

MUOVIN KUIVAUSMENETELMÄT

Kiemura-hanke

Tiivistelmä

Tekijä(t) Laine, Ville	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Kevät 2020
	Sivumäärä 38	
Työn nimi Muovin kuivausmenetelmät Kiemura-hanke		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyössä selvitettiin sopivin muovinkuivaustapa Euroopan unionin rahoittamaan Kiemura-hankkeeseen, jossa kehitetään pienille kierrätysmuovimäärille soveltuvaa pesu- ja erottelinjastoa. Muovin murskauksen, pesun ja erottelun jälkeen muovi tulee laitteistossa kuivata ennen sen jatkokäsittelyä, jotta vältetään ongelmilta jatko-työstössä ja lopputuotteesta saadaan mahdollisimman laadukas. Työn toimeksiantajana toimi LAB-ammattikorkeakoulu.</p> <p>Työ toteutettiin tutkimalla kuivausmenetelmän valintaan vaikuttavaa teoriaa muovia, lämpöoppia sekä kuivausta käsittelevistä kirjoista, tutkimalla aiheita käsitteleviä insinööri- ja diplomitoita, tutkimalla muuta aiheeseen liittyvää verkkomateriaalia sekä haastattelemalla hankkeen parissa työskennelleitä ihmisiä.</p> <p>Teoriaosuus sisältää tietoa erityisesti adsorptio- ja kondensiokuivausmenetelmistä, jonka lisäksi työssä perehdytään myös muihin kuivausmenetelmiin. Työssä tutkitaan myös muita muovin kuivaamiseen vaikuttavia asioita, kuten ilmankosteutta, veden höyrystymisen teoriaa, erilaisia muovilaatuja, muovien vedenimukykyä sekä muovien sulamislämpötiloja. Työssä pohditaan tutkimustiedon perusteella käytännön ratkaisuja käytettäväksi Kiemura-hankkeessa sekä esitellään koululla rakennetut koelaitteet.</p> <p>Työn lopputulokseksi saatiin se, että muovin kuivauksessa Kiemurassa on kannattavaa yhdistää erilaisia kuivausmenetelmiä parhaan ja tehokkaimman lopputuloksen saamiseksi. Muovi kannattaa kuivata karkeasti mekaanisella menetelmällä ja suorittaa tämän jälkeen karkea kuivaus termisellä menetelmällä. Termisistä menetelmistä adsorptiokuivain kuivaa muovin erityisen kuivaksi riippumatta suuresti ympäristön olosuhteista. Veden tehokkaaseen höyrystymiseen vaaditaan kolme tekijää: mahdollisimman kuiva ilma, suuri ilmavirta sekä suuri lämpötila.</p>		
Asiasanat adsorptio, kondensaatioreaktiot, muovi, kuivaus, höyrystyminen		

Abstract

Author(s) Laine, Ville	Type of publication Bachelor's thesis	Published Spring 2020
	Number of pages 38	
Title of publication Drying of plastics Kiemura project		
Name of Degree Bachelor of Engineering in Mechatronics		
Abstract <p>The objective of this thesis was to determine the most suitable plastic drying method for the Kiemura Project, funded by the European Union. The goal of the project is to develop a washing and separation line for small amounts of recycled plastic. After the crushing, washing and separating stages, the plastic must be dried in the equipment before further processing in order to avoid problems in further processing and to obtain the highest possible quality of the final product. The work was commissioned by LAB University of Applied Sciences.</p> <p>The work was carried out by researching the theory on the choice of the drying method from books on plastics, thermodynamics and drying, researching theses, researching other related online material and interviewing people working on the project.</p> <p>The theoretical part contains information on adsorption and condensation drying methods, in addition to which other drying methods are introduced. Other issues affecting the drying of plastics are also studied in the work, such as humidity, the theory of water vaporization, various plastic grades, water absorbency of plastics and melting temperatures of plastics. Based on the research data, the work considers practical solutions for use in the Kiemura project and presents the pilot equipment built at the school.</p> <p>The result of the work was that when drying plastics in Kiemura, it is profitable to combine different drying methods to get the best and most efficient result. It is advisable to dry the plastic roughly by a mechanical method and then carry out a rough drying by a thermal method. Of the thermal methods, the adsorption dryer dries the plastic particularly dry, regardless of the ambient conditions. Three factors are required for efficient water evaporation: as dry air as possible, high airflow, and high temperature.</p>		
Keywords adsorption, condensation, plastic, drying, vaporization		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	MUOVIN KUIVAUS.....	2
2.1	Muovin kuivaus yleisesti	2
2.2	Kuivaukseen liittyvä fysiikka ja lämpöoppi.....	2
2.2.1	Ilmankosteus ja -osapaine	3
2.2.2	Veden höyrystyminen	4
2.2.3	Höyrystymiseen vaadittava energia	5
3	MUOVISEOKSET JA NIIDEN OMINAISUUDET	8
3.1	Muoviseokset.....	8
3.1.1	Polyeteenit.....	9
3.1.2	Polypropeenit.....	9
3.1.3	Polyamidit.....	10
3.2	Veden imeytyminen eri muovilaatuihin.....	10
3.3	Muovilaatujen sulaminen ja pehmeneminen	11
4	KUIVAUSMENETELMÄT.....	12
4.1	Adsorptiokuivaus	12
4.1.1	Kuivausaine.....	12
4.1.2	Kahdella kuivausainesäiliöllä toimiva adsorptiokuivain.....	12
4.1.3	Kuivauspyöräteknikalla toimiva adsorptiokuivain.....	13
4.1.4	Adsorptiokuivauksen ominaisuudet.....	15
4.2	Kondenssikuivaus.....	16
4.2.1	Kondenssikuivaimen toimintaperiaate.....	16
4.2.2	Kondenssikuivauksen ominaisuudet	17
4.3	Kuumailmakuivaus.....	17
4.4	Mekaaninen kuivaus	18
4.5	Alipainekuivaus.....	19
5	MUOVIN KUIVAUS KIEMURASSA.....	20
5.1	LAB-ammattikorkeakoulu.....	20
5.2	Kiemura-hanke	20
5.3	Kiemuran rajoitukset ja vaatimukset	22
5.4	Eri muovilaatujen kuivaus	23
5.5	Valittava kuivausmenetelmä	24
6	KOELAITTEISTOT	26
6.1	Yleistä koelaitteistoista	26

6.2	Adsorptiokuivaimen koelaitteen toiminta	26
6.3	Puhallinkuivaimen koelaitteen toiminta	28
7	YHTEENVETO	31
	LÄHTEET	33
	LIITTEET	36

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää sopivin muovinkuivaustapa Euroopan unionin rahoittamaan LAB-ammattikorkeakoulun, Muovipoli Oy:n ja Helsingin yliopiston yhteishankkeeseen Kiemuraan. Kiemuran tavoitteena on tehostaa muovien kierrätystä ja tutkia mikromuovien analytiikkaa sekä tunnistamista (LAB University of Applied Sciences 2020a). Hankkeessa rakennetaan muovienkierrätyslaitteisto, jonka toimintaan muovin kuivaus sisältyy merkittäväällä tavalla (LAB University of Applied Sciences 2020a).

Tämä opinnäytetyö toteutettiin, jotta muovinkierrätyslaitteeseen saataisiin paras mahdollinen kuivausmenetelmä. Työn tavoitteina on muovin kuivaamiseen vaikuttavien tietojen tutkiminen, niiden perusteella sopivimpien käytännön ratkaisujen etsiminen Kiemuraan sekä valmiiden LAB-ammattikorkeakoulussa rakennettujen koelaitteiden esittely.

Tämän opinnäytetyön teoriaosassa paneudutaan erityisesti adsorptio- ja kondensiokuivausmenetelmiin, minkä lisäksi työssä perehdytään lyhyesti myös muihin kuivausmenetelmiin sekä muihin kuivausprosesseissa huomioon otettaviin asioihin. Näitä ovat yleisesti kuivaukseen vaikuttavat tekijät, kuten ilmankosteus, veden höyrystymisen teoria, erilaiset muovilaadut, muovien vedenimukyky sekä muovien sulamislämpötilat. Työssä pohditaan myös teoriaan pohjautuen käytännön ratkaisuja käytettäväksi Kiemura-hankkeessa sekä esitellään koululla rakennetut kuivaimen koelaitteet.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi alun perin Lahden ammattikorkeakoulu. Tammi-kuusta 2020 lähtien työn toimeksiantajana on toiminut LAB-ammattikorkeakoulu Lahden ja Saimaan ammattikorkeakoulujen yhdistymisen jälkeen.

Työ on toteutettu tutkimalla kuivausmenetelmän valintaan vaikuttavaa teoriaa muovia, lämpöoppia sekä kuivausta käsittelevistä kirjoista, tutkimalla aiheita käsitteleviä insinööri- ja diplomitöitä, tutkimalla muuta aiheeseen liittyvää verkkomateriaalia sekä haastattelemalla hankkeen parissa työskennelleitä henkilöitä. Kevään 2020 koronapandemia rajoitti mahdollisuuksia työn tekemisessä sen loppupuolella koulun ollessa suljettuna ja kokoon-
tumisrajoitusten ollessa voimassa.

Aikaisempia pääasiassa muovin kuivausta käsitteleviä opinnäytetöitä ei löytynyt, mutta muovin kuivausta on kuitenkin sivuttu muovin kierrätystä käsittelevissä opinnäytetöissä. Kuivausta käsittelevää tietoa löytyy myös monista rakennusalan opinnäytetöistä näiden koskiessa kuitenkin pääasiassa rakennusten sisätilojen kuivausta.

2 MUOVIN KUIVAUS

2.1 Muovin kuivaus yleisesti

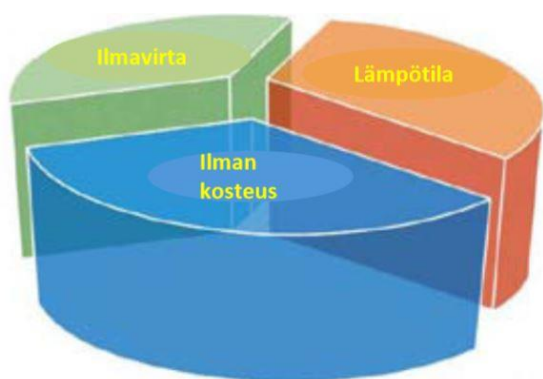
Työstövaiheessa muoviin sitoutunut tai sen pinnalla oleva kosteus aiheuttaa valmiissa kappaleessa mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä, huonoa pinnanlaatua tai muita ongelmia. Sulamispisteen yläpuolella ylimääräinen kosteus voi aiheuttaa hydrolyysiä, joka vaikuttaa muovin lujuuteen, moolimassaan sekä sulaviskositeettiin. (Aaltonen 2014, 19.) Muovigranulaatit tulee siten kuivata huolellisesti ennen valmistusprosessia. Kuivausta erityisesti vaativia ovat hygroskooppiset eli kosteutta imevät muovit. Näitä ovat esimerkiksi PC, PA, PMMA ja ABS. (Kurri, Malén, Sandell & Virtanen 2008, 88.) Ei-hygroskooppisissa muoveissa kosteus ei imeydy muovin sisälle vaan jää sen pinnalle (Aaltonen 2014, 19).

Kuivauksen tavoitteena on saada työstön raaka-aine mahdollisimman kuivaksi valmiin tuotteen laadun ja työprosessin onnistumisen maksimoimiseksi. Ruiskuvalussa sallitaan muovin kosteudeksi korkeintaan 0,02–0,1 prosenttia muovin painosta. (Kurri ym. 2008, 88.)

Muovin kuivaukseen on olemassa termisiä sekä mekaanisia menetelmiä. Mekaanisia menetelmiä, jotka perustuvat veden erottamiseen paino- ja keskipakoisvoiman avulla, käytetään yleensä muovien karkeaan kuivaukseen. Termiset menetelmät perustuvat puolestaan veden höyrystämiseen kappaleesta lämmön avulla. Näillä menetelmillä kappaleiden kosteusprosentti saadaan huomattavasti alhaisemmaksi kuin mekaanisilla menetelmillä. Samalla termiset menetelmät vievät yleensä enemmän energiaa, koska veden kuivaamiseen tarvitaan faasimuutos. (Aaltonen 2014, 19–20.)

2.2 Kuivaukseen liittyvä fysiikka ja lämpöoppi

Termisessä kuivausprosessissa vesi muutetaan kappaleen pinnalla tai huokosiin imeytyneenä olevasta nesteestä höyryksi. Kuivausnopeuteen vaikuttavat pääasiassa kolme eri tekijää, jotka havainnollistetaan kuvassa 1. (ASTQ Supply House Oy 2020, 2.)



Kuva 1. Kuivumiseen vaikuttavat kolme tekijää (ASTQ Supply House Oy 2020, 2)

Kuivumisnopeuteen vaikuttaa niin kuivattavien materiaalien kuin ilman lämpötila. Ilman-kosteuden tulee olla kuivumisen kannalta ilmassa mahdollisimman alhainen. Kuivuminen on sitä nopeampaa, mitä alhaisempi kuivausilman ilmankosteus on (Kurri ym. 2008, 89). Kuivattavien kappaleiden pinnalle kohdistuva ilmavirta nopeuttaa höyrystymistä. (ASTQ Supply House Oy 2020, 2.)

2.2.1 Ilmankosteus ja -osapaine

Ilman absoluuttinen kosteus kertoo ilmassa olevan vesihöyryn massan suhteessa ilman tilavuuteen. Ilman korkein mahdollinen absoluuttinen kosteus riippuu ilman lämpötilasta: mitä korkeampi se on, sitä enemmän ilmaan mahtuu höyrystynyttä vettä. Tätä riippuvuutta kuvataan taulukossa 1. Kun ilmassa on yhtä paljon vesihöyryä kuin siihen enimmillään mahtuu, ilma sanotaan olevan kylläistä. Ylimääräinen vesi tiivistyy tämän jälkeen nesteeksi. (Lehto, Havukainen, Leskinen & Luoma 2005, 86.)

Taulukko 1. Vesihöyrystä kylläinen ilma ilmakehän paineessa (mukailtu Seppälä & Lampinen 2004, 17)

Lämpötila °C	Veden määrä ilmassa g/m ³	Vesihöyryn osapaine kPa
0	4,846	0,6108
10	9,396	1,2271
20	17,29	2,337
30	30,36	4,241
40	51,14	7,375
50	82,98	12,335
60	130,2	19,92
70	198,1	31,16
80	293,3	47,36
90	426,5	70,11
100	597,7	101,325

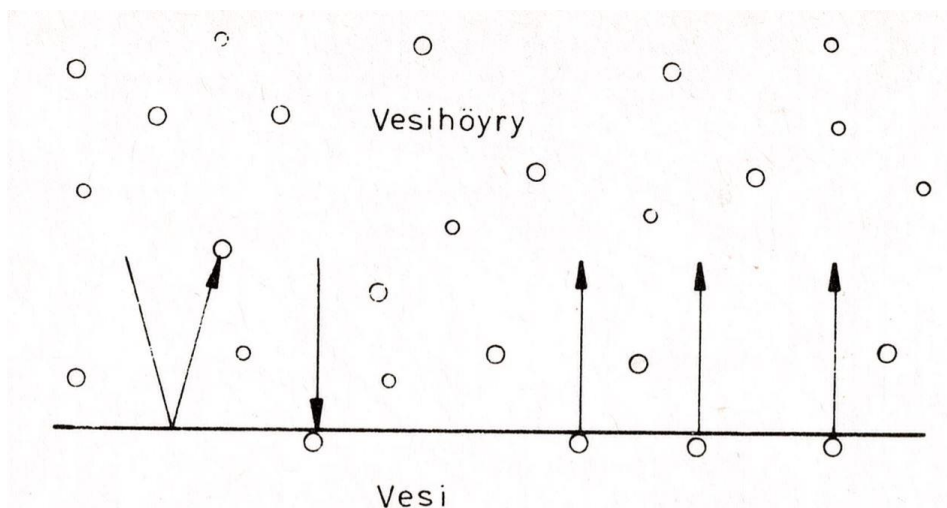
Ilman suhteellinen kosteus tarkoittaa ilman absoluuttisen kosteuden prosentuaalista osuutta kylläisen ilman absoluuttisesta kosteudesta. Kastepisteellä tarkoitetaan lämpötilaa, jolloin ilman jäähtyessä ja absoluuttisen kosteuden pysyessä vakiona suhteellinen kosteus nousee 100 prosenttiin. Tällöin vesihöyryä alkaa tiivistymään nesteeksi. (Lehto ym. 2005, 86.)

Vesihöyryn osapaine tarkoittaa vesihöyryn osuutta kokonaispaineesta. Vesihöyryn osapaine on riippuvainen ilman absoluuttisesta kosteudesta. Kylläisessä vesihöyryssä vesihöyryn osapaine on sama kuin ilman kokonaispaine. Tätä havainnollistetaan taulukossa 1. (Sisäilmayhdistys ry 2020.)

2.2.2 Veden höyrystyminen

Veden höyrystyessä eli haihtuessa vesimolekyylien välinen etäisyys kasvaa. Molekyylien välisen vetovoiman voittamiseen vaaditaan energiaa, jonka määrä riippuu veden lämpötilasta. (Mustonen 1986, 64.)

Veden höyrystymisen periaate esitetään kuvassa 2. Vesimolekyyliä siirtyy veden ja ilman rajapinnassa molempiin suuntiin - sekä ilmasta veteen että vedestä ilmaan. Höyrystyessä ilmaan siirtyvien molekyylien määrä on suurempi kuin veteen siirtyvien. Siirtyvien molekyylien erotusta kutsutaan nettohaihdunnaksi. (Mustonen 1986, 65.)



Kuva 2. Periaatekuva höyrystymisestä (Mustonen 1986, 65)

Höyrystymistä tapahtuu vain, jos veden pinnalla on suurempi höyrinpaine kuin heti pinnan yläpuolella. Jos tilanne on päinvastainen, tapahtuu tiivistymistä eli ilmassa oleva vesihöyry palautuu nestemäiseen muotoon. Mitä suurempi veden pinnan ja heti pinnan yläpuolella olevan vesihöyryn osapaine-ero on, sitä nopeammin höyrystyminen tapahtuu. (Mustonen 1986, 65.)

Jos pinnan yläpuolinen ilma ei kulkeudu pois höyrystymisen jatkuessa, siitä tulee ajan kuluessa kylläistä. Tällöin höyrystyminen loppuu kokonaan. Höyrystymisen kannalta on tärkeää, että heti vedenpinnan yläpuolinen ilma saadaan kuljetettua pois ja tilalle tulee mahdollisimman kuivaa ilmaa, jolloin höyrystymisprosessi pysyy käynnissä ja tehokkaana. (Mustonen 1986, 65.)

Höyrystyminen tarvitsee myös energiaa, jota saadaan höyrystymiseen useimmiten veden lämmöstä. Veden höyrystyessä jäljelle jäävän nesteinä olevan veden lämpötila laskee veden höyrystyessä. Tarvittava energia voi tulla myös lämmön kulkeutumisenä ilmasta tai säteilynä. (Mustonen 1986, 65.)

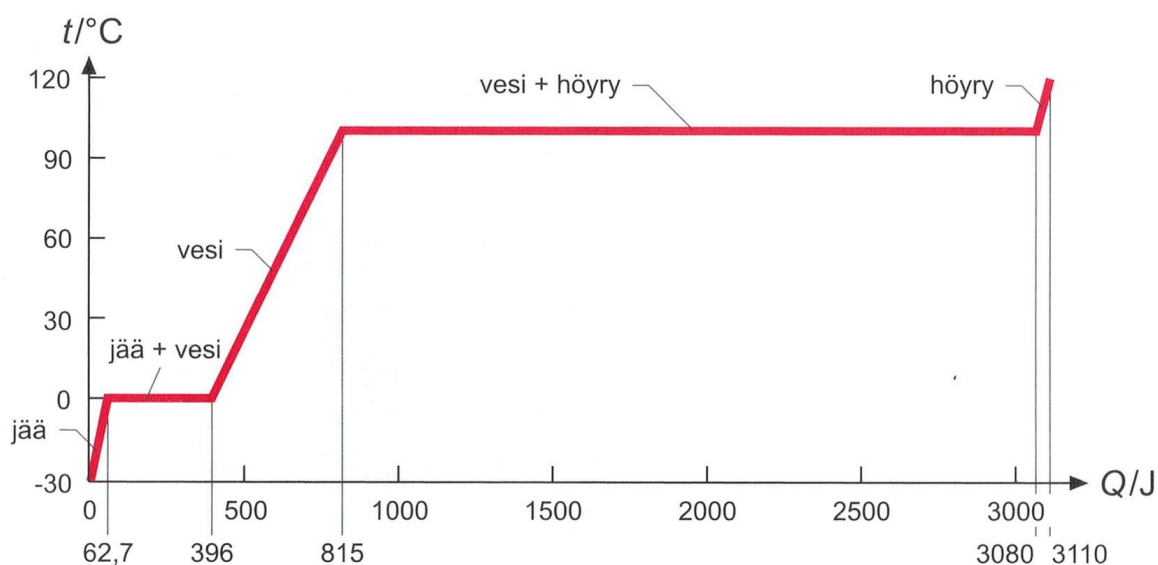
2.2.3 Höyrystymiseen vaadittava energia

Lämpömäärä kuvastaa kappaleeseen tai nesteeseen siirtyvän energian määrää. Energian siirtyminen tapahtuu kappaleiden tai nesteiden lämpötilaeron takia lämpimämmästä kappaleesta tai nesteestä kylmempään. Lämpömäärän tunnus on Q ja yksikkö joule (J). (Inkinen & Tuohi 1999, 380–381.)

Latenttilämpö kuvaa aineen olomuodonmuutokseen tarvittavaa lämpömäärää. Aineen olomuodonmuutoksessa ei tapahdu latenttilämpömäärää laskettaessa ollenkaan lämpötilanmuutosta. Ominaislatenttilämpö voidaan laskea niin sulamiselle kuin höyrystymiselle.

Ominaislatenttilämpöä höyrystymisessä eli ominaishöyrystymislämpöä kuvataan tunnuksella l_h ja sen yksikkö on kJ/g. Veden ominaishöyrystymislämpö on 2,26 kJ/g. (Inkinen & Tuohi 1999, 385–386.)

Kuva 3 esittää veden sulattamiseen, lämmittämiseen ja höyrystymiseen vaadittavan energian. Kuvaajassa yksi gramma vettä lämmitetään -30 °C jäästä $+120\text{ °C}$ höyryksi. (Inkinen & Tuohi 1999, 387.)



Kuva 3. 1 gramman vesimäärän lämpötila tuodun lämpöenergian funktiona (Inkinen & Tuohi 1999, 387)

Taulukossa 2 esitetään tarkemmin veden höyrystymiseen vaadittava energia veden eri lämpötiloilla. Kuvasta 3 ja taulukosta 2 nähdään, että latenttilämmöllä on merkittävä vaikutus höyrystymiseen vaadittavaan lämpömäärään. 0 °C lämpöisen veden höyrystäminen vaatii suhteessa vain hieman enemmän energiaa kuin kiehuvan veden höyrystäminen.

Taulukko 2. Veden höyrystymislämpö veden eri lämpötiloilla (mukailtu Seppälä & Lampinen 2004, 18)

Lämpötila °C	Veden höyrystymislämpö kJ/kg
0	2500,8
10	2477,2
20	2453,1
30	2430
40	2406,2
50	2382,1
60	2357,9
70	2333,3
80	2308,3
90	2282,8
100	2256,7

Veden höyrystämiseen ilman lämpötilanmuutosta tarvittava lämpömäärä voidaan laskea höyrystettävän veden massan ja ominaislatenttilämmön avulla (kaava 1) (Inkinen & Tuohi 1999, 386).

$$Q_h = ml_h \quad (1)$$

Q_h = höyrystämiseen vaadittava lämpömäärä (J)

m = massa (g)

l_h = ominaishöyrystymislämpö (J/g)

Jäähdytysteho voidaan laskea veden massavirran, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan muutoksen avulla (kaava 2) (Evans 2017).

$$Q = (V \times \rho) \times C_p \times \Delta T \quad (2)$$

Q = Jäähdytysteho (W)

V = Tilavuusvirta (m³/s)

ρ = Tiheys (kg/m³)

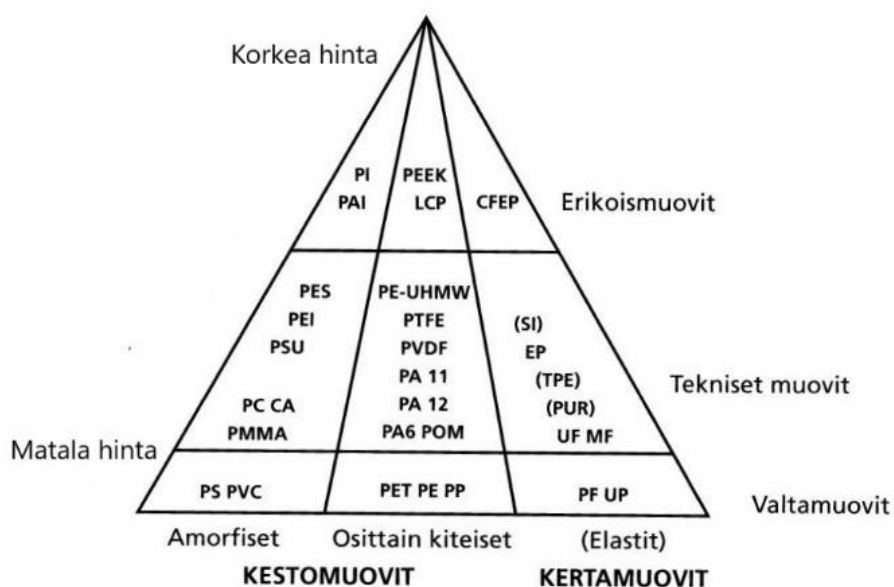
C_p = Ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg·K)

T = lämpötila (K)

3 MUOVISEOKSET JA NIIDEN OMINAISUUDET

3.1 Muoviseokset

Muovien ryhmittelyyn on olemassa useita eri tapoja. Yksi yleinen ryhmittelytapa on jakaa muovit niiden käyttömäärien mukaan valtamuoveihin, teknisiin muoveihin ja erikoismuoveihin. Muovien hinnat kasvavat niiden harvinaisuuden mukaan, joten erikoismuovit ovat yleensä kaikista kalleimpia ja valtamuovit edullisimpia. Muovit voidaan jakaa myös niiden rakenteen mukaan. Muoveja on olemassa niin kestopuoveja kuin kertamuoveja. Kestomuovit voidaan jakaa edelleen amorfisiin ja osittain kiteisiin muoveihin. Muovien jako ei kuitenkaan ole yksiselitteistä vaan esimerkiksi polyeteenejä kuuluu sen eri seosten perusteella useaan ryhmään. (Kurri ym. 2008, 19–20.) Tämä jakoperuste esitetään kuvassa 4.

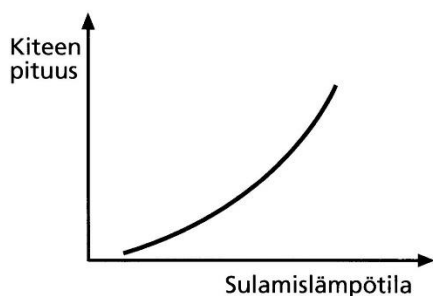


Kuva 4. Muovien jako käyttömäärän ja rakenteen perusteella (Kurri ym. 2008, 20)

Muovien jako kesto- ja kertamuoveihin tapahtuu niiden rakenteen mukaan. Kestomuovit koostuvat lineaarisista ja haarautuneista polymeeriketjuista, joita yhdistää poikittain toisiinsa vain heikot voimat. Kertamuoveissa polymeerejä yhdistää toisiinsa lujat kemialliset sidokset niin pitkittäis- kuin poikittaissuunnassa. Kestomuoveja voidaan lämmittää, sulattaa ja muotoilla toistuvasti, kun taas kertamuoveille on annettava lopullinen muoto ennen niiden kovettumista. (Kurri ym. 2008, 23–24.)

Osittain kiteisillä muoveilla kiteiden koko vaikuttaa niiden sulamislämpötilaan. Pienet kiteet sulavat alhaisemmassa lämpötilassa kuin suuret. Tätä havainnollistetaan kuvassa 5. Muovin sisältäessä erisuuruisia kiteitä, sillä ei ole tarkkaa sulamispistettä vaan se sulaa vähitellen lämpötilaa nostettaessa. Myös molekyyliketjujen rakenne vaikuttaa

sulamisaalueeseen. Linearisilla muoveilla on kapeampi sulamisaalue kuin haaroittuneilla polymeeriketjuilla. Kiteisyydeltään 60-prosenttisen haaroittuneen polyeteenin sulamisaalue on noin 40 °C, kun kiteisyydeltään 70-prosenttisen lineaarisen polyeteenin sulamisaalue on 3–4 °C. Sulamisaalue voi vaihdella selvästi saman muovin eri tyypeillä. (Kurri 2008, 43, 50–51.)



Kuva 5. Kiteen pituuden vaikutus sulamislämpötilaan (Kurri ym. 2008, 51)

3.1.1 Polyeteenit

Polyeteeni on, sen eri seokset yhteenlaskettuna, muoveista kaikista käytetyin. Polyeteenit ovat kestumuoveja, ja ne voidaan jakaa päätyyppeihin sen tiheyden mukaan. Pientiheyspolyeteenin (PE-LD tai LDPE) tiheys on tyypillisesti 0,91–0,93 g/cm³ ja suuritiheyspolyeteenin (PE-HD tai HDPE) 0,94–0,97 g/cm³. Näiden välissä olevaa polyeteeniä kutsutaan keskitiheyspolyeteeniksi (PE-MD). Päätyypit voidaan jakaa edelleen useisiin alatyyppeihin seosaineiden, kopolymeerien ja erilaisten molekyyliketjujen perusteella. Polyeteenit ovat sitkeitä, mutta niillä on huono lämmönkestävyys. (Järvinen 2008, 29, 37.)

Polyeteenitereftalaatti (PET tai polyesteri) on muihin polyeteenityyppeihin verrattuna hyvin lämmönkestävää. Sitä on olemassa sekä kiteisenä että amorfisena tyyppinä. (Järvinen 2008, 74, 77.)

3.1.2 Polypropeenit

Polypropeeni on hyvin suuritiheyspolyeteenin kaltainen kiteinen muovi. Polypropeeni on kuitenkin lämmönkestokyvyltään hieman parempi. Polypropeeni voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin. Perinteinen polypropeeni on muodoltaan homopolymeeriä. Blokkipolymeerissä polypropeenissa on selkeitä ja säännöllisiä eteenijaksoja. Satunnais- eli randomkopolymeerissä eteenin sijaitseminen rakenteessa on satunnaisempaa. Sitä sijaitsee jaksotomasti niin polymeerin sivuhaaroissa kuin pääketjussa. (Järvinen 2008, 41.)

Polypropeenin tiheys vaihtelee suuresti sen seoksen mukaan. Tavallisen polypropeenin (PP) tiheys on $0,91 \text{ cm}^3$ (Kurri ym. 2008, 25). Polypropeenin tiheys voi kuitenkin olla jopa $1,3 \text{ g/cm}^3$, kun täyteaineena käytetään lasikuitua (Omnexus 2020).

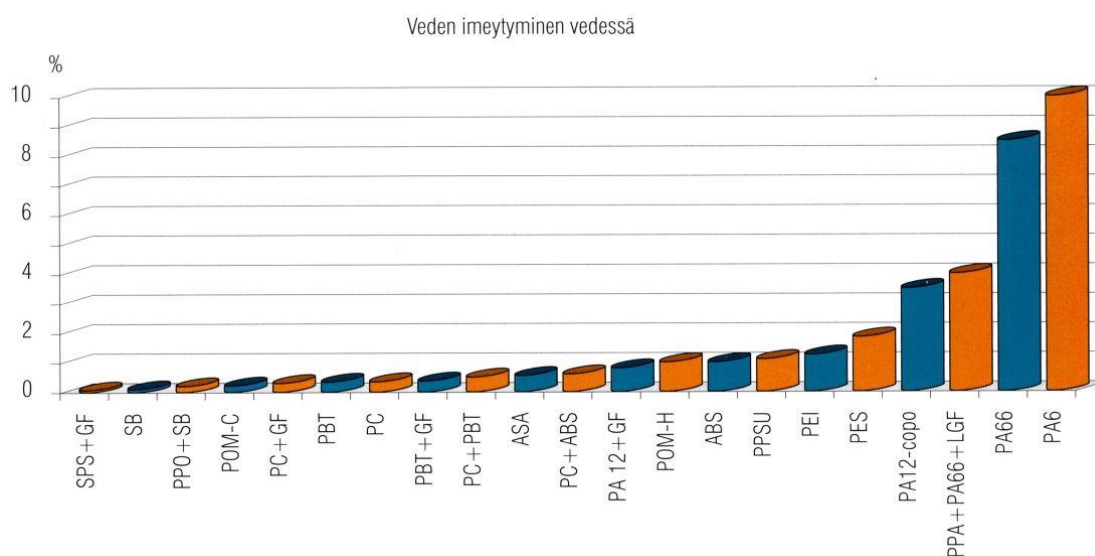
3.1.3 Polyamidit

Polyamidit nimetään numeroilla toistuvan jakson hiiliatomien lukumäärän mukaisesti. Polyamidit voidaan jakaa tyyppien mukaan osakiteisiin PA 6:een ja PA 66:een sekä erikoispolyamideihin. Näistä PA 6:n ja PA 66:n osuus kaikkien polyamidien käyttömääristä on yli 90 prosenttia. PA 66:en lämmönkesto on hieman parempi kuin PA 6:en. Polyamidit 6 ja 66 ovat osakiteisiä. Erikoispolyamideja ovat muun muassa PA 11, PA 12 sekä PA 46. Erikoispolyamideja käytetään, jos polyamidilta vaaditaan erikoisominaisuuksia kuten pienempää vedenimeytymistä. (Järvinen 2008, 85.)

Polyamidien 6 ja 66 tiheys on $1,14 \text{ g/cm}^3$. Erikoispolyamidin PA 11 tiheys on $1,04 \text{ g/cm}^3$. (Kurri ym. 2008, 25.) Polyamidien tiheys vaihtelee kuitenkin paljon seoksen mukaan. Se voi olla PA 66:lla jopa $1,6 \text{ g/cm}^3$, kun täyteaineena käytetään lasikuitua. (Omnexus 2020.)

3.2 Veden imeytyminen eri muovilaatuihin

Vesi imeytyy erityisen hyvin polyamideihin kun taas muihin muovilaatuihin veden imeytyminen on huomattavasti vähäisempää. Polyamideista vesi imeytyy parhaiten PA 6 tyyppiin. Se absorboi vettä lähes 10 % omasta painostaan. (Järvinen 2008, 85.) Kosteuden imeytymisessä muovikappaleisiin kestää tyypillisesti viikkoja tai kuukausia riippuen muovin paksuudesta. Veden imeytyminen eri muovilaatuihin esitetään kuvassa 6. (Järvinen 2008, 155.)



Kuva 6. Veden imeytyminen eri muovilaatuihin (Järvinen 2008, 155)

3.3 Muovilaatujen sulaminen ja pehmeneminen

Eri muovilaaduilla on erilaisia sulamis- ja pehmenemislämpötiloja. Muovien sulamislämpötila riippuu muun muassa kiteiden suuruudesta sekä molekyyliketjujen rakenteesta. (Kurri ym. 2008, 50–51.)

Vicat-pehmenemislämpötilan avulla voidaan määritellä muovin pehmenemislämpötila tiettyyn pehmeuteen. Testissä käytetään tasapäistä päästään 1 mm²:n kokoista kovaa neulaa, jota painetaan muovikappaleeseen tietyllä voimalla muovikappaleen lämpötilaa samalla kasvattaen. Pehmenemislämpötila saadaan, kun neula uppoaa muovikappaleeseen 1 mm:n syvyyteen. Testaus voidaan toteuttaa muutamalla eri parametrilla. Neulan työntövoimana voidaan käyttää joko 10 N:n tai 50 N:n voimaa ja muovin lämmitysnopeutena joko 50 tai 120 Kelviniä tunnissa. (ASTM International 2020.)

Polypropeeniseosten alin sulamispiste on 61,0 °C ja alin Vicat-pehmenemislämpötila 35,0 °C. Näin alhainen sulamis- ja pehmenemislämpötila voidaan saavuttaa joillain muotissa valmistetuilla kappaleilla ja seoksilla. Polypropeenien sulamispiste on kuitenkin lähes kaikissa normaaleissa tapauksissa 130–180 °C. Pehmenemislämpötilat ovat yleensä noin 50–180 °C. Nämä on esitetty liitteessä 1. (MatWeb 2020a.) Liitteessä 2 on puolestaan selvitetty eri polyeteeniseosten sulamispisteitä sekä Vicat-pehmenemislämpötiloja. Taulukossa 3 on tehty yhteenveto liitteen 2 tiedoista.

Taulukko 3. Polyeteeniseosten alimmat sulamispisteet ja pehmenemislämpötilat (mukailtu MatWeb 2020b)

Muoviseos	Alin sulamispiste (°C)	Alin Vicat pehmenemislämpötila (°C)
Polyeteenitereftalaatti (PET)	200	74.0
Pientiheyspolyeteeni (LDPE)	95.0	52.0
Lineaarinen pientiheyspolyeteeni (LDPE)	75.0	41.1
Erittäinen pientiheyksinen polyeteeni (VLDPE)	110	87.8
Keskitiheyspolyeteeni (MDPE)	116	62.0
Lineaarinen keskitiheyspolyeteeni (LMDPE)	124	111
Suurtiheyspolyeteeni (HDPE)	53.9	41.0

Polyamidien sulamispiste on vähintään 250 °C ja pehmenemislämpötila vähintään 200 °C. Nämä on esitetty liitteessä 3. (Järvinen 2008, 50, 60, 67, 72, 79, 83, 85, 89, 93, 96, 117.)

4 KUIVAUSMENETELMÄT

4.1 Adsorptiokuivaus

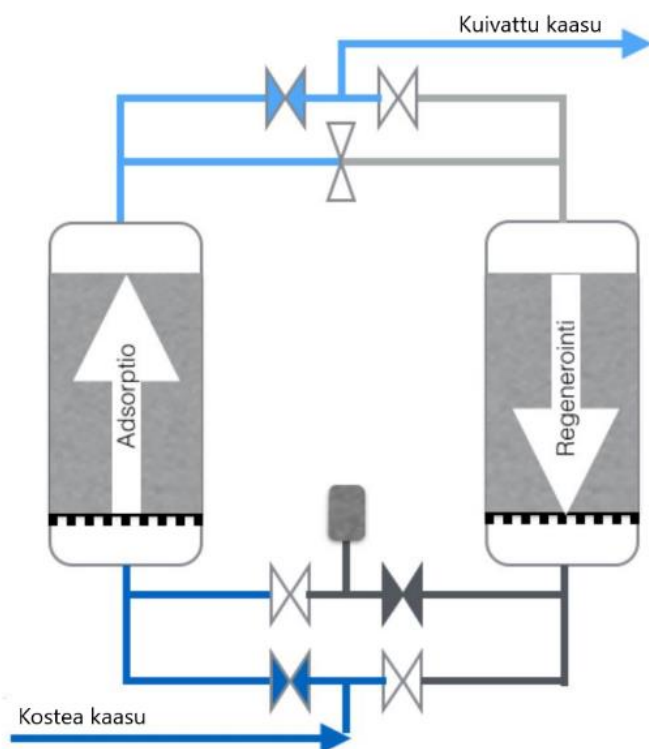
Adsorptiokuivauksen toimintaperiaate perustuu jonkun aineen kykyyn sitoa vesimolekyyliä pinnalleen sekä vettä sitovan aineen jatkuvaan regenerointiprosessiin (Ellman, Hautanen, Järvinen & Simpura 2002, 55; Willman 2015, 69).

4.1.1 Kuivausaine

Laitteistoissa yleisesti käytettävä kuivausaine on silikageeli (Willman 2015, 69), joka on nimestään huolimatta kiinteää ainetta. Sillä on mikrohuokoinen hyvin kosteutta sitova rakenne, jonka pinta-ala on 700–800 m²/g. Silikageelin rakenne adsorpoi kosteutta, joten sen ulkonäkö ei muutu prosessissa. Silikageeli myös tuntuu kuivalta koskettaessa, vaikka se olisi täysin kylläinen vedestä. Joihinkin silikageeleihin on lisätty oranssia väriainetta, joka muuttuu vihreäksi, kun siihen adsorpoituu kosteutta. Valkoinen silikageeli ei sisällä väriainetta eikä siten vaihda väriä vettä sitoessaan. Silikageeli voidaan regeneroida kuumentamalla sitä 100–120 °C lämpötilassa. (Material Harvest Ltd 2020.)

4.1.2 Kahdella kuivausainesäiliöllä toimiva adsorptiokuivain

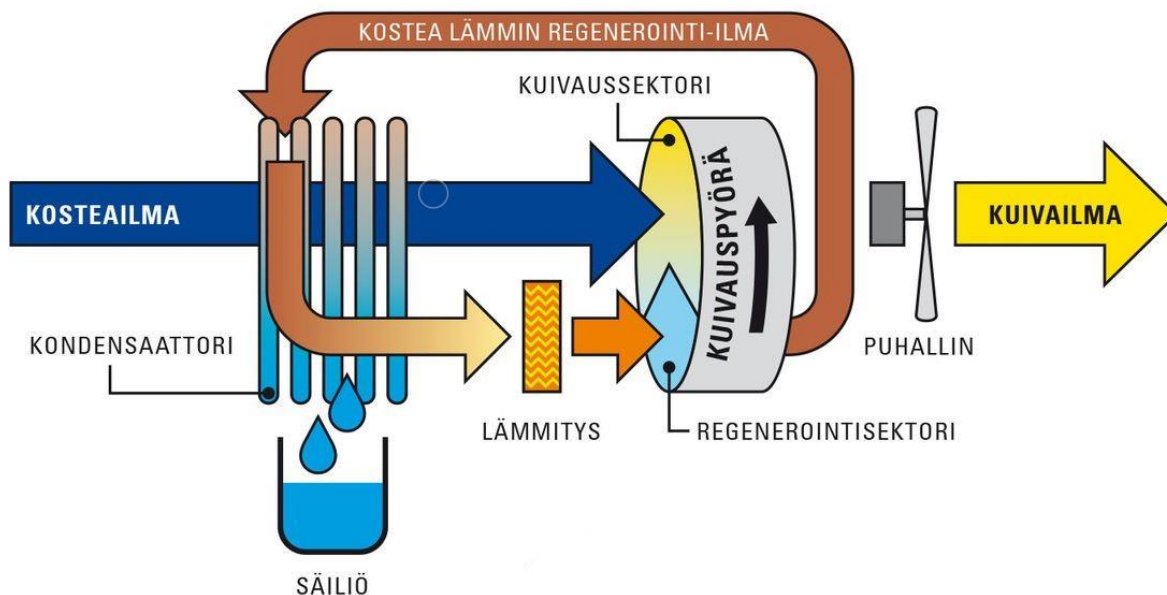
Veden erottamiseen paineilmasta voidaan käyttää kaksi kuivausainesäiliötä sisältävää kuivauslaitteistoa. Tällöin ilma johdetaan ensin toiseen kuivausainesäiliöön, ja kun kuivausaineesta tulee kylläistä, ohjataan virtaus kulkemaan toisen säiliön kautta. Samaan aikaan kyllästyneen säiliön kuivausaine elvytetään sähkövastusten tai lämpimän ilmavirran avulla. Menetelmällä voidaan saavuttaa -30– -90°C kastepiste. Saavutettava kastepiste riippuu muun muassa käytetystä kuivausaineesta. (Ellman ym. 2002, 55.) Menetelmä esitetään kuvassa 7.



Kuva 7. Kahdella säiliöllä toteutettu adsorptiokuivain (Haikarainen 2015, 21)

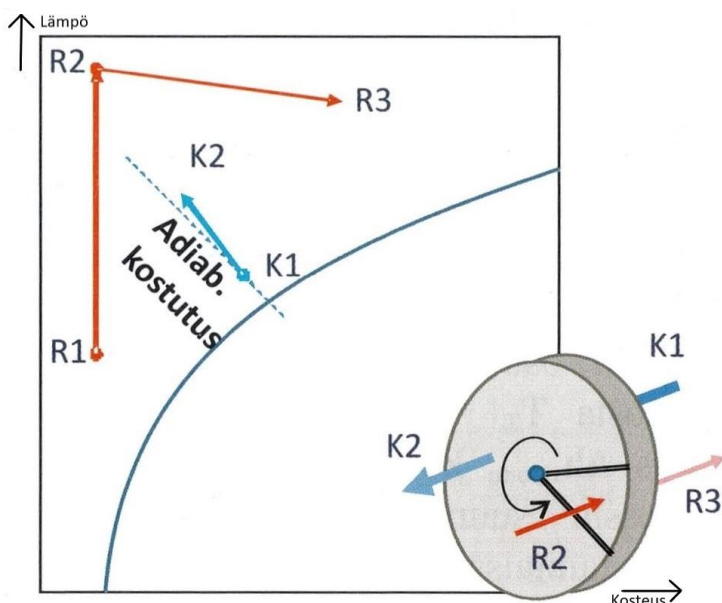
4.1.3 Kuivauspyöräteknikalla toimiva adsorptiokuivain

Kuivauspyöräteknikalla toimivan adsorptiokuivaimen toiminta perustuu sorptioaineella päällystettyyn kuivauspyörään. Kosteaa ilmaa johdetaan puhaltimen avulla kuivauspyörän läpi, jolloin se sitoo ilmasta kosteutta itseensä ja ilma kuivuu. Kuivauspyörässä on regenerointisektori, jonka läpi johdetaan erillisessä piirissä lämmitettyä kuivaa ilmaa, joka regeneroi sorptioaineen kuivauspyörän pinnassa. Kuiva lämmin ilma kerää samalla kosteutta minkä jälkeen ilma jäähdetään, jolloin siinä oleva kosteus tiivistyy vedeksi ja se valutetaan poistoastiaan. Tämän jälkeen ilma voidaan jälleen lämmittää ja käyttää regenerointiin. Kuivauspyörän pyöriessä kuivaussektorille tulee jatkuvasti regeneroitua sorptioainetta. (Trotec Oy 2020a.) Kuivauspyöräkuivaimen toimintaperiaate esitetään kuvassa 8.



Kuva 8. Kuivauspyörän sisältävän adsorptiokuivaimen toimintaperiaate (Trotec Oy 2020a)

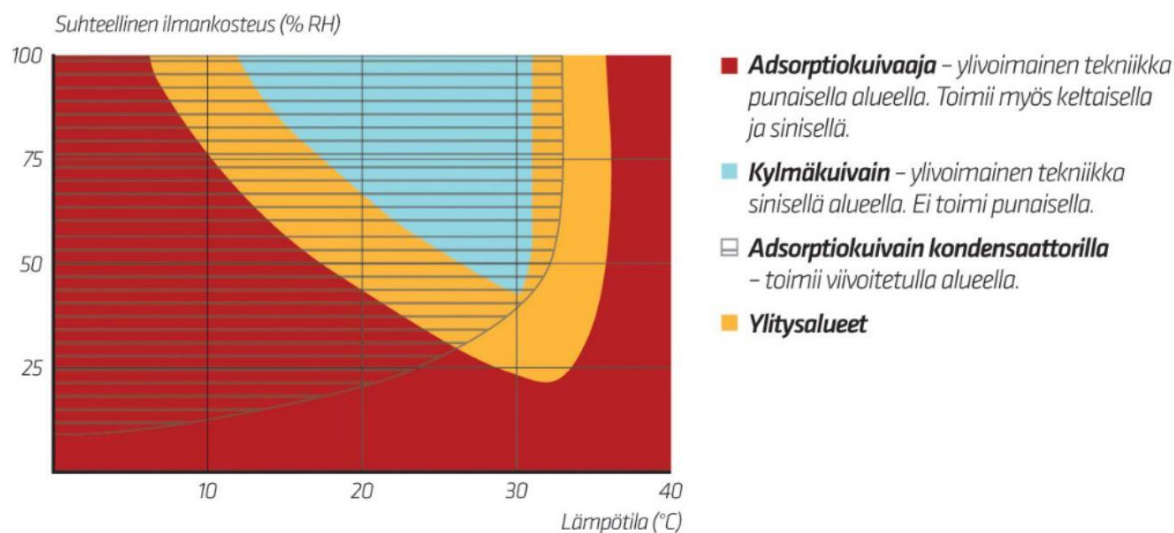
Kuvassa 9 esitetään adsorptiokuivauksen tarkempi prosessikaavio. Vaaka-akselilla on ilman kosteus ja pystyakselilla lämpötila. K-kirjain esittää kuivattavan ilman ja R-kirjain regenerointi-ilman kulkua kuivauspyörän läpi. Pyörivä roottori on jaettu kahteen eri suuruiseen sektoriin, joista kuivattava ilma kulkee suuremman ja regenerointi-ilma pienemmän sektorin läpi. R1 → R2 -vaiheessa regenerointi-ilma lämmitetään riittävään lämpötilaan, jotta se sitoo kosteuden sorptioaineesta. R2 → R3 -vaiheessa kosteuden siirtyessä sorptioaineen pinnasta regenerointi-ilmaan, ilman lämpötila laskee samalla hieman. K1 → K2 -vaiheessa kuivattava ilma kulkee kuivauspyörän läpi, jolloin sen kosteus pienenee ja lämpötila nousee, koska prosessi kulkee hieman adiabaattisen kostutuspuoran yläpuolella. (Sandberg 2014, 142.)



Kuva 9. Kuivauspyöräkuivaimen prosessikaavio (mukailtu Sandberg 2014, 142)

4.1.4 Adsorptiokuivauksen ominaisuudet

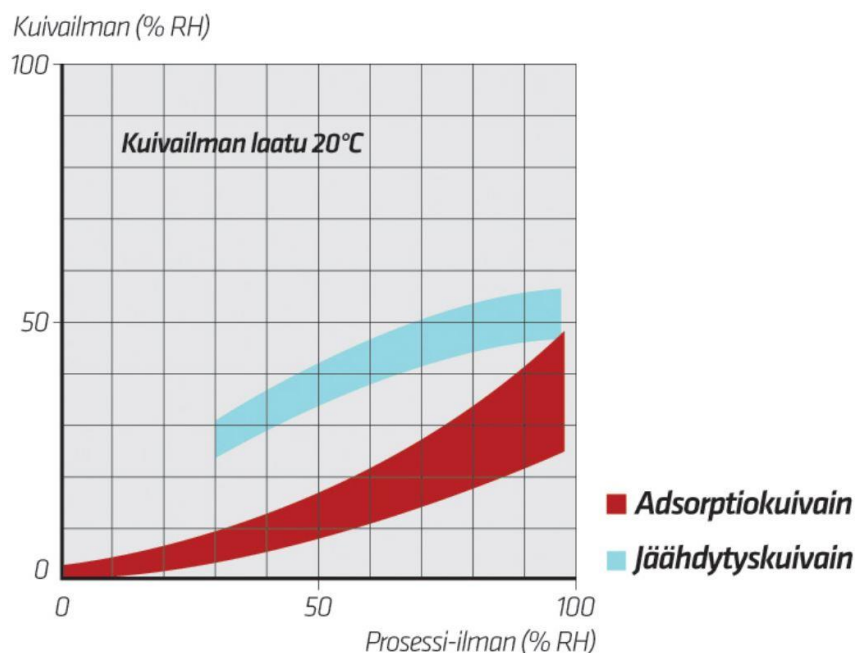
Adsorptiokuivaus ei vaadi kuivattavalta tilalta yhtä tarkkaa lämpötilaa kuin kondenssi-kuivaus, vaan sen toimintalämpötila on huomattavasti laajempi. Adsorptiokuivaus toimii myös pakkasella. (Willman 2015, 68.) Kuvassa 10 esitetään adsorptio- ja kondenssikuivaimen käyttöalueet.



Kuva 10. Adsorptio- ja kondenssikuivauksen toiminta-alueet (Corroventa 2017, 6)

Adsorptiokuivain tuottaa kondenssikuivaimen verrattuna kuivempaa ilmaa (Willman 2015, 68). Tämä esitetään kuvassa 11. Kuivattavan ilman suhteellisen kosteuden ollessa 90 prosenttia 20 °C:n lämpötilassa, saadaan ilma kuivattua yhdellä kuivauskierrolla noin

25–40 prosenttiin suhteellisella kosteudella mitattuna. Kuivattavan ilman suhteellisen kosteuden ollessa samassa lämpötilassa 40 prosenttia saadaan ilma kuivattua noin 5–15 prosenttiin suhteellisella kosteudella mitattuna.



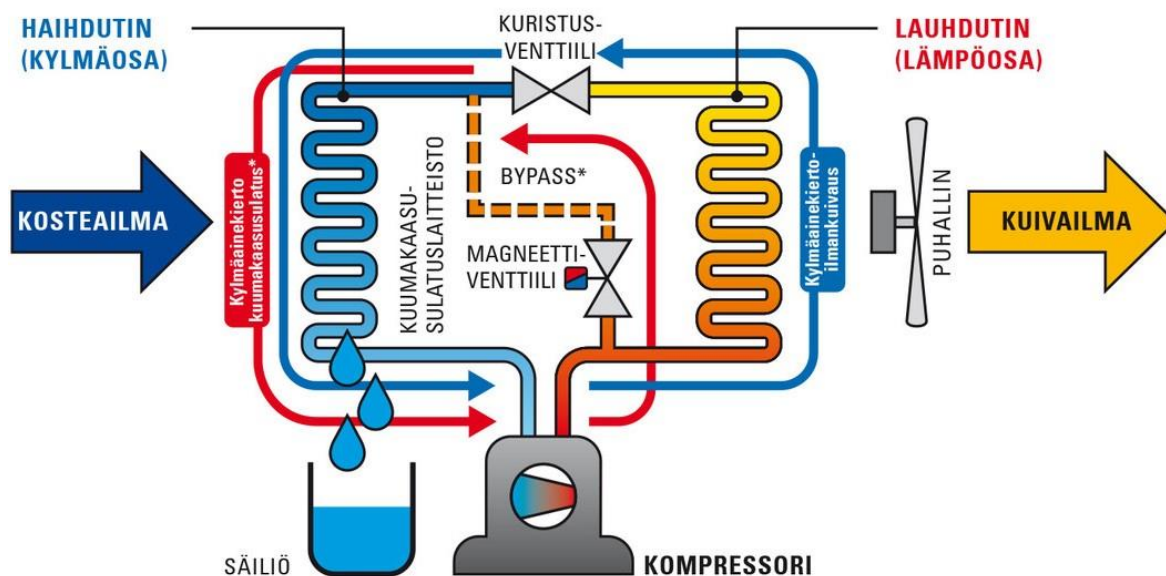
Kuva 11. Adsorptio- ja kondenssikuivauksen tulo- ja poistoilman suhteelliset kosteudet (Corroventa 2017, 5)

4.2 Kondenssikuivaus

Kondenssikuivaimen toiminta perustuu kondensaatioon eli tiivistymiseen. Kuivattavan ilman lämpötila lasketaan kastepisteen alapuolelle, jolloin ilmassa oleva höyrystynyt vesi tiivistyy ja se voidaan valuttaa säiliöön. (Trotec Oy 2020c.)

4.2.1 Kondenssikuivaimen toimintaperiaate

Kondenssikuivaimessa on suljettu kylmäainepiiri, jossa kulkee kylmäainetta. Se puristetaan ensin lauhduttimessa kompressorin ja kuristusventtiilin avulla kasaan suureen paineeseen, jolloin sen lämpötila kasvaa. Tämän jälkeen neste pääsee kuristusventtiilin ohi haihduttimeen, jossa sen lämpötila laskee paineen laskun takia. Tämän jälkeen kylmäaine ohjataan jälleen kompressoriin ja kierto alkaa alusta. Kuivattava ilma kulkee omassa piirissä sekä haihduttimen että lauhduttimen läpi. Kostean ilman tullessa haihduttimeen sen lämpötila laskee nopeasti alle kuivattavan ilman kastepisteen, jolloin osa ilmassa olevasta kosteudesta tiivistyy ja se valutetaan säiliöön. Tämän jälkeen ilma ohjataan lauhduttimeen, jossa se lämpenee takaisin normaaliin lämpötilaan. (Trotec Oy 2020b.) Kompressiotekniikalla toimivan kondenssikuivaimen toimintaperiaate esitetään kuvassa 12.



Kuva 12. Kompressiotekniikalla varustetun kondenssikuivaimen toimintaperiaate (Trotec Oy 2020b)

4.2.2 Kondenssikuivauksen ominaisuudet

Kondenssikuivain sopii erityisesti erittäin kosteisiin ja lämpötilaltaan $+20$ – $+30$ °C oleviin tiloihin. Tällaisissa tiloissa kondenssikuivain on adsorptiokuivainta tehokkaampi erottelukyvyltään. Kondenssikuivaimen toiminta on kuitenkin erittäin riippuvaista vallitsevista olosuhteista. Kuivaimen toiminta heikkenee huomattavasti lämpötilan laskiessa ja loppuu riittävän alhaisissa lämpötiloissa kokonaan. (Willman 2015, 68.) Kondenssikuivaimen käyttöalueet esitetään kuvassa 10.

4.3 Kuumailmakuivaus

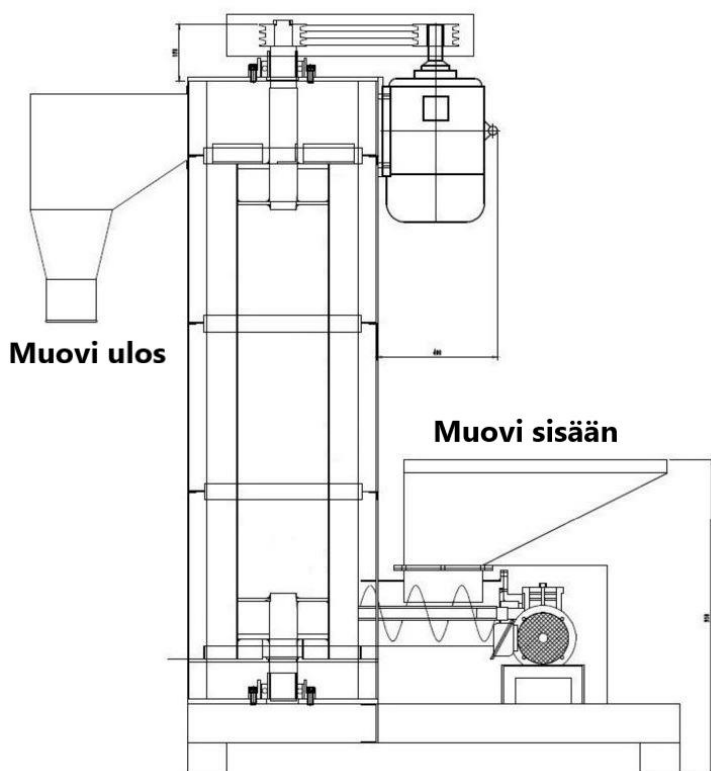
Kuumailmakuivaimen toiminta perustuu esilämmitetyn ilman puhaltamiseen kuivattavan muovin läpi. Kuuma ilma sitoo kappaleiden pinnalla olevan kosteuden itseensä, jolloin kappale kuivuu. Menetelmä soveltuu ainoastaan ei-hygroskooppisten eli vettä imemättömien kappaleiden kuivaukseen. Kuumailmakuivurin rakenne on yleensä yksinkertainen, joten se on hinnaltaan edullinen. (Aaltonen 2014, 20.) Kuumailmakuivausmenetelmän haittapuolina on kuivauslopputuloksen vaihtelevuus sekä kuivauksen hitaus. Kuivauksen lopputulos vaihtelee, koska se on riippuvainen ympäristön kosteudesta ja lämpötilasta. (Kurri ym. 2008, 89.)

4.4 Mekaaninen kuivaus

Muovin kuivauksessa voidaan hyödyntää myös mekaanisia kuivausmenetelmiä, jotka soveltuvat hyvin muovin karkeaan kuivaukseen. Mekaaninen menetelmä voi olla esimerkiksi sihtierotin, täryseula, vedenpoistoruuvi eli kitkaerotin tai sentrifugaalikuivain. Mekaaniset menetelmät ovat energiankulutukseltaan tehokkaita, sillä veden ei tarvitse muuttaa olo- muotoaan kuivaustapahtumassa. (Aaltonen 2014, 19–20.)

Sihtierottimella, täryseulalla ja vedenpoistoruuvilla suoritettu kuivaus on hyvin karkeaa. Muovin kosteuspitoisuus saadaan laskettua niiden avulla vain noin 7–8 prosenttiin. (Aaltonen 2014, 20.)

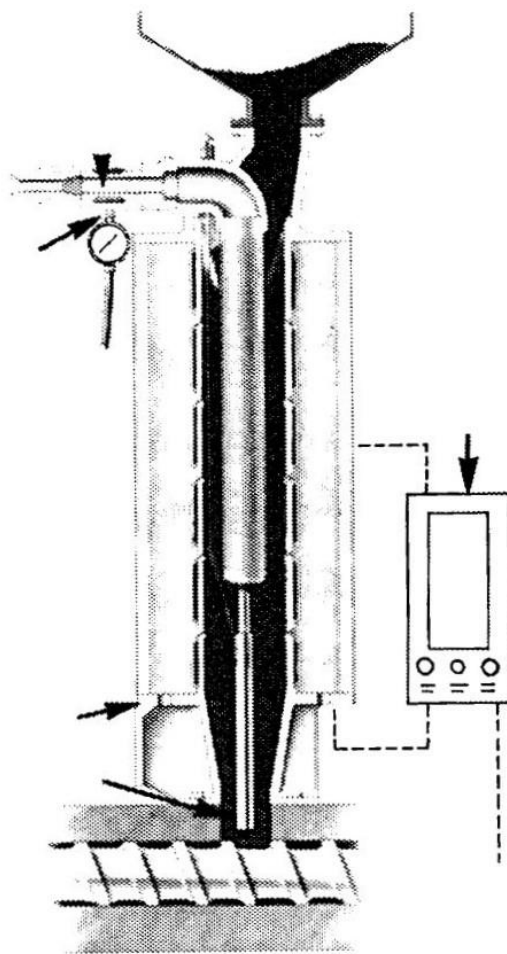
Sentrifugaalikuivaimella on sihtierotinta, täryseulaa ja vedenpoistoruuvia parempi vedenerottelukyky. Sen toiminta perustuu pyörivään sihtikoriin. Sentrifugaalikuivain voi olla myös jatkuvatoiminen, jolloin kuivattavaa materiaalia siirtyy jatkuvasti sisään sekä ulos kuivaimesta. Kuivaustehokkuus riippuu sekä muovin että laitteen ominaisuuksista. Siihen vaikuttavat muun muassa muovikappaleiden rakenne ja koko, niiden vedenimukyky, sekä sihtikorin pyörimisnopeus ja rakenne. (Aaltonen 2014, 20.) Kuvassa 13 esitetään rakennepiirros eräästä muoveille soveltuvasta sentrifugaalikuivaimesta.



Kuva 13. Rakennekuva muoveille soveltuvasta sentrifugaalikuivaimesta (mukailtu China plastic granulator 2020)

4.5 Alipaine kuivaus

Alipaine kuivureiden toiminta perustuu paineen alentamiseen kuivaimessa niin alas, että vesi alkaa kiehua. Ilman paineen pitää 0 °C:n lämpötilassa olla alle 6,105 mbar:a, 10 °C:n lämpötilassa alle 12,28 mbar:a ja 20 °C:n lämpötilassa alle 23,37 mbar:a veden kiehumiseksi (Seppänen, Kervinen, Parkkila, Karkela & Meriläinen 2009, 80). Alipaine kuivuri malleja on olemassa erilaisia, joista käytetyin on jatkuvatoiminen eli venturikuivuri. Alipaine kuivureiden etuina on pieni energiankulutus ja huonoina puolina niillä on pieni kuivaus teho sekä ongelmat kuivaukseen käytetyn ilman poistossa järjestelmästä. (Kurri ym. 2008, 89.) Kuvassa 14 esitetään yksi malli alipaine kuivurista.



Kuva 14. Alipaine kuivuri (Kurri ym. 2008, 88)

5 MUOVIN KUIVAUS KIEMURASSA

5.1 LAB-ammattikorkeakoulu

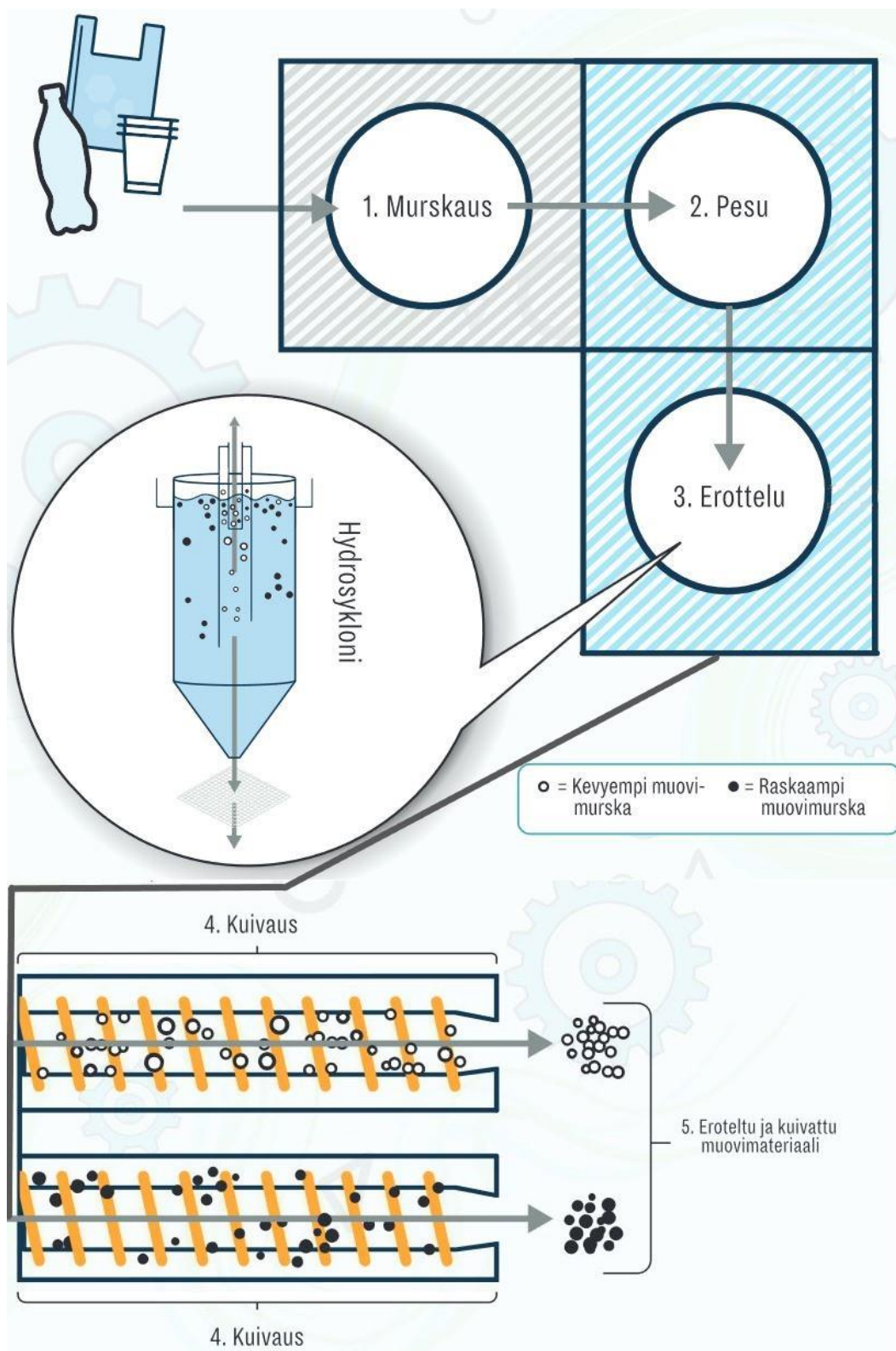
LAB-ammattikorkeakoulu aloitti toimintansa tammikuussa 2020. Lahden ja Saimaan ammattikorkeakoulu toimivat aiemmin erillisinä ammattikorkeakouluina, mutta niiden yhdistyminen syntyi uudella nimellä varustettu kokonaisuus. LAB-ammattikorkeakoululla on kampus sekä Lahdessa että Lappeenrannassa, minkä lisäksi se tarjoaa opiskelua verkossa. LAB-ammattikorkeakoulu tarjoaa opetusta viidellä alalla, jotka ovat tekniikka, liiketalous, sosiaali- ja terveysala, ravintola- ja matkailuala sekä muotoilu, taide ja visuaalinen viestintä. (LAB University of Applied Sciences 2020b.)

LAB-ammattikorkeakoulu on Suomen kuudenneksi suurin ammattikorkeakoulu yli 8500 opiskelijallaan (LAB University of Applied Sciences 2020b). Lahden kampuksella opiskelijoita on yhteensä noin 5000 (LAB University of applied sciences 2020d). Opettajia ja TKI-asiantuntijoita ammattikorkeakoulussa on yhteensä noin 500 (LAB University of Applied Sciences 2020c). Ammattikorkeakoulun liikevaihto on noin 65 miljoonaa euroa (LAB University of Applied Sciences 2020c).

5.2 Kiemura-hanke

Kiemura on LAB-ammattikorkeakoulun, Muovipolin ja Helsingin yliopiston yhteinen tutkimus- ja kehitysprojekti, jolla tutkitaan ratkaisuja mikro- ja kierrätysmuovien kiertotalouteen. Hanke on saanut rahoitusta Euroopan unionilta. LAB-ammattikorkeakoulussa tutkitaan ja kehitetään pienille kierrätysmuovimäärille soveltuvaa pesu- ja erottelulinjastoa. Laitteesta on tarkoitus tehdä pilot-tason versio, jolla voidaan testata samalla myös eri jätemuovijakeiden soveltuvuutta laitteelle. (Lahden ammattikorkeakoulu 2019.)

Laitteen perustoimintaperiaate esitetään kuvassa 15. Laitteen ensimmäisessä vaiheessa muovimateriaali murskataan tarpeeksi pieniksi partikkeleiksi siihen soveltuvalla laitteella (vaihe 1). Seuraavassa vaiheessa muovipartikkelit pestään kaikista siihen kuulumattomista roskista ja muista aineista (vaihe 2). Kolmannessa vaiheessa muovilaadut erotellaan hydrosyklonimenetelmällä eri jakeisiin niin, että vähintään toiseen jakeeseen tulee myöhemmin hyödynnettävää muovilaatua (vaihe 3). Erottelun jälkeen muovit kuivataan jakeittain kahdessa eri kuivaimessa tai kuivaimen osiossa (vaihe 4). Tämän jälkeen kuivattua materiaalia voidaan hyödyntää pelletöimällä se kuivauksen jälkeen ekstruuderilla (vaihe 5). (Lahden ammattikorkeakoulu 2019.)



Kuva 15. Kiemuran toimintaperiaate (mukailtu Lahden ammattikorkeakoulu 2019)

Muovien kuivaus on tärkeä osa Kiemura-muovinkierrätyslaitteiston toimintaa. Muovit tulee kuivata huolellisesti pesu- ja erotteluvaiheiden jälkeen ennen kaksoisruuviekstruuderiin syöttämistä. (Lahden ammattikorkeakoulu 2019.) Muoveihin jäävä vesi aiheuttaa

valmiissa kappaleessa mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä sekä huonoa pinnanlaatua. Muovin prosessointivaiheessa muovin lämpötilan ollessa sen sulamispisteen yläpuolella ylimääräinen kosteus voi aiheuttaa hydrolyysia ja sen seurauksena muutoksia muovin lujuudessa, moolimassassa sekä sulaviskositeetissä. (Aaltonen 2014, 19.)

5.3 Kiemuran rajoitukset ja vaatimukset

Muovin sallitusta kosteusprosentista Kiemurassa ei ole olemassa tarkkaa tietoa ennen kaksoisruuviekstruuderilla suoritettavia testejä (Rintala 2020). Esimerkiksi ruiskuvalussa sallitaan kuitenkin yleensä vain korkeintaan 0,02–0,1 prosentin kosteuspitoisuus (Kurri ym. 2008, 88). Kaksoisruuviekstruuderin sallima kosteuspitoisuus tulee olemaan sen perusteella myös todennäköisesti hyvin pieni.

Muovia tulee jatkuvalla syötöllä niiden erottelu- ja pesuprosessista, ja lisäksi muovia tulee syöttää jatkuvalla syötöllä kaksoisruuviekstruuderiin (Rintala 2020). Tämän takia toimivin tapa muovin kuivaamiseen Kiemurassa on todennäköisesti jatkuvasyöttöinen kuivain. Panoskuivurimalliset ratkaisut eivät todennäköisesti ole niin toimivia, koska kuivattaessa muovia erissä, muovia joudutaan annostelevaan kuivuriin sopivin väliajoin ja sopivin erin. Edellä mainittu vaatii monimutkaisempaa teknologiaa kuin muovin suora syöttö erottelusta jatkuvasyöttöiseen kuivuriin. Muovia joudutaan eräkuivaustavassa keräämään säilöön myös kuivausprosessin jälkeen. Annostelu säilöstä kaksoisruuviekstruuderiin on vaikeammin toteutettavissa kuin jatkuvasyöttöisen kuivurin tasainen syöttö kaksoisruuviekstruuderiin suoraan kuivurista.

Kuivausprosessin pullonkaulan välttämiseksi laitteistolta vaaditaan riittävä kuivausteho, jotta se saa muovin kuivattua sitä mukaa kuin sitä tulee pesuprosessista. Tämänhetkisen tiedon mukaan kuivattavaa materiaalia tulee lopullisessa laitteistossa pesu- ja erottelulinjalta kuivaukseen noin kolme kilogrammaa minuutissa (Rintala 2020).

Kuivauslinjaston sähkönkulutuksen tulisi olla mahdollisimman pieni kuivaustehon kuitenkin kärsimättä, jotta laitteiston käyttö olisi mahdollisimman edullista.

Kuivauslaitteistossa rajoittavana tekijänä on myös kuivauslaitteiston koko. Lopullisen Kiemura-laitteiston on määrä mahtua merikonttiin ja kuivauslaitteistolle on käytössä vain pieni osa tästä tilavuudesta.

Muovin lämmittämiseksi kuivaimessa on rajoitteita. Teoriassa esitetyn mukaisesti muovit alkavat sulamaan ja pehmenemään eri lämpötiloissa ja sulaessaan muovit voivat jäädä kiinni kuivauslaitteistoon estäen sen kunnollisen toiminnan. Ennakkotiedon mukaan suurin sallittu lämpötila kuivaimessa on noin 80 °C (Rintala 2020).

5.4 Eri muovilaatujen kuivaus

Eri muovilaaduilla on kuivumiseen erilaisia vaatimuksia. Erityisen tarkasti kuivausta vaativat hygroskooppiset eli kosteutta imevät muovit. (Kurri ym. 2008, 88.) Kiemurassa tärkeimpiä ekstruuderilla työstettäviä muoveja ovat hydrosykloni-erottelussa ylitteeseen kerääntyvät polyolefiinit eli polyeteenit ja polypropeenit. Selvityksen alla on myös polyamidien kuivaus. (Rintala 2020.)

Polypropeenit ja polyeteenit eivät ole hygroskooppisia muoveja eli niissä vettä kerääntyy ainoastaan muovin pinnalle (Aaltonen 2014, 19). Niiden kuivaus on siten selvästi esimerkiksi hygroskooppisia polyamideja helpompaa. Hygroskooppiset muovit, erityisesti polyamidit, puolestaan ovat erittäin hyvin vettä imeviä ja imevät vettä molekyyli-rakenteeseen asti. (Rintala 2020.) PA66 voi imeä vettä jopa yli 8 % omasta massastaan ja PA6 noin 10 % omasta massastaan (Järvinen 2008, 155).

Aiemmin mainitusti muovien sulamis- ja pehmenemislämpötilat asettavat rajoitteita laitteen toimintaan. Polyeteenien sulamispiste on pääasiassa selvästi yli 100 °C:a ja polyeteenitereftalaateilla (PET) se on puolestaan vähintään 200 °C. Joillain polyeteenin sekoituksilla sulamispiste voi olla alle 100 °C, mutta tämä on harvinaista. Vicat-pehmenemislämpötilat ovat polyeteeneillä pääasiassa 70–130 °C, mutta joissain tapauksissa pehmenemislämpötilat ovat myös alle tämän kuten on esitetty taulukossa 3. Vicat-pehmenemislämpötilan korkeiset lämpötilat kuivaimessa eivät vaikuttaisi aiheuttavan ongelmaa kuivausprosessiin. Muovi on tällöin vasta hieman pehmentynyt, mutta ei niin paljon, että se sotkeutuisi kuivauslaitteistoon. Todennäköinen rajalämpötila kuivausprosessille lienee Vicat-pehmenemislämpötilan ja sulamispisteen välissä.

Polypropeenien sulamispiste on lähes kaikissa normaaleissa tapauksissa 130–180 °C. Vicat-pehmenemislämpötilat ovat yleensä noin 50–180 °C, mutta joissain harvemmissä sekoituksissa sulamis- ja pehmenemislämpötilat voivat olla alle näiden lämpötilojen kuten on esitetty liitteessä 2.

Polyamidit kestävät erittäin hyvin kuumuutta, sillä niiden sulamispiste on vähintään 250 °C ja Vicat-pehmenemislämpötila vähintään 200 °C kuten on esitetty liitteessä 3.

Kuivaimen maksimilämpötilaa rajoittaa edellä mainitut polyeteenien ja polypropeenien sulamislämpötilat, koska niiden sulamispisteet ovat Kiemurassa kuivattavista muoveista matalimmat.

5.5 Valittava kuivausmenetelmä

Kiemuran tapauksessa kuivaukseen vaaditaan vähintään terminen menetelmä. Ennen ekstruuderiin syöttöä muovin tulee olla niin kuivaa, että kuivauksen toteuttaminen pelkällä mekaanisella kuivauksella ei vaikuta riittävältä.

Kiemuran tapauksessa mekaanisen ja termisen menetelmän yhdistelmä voisi kuitenkin olla toimivinta, koska muovin kuivaus termisellä menetelmällä on sitä nopeampaa ja helpompaa mitä kuivempaa muovi on siihen tullessa. Muovin karkea kuivaus ennen termistä menetelmää on kannattavaa, myös siksi energiaa tarvitaan veden höyrystymiseen mekaanisella menetelmällä termistä menetelmää vähemmän.

Mekaanisista menetelmistä sentrifugaalikuivaimella on sihtierotinta, täryseulaa ja vedenerotusruuvia parempi vedenerottelukyky. Sentrifugaalikuivain voidaan myös toteuttaa jatkuvasyöttöisenä, joten se soveltuu mekaanisista menetelmistä Kiemuraan parhaiten.

Termisessä kuivauksessa ilman kuivaamiseen voidaan hyödyntää sekä adsorptio- että kondenssikuivausta tai näiden yhdistelmää (Rintala 2020). Kiemurassa muovin kuivusvaatimus tulee olemaan aiemmin mainitun ruiskuvalun kosteuspitoisuusvaatimusten perusteella todennäköisesti melko tarkka. Laitetta tulee pystyä käyttämään myös erilaisissa olosuhteissa. Adsorptiokuivaimen toiminta-alue on kondenssiokuvainta laajempi ja sen kuivausteho ei ole niin riippuvainen ympäristön lämpötilasta kuin kondenssiokuvaimella. Kondenssiokuvain toimii kuitenkin erottelukyvyltään adsorptiokuvainta tehokkaammin +20–+30 asteen lämpötiloissa. Kiemura-laitteen käyttöolosuhteet voivat kuitenkin vaihdella laajasti, joten pelkän kondenssikuivaimen käyttö ei ole todennäköisesti hyvä vaihtoehto, vaan adsorptiokuivaimella saadaan paremmin varmistettua, että muovista tulee riittävän kuivaa kaikissa olosuhteissa ja kuivumisaika pysyy mahdollisimman tasaisena.

Termisessä menetelmässä tulee varmistaa, että veden höyrystymisnopeus muovin pinnalta ja sisältä saadaan maksimoitua riittäväällä ilmavirralla, riittäväällä lämpötilalla ja riittävän kuivalla ilmalla. Murskattujen muovipartikkelien ollessa kuivaimessa mahdollisimman harvassa ja ilmastisesti, niiden kuivuminen todennäköisesti nopeutuu, koska kuiva ilma pääsee vaihtumaan ja ympäröimään kuivattavat pinnat tehokkaammin.

Veden höyrystymiseen termisillä menetelmillä vaadittava lämpömäärä voidaan laskea kaavan 1 ja taulukon 2 tietojen perusteella. Rintalan (2020) mukaan valmiissa laitteessa muovimassaa tulee kuivaukseen noin kolme kilogrammaa minuutissa. Esimerkkilaskussa lämpöenergian tarve on laskettu sekä yhden, kolmen että seitsemän prosentin kosteuspitoisuuksilla, koska kuivaimen tulevan muovin tarkka kosteuspitoisuus ei ole vielä tiedossa. Kosteusprosenttien perusteella voidaan laskea höyrystettävän veden määrä, jos

oletetaan että muovi on kuivattava täysin vedettömäksi. Vettä ei myöskään poistu mekaanisesti vaan kaikki vesi poistuu muovista höyrystymällä. Yhden prosentin kosteusprosentilla höyrystettävää vettä on 30 grammaa minuutissa, kolmen prosentin kosteusprosentilla 90 grammaa minuutissa ja seitsemän prosentin kosteusprosentilla 210 grammaa minuutissa. Höyrystettävän veden lämpötilaksi oletetaan laskuissa 20 °C.

$$Q_h = ml_h \quad (1)$$

- 1 % kosteuspitoisuus: $Q_h = 30 \text{ g} \cdot 2453,1 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 73,59 \text{ kJ}$
- 3 % kosteuspitoisuus: $Q_h = 90 \text{ g} \cdot 2453,1 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 220,08 \text{ kJ}$
- 7 % kosteuspitoisuus: $Q_h = 210 \text{ g} \cdot 2453,1 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 515,15 \text{ kJ}$

Laskuista saadut arvot ovat lämpöenergian tarve minuuttia kohden.

6 KOELAITTEISTOT

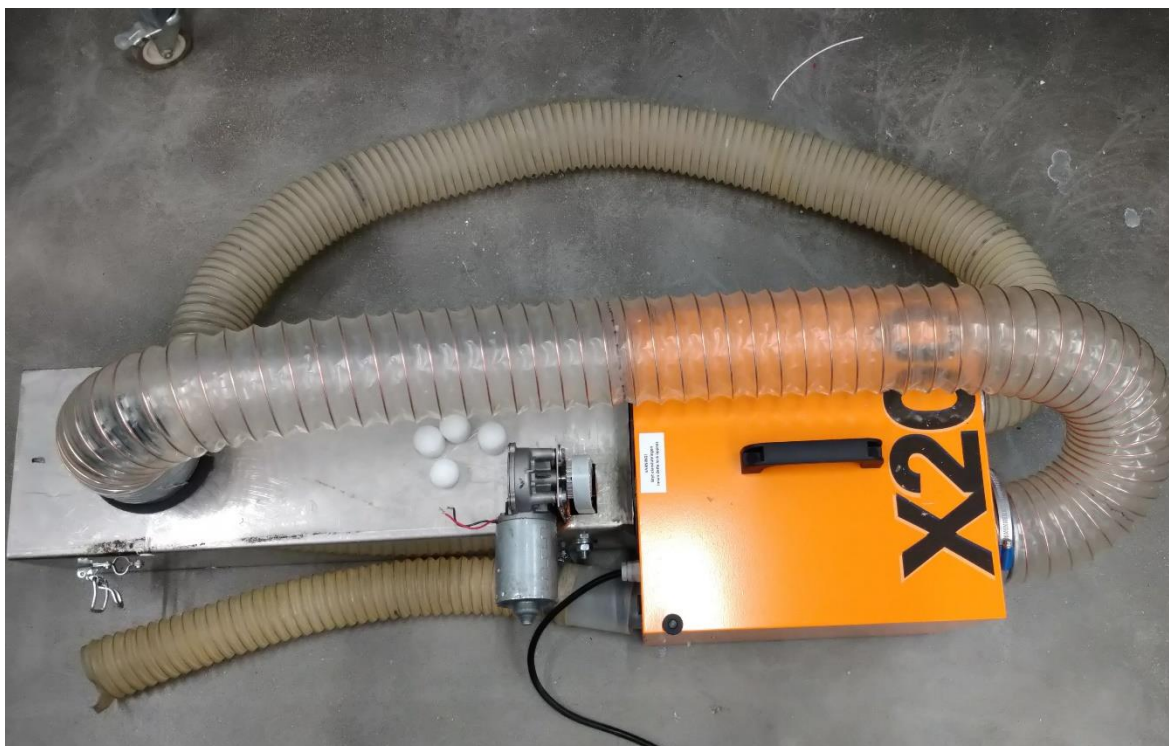
6.1 Yleistä koelaitteistoista

LAB-ammattikorkeakoulun Lahden kampuksella on valmistettu kaksi muovinkuivainten koelaitetta. Ensimmäisenä valmistettiin panoskuivurimallinen adsorptiokuivain ja toisena purupuhaltimen avulla toimiva putkimallinen kuivain. Koelaitteistoilla voidaan testata eri kuivurimallien toimintaa ja kuivaustehoa.

6.2 Adsorptiokuivaimen koelaitteen toiminta

Kuvassa 16 esitetään koululla valmistettu kuivauspyöräteknikalla toimivan adsorptiokuivaimen koelaitte. Rintalan (2020) mukaan koelaitte on niin sanottu panoskuivuri, jossa muovi kuivuu erä kerrallaan sen kuivausosan sisällä. Muovia ei siis voida syöttää kuivuriin jatkuvasti sisään ja ulos laitteen pyöriessä.

Kuvassa näkyvän laitteen metallinvärinen osa on muovin kuivaustila. Sen sisällä pyörii metalliverkosta tehty lieriönmallinen säiliö, jonka sisälle kuivattava muovi laitetaan (Rintala 2020). Säiliö saa pyörimisvoimansa sähkömoottorista. Metalliverkko on tiheydeltään sellainen, että muovipalat pysyvät säiliön sisällä, mutta samalla ilma pääsee kiertämään muovin seassa. Kuvassa näkyvän oranssin kuution sisällä on kuivaustapahtumaan käytetty adsorptiokuivain.



Kuva 16. Adsorptiokuivaimen koelaitte

Kuvassa 17 esitetään tarkemmin adsorptiokuivaimen laitteiston sisältö. Kuvassa näkyvä ohut harmaa lieriö on sorptioaineella päällystetty kuivauspyörä, jossa käytetään kuivausaineena silikageeliä.

Kuvassa näkyvä punainen kappale on ilmaa laitteistossa kierrättävä puhallin, joka toimii sähkömoottorilla. Puhallin imee ilmaa kuvassa näkyvän vaalean HEPA-suodattimen läpi kuivauspyörälle (Rintala 2020). HEPA-suodatin suodattaa ilmasta suurimman osan epäpuhtauksista ja estää muun muassa muovinpaloja kulkeutumasta puhaltimeen ja kuivauspyörään. Rintalan (2020) mukaan muovinkuivaustilasta kostea ilma puhalletaan kuivauspyörän läpi. Kuivunut ilma kulkeutuu kahta letkua pitkin takaisin muovinkuivaustilaan ja siitoo muovista kosteutta. Kolmas, kokonaan laitteen ulkopuolelle kulkeutuva letku, kuljettaa kosteaa ilmaa pois prosessista.

Adsorptiokuivaimen pyörittämä ilmamäärä on noin 180 m³ tunnissa. Laitteelle tehtyjen testien perusteella kuivausteho on muutamia vesilitroja tunnissa. Kuivausteho riippuu kuitenkin muovimateriaalista, muovin kosteudesta, muovin sekoittumisesta sekä muista muuttujista. (Rintala 2020.)

Kiemuran lopullisen version näkökulmasta laitteen ongelmana on se, että laite on panoskuivurimallinen eikä jatkuvasyöttöinen. Muovi ei myöskään sekoitu laitteessa tarpeeksi ilmastavasti mahdollisimman suuren kuivaustehon saavuttamiseksi (Rintala 2020).

Kuivauslämpötilan nostaminen voisi aiemmin esitetyn tiedon perusteella nopeuttaa muovin höyrystymistä ja kasvattaa siten laitteen kuivaustehoa. Kuivauspyörän kuivausteho aiheuttaa kuitenkin jossain vaiheessa rajan kuivausteholle.



Kuva 17. Adsorptiokuivaimen koelaitteen sisäosat

6.3 Puhallinkuivaimen koelaitteen toiminta

Kuvassa 18 esitetään koeversio tornimaisesta puhallinkuivaimesta. Puhaltimen alaosassa on kolmen kilowatin tehoinen purupuhallin, jolla ilmaa puhalletaan putkeen. Rintalan

(2020) mukaan märkä muovi syötetään kuivaimeen laitteiston alaosassa olevasta aukosta, ja muovi jää kuivumaan ja sekoittumaan laitteistoon halutuksi ajaksi. Kuiva muovi poistetaan laitteesta avaamalla yläosassa oleva luukku.

Laitteistoon on tarkoitus lisätä myöhemmin adsorptiokuivain ennen purupuhallinta, jolloin laitteeseen puhalletaan kuivaa ilmaa (Rintala 2020). Suoraan ulkoa tai huoneilmasta otettuna laitteeseen syötettävän ilman kosteuspitoisuus voi vaihdella suuresti, mikä voi aiheuttaa suurta lisäheittoa laitteen kuivausaikoihin. Muovin kuivumisaika on pidempi kuivausilman suhteellisen kosteuden ollessa suurempi.

Mitä pienempi kosteuspitoisuus ja mitä suurempi ilmavirtaus kuivausilmaan saadaan, sitä suurempi on kuivausteho (ASTQ Supply House Oy 2020, 2). Adsorptiokuivaimen lisääminen parantaa siten kuivaustehoa. Ilman lämpötilan nostaminen voi parantaa laitteen kuivaustehoa. Laitteen etu panoskuivurimalliseen adsorptiokuivaimeen on muovin parempi ilmavuus ja täten parempi kuivuminen (Rintala 2020).



Kuva 18. Puhallinkuivaimen koelaite

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää sopivin muovinkuivaustapa Euroopan unionin rahoittamaan LAB-ammattikorkeakoulun, Muovipoli Oy:n ja Helsingin yliopiston yhteishankkeeseen Kiemuraan. Työn tavoitteina oli muovin kuivaamiseen vaikuttavien tietojen tutkiminen, niiden perusteella sopivimpien käytännön ratkaisujen etsiminen Kiemuraan sekä valmiiden LAB-ammattikorkeakoulussa rakennettujen koelaitteiden esittely.

Opinnäytetyössä paneuduttiin erityisesti adsorptio- ja kondensiokuivausmenetelmien tutkimiseen, jonka lisäksi työssä perehdyttiin lyhyesti myös muihin kuivausmenetelmiin sekä muihin kuivausprosesseissa huomioon otettaviin asioihin. Näitä olivat yleisesti kuivaukseen vaikuttavat tekijät, ilmankosteus, veden höyrystymisen teoria, erilaiset muovilaadut, muovien vedenimukyky sekä muovien sulamislämpötilat. Työssä pohdittiin myös tutkimustiedon perusteella käytännön ratkaisuja käytettäväksi Kiemura-hankkeessa sekä esiteltiin koululla rakennetut kuivaimen koelaitteet.

Muovin kuivauksessa Kiemurassa on kannattavaa yhdistää erilaisia kuivausmenetelmiä parhaan ja tehokkaimman lopputuloksen saamiseksi. Mekaanisella kuivauksella saadaan suurin osa vedestä poistettua tehokkaasti ja nopeasti, ja termisellä kuivauksella saadaan muovi kuivattua lopullisesti mahdollisimman kuivaksi. Erityisesti adsorptiokuivain kuivaa ilman erityisen kuivaksi riippumatta suuresti ympäristön olosuhteista. Muovin tulee olla jatkokäsittelyssä todella kuivaa laadukkaan lopputuloksen saamiseksi muovin kierrätyksen kokonaisprosessista. Pienetkin vesimäärät voivat aiheuttaa epätasaisuutta lopputuotteessa sekä ongelmia jatkokäsittelyprosessin aikana.

Termisessä kuivauksessa veden tehokkaaseen höyrystymiseen tarvitaan kolme osa-aluetta: mahdollisimman kuiva ilma, suuri ilmavirta sekä suuri lämpötila. Näitä on havainnollistettu kuvassa 19. Näiden osa-alueiden yhdistämisellä saadaan veden höyrystäminen suoritettua mahdollisimman tehokkaasti. Myös muut rajoitteet on kuitenkin otettava prosessissa huomioon kuten termisen menetelmän ilmankuivauskyky. Veden höyrystäminen mahdollisimman nopeasti ei auta prosessissa, jos kosteutta ei pystytä poistamaan kuivausilmasta samaan tahtiin.



Kuva 19. Veden höyrystymistä edesauttavat kolme tekijää (mukailtu ASTQ Supply House Oy 2020, 2)

Työhön asetetut tavoitteet saavutettiin.

Tutkimuksen tietoa on mahdollista hyödyntää myös muiden materiaalien kuin muovin kuivauksessa. Muun muassa veden höyrystymisen periaatteet pätevät myös muissa kuin muovin kuivauksessa ja työssä esiintyviä kuivausmenetelmiä voi käyttää myös muiden materiaalien kuivaukseen.

Jatkona työlle sopisi erilaisten käytännön mittausten tekeminen koelaitteistoilla. Muovien kuivausta voisi kokeilla eri muovilaaduilla, eri kosteuspitoisuuksilla, erilaisilla ympäristön olosuhteilla, sekä erilaisilla kuivausilman virtauksilla ja lämpötiloilla. Näin olisi mahdollista tutkia parasta menetelmää käytännön tasolla.

LÄHTEET

- Aaltonen, L. 2014. Teknisten muovien kierrätys. Tampereen teknillinen yliopisto [viitattu 15.3.2020]. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/22106/Aaltonen.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- ASTM International. 2020. Standard Test Method for Vicat Softening Temperature of Plastics [viitattu 25.2.2020]. Saatavissa: http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm_d1525.pdf
- ASTQ Supply House Oy. 2020. Kosteudenhallinnan käsikirja. Kuivauksen teoriaa ja käytäntöjä osa 2. Kuivauspuhaltimet [viitattu 4.2.2020]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/7745955-Kosteudenhallinnan-kasikirja-kuivauksen-teoriaa-ja-parhaita-kaytantoja-osa-2-kuivauspuhaltimet-ilmavirran-tarkeys.html>
- China plastic granulator. 2020. Ss304 316 centrifugal drying machine for PET and PE grinded [viitattu 15.3.2020]. Saatavissa: <http://www.china-plastic-granulator.com/peripheral/21614421.html>
- Corroventa. 2017. Adsorptiokuivain sisäänrakennetulla turbiinilla. CTR Kombi 100XT. Käyttöohje [viitattu 30.1.2020]. Saatavissa: https://www.corroventa.fi/app/uploads/2017/11/CTR-K100XT_K%C3%A4ytt%C3%B6hje_201710_FI.pdf
- Ellman, A., Hautanen, J., Järvinen, K. & Simpura, A. 2002. Pneumatiikka. Helsinki: Edita Prima Oy.
- Evans, P. 2017. Chiller Cooling Capacity – How to calculate. The Engineering Mindset [viitattu 19.3.2020]. Saatavissa: <https://theengineeringmindset.com/chiller-cooling-capacity-calculate/>
- Haikarainen, I. 2015. Hiilidioksidin käsittely P2G prosessia varten. Lappeenrannan teknillinen yliopisto [viitattu 30.1.2020]. Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/104437/Hiilidioksidin%20k%C3%A4sittely%20P2G-prosessissa_kandity%C3%B6_haikarainen.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Inkinen, P. & Tuohi, J. 1999. Momentti 1. Insinöörifysiikka. 2. painos. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy.
- Järvinen, P. 2008. Uusi muovitieto. Porvoo: WS Bookwell Oy.
- Kurri, V., Malén, T., Sandell, R. & Virtanen, M. 2008. Muovitekniikan perusteet. 4. tarkistettu painos. Helsinki : Opetushallitus 2008.

LAB University of Applied Sciences. 2020a. Kiemura: Mikro- ja kierrätysmuovien kiertotalousratkaisut [viitattu 2.3.2020]. Saatavissa: <https://www.lamk.fi/fi/kiemura>

LAB University of Applied Sciences. 2020b. LAB-ammattikorkeakoulu [viitattu 2.3.2020]. Saatavissa: <https://lab.fi/fi/info>

LAB University of Applied Sciences. 2020c. Tietoa meistä [viitattu 2.3.2020]. Saatavissa: <https://lab.fi/fi/info/tietoa-meista>

LAB University of Applied Sciences. 2020d. Lahden kampus [viitattu 2.3.2020]. Saatavissa: <https://lab.fi/fi/info/kampukset/lahden-kampus>

Lahden ammattikorkeakoulu. 2019. Kiemura, Mikro- ja kierrätysmuovien kiertotalouden ratkaisut [viitattu 2.3.2020]. Saatavissa: https://www.lamk.fi/sites/default/files/2019-08/Kiemura_esite_2019_1.pdf

Lehto, H., Havukainen, R., Leskinen, J. & Luoma, T. 2005. Fysiikka 2-3, lämpö, aallot. 1. – 5. painos. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi.

Material Harvest Ltd. 2020. Silica Gel Desiccants [viitattu 30.1.2020]. Saatavissa: http://www.materialharvest.com/welcome/silica_products/desiccants.html

MatWeb. 2020a. Search Results: Polypropylene [viitattu 24.2.2020]. Saatavissa: <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=polypropylene>

MatWeb. 2020b. Search Results: Polyethylene [viitattu 24.2.2020]. Saatavissa: <http://www.matweb.com/search/QuickText.aspx?SearchText=polyethylene>

Mustonen, S. (toim.). 1986. Sovellettu hydrologia. Mänttä: Mäntän Kirjapaino Oy.

Omnexus. 2020. Density of Plastics. Technical Properties [viitatti 2.3.2020]. Saatavissa: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/density>

Rintala, N. 2020. LAB-ammattikorkeakoulu. Haastattelu 3.4.2020.

Sandberg, E. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka osa 2. Tammerprint.

Seppälä, A. & Lampinen, M. 2004. Aineensiirto-oppi. Helsinki: Hakapaino Oy.

Seppänen, R., Kervinen, M., Parkkila, I., Karkela, L. & Meriläinen, P. 2009. Maol taulukot. 2.-7. painos. Kustannusosakeyhtiö Otava.

Sisäilmayhdistys ry. 2020. Ilman ominaisuudet [viitattu 18.2.2020]. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekninen-toiminta/Ilman-ominaisuudet>

Trotec Oy. 2020a. Adsorptiokuivain [viitattu 30.1.2020]. Saatavissa: <https://fi.trotec.com/tuotteet-ja-palvelut/koneet-homecomfort/ilmankuivaus/kaeytaennoen-tietoa-ilmankuivaimista/ilmankuivausmenetelmaet-yhdellae-silmaeyksellae/adsorptiokuivain/>

Trotec Oy. 2020b. Kompressiotekniikalla varustettu kondenssikuivain [viitattu 31.1.2020]. Saatavissa: <https://fi.trotec.com/tuotteet-ja-palvelut/koneet-homecomfort/ilmankuivaus/kaeytaennoen-tietoa-ilmankuivaimista/ilmankuivausmenetelmaet-yhdellae-silmaeyksellae/kompressoriteknikaalla-varustettu-kondenssikuivain/>

Trotec Oy. 2020c. Ilmankuivausmenetelmät [viitattu 31.1.2020]. Saatavissa: <https://fi.trotec.com/tuotteet-ja-palvelut/koneet-homecomfort/ilmankuivaus/kaeytaennoen-tietoa-ilmankuivaimista/ilmankuivausmenetelmaet-yhdellae-silmaeyksellae/>

Valtanen, E. 1986. Tekniikan taulukkokirja. 21. painos 2016. Genesis-Kirjat Oy.

Willman, J. 2015. Kosteudenhallinnan menetelmät. Metropolia ammattikorkeakoulu [viitattu 30.1.2020]. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97960/kosteude.pdf?sequence=1>

LIITTEET

Liite 1 Polypropeenin sulamis- ja pehmenemislämpötilat (mukailtu MatWeb 2020a)

Muovi	Sulamispiste °C	Vicat pehmenemislämpötila °C
PP, Molded	61.0 - 220	35.0 - 160
PP, Extrusion Grade	130 - 174	60.0 - 159
PP, Impact Modified; molded/Extruded	120 - 170	50.0 - 155
PP, Blow Molding Grade	143 - 165	67.0 - 156
PP, Film Grade	119 - 170	67.0 - 159
PP, Flame Retardant	130 - 170	70.0 - 189
PP, 10 % Glass Fiber Filler	136 - 170	105 - 156
PP, 20 % Glass Fiber Filler	130 - 193	75.0 - 205
PP, 30 % Glass Fiber Filler	145 - 193	96.0 - 166
PP, 40 % Glass Fiber Filler	160 - 182	90.0 - 189
PP, Long Glass Fiber 50 %	160 - 167	140 - 163
PP, 60 % Glass Fiber Filler	160 - 170	
PP, Glass Bead Filled	150 - 170	94.0 - 156
PP, Glass Reinforced, Impact Modified	145 - 168	95.0 - 165
PP, Carbon Fiber Filled	165	80.0 - 100
PP, Carbon Black Filler		80.0 - 156
PP, Mineral Reinforced	160 - 168	36.0 - 161
PP, Glass/Mineral Reinforced	162 - 182	55.0 - 160
PP, Mineral Reinforced, Impact Modified		100 - 140
PP, Sheet/Thermoforming Grade	147 - 165	78.0 - 159
PP, Fiber Grade	146 - 165	78.0 - 155
PP, Copolymer	128 - 171	49.0 - 189
PP, 10 % Talc Filler	135 - 165	50.0 - 155
PP, 20 % Talc Filler	135 - 193	45.0 - 160
PP, 30 % Talc Filler	150 - 182	50.0 - 192
PP, 40 % Talc Filler	150 - 182	54.0 - 165
PP, 20 % Mica Filler		36.0 - 150
PP, 10 % Calcium Carbonate (CaCO ₃) Filler		87.0 - 148
PP, 20 % Calcium Carbonate (CaCO ₃) Filler	160 - 182	70.0 - 150
PP, 30 % Calcium Carbonate (CaCO ₃) Filler	160 - 182	94.0 - 152
PP, 40 % Calcium Carbonate (CaCO ₃) Filler	150 - 182	76.0 - 154

Liite 2 Polyeteenin sulamis- ja pehmenemislämpötilat (mukailtu MatWeb 2020b)

Muovi	Sulamisaste °C	Vicat pehmenemislämpötila °C
PET Polyester Blend	220 - 280	90.0 - 220
PET + PBT Unreinforced	255	
PBT + PET Blend, Glass Filled	220 - 260	150 - 225
PET, Unreinforced	200 - 260	74.0 - 85.0
PET, Glass Fiber Filled, Flame Retardant	245 - 255	195 - 240
PET, 20 % Glass Reinforced	225 - 260	205 - 255
PET, 30 % Glass Reinforced	232 - 260	225 - 260
PET, 40 % Glass Reinforced	247 - 255	
PET, 50 % Glass Reinforced	244 - 255	
PET, Glass/Mineral Reinforced	232 - 268	79.0 - 242
LDPE, Molded	95.0 - 115	52.0 - 117
LDPE, Extrusion Grade	102- 113	84.0 - 128
LDPE, Film Grade	97.8 - 121	77.2 - 109
LDPE, Blow Molding Grade	108 - 121	85.0 - 111
LDPE, Sheet/Profile extrusions		90.0 - 107
VLDPE	110 - 122	38.0 - 95.0
LDPE, Wire/Cable Grade	104 - 200	87.8 - 93.9
LLDPE, Injection Molded	75.0 - 128	41.1 - 130
LLDPE, Extrusion Grade	119 - 124	62.0 - 120
LLDPE, Film Grade	110 - 130	65.0 - 123
LLDPE, Blow Molding Grade	108 - 127	
LLDPE, Rotational Molding Grade	104 - 128	91.0 - 117
LLDPE, Compounding Resin	112 - 124	88.0 - 94.0
MDPE, Molded	117 - 131	62.0 - 124
MDPE, Extruded	126 - 128	114 - 127
MDPE, Rotational Molded	123 - 129	108 - 122
MDPE, Film Grade	116 - 131	116 - 124
LMDPE, Film	124 - 128	111 - 123
LMDPE, Rotational Molded	125 - 128	113 - 121
HDPE, Injection Molded	118 - 137	64.0 - 194
HDPE, Extruded	101 - 135	70.0 - 133
HDPE, Impact Grade		75.0 - 129
HDPE, Rotational Molding Grade	126 - 133	
HDPE, Crosslinkable		124 - 127
HDPE, Pipe Grade	53.9 - 138	67.0 - 132
HDPE, Blow Molding Grade	126 - 139	62.0 - 131
HDPE, Film Grade	72.0 - 216	41.0 - 133
HDPE, Ultra High Molecular Weight	127 - 255	67.0 - 136
HDPE, Glass Fiber Filled		80.0 - 92.0
HDPE, Sheet/Thermoforming Grade		74.0 - 134
HDPE, Carbon Black Filled		115 - 129
HDPE, Copolymer Film Grade		119 - 129

Liite 3 Polyamidien ja muiden muovien sulamis- ja pehmenemislämpötilat (mukailtu Järvi-
nen 2008, 50, 60, 67, 72, 79, 83, 85, 89, 93, 96, 117)

Muovi	Kauppanimi	Sulalämpötila °C	Vicat pehmenemislämpötila °C
PA 6	Durethan B30S	260	200 (Vicat B, 50 N)
PA 6 + GF	Kopa KN 133G30	250 - 280	
PA 66	Zytel 101F	290	238 (Vicat B, 50 N)
PA 66 + palosuoja	Ultramid A3XG5	280 - 300	
PA 66-HI	Zytel ST 801A	280	
PAA + GF	IXEF 1028	280	230 (Vicat B, 50 N)
PA 12-kopolymeeri	Grilamid TR55	280	
PA 12 + GF	Grilamid LV-5H	260	
PPA + PA 66 + LGF	Grivory FE 8327	290 - 330	
ALCOM PA 66	910 CF10	285 - 310	> 200 (Vicat B, 50 N)
PPA + GF	Zytel HTNFR52G30NH	320 - 330	
PVC, Putkilaatu			84
PS	Styron 678E		86 (Vicat B, 50 N)
PS-HI	Empera 542N		92 (Vicat B, 50 N)
PPO-seos	Noryl 110	280-300	115 (Vicat B, 50 N)
SPS	Xarec S 931	290	
SAN	Luran 368R	220 - 270	106 (Vicat B, 50 N)
ABS	Cycolac GPM5500	220 - 250	98 (Vicat B, 50 N)
ASA/SAN	Geloy CR7520	240-260	85 (Vicat B, 50 N)
PMMA	Plexiglas 8N	220 - 260	108 (Vicat B, 50 N)
PMMA-HI	Altuglas MI-4T	220 - 240	106 (Vicat B, 50 N)
PC	Lexan 123R	280 - 300	140 (Vicat B, 50 N)
PC + GF	Makrolon 9415	300	145 (Vicat B, 50 N)
PC + ABS	Cycloy C1200FH	260 - 290	132 (Vicat B, 50 N)
PC + ABS	Bayblend FR 90	240	88 (Vicat B, 50 N)
PC + PBT	Xenoy CL100	255-270	150 (Vicat B, 50 N)
POM-C	Kocetal K300	185 - 200	162 (Vicat B, 50 N)
POM-H	Deirin 111P	215	160 (Vicat B, 50 N)
PBT	Valox 325	250 - 270	220 (Vicat B, 50 N)
PBT + GF	Crastin SK605	250	213 (Vicat B, 50 N)
PES	Radel A-300	350 - 390	215 (Vicat B, 50 N)
PEI	Ultem 1000	370 - 410	215 (Vicat B, 50 N)
PAI	Torlon 4203L	305	
PPSU	Radel R5000	365 - 393	
LCP	Xydar G930	320 - 360	