



Eino Rantti

# Energialaitoksen polttoaineen kuivauksen esiselvitys

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

11.4.2024

# Tiivistelmä

Tekijä: Eino Rantti  
Otsikko: Energialaitoksen polttoaineen kuivauksen esiselvitys  
Sivumäärä: 21 sivua + 1 liite  
Aika: 11.4.2024

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Bio- ja kemiantekniikka  
Ammatillinen pääaine: Kemian prosessitekniikka  
Ohjaajat: Laitosinsinööri Pontus Ekberg  
Lehtori Timo Seuranen

---

Ferroplan Oy:lle tehdyn insinööriyön aiheena oli tuottaa esiselvitys polttoaineen kuivurin toteuttamisesta pienen kokoluokan energialaitoksen yhteyteen. Projektin taustalla oli tarve hyödyntää tarjolla olevaa korkean kosteuspitoisuuden polttoainetta. Yrityksen tavoitteena oli korvata yksi nykyisistä polttoaineen syöttöön käytetyistä kuljettimista polttoaineen kuivurilla, joka toimisi myös kuljettimena. Työssä perehdyttiin kuivauksen teoriaan, kuivausprosessien mitoittamiseen sekä suunnitteluun.

Kuivauksen sekä haihdutuksen teoreettisen tarkastelun perusteella projektin tuloksena saatiin laadittua Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmalla käytettävä laskentatyökalu kuivurin suunnittelijan avuksi. Työkalun avulla voidaan riittävästi esitiedoilla arvioida tarvittava polttoaineen viipymäaika kuivurissa halutun kuiva-ainepitoisuuden saavuttamiseksi. Lisäksi työkalulla voidaan määrittää kuivurin energian kulutus sekä poistoilmasta talteen otettavan lämpöenergian määrä. Viipymäajan perustella voidaan alustavasti arvioida kuivurin kokoa ja siten sen soveltuvuutta siirrettävän energialaitoksen yhteyteen.

Työssä onnistuttiin luomaan työkalu, jonka avulla voidaan riittävästi tarkkuudella arvioida suunniteltavan kuivurin kokoa ja tehokkuutta. Työkalun jatkokehitys on mahdollista toimeksiantajan omien tarpeiden mukaisesti. Työkaluun voidaan sisällyttää esimerkiksi aineominaisuuksien laskentamalleja, joiden avulla lasketaan aineominaisuuksien muutokset, kun kuivausparametreja muutetaan.

Avainsanat: kuivausprosessi, mitoitus, haihdutus

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Eino Rantti  
Title: Preliminary Study of Fuel Drying in an Energy Plant  
Number of Pages: 21 pages + 1 appendix  
Date: 11 April 2024

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Biotechnology and Chemical Engineering  
Professional Major: Chemical Process Technology  
Supervisors: Pontus Ekberg, Plant engineer  
Timo Seuranen, Senior Lecturer

---

This engineering thesis conducted for Ferroplan Oy aimed at conducting a preliminary study on the implementation of a fuel dryer for a small-scale power plant. The project was motivated by the requirement for available high-moisture fuels. The company's goal was to replace one of the currently used fuel feeders with fuel dryer that would also act as a conveyor.

The thesis examines the theory of drying, the dimensioning of drying processes, and their design. On the basis of the theoretical examination of drying and evaporation, the project resulted in a calculation tool implemented in Microsoft Excel to assist the dryer designer.

With sufficient prior information, the tool can estimate the required fuel residence time in the dryer to achieve the desired dry matter content. It can also determine the dryer's energy consumption and the amount of heat energy recovered from the exhaust air. On the basis of the residence time, the dryer size can be preliminarily estimated and, thus, also its suitability for a mobile power plant.

The project successfully created a tool that can be used to estimate the size and efficiency of a planned dryer with sufficient confidence. The tool can be further developed according to the client's specific needs. It can be enhanced by incorporating calculation models that would eliminate the requirement to check changes in material properties from tables when modifying drying parameters.

Keywords: drying process, design, evaporation

# Sisällys

1	Johdanto	1
2	Ferroplan	1
3	Kosteus	2
3.1	Kostean ilman termodynamiikka	2
3.2	Kosteuden määritelmät	4
3.3	Kosteus huokoisessa materiaalissa	5
3.4	Märkälämpötilan määrittäminen Mollier diagrammilla	6
4	Kuivaus	7
4.1	Kuivumisen vaiheet	7
4.2	Haihtuminen vapaalta nestepinnalta	9
4.3	Kuivurin energia- ja massatase	12
4.4	Kuivurityyppejä	15
4.4.1	Leijukerroskuivuri	15
4.4.2	Rumpu/rotaatiokuivuri	16
4.4.3	Kuljetintyyppiset kuivurit	17
4.4.4	Pneumaattinen kuivuri	17
5	Laskentatyökalu	18
5.1	Laskentatyökalun käyttö	19
5.2	Tulosten tarkastelu	20
6	Yhteenveto	20
	Lähteet	22
	Liitteet	
	Liite 1: Laskentatyökalun käyttönäkymä	

## 1 Johdanto

Ferroplanin voimalaitokseen on tähän asti ollut tarjolla polttoaineita, joita on voitu hyödyntää käsittelemättömänä. Nyt yritys on kiinnostunut mahdollisuudesta hyödyntää polttoainetta, jonka kosteuspitoisuus on niin korkea, että sen tehokas hyödyntäminen polttoaineena vaatii kuivausta. Kuivattavaa polttoainetta varten yritys on antanut toimeksiannon selvittää polttoainekuivurin sopivuutta liikutettavan energialaitoksen yhteyteen. Polttoaineen syöttöön käytetään tällä hetkellä kuljettimia, joista yksi korvattaisiin kyseisellä kuivaimella. Kuivurin pitäisi olla kooltaan tarpeeksi pieni, jotta se mahtuisi korvattavan kuljettimen paikalle sekä olisi helposti kuljetettavissa. Polttoaineen kuivaamisen keskeisimmät hyödyt ovat polttoaineen alemman lämpöarvon nousu, kattilan hyötysuhteen kasvu, polttoaineen laaduntasaus sekä voimalaitoksen energiatehokkuuden parantaminen [1, s. 13].

Tämän insinööriyön tavoitteena oli laatia laskentatyökalu Microsoft Excelliin kuivaimen riittävän tehon varmistamiseksi. Työssä perehdyttiin kuivauksen teoriaan, yleisimpiin kuivurityyppeihin sekä kuivurin tehoon vaikuttaviin tekijöihin.

## 2 Ferroplan

Ferroplan Oy on vuonna 1983 perustettu pääosin kuljetinratkaisuja suunnitteleva ja valmistava yritys. Ferroplan on laajentanut toimintaansa energiantuotantoon kehittämällä moduuleittain kontteihin rakennettavan yhdistetyn energiantuotantolaitoksen. Energialaitos nopeasti toimitettava nimellisteholtaan 1 MW:n laitos, joka pystyy hyödyntämään monia eri polttoaineita. Yrityksen toimipaikka on Orimattilassa, ja sillä on komponentteja valmistava yksikkö Latviassa [2].

### 3 Kosteus

Termi kostea kaasu viittaa kaasuseokseen, jossa osa komponenteista on prosessiolosuhteissa kaasumaisia, ts. kriittisen lämpötilansa yläpuolella. Nämä komponentit eivät lauhdu prosessiolosuhteissa vaan pysyvät kaasumaisina. Kosteus viittaa kaasuseoksen niihin komponentteihin, jotka voivat lauhtua. Kosteus on joskus pisaroina (sumuna), tai yleisemmin ovat vain osana kaasuseosta. Mikäli lauhtuvia komponentteja on vain yksi, systeemiä voidaan usein kuvata kahden komponentin seoksena, jossa toisena ”komponenttina” on lauhtumattomien komponenttien seos. Tyypillisin esimerkki on ilma-vesiseos, jossa prosessiolosuhteissa lauhtumaton ilma voidaan ajatella yhdeksi komponentiksi. Määritelmän mukaan kaasu on kosteaa, jos se sisältää höyrystynyttä komponenttia, oli se sitten vettä tai jotain muuta nesteytyvää komponenttia. Kosteuden määritelmä pätee myös kiinteään materiaaliin, jossa kosteus on nestemäisessä muodossa. [3, s. 2.]

#### 3.1 Kostean ilman termodynamiikka

Kostea ilma on kuivan ilman ja vesihöyryn muodostama seos. Käsitteellä kuiva ilma tarkoitetaan kaikkien ilmassa olevien vesihöyrystä poikkeavien kaasujen muodostamaa seosta. Ilman kosteudella  $x$  tarkoitetaan ilman sisältämän vesihöyryn suhdetta kuivailmamäärään. Ilman kosteus määritetään seuraavalla kaavalla

$$x = \frac{m_h}{m_{ki}} \quad (1)$$

jossa  $m_h$  on vesihöyryn massa [kg] ja  $m_{ki}$  on kuivan ilman massa [kg].

Kostean ilman kokonaispaine on kaavan 2 mukaisesti kuivan ilman osapaineen ja vesihöyryn osapaineen summa.

$$p_{tot} = p_{ki} + p_h \quad (2)$$

Matalassa paineessa voidaan olettaa kuivan ilman ja vesihöyryn seoksen käyttäytyvän ideaalikaasuna, jolloin ilman kosteus voidaan määrittää vesihöyryn osapaineen ja kokonaispaineen avulla käyttäen kaavaa 3. [4.]

$$x = \frac{M_{H_2O}}{M_{k.i}} \frac{p_h}{p_{tot} - p_h} \quad (3)$$

Mikäli väliaine on joku muu kuin kuiva ilma, esim. savukaasu, on yhtälössä (3) käytettävä vesihöyryn ja kyseisen väliaineen moolimassojen suhdetta.

Tietyn lämpöinen ilma voi sisältää tietyn maksimimäärän kosteutta. Mikäli ilman sisältämän vesihöyryn määrä ylittää tämän maksimimäärän, osa ilman sisältämästä vesihöyrystä tiivistyy pisaroiksi. Tätä maksimikosteusmäärää vastaavaa vesihöyryn osapainetta kutsutaan kylläisen höyryn paineeksi  $p_h'$ . Kylläisen höyryn paine riippuu voimakkaasti ilman lämpötilasta sekä pienessä määrin kuivan ilman osapaineesta [5, s. 8]. Käytännössä kuivan ilman osapaineen merkitys kylläisen höyryn paineeseen on pieni, eikä sitä tarvitse yleensä huomioida [4]. Kylläisen höyryn arvot löytyvät luotettavimmin höyrytaulukoista. Seuraavalla likiarvokaavalla 4 kylläisen höyryn paine voidaan kohtuullisella tarkkuudella arvioida eri lämpötiloissa:

$$p_h'(T) = p_0 \exp\left(\frac{11,78 (T-372,79)}{T-43,15}\right) \quad (4)$$

jossa  $p_0$  on  $10^5$  Pa ja lämpötila  $T$  on kelvin asteina. [4.]

Ilman kosteuden yhteydessä usein käytetty termi suhteellinen kosteus  $\varphi$  kuvastaa ilmassa olevan vesihöyryn määrää suhteessa siihen määrään, mitä kyseisessä lämpötilassa voi enimmillään olla. Suhteellinen kosteus määritetään vesihöyryn osapaineen ja kyseistä lämpötilaa vastaavan kylläisen höyrynpaineen suhteena kaavassa 5.

$$\varphi = \frac{p_h(T)}{p_h'(T)} \quad (5)$$

jossa  $p_h$  on vesihöyryn osapaine lämpötilassa  $T$  ja  $p_h'$  kyseistä lämpötilaa vastaavan kylläisen vesihöyryn paine. Suhteellista kosteutta kutsutaan myös suhteelliseksi höyrynpaineeksi. [4.]

### 3.2 Kosteuden määritelmät

Kostean materiaalin kokonaismassa  $M_{tot}$  koostuu kuiva-aineesta  $M_{k.a}$  ja vedestä  $M_v$ . Materiaalin kosteus voidaan ilmoittaa joko kokonaismassaa tai kuivamassaa kohti. Kun puhutaan materiaalin kosteudesta, tarkoitetaan yleensä kokonaismassaa kohti laskettua vesipitoisuutta. Kokonaismassaa kohti laskettu vesipitoisuus lasketaan kaavalla 6.

$$w = \frac{M_v}{M_v + M_{k.a}} \quad (6)$$

Kuivamassaa kohti lasketusta vesipitoisuudesta käytetään yleensä termiä kosteussuhde, joka voidaan määrittää kaavalla 7

$$u = \frac{M_v}{M_{k.a}} \quad (7)$$

Yleisesti ottaen on havaittavissa, että termeillä "kosteus" ja "kosteussuhde" ei ole vahvasti vakiintuneita määritelmiä, ja usein kosteussuhteen yhteydessä käytetään myös pelkkää termiä "kosteus". On suositeltavaa selventää, onko kosteuden arvo ilmoitettu kokonais- vai kuivamassaa kohti, mikä auttaa välttämään mahdollisia sekaannuksia. [4.]

Kosteuden ja kosteussuhteen määritelmien avulla voidaan helposti johtaa toistensa riippuvuudet kaavoilla 8 ja 9.

$$w = \frac{u}{1+u} \quad (8)$$

$$u = \frac{w}{1-w} \quad (9)$$



### 3.3 Kosteus huokoisessa materiaalissa

Kosteus ilmenee huokoisessa materiaalissa kahdessa päämuodossa, jota ovat vapaa ja sidottu vesi. Lisäksi huokoisessa materiaalissa voi esiintyä jonkin verran vesihöyryä. Sidotuksi vedeksi nimitetään vettä, joka on kerrostunut soluseinämien päälle kemiallisten pintavoimien seurauksena. Tässä yhteydessä kemialliset pintavoimat viittaavat vetysidoksiin, joita vesimolekyylit muodostavat materiaalin soluseinämien kanssa. [5, s. 17.]

Lisäksi vesimolekyylit muodostavat keskenään heikompia vetysidoksia verrattuna seinämän kanssa muodostuneisiin vetysidoksiin. Tämän seurauksena soluseinämien pinnoille muodostuu muutaman kerroksen paksuisia vesimolekyylikerroksia, joissa vesimolekyylit ovat sidoksissa toisiinsa. Termiä "sitoutunut vesi" käytetään myös kuvaamaan vesimolekyylejä, jotka ovat erityisen ohuissa huokosissa, joissa vesimolekyylit eivät pääse liikkumaan kuten suuremmissa huokosissa oleva vapaa vesi. [5, s. 17.]

Kuivauksen kannalta sidotun veden ominaisuudet eroavat merkittävästi vapaan veden ominaisuuksista. Keskeiset erot voidaan tiivistää seuraavasti:

- Sitoutuneen veden höyrystämiseen tarvittava lämpömäärä on suurempi verrattuna samassa lämpötilassa olevan vapaan veden höyrystyslämpöön (esimerkiksi noin 2.43 MJ/kg lämpötilassa 25 °C).
- Sitoutuneen veden höyrinpaine on alhaisempi kuin samassa lämpötilassa olevan vapaan veden höyrinpaine, ja se riippuu lämpötilan lisäksi myös materiaalin kosteudesta. Höyrinpaine on siis funktio lämpötilasta ja kosteudesta, eli  $p_h' = f(u, T)$ .

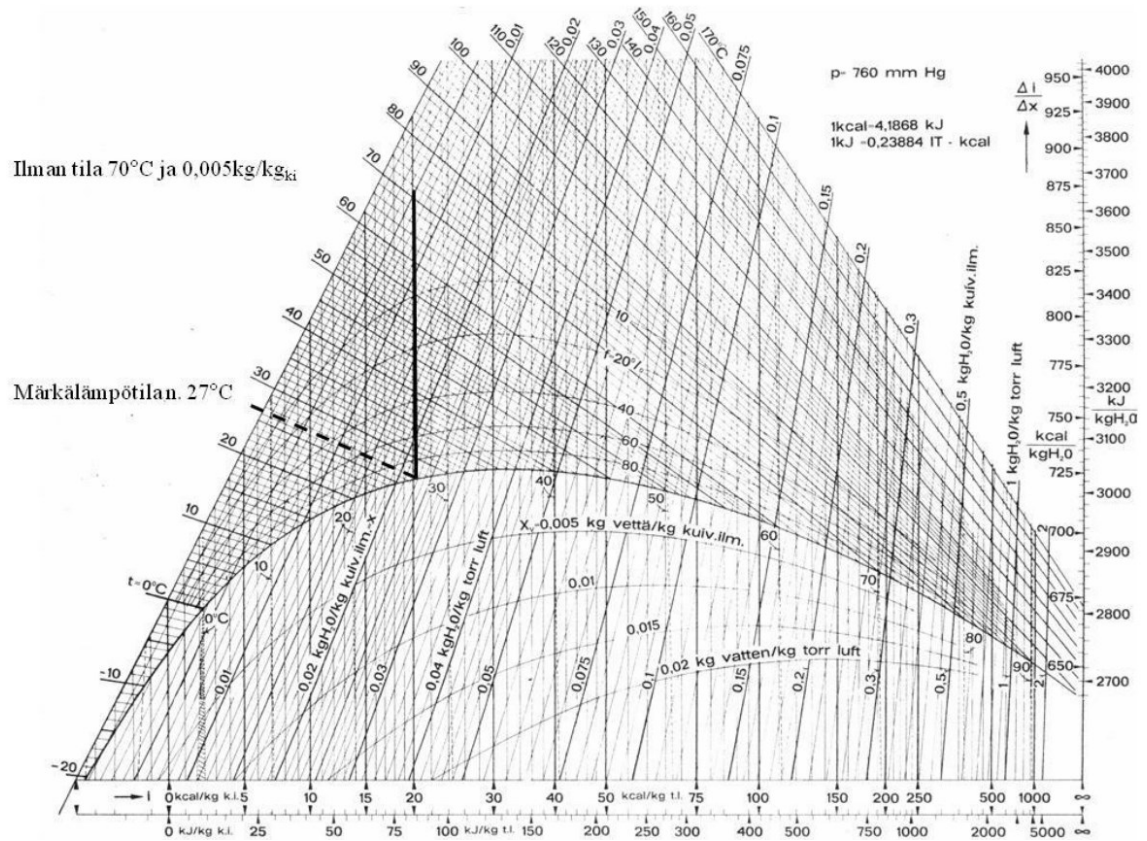
Sitoutuneen ja vapaan veden höyrystyslämpöjen välistä eroa kutsutaan sorptiolämmöksi, ja se vastaa vetysidosten muodostumisessa vapautuvaa

lämpö määrää. Sorptiolämmön suuruus riippuu huokoisesta materiaalista, kosteussuhteesta ja lämpötilasta. [5, s. 18.]

Materiaalin saavuttaessa riittävän korkean kosteussuhteen alkaa soluonteloiden välissä esiintymään myös vapaata vettä. Kosteussuhteen rajaa, jossa vapaata vettä alkaa esiintymään, on yleensä vaikea määrittää tarkasti. Tyypillisesti monet huokoisen materiaalin ominaisuudet, kuten lujuusominaisuudet ja sähkönjohtavuus, muuttuvat merkittävästi, kun materiaalissa ilmenee sidotun veden lisäksi myös vapaata vettä. Vapaan veden ominaisuudet huokoisessa materiaalissa ovat vastaavat kuin ns. ”normaalin” veden, eli veden höyrynpaine ja höyrystymislämpö ovat vain lämpötilan funktioita, ja niille voidaan käyttää veden höyrynpainetaulukoiden arvoja. [5, s. 18–19.]

### 3.4 Märkälämpötilan määrittäminen Mollier diagrammilla

Märkälämpötila tarkoittaa lämpötilaa, johon kostea pinta asettuu tasapainotilassa, kun tietyssä lämpötilassa ja kosteudessa oleva ilma virtaa sen ohi, ja kaikki haihtumiseen tarvittava lämpömäärä on siirtynyt ilmavirrasta konvektiivisesti materiaaliin. Eli kuivauksen yhteydessä märkälämpötila kertoo mihin lämpötilaan kuivattava materiaali nousee kuivauksen aikana. Kun haihtuminen tapahtuu ilmanpaineessa, märkälämpötila voidaan arvioida Mollier-diagrammin avulla. Tiettyä ilman lämpötilaa ja kosteutta vastaava märkälämpötila voidaan lukea kuvassa 1 esitetyllä tavalla Mollier-diagrammista ilman tilaa vastaavaan vakioentalpiasuoran sekä kyllästyskäyrän leikkauspisteen isotermistä. [5, s. 12.]



Kuva 1. Ilman märkälämpötilan määrittäminen [5, s. 12].

## 4 Kuivaus

### 4.1 Kuivumisen vaiheet

Kuivauksen laskennallisissa malleissa on yleensä tarpeen määrittää haihtumisnopeus ja kuivumisaika lähtökosteudesta haluttuun loppukosteuteen. Yleisimmin kuivaussovelluksissa lämmönsiirto kuivattavaan materiaaliin toteutetaan konvektiona, jota kutsutaan suora kuivaukseksi. Epäsuorissa kuivausratkaisuissa lämmönsiirto kuivattavaan materiaaliin perustuu konduktioon, jossa lämmönsiirtyminen materiaaliin tapahtuu lämpöä hyvin johtavan seinämän läpi. Joissain epäsuorissa kuivuriratkaisuissa lämmönsiirron päämekanismi voi myös olla säteily (esim. infrapunakuivaus. [5, s. 56.]

Yksittäisen partikkelin tai materiaalin kuivumisnopeuteen ja kuivumisaikaan vaikuttavat olennaisesti seuraavat tekijät.

Kuivattavan materiaalin ominaisuudet:

- koko (paksuus, halkaisija)
- muoto
- alkukosteus
- tavoiteltu loppukosteus
- alkulämpötila
- fysikaaliset ominaisuudet (tiheys, lämmönjohtavuus, tehollinen diffuusiokerroin, ja permeabiliteetti).

Kuivauskaasun ominaisuudet:

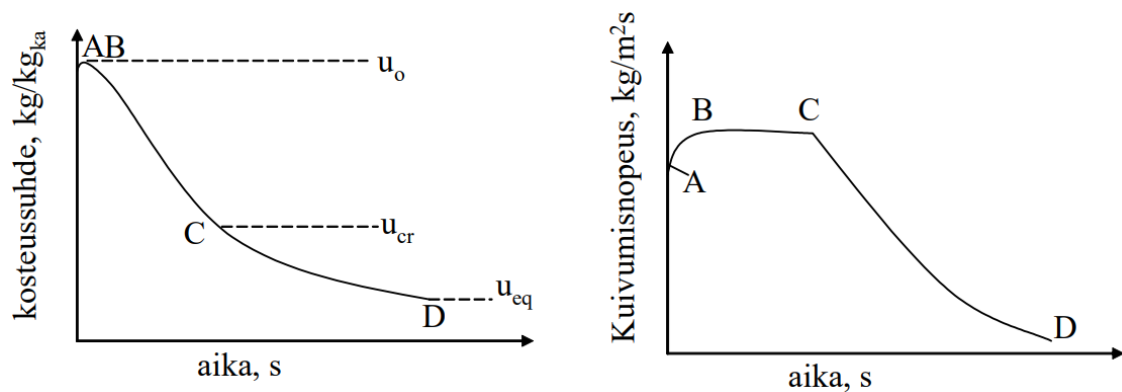
- lämpötila
- nopeus
- kosteus.

Materiaalin kuivuminen jaetaan yleisesti kolmeen vaiheeseen, jotka ovat

1. alkulämpenemisen vaihe
2. vakiokuivumisvaihe
3. hidastuvan kuivumisen vaihe

Alkulämpenemisen vaihe on yleensä todella lyhyt verrattuna koko kuivumisaikaan, joten se jätetään usein huomioimatta kuivauslaskelmissa. Tämän vaiheen aikana kuivattavan partikkelin lämpötila nousee kuivausympäristön olosuhteita vastaavaan märkälämpötilaan. Partikkelin saavutettua märkälämpötilan alkaa vakiokuivumisvaihe. Vakiokuivumisen aikana partikkelin kosteus- ja lämpötilajakauman oletetaan olevan tasaiset, ja vesi haihtuu tällöin ainoastaan partikkelin pinnalta. Vakiokuivumisvaiheen aikana kosteuden siirtymistä partikkelista kuivauskaasuun vastustaa ainoastaan rajakerros, joka huomioidaan laskennallisesti lämmön-/aineensiirtokertoimen avulla. Vakiokuivumisen vaiheen haihtumisnopeutta käsitellään seuraavassa luvussa 4.2. Materiaalin kosteuden laskettua riittävän alhaiseksi, sen

pintalämpötila ei enää pysy vakiona vaan alkaa nousta. Tätä vaihetta kutsutaan hidastuvan kuivumisen vaiheeksi. Kirjallisuudessa käytetään termiä "kriittinen kosteussuhde" kuvaamaan sitä kosteussuhdetta, jossa hidastuva kuivuminen alkaa. Kriittinen kosteussuhde riippuu muun muassa materiaaliominaisuuksista, materiaalin paksuudesta ja haihtumisnopeudesta. Hidastuvan kuivumisen aikana rajakerroksen aineensiirtovastuksen lisäksi myös materiaalin sisäiset ominaisuudet alkavat vastustaa kosteuden siirtymistä, jonka takia materiaalin kuivumisnopeus hidastuu verrattuna vakiokuivumisvaiheeseen. Kun materiaalin höyrynpaine on laskenut ympäristön kanssa samaan ilmanpaineeseen, kuivuminen loppuu ja materiaali on saavuttanut tasapainokosteuden. Kuivumisen kolme vaihetta on havainnollistettuna kuvassa 2. [5, s. 56–57.]



Kuva 2. Kuivumisen kolme vaihetta: A->B alkulämpenemisen vaihe, B->C vakiokuivumisvaihe, C->D hidastuvan kuivumisen vaihe.  $u_o$  alkukosteus,  $u_{cr}$  kriittinen kosteuspitoisuus,  $u_{eq}$  tasapainokosteus [5, s. 60].

## 4.2 Haihtuminen vapaalta nestepinnalta

Kuivauslaskuissa on tärkeää määrittää, kuinka nopeasti vesihöyryn haihtumista tapahtuu kuivausolosuhteissa. Vesihöyryn haihtumisnopeus vapaalta nestepinnalta voidaan laskea yhtälöllä 10 [6, s. 104]:

$$m'' = M_{H_2O} \frac{p_o}{RT} k_c \ln \frac{p_o - p_h}{p_o - p_h'(t_p)} \quad (10)$$

$m''$  on haihtumisnopeus [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]

$M_{\text{H}_2\text{O}}$  veden moolimassa [ $\text{kg}/\text{mol}$ ]

$k_c$  aineensiirtokerroin [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$T$  rajakerroksen lämpötila [ $\text{K}$ ]

$t_p$  haihtuvan pinnan lämpötila [ $\text{K}$ ]

$p_h'$  haihtuvan pinnan lämpötilaa  $t_p$  vastaava kylläisen höyrynpaine [ $\text{Pa}$ ]

$p_h$  ympäristön höyrynpaine [ $\text{Pa}$ ]

$R$  kaasuvakio [ $8,314 \text{ J}/\text{molK}$ ]

$p_o$  kokonaispaine [ $\text{Pa}$ ].

Yhtälössä 10 käytettävä aineensiirtokerroin  $k_c$  on määritettävä rajakerroksen lämpötilassa. Rajakerroksen lämpötilana  $T$  käytetään yleensä haihtuvan pinnan lämpötilaa tai ympäristön ja haihtuvan pinnan lämpötilan keskiarvoa.

Yhtälön 10 aineensiirtokerroin on samankaltainen kerroin, kuin konvektiivisessa lämmönsiirrossa käytettävä lämmönsiirtokerroin. Käytännön laskuissa aineensiirtokertoimen määrittämiseen voidaan käyttää hyväksi ns. lämmön- ja aineensiirron analogiaa. Lämmön- ja aineensiirron analogia on perusteltavissa rajakerroksen energia, massa- ja liikemääräyhtälöiden ratkaisujen avulla. Analogian tarkemmat perustelut löytyvät Seppälän ja Lampisen teoksesta [6].

Lämmönsiirtokerroin määritetään yleensä tilanteeseen sopivasta Nusseltin luvun korrelaatiosta, joka kuvaa lämmönsiirtotapahtumaa riittäväällä tarkkuudella. Nusseltin luvun korrelaatio voidaan esittää yleisessä muodossa kaavalla 11.

$$Nu = ARe^m Pr^n \quad (11)$$

jossa dimensiottomat luvut ovat

$$\text{Nusseltin luku:} \quad Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad (12)$$

$$\text{Reynoldsin luku} \quad Re = \frac{vL}{\nu} \quad (13)$$

Prandtlin luku  $Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$  (14)

jossa  $\lambda$  on vesihöyryllä kyllästetyn ilman lämmönjohtavuus,  $\nu$  vesihöyryllä kyllästetyn ilman kinemaattinen viskositeetti,  $\mu$  vesihöyryllä kyllästetyn ilman dynaaminen viskositeetti ja  $c_p$  vesihöyryllä kyllästetyn ilman ominaislämpökapasiteetti. Edellä mainittujen suureiden arvot annetaan rajakerroksen olosuhteissa.  $L$  on karakteristinen mitta, jonka suhteen Nusseltin luku määritetään. Muodoltaan säännöllisille kappaleille karakteristinen mitta voi olla halkaisija, sivun pituus tai lävistäjä. Epäsäännöllisen muotoisille kappaleille käytetään yleensä ns. tehollista halkaisijaa, joka voidaan määrittää kaavalla 15.

$$d_{eff} = \frac{6V}{A} \quad (15)$$

missä  $V$  on partikkelin tilavuus ja  $A$  on haihdutuspinta-ala.

Lämmön- ja aineensiirron analogiatarkastelun keskeinen päätelmä on, että tietylle konvektiiviselle lämmönsiirtotapahtumalle vastaava aineensiirtokerroin voidaan määrittää käyttäen samaa Nusseltin luvun korrelaatiota kuin lämmönsiirtokerroin. Tämä edellyttää kuitenkin, että Nusseltin luku korvataan Sherwoodin luvulla ja Prandtlin luku Schmidtin luvulla päätyen kaavaan 16.

$$sh = ARe^m Sc^n \quad (16)$$

Kaavan Sherwoodin luku ja Schmidtin luku määritetään seuraavasti

Sherwoodin luku  $Sh = \frac{k_c L}{D_{AB}}$  (17)

Schmidtin luku  $Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$  (18)

missä  $\nu$  on vesihöyryllä kyllästetyn ilman kinemaattinen viskositeetti rajakerroksessa ja  $D_{AB}$  on diffuusiokerroin. Kun yhtälöitä 12–14 ja 16–18

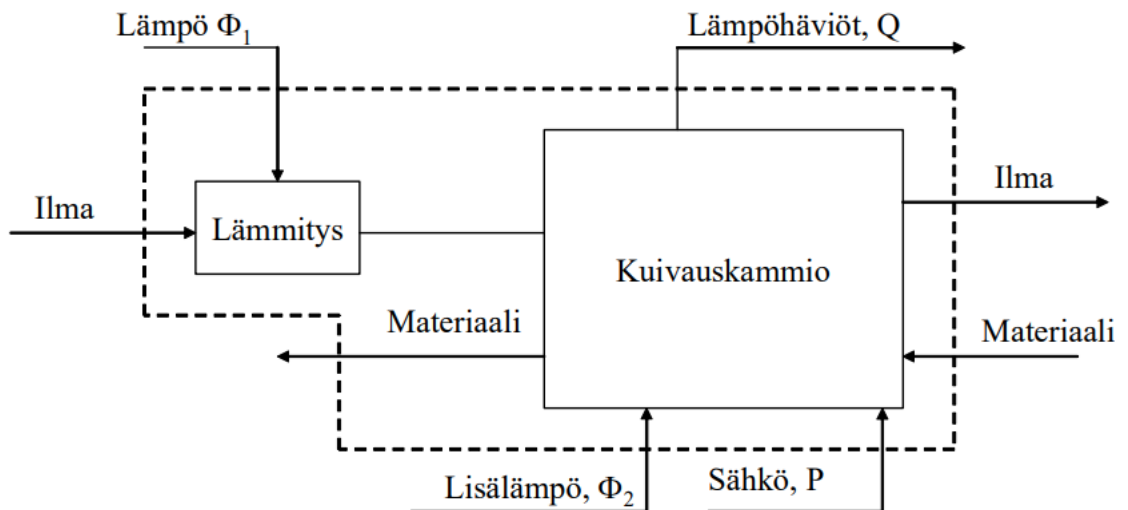
muokataan, saadaan aineen- ja lämmönsiirtokertoimen välille kaavan 19 mukainen riippuvuus.

$$k_c = \frac{\alpha}{\rho c_p} \frac{Pr}{Sc}^{1-n} \quad (19)$$

Termi  $\rho c_p$  on kuivan ilman ja vesihöyryn osatiheyksillä painotettu ominaislämpökapasiteetti eli  $\rho c_p = \rho_{ki}c_{pki} + \rho_{h}c_{ph}$ . On huomioitavaa, että kaava 19 antaa aineensiirtokertoimen ns. tasamääräisen aineensiirron tapauksessa, jossa  $j_A = -j_B$ . [6, s. 101–102.]

### 4.3 Kuivurin energia- ja massatase

Alla olevassa kuvassa 3 on esitettyä kuivauskammion energia- ja ainevirrat, kun kuivauskaasuna käytetään ilmaa, jonka lämmitys on sisällytettyä energiataseeseen.



Kuva 3. Kuivurin energia- ja massatase, kun ilman lämmitys sisällytetään taseeseen [5, s. 104].

Kun kuivauskammioon tulevien virtojen etumerkkiä käsitellään positiivisena ja sieltä lähtevien negatiivisena, koko kuivauskammion energia- ja massatase



voidaan laskea yhtälöillä 20 ja 21.  
Massatase

$$\dot{m}_{ki}x_{in} + \dot{M}_{ka}u_{in} = \dot{m}_{ki}x_{out} + \dot{M}_{ka}u_{out} \quad (20)$$

Energiatase

$$\dot{m}_{ki}h_{in} + \dot{M}_{ka}i_{in} + P + \Phi = \dot{m}_{ki}h + \dot{M}_{ka}i_{out} + Q \quad (21)$$

jossa (h) tarkoittaa kuivauskaasuna toimivan ilman entalpiaa, joka voidaan laskea kaavalla 22 ja (i) kuivattavan materiaalin entalpiaa, joka määritetään kaavalla 23. Sähkönkulutuksella tarkoitetaan pääasiassa puhaltimen sähkönkulutusta (P), joka lasketaan kaavalla 24. [5, s. 102–103.]

$$h = c_{pki}t_i + x(c_{ph}t_i + 2501) \quad (22)$$

$$i = c_{pka}t_m + uc_{pv}t_m \quad (23)$$

$$P = \dot{V} \frac{\Delta p}{\eta_m \eta_s} \quad (24)$$

$c_{pki}$  on kuivan ilman ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg °C]

$c_{ph}$  on vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg °C]

$c_{pka}$  on kuiva-aineen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg °C]

$c_{pv}$  on veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg °C]

$t_i$  on ilman lämpötila [°C]

$t_m$  on materiaalin lämpötila [°C]

$V$  on kuivauskaasun tilavuusvirta puhaltimen kohdalla [m<sup>3</sup>/s]

$\Delta p$  on paine-ero puhaltimen/kuivaussysteemin yli [Pa]

$\eta_m$  on puhaltimen sähkömoottorin hyötysuhde

$\eta_s$  on puhaltimen isentrooppinen hyötysuhde

Energia- ja massataseet stationääritilanteille esitetään usein differentiaalimuodossa kuivauslohkolle, jonka pituus on dL. Käytännön

laskuissa taseet joudutaan yleensä muodostamaan äärelliselle pituudelle  $\Delta L$ .  $\Delta L$ -pituiselle kuivurille saadaan energia- ja massataseiksi:

$$\dot{m}_{ki}(x_1 - x_2) + \dot{M}_{ka}(u_1 - u_2) = 0 \quad (25)$$

$$\dot{m}_{ki}(h_1 - h_2) + \dot{M}_{ka}(i_1 - i_2) = 0 \quad (26)$$

$$\dot{M}_{ka}(u_2 - u_1) = -m'' a\Delta V \quad (27)$$

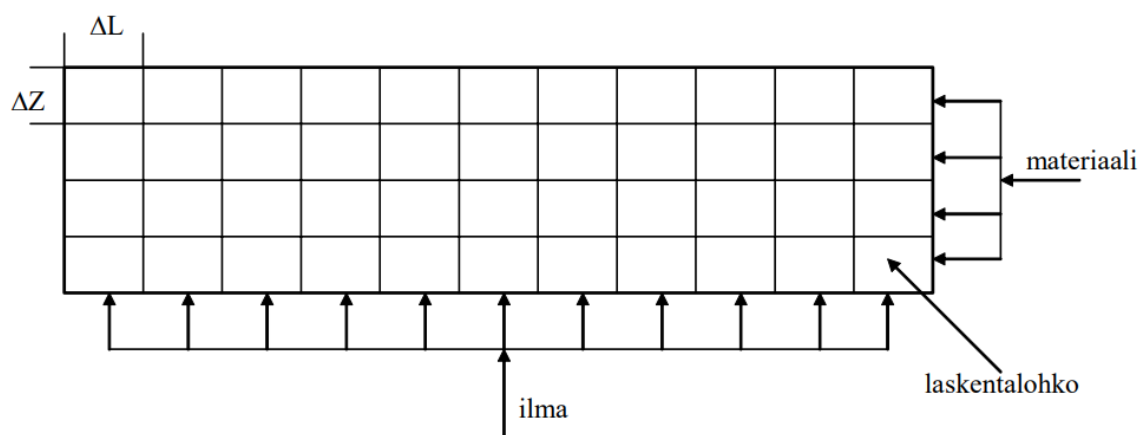
$$\dot{M}_{ka}(i_2 - i_1) = -m'' a\Delta V l_h + \alpha(t_i - t_m)a\Delta V \quad (28)$$

$$\Delta V = A_p \Delta L \quad (29)$$

jossa  $x$  on ilman kosteus [kg/kg<sub>ki</sub>],  $u$  materiaalin kosteus [kg/kg<sub>ka</sub>],  $m_{ki}$  ilman massavirta [kg<sub>ki</sub>/s],  $M_{ka}$  materiaalin massavirta [kg<sub>ka</sub>/s],  $h$  ilman entalpia [J/kg<sub>ki</sub>],  $i$  materiaalin entalpia [J/kg<sub>ka</sub>],  $m''$  haihtumisnopeus [kg/m<sup>2</sup> s],  $a$  elementin tilavuusyksikköä kohti laskettu haihdutuspinta-ala [m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>],  $\Delta V$  elementin tilavuus [m<sup>3</sup>],  $A_p$  elementin poikkipinta-ala [m<sup>2</sup>],  $\alpha$  lämmönsiirtokerroin [W/m<sup>2</sup>K],  $t_m$  materiaalin pintalämpötila [°C],  $t_i$  ilman lämpötila [°C] ja  $l_h$  on höyryn ominaisentalpia [J/kg<sub>höyry</sub>]. [5, s. 106.]

Yhtälöillä 25–28 voidaan ratkaista neljä tuntematonta suuretta, kun syötettäviä lähtötietoja on tarpeeksi monta. Esimerkiksi laskentatapaus, jossa tunnettuja arvoja ovat ilman ja materiaalin massavirrat, kosteudet sekä sisääntulolämpötilat, voidaan yhtälöiden 25–28 avulla ratkaista ilman ja materiaalin ulostulolämpötilat ja kosteudet. Kuivurin alustava mitoittaminen voidaan toteuttaa jakamalla kuivuri useisiin laskentalohkoihin, joihin jokaiseen sovitetaan yhtälöiden 25–28 energia- ja massataseet. Laskentalohkojen määrä riippuu laskentatapauksen kuivurityypistä. Yhtälöiden määrä kasvaa yleensä hyvin suureksi, koska jokaisen lohkon sisääntuloarvot on laskettava usein lohko kerrallaan. Myötävirtauskuivurissa lohkojen sisääntuloarvoina käytetään edellisen lohkon ulostuloarvoja. Ristivirtaustapauksessa kuivuri joudutaan jakamaan pituussuunnan  $\Delta L$  lisäksi myös korkeussuunnassa  $\Delta Z$ . Kuvassa 4 on

esitettyinä ristivirtauskuivurin mukainen laskentalohkojen muodostaminen. [5, s. 105–107.]



Kuva 4. Laskentalohkojen muodostaminen ristivirtakuivurille [5, s. 108]

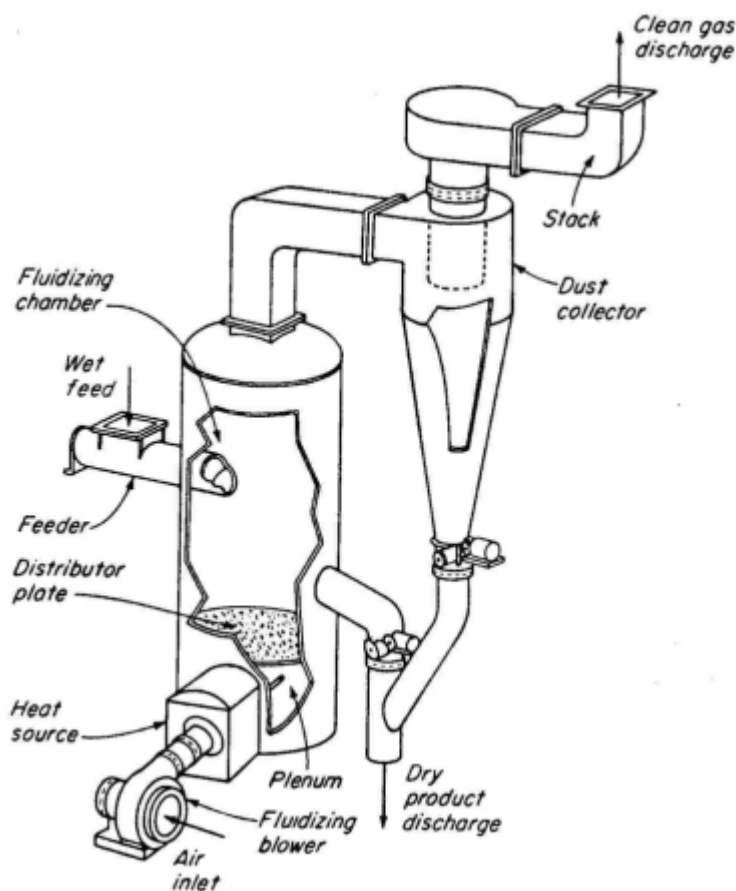
#### 4.4 Kuivurityyppejä

Teollisuudessa käytetään monenlaisia kuivureita, jotka on kehitetty erilaisten materiaalien kuvaamiseen. Kuivaimen valinnassa tärkeimmät lähtötiedot ovat kuivattavan materiaalin ominaisuudet sekä sen massavirta. Yleisimmin kuivureissa käytetään kuivauskaasuna ilmaa, ja lämmönsiirto toteutetaan konvektiolla (suora kuivaus), joten kuivureita kutsutaan yleensä vain sen perusteella, minkälainen kuivauskammio niissä on. [5, s. 126.]

##### 4.4.1 Leijukerroskuivuri

Leijukerroskuivuri perustuu partikkeleiden leijutukseen kuivauskammiossa, ja sen yksinkertainen rakenne pitää investointi- ja huoltokustannukset alhaisina. Leijutuksen hyvät lämmön- ja aineensiirron ominaisuudet mahdollistavat vähemmän tilaa vievän kuivauskammion. Leijutus sopii kuitenkin vain hyvin homogeenisten ja pienikokoisten, yleensä  $20\ \mu\text{m}$  –  $10\ \text{mm}$ :n partikkeleiden kuivaamiseen, joten se ei sovi materiaalivirroille, joiden partikkelikoko ja tiheys vaihtelevat. Jatkuvatoimisessa kuivurissa partikkeleiden viipymäajat vaihtelevat, minkä takia kuivurista poistuvien partikkeleiden kosteus vaihtelee. Tyypillinen

energiankulutus leijukuivureille on 4 000–6 000 kJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>. Kuvassa 5 on periaatekuva leijukerroskuivaimesta. [5, s.140–141.]



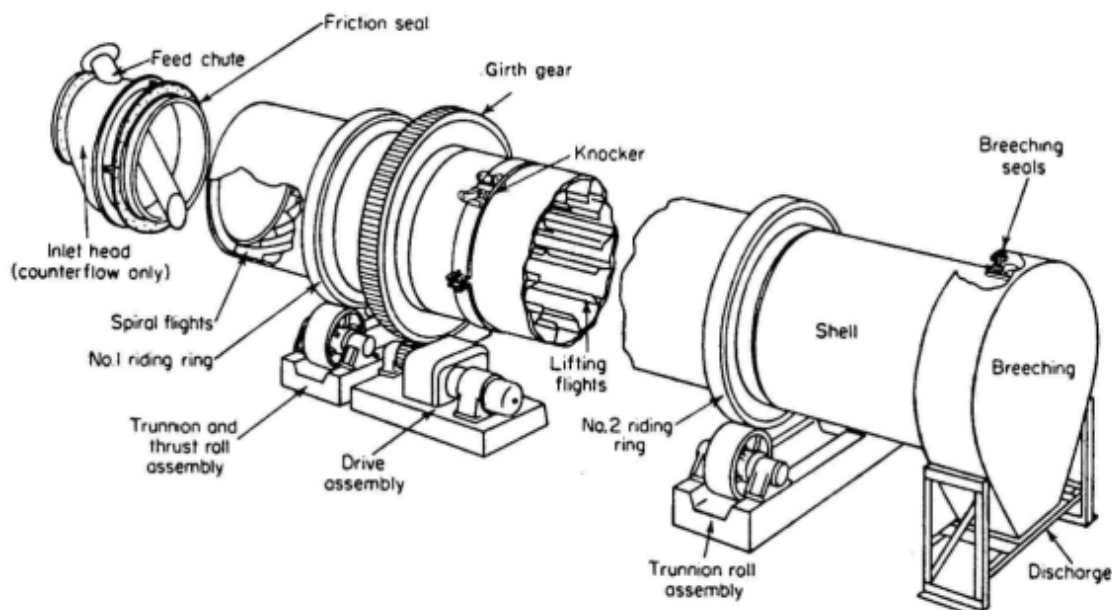
Kuva 5. Leijukerroskuivurin periaatekuva [7, s. 9].

#### 4.4.2 Rumpu/rotaatiokuivuri

Rumpukuivuri kuivuri perustuu pyörivään rumpuun, jonka seinämällä olevat listat nostavat kuivattavaa materiaalia rumpun pohjalta ylös, pudottaen sen jälleen kuivauskaasuvirtaan. Rumpukuivuri soveltuu materiaaleille, joilla on suuri palakokojakauma. Partikkeleiden viipymäaika kuivurissa on hyvin vakio, joten kuivurista poistuva materiaali on kosteudeltaan tasalaatuista.

Rumpukuivureiden heikkoutena on niiden huonot lämmön- ja aineensiirron ominaisuudet, minkä takia rumpukuivurit ovat usein todella suuria.

Rumpukuivureiden tyypillinen energiankulutus on 4 600–9 200 kJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>. [5, s. 142] Kuvassa 6 on esitettyä rumpukuivaimen leikkauskuva.



Kuva 6. Rumpukuivaimen leikkauskuva [7, s. 7].

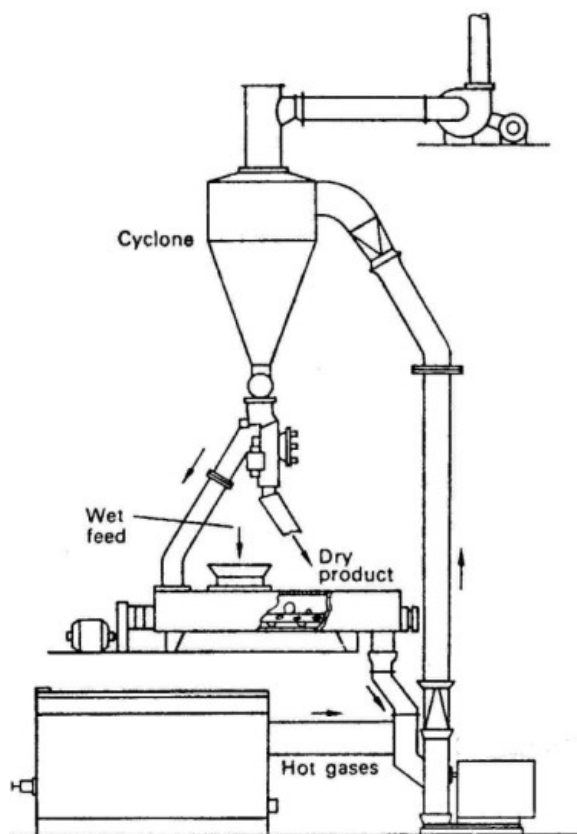
#### 4.4.3 Kuljetintyyppiset kuivurit

Kuljetintyyppisillä kuivureilla kuivaus toteutetaan usein levittämällä kuivattava materiaali tasaisesti kuljettimelle, jossa kuivauskaasu puhalletaan/imetään materiaalikerroksen läpi tai sen ylitse. Huonot lämmön- ja aineensiirron ominaisuudet vaativat pitkän viipymääjan. Lopputuotteen kosteuspitoisuus saadaan hyvin tasalaatuiseksi viipymääjan helpolla säätämisellä. Tyypillinen kuljetintyyppinen kuivuri soveltuu hyvin kuivausprosesseihin, joissa viipymäaika on pitkä, esimerkiksi matalalämpötilakuivaus. Kuljetintyyppisissä kuivureissa energiankulutus on tyypillisesti 4 000–6 000 kJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>. [5, s. 143–144.]

#### 4.4.4 Pneumaattinen kuivuri

Pneumaattisilla kuivureilla tarkoitetaan kuivurityyppiä, jossa kuivattava materiaali kulkee kuivausilman mukana. Kuivauskaasun minimivirtausnopeuden on oltava yli 2 m/s suurempi, kuin suurimpien partikkeleiden ns. terminaalinopeus, eli nopeus, jolloin partikkeli siirtyy suspensiona kuivauskaasun mukana. Pneumaattisilla kuivaimilla on hyvät lämmön- ja

aineensiirron ominaisuudet ja pienet viipymääjat, mutta toimii yleensä vain pienillä partikkeleilla. Korkea virtausnopeus voi aiheuttaa pintojen kulumista tietyillä materiaaleilla esimerkiksi biopolttoaineet ja niiden mahdollisesti mukana tulevat kivet. Kuivurin suuri painehäviö lisää sähkönkulutusta. Kuivurin tyypillinen energiankulutus 4500–11500 kJ/kg<sub>H<sub>2</sub>O</sub>. [5, s. 144–145.] Yksinkertainen pneumaattinen kuivuri esitettynä kuvassa 7.



Kuva 7. Yksinkertainen pneumaattinen kuivuri [7, s. 8].

## 5 Laskentatyökalu

Laadittava laskentatyökalu toteutettiin taulukkolaskentaohjelma Microsoft Excelissä. Laskentatyökalun laskuperiaatteena käytettiin luvussa 4.3 esitetyn lämmön- ja aineensiirron analogian avulla määritettävää haihtumisnopeutta. Haihtumisnopeuden avulla voidaan määrittää partikkelin kuivumiseen tarvittava viipymäaika kuivaimessa. Haihtumisnopeuden avulla määritetty viipymäaika ei vielä ole riittävän tarkka mitoitusperiaate kuivaimen mitoittamiseen, mutta sitä

voidaan käyttää arvioimaan muuttujien vaikutukseen kuivaimen tehokkuuteen. Kappaleessa 4.4 esitetyllä lohkolaskentaperiaatteella voidaan tietyissä tapauksissa käyttää kuivaimen alustavaan mitoittamiseen.

## 5.1 Laskentatyökalun käyttö

Laskentatyökaluun käyttäjän syötettäviä arvoja ovat kuivaimen mitat, kuivausilman aineominaisuudet sekä kuivattavan materiaalin ominaisuudet ja keskimääräisen partikkelin dimensiot. Käyttäjän on itse tarkistettava kuivausilman ja materiaalin ulostulolämpötilat Mollier-diagrammista sekä ilman aineominaisuudet taulukoista, Mollier-diagrammista määritetyssä märkälämpötilassa. Laskentatyökalu on esitettyinä liitteessä 1, jossa Mollier-diagrammista tarkistettavien arvojen solut ovat korostettuina keltaisella värillä ja taulukoista tarkistettavien aineominaisuuksien solut ovat korostettuina oranssilla värillä. Märkälämpötilan määrittämistä varten toiselle välilehdelle on liitetty Mollier diagrammi, johon on valmiiksi merkitty tarvittavat viivat, joita käyttäjä voi tarvittaessa siirtää. Jokaisella välilehdelle on koottu kyseisen välilehden käyttämiseen tarvittavat ohjeet. Tarvittavia ilman aineominaisuuksia varten kolmannelle välilehdelle on liitetty taulukot, joista löytyy kaikki työkalun tarvitsemat aineominaisuudet.

Työkalu määrittää automaattisesti kuivaukseen tarvittavan kuivausilman määrän käyttäjän syöttämien arvojen perusteella. Kuivausilman määrän ja diffuusiokertoimen avulla laskentatyökalu määrittää aineensiirtokertoimen, jota laskuri käyttää määrittääkseen veden haihtumisnopeuden kuivattavan partikkelin pinnalta sekä tarvittavan viipymäajan halutun kosteuspitoisuuden saavuttamiseksi.

Neljännellä välilehdellä on laskentatyökalu, joka laskee kuivurin energiankulutuksen sekä kuivurin poistoilmasta mahdollisesti talteen otettavan lämpöenergian määrän kuivausilman massavirran sekä Mollier- diagrammista määritettyjen entalpia-arvojen perusteella.

## 5.2 Tulosten tarkastelu

Laskentamallin luotettavuutta apuvälineenä arvioitiin vertaamalla laskentamallin avulla määritettyä viipymäaikaan lähteen [5] esimerkkilaskun viipymäaikaan, antamalla laskentatyökalulle vastaavat lähtötiedot. Vertailussa viipymäaikojen eroksi tuli vain noin 5 %, joten arvioinnin perusteella laskentatyökalu voidaan todeta luotettavaksi.

Työkalun luotettavuutta arvioitaessa tulee huomioida, että kuivaimen mitoitus on monimutkainen prosessi. Laskentamallissa käytetyt kaavat olivat löydettävissä useasta lähteestä, mikä lisää laskentamallin luotettavuutta. On myös tärkeä huomata, että muuttujien kohdalla matemaattisen mallintamisen ja todellisen tapahtuman arvot voivat poiketa toisistaan huomattavasti. Tämä johtuu siitä, että virtauksien ja aineensiirron arvioiminen pelkästään laskennallisesti on todella haastavaa sekä yksinkertaistettua, mikä voi johtaa virheisiin.

## 6 Yhteenveto

Insinööriyöllä pyrittiin selvittämään polttoainekuivurin sopivuutta liikutettavan energialaitoksen yhteyteen luomalla laskennallinen työkalu, jota voidaan käyttää avuksi kuivaimen mitoittamisessa. Työssä perehdyttiin kuivauksen teoriaan, mitoittamiseen sekä suunnitteluun. Hankittujen tietojen perusteella rakennettiin laskentatyökalu, jonka avulla voidaan arvioida, miten erilaiset parametrit vaikuttavat kuivaimen tehokkuuteen.

Työkalun avulla voidaan riittävällä tarkkuudella määrittämään tarvittava viipymäaika halutun kosteuspitoisuuden saavuttamiseksi. Tutkimuksen perusteella havaittiin, että kuivausilman lämpötilalla on merkittävä vaikutus kuivurin suorituskykyyn. Työkalua voidaan käyttää apuna sopivan kuivausilman määrän määrittämisessä. Työn aikana koettiin haasteita kuivattavan polttoaineen ominaisuuksien vaihtelevuuden kanssa, mikä vaikutti suunnitteluparametreihin ja tulosten tulkintaan. Työn perusteella voidaan päätellä, että asianmukaisesti suunniteltu polttoainekuivuri voidaan toteuttaa



osaksi liikutettavan energialaitosta, kun suunnittelussa huomioidaan muuttuvat kuivausparametrit sekä tehokas energian talteenotto. Tarkemman mitoitustyökalun laatimiseen olisi tarvinnut käyttää enemmän resursseja materiaalin kuivumiskäyrän tutkimiseen ja monipuolisempien testien suorittamiseen, jotta kuivumistapahtuman tarkempi arvioiminen olisi ollut mahdollista.

## Lähteet

- 1 Nummelin, Jaakko., Hankalin, Ville. & Raiko, Markku. 2014. Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen - Polttoaineen kuivaustekniikat. Motiva.  
<[https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/ylijaamalammon\\_taloudellinen\\_hyodyntaminen\\_polttoaineen\\_kuivaustekniikat.10766.shtml](https://www.motiva.fi/ajankohtaista/julkaisut/teollisuus/ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_polttoaineen_kuivaustekniikat.10766.shtml)>. Luettu 20.1.2024.
- 2 Yritys - Ferroplan Oy. Verkkoaineisto <<https://www.ferroplan.fi/fi/yritys/>> Luettu 16.3.2024
- 3 Kostean kaasun käsittely, 2013. Oppimateriaali. Aalto-yliopisto.
- 4 Lampinen, Markku J. 1996. Kemiallinen termodynamiikka energiatekniikassa, TKK, Sovellettu termodynamiikka, Raportti no. 90 Espoo.
- 5 Holmberg, Henrik. 2017. Kuivaus. Kuivatus- ja haihdutusprosessit teollisuudessa EEN-E3003. Luentomateriaali. Aalto yliopisto.
- 6 Seppälä, Ari & Lampinen, Markku. 2004. Aineensiirto-oppi. Helsinki: Otatieto.
- 7 Kuivaus, 2013. Oppimateriaali. Aalto-yliopisto.

## Liite 1 Laskentatyökalun käyttönäkymä

1			
2			
3	Kuivain		
4	leveys	0,7	m
5	pituus	4,00	m
6	pinta-ala	2,80	m <sup>2</sup>
7			
8	Materiaali		
9	tiheys (kuivana)	400	kg/m <sup>3</sup>
10	Alkukosteus	1,8	kg/kgka
11	loppukosteus	0,5	kg/kgka
12	kuiva-aine massavirta	0,1	kg/s
13	tilavuusvirta	0,00025	m <sup>3</sup> /s
14	veden haihtumisnopeus	0,13	kg/s
15			
16	Lämpötilat		
17	materiaali in	20	°C
18	ilma in	80	°C
19	materiaali out	28	°C
20	ilma out	28	°C
21			
22			
23			
24	Ilman tiedot		
25	x in	0,005	kg/kg <sub>ki</sub>
26	x out	0,025	kg/kg <sub>ki</sub>
27	tiheys1	1,2	kg/m <sup>3</sup>
28	tiheys2	1	kg/m <sup>3</sup>
29	veden osatiheys	0,2723	kg/m <sup>3</sup>
30	ilman osatiheys	1,129	kg/m <sup>3</sup>
31	yhteis tiheys	1,4013	kg/m <sup>3</sup>
32	Lämmönjohtavuus	0,02548	W/mK
33	kinemaattinen visko	1,584E-05	m <sup>2</sup> /s
34	dynaaminen visko	2,22E-05	Pas
35	cp	1050,9	J/kgK
36			
37			
38	Partikkelin dimensiot	(Arvio)	
39	Leveys	0,15	m
40	Korkeus	0,2	m
41	paksuus	0,005	m
42	Tilavuus	0,00015	m <sup>3</sup>
43	Pinta-ala	0,064	m <sup>2</sup>
44	d <sub>eff</sub>	0,0140625	

## Liite 1 Laskentatyökalun käyttönäkymä

45			
46			
47	Tarvittava ilman määrä		
48	m	6,5	kg/s
49		23400	kg/h
50	Tilavuusvirta alempi lämpötila	5,4166667	m3/s
51		19500	m3/h
52	Tilavuusvirta korkeampi lämpötila	6,5	m3/s
53		23400	m3/h
54	ilman virtausnopeus	2,3214286	m/s
55			
56			
57	Laskin		
58			
59	Re	2060,9274	
60	m	0,5	
61	n	0,3333333	
62	A	0,644	
63	Diffuusiokerroin	0,0000258	
64	Schmidt	0,6129186	
65	Sherwood	26,834275	
66			
67	kc	0,04932	m/s
68			
69	kosteus		
70	prosentit	21 %	
71	x	0,005	kg/kg <sub>ki</sub>
72	x erotus	0,0000	
73			
74	R	8,314	J / K mol
75	T	301,15	K
76	p <sub>o</sub>	100000	Pa
77	p <sub>h</sub>	797,56337	Pa
78	p <sub>ph</sub>	3796,8263	Pa
79	M <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	0,018	kg/mol
80			
81	m <sup>2</sup>	0,0010884	kg/m <sup>2</sup> s
82			
83	Haihtumisnopeus	6,966E-05	kg/s
84			
85	Viipymäaika	1866	s
86		31,1	min
87			