukko 2. Kaasujen kiehumislämpötiloja

	Celcius (°C)	Kelvin (K)
vesi	0	273
propani	-42	231
hiilidioksidi	-79	195
asetyleeni	-84	190
typpioksiduuli	-89	185
etaani	-89	185
eteeni	-104	169
xenon	-108	165
krypton	-153	120
metaani	-162	112
happi	-183	90
argon	-186	87
typpi	-196	77
neon	-246	27
vety	-253	20
helium	-269	4

2.4 Hiilivedyt

Hiilivedyt ovat orgaanisia yhdisteitä, jotka koostuvat hiilestä ja vedystä. Erilaisia hiilivety-yhdisteitä tiedetään olevan useita tuhansia. Fossiiliset polttoaineet kuten bensiini ja maakaasu koostuvat enimmäkseen hiilivedyistä. [3.]

Ilma sisältää hiilivetyjä nolasta ylöspäin joihinkin ppm-luokkiin. Alueilla joilla on paljon kemianteollisuutta voivat hiilivetypitoisuudet olla hetkellisesti myös suurempia, johtuen erilaisista päästöistä ilmakehään. Ilmakaasujen valmistuksessa huomioon otettavia hiilivetyjä ovat muun muassa metaani, etaani, propani ja eteeni. Ilmakaasujen valmis-

tuksessa saadaan ilman esikäsitteilyllä poistettua hiilivetyjen pääsy prosessiin osittain. Hiilivetyjen kiehumispisteet ovat huomattavasti korkeampia kuin ilmakaasujen (kt. taulukko 2), joten ne nesteytyvät ja kerääntyvät näin usein nestemäisen hapen sekaan prosessissa. Tähän kiinnitetään paljon huomiota ilmakaasujen valmistuksessa, jotta vaaratilanteita välttyttäisiin. [1.]

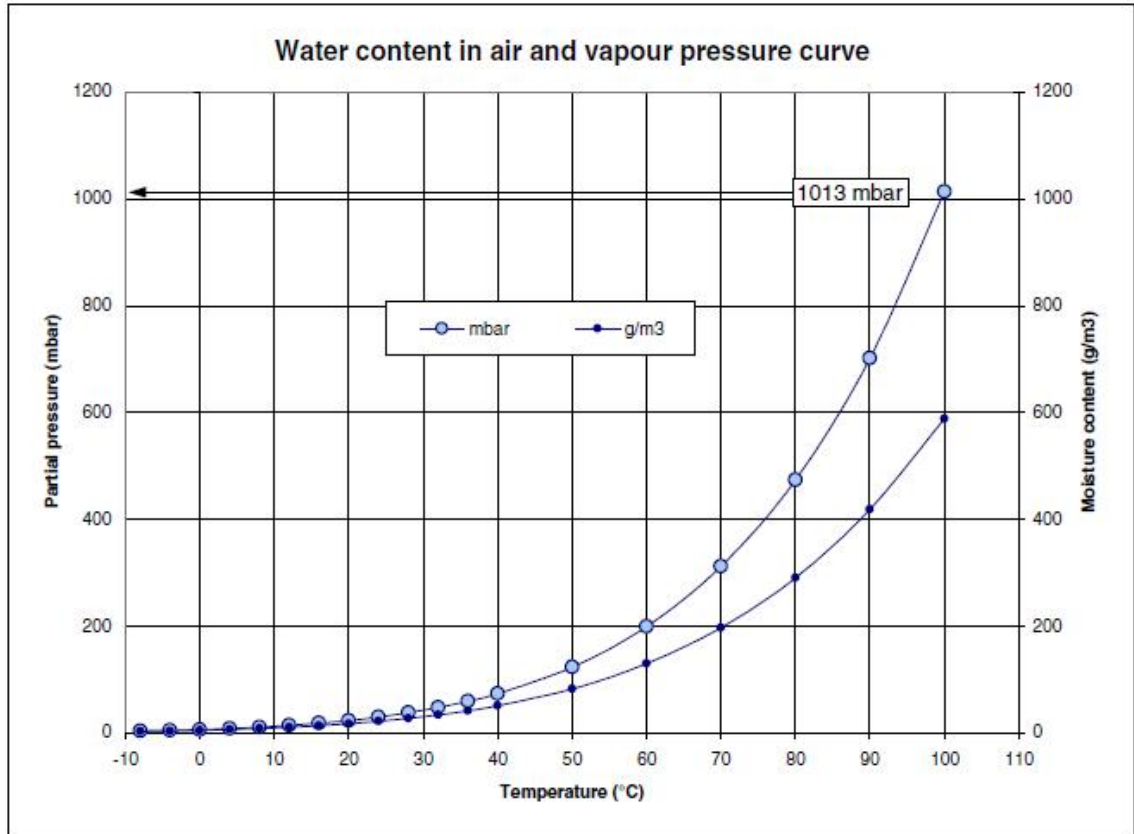
2.5 Ilman kosteus

Ilman sisältämän kosteuden poisto on tärkeää ilmakaasujen valmistuksessa. Kryogeenisessä prosessissa kosteus on haitallista, sillä prosessiin päästessään se jäätyy kiteiksi ja näin estää prosessilaitteiden normaalin toiminnan. Jopa yhden ppm:n kosteuspitoisuus prosessi-ilmassa on haitallista.

Ilman kosteudella tarkoitetaan ilman sisältämää vesihöyryä. Ulkoilma sisältää aina kosteutta, jonka määrä vaihtelee ilman lämpötilan mukaan. Lämmin ilma pystyy pidättämään enemmän vesihöyryä kuin kylmä ilma. Ilman kosteuden määrää voidaan ilmaista erilaisten suureiden avulla. Yleensä puhutaan suhteellisesta kosteudesta, joka ilmaisee prosentteina ilman sisältämän vesihöyryn määrän suhteessa kyseisen lämpötilan maksimivesihöyryn määrään. Absoluuttinen kosteus taas ilmaisee vesihöyryn määrän grammoina kuutiometrissä ilmaa. Kastepistelämpötila kuvaa lämpötilaa, johon ilman tulee jäähtyä, ennen kuin sen sisältämä vesihöyry alkaa tiivistyä. [4.]

Ilman vesihöyrypitoisuuden ollessa kylläinen on ilmassa silloin maksimimäärä kosteutta, eli ilma on sen kastepistelämpötilassa. Höyrynpaine kuvaa ilman sisältämän vesihöyryn painetta. Ilman ollessa kylläistä on höyrynpaine sitä korkeampi mitä lämpimämpää ilma on. Lämpötilan ollessa 100 °C höyrynpaine on yhtä suuri kuin normaali ilmanpaine, jolloin vesihöyry syrjäyttää ilman. Tästä johtuu veden kiehumisen 100 °C:ssa normaali-ilmanpaineessa. [1.]

Kuvassa 1 on näkyvillä kaksi kuvaajaa, joista alempi ilmaisee kosteuden määrän (g/m^3) kylläisessä ilmassa sen eri lämpötiloissa. Ylempi kuvaaja ilmaisee kylläisen höyryn paineen eri lämpötiloissa. Kuvaajasta nähdään, että ilman kosteuspitoisuus kasvaa nopeasti lämpötilan noustessa.



Kuva 1. Ilman kosteuspitoisuus ja höyryn paine eri lämpötiloissa [1].

Taulukossa 3 on merkitty kosteuspitoisuus ja höyryn paine kylläisessä ilmassa eri lämpötiloissa. Taulukosta nähdään, että ilma sisältää kosteutta myös lämpötilan laskiessa alle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$:n. Ilman kosteuspitoisuuden ollessa kylläistä sen suhteellinen kosteus on 100 %. Sateisella säällä ilman suhteellinen kosteuspitoisuus on 100 %, kun taas aurinkoisella säällä suhteellinen kosteus voi olla 60 %. Siitä huolimatta aurinkoisella säällä ilman kosteuspitoisuus voi olla korkeampi, jos myös lämpötila on korkeampi. [1.]

Taulukko 3. Ilman kosteuspitoisuus ja höyryn paine eri lämpötiloissa [1.].

Lämpötila (°C)	Kosteuspitoisuus (g/m ³)	Höyryn paine (mbar)
-10	2,3	2,9
0	4,8	6,1
5	6,8	8,7
10	9,4	12,3
20	17,3	23,4
30	30,3	42,4
40	51	123
100	59,8	1013

3 Ilman esikäsitely

3.1 Prosessin kuvaus

Ilman esikäsitelyllä tarkoitetaan prosessia, jossa ilmakehästä otettu ilma komprimoidaan ja puhdistetaan käyttökelpoiseksi prosessointia varten. Esikäsitelyn ensimmäinen vaihe on ilman paineistus kompressorin avulla haluttuun paineeseen. Kompressorin imupuolella on hiukkassuodattimet, joilla poistetaan ilman sisältämät pöly ja pienhiukkaset. Ilman komprimointi tapahtuu turbokompressorin avulla. Turbokompressorin koostuu useammasta vaiheesta eli juoksupyörästä, joissa ilma paineistetaan. Turbokompressorin käyttö perustuu sen kapasiteettiin paineistaa suuri määrä ilmaa. Paineistettu ilma puristuu kasaan, jolloin sen tilavuus pienenee. Tilavuuden pienentyessä ilma pystyy sitomaan vähemmän kosteutta. Tämän vuoksi turbokompressorin jokaisen vaiheen jälkeen on välijäähdytin ja kondenssiveden poisto. Kompressorin jälkeen ilma on kylläistä ja lämmintä, joten se sisältää vielä kosteutta. Kosteuden poistoa varten ilma on ensin jäähdytettävä. Jäähdyttämällä suuri osa paineistetun ilman sisältämästä kosteudesta tiivistyy pisaroiksi. Jäähdytykseen käytetään erillistä jäähdytysyksikköä, jossa ilma jäähdytetään ammoniakkin avulla. Jäähdytyneeseen ilmaan muodostuva kondenssivesi erotetaan pisaraerottimella, minkä jälkeen paineistettu ilma on kylläistä ja alhaisessa noin + 5 °C:n lämpötilassa. Jäähdytynyt ilma ei ole vielä täysin kuivaa, joten loput sen sisältämästä kosteudesta adsorroidaan kuivaimien avulla. Kuivaimissa adsorroidaan myös ilman sisältämä hiilidioksidi, sekä joitakin hiilivetyjä. Molekyyliseulojen jälkeen ilma on puhdistettu vedestä ja hiilidioksidista kokonaan ja se voidaan nesteyttää ja erottaa siitä halutut kaasut.

3.2 Ilman komprimointi

Lähes kaikissa ilmakaasutehtaissa ilman komprimointiin käytetään turbokompressoria, lukuun ottamatta joitain pienempiä laitoksia, joissa käytössä on ruuvikompressori. Turbokompressorin hyötyjä ovat mahdollisuus suuriin ilmamääriin, sekä konstruktio jonka ansiosta voiteluöljy ei pääse ilman sekaan. Normaali turbokompressori koostuu juoksupyörästä, joka on spiraalin muotoisen vaipan sisällä. Juoksupyörä ja vaippa on valmistettu siten, että niiden välissä on niin pieni välilyös, etteivät ne kosketa toisiaan. Ilma tulee aksiaalisuunnassa juoksupyörälle, joka on kiinni laakeroidussa akselissa. Kaasun vuoto ulos akselia pitkin on estetty käyttämällä labyrinttitiivistettä. Juoksupyörä pyörii kovalla vauhdilla, joka saa aikaan sen, että myös sisään tuleva ilma alkaa pyörimään suurella nopeudella. Juoksupyörältä ilma poistuu radiaalisuunnassa sen ympäröimään vaippaan, jossa se menettää nopeutensa ja paisuu korkeaan paineeseen. Bernoullin lakia noudattaen kaasun kineettinen energia muuttuu korkeaksi paineeksi. Koska ainoastaan yhdessä juoksupyörässä ei painetta saada nostettua tarpeeksi korkeaksi, on tarpeellista käyttää useampaa juoksupyörää. Yleensä turbokompressori koostuu kolmesta tai neljästä juoksupyörästä. Ilma lämpenee paineistettaessa, joten jokaisen vaiheen jälkeen on omat välijäähdyttimet. Tämän ansiosta saadaan tehokkaampi paineistus aina seuraavassa vaiheessa. Kompressorin jokaisen vaiheen jälkeen on myös lauhteen poisto, jossa paineistetun ilman ylimääräinen kosteus poistetaan. Kun ilma komprimoidaan ilmakehän paineesta (1 atm) kuuden bar:n paineeseen, sen tilavuus pienenee noin 1/6 m³:iin (Boyle'n laki). Tämän vuoksi paineistetun ilman sisältämä kosteus vähenee huomattavasti. Ilmamäärän säätö turbokompressorissa tapahtuu johtosiivikon avulla. Yleensä johtosiivikko on ensimmäisen vaiheen juoksupyörän imupuolella. Johtosiivikolla säädetään kulma, jolla tuleva ilma ohjataan juoksupyörälle. Mitä suurempi kulma johtosiivikossa on, sitä pienempi on ilmamäärä ja myös tarvittava energia. Muita energian kulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat imulämpötilat joka vaiheella ja paineen nosto. [1.]

3.3 Jäähdytysyksikkö ja sen toiminta

Jäähdytysyksikön tehtävänä on jäähdyttää kompressorilta tuleva paineistettu ilma noin + 5 - 7 °C:seen. Jäähdytysyksikön avulla saadaan kuivaimien kuormitusta vähennettyä merkittävästi. Prosessissa käytetään jäähdytysaineena paljon vettä, muun muassa koneiden jäähdytykseen. Jäähdytysveden lämpötila riippuu paljon vallitsevan ulkoilman lämpötilasta, joten sen jäähdytysteho ei riitä jäähdyttämään ilmaa tarpeeksi alhaiseen

lämpötilaan. Tämän vuoksi ilman jäähdytysyksikössä käytetään kylmäaineena ammoniakkia.

Jäähdytysyksikkö toimii samalla periaatteella kuin normaalit kylmäkoneet. Se koostuu kahdesta kompressorista, joista toinen on varalla, sekä lauhduttimesta ja höyrystimestä. Lisäksi yksikköön kuuluu keräilysäiliö nestemäiselle ammoniakille, sekä veden erotin ilman kondenssivedelle. Ilman suhteellinen kosteus on 100 % sen tullessa ilmakompressorilta jäähdytysyksikköön. Ilman lämpötila ennen jäähdytystä on riippuvainen ulkoilman lämpötilasta, mutta enimmillään se on noin + 35 °C.

Toimintakuvaus

Jäähdytysyksikön kylmäaineena on ammoniakki. Höyrystimeltä tuleva ammoniakkikaasu virtaa kompressorille, jossa se nostetaan 13,9 bar:n paineeseen. Tässä paineessa ammoniakin nesteytymislämpötila on + 35,5 °C. Kompressorilta tuleva korkeapaineinen kaasu virtaa seuraavaksi ulkoilmassa olevaan lauhduttimeen. Lauhduttimessa kaasu nesteytyy. Lauhduttimelta tuleva nestemäinen ammoniakki on nyt 13,9 bar:n paineessa ja sen lämpötila + 34 °C. Seuraavaksi neste kerätään keräilysäiliöön, jossa se on edelleen korkeassa paineessa. Keräilysäiliöstä nestettä voidaan ottaa jäähdytystarpeen mukaan. Keräilysäiliöstä otettavan nesteen määrää säädellään paisuntaventtiilin avulla. Paisuntaventtiili laskee ammoniakin paineen 5,4 bar:iin, jolloin sen lämpötila laskee + 7 °C:seen. Paisuntaventtiililtä tuleva neste virtaa neste-erottimeksi kutsuttuun säiliöön. Paisuntaventtiilin avulla neste-erottimen pinta pidetään vakiona. Neste-erotin sijaitsee höyrystimen yläpuolella, ja ne ovat putkiston avulla yhteydessä toisiinsa. Höyrystimenä toimii putkilämmönvaihdin, jonka läpi jäähdytettävä prosessi-ilma virtaa. Neste-erottimen ja höyrystimen välillä toimii ns. luonnollinen kierto, jossa nestemäinen ammoniakki valuu alapuolella olevaan höyrystimeen ja höyrystynyt ammoniakki nousee ylöspäin neste-erottimen kautta edelleen takaisin kompressorille.

Ilman virratessa höyrystimen läpi se jäähtyy n. + 7 °C:seen. Ilman jäähtyessä siitä kondensoituu paljon kosteutta. Kosteuden poistoa varten on erillinen veden-erotin, jossa kondensoitunut vesi poistetaan. Veden-erottimessa ilman virtausuuntaa ja virtausnopeutta muuttamalla, sekä suodattimen avulla, ilman sisältämä kondenssivesi saadaan poistettua. [5.]

3.4 Kosteuden poisto

Ilman esikäsitelyssä ilmasta poistetaan paljon kosteutta. Kosteus poistuu vaiheittain ja sen määrä vaihtelee ulkoilman lämpötilan mukaan. Ensimmäinen vaihe on ilman koprimointi, jossa ilman tilavuus pienenee ja samalla sen sitoma kosteuspiitoisuus pienenee. Toinen vaihe on ilman jäähditys, jossa paineistettu ilma jäähdytetään. Jäähtyneen ilman kastepistelämpötila laskee, jolloin se luovuttaa lisää kosteutta. Kolmannessa vaiheessa on molekyyliseulat eli kuivaimet, jossa loput ilman sisältämästä kosteudesta poistetaan.

3.5 Molekyyliseulat eli kuivaimet

Kuivaimien tehtävänä on adsorboida kosteus ja hiilidioksidi prosessiin menevästä ilmasta. Kosteuden ja hiilidioksidin poisto tapahtuu kahden rinnakkain olevan kuivaimen avulla. Kuivaimet sisältävät paksun pedin zeoliitista koostuvaa massaa, jonka läpi ilman virtaus ohjataan. Kuivaimen sisältämä zeoliitti adsorboi sen läpi virtaavan ilman sisältämät epäpuhtaudet. Molekyyliseuloja on kaksi kappaletta, ja ne toimivat sykleittäin. Samalla kun toinen molekyyliseula on käytössä ilman puhdistamiseen, niin toista elvytetään poistamalla siihen adsorboituneet epäpuhtaudet. Elvytyskaasu virtaa molekyyliseulan läpi vastakkaiseen suuntaan kuin ilma. Elvytykseen käytetään prosessista saatavaa typpikaasua, joka ei sisällä lainkaan kosteutta eikä hiilidioksidia. Elvytyksen tärkeimmät vaiheet ovat lämmitys ja jäähditys. Lämmityksessä kuuma elvytyskaasu saa adsorboituneet molekyylit irtoamaan zeoliittikiteiden pinnalta. Kuivaimesta lähtevät epäpuhtaudet puhalletaan ulkoilmaan elvytyskaasun mukana. Jäähdityksessä kuivaimen lämpötila jäähdytetään, jolloin siitä tulee taas toimintakykyinen.

3.5.1 Zeoliitti

Zeoliitit ovat alkali- ja maa-alkalimetallien alumiinisilikaatteja. Zeoliitteja esiintyy luonnossa, mutta niitä valmistetaan myös synteettisesti. Molekyyliseulat ovat synteettisesti valmistettuja zeoliitteja. Molekyyliseulojen nimi tulee niiden kyvystä erotella molekyylejä niiden koon perusteella. Molekyyliseuloja on eri tyyppisiä, joista yleisimpiä ovat A- ja X-tyypin molekyyliseulat. Esimerkkinä 13X-molekyyliseula, joka adsorboi halkaisijaltaan alle 10 ånströmin molekyylit, mutta suuremmat eivät adsorboidu. [6.]

Synteettisesti valmistetut zeoliitit aktivoidaan poistamalla niistä kosteus, minkä jälkeen ne pystyvät adsorboimaan tehokkaasti. Molekyyliseulojen tehokas adsorbtiokyky perustuu niiden huokoisen rakenteen laajaan pinta-alaan. Molekyyliseulojen ulkopinta-ala on vain noin yhden prosentin verrattuna niiden huokosten kokonaispinta-alaan. Huokosten koot ovat molekyyliseuloissa täsmälleen saman kokoiset, minkä ansiosta halutut molekyylit saadaan eroteltua. Molekyyliseulojen adsorbtiokyky perustuu molekyylien polaarisuuteen. Zeoliittikiteen kationit toimivat positiivisena varauksena, jotka vetävät puoleensa adsorboitavien molekyylien negatiivisia varauksia. [7.]

Kuvassa 2 on X-tyyppin molekyyliseulan rakenne. X-tyyppin molekyyliseuloja käytetään ilmakehän puhdistuksessa ilman puhdistukseen ja kuivaamiseen. Ne kykenevät adsorboimaan tehokkaasti kosteutta ja hiilidioksidia.



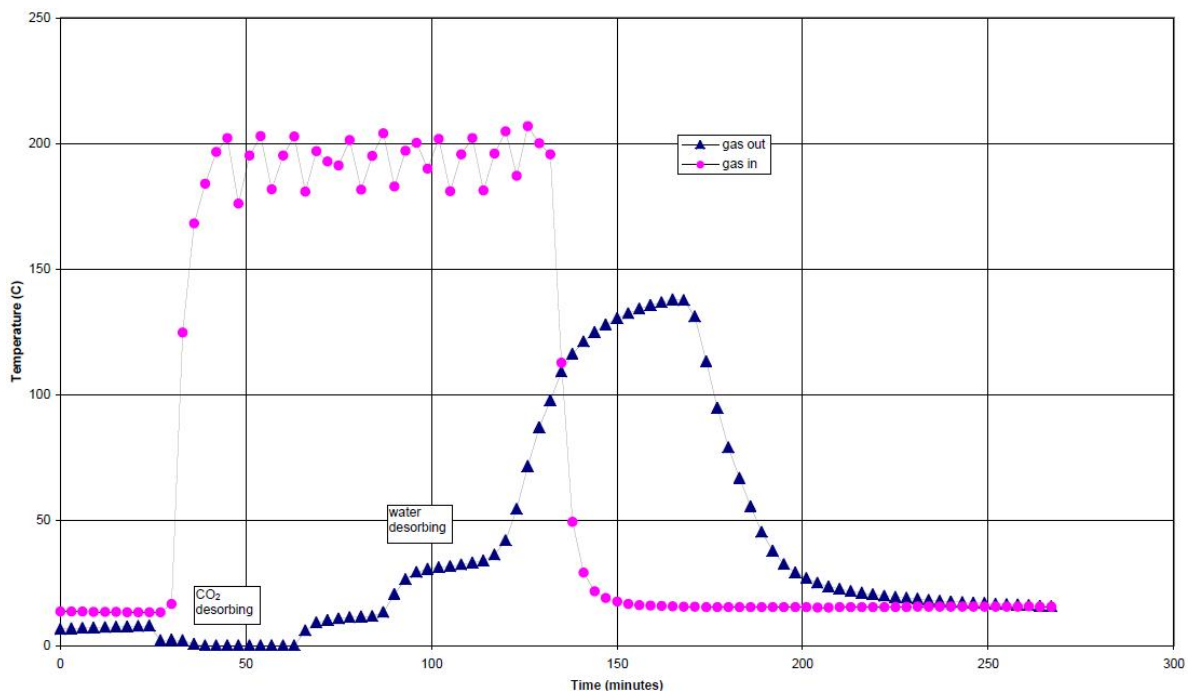
Kuva 2. X-tyyppin molekyyliseulan kiteen rakenne

3.5.2 Riskit

Kuivaimien käyttöön liittyy riskitekijöitä, jotka on otettava huomioon niiden käytössä. Zeoliitilla on rajoitetut mahdollisuudet poistaa epäpuhtauksia ilmasta, joten yhden seulan liian pitkä käyttöaika voi johtaa kosteuden ja hiilidioksidin läpipääsyyn. Usein sekvenssin pitkittymisen syynä on esimerkiksi venttiilissä jokin laiterikko, joka estää sekvenssin etenemisen normaaliajassa. Myös jäähdytysyksikön toiminta on tärkeää kuivaimien toiminnan kannalta. Jos ilmaa ei saada jäähdytettyä tarpeeksi ennen molekyyliseuloja, nousee sen kosteuspitoisuus huomattavasti. Tämä johtaa seulojen kapasiteetin laskuun suhteessa samaan määrään kuivempaa ilmaa. Liian nopeat paineenvaihtelut ovat myös haitaksi molekyyliseuloille. Liian nopea paineenvaihtelu aiheuttaa zeoliitti-

ryynien hioutumista toisiinsa, jolloin niistä muodostuu pölyä. Muodostunut pöly heikentää materiaalin kykyä poistaa muun muassa hiilidioksidia. Molekyyliseulan on pystyttävä tehokkaasti puhdistamaan ilma siinä ajassa, kun toinen seula elvytetään.

Lämpötiloja seuraamalla nähdään, onko molekyyliseulojen kosteus ja hiilidioksidi poistunut kokonaan. Kuvassa 3 on nähtävillä kuivaimen elvytysvirtaus. Vaaka-akselilla on näkyvissä kulunut aika minuuteissa ja pystyakselilla lämpötila. Toinen käyrä (gas out) kuvaa ulostulevan elvytysvirtauksen lämpötilaa. Tästä käyrästä nähdään ovatko kuivaimen kertyneet epäpuhtaudet poistuneet. Hiilidioksidin ja veden poistuminen huomataan lämpötilan pysyessä vakiona, minkä jälkeen se taas nousee (kuvassa 3, CO₂ ja water desorbing). Kun lämpötila ei nouse, elvytysvirtauksen lämpöenergia kuluu kertyneen hiilidioksidin ja vesimolekyylien irrottamiseen zeoliittikiteistä. Ulostulevan lämpötilan huipun saavuttaessa noin 140 °C:een lämpötilan, nähdään että kertyneet epäpuhtaudet ovat poistuneet. Toinen käyrä (gas in) näyttää sisään menevän elvytysvirtauksen lämpötilan, joka on lämmitysvaiheessa noin 200 °C. Lämmityksen jälkeen elvytysvirtauksen lämpötila laskee noin 10 °C:seen. Jäähdytystä jatketaan kunnes ulostuleva kaasu on jäähtynyt tarpeeksi.

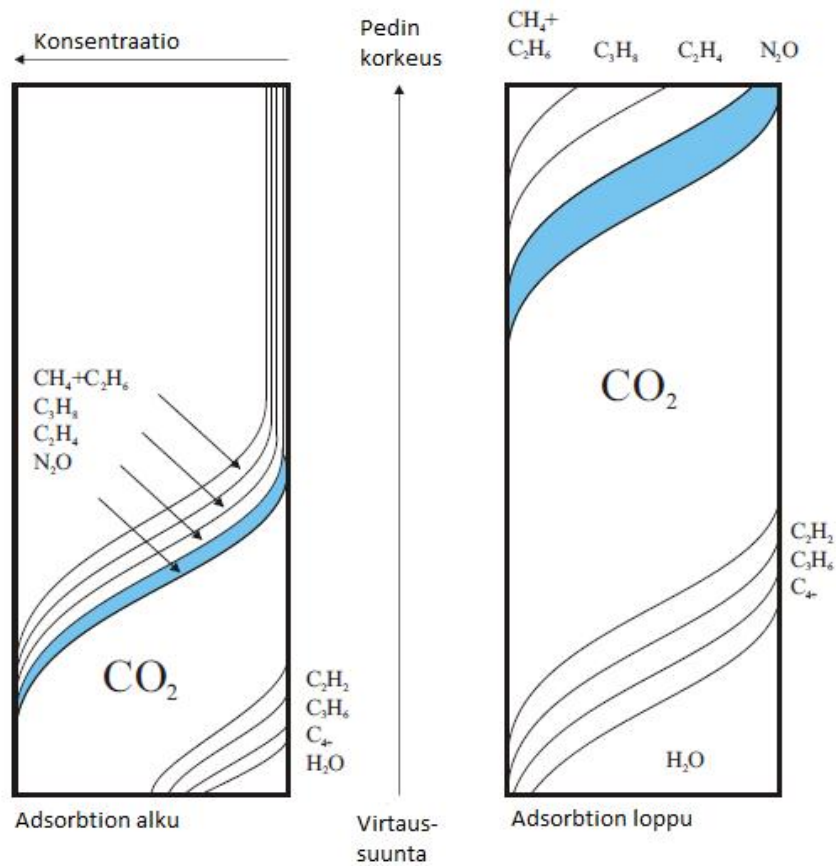


Kuva 3. Kuivaimen elvytyskaasun lämpötilat

3.5.3 Adsorboitavat komponentit

Kuivaimien päätehtävä on adsorboida prosessiin menevästä ilmasta kosteus ja hiilidioksidi. Kosteus ja hiilidioksidi, sekä suurin osa ilman sisältämistä hiilivedyistä adsorboituvat kokonaan. Eteeni ja propaani adsorboituvat osittain, mutta metaani ja etaani eivät ollenkaan. Jos kuivaimen kapasiteetti ylitetään, hiilidioksidi pääsee kuivaimen läpi prosessiin. Tämän vuoksi kuivaimilta tulevasta ilmasta analysoidaan sen hiilidioksidipitoisuus. Hiilidioksidin päästessä prosessiin se muuttuu jäähtyessään lumeksi ja voi tukkia lämmönvaihtimen. [1.]

Kuivainta kuormittaessa ilman sisältämät epäpuhtaudet tulevat sen läpi tietyssä järjestyksessä. Siksi on tärkeää mitoittaa yhden syklin pituus siten, etteivät haitalliset epäpuhtaudet pääse virtaamaan kuivaimen läpi. Kuvassa 4 näkyy epäpuhtauksien kertyminen kuivaimen zeoliittipetiin syklin alku- ja loppuvaiheessa. Kosteus adsorboituu ensimmäisenä, joten se kertyy kuivaimen alaosaan. Hiilidioksidi nousee kuivaimen pedin yläosaan asti, minkä vuoksi se pääsee ensimmäisenä läpi kuivaimen ylikuormittuessa. Kuvasta nähdään myös, että tietyt hiilivedyt pääsevät kuivaimen läpi koko syklin ajan.



Kuva 4. Kuivaimen läpi tulevat epäpuhtaudet

Kuivaimen läpi tulevat epäpuhtaudet tulevat seuraavassa järjestyksessä:

- metaani, CH_4
- etaani, C_2H_6
- propaani, C_3H_8
- eteeni, C_2H_4
- typpioksiduuli eli ilokaasu, NO_2
- hiilidioksidi, CO_2
- asetyleeni, C_2H_2
- propeeni, C_3H_6
- korkeammat hiilivedyt, CH_{4+}

Kuivainta elvytettäessä adsorboituneiden epäpuhtauksien poistumisjärjestys on päinvastainen, koska elvytyskaasu virtaa vastakkaiseen suuntaan kuin puhdistettava ilma. Kosteus kerääntyy kuivaimen alaosaan, joten se poistuu viimeisenä. Tämän vuoksi on tärkeää, että elvytyksen lämmitysvaihe on tarpeeksi pitkä, jolloin kaikki kuivaimen kertynyt kosteus saadaan poistettua. Jos kuivainta ylikuormitetaan, sitä ei välttämättä huomata heti, sillä kosteus kertyy pikkuhiljaa kuivaimen pohjalle liian lyhyeksi jääneen lämmityksen vuoksi.

4 Kuivaimien ohjausekvenssi

4.1 Ohjausekvenssin periaate

Kuivaimien putkisto on suunniteltu siten, että automaattiventtiilejä ohjaamalla niiden toiminta saadaan askellettua. Jokaisessa askeleessa kummallekin kuivaimelle ohjataan askeleen edellyttämä kaasun virtaus. Adsorbtiossa kaasu on prosessiin menevää ilmaa ja elvytyksessä prosessista tulevaa typpeä.

Molekyyliseuloja ohjaa sekvenssi, jonka päävaiheet ovat seuraavat:

- adsorptio, +5°C asteinen ilma 5 - 6 barg:n paineessa jäähdytysyksiköltä
- eristäminen
- paineenlasku adsorptiossa olleesta molekyyliseulasta
- lämmitys, epäpuhtaalla typellä +200 °C 0,2 barg:n paineessa
- jäähdytys, +10 °C-asteisella epäpuhtaalla typellä
- paineistus, ilmalla 5 – 6 barg:n paineeseen
- rinnanajo.

Molekyyliseulojen toimintaa ohjaa automaattinen sekvenssinohjauslogiikka. Molekyyliseuloihin menevä ja niistä lähtevä putkisto on suunniteltu ja rakennettu siten, että ilman ja elvytyskaasun virtaukset saadaan ohjattua venttiilien avulla oikein. Puhdistettava ilma virtaa molekyyliseulan läpi alhaalta ylöspäin ja elvytyskaasu päinvastaiseen suuntaan. Venttiilien lisäksi logiikka ohjaa elvytyskaasulämmitintä ja elvytyskaasuvirtausta. Elvytyskaasun virtaus säädetään automaattiventtiilillä, jota ohjaa virtaussäädin. Sekvenssiä ohjataan yhdentoista automaattiventtiilin avulla, jotka toimivat kiinni/auki

periaatteella. Sekvenssi ohjaa elvytyskaasun virtausta automaattisen virtaussäätöventtiilin avulla.

Molekyyliseulojen sekvenssi koostuu yhteensä 24 askeleesta. Sekvenssin suunniteltu nimellisaika on 8,1 h. Askeleet koostuvat ennalta määritetyistä venttiilien ohjauksista ja kunkin askeleen suunnitellusta kestosta. Sekvenssin avulla saadaan kummallekin kuivaimelle ohjattua kunkin askeleen edellyttämä virtaus. Sekvenssi etenee automaattisesti kronologisessa järjestyksessä, kunkin ennalta määrätyn askeleen läpi. [8.]

4.2 Ohjausekvenssin eteneminen

4.2.1 Ohjaustilat

Ohjelmalla on kolme ohjaustilaa missä sekvenssi voi olla.

AUTO	Normaalijotila, jolloin sekvenssi etenee automaattisesti askeleesta toiseen askelehtojen täytyttyä.
MAN	Sekvenssiä voidaan ohjata myös manuaalisesti, jolloin askeleesta toiseen siirrytään manuaalisesti ohjaamalla sekvenssi eteenpäin. Siirto ei ole kuitenkaan mahdollinen, mikäli prosessin tila ei sitä edellytä. Vasta kun prosessiehdot ovat täyttyneet, on mahdollista edetä manuaalisesti seuraavaan askeleeseen.
HOLD	Lukitustila, johon sekvenssi menee jonkin lukituksen seurauksena. Sekvenssi menee lukitustilaan silloin, kun jokin askeleen ehdoista ei ole täyttynyt määräaikaan mennessä.

Sekvenssin etenemistä voidaan seurata grafiikkanäytöltä, jossa kunkin kuivaimen tila näkyy tekstinä ja numerona. Lisäksi kullakin askeleella on grafiikkanäytöllä nähtävissä ajastin, josta näkyy askeleen jäljellä oleva aika.

4.2.2 Elvytyskaasuvirtaus ja -lämmitin

Kuivaimien elvytyskaasu on prosessista tulevaa typpikaasua. Elvytyskaasuvirtausta säädetään kahden automaattiventtiilin avulla. Toinen venttiili säättää kuivaimille menevän virtauksen, joka vaihtelee jäähdytys- ja lämmitysaskelien mukaan. Toinen venttiili puhalttaa ylimääräisen typen ulkoilmaan, minkä avulla saadaan prosessista tuleva virtaus pidettyä tasaisena.

Elvytyksen lämmitysaskelissa kuivaimille menevä elvytyskaasu lämmitetään. Lämmityskaasun lämpötila on n. 200 °C. Elvytyskaasun lämmitykseen käytetyn lämmittimen kokonaisteho on 300 kW. Lämmitin koostuu kolmesta vastuksesta, joiden tehot ovat 1. 150 kW, 2. 100 kW ja 3. 50 kW. Vastukset kytketään päälle tarpeen mukaan niin, että elvytyskaasun lämpötila saadaan pidettyä tasaisena.

4.2.3 Tarkka sekvenssikuvauus

Seuraavaksi sekvenssin eteneminen on kuvattu askeleittain. Molekyyliseulat on nimetty kirjaimin A ja B. Kunkin askeleen kohdalla on kerrottu tarvittavien venttiilien asennot ja askeleen kesto ajallisesti. Kuvaan 5 on merkitty kunkin venttiilin positiot.

ASKEL 1 ERISTETÄÄN B

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A ja KV1811A

Suljetaan venttiilit: KV1810B ja KV1811B

Kaikki muut venttiilit ovat kiinni. Sekvenssi siirtyy seuraavaan askeleeseen 1 min. kuluttua.

ASKEL 2 PROSESSITARKISTUS

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A ja KV1811A

Kaikki muut venttiilit ovat kiinni. Askeleessa tarkistetaan ettei, seulan B paine PI1801B ole jo valmiiksi alle L1-rajan. Mikäli kaikki on kunnossa, sekvenssi siirtyy seuraavaan askeleeseen 20 sek. kuluttua.

ASKEL 3 PAINEENLASKU B

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A ja KV1811A

Avataan venttiili: KV1814B

Paineenlaskuaika on 15 min., jonka aikana paine PI18101B laskee alle L1-rajan ja sekvenssi etenee seuraavaan askeleeseen. Mikäli paine ei laske määräajassa alle L1-rajan, menee sekvenssi HOLD-tilaan. Mikäli paineen lasku on liian nopea, tulee ainoastaan hälytys liian nopeasta paineen laskusta.

ASKEL 4 ELVYTYSVIRTAUS

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A ja KV1811A

Suljetaan venttiili: KV1814B

Avataan venttiilit: KV1812B ja KV1813B. Venttiilit aukeavat 2 min. rampilla.

Asetetaan FICZA1821 automaatille, jolloin virtaussäätäjä ajaa asetusarvonsa oikeaan aikaan noin 2 min. aikana. Askeleen kokonaisaika on 5 min., jonka aikana virtaus tasaantuu oikeaan arvoonsa.

ASKEL 5 PROSESSITARKISTUS

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A, KV1811A, KV1812B ja KV1813B

Säätäjä FICZA1821 on automaatilla ja säätää elvytysvirtausta.

Askeleessa tarkistetaan, että lämpötila TICZA1825 ei ole valmiiksi yli H1-ajan ja siirytään seuraavaan askeleeseen 20 sek. kuluttua. Mikäli TICZA1825 on yli rajan H1 menee sekvenssi HOLD-tilaan.

ASKEL 6 LÄMMITYS B

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A, KV1811A, KV1812B ja KV1813B

Säätäjä FICZA1821 on automaatilla ja säätää elvytysvirtausta.

Asetetaan TICZA1825 automaatille, jolloin säätäjä ajaa asetusarvonsa oikeaan arvoon noin 5 min. aikana. Säätäjän lähtö säätää kolmea lämmitysvastusta siten, että lähdoilla:

10 % vastus 1 päälle

50 % vastus 2 päälle

75 % vastus 3 päälle

Ehdot seuraavaan askeleeseen siirtymiseksi ovat

TICZA1825:n pitää olla yli rajan H1, TI1805B:n pitää olla yli rajan H1 ja lämmitysajan pitää olla kulunut loppuun.

Askeleesta seuraavaan voi siirtyä myös manuaalisesti, vaikka aika ei olisi kulunut loppuun, mikäli muut ehdot ovat täytetyt. Minimiaika on kuitenkin 20 min.. Mikäli aika on kulunut loppuun eikä muita ehtoja ole täytetty, menee sekvenssi HOLD-tilaan. Lämmitysaikaa voi muuttaa manuaalisesti näppäimistöltä 2 - 3 tunnin välillä.

ASKEL 7 LÄMMITYSVASTUKSET POIS

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A, KV1811A, KV1812B ja KV1813B

Säätäjä FICZA1821 on automaatilla ja säätää elvytysvirtausta.

Säätäjä TICZA1825 on manuaalilla ja sen lähtö on 0 %. Lämmitysvastukset varmistetaan, etteivät ne mene päälle.

ASKEL 8 PROSESSITARKISTUS

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A, KV1811A, KV1812B ja KV1813B

Säätäjä FICZA1821 on automaatilla ja säätää elvytysvirtausta.

Askeleessa tarkistetaan, ettei lämpötila TI1805B ole valmiiksi alle L1-
rajan. Mikäli lämpötila on yli L1-rajan siirrytään seuraavaan askeleeseen,
ellei näin ole menee sekvenssi HOLD-tilaan.

ASKEL 9 JÄÄHDYTYS B

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A, KV1811A, KV1812B ja
KV1813B

Säätäjä FICZA1821 on automaattilla ja säätää elvytysvirtausta.

Ehdot seuraavaan askeleeseen siirtymiseksi ovat

TI1805B:n pitää olla alle rajan L1.

Jäähdytysajan pitää olla kulunut loppuun.

Askeleesta voi siirtyä myös manuaalisesti seuraavaan vaiheeseen, mikäli
muut ehdot paitsi aika ovat täyttyneet. Minimiaika manuaalisesti on kui-
tenkin 20 min.. Mikäli aika on kulunut loppuun eikä muita ehtoja ole täytet-
ty, menee sekvenssi HOLD-tilaan. Jäähdytysaikaa voi muuttaa manuaali-
sesti 3 - 4 tunnin välillä.

ASKEL 10 PROSESSITARKISTUS

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A, KV1811A, KV1812B ja
KV1813B

Askeleessa tarkistetaan, ettei paine-ero PDI1803B ole valmiiksi alle L1-
rajan. Mikäli paine-ero on yli L1-rajan siirtyy, sekvenssi seuraavaan aske-
leeseen 20 sek. kuluttua. Ellei niin sekvenssi menee HOLD-tilaan.

ASKEL 11 PAINEISTUS B

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A ja KV1811A

Venttiilit KV1812B ja KV1813B ajetaan kiinni 2 min. rampilla. Kun venttiilit ovat kiinni, menee FICZA1821 manuaalille ja lähtö 0 %:iin ja venttiili KV1815 aukeaa 2 min. rampilla.

Paineistusaika on 15 min., jonka aikana paine-eron PDI1803B laskettua alle L1-rajan siirtyy sekvenssi seuraavaan askeleeseen. Mikäli paine-ero ei ole laskenut 16 min. aikana alle L1-rajan, menee sekvenssi HOLD-tilaan. Mikäli paine-ero laskee alle 12 min. tulee hälytys liian nopeasta paineen laskusta.

ASKEL 12 RINNANAJO

Askeleessa ovat auki venttiilit: KV1810A ja KV1811A

Suljetaan venttiili KV1815

Avataan venttiilit: KV1810B ja KV1811B

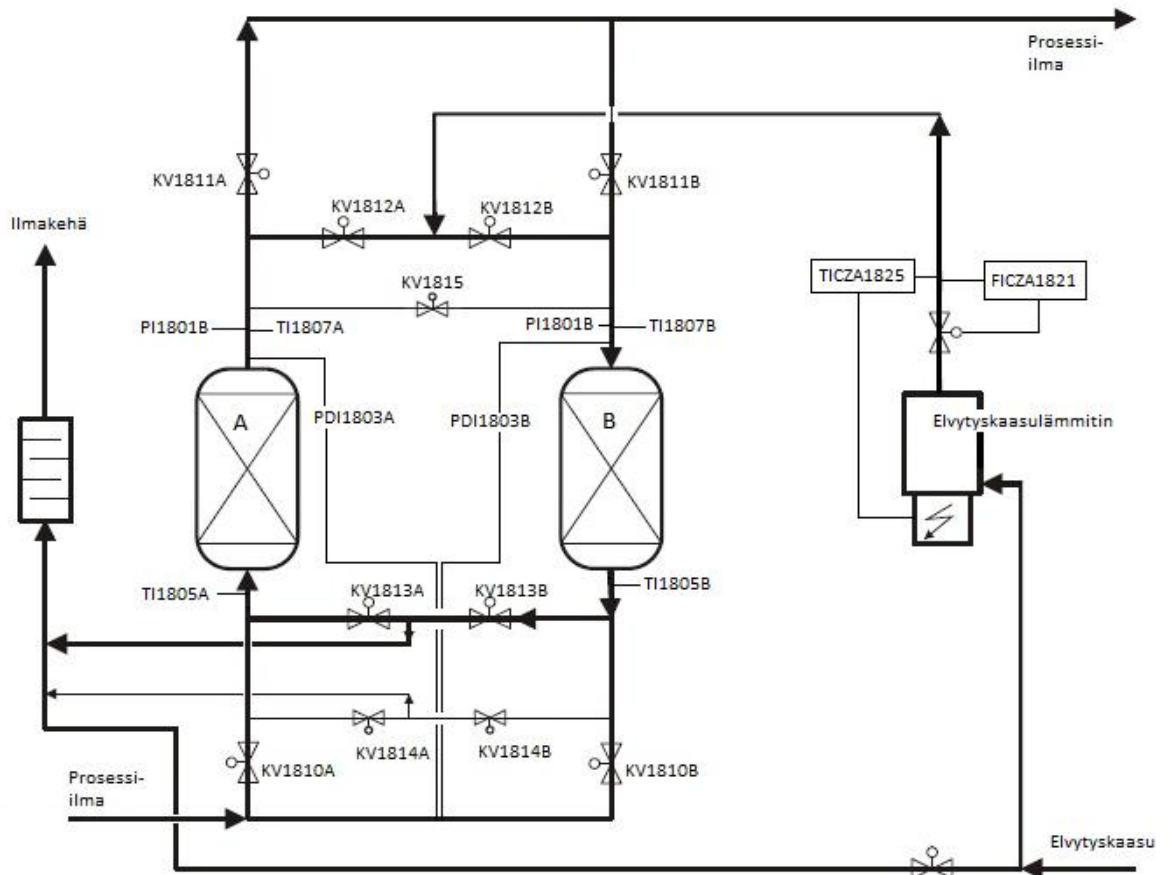
Molekyyliseuloja ajetaan rinnan 1 min., minkä jälkeen siirrytään seuraavaan askeleeseen.

ASKEL13 - 24

Sekvenssi etenee kuten askeleissa 1 - 12 elvyttään molekyyliseulan A.

[9.]

Kuvassa 5 näkyy kuivainten prosessikaavio. Kaaviossa näkyvät kuivaimet, jotka on nimetty kirjaimin A ja B sekä elvytyskaasulämmitin. Lisäksi kuvaan on merkitty sekvenssin toimintakuvauksessa käytettyjen venttiilien positiot.



Kuva 5. Kuivainten prosessikaavio

5 Kuivaimien käytön tehostaminen

5.1 Adsorptioaika

Kuivaimien sekvenssin kestoaika on vakio, eli sekvenssin jokaiseen askeleeseen kuluu niille määrätty aika. Sekvenssiaikaa voidaan muuttaa manuaalisesti lämmitys- ja jäähdytysaskeleiden aikoja muuttamalla. Nämä ovat ainoat askeleet, joiden ajat ovat muutettavissa. Lisäämällä lämmitys- tai jäähdytysaskeleen kesto, lisätään samalla elvytyssekvenssin kokonaisaika. Tämä johtaa siihen, että myös ilman elvytykseen käytetyn kuivaimen ajoaika pitenee, eli enemmän ilmaa ehtii virrata sen läpi.

Sekvenssiaikoja muutettaessa on otettava huomioon seuraavat asiat. Sekvenssin keston on oltava sen pituinen, että kuivaimen kapasiteetti riittää adsorboimaan kaiken kosteuden ja hiilidioksidin sen läpi virtaavasta ilmasta. Kuivaimen ollessa elvytyksessä sen lämmitysaskelen on oltava tarpeeksi pitkä, jotta kuivaimeen adsorboituneet epäpuhtaudet poistuvat täydellisesti. Lämmityksen jälkeisen jäähdytysaskelen keston tulee olla sellainen, että seulamassa ehtii jäähtyä haluttuun lämpötilaan, jonka jälkeen se pystyy adsorboimaan taas täydellä kapasiteetilla.

5.2 Ilmamäärä ja ilman virtaus

Ilmakompressorin antama ilmamäärä vaihtelee laitoksen tuotannon tarpeen mukaan. Ilman tilavuusvirta voi vaihdella välillä 22 000 Nm³/h - 32 000 Nm³/h. Kuivaimien sekvenssi on kestoaltaan vakio, joten kuivaimen puhdistaman ilman määrä voi vaihdella suuresti.

Taulukossa 4 on ensimmäisessä sarakkeessa ilman tilavuusvirta ja toisessa sarakkeessa ilman kokonaismäärä. Ilman kokonaismäärä kertoo kuivaimen läpi virtaavan ilman määrän kuutiometreissä 8 h sekvenssin aikana. Taulukosta voidaan nähdä että minimi- ja maksimivirtauksilla syntyvä kokonaisilmamäärän ero on huomattavan suuri. Laskemalla maksimi- ja minimi-ilmamäärien erotus $(272\ 000 - 187\ 000)\ \text{Nm}^3 = 85\ 000\ \text{Nm}^3$, saadaan määrä, jonka verran molekyyliseulan läpi virtaava ilmamäärä voi vaihdella. Kuivaimien tekemä työ voi siis vaihdella suuresti laitoksen tuotannon mukaan.

Taulukko 4. Kokonaisilmamäärä

Ilman virtaus (Nm ³ /h)	Ilmamäärä (Nm ³)	Adsorbtiotaika (h)
22000	187000	8
23000	195500	8
24000	204000	8
25000	212500	8
26000	221000	8
27000	229500	8
28000	238000	8
29000	246500	8
30000	255000	8
31000	263500	8
32000	272000	8

5.3 Kuivaimien käyttö

Kuivaimien nykyinen käyttö perustuu luvussa 4 kuvattuun sekvenssiin. Kuivainsekvenssi on kestoaltaan aina vakio, ellei lämmitys tai jäädytysaikoja muuteta manuaalisesti. Taulukossa 5 näkyvät prosessi-ilman ominaisuudet sen mennessä kuivaimeen. Ilman virtaus vaihtelee tarpeen mukaan 22 000 Nm³/h:n ja 32 000 Nm³/h:n välillä. Kuivaimelle menevä ilma on paineistettu 6,5 bar:n paineeseen ja sen lämpötila on noin 5 °C.

Taulukko 5. Prosessi-ilman ominaisuudet kuivaimessa

ILMAN SYÖTTÖ

Seos (mol. %)	
ilma	100
H ₂ O	Kylläistä (5 °C, 6.5 bar)
CO ₂ (ppm)	350 – 450
tilavuusvirta (Nm ³ /h)	22000 – 32000
molekyylipaino (kg/kgmol)	28
paine (bara)	6,5
lämpötila (°C)	5

Regenerointi- eli elvytyskaasu, jota käytetään kuivaimien elvytyksessä, on täysin kuivaa prosessista tulevaa lähes puhdasta tyypeä, joka sisältää happea noin 3 %. Elvytyssekvenssin lämmitysaskeleessa elvytyskaasun virtaus on 3 500 Nm³/h ja sen lämpötila on 200 °C. Jäähdytysaskeleessa kaasun virtaus on 4 500 Nm³/h ja lämpötila on noin 5 °C. Taulukossa 6 näkyvät regenerointikaasun ominaisuudet.

Taulukko 6. Regenerointi- eli elvytyskaasun ominaisuudet

REGENEROINTI	
Seos (mol. %)	
typpi	97
happi	3
H ₂ O (ppm)	< 1
CO ₂ (ppm)	< 1
Tilavuusvirta (Nm ³ /h)	
lämmityskaasu	3500
jäähdytyskaasu	4500
molekyylipaino (kg/kgmol)	28
paine (barg)	0,2
Lämpötila (°C)	
lämmityskaasu	200
jäähdytyskaasu	5

5.4 UOP:n suunnitelma

Insinööriyötä varten pyydettiin seulamateriaalin toimittajaa, UOP, A Honeywell Company, laskemaan kuivaimien kapasiteetti ja tekemään suunnitelma niiden optimaaliseen käyttöön.

Päähuomio uudessa laskelmassa oli, että kuivain kykenee pidempään kuin 8 tunnin adsorptioaikaan, kun ilman CO₂-pitoisuus on välillä 350 - 450 ppm ja virtaus välillä 22 000 – 32 000 Nm³/h. UOP:n suositus olisi muuttaa kuivainsekvenssiä siten, että sen kesto vaihtelee ilman virtausmäärän mukaan. Tällä tavoin olisi mahdollista tehostaa kuivaimien käyttöä ja ottaa niiden koko kapasiteetti käyttöön. Ilman virtausmäärän ollessa 22 000 – 32 000 Nm³/h sekvenssin kesto voidaan säätää ilmamäärän mukaan siten, että yhden syklin prosessoima kokonaisilmamäärä on aina 320 000 Nm³. Maksi-

mi-ilman virtauksella 32 000 Nm³/h, tämä vastaa 10 tunnin kestoa sekvenssille. Minimii ilman virtauksella 22 000 Nm³/h, sekvenssin kesto olisi 14,5 tuntia.

Sekvenssiajan kasvaessa kuivaimet tekevät enemmän töitä, eli puhdistavat suuremman määrän prosessiin menevää ilmaa. Kuivaimien käyttökapasiteetin kasvaessa myös niiden elvytyssekvenssiä on muutettava. UOP:n laskelmien mukaan edellä mainituilla ilman adsorbtiioon käytetyillä määrillä kuivaimien elvytykseen tarvitaan vähintään 5,5 tunnin lämmitys. Jäähdytysajaksi tulisi alimmillaan 4,25 tuntia, jota voidaan kasvat-
taa sekvenssin kokonaisajan kasvaessa. Huomioitavaa on, että nämä ovat minimiajat regenerointiin, jotta kuivaimen koko kapasiteetti on käytettävissä seuraavan syklin aikana. UOP:n laskelmien mukaan jo 8,5 tunnin adsorbtiioaika suhteessa kuivaimen nykyiseen lämmitysaikaan on liian lyhyt maksimi-ilmamäärällä. Suositeltavaa olisi asteittain lisätä adsorbtiio- ja lämmitysaikaa.

Taulukossa 7 nähdään adsorbtiioaika, eli sekvenssin kesto tunteina eri ilman virtausmäärillä. Sekvenssin kesto voi vaihdella enimmillään 4,5 tuntia, ilman virtausmäärän mukaan.

Taulukko 7. Adsorbtiioaika ilman virtausmäärän mukaan

Ilman virtaus (Nm ³ /h)	Kokonaisilmamäärä (Nm ³)	Adsorbtiioaika (h)
22000	320000	14,5
23000	320000	13,9
24000	320000	13,3
25000	320000	12,8
26000	320000	12,3
27000	320000	11,9
28000	320000	11,4
29000	320000	11,0
30000	320000	10,7
31000	320000	10,3
32000	320000	10,0

5.5 Kuivainsekvenssin muuttaminen

UOP:n suunnitelman perusteella kuivaimien kapasiteetti riittää puhdistamaan sisään menevän ilman 10 h ajan ilman maksimi virtausmäärällä. Ilman minimivirtauksella syklin pituus olisi 14,5 h. Tämä lisäisi nykyistä vakio 8 h syklin pituutta vähintään 2 h. Syklin pituuden kasvaessa kuivaimet adsorboivat enemmän kosteutta ja muita epäpuhtauksia, joka edellyttää pidempää lämmitysaikaa elvytysvaiheessa.

Prosessiin menevälle ilmalle on valmiina ilman virtausmittaus, joten sekvenssin muuttaminen vaatii vain ohjelmallisia muutoksia. Kuivaimien kuormitus syklin aikana voidaan laskea virtausmittauksen avulla. Kuivaimille menevän ilman ominaisuudet, eli paine, lämpötila ja kosteuspitoisuus, pysyvät lähes vakiona vuodenajasta riippumatta. Tämän vuoksi ainoa kuormitusta vaihteleva tekijä on ilman virtausmäärä.

Muuttamalla kuivaimien sekvenssin kesto riippuvaiseksi ilman virtausmäärästä, voidaan säästää kuivaimien elvytykseen tarvittua lämmitysenergiaa. Kuivaimien kuormituksen ollessa vakio jokaisen syklin aikana, käytetään niiden elvytykseen juuri tarvittava määrä energiaa. Kuivaimien kuormituksen lisääminen on tehtävä asteittain nykyisiä sekvenssin aikoja lisäämällä. Siten vältytään niiden mahdolliselta ylikuormittamiselta.

6 Yhteenveto

Tämän insinööritöiden tavoitteena oli tutkia ilman esikäsitteilyprosessia ja kuivaimien, eli molekyyliuulojen toimintaa Oy AGA Ab:n ilmakaasutehtaalla. Tarkoituksena oli selvittää kuivaimien kapasiteetti ilman kuivaamiseen ja niiden käytön mahdollista tehostamista. Lisäksi työssä kerrotaan ilman ominaisuuksista ja esikäsitteilyprosessin eri vaiheista.

Kuivaimien kapasiteetin selvittäminen oli tarpeellista, sillä niiden ylikuormittaminen on prosessin kannalta haitallista. Kuivaimien kapasiteetin ylittyessä hiilidioksidi pääsee prosessiin, joka johtaa tuotannon keskeytykseen väliaikaisesti. Tuotannon keskeytys vähentää tehtaan tuottavuutta merkittävästi. Kuivaimien kapasiteetin selvittäminen koskee niiden kykyä adsorboida kosteutta ja hiilidioksidia ilmasta. Tämän lisäksi oli tärkeää

selvittää niiden elvytykseen tarvittava lämmitys- ja jäähdytysvirtauksen määrä ja kesto, jotta niiden koko kapasiteetti on käytössä elvytyksen jälkeen. Kuivaimien kapasiteettia selvittäessä käytettiin avuksi nykyistä kuvainsekvenssiä, sekä kuivainmateriaalin toimittajalta saatua laskelmaa.

Toimittajalta saadun laskelman perusteella selvisi, että kuivaimien kapasiteettia voidaan lisätä nykyisestä. Kapasiteetin lisäys edellyttää muutoksia nykyiseen ohjaussekvenssiin. Ohjaussekvenssin muuttaminen ei vaadi mekaanisia muutoksia prosessiin, sillä tarvittavat paine-, lämpötila- ja virtausmittaukset ovat jo olemassa. Ainoastaan sekvenssin ohjaukseen on tehtävä ohjelmallisia muutoksia. Kuivaimien kuormituksen laskemiseen voidaan käyttää nykyistä virtausmittausta. Energiansäästöä kuvainsekvenssiä muuttamalla saadaan elvytyssekvenssin tehostumisella, koska turha lämmitysenergian käyttö elvytyksessä vähenee.

Lähteet

- 1 Anders, Lenneskog. 2007. Air separation techniques, Cryogenic plants.
- 2 Helsingin yliopiston kemian laitos. Verkkodokumentti. <<http://www.helsinki.fi/kemia/opettaja/aineistot/kaasut/ilma.html>>. Luettu 13.1.2014.
- 3 Ahlberg, Kersti. 1985. AGA Gas Handbook.
- 4 Ilmatieteenlaitos. Verkkodokumentti. <<http://ilmatieteenlaitos.fi/ilman-kosteus>>. Luettu 1.2.2014.
- 5 Sabroe. 1989. Operation and Maintenance Manual. SMC 104-116.
- 6 KW-Filter Oy. Verkkodokumentti. <<http://www.kwfilter.fi/sivut/molekyyliseulat.html>>. Luettu 2.3.2014.
- 7 Honeywell UOP. An Introduction to Zeolite Molecular Sieves. Verkkodokumentti. <<http://www.eltrex.pl/pdf/karty/adsorbenty/ENG-Introduction%20to%20Zeolite%20Molecular%20Sieves.pdf>>. Luettu 13.1.2014.
- 8 Air Products. 1989. Plant Instruction Manual.
- 9 Oy AGA Ab. 1990. Työohje.

CUSTOMER: Oy AGA Ab
Kilpilahti, Finland

DATE: 31 January 2014

UOP ADSORBENT DESIGN SUMMARY
UOP REF. NO. : ZL1-4010

DESIGN BASIS: Air pre-purification unit.

OPERATING CONDITIONS	DRYER FEED (TOTAL)	NET PRODUCT / SPEC.	PURGE GAS (HEATING)	PURGE GAS (COOLING)
FLOW RATE (Nm ³ /h)	32000 ^(note 1)	32000	3500	3500
PRESSURE (bar a)	6.5		1.35	1.35
TEMPERATURE (°C)	5		200	5
MOLECULAR WEIGHT (kg/kgmol)	28		28	28
COMPOSITION (mol.%)	No composition specified, design review based on assumed standard air composition		Nitrogen/Oxygen mixture	
AIR	100			
N2			97	97
O2			3	3
Key:				
CO2 (ppmM)	< 450 ^(note 2)	< 1.0	< 1.0	< 1.0
H2O (ppmM)	Saturated @T,P	< 1.0	< 1.0	< 1.0

PROCESS DESIGN:

	ADSORPTION	HEATING	COOLING	STANDBY
TIME (hours/bed)	10 ^(note 3)	5.5	4.25	0.25 ^(note 4)
FLOW DIRECTION	DOWN ^(note 5)	UP ^(note 5)	UP ^(note 5)	
TYPE OF CYCLE	OPEN	OPEN	OPEN	
FLOW RATE (Nm ³ /h/bed)	32000	3500	3500	
PRESSURE DROP FRESH ADSORBENT (bar)	< 0.1	< 0.1	< 0.1	

UOP ADSORBENT RECOMMENDATIONS:

Number of beds : 2	Insulation : external
Bed internal diameter : 2750 mm	Bed packed height : 2555 mm
Adsorbent requirement per bed : 10000 kg	Type : UOP 13X-APG 6 x 8 BEADS
Total UOP Molecular sieve: 20000 kg	
Notes:	
1. Maximum feed flow rate, specified feed flow rate range from 22000 to 32000 Nm ³ /h.	
2. Expected inlet CO2 content range from 350 to 450 ppmM	
3. Expected adsorption time (minimum)	
4. Includes time for valve switching, de and re-pressurization (max 3.5 bar/min, Flow direction: DOWN)«note2» and standby time.	
5. Standard flow directions assumed by UOP for this design review effort	

Neither this paper nor the ideas, information, and know-how contained herein may be used, lent, copied, reproduced or communicated in any Manner without first obtaining written permission

of a duly authorised representative of UOP. All authorised reproductions in whole or in part shall bear this notice.