

Ylijäämälämmön hyödyntäminen  
Polttoaineen kuivaus  
Teollisuus  
Energiatehokkuus

Ylijäämälämmön taloudellinen  
hyödyntäminen

Polttoaineen kuivaustekniikat



# Ylijäämälämmön taloudellinen hyödyntäminen polttoaineen kuivatustekniikat

---

## **Polttoaineen kuivatustekniikat**

**Jaakko Nummelin**

**Ville Hankalin**

**Markku Raiko**

Julkaisija Motiva, Helsinki, 1/2014

# Johdanto

---

Polttoaineen kuivauksen tavoitteena on perinteisesti ollut palamisolosuhteiden parantaminen ja syttymisen varmistaminen. Biopolttoaineiden tapauksessa suuremman kokoluokan polttotekniikkana on tyypillisesti leijukerrospoltto, joka mahdollistaa myös kosteampien polttoaineiden käytön, eikä kuivausta täten ole pidetty kriittisenä tekijänä.

Ilmastonmuutoksen torjumisen myötä kuivaus on jälleen tullut ajankohtaiseksi koska sen avulla on mahdollista parantaa voimalaitoksen energiatehokkuutta. Samalla voidaan tehostaa polttoaineen käyttöä kuivatun polttoaineen lämpöarvon paranemisen myötä. Kuivauksella on myös yleisesti ottaen suotuisia vaikutuksia voimalaitoksen käytettävyyteen ja savukaasupäästöihin.

Tässä raportissa on esitetty puupohjaisten kiinteiden biopolttoaineiden energiatehokkaan kuivauksen tämän hetkinen teknologiatilanne. Myös kivihiilen kuivausta on käsitelty lähinnä pölypolton yhteydessä olevien hiilimyllyjen toiminnan kuvauksena.

Eri polttoaineille soveltuvia kuivausratkaisuja on käyty läpi ja niitä on vertailtu teknis-taloudellisin kriteerin kannalta. Myös kuivauksessa syntyviä päästöjä ja siinä huomioitavia turvallisuusseikkoja on selvitetty. Selvityksen pääpaino on kuivaukseen liittyvän polttolaitoksen ja teollisuusprosessien energiatehokkuuden parantamisessa sekä uusien innovatiivisten ratkaisujen esittelemisessä.

Selvitys liittyy Motivan koordinoimaan projektiin, jossa on selvitetty teollisuuden ylijäämälämmön taloudellista kannattavuutta.

Tämän yhteenvedon kuivausteknologioiden tilanteesta ovat tehneet ÅF-Consult Ltd:n konsultit Jaakko Nummelin, Ville Hankalin ja Markku Raiko.

## Käytetyt lyhenteet

---

VOC	Volatile Organic Compound
LTO	Lämmöntalteenotto
CMC	Critical Moisture Content
TPE	Toimenpide-ehdotus
MP	Matalapaine
PM	Particulate Matter
k.i.	Kuiva ilma
i-m <sup>3</sup>	Irtokuutio

# Sisällysluettelo

---

<b>Johdanto</b>	<b>3</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>5</b>
<b>1 Kuivauksen teoriaa</b>	<b>7</b>
1.1 Kuivausprosessi	7
1.2 Kuivauksen energiatehokkuus	8
<b>2 Polttoaineiden kuivatus</b>	<b>13</b>
2.1 Biopolttoaineet	15
2.1.1 Puun kuivuminen	16
2.2 Kivihili	18
<b>3 Teknologia kuvaukset</b>	<b>19</b>
3.1 Rumpukuivaus	20
3.2 Virtauskuivaus	21
3.3 Viirakuivaus	23
3.4 Kerroskuivaus	24
3.4.1 Petikerroskuivaus	25
3.4.2 Siilokuivaus	26
3.4.3 Aumakuivaus	28
3.4.4 Kenttäkuivaus	29
3.5 Yhteenveto menetelmistä	31
<b>4 Kuivuri-investoinneista</b>	<b>32</b>
4.1 Päästöt	32
4.2 Paloturvallisuus	33
4.3 Kuivauksen kannattavuus	33
<b>5 Kuivaus energiakatselmoinnissa</b>	<b>35</b>
<b>6 Yhteistyöyritysten toimenpide-ehdotukset</b>	<b>36</b>
<b>7 Yhteenveto</b>	<b>39</b>
CASE: aumakuivaus, Kokkola	42
CASE: kenttäkuivaus, Hyötypaperi Oy	44
CASE: Viirakuivuri, Stora Enso	46
CASE: siilokuivuri, Winnova	48
CASE: epäsuora kiekkokuivuri, Vapo	50
CASE: Kivihillen kuivaus hiilimylyllä	52
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>55</b>





# 1 Kuivauksen teoriaa

---

Kostean materiaalin terminen veden höyrytämiseen ja väliaineen johon syntyvä vesihöyry siirretään. Kuivumista voidaan tehostaa liikuttelemalla kuivattavaa ainesta.

Termiset kuivausmenetelmät voidaan jaotella mm. seuraavin perustein:

- Lämmönsiirtotapa (ilma, höyry tai savukaasu)
- Kuivauksen toimintatapa (jatkuva- tai erätoiminen)
- Kuivausprosessi (yksi- tai monivaiheinen, poistoilman takaisinkierätyks, poistoilman lämmöntalteenotto)
- Suora / epäsuora kuivaus
- Erilaiset kuivurivaihtoehdot (kiinteä- tai leijukerroskuivuri, viirakuivuri)

Saatavilla olevat teknologiat perustuvat useimmiten ilman konvektiolla tapahtuvaan lämmönsiirtotapaan ja kuivausprosessi on tyypillisesti yksivaiheinen.

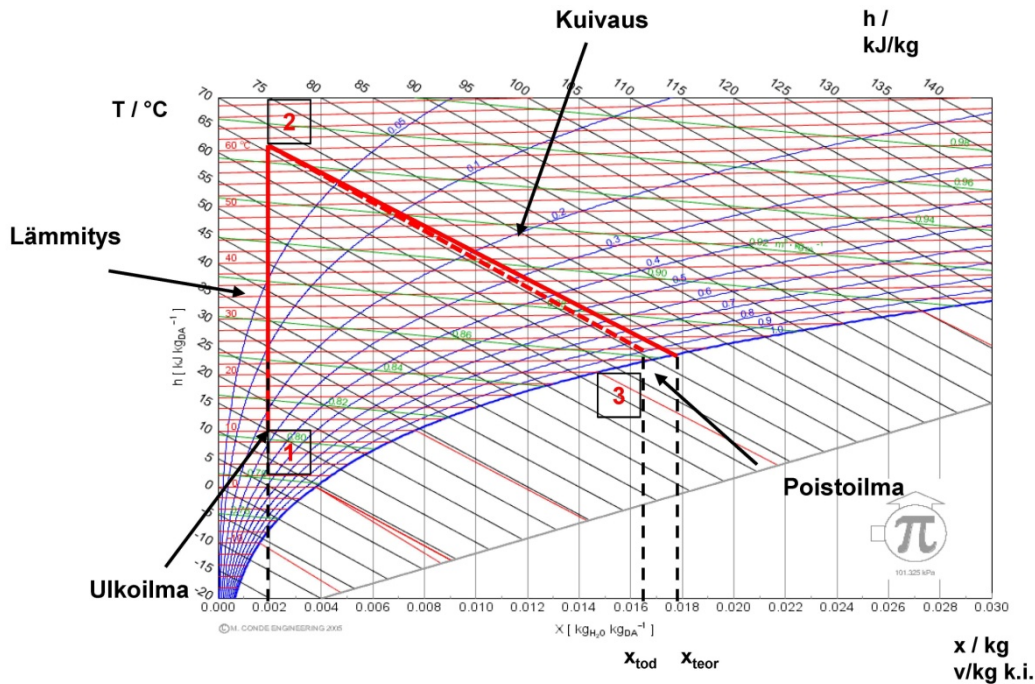
Menetelmät voidaan jakaa myös kostean ilman kuivausprosessin mukaisesti. Tällöin kuivaus voi tapahtua esim. yksi- tai monivaiheisen prosessin mukaisesti tai kuivurista poistuvaa ilmaa voidaan kierrättää takaisin prosessiin tai sillä voidaan lämmittää kuivuriin tulevaa ilmaa.

## 1.1 Kuivausprosessi

---

Polttoaineen kuivuessa sen sisältämä vesi haihtuu kuivausilmaan vesihöyryksi. Kuivausprosessia analysoitaessa kuivauksen pääasialliset suoritusarvot (lämmön tarve, ominaisenergiankulutus, puhallinteho) on siis helppo määrittää kostean ilman termodynaamisista tilasuureista ennen ja jälkeen kuivurin.

Kostean ilman tilanmuutoksia kuivausprosesseissa kuvataan yleisesti ns. Mollier-kuvaajalla. Pystyakselilla on ilman lämpötila (°C) ja vaaka-akselilla ilman sisältämä absoluuttinen kosteus (kg H<sub>2</sub>O / kg k.i.). Kostean ilman entalpia eli lämpösisältö (kJ/kg) on vinosuuntaisena akselina. Koordinaatiston lävistävät paraabelin muotoiset käyrät kuvaavat ilman suhteellista kosteutta (0–100 %). Alimmalla käyrällä ilma on kyllästystilassa, jossa sen suhteellinen kosteus on 100 %.



**Kuva 1 Kuivausilman tilapisteet Mollier-diagrammilla kuvattuna yksivaiheisessa kuivausprosessissa.**

Yksivaiheisessa yksinkertaisessa kuivausprosessissa ulkoilma (piste 1) lämmitetään kuivauslämpötilaan (piste 2), jolloin sen sisältämä absoluuttinen kosteus pysyy vakiona suhteellisen kosteuden pienentyessä. Ideaalinen kuivausprosessi etenee vakioentalpiasuoraa pitkin kohti kylläisyrajalta määräytyvää kuivausilman märkälämpötilaa. Todellisessa häviöllisessä prosessissa ilman lopputilassa lämpötila on hieman märkälämpötilaa suurempi (1–2 °C) ja suhteellinen kosteus jää kylläisestä tilasta hieman vajaaksi (80–90 %) (piste 3).

## 1.2 Kuivauksen energiatehokkuus

Kuivausilmaan tuotu lämmön määrä voidaan määrittää kuvan 1 pisteiden 1 ja 2 välisen entalpiaerotuksen avulla ja haihtunut kosteus pisteiden 3 ja 2 välisten kosteusmäärien erotuksella (kuivausilman absorboima kosteusmäärä). Näiden suureiden osamäärä kertoo kuivauksen ominaisenergiakulutuksen eli kuivauksen energiatehokkuuden lämpöenergian suhteen. Ominaisenergiakulutus määritetään kuivaukseen käytettävän lämpöenergian suhteena haihdutettavaan vesimäärään nähden (kJ/kg H<sub>2</sub>O).

Ominaisenergiakulutus vaihtelee mm. ulko- ja kuivausilman lämpötilojen, polttoaineen lämpötilan ja olomuodon sekä prosessikytkentöjen ja kuivausmenetelmän suhteen.

Teoreettisesti aihetta on tutkittu mm. lähteessä [1], jossa päädyttiin yksivaiheiselle kuivausprosessille lukemiin 2,7–2,9 MJ/kg H<sub>2</sub>O<sup>1</sup>. Käytännössä ominaisenergiakulutus vaihtelee pitkälti ulkoilman lämpötilan mukaisesti. Suomen olosuhteissa kulutus vaihtelee alle 100 °C ilmalla

<sup>1</sup> Polttoaineen kuivaus alkukosteudesta 60 % loppukosteuteen 23 %. Ulkoilman lämpötila 15 °C, kuivausilman lämpötila 75 °C. Kuivauksen lopussa ilma kylläistä ja kuivausprosessissa osittainen ilman takaisinkierätyks.

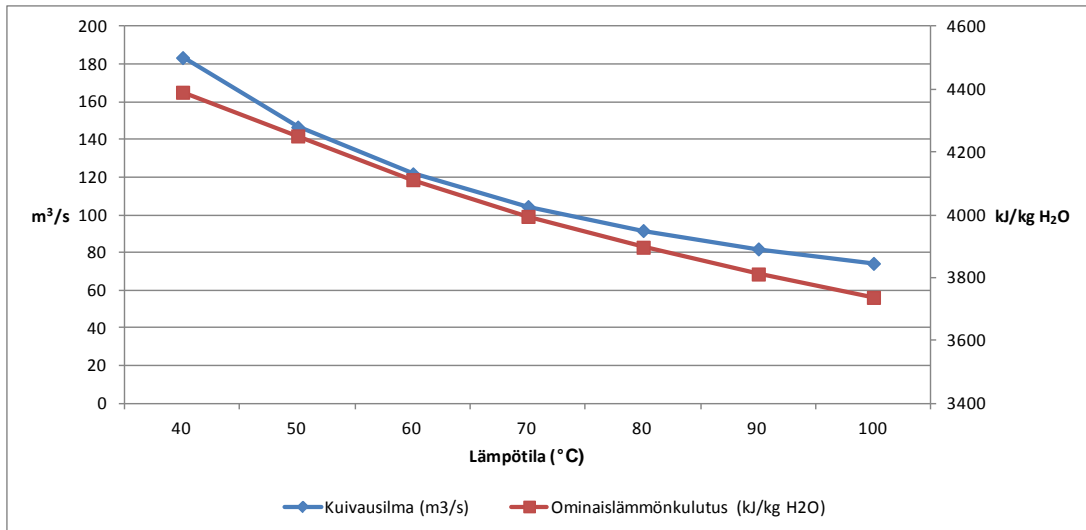
toimivilla kuivureilla välillä 4–6 MJ/kg H<sub>2</sub>O. Korkeammissa lämpötiloissa veden höyrystymislämpö laskee ja voidaan päästä lukemiin 3–4 MJ/kg H<sub>2</sub>O (mm. rumpukuivurit). Höyryllä toimivilla kuivureilla päästään tasolle 2–3 MJ/kg H<sub>2</sub>O johtuen poistuvan höyryn latentin lämmöntalteenotosta.

Ulkoilman suhteellinen kosteus määrittää kuivausilman sisältämän absoluuttisen kosteuden koska lämmitettäessä ilmaa ennen kuivuria pysyy sen absoluuttinen kosteus vakiona. Oletamalla teoreettinen kuivaustilanne, jossa lähtevä kuivausilma on imenyt itseensä maksimaalisen määrän kosteutta (suhteellinen kosteus 100 %), voidaan todeta että kuivausprosessi etenee isentalpisesti ja ilman loppulämpötila on lähellä kuivausilman märkälämpötilaa.

Kuivausilman lämpötila ja absoluuttinen kosteus määräävät siis ilman lopputilan ja näin ollen myös teoreettisen tarvittavan kuivan ilman massavirran, joka tarvitaan, että vaadittu höyrystettävä vesimäärä saadaan siirrettyä kuivausilmaan. Kuvassa 2 on esitetty esimerkinomaisesti kuivan ilman massavirran tarve kuivauksen lämpötilan funktiona teoreettiselle kuivausprosessille seuraavin oletuksin:

- Kuivattava polttoainetehto märkänä 50 MW, käyttötunnit vuodessa 8000 h
- Polttoainetta kuivataan 50 % kosteuspitoisuudesta 25 % kosteuteen (haihtuva vesimäärä 7,1 t/h)
- Kuivan polttoaineen lämpöarvo 19,3 MJ/kg
- Ulkoilman lämpötila 0 °C, suhteellinen kosteus 80 %
- Ilman tila kuivauksen lopussa kylläinen (suhteellinen kosteus 100 %)

Kuvasta 2 huomataan, että kuivausilman lämpötilalla on huomattava vaikutus tarvittavaan kuivausilman määrään. Kuivausilman lämpötilaa nostamalla myös sen märkälämpötila nousee ja näin ollen lämpötila ja absoluuttinen kosteus kuivurin jälkeen ovat korkeampia. Tällöin erotus ilman kosteuspitoisuuksissa ennen ja jälkeen kuivurin kasvaa ja kuivausilman massataseen mukaisesti ilman massavirta pienenee. Lämpötila tosin pienentää ilman tiheyttä, mutta tämän tarvittavaa ilman tilavuusvirtaa kohottava vaikutus on pienempi kuin kuivausprosessin mukaan saavutettava tilavuusvirran pienentyminen.

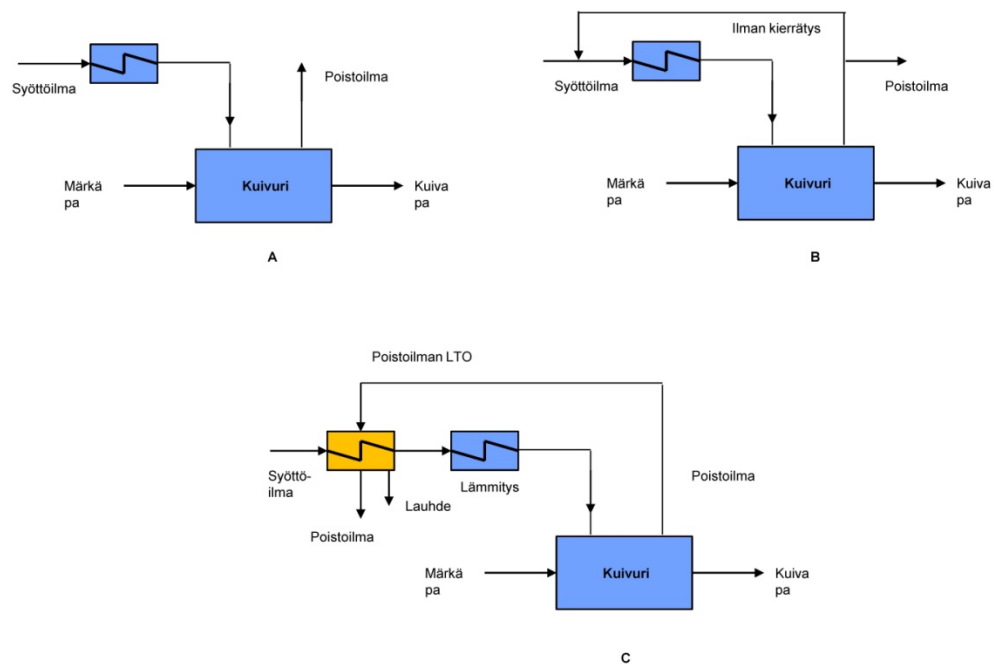


**Kuva 2 Teoreettinen kuivausilman tarve ( $\text{m}^3$  ilmaa /s) ja kuivauksen ominaislämmönkulutus ( $\text{kJ/kg H}_2\text{O}$ ) kuivauslämpötilan funktiona.**

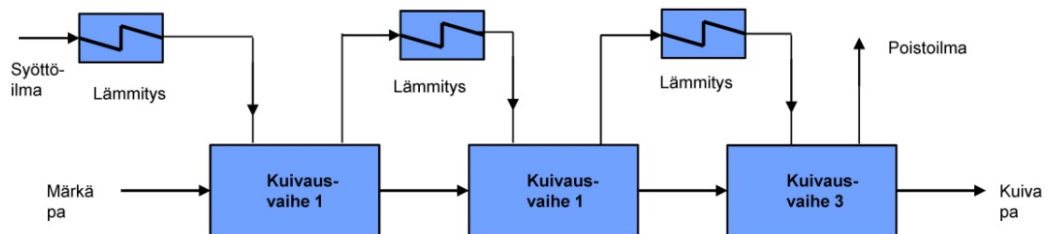
Kuivauksen lämpötilan nostaminen vähentää siis kuivausilman tarvetta ja näin ollen puhallintehoa ja kuivauksen omakäyttösähkön kulutusta. Samalla kuivaukseen tarvitaan korkeampilämpötilaista ja arvokkaampaa lämmönlähdettä. Toisaalta alhaisempi ilman massavirta pienentää ilman lämmitystehoa ja kuivauksen ominaislämmönkulutusta. Kuivurin investointikustannuksiin lämpötilan nosto vaikuttaa alentavasti koska kuivuri voidaan suunnitella kompaktimmaksi.

Kuivauksen lämmön kulutusta voidaan vähentää mm. kostean poistoilman takaisinkierrätyksellä, jolloin lämmitettävän ilman piste siirtyy ns. sekoituspisteeseen, joka nostaa sen entalpiaa ja vaadittu lämmön tuonti pienenee. Kuivauksesta poistuvan kostean ilman lämmöntalteenotolla saadaan myös parannettua energiatehokkuutta. Etenkin kosteuden sisältämä latentti lämpö omaa merkittävän talteenottopotentialin.

Ilman takaisinkierrätyksellä kuivausilman ja kuivurista poistuvan ilman kosteuspitoisuudet nousevat, joka mahdollistaa myös paremman potentiaalilämmöntalteenotolle. Samalla kuitenkin lämmitettävän ilman massavirta kasvaa kasvattaen puhaltimen tehoa.



**Kuva 3** Erilaisia kuivausprosessikytkentöjä: A = yksivaiheinen kuivausprosessi, B = poistoilman takaisinkierrätys, C = poistoilman lämmöntalteenotto.



**Kuva 4** Monivaiheinen kuivausprosessi.

Kuivauksen energiatehokkuutta voidaan myös parantaa ns. monivaihekuivauksella. Tässä edellisestä kuivausvaiheesta palaava ilma on syötteenä seuraavaan vaiheeseen. Tämä kohottaa lämmitettävän ilman alkulämpötilaa vaiheiden välillä ja kuivausprosessi vaatii monivaiheisena vähemmän lämpöenergiaa.

Samalla kuivausilman loppukosteus on suurempi eli ilma sitoo polttoaineesta höyrystävää vettä tehokkaammin. Näin ollen tarvittava kuivausilman massavirta pienenee. Monivaihekuivauksessa voidaan myös hyödyntää joustavammin lämmönlähteitä, koska samaan kuivaustulokseen päästään alemmalla kuivausilman lämpötilatasolla. Käytännön toteutukset monivaihekuivauksesta ovat tosin vähäisiä.

Kuivauksen optimointi erilaisilla prosessikytkennöillä on lopulta optimointia lämmön kulutuksen ja omakäyttösähkön kulutuksen välillä. Esim. ilman takaisinkierrätys vähentää lämmön

kulutusta, mutta kasvattaa tarvittavaa kuivan ilman massavirtaa ja näin ollen ilmapuhaltimen kapasiteettia.

Kuivauksen energiatehokkuutta voidaan parantaa myös kuivurin alipaineistuksella. Tällöin veden höyrystymispiste on alempi kuin normaalin ilmanpaineen – riittäväällä alipaineella jopa 40–50 °C. Näin ollen kuivauksen lämmön kulutus on pienempi ja puun sisälle muodostuu ylipaine, joka nopeuttaa kuivumista huomattavasti. Ongelmaksi muodostuu riittävän lämmönsiirron aikaansaanti tyhjiöksi imettyyn kuivaustilaan. Tyypillisesti käytetään suurtaajuusradioaaltoja tai lämpölevyjä. Alipainekuivausta käytetään erityisesti, mikäli halutaan saada kuivattavaan lopputuotteeseen (esim. sahatavara) mahdollisimman vähän tuotevirheitä esim. värin säilymisen kannalta.

## 2 Polttoaineiden kuivatus

---

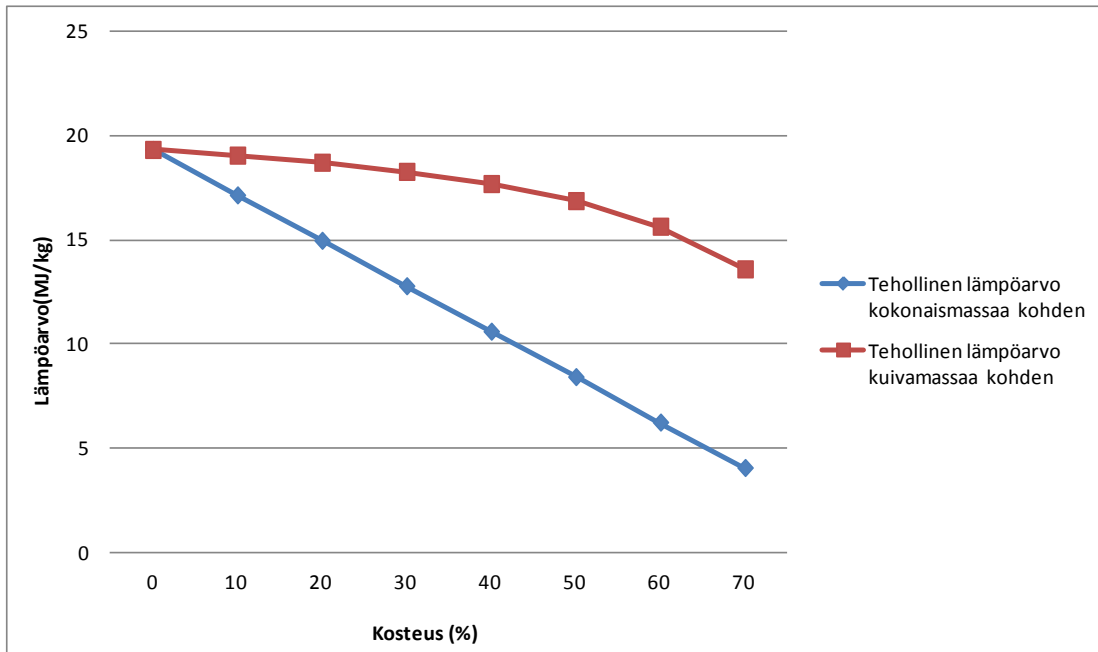
Biopolttoaineen sisältämällä kosteudella on lukuisia epäsuotuisia vaikutuksia polttolaitoksen energiatehokkuuteen. Osa polttoaineen lämpösisällöstä kuluu kosteuden höyrystämiseen, mikä laskee polttoaineen lämpöarvoa ja adiabaattista palamislämpötilaa. Palaminen on siis epätodellisempää ja polton ilmakerrointa joudutaan nostamaan.

Vesihöyryksi siirtyvä kosteus kasvattaa polttolaitoksen savukaasuvirtaa ja puhaltimien kapasiteettia pitää lisätä, jolloin laitoksen omakäyttösähkön kulutus kasvaa. Näillä tekijöillä on myös kattilahyötysuhdetta alentava vaikutus. Samalla savukaasujen kastepistelämpötila nousee vesihöyryn osapaineen nousemisen myötä.

Biopolttoaineen kuivauksella saavutettavat keskeiset hyödyt ovatkin siis:

- Lämpöarvon nousu
- Kattilahyötysuhteen nousu
- Palamisilman tarpeen lasku
- Savukaasun massavirran pienentyminen
- Polttoaineen käytettävyyden parantuminen (mm. jäätyminen ja homehtumisen esto)
- Kattilan lämpöpintojen likaantumisen- ja syöpymisriskien pienentyminen
- Mahdollistaa kattilan ja apulaitteiden mitoituksen pienemmiksi

Energiatehokkuuden parantamiseen tähtäävällä kuivauksella olennaisin saavutettava hyöty on polttoaineen lämpöarvon kasvu. Kuivauksen myötä biopolttoaineen energiasisältö kasvaa ja saadulla lisäpolttoaineteholla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita tai turvetta. Toisaalta esim. 100 % biomassaa polttavassa laitoksessa voidaan käyttää saman lämpötehon tuottamiseen vähemmän biopolttoainetta jolloin saavutetaan myös polttoainesäästöjä.



**Kuva 5 Biopolttoaineen kosteuspitoisuuden vaikutus polttoaineen teholliseen lämpöarvoon. Kuiva-aineen lämpöarvo 19 MJ/kg.**

Kuvassa 5 on esitetty puupohjaisen polttoaineen kosteuspitoisuuden vaikutus sen teholliseen lämpöarvoon. Tehollinen lämpöarvo puun massaa kohden laskee kosteuden kasvaessa veden höyrytämiseen kuluvan lämpömäärän mukaisesti. Kuivauksessa kuiva-aineen massavirta pysyy vakiona, jolloin polttoaineen säästö on suoraan verrannollinen tehollisen lämpöarvon muutokseen kuivamassaa kohden. Kostean polttoaineen energiasisältö puun irtotilavuutta kohden on käytännössä 0,6 – 1,0 MWh/i-m<sup>3</sup>.

Kuvasta huomataan, että biopolttoaineen kuivauksella voidaan saavuttaa n. 10–15 % polttoainesäästö<sup>2</sup>. Huomattavaa on myös se, että kuivauksen aikaansaama polttoainesäästö on sitä suurempi mitä suuremmasta kosteuspitoisuudesta kuivaus alkaa.

Kuivauksella on myös muita myönteisiä vaikutuksia voimalaitoksen käyttötalouteen – mm. polttoainejärjestelmän varasto- ja siirtokapasiteettia sekä kattilan ja apulaitteiden mitoitusta voidaan kuivauksen myötä pienentää. Talviaikaan polttoaineen mukana tulevan jään ja lumen sulattamisella on selkeä positiivinen vaikutus polttoaineen käytettävyyteen. Samalla kuivaus toimii polttoaineen ja sen sisältämän veden esilämmitysprosessina. Myös materiaaliteknisesti kuivaus on järkevää, koska liiallinen vesihöyry voi aiheuttaa kattilan syöpymistä ja savukaasukanavien likaantumista kattilan loppupäässä.

Voimalaitoksen suoritusarvojen parantamisen lisäksi toinen kannuste biopolttoaineiden kuivaukseen on polttoaineen jatkoprosessoinnin vaatimukset. Nämä tulevat kyseeseen esim. pyrolyysi-, kaasutus- ja torrefaction-prosesseissa, jotka vaativat syötettävältä biomassalta tyypillisesti 10–40 %:n kosteuspitoisuuden. Myös pelletöinti- ja briketöinti prosessit vaativat biopolttoaineelta samaa suuruusluokkaa olevan kosteuspitoisuuden.

Toisaalta kuivauksella saattaa olla myös haittavaikutuksia. Korkeampi palamislämpötila voi johtaa tuhkan sulamiseen ja NO<sub>x</sub>-päästöjen kasvuun. Mikäli osa polttoaineesta kuivataan, aihe-

<sup>2</sup> Esim. kuivattaessa polttoainetta 50 % lähtökosteudesta 20 % loppukosteuteen sen energiasisältö kasvaa 11 %.



uttaa se kosteuspitoisuuden vaihteluiden myötä kuormitusta kattilalle, ellei kuivaa ja märkää polttoainetta sekoiteta hyvin ennen polttoa.

Kuivauksen vaikutus voimalaitoksen sähköntuotantoon riippuu olennaisesti kuivauslämmön lämpötilatasosta. Käytettäessä korkeampiarvoista lämpöä, esim. vastapaine- tai väliottohöyryä, menetetään osa turbiinissa paisuvasta höyrystä ja täten sähkösaalis pienenee. Sähkösaaliin menetys tulisi minimoida käyttämällä mahdollisimman alhaista lämpöä. Toisaalta jos laitosalueella on sopivan lämpötilan jätelämpöjä (> 50 °C), voidaan näitä hyödyntää kuivauksessa hyötysuhdetta parantaen.

Myönteiset ja haitalliset vaikutukset polttolaitoksen toimintaan tuleekin arvioida tapauskohtaisesti ennen mahdollista kuivuri-investointia.

## 2.1 Biopolttoaineet

Yleisin voimalaitoksilla poltettava puupohjainen kiinteä biopolttoaine koostuu erilaisista hake-tyypeistä (ranka-, kokopuu ja metsätähdehake sekä murske). Näistä yleisimmin käytetään metsätähdehaketta. Hake on koneellisesti tiettyyn palakokoon käsiteltyä puuainesta. Myös sahanpurua, kuorta, kantoja sekä pellettejä ja brikettejä käytetään.

Puu sisältää kosteutta tyypillisesti 40–60 %, jopa yli 60 % joissain tapauksissa. Kosteus vaihtelee vuodenajan mukaan ja puulajeittain sekä puun osien mukaisesti. Talvisin kosteuspitoisuudet ovat korkeimmillaan (jopa 65 %) johtuen polttoaineen joukkoon joutuvasta lumesta ja jäätä.

Havupuilla kosteuspitoisuus kasvaa siirryttäessä runkopuusta oksiin, latvaan ja kuoriosaan. Tämä on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1 Havupuiden eri osien kosteuspitoisuuksia (%) (perustuen lähteeseen [12]).**

Puun osa	Mänty (%)	Kuusi (%)
Runkopuu	45–50	40–60
Oksat	50–56	42–46
Latva	60	60 (50 <sup>3</sup> )
Kuori (kaarna)	36–60	38–58
Kuori (muu kuori)	53–67	47–63

Hakkeen palakoko on epäyhtenäinen ja vaihtelee haketettavan aineksen, hakeutus/murskaustavan ja -laitteen sekä puutyyppin mukaan. Palakoko eli pituus vaihtelee tyypillisesti

<sup>3</sup> Pohjois-Suomen kuuset.

5–50 mm välillä siten että murskattu hake on karkeampaa kuin haketettu hake. Useimmiten hakepala on suorakaiteen muotoinen ja sen paksuus on pieni verrattuna pituuteen.

Palakooltaan alle 3 mm olevan hienojakoisen aineksen (esim. neulaset, puru) määrä vaihtelee hakkeen laatuluokasta riippuen välillä 4–12 %. Runkopuun osuus hakkeessa tasoittaa palajakaumaa.

### 2.1.1 Puun kuivuminen

Puupartikkelin kuivuminen voidaan jakaa eri vaiheisiin kosteuden poistumiseen liittyen. Tällöin kuivatuksessa haihtuvan vesimäärän mukaan on määriteltävissä kolme vaihetta: lämmitysvaihe, vakiokuivumisvaihe ja laskevan kuivumisnopeuden vaihe.

Lämmitysvaiheessa puun lämpötila ja kuivumisnopeus nousevat vähitellen. Vakionopeusvaiheessa puun pinnalla ja soluonteloissa oleva vapaa vesi haihtuu kuivausilmaan ja kuivaus tapahtuu lämmön- ja aineensiirron määräämässä tasapainotilassa (märkälämpötila). Vakiokuivumisvaihe loppuu ns. kriittisen kosteuspitoisuuden pisteessä (CMC). Laskevan kuivumisnopeuden alueella vapaan veden määrä vähenee ja kuivausta hidastaa vesihöyryn aineensiirrosta aiheutuva vastus materiaalin sisällä. Puun pinta alkaa samalla kuivua ja partikkelin muoto muuttuu.

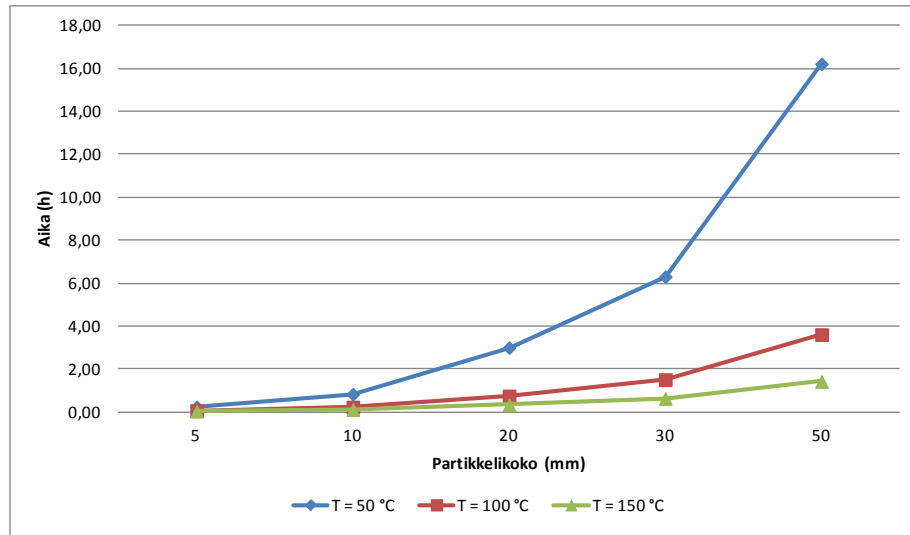
Kriittisen kosteuspitoisuuden piste on kuivattavalle materiaalille spesifinen, mutta käytännössä se on lähellä puun syiden kyllästymispistettä (vaihtelee n. 30 % molemmin puolin). Tällöin puun pintahuokokset ovat kyllästymistilassa ja tämän ylittämä vesi alkaa kerääntyä puun onteloihin.

Tyypillisille 50–60 % kosteudessa olevien biopolttoaineiden kuivausprosessit koostuvat siis pitkälti lämmitys- ja vakiokuivumisvaiheesta kun loppukosteus pysyy lähellä kriittistä kosteuspitoisuutta.

Vaadittu viipymäaika tietyn kosteuspitoisuuden muutoksen aikaansaamiseksi riippuu tällöin mm. seuraavista tekijöistä:

- Kuivauskaasun lämpötila, nopeus ja suhteellinen kosteus
- Kuivattava polttoaine ja sen partikkelikoko
- Polttoainepedin korkeus ja muoto

Yksittäisen puuhakepartikkelin kuivumista on tutkittu mm. lähteessä [11] sekä teoreettisesti virtausmallinnuksen avulla että kokeellisesti termovaakamäärityksellä. Teoreettisen mallin tulokset havaittiin korreloivan hyvin kokeellisten tulosten kanssa.



**Kuva 6 Yksittäisten puupartikkelien kuivausajat tunteina lämpötilan ja partikkelikoon funktiona, kun kuivauskaasuna on savukaasu (perustuen lähteeseen [11]).**

Kuvassa 6 on esitetty teoreettiseen laskentamalliin perustuvia kuivausaikoja partikkelikoon ja kuivauslämpötilan funktiona mikäli oletetaan, että partikkeleita kuivataan 50 % alkukosteudesta 25 % loppukosteuteen savukaasun ja partikkelien välisen nopeuseron ollessa 0,3 m/s.

Käytännössä puupartikkeleiden alkuvaiheen kuivaus noin 25 %:n loppukosteuteen asti voidaan laskea kuivauskaasun ja partikkelin välisen aineen- ja lämmönsiirron mukaan kun vesi haihtuu partikkelin pinnalta kuivauskaasuun. Ilman ja savukaasun väliset aineominaisuudet eroavat niin vähäisesti, että tuloksia voidaan käyttää suuntaa-antavina myös kuivauskaasun ollessa ilmaa.

Kivihiilen sisältämä kosteus riippuu sen laatuluokasta. Alempiarvoiset, ns. sub-bitumiset hiilityypit, sisältävät kosteutta tyypillisesti 10–45 %. Bitumisessa kivihiilessä on puolestaan kosteutta 2–15 %. Suomessa käytettävät hiililaadut ovat lähinnä bitumisia, ja niissä kosteus vaihtelee välillä 8–15 %.

Kivihiilen kuivaus on käytössä aina kun hiilen poltto on pölypolttoa. Tämä vaatii kuivan syötteen jauhimeen. Kuivaus on siis jauhamisen yhteydessä käytössä ja parantaa hiilen käsitelävyyttä pienentämällä pintakosteutta.

Kuivaukseen käytetään palamisilman esilämmittimen jälkeistä primääri-ilmaa ja se jäähtyy hiilimyllyissä n. 80–90 °C:een. Myllyn käsittelemä hiilipöly ajetaan primääri-ilman mukana kattilan polttimille. Mikäli käytetään erityisen kosteita hiililaatuja kuten ligniittiä, kuivaukseen käytetään savukaasuja, jotka otetaan tulipesästä.

Jauhamattoman raakahiilen kuivaus ei ole yleisesti käytössä hiililaitoksilla. Koska raakahiilen varastointi hiilikasoissa aiheuttaa kuivaamattomanakin itsesyttymisriskin, tulee paloturvallisuus huomioida kuivausmenetelmiä valittaessa.

Ulkona polttoainekentällä voisi kivihiilellä tulla kyseeseen kenttäkuivaus sekundäärilämpöjä hyödyntämällä. Ilmapuhalluksen aiheuttamien syttymisriskien takia aumakuivaus ei toisaalta tulisi kyseeseen. Kenttäkuivaus tulisi suorittaa lyhyellä viipymisajalla ja hyvin kontrolloidulla osalla hiilikenttää. Hyödyksi tulisi ylimääräisen pintakosteuden haihduttaminen, jolla olisi lähinnä käytännöllisiä vaikutuksia polttoaineen käsittelyyn. Kuivatun kivihiilen pitkäaikaisvarastointia tulisi syttymisriskien vuoksi välttää.

Kivihiilelle voisi soveltua myös siilokuivaus, mikäli siilo olisi polttoainejärjestelmässä lähellä kattilalaitosta. Tällöin minimoitaisiin kuivan polttoaineen varastoinnista aiheutuvat paloturvallisuusriskit.

Kuivaus voidaan suorittaa mm. termisin ja mekaanisin menetelmin. Seuraavassa käsitellään lähinnä teollisen kokoluokan termisiä kuivausmenetelmiä. Mekaaniset menetelmät kuten prässäys tulevat kyseeseen polttoaineen ollessa erityisen kosteaa (yli 60 % kosteuspitoisuuksilla). Näillä saavutettavat loppukosteudet ovat kuitenkin varsin korkeita (50–55 %) eli kyseiset menetelmät soveltuvat lähinnä termisen kuivauksen esikuivausmenetelmäksi.

Sopivan kuivausmenetelmän valinta riippuu mm. saatavilla olevasta lämmönlähteestä, haihdutuskapasiteetista, halutusta loppukosteuspitoisuudesta ja kuivurille käytettävissä olevasta pinta-alasta. Kaupallisten ratkaisujen investointikustannukset riippuvat lähinnä haihdutetusta vesimäärästä (t/h). Myös kuivaavan väliaineen lämpötila ja sitä myötä tarvittava tilavuusvirta ja polttoaineen viipymisaika vaikuttavat kuivurin kokoon ja kustannuksiin.

Käytännössä lähes kaikissa teolliseen kokoluokkaan soveltuvissa menetelmissä käytetään lämmitettyä väliainetta. Kylmäkuivausta käytetään yleisesti esim. sahatavaran varastoinnissa, mutta suuremmissa kokoluokassa se on hankalaa, koska kuivauksen vaatima ilman ja tilan tarve kasvaa liian suureksi.

Kuivaus voidaan toteuttaa pienimuotoisesti myös ns. luonnonkuivauksena, eli kasaamalla polttoaine aumaan ja mahdollisesti peittelemällä ulkona varastoitava puupolttoaine esim. pressulla tai voimapaperilla. Vaikutus on arviolta 5–10 prosenttiyksikön muutos polttoaineen kosteuspuiteen kuivausajan vaihdellessa puolesta vuodesta vuoteen.

Varastoinnin aikana ongelmaksi syntyvät polttoaineen lahoamisesta aiheutuvat kuiva-ainetappiot, jotka riippuvat polttoaineen koostumuksesta ja varastointiolosuhteista. Mikrobiologinen hajoaminen aktivoituu kosteuspuiteen ollessa riittävän korkea (n. 30 %). Myös lämpötila aktivoi hajoamista.

Kaupallisia menetelmiä laajamittaiseen voimalaitoskokoluokan biopolttoaineen kuivaamiseen ovat lähinnä viirakuivurit, rumpukuivurit ja erilaiset kerroskuivurit. Myös ns. virtauskuivausmenetelmiä kuten flash-, kaskadi-, liejakerros- ja höyrykuivureita käytetään.

Erilaiset kerroskuivausmenetelmät perustuvat useimmiten yksilöllisesti räätälöityihin ratkaisuihin (esim. auma-, siilo- ja kenttäkuivaus). Kerroskuivurit ja viirakuivurit soveltuvat erityisesti matalalämpötilaisella ylijäämälämmöllä tapahtuvaan kuivaukseen. Rumpu- ja virtauskuivausmenetelmät vaativat puolestaan arvokkaampaa lämmönlähdettä – esim. savukaasua tai höyryä.

Taulukossa 2 on esitetty kuivausmenetelmien yleisiä teknisiä ominaisuuksia. Menetelmistä rumpukuivurit ovat kapasiteetiltaan suurimpia ja ne vaativat varsin korkealämpötilaisia lämmönlähteitä (savukaasua tai höyryä). Niillä voidaan päästä jopa yli 50 t/h haihdutettavaan vesimäärään.

Matalammissa lämpötiloissa toimivat menetelmät, viira- ja kerroskuivurit, käyttävät lämmönlähteinä useimmiten lämpimiä prosessivesiä (esim. ylijäämälämpöä). Tällöin kuivauslämpö siirretään tyyppillisesti ilma/vesi – lämmönvaihtimella kuivausilmaan. Myös savukaasun lämpöä voidaan hyödyntää kuivausilman lämmittämiseksi, mutta tällöin vaadittava lämmönsiirto tapahtuu kaasusta kaasuun pienemmällä lämmönsiirtokertoimella.

Taulukko 2 Kuivausmenetelmien tyypillisiä ominaisuuksia. Kerätty lähteistä [3] – [6].

Kuivaus- teknologiat	Rumpukuivuri	Virtauskuivuri	Viirakuivuri	Kerroskuivuri
Tyypillinen väliaine	savukaasu/ höyry	savukaasu/ höyry	ilma	ilma
Viipymäaika (min)	1–30	0,1–3	30–90	30–600
Kuivauslämpötila (°C)	200–600	150–200	30–120	30–80
Partikkelikoko (mm) <sup>4</sup>	20–100	0,5–50	5–50	5–50
Loppukosteus (%)	2–10	15–20	> 5	20–30
Haihdutuskapasiteetti (t/h H <sub>2</sub> O)	5–75	10–30	5–40	0,1–20
Lämmönlähde	höyry, savukaasu	höyry, savukaasu	mp-höyry, savukaasu, kuumat vedet	savukaasu, kuumat vedet

### 3.1 Rumpukuivaus

Rumpukuivauksessa kuivattava polttoaine ja kuivauskaasu syötetään hitaasti pyörivään rumpuun, jonka seinämällä olevat evämäiset levyt pudottavat partikkelit kuivauskaasun läpi rumpun alaosaan. Näin kuivattava polttoaine on koko ajan liikkeessä ja kuivuminen on varsin tehokasta johtuen tehokkaasta lämmönsiirrosta kuivauskaasun ja partikkelien välillä.

Kuivauskaasuna on tyypillisesti savukaasu, joka syötetään rumpun sisään joko myötä- tai vastavirtaan polttoaineen syöttöön nähden. Myös kuumaa ilmaa voidaan käyttää. Rumpukuivurin yhteydessä on usein sitä varten oma polttolähde.

Kuivauskaasun sisäänmenolämpötila vaihtelee 200–600 °C välillä. Biomassalla käytetään useimmiten myötävirtakuivausta, jolloin kuumien kaasujen kosketuksissa kosteimman syötteen kanssa eikä liiallista materiaalin kuumentumista pääse tapahtumaan. Olennaista on, että kuivaus tapahtuu niin korkeassa lämpötilassa, että ulostulolämpötila ei laske alle 100 °C orgaanisten yhdisteiden lauhtumisen estämiseksi.

<sup>4</sup> Tyypillinen käytetty kokojakauma.

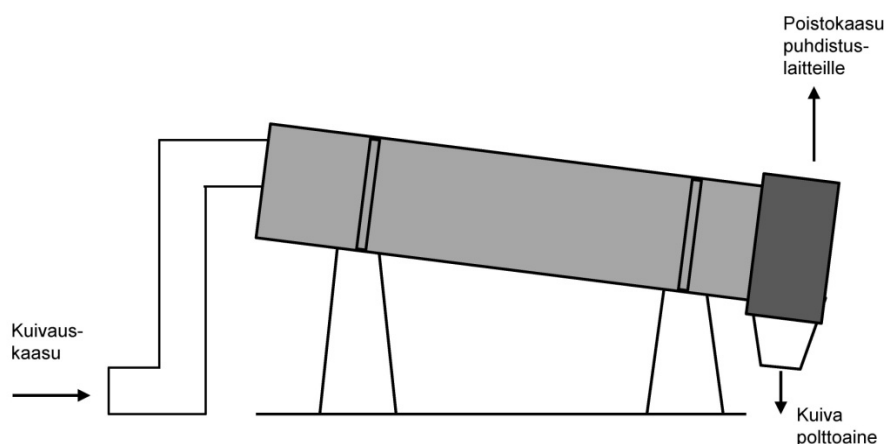
Suoralla konvektiolla toimivien rumpukuivurien lisäksi käytössä on kuivureita, joissa kuivauslämpö tuodaan kuivaustilan ulkopuolelle ja se siirtyy johtumalla kuivurin sisälle olevien rakenteiden kautta (ns. epäsuora kuivaus).

Yleisin menetelmä on höyryputkia hyödyntävä ns. kiekkokuivuri, jossa kuuma höyry tai termoöljy tuodaan putkissa, jotka on kiinnitetty lämmönsiirtorakenteena toimiviin kiekkoihin. Lämmönsiirtorakenne on kiinnitetty pyörivään roottoriin ja kuivaus tapahtuu sylinterin muotoisessa paikallaan pysyvässä staattorissa. Kuivaustila on olosuhteiltaan inertti ja usein alipaineistettu.

Materiaali kuivuu lämmönsiirtopintaan tapahtuvan jatkuvan kontaktin ansiosta. Yleisin käytetty väliaine on 6–10 bar(a) kylläinen höyry, joka lauhtuu lämmönsiirtorakenteen sisällä. Menetelmien etuja ovat kuivurista tulevat alhaiset päästöt ja hyvä paloturvallisuus. Toisaalta johtumisen myötä kuivaustehokkuus on alhaisempi ja kuivausaika siis pidempi. Epäsuorasti toimivia kuivureita toimittaa esim. Haarslev.

Rumpukuivauksen etuja on sen mahdollistama suuri kuivauskapasiteetti sekä joustavuus kuivattavan materiaalin palakoossa ja alkukosteudessa. Viirakuivureihin verrattuna niiden etuna on pienempi ominaisenergian ja omakäyttösähkön kulutus sekä alhaisemmat huolto- ja kunnossapitokustannukset. Lisäksi kuivurit ovat rakenteeltaan kompakteja, kestäviä ja yksinkertaisia.

Haittoina voidaan pitää kuivurin vaatimaa korkeaa lämpötilaa ja sen aiheuttamia VOC- ja hajupäästöjä sekä pölyämistä. Poistokaasun käsittelyjärjestelmän kustannukset kasvattavat niiden investointikustannuksia. Biomassan kosteuspitoisuuden vaihdellessa materiaalin ylikuumentuminen ja näin ollen paloturvallisuusriskit ovat myös mahdollisia.



**Kuva 7 Rumpukuivurin periaatekaavio.**

Rumpukuivurien laitevalmistajia on useita mm. Metso, Simon-dryers ja Torkapparater.

### 3.2 Virtauskuivaus

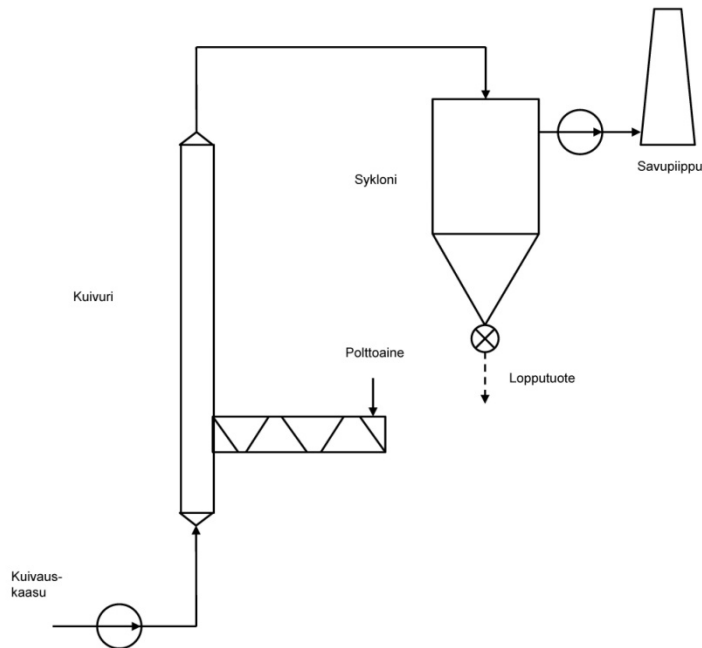
Virtauskuivausmenetelmissä (käytetään myös nimitystä pneumaattiset kuivausmenetelmät) polttoaine syötetään suurella nopeudella virtaavaan kuumaan kuivauskaasuun, joka voi olla savukaasua, ilmaa tai tulistettua höyryä. Erilaiset menetelmät eroavat kytkennöiltään lähinnä kuivaavan väliaineen ja polttoaineen virtauskanavien asettelun suhteen. Kiinteät partikkelit erote-

taan kuivurin jälkeen tyypillisesti syklonierottimella ja mahdollisilla muilla savukaasun puhdistus-menetelmillä.

Tyypillisiä virtauskuivausmenetelmiä ovat flash-kuivaus, kaskadikuivaus, leijukerroskuivaus ja höyrykuivaus. Menetelmien viipymääjat ovat varsin lyhyitä ja vaihtelevat muutamista kymmenistä sekunneista minuutteihin. Tämän ansiosta kuivurit ovat kooltaan varsin kompakteja.

Menetelmien haittana on kuitenkin suuri omakäytösähkön kulutus koska tarvittavan polttoainepartikkelien suspensiovirtauksen aikaansaamiseksi kuivauskaasulla tulee olla riittävän suuri nopeus. Virtauskuivausmenetelmät vaativat myös polttoaineen esikäsitteilyn, murskaamisen tai jauhamisen, riittävän pieneen partikkelikokoon. Virtauskuivausmenetelmiä vaativat myös kuivaavalta väliaineelta varsin korkeita lämpötiloja, tyypillisesti yli 200 °C.

Johtuen menetelmien vaatimasta korkealämpötilaisesta lämmönlähteestä, niitä ei voida suositella energiatehokkuuden parantamiseksi vaan lähinnä siinä tapauksessa, jos kuivauksen tavoitteena on tuottaa laadukkaampia lopputuotteita esim. biomassan kyseessä kaasutus- tai pyrolyysiprosesseihin.



**Kuva 8** Flash-kuivurin periaatekaavio.

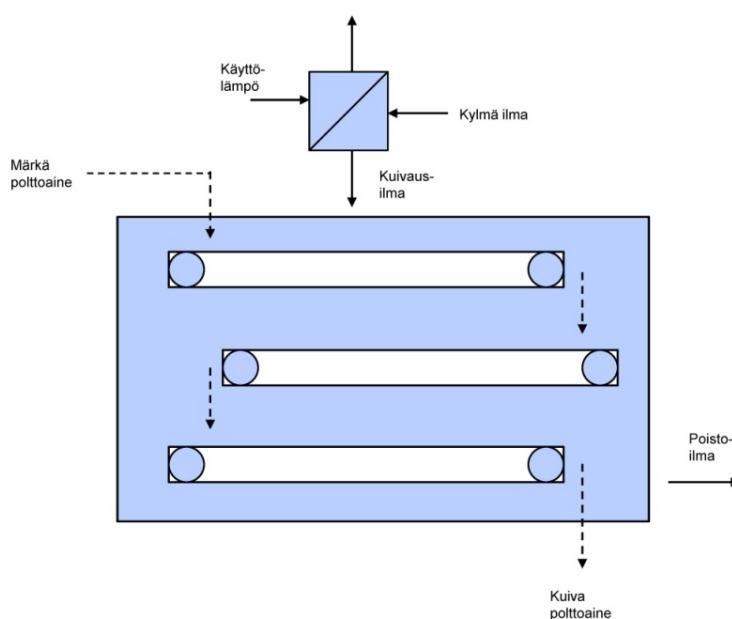
Höyrykuivaus toimii samalla periaatteella kuin flash-kuivaus sillä erotuksella, että virtaavana kaasuna onkin tulistettu höyry. Menetelmän etu on se, että kuivurista palaava kylläinen höyryn lämpösisältö voidaan lähes kokonaisuudessaan hyödyntää lauhduttamalla. Höyry voidaan hyödyntää myös komprimoinnilla korkeampaan painetasoon tai kaasuturbiinin STIG-prosessilla, joka kasvattaa turbiinin virtaamaa ja siitä saatavaa sähkötehoa.



Viirakuivuri (käytetään myös nimityksiä hihnakuivuri ja kerroskuivuri) on yleisin kuivurityyppi matalassa lämpötilassa tapahtuvalle kuivaukselle. Sitä käytetään yleisesti monille biomassapolttoaineille kuten sahanpurulle, hakkeelle, kuorelle, bagassille ja lietteelle.

Märkä polttoaine levitetään tasaisesti hitaasti (n. 1 m/min) liikkuvalla viiralla koko kuivaimen leveydelle syöttölaitteen avulla. Polttoainepatjan paksuus on tyypillisesti 0,1–0,2 m polttoaineen laadusta riippuen. Patjan paksuus ja polttoaineen jakautuminen vaikuttavat painehäviöön patjan yli. Tasainen palakoko ja patjan paksuus antavat tasaisen loppukosteuden. Kuivuri voi olla yksi-, kaksi- tai monikerroksinen.

Ulkoilmaa lämmitetään lämmönvaihtimissa ja lämmitetty ilma johdetaan polttoainepatjan läpi joko ylä- tai alapuolelta. Ilman tullessa yläpuolelta ovat pölypäästöt pienemmät alhaalta tulevaan virtaukseen verrattuna, mutta paine-ero on suurempi. Pölyämiseen voidaan vaikuttaa myös puhaltimien sijoittelulla. Imupuolelle sijoittaminen vähentää pölyvuotoja painepuolelle sijoittamiseen verrattuna.



**Kuva 9 Monikerrosviirakuivurin periaatekaavio.**

Ilma lämmitetään tyypillisesti n. 80–120 °C lämpötilaan, mutta alhaisempia ja korkeampiakin lämpötiloja voidaan käyttää. Maksimilämpötila määräytyy materiaalispesifisesti VOC-päästöjen kasvun rajoittamana. Ilman lämmitykseen voidaan käyttää kuumia kaasuja, matalapainehöyryä tai kuumaa vettä.

Viiran materiaalina on tyypillisesti kudottu polymeeriviira kuten paperikoneissa. Korkeissa lämpötiloissa voidaan käyttää esimerkiksi metallikudosviiroja. Viira pidetään puhtaana joko automaattisella harjalla tai ilmapuhalluksella. Likaavampia polttoaineita käytettäessä viira voidaan varustaa automaattisella vesipesurilla.

Viirakuivurin etuina ovat sen soveltuvuus eri polttoaineille, korkea käytettävyys, sekundäärilämpöjen hyödyntäminen, kestävä ja yksinkertainen rakenne, helppo säädettävyys sekä rum-

pukuivuria pienemmät palovaarariski ja päästöt. Heikkouksia rumpukuivuriin verrattuna ovat suurempi investointikustannus, korkeampi käyttöteho, suurempi pinta-ala sekä suuremmat huoltokustannukset. Asennuspinta-alaa voi pienentää käyttämällä monikerroskuivuria. Kylmissä ilmanaloissa viirakuivuri vaatii rakennuksen jäätyminen estämiseksi, mutta lämpimissä maissa sateensuoja on riittävä.

Viirakuivureille on useita laitetoimittajia, mm. Andritz, Metso, Stela, Siemens Water Technologies, Sandvik, Swiss Combi, Belt-O-Matic, Sevar ja Buttner.

### 3.4 Kerroskuivaus

---

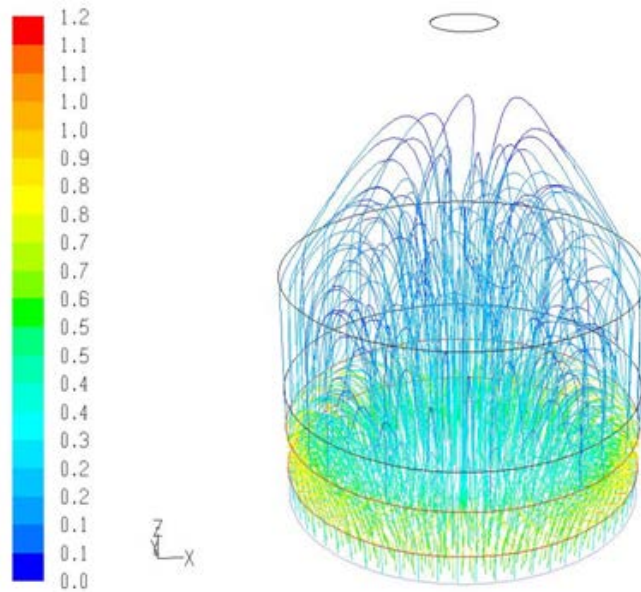
Kerroskuivauksessa kuivuminen tapahtuu polttoainepedin läpi puhallettavan ilmavirran vaikutuksesta. Oletuksena on, että ilmavirran nopeus pysyy alle kuivattavalle materiaalille ominaisen leijutusnopeuden eli peti pysyy vertikaalisessa suunnassa liikkumattomana. Tällöin puhutaan ns. kiinteäkerroskuivauksesta.

Kiinteäkerroskuivauksessa kerros voi olla joko paikallaan eli kuivaus tapahtuu panosperiaatteella tai asetettuna liikkuvalla tasolle, jolloin prosessi on jatkuvatoiminen. Kerroksen optimaalinen korkeus on 0,5–2 m sen aiheuttaman painehäviön minimoimiseksi. Korkeammilla petikerroksilla tarvittavan vastapaineen nousu lisää puhallintehon tarvetta.

Paikallaan oleva kuivaus voi tapahtua esim. polttoaineen varastoinnin yhteydessä ulkona polttoainekentällä, polttoainesiilossa, kontissa tai muussa varastotilassa. Ulkoilmassa tapahtuvan kuivauksen käyttöaika on pääasiassa rajoitettu tapahtumaan kevään, kesän ja syksyn aikana.

Liikkuvalla pedille toteutettu kuivaus vaatii vaakasuunnassa liikkuvan arinatasen, joka siirtää polttoaineen hitaasti esim. syöttösiilolle. Polttoaine siirretään arinatasolle joko kuljettimella tai kauhakuljettimella syöttötaskun kautta.

Olennaista kerroskuivauksessa on ilman virtauksen optimaalinen jakautuminen polttoainepedissä ilmanjakojärjestelmän huolellisella suunnittelulla. Virtauksen tulisi jakautua mahdollisimman tasaisesti polttoainepedissä, jotta saavutetaan tasainen loppukosteuden jakauma. Tyyppillinen ongelma on ilmavirran kanavoituminen esim. polttoainekerroksen epätasaisuuden vuoksi, jolloin polttoaine kuivuu epätasaisesti liian kuivaksi kanavoitumiskohdassa kuivumatta tarpeeksi muualla pedissä.



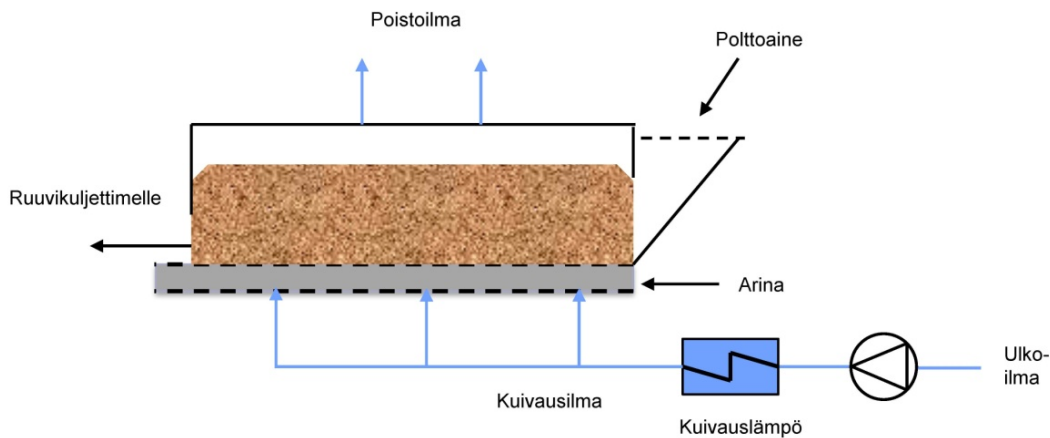
**Kuva 10** Virtausmallinnuksen mukainen ilmavirtauksen jakautuminen siilokuivurissa. Ilman virtaviivan värit kuvaavat ilman nopeutta (m/s).

Kerroskuivausmenetelmille on tyypillistä yksinkertainen toimintaperiaate ja kohtalaisen pieni kokoluokka verrattuna yleisempiin kaupallisiin menetelmiin. Johtuen matalasta lämpötilasta ne myös vaativat tavallista enemmän tilaa. Menetelmien investointikustannukset ovat alhaisemmat kuin viira- tai rumpukuivureilla, mutta kuivaustehokkuus jää niissä melko alhaiseksi. Lisäksi kerroskuivureille löytyy varsin vähän laitetoimittajia eli menetelmät vaativatkin usein yksittäin räätälöidyt tekniset ratkaisut. Mikäli kuivaus halutaan toteuttaa pelkästään energiatehokkuusmielessä eikä kuivalle polttoaineelle ole määritelty tiukkaa laatutavoitetta kosteuspitoisuuden tai sen vaihtelun suhteen, voi kerroskuivaus olla mielekäs investointi.

Seuraavassa on käyty läpi eräitä kerroskuivausmenetelmiä: petikerros-, siilo-, auma- ja kenttäkuivaus.

#### 3.4.1 Petikerroskuivaus

Petikerroskuivauksessa polttoaine syötetään vaakasuunnassa liikkuvalla arinatasolle, jota pitkin se kulkee petimuodossa läpi kuivurin ja se tiputetaan polttoainekuljettimille siirrettäväksi eteenpäin polttojärjestelmässä. Polttoaine siirretään arinatasolle joko kuljettimella tai kauhakuljettimella syöttötaskun kautta. Kuivausilma lämmitetään lämmönsiirtimellä saatavilla olevalla lämmönlähteellä ja syötetään arinatason kautta polttoainepetiin.



**Kuva 11** Petikerroskuivurin periaatekaavio.

Teknologian etuina on yksinkertainen ja robusti toimintaperiaate sekä soveltuvuus matalalämpötilaiselle ylijäämälämmölle. Polttoaineen viipymäaika kuivurissa on useita tunteja riippuen mikä loppukosteuspitoisuus halutaan saavuttaa.

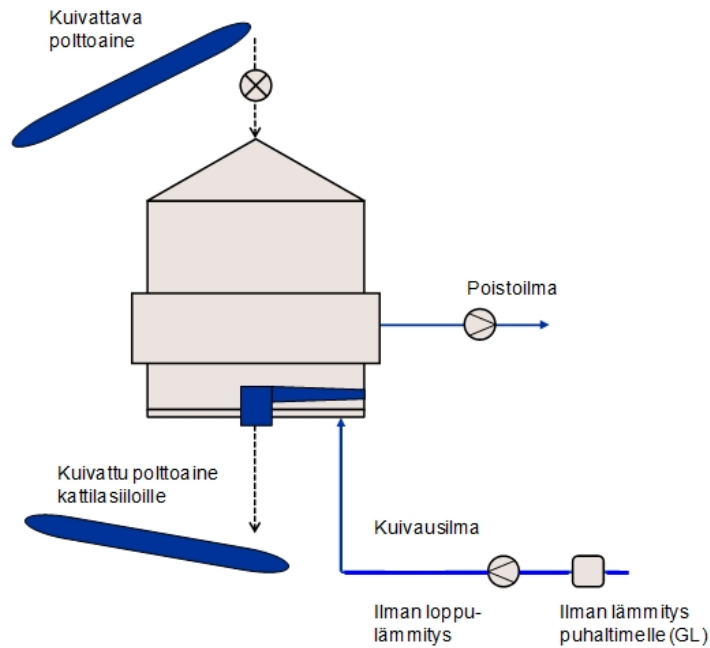
Petikerroskuivureita toimittavat mm. Akron ja Swedish Exergy Ab. Toteutukset ovat lähinnä konttikokoluokan (haihdutuskapasiteetti < 1 t/h) laitteita.

### 3.4.2 Siilokuivaus

Siilokuivauksessa polttoaine kuivataan polttoaineen varastointisiiloissa. Siilot voivat olla joko normaalikäyttöisistä kuivauskäyttöisiksi muutettuja tai erityisesti kuivureiksi suunniteltuja. Teknologia on yleisesti käytössä maataloudessa viljan kuivauksessa, mutta teollisuudessa se on harvinaisempi.

Retrofit-tyyppiset kuivurit varustetaan ilman tuloyhteillä ja polttoainekerroksen läpi johdetaan lämmitettyä ulkoilmaa. Tarvittava lisäinvestointi koostuu lämmön hyödyntämiseen liittyvästä järjestelmästä sekä ilman syöttö- ja poistojärjestelmästä.

Siilokuivauksessa voidaan hyödyntää jo olemassa olevaa polttoaineen varastointikapasiteettia ja kuljetinjärjestelmää, jolloin kuivaukseen tarvittava investointikustannus on pienempi kuin esim. viirakuivurilla.



**Kuva 12 Siilokuivurin periaatekaavio.**

Tarvittava laitteisto koostuu lähinnä ilmapuhaltimista ja niiden oheislaitteista, ilma/vesi-lämmönvaihtimista, ilmakanavista, kuivauslämmön siirtoputkistosta (vesi+glykoli -kiertopiiri) sekä ilmanjakorakenteista siilon pohjalla (esim. suomulevyarina).

Ilma voidaan syöttää siiloon esim. pohjan tai sivujen läpi poratuilla kanavilla ja poistaa siilon yläosaan tehdyistä ilma-aukoista. Polttoaineen viipymäaika riippuu siilon ajotavasta, käytännössä se on n. 10–20 h. Pitkän viipymäajan ansiosta kuivauslämpönä voidaan käyttää matalia lämmönlähteitä (50–80 °C).

Siilokuivurin etuina voidaan pitää kaupallisia kuivureita alempaa investointikustannusta johtuen olemassa olevien rakenteiden hyödyntämisestä ja soveltuvuutta matalille lämmönlähteille pitkän viipymäajan ansiosta.

Teknologia vaatii tosin vielä tutkimus- ja kehityspanostusta ja täyden kokoluokan toteutukseen liittyy lukuisia kehityksellisiä riskitekijöitä. Kuivausprosessin kannalta nämä ovat kytköksissä ilman käyttäytymiseen (esim. epätasainen jakautuminen tai kanavoituminen), kosteuden siirtymiseen (kosteus ei poistu siilosta tai ilma ei täysin absorboi haihtuvaa kosteutta) sekä polttoainepatjan käyttäytymiseen (holvaantuminen). Myös ilman syötön optimaalinen suunnittelu vaatii kehitystyötä.

Siilokuivauksessa rajoittavana tekijänä ei yleensä ole kuivausviive, vaan tarvittavan lämmön siirtäminen polttoainekerrokseen. Kuivausilman määrää rajoittaa se, että ilman nopeutta ei voida nostaa liian korkeaksi leijumisen estämiseksi ja polttoainepedin painehäviöiden minimoimiseksi. Optimaalinen ilman nopeus polttoaineesta riippuen vaihtelee välillä 0,2–0,5 m/s.

Nakkilan Konepaja Oy (nykyinen Nakkila Boilers Oy) on aikaisemmin toimittanut kattilalaitoksia, joissa on yhtenä optiona ollut polttoaineen kuivaus siilokuivurissa laitoksen yhteydessä. Myös maatalouteen toimitettuihin viljasiiloihin on tehty muutostöitä, jotka ovat mahdollistaneet biopolttoaineen siilokuivauksen (esim. Antti-Teollisuus Oy:n toimesta).

### 3.4.3 Aumakuivaus

Aumakuivauksessa polttoaine varastoidaan ja kuivataan kausittaisesti voimalaitosalueella ns. aumoissa, jotka ovat muodoltaan mahdollisimman korkeita ja kartion muotoisia tai teräväharjaisia avoimia polttoainekasoja. Kuivaus aloitetaan tyypillisesti keväällä ja sitä jatketaan aina loppusyksyyn saakka. Aumakuivauksen toimivuutta on kokeiltu esim. Kokkolan Voiman Oy:n voimalaitoksella, jonka aumakuivauslaitteisto on esitetty kuvassa 13.

Polttoainetta kuivataan aumaan syötettävän lämmitetyn ilman avulla. Auma on tyypillisesti avoin, koska peittämisen on todettu estävän kosteuden poistumista aumasta. Lisäksi sen on todettu lisäävän mikrobitoimintaa aumassa ja täten kuiva-ainetappioita biopolttoaineessa. Näin ollen auma kuivuu tyypillisesti sisältä hyvin, mutta pintakerroksen kosteuspiitoisuus kasvaa sisältä haihtuvan veden kulkeutumisen ja sadeveden kertymisen seurauksena. Erityisesti sateisen ja kostean kesän aikana tämä on ongelmallista.

Kuivausilma johdetaan aumaan ilmanakanavien ja niissä olevien ilmanjakoreikien kautta. Kanavat voidaan asettaa esim. poikittain olevien betonipilarien päällä, jolloin ilma leviää esteettä aumaan. Kuivauksen tarvitsema laitteisto koostuu pääsääntöisesti ilmanakanavista (esim. merikontit), tuloilmapuhaltimista sekä ilma/vesi -lämmönvaihtimista.

Lämmönlähteenä voidaan käyttää saatavilla olevia matalalämpötilaisia lämmönlähteitä. Kokkolassa käytettävän aumakuivurin kuivauslämpötila on n. 50 °C ja lämmönlähteenä käytetään läheisen rikkihappotehtaan sekundäärilämpöä.



**Kuva 13** Biopolttoaineauma Kokkolan Voiman voimalaitosalueella.  
**Auman mitat: pituus n. 140 m, leveys n. 40 m ja korkeus n. 15 m.**

Auman muoto rajoittaa siinä kuivattavan polttoaineen määrää, joten tyypillisesti aumattavan polttoaineen osuus voimalaitoksen polttoainetehosta on varsin pieni, n. 10–15 %. Myös sääolot vaikuttavat kuivauksen lopputulokseen heikentävästi etenkin pintakerroksen kostumisen kautta. Samalla polttoaine kuivuu epätasaisesti ja se on sekoitettava märän polttoaineen kanssa ennen polttoa.

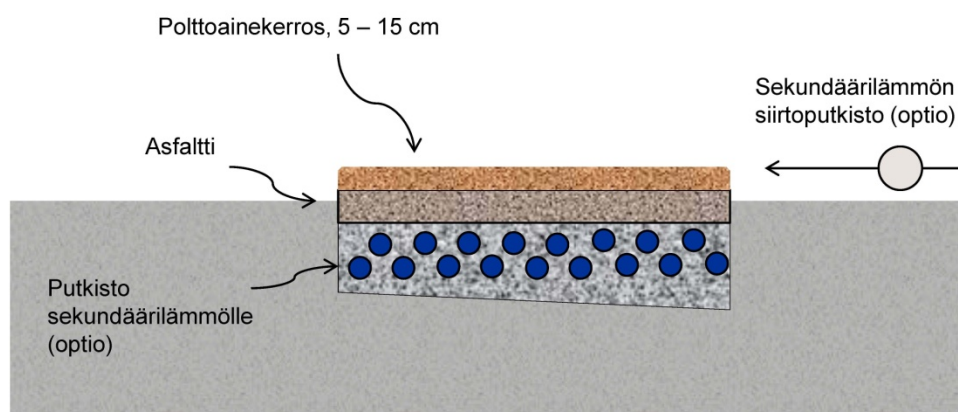
Aumakuivauksen heikkouksina voidaan pitää keskimääräistä pienempää kuivauskapasiteettia, pitkää kuivausaikaa ja pintakerroksen altistumista sääoloille. Etuja ovat verrattain matala investointikustannus vaikkakin kuivauksella saavutettava hyöty on alhainen.

### 3.4.4 Kenttäkuivaus

Toinen käytetty kausittainen kuivausmenetelmä on kenttäkuivaus asfalttikentällä. Tässä polttoaine siirretään kuivauskentälle n. 5–15 cm kerrokseksi ja se kuivuu auringon säteilylämmön myötä normaaleissa kesän sääolosuhteissa muutamassa vuorokaudessa. Kosteus siirtyy auringon säteilyn ja tuulen vaikutuksesta ulkoilmaan. On myös mahdollista kierrättää kentän alla olevissa putkissa lämmitettyä vettä mikäli kuivumista halutaan tehostaa. Lämpö voidaan myös tuottaa aurinkolämpökeräimillä tai kentän läheisyydestä olevilla ylijäämälämpövirroilla. Kuivatavan materiaalin kääntely esim. pyöräkuormaajalla tehostaa kuivausta edelleen.

Metsähakkeen kenttäkuivausta asfaltilla on käytetty mm. Hyötypaperi Oy:n Valkealan tehtaalla. Valkealassa on käytetty ainoastaan auringon passiivista asfalttiin siirtämää lämpöä eikä hukkalämmön kierrättämistä kentän alla ole todettu kannattavaksi menetelmäksi. Polttoainekerrosta on käännetty useita kertoja vuorokaudessa. Kenttäkuivaus on todettu kannattavaksi, koska käytettävä infrastruktuuri on laitoksella olemassa.

Hyötypaperi Oy:n kenttäkuivuriin liittyvien tutkimusten mukaan kuivausajan ollessa 4 vrk saavutettiin 5 cm kerrospaksuudella parhaimmillaan kosteuspitoisuuden muutos lähtökosteudesta 55 % loppukosteuteen 25 %. Kerrospaksuuden ollessa 15 cm saavutettu loppukosteus oli ainoastaan 40 %. Sateiden vaikutuksen huomattiin olevan merkittävämpi alhaisemilla kerrospaksuuksilla.



**Kuva 14** Kenttäkuivauksen periaatekaavio.

Kenttäkuivausta käytetään yleisesti myös palaturpeen tuotannossa. Kuivaus tapahtuu turpeen tuotantoalueella ja palaturve kuivataan yleensä vähintään 35 % kosteuspitoisuuteen. Menetelmän kuivauskausi kestää sääoloista riippuen touko-kesäkuusta elokuuhun.

Kenttäkuivauksen etuna voidaan pitää aumakuivaukseen verrattuna lyhyempää kuivumisaikaa. Sääoloista riippuen kuivuminen kestää 1–4 vuorokautta. Kenttäkuivausta voidaan käyttää myös erityisen matalilla lämmönlähteillä (20–30 °C) ja mikäli näitä on rajatta saatavilla, se soveltuu hyvin polttoaineen käytettävyyttä parantavaksi esikäsittelymenetelmäksi. Haittana on lähinnä suuri tilan tarve ja tämän lisäksi polttoainepatjaa on säännöllisesti käännettävä suotuisan kuivausvaikutuksen aikaansaamiseksi. Kuten aumakuivauksessa, paikalliset sääolosuhteet voivat heikentää kuivaustuloksia.

Kuivaus- teknologiat	Siilo- kuivuri	Auma- kuivaus	Kenttä- kuivaus	Petikerros- kuivaus
Viipymäaika (h)	10 – 30	4000 – 6000	48 – 96	10 – 40
Kuivauslämpötila (°C)	30–80	50–60	5–40	50–80
Kerroksen pinta-ala (m <sup>2</sup> )	150–700	3000–5500	1–2 ha	10–30
Kerroksen paksuus (m)	2–8	8–15	0,05–0,15	0,5–1,5
Kokoluokka (t/h H <sub>2</sub> O)	5–20	0,8–1	2–8	0,1–0,5
Loppukosteus (%)	20–30	15–40	25–40	15–25

**Taulukko 3 Yhteenveto kerroskuivausmenetelmien ominaisuuksista. Tiedot perustuvat Konsultin kokemuksiin ja laiteoimittajien tietoihin. Auma- ja kenttäkuivaus perustuen lähteisiin [2] ja [8].**

Taulukossa 3 on esitetty yhteenveto erilaisten kerroskuivausmenetelmien teknisistä suoritusarvoista. Menetelmistä siilokuivurilla on mahdollista saavuttaa hieman muita menetelmiä suurempi haihdutuskapasiteetti, mikäli siilo on kooltaan riittävän suuri.

Menetelmien viipymääjat ovat useita kymmeniä tunteja lukuun ottamatta aumakuivausta, jossa kuivausaikana on koko kuivauskausi keväästä syksyyn. Loppukosteuksiltaan menetelmät ovat samalla tasolla, lähellä 20 % kosteuspitoisuutta.



3.5 Yhteenveto menetelmistä

Kuivuriteknologia	Hyödyt	Haitat
<b>Rumpukuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Useita laitetoimittajia</li> <li>– Joustavuus syöttömateriaalin suhteen</li> <li>– Energiatehokkuus</li> <li>– Suuri kuivauskapasiteetti</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Päästöjen käsittely: VOC-, haju- ja partikkelipäästöt</li> <li>– Paloturvallisuusriskit</li> <li>– Vaatii korkealämpötilaisen lämmönlähteen</li> </ul>
<b>Flash-kuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Useita laitetoimittajia</li> <li>– Nopea kuivumisaika ja kompakti rakenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vaatii korkealämpötilaisen lämmönlähteen</li> <li>– Päästöjen käsittely: VOC-, haju- ja partikkelipäästöt</li> <li>– Korroosio- ja eroosio-ongelmat</li> </ul>
<b>Viirakuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Useita laitetoimittajia</li> <li>– Joustavuus syöttömateriaalin suhteen</li> <li>– Soveltuvuus ylijäämälämmölle</li> <li>– Helppo säädettävyys ja hyvä käytettävyys</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Tilan tarve</li> <li>– Omakäytösähkön kulutus</li> <li>– Investointi- ja huoltokustannukset</li> </ul>
<b>Petikerroskuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Soveltuvuus ylijäämälämmölle</li> <li>– Yksinkertainen rakenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Laitetoimittajia vähäisesti</li> <li>– Matalat kosteuspitoisuudet epärealistisia</li> </ul>
<b>Aumakuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Soveltuvuus ylijäämälämmölle</li> <li>– Yksinkertainen rakenne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kuivaus ulkoilmassa: kausirajoitteinen, epätasainen kuivuminen</li> <li>– Tilan tarve</li> <li>– Pölyäminen</li> <li>– Pitkä kuivumisaika</li> </ul>
<b>Kenttäkuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Soveltuvuus ylijäämälämmölle (erityisesti matalille lämpötiloille)</li> <li>– Hyödyntää olemassa olevia rakenteita</li> <li>– Voidaan hyödyntää aurinkolämpöä</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kuivaus ulkoilmassa: kausirajoitteinen, sääolot</li> <li>– Tilan tarve</li> <li>– Polttoainekerroksen käänteleväminen</li> </ul>
<b>Siilokuivuri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Soveltuvuus ylijäämälämmölle</li> <li>– Hyödyntää olemassa olevia rakenteita</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kehitysriskit</li> <li>– Laitetoimittajia vähäisesti</li> <li>– Matalat kosteuspitoisuudet epärealistisia</li> </ul>

Taulukko 4 Kuivausmenetelmien tyypilliset hyödyt ja haitat.

Seuraavassa on käyty läpi olennaisia seikkoja, jotka on syytä tarkastella ennen mahdollista investointia biopolttoaineen kuivausteknologiaan.

#### 4.1 Päästöt

---

Biomassan kuivauksessa huomattavimmat päästöt ovat kiinteät hiukkaspäästöt (PM) mukaan lukien pölypäästöt, VOC-päästöt sekä hajupäästöt. Biopolttoaineen kuivaukselle ei ole tällä hetkellä sitovia päästörajoja mikäli kuivaus tapahtuu väliaineena olevan ilman suoralla konvektiolla. Mikäli väliaineena käytetään savukaasua, määräytyvät päästörajat polton päästölähteen ja käytetyn polttoaineen mukaan. Kuivaukselle pätee kiinteiden biopolttoaineiden käsittelyyn ja biopohjaisen pelletin tuotantoon laadittu BAT-asiakirja [9]. Kuivauksen päästöjä myös on tutkittu useissa kirjallisuusviitteissä (mm. lähteet [3], [9] ja [10]).

Biopolttoaineet sisältävät luonnostaan ns. VOC-yhdisteitä (haihtuvat orgaaniset yhdisteet), joita ovat esim. heksanoli, pentanoli ja monoterpeni. Nämä päästökomponentit vapautuvat luonnollisesti metsistä sekä puun sisä- ja ulkovarastoinnin yhteydessä.

Vapautuvien päästöjen määrä kasvaa lämpötilan noustessa. Matalalämpötilaisessa kuivauksessa (< 100 °C) tai pelkän biomassan varastoinnin yhteydessä päästöt ovat erittäin vähäisiä ja verrattavissa lähinnä luonnollisiin päästöihin koska terminen hajoaminen on pientä. Kokeellisesti on havaittu VOC-päästöjen muuttuvan merkittäviksi lämpötilan noustessa yli 175 °C:een. Lämpötilan noustessa yli 275 °C:een päästöt kasvavat eksponentiaalisesti.

VOC-päästöihin vaikuttaa myös kuivausaika, kuivausilman määrä sekä kuivauksen loppukosteuspitoisuus. Kuivattaessa biomassaa alle 10 % kosteuteen päästöt kasvavat edelleen.

Hiukkaspäästöt riippuvat lähinnä käytetystä kuivausmenetelmästä. Mikäli kuivauskaasuna toimii biomassaa polttavasta kattilasta peräisin oleva savukaasu, voivat hiukkaspäästöt olla merkittäviä. Kerroskuivausmenetelmillä päästään alhaisiin päästötasoihin johtuen polttoainepedin suodattavasta vaikutuksesta.

Biopolttoaineiden käsittelyyn liittyvän polttoaineketjun eri kohdissa ilmenee yleisesti kuivan polttoaineen pölyämistä. Etenkin ulkovarastoinnin yhteydessä tuulen vaikutuksesta aiheutuvat pölypäästöt ovat merkittävä haitta. Kuivauksessa näitä voidaan vähentää esim. kuivaamalla polttoaine suljetussa tilassa ja tarpeen mukaan esim. vesisumutuslaitteistolla poistoilmakanavassa.

Biomassan kuivauksessa erityiset puhdistuslaitteet tulevat kyseeseen lähinnä kuivauksen tapahtuessa savukaasuilla ja lämpötilan noustessa yli 150 °C:een. Tällöin kyseeseen tulevat (multi)syklonit, kuitusuodattimet, sähkösuodattimet ja savukaasupesurit.

Ilmalla tai savukaasulla toimivassa kuivauksesta poistuvan kaasun sisältämät kondensoituvat yhdisteet ovat pääsääntöisesti kaasufaasissa. Mikäli poistokaasua lauhdutetaan, esim. lämmöntalteenoton myötä, pitää myös lauhdevedet käsitellä ja viemäroidä. Käytettyjä menetelmiä ovat mm. saostaminen, neutralisointi ja biologinen käsittely.

## 4.2 Paloturvallisuus

---

Kuivauksen palo- ja räjähdysriskit liittyvät kuivattavasta materiaalista vapautuvien tulenarkojen kaasujen syttymiseen sekä pölypilven muodostumiseen ja syttymiseen. Lisäksi kuivattavassa aineessa tapahtuvat biologiset reaktiot voivat kerroskuivauksessa aiheuttaa itsesyttymisen ja kytöpalon. Paloriskiä lisäävistä tekijöistä merkittävin on kuivauskaasun happipitoisuus, jonka kriittisenä rajana pidetään n. 10 %-til.

Kuivan polttoaineen käsittelyn yhteydessä ilmenee väistämättä puun hienojakoisen aineksen pölyämistä. Pöly palaa syttyessään nopeasti ja aiheuttaa voimakkaan ilman lämmönlaajenemisen sekä paineen nousun.

Pölyräjähdys vaatii käytännössä tarpeeksi tiheän pölypilven (pölypitoisuus  $> 20 \text{ g/m}^3$ ), riittävän ilman happipitoisuuden ja sytytyslähteen. Periaatteessa ilman normaali happipitoisuus riittää palon alkamiseen. Kriittisenä sytytyslämpötilana on pidetty 100–125 °C. Syttyminen voi tapahtua esim. sähkö- tai hankauskipinästä sekä kuljettimien kuumenneesta kohdasta.

Pölyräjähdysriskin rajoittamiseen on useita keinoja, jotka tulee selvittää tapauskohtaisesti. Tärkeintä on kuivausprosessin tilan jatkuva monitorointi ja säätö. Poistoilman häkäpitoisuutta seuraamalla syttymiset voidaan paikallistaa ja tehokkaasti sammuttaa. Lisäksi kuivaukseen käytetty tila voidaan eristää palo-osastoinnilla.

Kuivaa polttoainetta ei tulisi säilöä pitkään pölyräjähdysriskin vuoksi. Lisäksi varastointi kasvattaa polttoaineen itsesyttymisriskiä erityisesti suuren mittakaavan säilytyksessä.

## 4.3 Kuivauksen kannattavuus

---

Monet tekijät vaikuttavat energiatehokkuusmielessä toteutettavan kuivauksen kannattavuuteen:

- Korvattava polttoaine: biomassa / fossiilinen
- Polttoaineen ja sähkön hintataso
- Päästöoikeuden hinta
- Käytävissä oleva lämmönlähde
- Olemassa oleva infrastruktuuri, esim. polttoaineen käsittelyjärjestelmä, sen mahdollinen hyödyntäminen
- Mahdolliset investointituet energiatehokkuuden edistämiseen
- Arvokkaammat lopputuotteet (esim. pyrolyysiöljy)

Kuivuri-investointia harkittaessa ensin on syytä selvittää, millä lämmönlähteellä kuivaus toteutettaisiin. Mikäli ylijäämälämpöä on käytävissä, koostuvat käyttölämmön kustannukset lähinnä vesipiirin pumppauskuluista. Tällöin joudutaan tosin käyttämään verrattain alhaista kuivauslämpötilaa ja kuivurin kapasiteetti voi jäädä pieneksi. Kuivurin koko ja sitä myötä investointikustannukset myös kasvavat.

Kuivauslämmön lämpötilalla on oleellinen vaikutus tarvittavaan kuivausilman määrään ja puhalluskapasiteettiin, polttoaineen viipymäaikaan sekä kuivurin kokoon ja haihdutuskapasiteettiin. Kuivauksen suoritusarvojen kannalta lämpötilan tulisi olla mahdollisimman korkea, mutta samalla joudutaan käyttämään arvokkaampaa lämmönlähdettä, esim. kaukolämmön me-

novettä tai matalapainehöyryä. Kuivauslämpötilan nosto yli 150 °C aiheuttaa myös tarpeen syntyvien VOC-päästöjen puhdistamiseksi, mikäli kasvattaa investointia.

Kuivuri-investointia pienentää olemassa olevat rakenteet ja niiden hyödyntäminen. Esim. asfalttikentällä toteutettu kevään ja kesän aikainen kenttäkuivaus on todettu kannattavaksi, mikäli hyödynnettävissä oleva kenttä on olemassa. Myös laitoksen yhteydessä olevien varastointisiilojen modifiointi kuivureiksi voi mahdollistaa kaupallisia tekniikoita paremman kannattavuuden.

Kaupallisesti käytetyimpiä kuivausmenetelmiä biopolttoaineelle ovat rumpukuivurit ja viirakuivurit. Viimeaikaisten toteutusten valossa investoinnit ovat kannattavia mikäli ne toimivat arvokkaamman lopputuotteen jatko-prosessoinnin yhteydessä.

Pelkästään energiatehokkuuden tehostamiseksi ja laitoksen suorituskyvyn kohentamiseen tähtäävillä kuivuri-investoinneilla on kannattavuuden saavuttamisen todettu olevan haastavampaa tämän hetkisen polttoaineen ja päästöoikeuden hintatasoilla (helmikuu 2013) sekä kaupallisilla teknologioilla. Erityisesti päästöoikeuden nykyinen alhainen hinta ei ole riittävän kannustava fossiilisten polttoaineiden korvaamiseen kuivatulla biopolttoaineella.

Energiakatselmoinnissa suoritetaan perusteellinen selvitys kohteen energian ja veden käytöstä sekä niiden tehostamismahdollisuuksista. Tarkoituksena on löytää keinoja kohteen energiankulutuksen sekä siitä aiheutuvien kustannusten ja päästöjen vähentämiseen.

Polttoaineiden kuivausta voidaan pitää yhtenä potentiaalisena säästömahdollisuutena teollisuuden polttolaitoksien katselmoinnissa. Tässä raportissa esitettyihin teknologioihin tehdyt kuivuri-investoinnit voivat toimia kuivauksen toimenpide- ja jatkoehdotuksina.

Kuivauksen säästöpotentiaalia arvioitaessa seuraavat seikat ovat olennaisia:

- Mitä kuivattavia polttoaineita laitokselta löytyy ja mikä on niiden kosteuspitoisuuden vuotuinen vaihtelu?
- Mihin loppukosteuteen polttoaineita halutaan kuivata?
- Mikä on kuivattavien polttoainepartikkelien kokoluokkajakauma?
- Mitä käytettävissä olevia ylijäämälämpövirtoja laitokselta löytyy?
- Mikä on ylijäämälämpövirtojen vuotuinen lämpötilan ja massavirran vaihtelu?
- Mikä on kohteen ulkoilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden vuotuinen vaihtelu?

Olennaisena kriteerinä kuivauspotentiaalin selvittämisessä on ylijäämälämpöjen kartoittaminen. Käytettävissä olevat lämpövirtojen kapasiteetti ja laatu määrittävät saavutettavan kuivauslämpötilan ja asettavat reunaehdot kuivaukselle soveltuville teknologioille. Myös kuivauksen lämpöenergian ja omakäyttösähkön kulutus riippuu kuivauslämpötilasta. Kuivauksen käyttölämmön pumppauskustannusten minimoimiseksi olisi syytä käyttää mahdollisimman lähellä kuivuria olevia ylijäämälämpövirtoja.

Myös kuivattavan materiaalin alku- ja loppukosteuksien sekä massavirtojen mukaan määräytyvä kuivauksen haihdutuskapasiteetti on olennainen selvitettävä seikka. Pääsääntöisesti polttolaitoksilla käytettäviä biopolttoaineita ei ole syytä kuivata alle 20 % kosteuteen pelkästään energiatehokkuusmielessä kuivurin koon ja kustannusten nousun takia. Tämä mahdollistaa myös yksinkertaisempien ja tapauskohtaisesti räätälöityjen teknologiaratkaisuiden käytön (esim. aumakuivaus ja siilokuivaus).

Myös kuivattavan materiaalin alkukosteudella on merkitystä. Yleissääntönä voidaan todeta, että mitä kosteampaa polttoaine on, sitä kannattavampaa sen kuivaaminen tulee olemaan. Tällöin saavutetaan hyvä polttoainesäästöpotentiaali ja kuivaamisen myötä myös polttoaineen käytettävyyden ja käsittelyn paraneminen on huomattavaa.

Projektiin osallistuville yhteistyöyrityksille on työn aikana laadittu toimenpide-ehdotukset (TPE), joiden myötä he voivat arvioida kohteidensa potentiaalia kuivausinvestoinnille ja tehostaa polttoaineiden käyttöä.

Mukana olleiden yritysten kohteet olivat:

- TPE1: Kalkkitehdas, sahanpurun kuivaus petikerroskuivurilla
- TPE2: Sellutehdas, biopolttoaineen kuivaus viirakuivurilla
- TPE3: Lauhesähkövoimalaitos, hiilimyllyä ennen olevan savukaasuluvon tehostettu toiminta

Kalkkitehtaalla kuivauksen kehittämiskohteena oli tehtaan kiertouuni, jossa kuivattavana polttoaineena on teollisuudesta peräisin oleva sahanpuru. Raaka-aine on peräisin tuoreesta puusta, joten sen kosteuspitoisuus on varsin korkea (n. 50–57 %). Tavoitteena olisi kuivata sahanpurua tehtaan kiertouunissa tapahtuvaan kivihiilen seospolttoon ja näin ollen laajentaa käytettävien polttoaineiden kirjoa ja lisätä ylijäämälämmön talteenottoa uunissa. Kuivatun polttoaineen osuus polttoainetehosta on laskelmissa n. 3 MW.

Kuivauksen lämmönlähteenä olisi mahdollisuus käyttää kiertouunin vaipan läpi uunirakennuksen sisäilmaan johtuvaa hukkalämpöä. Konsultin näkemys on, että soveltuvin menetelmä vaipan lämmöntalteenottoon olisi rakennuksen katonrajan sisäilman puhaltaminen kuivurille. Näin ollen kuivausilman arvioitu lämpötila olisi n. 55 °C.

Kuivauskonseptiksi hahmoteltiin olemassa olevan polttoainekontin muuttamista petikerroskuivuriksi ja mahdollisuutta useampien konttikuivurien hankintaan.

Sellutehtaan kuivauskohteena oli yhtiön tehtaan leijupetikattilassa poltettavat biopolttoaineet – kuori, metsähake ja sahanpuru. Näiden kosteuspitoisuus vaihtelee välillä 50–60 %. Tavoitteena olisi kuivata biopolttoaineita viirakuivurilla tehdasalueella sijaitsevassa leijupetikattilassa turpeen seassa poltettavaksi. Kuivatun polttoaineen osuus polttoainetehosta on laskelmissa n. 120 MW.

Kuivauksen lämmönlähteenä olisi mahdollisuus käyttää sellutehtaan prosessista tulevia lämpimiä vesiä (75–80 °C). Prosessivedet kerättäisiin useammasta kohteesta ja siirrettäisiin kiertovesipiirillä kuivurille. Näin ollen kuivausilman arvioitu lämpötila olisi n. 70 °C.

Lauhesähkövoimalaitoksella ei koettu mielekkääksi tehostaa hiilimyllyillä tapahtuvaa kivihiilen kuivausta suhteellisen kuivan polttoaineen ja sen syttymisriskin takia. Sen sijaan hahmoteltiin kuinka savukaasuluvon toimintaa voitaisiin tehostaa ilman kierrätyksellä.

Tavoitteena olisi lisätä savukaasun jäähdytystä lisäämällä luvon läpi kierrätettävää palamisilmaa. Kiertoilmalla siirrettäisiin savukaasujen lämpöä syöttöveeten ja näin ollen parannettaisiin laitoksen sähköhyötysuhdetta vähentämällä väliottohöyryn kulutusta.

Savukaasun loppulämpötilaa rajoittaa happokastepiste ja suunnittelukriteerinä tuleekin huomioida tuloilman ja poistuvan savukaasun lämpötilojen summa materiaalin lämpötilan arvioimiseksi. Näin ollen samalla kun savukaasua jäähdytetään, tulisi ilman lämpötilaa pyrkiä nos-

tamaan esim. hukkalämpöä käyttämällä. Myös höyryluvon käyttö ilman esilämmittämiseksi mahdollistaisi savukaasun tehokkaamman jäähdyttämisen.

Seuraavassa on esitetty toimenpide-ehdotusten mukaisten vaadittujen investointien ja niiden alustavien suoritusarvojen mukaisen polttoainesäästön määrittämät karkeat kannattavuuslukumat.

Laskelmissa on käytetty kustannuslajikkeiden hintatietoina biopolttoaineelle 20 €/MWh, kivihiilelle ja turpeelle 15 €/MWh, sähkölle 80 €/MWh sekä päästöoikeudelle 12 €/t hintatasoa. Päästöoikeuden todellinen vallitseva hintataso on alhaisempi, mutta laskelmissa on oletettu siinä olevan hintapaineita.

Tuloksista huomataan viirakuivurin suuremman kuivauskapasiteetin ja näin ollen paremman polttoainesäästön myötä saavutettava petikerroskuivausta parempi kannattavuus. Petikerroskuivurin kannattavuutta laskee myös käytössä olevan kuivauslämmön alhainen lämpötilataso sekä korvattavan polttoaineen (kivihiili) alhainen hintataso. Luvon ilmakierron tehostamisessa päästään hyvään kannattavuuteen johtuen pienemmästä investointitarpeesta (ilmapuhallin ja lämmönsiirrin) kuin muissa toimenpide-ehdotuksissa.

Toimenpide-ehdotukset	Yksikkö	TPE 1	TPE2	TPE3
Investointi	k€	120	7000	130
Polttoainesäästö	k€/a	- 138	1723	78
Säästö päästöoikeuksissa	k€/a	176	31	21
Omakäyttösähkö	k€/a	20	395	1,0
Huoltokustannukset	k€/a	1,2	210	1,3
Kannattavuus	k€/a	17	1118	97
Takaisinmaksuaika (suora)	a	7,1	6,3	1,3

**Taulukko 5 Kuivauksen toimenpide-ehdotuksen mukaisten investointien kannattavuus yhteistyöyrityksille.**





Tässä selvityksessä on käyty läpi biopolttoaineille soveltuvia kuivausmenetelmiä. Myös kivihiilen kuivausta on käsitelty. Selvityksen tavoitteena on ollut tuottaa tiivistetty teknologiakatsaus nykytilanteen mukaisista teollisuuden polttolaitoksille soveltuvista menetelmistä ja vertailla niiden ominaisuuksia teknis-taloudellisin kriteerein.

Biopolttoaineiden kuivauksella on yleisesti todettu olevan suotuisia vaikutuksia niitä käytävälle polttolaitokselle. Olennaisin vaikutus on polttoaineen energiatiheyden kasvu, joka mahdollistaa polttoainesästöjä. Laitoksen tehostuneen suorituskyvyn myötä voidaan saavuttaa parannuksia myös muissa tunnusluvuissa kuten kattilahiötysuhteessa ja laitoksen omakäyttösähkön kulutuksessa.

Energiatehokkuusmielessä toteutettu kuivaus asettaa reunaehdoja taloudellisesti soveltuville kuivausmenetelmille. Kuivauslämpönä on taloudellisista syistä syytä käyttää lähellä ja hyödynnettävissä olevia matalalämpötilaisia ylijäämälämpövirtoja (n. 50–80 °C). Kuivauslämpötilan nousun myötä ongelmaksi muodostuu vaadittu VOC-päästöjen puhdistus, joka kasvattaa kuivuri-investointia.

Kuivauksessa syntyvät päästöt koostuvat lähinnä kiinteistä partikkelipäästöistä ja VOC-päästöistä. VOC-päästöjen on todettu muuttuvan merkittäviksi lämpötilan noustessa 175 °C:een. Tätä alhaisemmilla lämpötiloilla päästöt ovat verrattavissa luonnollisiin päästöihin johtuen alhaisesta termisestä hajoamisesta. Biopolttoaineen kuivaukselle ei ole tällä hetkellä sitovia päästörajajoja mikäli kuivaus tapahtuu väliaineena olevan ilman suoralla konvektiolla. Mikäli väliaineena käytetään savukaasua, määräytyvät päästörajat polton päästölähteen ja käytetävän polttoaineen mukaisesti.

Yleisimpiä kuivausmenetelmiä biopolttoaineille ovat rumpu- ja viirakuivurit. Myös erilaisia virtaus- ja kerroskuivausmenetelmiä käytetään. Rumpu- ja virtauskuivureilla vaaditaan arvokkaampaa kuivauslämmönlähdettä (> 150 °C), esim. savukaasua tai matalapainehöyryä, mikä kasvattaa käyttölämmön kustannuksia ja heikentää niiden kannattavuutta energiatehokkaassa kuivauksessa.

Ylijäämälämmölle soveltuvia kuivurityyppejä ovat lähinnä viirakuivurit sekä erilaiset kerroskuivurit. Viirakuivurien etuna on niiden hyvä kaupallinen saatavuus, korkea käytettävyys, helppo säädettävyys ja alhainen palovaarariski. Kerroskuivurit ovat useimmiten tapauskohtaisesti räätälöityjä teknologiaratkaisuja. Niiden etuja ovat yksinkertainen rakenne ja usein viirakuivureita alhaisemmat investointikustannukset. Tosin kaupallisia kerroskuivureita on saatavilla vain muutamilta toimittajilta ja varsin pienessä kokoluokassa. Viirakuivurien heikkouksia ovat puolestaan kerroskuivureita suuremmat investointi- ja huoltokustannukset.

Erityisesti matalalämpötilaisille lämmönlähteille soveltuvat kerroskuivausmenetelmät ovat energiatehokkuuden puolesta kiinnostavia. Joitain menetelmiä teollisuudessa jo onkin käytössä, kuten aumakuivaus ja kenttäkuivaus. Muiden kuivausmenetelmien kehittämiseksi olisi tarvetta julkis- tai yritysrahoitteisille demonstraatiolaitoksille, joissa investointikustannuksiltaan alhaisia ja toimivia kuivausmenetelmiä voitaisiin tutkia.

Kuivuri-investointia harkittaessa on syytä ensin kartoittaa käytettävissä olevat ylijäämä-  
lämpövirrat. Käyttölämmön lämpötila määrittää saavutettavan kuivauslämpötilan ja asettaa  
reunaehdot kuivaukselle soveltuville teknologioille. Myös kuivauksen lämpöenergian ja oma-  
käyttösähkön kulutus sekä kuivauksessa syntyvät päästöt riippuvat kuivauslämpötilasta. Kuivu-  
rien toimiessa alhaisilla lämmönlähteillä, käyttölämmön kustannukset laskevat, mutta samalla  
kuivurin koko ja investointikustannukset kasvavat. Myös kuivausilman tarve kasvaa kasvattaen  
puhallintehoa ja käyttökustannuksia.

Kuivuriin tehtyä investointia voidaan alentaa hyödyntämällä olemassa olevaa infrastruk-  
tuuria, esim. polttoaineen varastotilaa tai asfalttikenttää. Myös energiatehokkuuteen kannusta-  
villa investointituilla on merkitystä. Tämän hetkisillä polttoaineiden ja päästöoikeuden hinta-  
tasoilla (maaliskuu 2013) sekä kaupallisilla teknologioilla kannattavuuden saavuttamisen on ko-  
ettu olevan haastavaa, mikäli kuivaus toteutetaan pelkästään energiatehokkuuden tehostami-  
seksi ja laitoksen suorituskyvyn kohentamiseksi. Arvokkaampien lopputuotteiden (pyrolyysiöljy,  
kaasutuksen tuotekaasu, pelletit) tuottamisessa kuivaus voi olla taloudellisesti kannattavaa tai  
prosessi voi vaatia kuivausta.



## CASE: aumakuivaus, Kokkola

---

Kokkolan Voima Oy:n voimalaitoksella on käytetty metsähakkeen aumakuivausta jo vuodesta 2003 lähtien. Voimalaitos on lämpöteholtaan n. 65 MW ja sähköteholtaan n. 20 MW metsähaketta, puusivutuotteita, ruokohelpeä sekä turvetta polttava laitos.

Kuivuri on voimalaitosalueelle rakennettu alkujaan panostyyppinen auma, jonka vuotuinen kapasiteetti on 50 000 i-m<sup>3</sup> kuivattavaa puupolttoainetta. Tämä vastaa n. 30 000–50 000 MWh kosteaa metsähaketta eli kuivaukseen voidaan käyttää 10 % laitoksen vuotuisesta polttoaineesta (energiassa). Aumaan syötetään n. 50 °C kuivausilmaa alla olevien merikonttien kautta. Kuivauksen lämmönlähteinä käytetään Kokkolan rikkihappotehtaan sekundäärilämpöä ja voimalaitoksen vastapainelämpöä mikäli sen käyttö on voimalaitoksen ajotavan mukaisesti kannattavaa.

Kuivauksen käyttöenergia koostuu puhaltimien sähkön kulutuksesta ja kuivausilmaan siirretystä sekundäärilämmöstä kuivauksen käyttöaikana sekä muina aikoina lämmön siirtoputkistossa jäätyksen estämiseksi kierrätettävästä vedestä.

Viime aikoina kuivurin käyttöä on muutettu panostyyppisestä enemmän jatkuvatoimiseksi pienentämällä panoskokoa ja kuivausaikaa. Kuivaus on ollut käytössä lähes koko vuoden ajan lukuun ottamatta kireämpiä pakkaskelejä. Aumakuivauksella voidaan kuivata 50–60 % kosteuspitoisuudeltaan oleva märkä hake n. 30 prosentin keskimääräiseen loppukosteuteen.

Kokkolassa kuivauksen lopputulosta tutkittaessa on havaittu auman pintaa lähinnä olevien kerrosten kosteuspitoisuuksien kasvavan tulokosteudesta n. 10 prosenttia. Toisaalta auman sisällä kosteuksien on havaittu olevan erittäin pieniä: 1,0–2,5 %. Kosteuspitoisuuksien vaihtelusta ei toisaalta ole ollut haittaa, koska kuivattu polttoaine sekoitetaan muun polttoaineen joukkoon kuivauksen jälkeen.

Ongelmia Kokkolassa on aiheuttanut lähinnä polttoaineauman itsesytyminen sekä biologisen hajoamisen aiheuttamat kuiva-ainetappiot. Tämän myötä on jouduttu käyttämään pienempää aumakokoa ja lyhyempää kuivausaikaa.

Kannuste aumakuivaukselle on ollut lähinnä käytännöllinen. Se on mahdollistanut erittäin huonolaatuisten polttoainejakeiden (esim. märkien kuorien) kuivauksen polttokelpoisiksi. Varsinaista jatkuvaa kustannusseurantaa saavutettavasta kuivaushyödystä ei Kokkolassa viime aikoina ole tehty. Vuoden 2005 mukaisilla hintatiedoilla on päädytty 14–15 vuoden takaisinmaksuikaan, jolloin voidaan todeta kuivauslaitteiston investoinnin tulevan kannattavaksi voimalaitoksen käyttöiän aikana.

**Taulukko 6: Aumassa olevan polttoaineen kosteuden muutos ja lämpöarvon kasvu sekä tämän aikaansaama energianlisäys (Haikonen, 2005).**

<b>Polttoaine: metsätähdehake</b>	<b>Polttoaine</b>	<b>Vesi</b>	<b>Kuiva-aine</b>	<b>Lämpöarvo</b>
	t	t	t	MWh/t
<b>60 % alkukosteus, pa</b>	756	10162	302,4	1,70
<b>20 % loppukosteus, pa</b>	378	6100	302,4	4,09
<b>Poistuva kosteus</b>	378	4062		

Kuivausaika 15.3. - 5.10. / 6,2 kk

Haihdutuskapasiteetti 0,91 t/h

## CASE: kenttäkuivaus, Hyötypaperi Oy

Metsätähdehakkeen kuivausta asfalttikentällä on käytetty Valkealan Hyötypaperi Oy:n tuotannossa lisäämään biopolttoaineesta saatavaa hyötyä. Yritys vastaanottaa kierrätysmateriaalia ja erilaisia jättejakeita sekä valmistaa bio- ja kierrätyspolttoaineita teollisuuden tarpeisiin.

Valkealan laitoksella tuotetaan biopolttoaineita polttolaitoksille käytettäväksi. Yksikkö on perustettu vuonna 2002 ja se tuottaa n. 200 000 t biopolttoaineita vuodessa. Raaka-ainepohjana ovat metsätähteet, risut, kannot ja latvukset sekä lahopuu. Myös ruokohelpeä ja erinäisiä jättejakeita prosessoidaan.

Terminaalialueella tullessaan hakkuutähteet kuivuvat kasoissa 3–6 kuukautta, jonka jälkeen ne haketetaan varastoauomoihin. Varastoinnin aikana kosteuspitoisuus laskee 50 % lähtökosteudesta loppukosteuteen 35–40 % riippuen sääoloista.

Ongelmana hakkeen varastoinnissa on lahoamisen aiheuttamat kuiva-ainetappiot sekä hakkeen kostuminen syksyisen ja talvisin. Tämän takia biopolttoaineen tulisi kuivua kesän aikana vähintään loppukosteuteen 30 % hakkeen jalostusarvon ylläpitämiseksi talven aikana.

Yhtenä kuivausmenetelmänä Valkealassa on ollut metsähakkeen kenttäkuivaus terminaalialueen asfalttikentällä. Polttoaine levitetään 5–20 cm kerrokseksi ja sitä käännellään useita kertoja vuorokaudessa. Kuivaus on ollut käytössä aina kentän ollessa vapaana ja säiden salliessa. Käytännössä aika on rajoittunut kevään ja kesän aurinkoisille keleille. Kuivuminen tapahtuu auringon säteilyn ja tuulen vaikutuksen myötä.

Kenttäkuivaus on todettu teollisessa mittakaavassa kannattavaksi, koska tarvittava infrastruktuuri on olemassa ja hyödynnettävissä. Mikäli kuivuserä saadaan kuivattua riittävän alhaiseen kosteuspitoisuuteen, ovat kääntelyyn käytetyt työvoima- ja käyttöenergiakustannukset osoittautuneet riittäviksi.

**Taulukko 7: Kenttäkuivauksen hyötyjä 1 ha kokoisella kentällä, kun kuivattavan metsähakkeen lähtöpaino on 756 t ja lähtökosteus 60 %. Oletuksena on, että hehtaarin kentälle levitettäisiin 1400 m<sup>3</sup> haketta. Kustannuslaskennan perusta: hakkeen levitys, kääntely ja kasaus = 1708 €/ha. Metsähakkeen hinta 14 €/MWh. Hakkeen kerrospaksuus 15 cm. Kuivausaika 4 vrk. (Föhr diplomityö, 2008).**

Loppukosteus		60 %	50 %	40 %	30 %	20 %
Paino	t	756	605	504	432	378
Energiamäärä	MWh	1310	1433	1522	1591	1648
Energiamäärän lisäys	MWh	0	123	212	281	338
Kannattavuus (hyöty–tuotantokustannukset)	€	-1708	13	1257	2227	3027

**Taulukko 8:** Kenttäkuivauksen koekuivaustuloksia eri kerrospaksuuksilla (heinäkuu 2007).  
 Koejärjestely: 4 m<sup>2</sup> asfalttikenttä. Kosteuspitoisuudet on määritetty kostean ja uunissa kuivatun näytteen painoerotuksella. Kääntely-vaihtoehdossa analysoitiin ainoastaan 2 vrk:n jälkeinen kosteuspitoisuus. (Föhr diplomityö, 2008).

**5 cm kerrospaksuus**

Kuivausaika	Kosteuspitoisuus (%)	
	A	B
0 vrk	56,7	56,7
1 vrk	49,0	
2 vrk	40,7	20,2
3 vrk	27,5	
4 vrk	25,2	

**10 cm kerrospaksuus**

Kuivausaika	Kosteuspitoisuus (%)	
	A	B
0 vrk	56,7	56,7
1 vrk	54,9	
2 vrk	49,6	39,8
3 vrk	47,1	
4 vrk	46,4	

**15 cm kerrospaksuus**

Kuivausaika	Kosteuspitoisuus (%)	
	A	B
0 vrk	56,7	56,7
1 vrk	53,5	
2 vrk	53,0	44,1
3 vrk	50,4	
4 vrk	48,8	

A = pelkkä kenttäkuivaus ilman kääntelyä

B = kenttäkuivaus, jossa hakekerrosta käännettiin 3 kertaa vuorokaudessa.

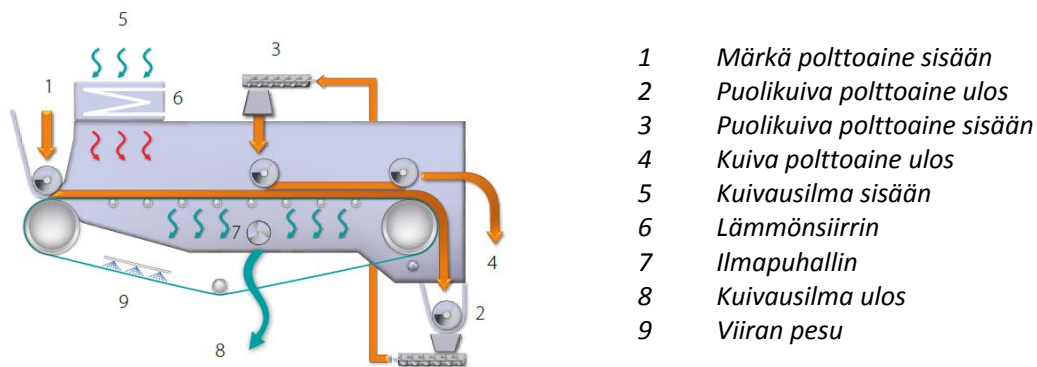
## CASE: Viirakuivuri, Stora Enso

Stora Enson Varkauden tehtailla sijaitsevalla viirakuivurilla kuivataan kosteaa biopolttoainetta läheiseen kaasutuslaitteistoon syötettäväksi. Kuivuri on Metson toimittama KUVU-malli ja se on ollut toiminnassa jo vuodesta 2009 lähtien.

Kuivaus tapahtuu tehtaan voimalaitokselta saatavan matalapainehöyryn avulla ja kuivauslämpö siirretään kuivurille erillisen vesi/glykoli -piirin avulla. Kuivausilma lämmitetään noin 100 °C:een.

Kuivattava polttoaine koostuu lähinnä metsätähdehakeesta sekä kuoresta ja sen kosteuspitoisuus vaihtelee välillä 45–65 %. Polttoaine kuivataan n. 15 % loppukosteuteen. Kuivan lopputuotteen kosteuspitoisuutta säädetään viiran nopeutta ja kuivausilman puhallintehoa ohjaamalla.

Kuivattava polttoaine levitetään syöttölaitteen avulla liikkuvalla viiralle tasaisesti koko kuivaimen leveydelle. Kuivausilma tuodaan polttoainepatjan päältä ja se imetään poistoilmapuhallimilla ulos kuivurista. Puoliksi kuivunut polttoaine syötetään kuivurin loppupäästä takaisin viiralle kosteamman polttoainepatjan päälle. Tällöin kuivurin loppupää toimii tuplakerroskuivauksen periaatteella. Tämä kasvattaa ilman kuivauskapasiteettia ja näin ollen pienentää kuivurin termistä ominaisenergiankulutusta.



**Kuva 15: Viirakuivurin kaavio.**

Kuivurin lopputuotteena on läheiseen kaasutuslaitokseen syötettävä kuiva polttoaine. Kaasutettavan aineksen kosteuspitoisuuden tulee olla suuruusluokaltaan n. 15 %, jotta kaasutuksen avulla tuotettavan synteetikaasun koostumus on halutun mukainen. Saadulla synteetikaasulla korvataan meesauunin öljyn käyttöä.

Viirakuivurin huoltotarve on osoittautunut vähäiseksi ja sen käyttö on täysin automatisoitu. Kuivurin toimintaan ollaan oltu tyytyväisiä koko sen käynnissäolon aikana.



**Taulukko 9: Viirakuivurin toiminta-arvoja.**

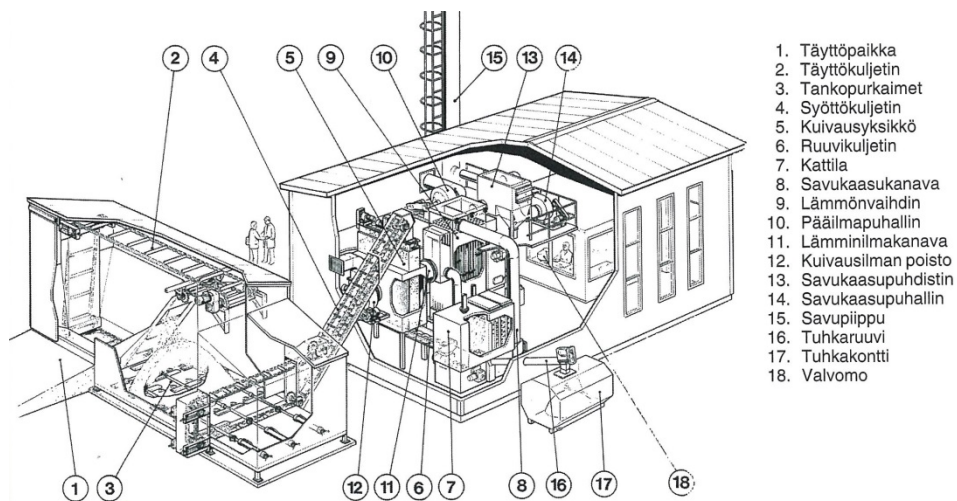
<b>Viirakuivuri Stora Enso, Varkaus</b>	
Kuivattava materiaali	kuori, metsätähdehake
Lämmönlähde	matalapainehöyry
Haihdutuskapasiteetti	8,3 t/h
Kuivauspinta-ala	150 m <sup>2</sup>
Kuivauslämpötila	100 °C
Kosteus sisään	45–65 %
Kosteus ulos	15 %
Polttoainevirta	30–80 i-m <sup>3</sup> /h

## CASE: siilokuivuri, Winnova

Nakkilan Konepaja Oy (nykyinen Nakkila Boilers Oy) on aikaisemmin toimittanut pienen kokoluokan arinakattilalaitoksia, joissa yhtenä optiona on ollut polttoaineen kuivaus siilokuivurissa laitoksen yhteydessä. Ratkaisulle on voimassaoleva patentti nro 100550.

Kuivuri hyödyntää savukaasujen lämpöä kuivausilman lämmittämisessä ja sillä on mahdollista kuivata 60 % kosteuspitoisuudeltaan oleva märkä hake 30–35 % loppukosteuteen. Toimitetut kattilat ovat olleet lämpötehoiltaan 0,5–2 MW.

Kuivurilla varustettuja kattiloita on toimitettu 1990- ja 2000-luvun vaihteessa useisiin kohteisiin. Ensimmäinen toteutus tehtiin v. 1996 Kullaan metsäopiston (nykyinen Winnova) lämpökeskukseen, jossa uudentyypinen 500 kW hakekattila asennettiin öljykattilan rinnalle.



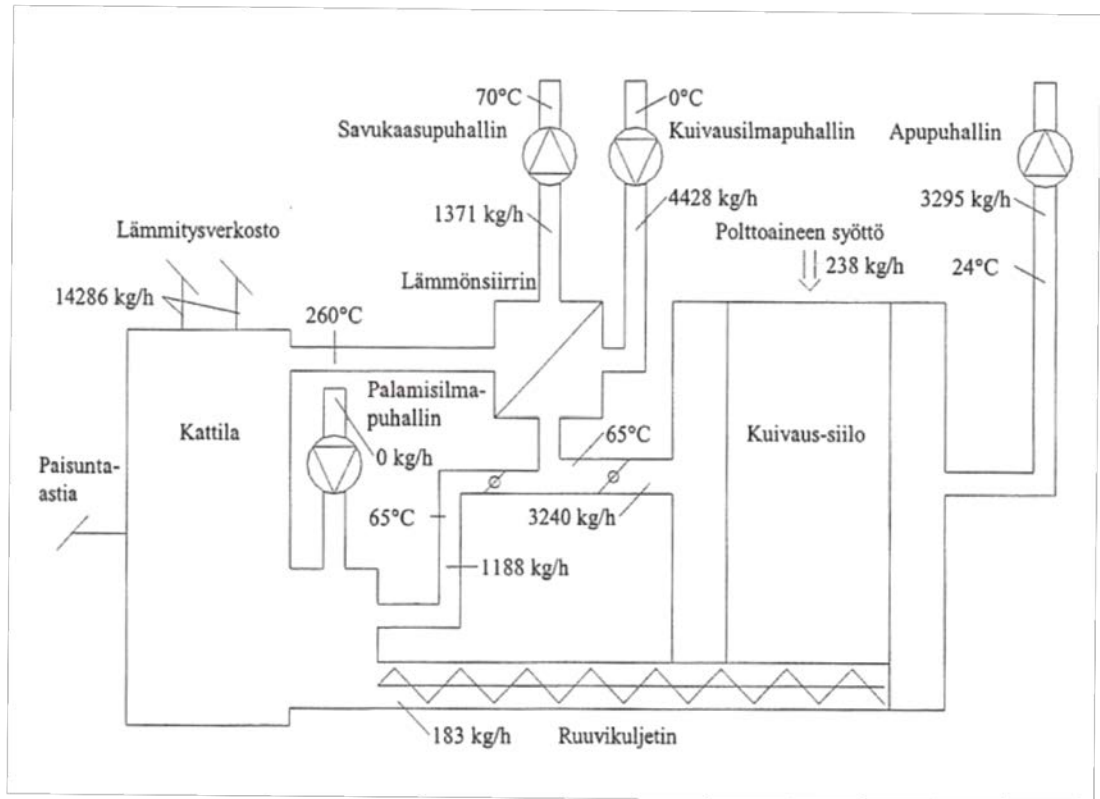
**Kuva 16:** Kullaan Metsäopiston lämpökeskuksen leikkauskuva.

Kattila on edelleen toiminnassa Kullaalla ja tuottaa oppilaitoksen tilojen lämmityksessä tarvittavan lämmön. Märkä polttoaine syötetään kuivaussiilon, jonka sivupuolilta ohjataan savukaasu/ilma -lämmönvaihtimella lämmintä kuivausilmaa. Kuivauslämpötila on mitoitustilanteessa 65 °C ja savukaasun loppulämpötila on 70 °C, joten kastepistelämpötilaa ei saavuteta eikä vesihöyryn kondensoitumista tapahdu. Kuivausilma poistuu kylläisessä tilassa n. 25 °C lämpötilassa ulos.

Kuivurilla varustetulla arinakattilalla on todettu olevan monia hyötyjä. Kattila mahdollistaa myös kosteampien hakelaatujen käytön eli lyhentää hankintaketjua metsästä energiakäyttöön ja vähentää hakekattilan omistajan vuotuisia varastointikustannuksia. Näin ollen poltettavaa haketta ei välttämättä tarvitse metsästä korjaamisen jälkeen kuivata palstalla. Samalla toimitusvarmuus kasvaa koska hyvin kosteakin hake kelpaa polttoon. Edut ovat selkeät etenkin jos omistaja toimittaa itse polttoaineen laitokselle.

Toisaalta tämän tyyppiset kattilat tulevat investointikustannuksiltaan kalliimmiksi kuin perinteiset kattilaratkaisut johtuen kuivurin ja lämmönsiirtimien aiheuttamista lisäkustannuksista.

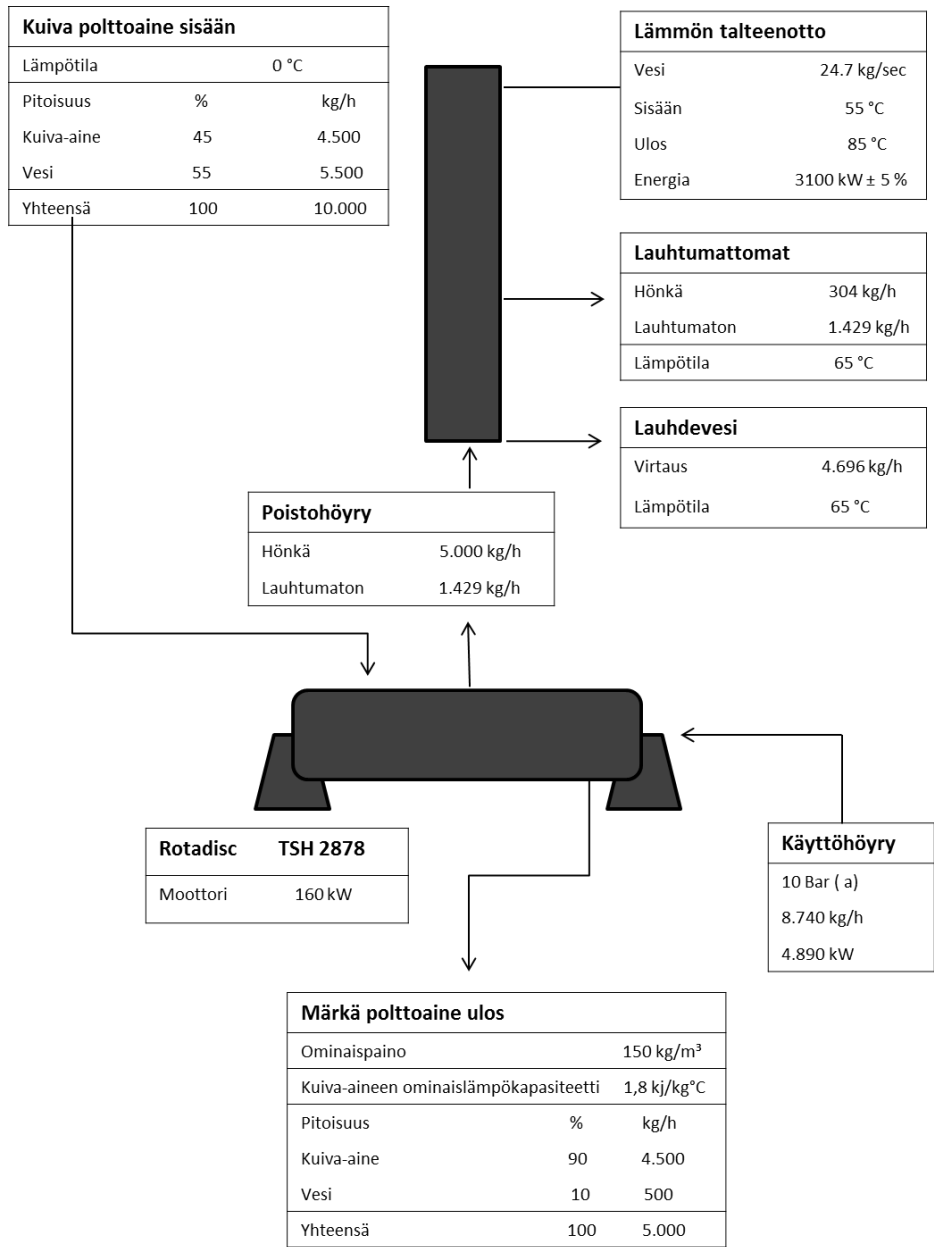
Kuivemman polttoaineen aikaansaamat edut kattilan mitoitukseen eivät siis täysin kompensoi kuivauksen lisäkustannusta. Nakkila Boilers Oy:n nykyisissä kattilatoimituksissa kuivausta ei enää käytetä.



**Kuva 17:** Kattilalaitoksen kaavio ja laskennallisia toiminta-arvoja lämmityskauden keskimääräisessä tilanteessa.

# CASE: epäsuora kiekkokuivuri, Vapo

Vapon Turengin pellettitehtaalla tuotetaan sahanpuruista ja kutterinlastuista noin 70 000 tonnia valmista pellettiraaka-ainetta vuodessa. Raaka-aineena käytettävä kostea sahanpuru kuivataan höyryllä toimivassa epäsuorassa kiekkokuivurissa, joka on ollut käytössä vuodesta 2008 alkaen.



Kuva 18: Kuivurin kaavio ja laskennallisia toiminta-arvoja

Kuivattavan materiaalin alkukosteus on 55 % ja se kuivuu 10 % loppukosteuteen. Kuivauslämpö siirtyy lämmönsiirtopinnan ulkopuolelle lauhtuvasta 10 bar(a) höyrystä. Kuivurin haihdutuskapasiteetti on n. 5 t/h, joka vastaa kuivatussa materiaalissa 5 t/h tuotantomäärää.

Kuivurin poistohöyry koostuu pääosin vesihöyrystä sekä osin kiinteistä partikkeleista ja lauhtumattomista yhdisteistä. Höyry johdetaan letkusuodattimen kautta lämmöntalteenottoyksikköön, jossa se lauhdutetaan ja samalla tuotetaan n. 3 MW kaukolämpöä meno ja paluu- lämpötilojen ollessa 85/55 °C. Lauhtunut jätevesi poistuu 65 °C:ssa ja johdetaan viemäriverkostoon.

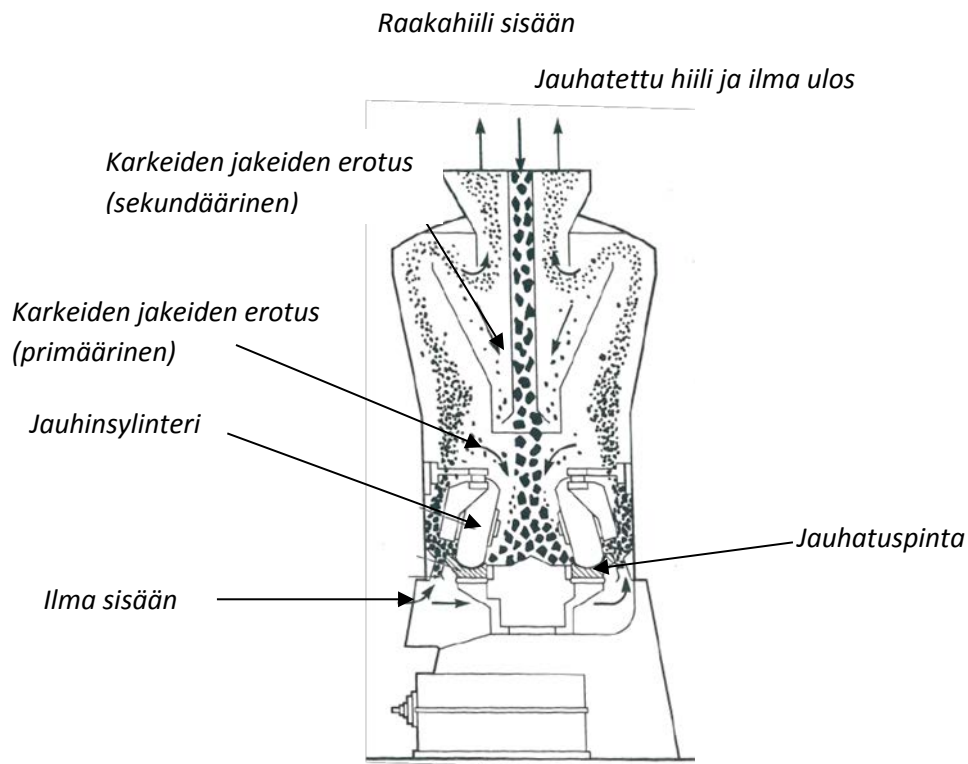
Pääosa kuivurista poistuvista kiinteistä partikkeleista palautetaan tuotantoon. Loput, eli pieni määrä letkusuodattimesta läpimenneitä ja lämmön talteenotossa tiivistyneitä hiukkasia johdetaan jäteveden mukana viemäriverkostoon.

Aikaisemmin Turengissa käytössä ollut suora savukaasulla toimiva rumpukuivuri on nykyään poistettu käytöstä. Uusi epäsuora kuivuri on mahdollistanut alhaisemmat paloriskit sekä myös jysinturpeen käytön.

## CASE: Kivihiilen kuivaus hiilimyllyllä

Kivihiilen kuivaus on käytössä aina kun hiilen poltto on pölypolttoa. Käytännössä näin on kaikissa Suomessa olevissa kivihiilen polttoon perustuvissa lauhdesähkö- ja CHP-laitoksissa (rinnakkaispolttolaitoksia lukuun ottamatta). Kuivaus tapahtuu hiilen jauhamisprosessin yhteydessä ns. valssirengasmyllyssä. Kuivaus parantaa hiilen käsiteltävyyttä myllyllä ja polttimilla pienentämällä sen pintakosteutta.

Kivihiilen myllyjauhatuksessa raakahiili johdetaan myllyn jauhinsylinterien läpi, johon tuodaan samanaikaisesti lämmintä kuivausilmaa. Kuivausilma aiheuttaa jauhimille leijupedin, jossa hienojakeinen pöly siirtyy primääri-ilman mukana kattilan polttimille ja karkeammat jakeet putoavat takaisin myllylle (primäärinen erotus). Ennen polttimia hiilipölystä erotetaan vielä viimeiset karkeat jakeet erotussyklonin (sekundäärinen erotus) avulla takaisin myllylle.



**Kuva 19: Hiilimyllyjen periaatekaavio.**

Kuivaukseen käytetään ilman esilämmittimen jälkeistä primääri-ilmaa lämpötilassa 220–300 °C ja se jäähtyy hiilimyllyissä lämpötilaan 70–90 °C. Kuivumisprosessi on varsin tehokas. Hiilen kosteus on sen alkuperästä riippuen n. 8–15 % ennen myllyä ja 1–3 % myllyn jälkeen. Mikäli käytetään erityisen kosteita hiililaatuja kuten sub-bitumista hiiltä tai ligniittiä, kuivaukseen tulee käyttää savukaasuja, jotka otetaan tulipesästä. Käytännöllinen yläraja raakahiilen kosteuspitoisuudelle on n. 40 %, jolloin kuivauskaasun lämpötilan tulee olla ainakin 400 °C.

Hiilimyllyjä säädetään siten, että myllyn jälkeisen hiilipöly-ilma -seoksen lämpötila pidetään halutulla tasolla. Käytännössä tämä tarkoittaa n. 80–120 °C. Sääto tapahtuu sekoittamalla esilämmitettyyn palamisilmaan kylmää ilmaa, siten että haluttu lämpötila myllyn jälkeen saavutetaan. Myös kantoilman osuutta hiilipöly-ilma -seoksessa säädetään, lähinnä tulipalovaaran ja myllyn tukkoon menon estämiseksi sekä oikean syttymisnopeuden saavuttamiseksi. Hiilipölyn osuutta pitää kasvattaa voimalaitoksen käynnistyksissä ja ajokuorman vähentyessä.

**Taulukko 10: Laskennallisia toiminta-arvoja Fortum Power and Heat Oy:n omistaman Meri-Porin voimalaitoksen hiilen jauhatukselle.**

<b>Fortum Power and Heat Oy, Meri-Porin voimalaitos</b>		
<b>Hiilen jauhatus</b>		
Hiilimyllyjen lukumäärä	5 kpl	
Jauhatusteho	540 kW	myllyä kohden
Kantoilmamäärä	23,2 kg/s	myllyä kohden
Jauhatuskapasiteetti (mitoitus)	15 kg/s	myllyä kohden
Ilma ennen myllyä	260 °C	
Ilma myllyn jälkeen	70–90 °C	





## Lähdeluettelo

---

- [1] Holmberg, H. 2007. Bio fuel drying as a concept to improve the energy efficiency of an industrial CHP plant, Teknillinen korkeakoulu.
- [2] Föhr, J. 2008. Metsähakkeen jalostusarvon nostaminen. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- [3] Fagnäs et al. 2010. Drying of biomass for second generation synfuel production, Biomass and Bioenergy 34 (2010): 1267-1277.
- [4] Worley, M. 2011. Biomass drying technology update, Biopro Expo Marketplace Atlanta, USA 2011.
- [5] Li et al. 2012. Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: a case study, Applied Thermal Engineering 35 (2012): 71-80.
- [6] Johansson et al. 2004. Torkning av biobränslen med spillvärme, Värmeforsk 881/2004.
- [7] Alpuja, J. 2011. Biopolttoaineen kuivaus voimalaitoksessa. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto.
- [8] Haikonen, T. 2005. Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta, Motiva Oy.
- [9] Lindberg et al. 2012. Best Available Techniques (BAT) in solid biomass fuel processing, handling, storage and production of pellets from biomass. Nordic Council of Ministers, Working group for sustainable consumption and production.
- [10] Spets & Ahtila. 2003. Reduction of organic emissions by using a multistage drying system for wood-based biomasses, Helsinki University of Technology.
- [11] Impola et al. 1996. Kiinteiden polttoaineiden kuivumisparametrien karakterisointi, VTT.
- [12] Alakangas. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT.



Urho Kekkosen katu 4-6 A  
PL 489  
00101 Helsinki

Puhelin 0424 2811  
Faksi 0424 281 299  
[www.motiva.fi](http://www.motiva.fi)