

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN  
TIEDONANTOJA

298



METSÄTEKNOLOGIAN TUTKIMUSOSASTO  
METSÄTYÖTIETEEN TUTKIMUSSUUNTA



PENTTI NISULA

TUULITURBIINI POLTTOHAKKEEN  
KUIVATUKSESSA

HELSINKI 1988







METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 298

Metsäteknologian tutkimusosasto  
Metsätyötieteen tutkimussuunta 1988

Pentti Nisula

TUULITURBIINI POLTTOHAKKEEN KUIVATUKSESSA

SISÄLLYS

MERKINNÄT.....	2
1. JOHDANTO.....	3
2. TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT.....	5
21. Tuuliroottoreiden antamat tehot.....	5
211. Käytännön esimerkkejä.....	5
212. Matemaattiset kaavat.....	8
22. Savonius-roottori.....	9
23. Tuuliturbiinikuivatuksen lähtökohdat.....	12
24. Erillisiä hakkeen kuivatuskokeita.....	17
3. KOEJÄRJESTELYT JA MITTAUKSET.....	25
4. TIETOJA HAKETETUSTA PUUSTA JA KUIVUMISOLOSUHTEISTA....	29
5. TUTKIMUKSEN TULOKSET.....	30
51. Mitatut tulokset.....	30
52. Arvioidut tulokset.....	34
6. PÄÄTELMIÄ.....	39
7. TIIVISTELMÄ.....	41
KIRJALLISUUS.....	41



## Merkinnät

Symboli		Yksikkö
A	= potkurin pyyhkäisyypinta-ala, esim. Savonius-roottorissa roottorin läpimitta x roottorin korkeus	$m^2$
$^{\circ}C$	= lämpötila Celsius-asteissa	aste
$C_p$	= roottorin hyötysuhde, kaava (4)	
N	= roottorin vääntömomentti	Nm
$P_a$	= roottorin akseliteho, kaava (5)	W
$P_{s3,8}$	= kokeessa käytetyn Savonius-roottorin teho, kaava (5)	W
$P_t$	= tuulesta saatava teoreettinen teho, kaava (3)	W
d	= vuorokausi	
ko/le/ha	= puulajisekoitus, koivua/lehtipuuta/haapaa	
n	= roottorin pyörimisnopeus	1/min
mmHg	= ilmapaine	133,322 Pa
$q_u$	= ilman virtausvastuskerroin hakkeessa	
v	= tuulen nopeus	m/s
$v_{ul}$	= tuuletusvirran suuruus siilosta ulostullessa, kaava (6)	m/s
w	= kosteus	%
$\lambda$	= potkurin kärkinopeussuhde, kaava (5) (Savonius-roottorissa: kehänopeuden suhde tuulennopeuteen)	
$\pi$	= 3.14159	
$\rho$	= kostean ilman tiheys	$kg/m^3$
$\omega$	= roottorin mitatusta pyörimisnopeudesta laskettu kulmanopeus	rad/s



## 1. JOHDANTO

Tämän tutkimuksen edeltäjiä ovat kirjoittajan aikaisempi selvitys varastoidun pinotavaran kuivumisesta (Nisula 1974) sekä myöhempi selvitys hakkeen kuivumisesta muovihuoneessa ja avokentällä katoksessa (Nisula 1980). Tutkimukset antoivat viirikkeitä lähteä etsimään käytäntöön soveliaista polttihakkeen kuivatusmenetelmää, koska siitä näytti olevan puutetta.

Kirjoittaja teki monia aikaa vaativia kokeiluja selvittääkseen hakkeen kuivumisprosessia. Pääasiassa kokeiltiin erilaisia hakkeen tuuletustapoja muun muassa siten, että hakenäytteitä asetettiin pyöreälle pöytälevylle laatikoihin, joita sitten pyöritettiin eri nopeuksilla useita viikkoja. Koe antoi mielenkiintoisia, joskaan ei käytäntöön suoranaisesti sovellettavia tuloksia.

Pitkässä, hakkeella täytetyssä 60 cm:n läpimittaisessa puutunnelissa tarkkailtiin kosteuden siirtymistä tuuletuksen aikana. Käytettävissä olevat tutkimusmenetelmät riittivät vain karkeahkoihin havaintoihin.

Muovikanisterissa olevaa haketta läpituuletettiin pienellä puhaltimella (11 W) toisen, vähän suuremman kanisterin sisässä pakastekaapissa ja pannuhuoneessa. Kummassakin tapauksessa alun perin tuore hake kuivui 20 %:n kosteuteen noin 80 tunnin kuluessa.

Myös kokeiltiin hakkeen koneellista pöyhimistä avotilassa ja pyörivässä rummussa sekä savukaasujen käyttämistä.

Lupaavimmalta alkoi näyttää tuulivoiman käyttäminen hakkeen kuivatuksessa. Vaikutti siltä, että hakekuivaamo voitaisiin tällöin rakentaa varsin pienin pääomakustannuksin, jos tyydyttäisiin hitaaseen kuivatukseen. Tältä pohjalta tämä tutkimus lähtikin sitten käyntiin.



Keskusosuusliike Hankkija salli pystyttää kokeilusiilon Anttilan koetilalle Hyrylään, jossa Metsäntutkimuslaitoksella oli jo ennestään menossa hakkeen konttikuivauskokeilut. Paikka oli muuten avonaisella peltoalueella, mutta sen etelä-lounaisella puolella sijaitsi noin 30 m pitkä ja noin 12 m korkea vanha heinälato. Siilo oli ladosta poikkisuuntaa vasten kohtisuoraan noin 30 m:n päässä. Lato saattoi siis vähentää paikalla puhaltavien etelä-lounaisten tuulien voimaa.

Tarvittava rankatavara saatiin Metsäntutkimuslaitoksen metsästä Helsinki-Vantaan lentokentän läheisyydestä.

Kirjoittaja teki suunnitelmat kuivaamosta sekä rakensi itse kokeessa käytetyn koneikon. Erkki Salo apulaisineen pystytti kuivaamon puuosat. Koska kokeiltava menetelmä oli uusi, oli tutkimus suunniteltava niin laajaksi, että menetelmän taustatekijät kuten tuulivoima, tuuliturbiinit ja kuivatuksen yleiset edellytykset joutuivat tarkasteltaviksi.

Tutkimuksen aikana avustivat - kukin omalla merkittävällä tavallaan: Bart Braam, Erkki Björn, Tapio Järvinen, Hannu Kalaja, Heidi Koskinen, Kauko Luoma, Leena Muronranta, Tapio Nevalainen, Esko Mäkinen, Reino Rannikko, Paavo Riihimäki, Martti Salakari, Erkki Salo, Veikko Salo, Esko Suvenaho, Paavo Takala, Maija Tuuri, Tapio Vihtakari ja Erkki Viuhkonen.

Käsikirjoituksen ovat lukeneet emerit.prof. Kalle Putkisto, professorit Pentti Hakkila ja Olli Uusvaara, rak.ins. Reijo Nykänen ja metsätyönjohtaja Tapio Nevalainen.



## 2. TUTKIMUKSEN LÄHTÖKOHDAT

### 21. Tuuliroottoreiden antamat tehot

#### 211. Käytännön esimerkkejä

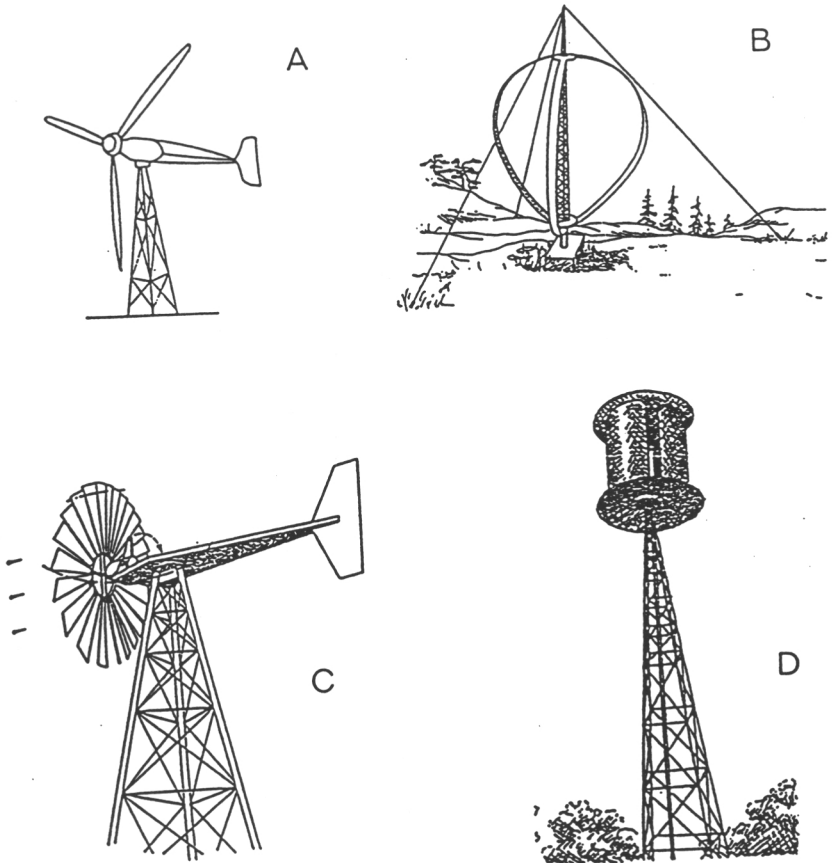
Tuuliturbiini on kone, jolla tuulen liike-energia muutetaan pyöriväksi liikkeeksi. Tuuliroottori on tuuliturbiinin voimakoneosa, joka saa käyttövoimansa tuulesta. Tuuliturbiinit ovat olleet jo kauan kiinnostuksen kohteina. Lindseyn (1974) ja Putnamin (1982) raporteissa luetellaan yhteensä 672 ai-  
hetta käsittelevää kirjallisuuslähdetä.

Kuvassa 1 nähdään yleisimmät tuuliturbiini-tyypit ja taulukoissa 1-3 eräitä niiden suoritusarvoja.

Kuvassa 2 esitetään kahden erikokoisen Darrieus-roottorin (vrt. kuva 1B) tehokäyrä (kW) tuulen nopeuden kasvaessa. Darrieus-roottori tunnetaan korkeatehoisena mutta vaikeasti käynnistyvänä tuuliturbiinina. Starttimoottorina käytetäänkin usein sähkömoottoria tai Savonius-roottoria.

Taulukko 1. Kolmilapaisen potkuriroottorin teho (W) tuulen nopeuden ollessa 7 m/s Le Gourieres'n (1982) mukaan (ks. kuva 1A).

Potkurin lavaston läpimitta, m	1	2	3	4	8	10
Potkurin pyörimisnopeus, 1/min	935	470	310	235	120	95
Roottorin teho, W	70	270	600	1070	4400	6700



Kuva 1. Tuulivoottoreita: A potkurivoottori, B tanskalainen Darrieus-voottori, C amerikkalainen monisiipivoottori ja D suomalainen Savonius-voottori.

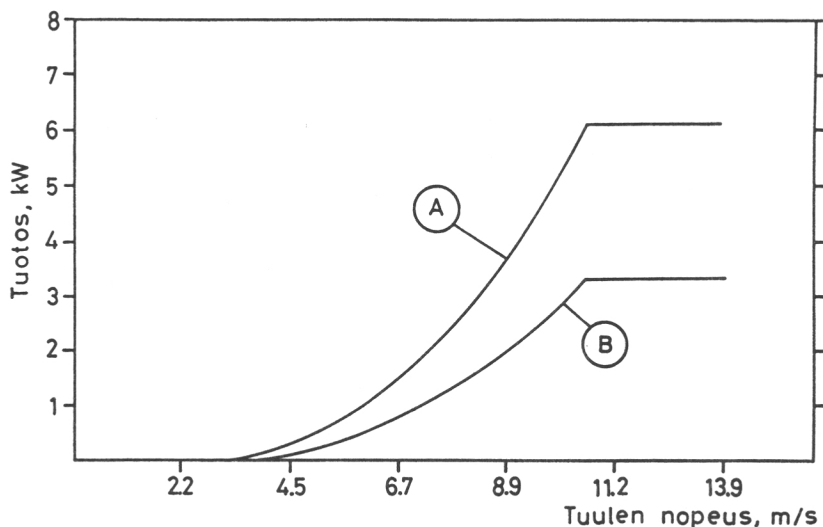


Taulukko 2. Amerikkalaismallisen monisiipiroottorin teho (W) tuulen nopeuden ollessa 5 ja 7 m/s Le Gourieres'n (1982) mukaan (ks. kuva 1C).

Potkurin lavaston läpimitta, m	1	2	3	4	8	10
Potkurin pyörimisnopeus, 1/min:						
Tuuli 5 m/s	95	47,5	31,9	23,8	11,9	9,5
Tuuli 7 m/s	133	66,5	44,5	33,2	16,6	13,3
Roottorin teho, W:						
Tuuli 5 m/s	18	73	165	295	1200	1870
Tuuli 7 m/s	30	400	450	810	3300	5150

Taulukko 3. Kahdesta päällekkäin 90<sup>o</sup>:n kulmaan asetetusta 230 litran öljytynnyristä (pyyhkäisyypinta A = 1,8 m<sup>2</sup>) rakennetun Savonius-roottorin teho (W) Le Gourieres'n (1982) mukaan (vrt. kuva 1D).

Tuulen nopeus, m/s	2	3	4	5	6
Roottorin teho, W	4,5	14,5	30,5	42,5	52



Kuva 2. Kahden erikokoisen Darrieus-roottorin tehokäyrä Le Gourieres'n (1982) mukaan.

## 212. Matemaattiset kaavat

Seuraavassa kerrataan lyhyesti ne matemaattiset kaavat, joilla voidaan laskea tuulen energia ja tuuliroottorin siitä saama akseliteho  $P_a$  (W) (ks. Optimaalisen... 1984).

Tuuliroottorin akseliteho  $P_a$  (W) saadaan kaavasta

$$P_a = Mw (W), \quad (1)$$

missä  $M$  on mitattu vääntömomentti (Nm) ja  $W$  roottorin mitatusta pyörimisnopeudesta laskettu kulmanopeus (rad/s).

Kulmanopeus saadaan kaavasta

$$\omega = 2\pi n/60 = \pi n/30 \text{ (rad/s)}, \quad (2)$$

missä  $n$  on potkurin mitattu pyörimisnopeus (1/min).

Tuulesta saatava teoreettinen teho  $P_t$  lasketaan kaavasta

$$P_t = \rho Av^3/2 (W), \quad (3)$$

missä  $\rho$  on kostean ilman tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ), esim.  $1,242 \text{ kg/m}^3/10^\circ\text{C}/760 \text{ mmHg}$ ,  $A$  on potkurin pyyhkäisyypinta-ala  $\pi R^2$  ( $\text{m}^2$ ) ja  $v$  on tuulen nopeus (m/s).

Kun  $P_a$  ja  $P_t$  on laskettu, saadaan tuuliroottorin hyötysuhde  $C_p$ , joka on roottorin akselitehon  $P_a$  ja tuulen tehon  $P_t$  välinen suhde

$$C_p = P_a/P_t \quad (4)$$

Tuuliroottorin maksimihyötysuhde ( $C_p$ ) voi olla enintään 0,592. Käytännössä arvot ovat usein 0,2:n ja 0,4:n välillä.

$C_p$ -arvoa 0,5 on pidettävä erittäin hyvänä, mikä merkitsee sitä, että joskus tuuliroottoreilla jopa puolet tuulen tehosta voidaan saada käyttöön.

Potkurin kärkinopeussuhde  $L$  on potkurin lavan uloimman eli kärkipisteen kehänopeuden ja tuulen nopeuden suhde. Savonius-roottorissa sitä vastaa roottorin kehänopeuden ja tuulennopeuden välinen suhde.

$$L = u/v = \omega R/v, \quad (5)$$

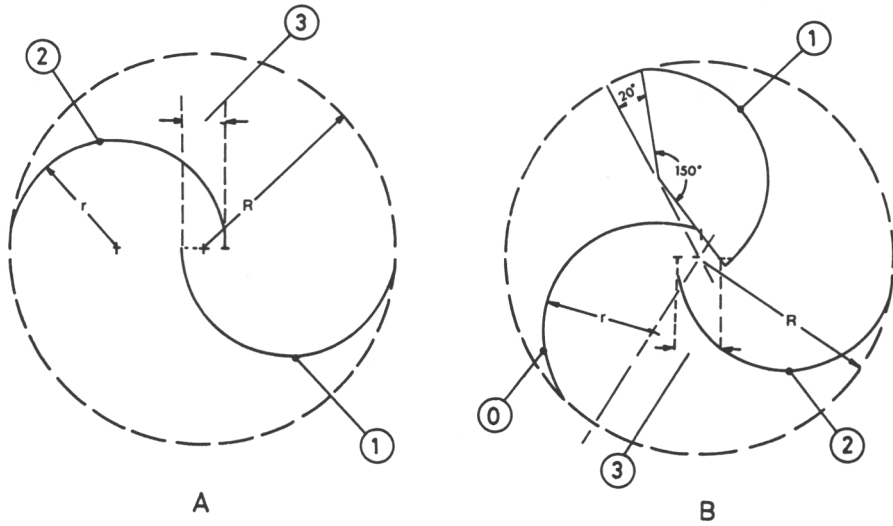
missä  $u$  on kehänopeus  $\omega R$  ja  $v$  tuulen nopeus (m/s).  $R$  on lavan pituus eli potkurin kärjen piirtämän ympyrän säde (m).

## 22. Savonius-roottori

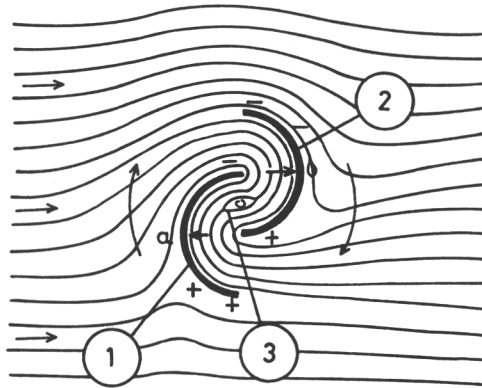
Savonius-roottori on suomalaisen ins.kapt.ltn. Sigurd Johannes Savoniuksen keksintö vuodelta 1924 (Savonius 1928). Tämä varsin pienitehoinen tuuliroottori on jatkuvasti kiinnostanut tutkijoita lähinnä edullisen vääntömomenttinsa takia, minkä takia roottori lähtee herkästi pyörimään heikollakin tuulella. Blackwell ym. (1977) mainitsee lähes 20 Savonius-roottoria koskevaa tutkimusta, useimmat 1970-luvulta.

Kuvista 3 ja 4 nähdään Savonius-roottorin poikkileikkaukset ja roottorin tapa ottaa tuuli vastaan. Roottorin tuulipinta muodostuu ikäänkuin kahdesta tynnyrinpuolikkaasta (kaaripinnat 1 ja 2, kuva 3A), jotka on siirretty pystyleikkausta myöten toisistaan erilleen siten, että tuuli pääsee virtaamaan puolikkaiden väliin rakenteeseen syntyneen läpivirtausaukon (3) kautta. Tuulen läpivirtaus nähdään Savoniuksen oman esityksen mukaisesti kuvassa 4. Tuulen läpivirtaus viereisen kaaripinnan taakse saa aikaan sen erikoisuuden, että Savoni-





Kuva 3. Kaksikaaripintaisen (A) ja kolmikaaripintaisen (B) Savonius-roottorin poikkiprofiili (Blackwell ym. 1977).



Kuva 4. Kaavamainen esitys ilmavirran kulusta Savonius-roottorissa (Savonius 1928).

us-roottorin kehänopeus saattaa nousta jopa 1,7 kertaa tuulen nopeutta suuremmaksi (König 1973). Tämä ilmiö selitettiin ns. Magnus-effektin avulla. Läpivirtausaukon suuruudeksi on Savonius-roottorille myöhemmin - Savoniuksen omasta käsityksestä poiketen - tuulitunnelikokeiden perusteella suositeltu huomattavasti pienempiä arvoja eli 0,1 - 0,15 d (d = kaaripinnan halkaisija) (Blackwell ym. 1977).

Savonius-roottori voidaan varustaa useammallakin kaaripinnalla (kuva 3B). Tällöin roottorin vääntömomentti paranee, mutta akseliteho  $P_a$  (W) pienenee. Kaksikaaripintaisen Savoniuksen hyötysuhde ( $C_p$ ) arvioidaan yleensä 0,3 suuruiseksi, mutta kolmikaaripintaisen huomattavasti pienemmäksi,  $C_p=0,2$ .

Blackwellin ym. (1977) laajojen tuulitunnelikokeiden perusteella (vrt. Shankar 1976):

- Kaksikaaripintaisen Savonius-roottorin vääntömomentti vaihtelee roottorin pyöriessä - eli akselikulman muuttuessa tuuleen nähden - enemmän kuin kolmikaaripintaisen roottorin. Kaksikaaripintainen roottori saattaa tämän takia heikolla tuulella juuttua paikoilleen. Tämän takia kaksikaaripintainen Savonius-roottori suositellaan usein kasattavaksi siten, että kaksi kaksikaaripintaista roottoria asennetetaan päällekkäin  $90^\circ$ :een kulmaan toisiinsa nähden.
- Kaksikaaripintaisen roottorin hyötysuhde ( $C_p$ ) on korkeampi, mutta vääntömomentti (M) on pienempi kuin kolmikaaripintaisen roottorin.
- Savonius-roottorin hyötysuhde ( $C_p$ ) paranee hiukan jos korkeuden suhde läpimittaan kasvaa.
- Paras hyötysuhde ( $C_p$ ) saavutetaan kun läpivirtausaukko on 0,1 - 0,15 d.

Savonius-roottoria on käytetty veden pumppaamiseen, vaatimattoman sähkövirran tuottamiseen, huoneiden ja ajoneuvojen tuuletukseen, tukkivarastojen sulana pitämiseen, veden hapestamiseen sekä tuulimittarina (Blackwell ym. 1977). Savonius-roottori ei kykene tuotoksensa puolesta kilpailemaan potkuriroottoreiden tai ns. Darrieus-roottoreiden kanssa,

joiden hyötysuhde ( $C_p$ ) voi nousta lähelle 0,50. Käyttöalueellaan Savonius-turbiini muodostuu kuitenkin usein edulliseksi sen tähden, että se on helppo rakentaa - jopa tee-se-itse-menetelmin - esimerkiksi vanhoista öljytynnyreistä. Tällaista menetelmää on sovellettakin kehitysmaaolosuhteissa (vrt. How to construct...).

Suurten Savonius-roottoreiden rakentaminen tuskin kannattaa. Putnam (1982) esittää laskelman, jonka mukaan 1000 kW:n Savonius-tuuliroottoriin tarvitaan n. 2800 m<sup>2</sup> metallilevyä, mikä on 30 kertaa enemmän kuin tarvittaisiin kolmilapaisen, lapapituudeltaan 26,5 metrisen, potkuriturbiinin rakentamiseen.

Kirjallisuudesta ei ole löytynyt mainintaa tuuliturbiinin käytöstä hakkeen, turpeen, heinän tms. aineen kuivattamiseen. Sellaisia ajatuksia, että tuuliroottori antaisi ensin voimaa sähkömoottorille, joka puolestaan käyttäisi tuulettaa, on kylläkin esitetty (ks. esim. Alhojärvi 1981) ja sovellettakin esim. Puerto Ricossa puutavaran kuivauksessa (Peck 1962). Tällaisessa sovellutuksessa noin 15 % tuuliroottorin akselitehosta hukkaantuu generaattorissa ja lisäksi noin 4 % vaihteistossa. Herätemoottori kuluttaa lisäksi synnytetystä virrasta noin 0,02 kW (Södergård 1978). Sähkömoottorin häviöt ovat samaa suuruusluokkaa kuin generaattorin.

### 23. Tuuliturbiinikuivatuksen lähtökohdat

Kirjoittajalla on omakohtaisia kokemuksia siitä, miten vanhoissa maalaistaloissa rossilattia estettiin mädäntymästä kivijalassa säännöllisten välimatkojen päässä olevien tuuletusaukkojen avulla. Jo vähäinen tuuletus pystyi pitämään homesienien itiöt latentissa tilassa niin kauan kuin tuuletusta kesti. Tämä kokemus antoi aiheen olettaa, että myös hakekassassa olevat home- ja sädesienikannat voitaisiin pitää toimintakyvyttöminä vähäisellä tuuletuksella. Tähän tuulen suora energia ehkä riittäisi. Oletettiin edelleen, että pieni-



kin ilman vaihtuvuus hakekasassa kuivattaisi haketta, jos home- ja sädesienikantojen toiminta hakkeen sisällä voitaisiin pysäyttää.

Koska tuuletusilma sisältää runsaasti kaikenlaisia itiöitä, niiden voidaan ajatella mieluusti tarttuvan säröpintaiseen hakkeeseen. Polttohake saattaa toimia optimaalisena tartuntapintana itiöille ja se on luonnostaan hyvä kasvualusta itse lahottajasienille. Itiömäärä voi hakkeessa kasvaa pelkän tuuletuksen takia. Kuivasta, tuuletetusta hakkeesta onkin usein analysoitu suuria itiömääriä.

Tuuliroottorikuivatus ulkoilmaolosuhteissa merkitsee kylmäilmakuivattavasta. Systeemiin ei tuoda muuta lämpöenergiaa kuin se, joka tulee ympäröivästä ilmasta. Tuuliroottorin lietsion paine ja kitkan aiheuttama lämpö hakkeessa on olematon. Tietenkin yhden vesikilon haihuttaminen joissain olosuhteissa vaatii suunnilleen aina saman energiamäärän - jopa 4500 kJ/kg H<sub>2</sub>O, vaikka vapaasta vesipinnasta haihtumiseen tarvitaan vain noin 2500 kJ/kg H<sub>2</sub>O. Haihtumisen nopeutta voidaan jouduttaa teknillisin toimenpitein, mutta energian kulutus höyryntyvää vesimäärää kohden pysyy samana eli noin 1 kWh/kg H<sub>2</sub>O edellyttäen, että puu suostuu mukautumaan kiihdytettyyn kuivausvauhtiin (ks. esim. Sahatavaran... 1976, Mikkonen 1981, Kares ja Linna 1983).

Keinollisessa sähkömoottorituuletuksessa systeemiin tuodaan aina ulkopuolista lämpöä ainakin se määrä, joka tulee sähkömoottorista tai aiheutuu syntyvästä vastapaineesta. Moottorituuletus tuo siis lisälämpöä haihtumisen jouduttamiseksi, joka vaatii ostoenergiaa. Mikkonen (1981) arvioi, että 11 kW:n tehoisen sähkömoottorin jälkeen tuuletusilman lämpötila on moottorin käyntilämmön johdosta kohonnut 0,9°C. Fagerholmin (1986) antamaa laskuesimerkkiä muuntaen puhallin, joka liikuttaa ilmaa 10 m<sup>3</sup>/s 600 Pa:n paineella (moottori 11 kW), ottaa tehoa verkostosta 6 kW. Joskus moottorituuletuksen yhteydessä voidaan prosessiin tuoda erillistä lisälämpöä.

Ostoenergian käyttäminen voi helposti johtaa epätaloudelliseen tulokseen, varsinkin silloin kun kaikkea lisälämpöä ei pystytä sitomaan haihtuvaan vesihöyryyn, vaan jokin osa siitä pääsee karkaamaan hakkeen läpi hyödyntymättä. Näin voi käydä varsinkin silloin, kun puun sisällä pintaa kohti siirtyvä vesi liikkuu hitaammin kuin tuuletusvirta edellyttäisi.

Hyvässä polttihakkeen kuivatusjärjestelmässä pääoma- ja käyttökustannukset ovat mahdollisimman pieniä. Luonnonenergian - vesi- tai tuulivoiman - käyttökustannukset ovat ostoenergiaan verrattuna vähäisiä. Tämän takia kirjoittaja halusi kokeilla jompaa kumpaa näistä energiamuodoista. Tuulivoimakokeilujen toteuttaminen näytti käytettävissä olevissa tutkimusolosuhteissa helpoimmalta. Suunnitelman toteuttamiseksi oli valittava sellainen tuuliturbiini, jonka rakentaminen on helppoa ja halpaa. Savonius-tyyppinen tuuliturbiini näytti tässä mielessä edullisimmalta.

Suunniteltiin kolme kuivaamotyyppiä, jotka nähdään kuvassa 5.

Kuvassa 5A voimakoneeksi valittiin kolmilapainen tuulirootori siilon suuren koon takia.

Kuvien 5A ja 5C kuivaamotyypeissä on pystysuora keskustunneli (4), jossa tuuletusilma liikkuu. Kuvassa 5A käytetään vetoakselille (5) sijoitettuja, vaakasuorassa tasossa pyöriviä tuuletussiipiä (6), samantapaisia kuin sähkömoottorituulettimissa. Ne voivat puhaltaa tunneli-ilmaa joko ylöspäin tai alaspäin. Ensiksi mainittu sovellutus saattaa olla edullinen, koska silloin voidaan ulkoilmaa imeä hakkeen läpi. Tällöin ulkoilman lämpö ja siilon vaippaan sitoutunut auringon lämpö saadaan paremmin käyttöön.

Sovelluksessa kuvassa 5C vetoakselille on tunneliin sijoitettu yksinkertaiset pystylavat (7), jotka muodostavat lietsion ja jotka pyöriessään puskevat ylä- tai alakautta tunne-

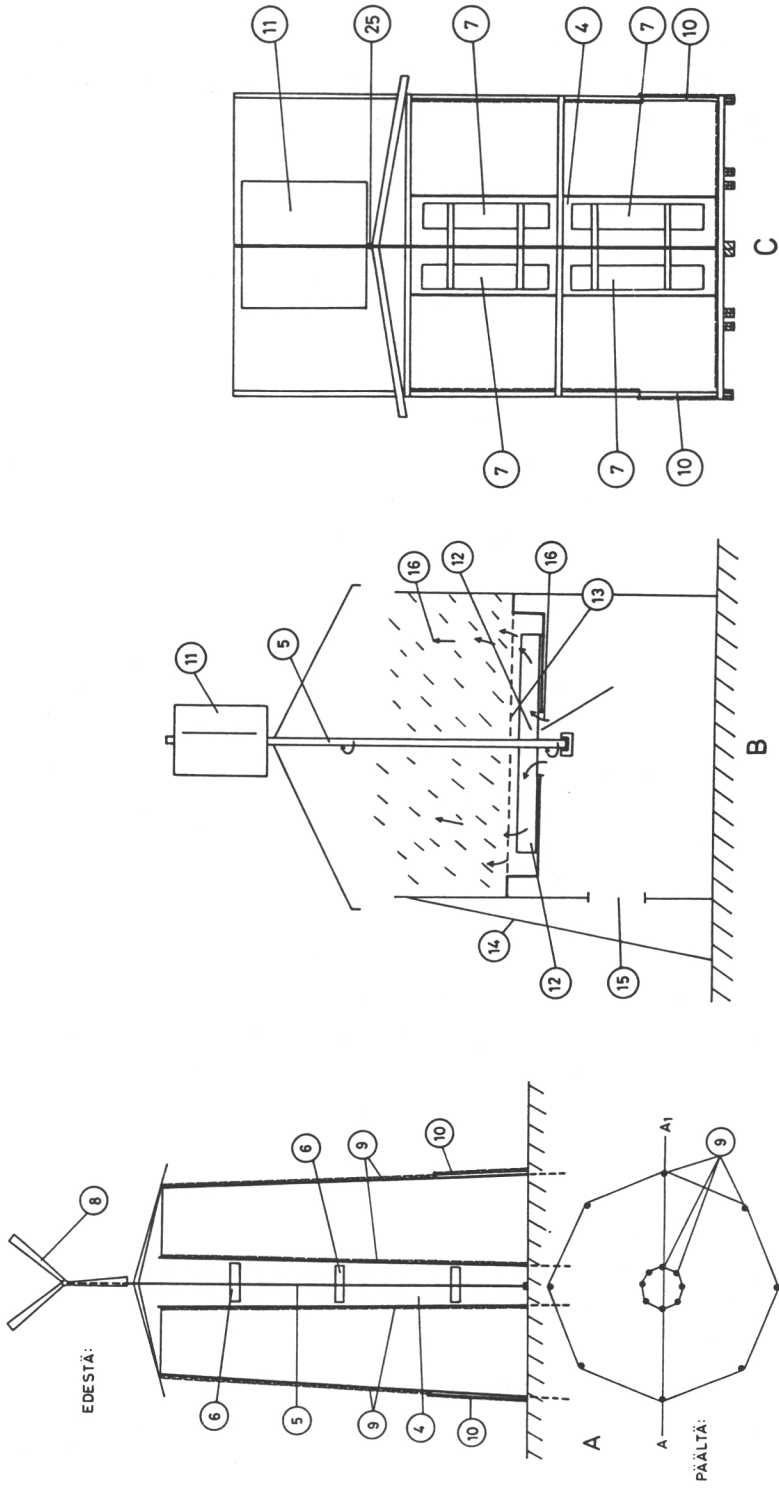
liin tulevan tuuletusilman hakkeen läpi ulos. Ulkoilman lämpöä tuskin voidaan tässä tapauksessa käyttää niin hyvin hyödyksi kuin kuvan 5A esittämässä tapauksessa.

Kuvan 5A koneikossa lienee siis syytä käyttää voimanlähteenä esim. kolmilapaista tuuliroottoria (8), josta saadaan tarpeeksi energiaa pyörittämään vaihteiston avulla nopeakierroksisia tuuletussiipiä (6) ( $n=1400$  l/min).

Kuvassa 5A on runkorakenteet ajateltu tehtäviksi pitkistä painekyllästetyistä pylväistä (9), jotka alapäistään perustetaan maahan routarajan alapuolelle, aivan samoin kuin nykyään menetellään rakennettaessa varastosuojia maatalouskäyttöön. Pylväät sidotaan yläosistaan toisiinsa sopivilla katto- ja seinärakenteilla. Kyllästettyjen pylväiden kestoikä lienee 15 - 20 vuotta. Tällainen kuivaamo täytettäisiin yläkautta kuljettimella tai puhaltimella ja purettaisiin traktorikauhalla alakautta, jokaisella sivulla olevien avattavien sarnaluukkujen (10) kohdalta. Siiloon voitaisiin siis yläkautta ajaa haketta sitä mukaa, kun tavaraa otetaan alakautta poltoon. Tämän takia siilon seinien tulee olla sopivasti sisäänpäin kaltevat, etteivät ne holvaamalla estäisi hakkeen valumista. Tällaiseen siiloon voitaisiin varastoida useita satoja kuutioita haketta.

Kuvan 5C ehdotus on tilavuudeltaan pienempi, noin  $100 \text{ i-m}^3$ . Se voidaan rakentaa soiroista ja laudoista. Alaseinille on sopiva rakentaa samanlaiset purkauksessa avattavat sarnaluukut (10) kuin kuvassa 5A. Tuuletusmoottoriksi riittänee Savonius-roottori.

Kuvassa 5B esitetään edellisistä poikkeava ratkaisu, joka voidaan rakentaa latoon tms. paikkaan, jolloin vetoakseli (5) kulkee katon keskiharjasta ylös ja päättyy ylhäällä Savonius-roottoriin (11) tai johonkin tehokkaampaan tuulimoottoriin. Kuvan 5B mukaisen rakenneratkaisun mukaan tuuletuslietso (12) on sijoitettu lattiatason alla olevaan umpinaiseen tilaan muuten paitsi, että sen yläosassa on haketta



Kuva 5. Hakkeen kuivaamomallit. 5A suurehko kuivaamo, 5B latokuivaamo, 5C noin 100 i-m<sup>3</sup>:n kuivaamo.



kannattavaa reikälevyä tms. (13), joka kestää hakkeen kuor-  
mauksen ja purkauksen. Akselin alapään ympärillä on lisäksi  
ilman sisäänottoaukko.

Kuvan 5B mukaista ratkaisua voidaan hyvin soveltaa karjara-  
kennusten ylisillä tms. paikoissa, jolloin tuuletuslietso  
sijoitetaan välipohjaan. Muovisen aurinkokeräimen (14) läm-  
mittämä ilma voidaan imeä vaikka ikkuna-aukkojen (15) kautta  
lietsoon.

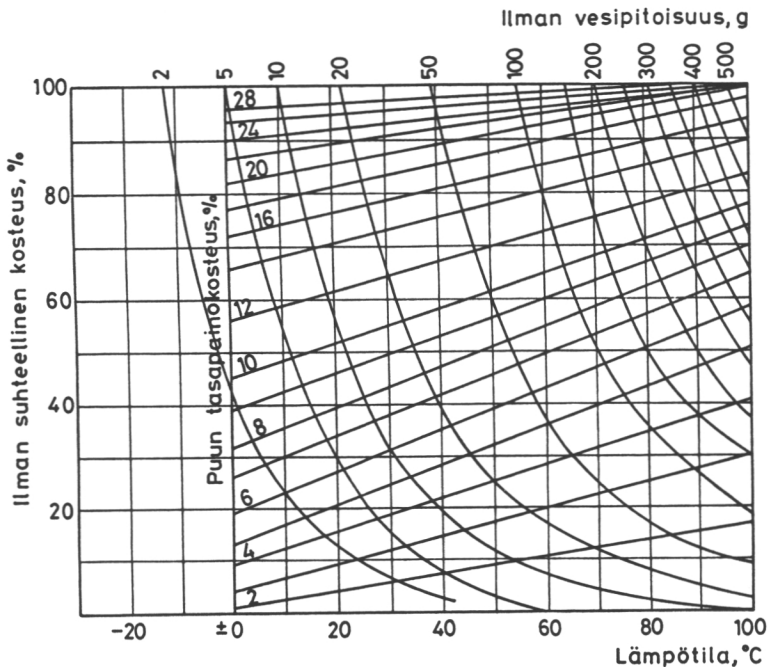
Tuuletusilma kulkee nuolien (16) mukaisesti. Haluttaessa voi-  
daan tuuletusilma ottaa lietson keskustaan myös erillistä  
tunnelia myöten. Silloin voidaan käyttää myös aurinkoener-  
giaa apuna hakkeen kuivauksessa. Latoon voidaan sijoittaa  
tarvittaessa sopivin etäisyyksin useampiakin tuuliturbiineja.  
Koska Savonius-roottorit ovat äänettämiä ja huokeita, ne  
soveltuvat tarkoitukseen asumusten lähelläkin.

#### 24. Erillisiä hakkeen kuivatuskokeita

Puu on hygroskooppista ja se pyrkii imemään itseensä kosteut-  
ta, mutta myös ilmalla on tämä sama ominaisuus. Jos minkä  
hyvänsä kosteuden omaavan puukappaleen annetaan riittävän  
kauan olla määrätyn tasaisen lämpötilan ja suhteellisen kos-  
teuden omaavassa ilmassa, se asettuu aina samaan kosteustasa-  
painotilaan. Tätä kosteutta sanotaankin tasapainokosteudeksi  
ko. lämpötilassa. Jos esimerkiksi kuiva puu asetetaan +2°C:n  
lämpötilaan ja 80 %:n suhteelliseen kosteuteen, niin puun  
kosteudeksi tulee vähitellen 20 %. Samoin likomärkä puukap-  
pale pitkän kuivumisajan jälkeen asettuu samoissa olosuh-  
teissa vähitellen 20 %:n kosteuteen. Tätä kysymystä voidaan  
tarkastella yksityiskohtaisesti kuvan 6 perusteella (Isomäki  
ym. 1964). Kuvaus puun kuivumisesta muuttuu, jos sadevesi  
kastelee puun tai jos home- tai sädesienet alkavat lahottaa  
puuta, jolloin puussa alkaa kehittyä vettä tuottavia kemial-  
lisiä prosesseja.

Periaatteessa hakekasa kuivuu samoin edellytyksin. Käytännössä tulee kuitenkin eteen suuria vaikeuksia, koska hake suo hyvän suojan ja suotuisat edellytykset myös sienien ja kemiallisten prosessien edistymiselle. Kun puu lisäksi haketettaessa rikkoutuu pieniksi, runsaasti säröileviksi palasiksi, sen vaippapinta lisääntyy suunnattomasti. Tämä luo hyvin edulliset lähtökohdat lämmön kehittymiselle ja sienikantojen lisääntymiselle.

Tuulettamattomassa hakekasassa alkaakin sisäosien lämpötila nopeasti nousta. Kuitenkin jo vähäinen tuuletus voi estää sienien ja kemiallisten prosessien aktivoitumisen ja johtaa ilman riittävään vaihtumiseen hakekasan sisällä. Kun tuuletus kuljettaa kosteutta hakekasan sisästä, lopputulos päättyy kuvan 6 mukaiseen tasapainotilaan. Hakkeen hitaaseen kuivattamiseen tuuliturbiinin käyttö lienee aivan paikallaan.

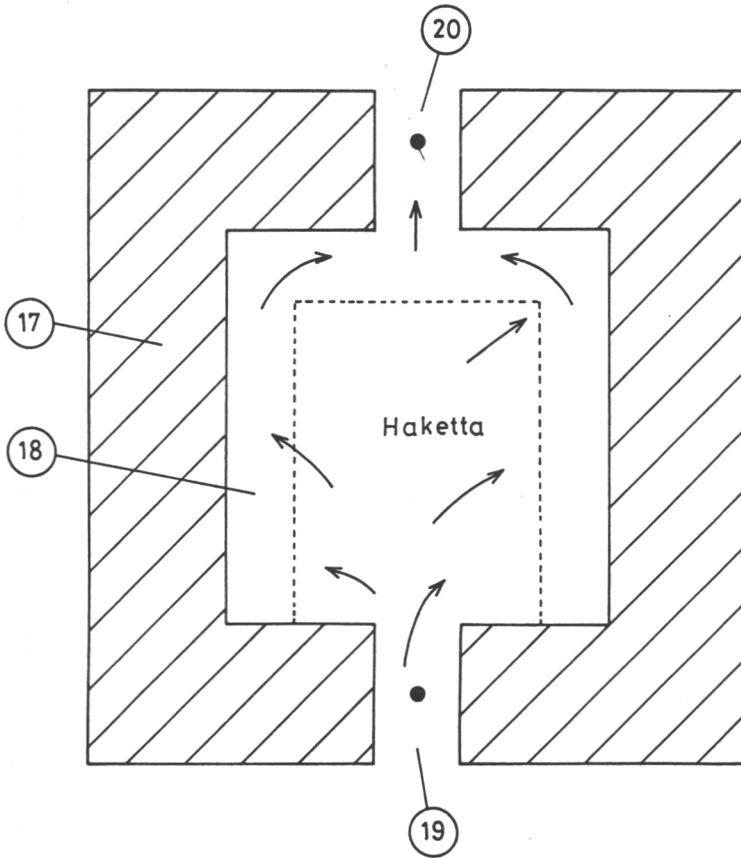


Kuva 6. Nomogrammi, joka ilmoittaa puun tasapainokosteuden, kun ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila tunnetaan.

Mikäli kuivatuksen on tapahduttava nopeasti, on käytettävä ostoenergiaa apuna. Polttohaketta on runsaasti tutkittu, varsinkin energiakriisien aikoina. Sellaista tutkimuspistettä, jossa hakkeen kuivatuksen teoriaa ja tuloksia erikokoisesti tutkittaisiin, ei kuitenkaan ole. Tieto on ollut varsin hajanaista ja yksittäisiä koetuloksia selostavaa.

Kuivumista ja kuivattamista selittävät matemaattiset yhtälöt nähdään esim. ns. Mollierin piirroksessa nomogrammina. Sen mukaan, jos tiedetään hakkeeseen puhalletun ilman lämpötila ( $t_1$ ) ja sen suhteellinen kosteus ( $w_1$ ) sekä hakkeesta ulos tulevan ilman lämpötila ( $t_2$ ) ja sen kosteus ( $w_2$ ), selviää paljonko sisäänpuhallettu ilma on lisännyt tai vähentänyt vesimääräänsä hakkeen läpi kulkiessaan. Edellisessä tapauksessa hake kuivuu, jälkimmäisessä tapauksessa se kostuu sillä vesimäärällä (g/kg kuivaa ilmaa), joka on luettavissa nomogrammista. Ilman suhteellisen kosteuden ( $w$ ) määrittämisessä on syytä käyttää ns. kuiva/märkä-lämpötilamittaria (vrt. Mollier... 1969).

Käytännössä hakekasaa ei voida käsitellä sellaisena kokonaisuutena, että Mollierin nomogrammia voitaisiin siihen soveltaa. Näin voi tapahtua vain silloin, jos tutkittava hake suljetaan kuvan 7 esittämällä tavalla lämpöeristettyyn (17) kammiioon (18), johon puhallusilma menee sisälle vain yhdestä aukosta (19) ja tulee ulos toisesta (20). Aukoissa (19, 20) voidaan sitten suorittaa mittaukset, joita on mahdollisuus selittää Mollierin nomogrammin avulla tai suoraan kuivumisyhtälöillä. Aukkoihin (19 ja 20) voidaan järjestää automaattinen mittaus ja tulosten tietokonelaskenta - luonnollisesti prosessin ilmavirta (kg/s) on samalla mitattava (esim. Ilmanvaihtolaitosten... 1978 mukaan, ks. myös Schmidt 1956).



Kuva 7. Ehdotus hakkeen kuivatusprosessin tutkimiseksi tarvittavasta lämpöeristetystä kammiosta.

Kirjoittaja yritti tehdä tämän tapaisia kanisterikokeita, mutta kun niistä puuttui lämpösuojaus, lämpöä pääsi aina kar-  
kuun. Varsinkin kylmällä säällä kanisterin seinä tiivisti  
höyryntynyttä vettä takaisin nesteeksi, aiheuttaen kaniste-  
rin sisällä oman energiankiertonsa. Näitä kokeita kuitenkin  
selostetaan jäljempänä niiden kiinnostavuuden takia, vaikka-  
kin diagrammeissa esitetyt tulokset ovat jonkin verran vir-  
heellisissä esitystasoissa. Kokeiden aikana suoritettut lämpö-  
tila- ja kosteusmittaukset jätetään nyt tarkemmin esittämät-  
tä.

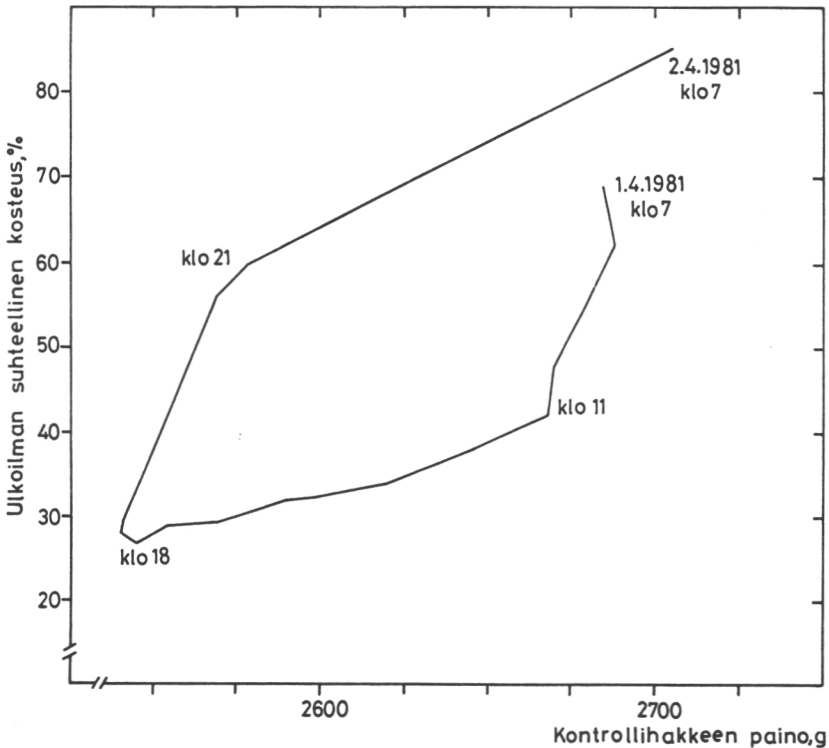


Kokeiden järjestely oli seuraava. Samasta suuresta määrästä tasalaatuiseksi sekoitettua haketta otettiin 25 litran suuruisiin muovikanistereihin hakenäytteitä, kuhunkin 5 kg. Sitten kanistereihin puhallettiin 11, 16 tai 42 watin pienois-tuulettimilla niiden yläkannen kautta ilmaa, joka kulki hakkeen läpi kanisterin pohjassa olevalle purkautumisaukolle.

Mittausten yhteydessä tulee esille nimitys kontrollihake. Sillä tarkoitetaan sellaista kanisterissa olevaa hake-erää, jota on pitkän aikaa jatkuvasti tuuletettu moottorituulettimella. Tällä toimenpiteellä on varmistettu se, että hake on saatu ympäröivän ilman kanssa tasapainokosteustilaan.

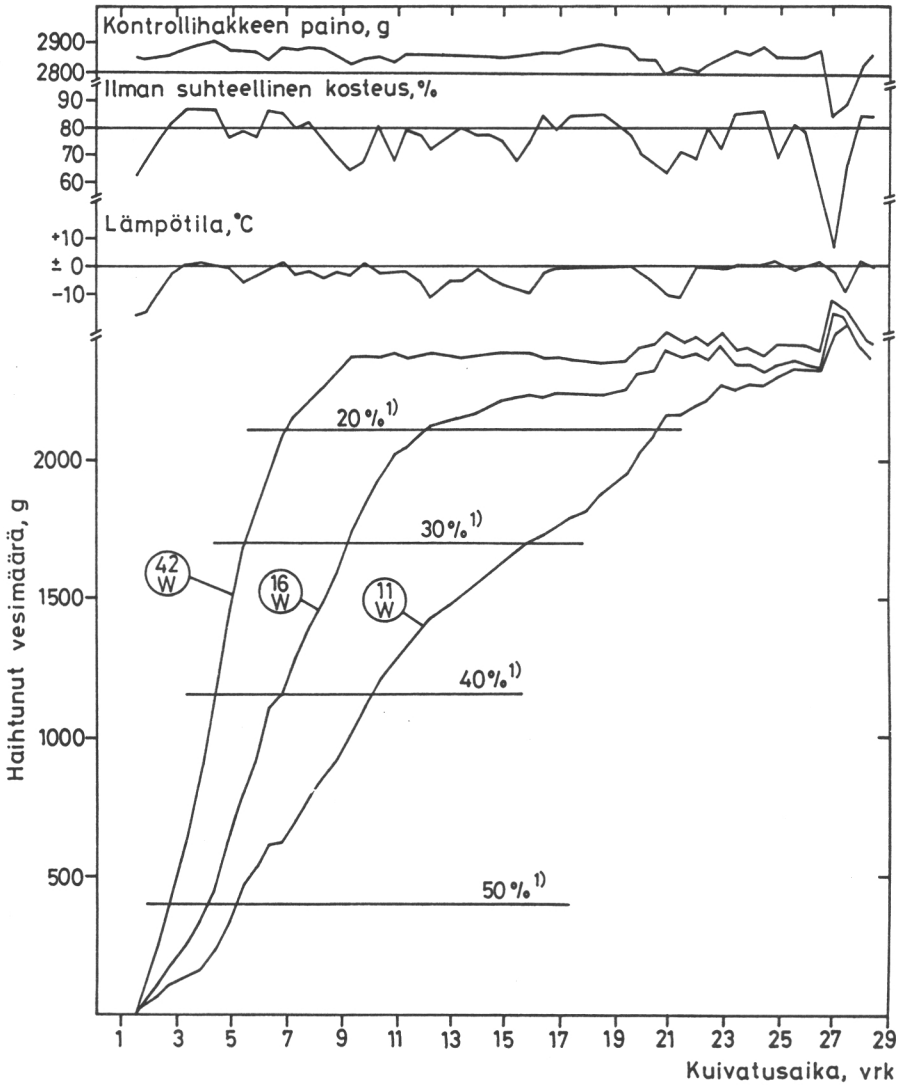
Kontrollihake-erän painon vaihteluiden perusteella voitiin myöhemmin sitten arvioida ulkoilman lämpötilan (t) ja kosteuden (w) yhteisvaikutusta hakkeen painoon. Kuvassa 8 nähdään esimerkki tasapainokosteustilassa olevan kontrollihakkeen yhden vuorokauden pituisesta punnitusjaksosta.

Tämä kontrollihakkeen mittaus alkoi aamulla klo 7. Päivän aikana paino laski ensin jyrkästi klo 11 saakka ja sen jälkeen hitaammin. Klo 18, kun ulkoilman lämpötila alkoi vähetä ja suhteellinen kosteus taas nousta, hakkeen paino lähti seuraamaan tätä kehitystä. Paino nousi ensin jyrkästi klo 21 saakka ja sitten hitaammin seuraavan aamun tullessa, josta se sitten taas lähti uudelle vuorokautiselle taipaleelleen. Itseasiassa koe sisältää mallin, jonka pohjalta voidaan rakentaa automaattinen laite, joka valvoo koneellista tuuletusta niin, että tuuletus tapahtuu vain silloin, kun kuivumiselle on olemassa luontaiset edellytykset.



Kuva 8. Esimerkki 16 W:n sähkömoottorilla kosteustasapainoon tuuletetun kontrollihakkeen painon vaihtelusta vuorokauden aikana.

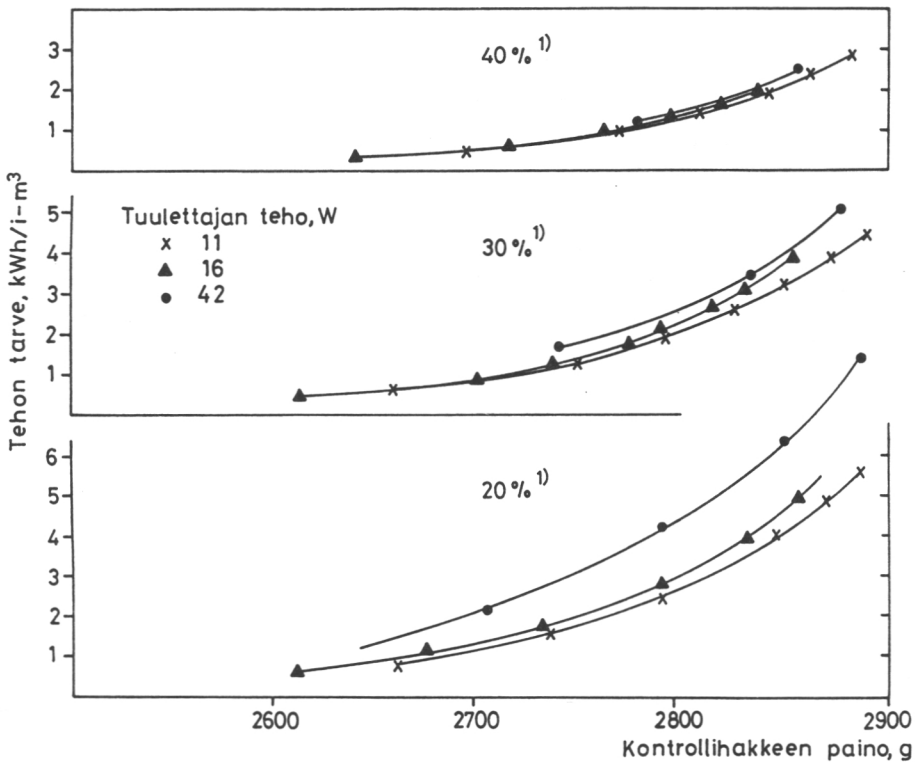
Kuvassa 9 tarkastellaan kolmea hake-erää eri tuuletuksilla talvella 1981. Mittausaika on ollut 29 vuorokautta. Y-akselilla nähdään haihtunut vesimäärä. Lisäksi nähdään lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja kontrollihakkeen painon vaihtelu. Diagrammeista havaitaan, että paino keventyi nopeimmin 42 watin moottorituetinta käytettäessä. Aluksi ilman lämpötilan ja sen suhteellisen kosteuden vaihteluilla ei näytä olevan sanottavaa vaikutusta diagrammien kulkuun. Haihtuminen on ollut aluksi tasaista ja se on edennyt melkein suoraviivaisesti. Tasapainokosteus on saavutettu sitä myöhemmin, mitä pienempitehoisesta tuulettajasta on ollut kysymys. Myöhemmin hakkeen painon muuttuminen seuraa kontrollihakkeen painon muutoksia. Mielenkiintoinen haihtumistapahtuma sattuu kokeen loppupuolella, 27. pv:n kohdalle. Tällöin hake-erät keven-



Kuva 9. Esimerkki kolmella eri tehoisella (11, 16, 42 W) moottorituulettajalla kuivatun hakkeen painon keventymisestä 29 vuorokauden pituisen kuivausjakson aikana talvella 1981.

tyivät, kun lämpötila laski noin  $-8^{\circ}\text{C}$ :een ja ilman kosteus väheni lähes 30 %:iin. Samantapaista liikettä on nähtävissä myös 21. pv:n tienoilla. Moottoreista tullut vähäinen lisälämpö lienee koko ajan vaikuttanut diagrammien kulkuun.

Kuvassa 10 nähdään moottoreiden nimellisarvon mukaan laskettu kulutus lukuisissa kanisterikokeissa, joissa kuivatettavan hakkeen päätekuosteus on ollut 20, 30 ja 40 %. Kulutus (W) esitetään kontrollihakkeen painon funktiona. Kun yksittäiset havainnot on saatu tammi- (suuri kontrollihakkeen lukuarvo) -kesäkuun (pieni kontrollihakkeen lukuarvo) ajalta, näkyy kuvassa eräällä tavalla vuodenajan vaikutus kuivattamiseen. Kontrollihakkeen paino 2 600 g vastaa suunnilleen kesäkuun alkupäiviä ja 2 800 g suunnilleen edellistä vuodenvaihdetta.

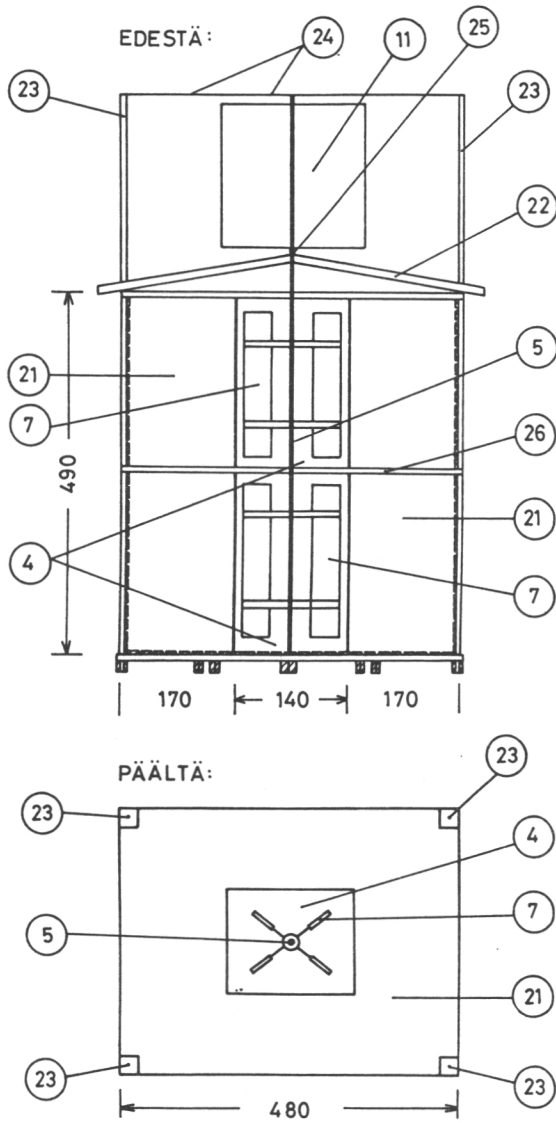


Kuva 10. Arvioitu sähkönkulutus (kWh/i-m<sup>3</sup>) hakkeen tuuletuskokeiden aikana kontrollihakkeen avulla selitettynä. Esim. kontrollihakkeen lukuarvo 2600 edustaa kesäkuun alkua 1981 ja lukuarvo 2800 edellistä vuodenvaihdetta 1980 - 1981.

Kuvasta havaitaan, että pienin tuuletusmoottori (11 W) on ollut sitä edullisempi, mitä kuivemmaksi hake on tuuletettu. Suurimmalla eli 42-wattisella tuulettajalla sähkön kulutus on sen sijaan ollut suurin eli kuivatushyöty on maksanut eniten. Tässä tapauksessa puun luontainen kuivumisvirta ei siis ole kyennyt tuomaan kosteutta puun sisältä niin nopeasti kuin ilmavirta olisi suurta moottoria käytettäessä kyennyt viemään pois. Pieni moottori on siinä suhteessa onnistunut paremmin.

### 3. KOEJÄRJESTELYT JA MITTAUKSET

Koekuivaamo rakennettiin vaihtoehdon 5C mukaisesti (kuva 5C). Kuvassa 11 nähdään tästä 100 m<sup>3</sup>:n hakesiilosta yksityiskoh-  
 taisempi poikkileikkaus. Siiloon kuuluu nelikulmainen pysty-  
 suora keskustunneli (4) ja sen ympärille rakennettu varsinai-  
 nen siilo-osa (21) polttihaketta varten sekä peltikatto (22).  
 Keskustunnelin seinät tehtiin pystyrimoista, joiden väliin  
 jätettiin rakoja tuuletusvirtaa varten. Voimakoneena käytetty  
 Savonius-roottori (11) sijaitsee peltikaton (22) yläpuolella  
 ja on runkoakselinsa yläpäästä tuettu neljään tukipylvääseen  
 (23) säädettävillä vaijereilla. Vaijereitten (24) risteykses-  
 sä on tukilaakeri. Katon rajassa, kohdassa (25) on vetoakse-  
 lilla kardaninivel, joka sallii roottoriosan ja ala-akselien  
 erisuuntaisuuden pyörimisen aikana. Alapuolinen vetoakseli  
 (5) on laakeroitu kolmesta kohdasta ja alin - maajalustaan  
 tukeutuva laakeri - on paine- eli aksiaalilaakeri. Lietsona  
 toimivien siipilapojen (7) pyörimisläpimitta on 120 cm. Lapo-  
 ja on neljä kappaletta sekä ylhäällä että alhaalla. Lapojen  
 yhteenlaskettu pyyhkäisyypinta on 5,5 m<sup>2</sup>, siilon tunnelisei-  
 nien pinta-ala 27,5 m<sup>2</sup> sekä siilon ulkoseinien pinta-ala 94  
 m<sup>2</sup>. Kulkiessaan tunnelista hakkeen läpi siilon ulkoseinille  
 tuuletusvirta siis heikkenee suhteessa 3,4:1 eli tuuletusil-  
 man häviötön paine siilosta ulostullessaan on enää vain kol-  
 mannes siitä, mitä se oli tunnelissa. Käytännössä hakkeen  
 virtausvastus aiheuttaa vähennyksen ilman virtausnopeuteen.



Kuva 11. Tutkimuksessa käytetyn kuivaamon leikkaukset edestä ja päältä.



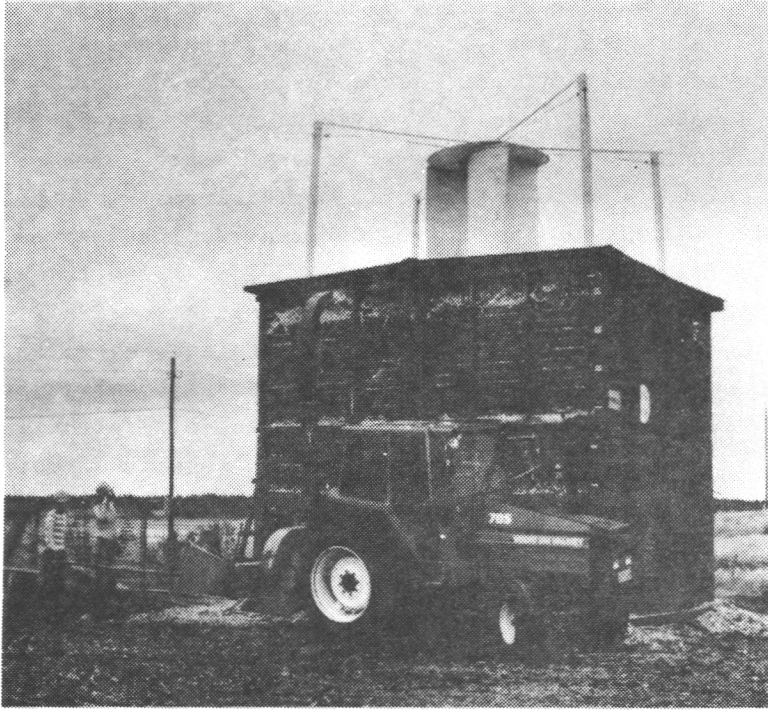
Kokeen Savonius-roottori koottiin 3 mm paksusta, vedenkestävästä vanerista, joka liimattiin kaksinkertaiseksi veneenkennuksessa käytettävällä erikoisliimalla. Kaaripintoja varten sahattiin ylä- ja alakansilevyjen läpi ura-aukot, joihin liimalla sivellyt 3 mm levyt (kaksi vastakkain) oli helppo yksitellen upottaen taivuttaa paikalleen. Levyt ruuvattiin sitten kiinni toisiinsa ja sidottiin, edelleen hyvää veneliimaa ja vaneerisiteitä käyttäen, ylä- ja alalevyihin. Savonius-roottori rakennettiin kolmikaaripintaiseksi siitä huolimatta, että tiedettiin kaksikaaripintaisen Savonius-roottorin tehon olevan kolmanneksen parempi. Koska kolmikaaripintainen Savonius-roottori lähtee herkästi liikkeelle pienelläkin tuulella, tällaista roottoria pidettiin kokeiluvarmuutta lisäävänä. Kolmikaaripintainen Savonius-roottori on heikossakin tuulessa melkein aina liikkeessä. Koeroottorin pyyhkäisy-pinta-alaksi (A) tuli  $3,8 \text{ m}^2$  ja sen teho voidaan laskea jo edellä esitetyn mukaisesti kaavasta

$$P_{S3,8} = 0,2\rho Av^3/2, \quad (6)$$

missä  $P_{S3,8}$  on Savonius-roottorin teho, 0,2 on kolmikaaripintaisen Savonius-roottorin hyötysuhde,  $\rho$  on ilman tiheys ( $\text{kg/m}^3$ ),  $A = 3,8 \text{ m}^2$  ja  $v$  on tuulen nopeus (m/s). Suoran akselivetonsa ansiosta roottorin teho voidaan arvioida siirtyvän sellaisenaan tuuletuslietson akselille tunneliin. Laakerikitka saattaa aiheuttaa tosin 1 %:n suuruisen tehon häviön. Siilo nähdään valmiina kuvassa 12.

Siilo haketettiin täyteen vastakaadetuista pienpuurangoista, jolloin hake puhallettiin hakkurin omalla lietsolla siiloon. Kuivauksen jälkeen siilon etuseinä purettiin ja hake siirrettiin traktorin etukauhalla odottavaan ajoneuvoon, joka kuljetti sen polttolaitokselle.

Kuivauksen aikana yritettiin mitata tuuletusvirran suuruutta siten, että hakkeeseen asennettiin siilon eri korkeuksille ja määräsyyvyyksille putkia, joiden toinen pää ulottui siilon



Kuva 12. Koesiilo rakennettuna.

ulkopuolelle. Tarkoituksena oli mitata putken sisäpään kohdalta putkeen joutuvan ilmavirran lämpötila, kosteus ja virtausnopeus sekä verrata niitä tunnelista saatuihin ilman lähtöarvoihin. Vaikka mittauksia suoritettiin varsin runsaasti, tuloksiin ei voida luottaa. Todettiin näet, että putkea myöten mittariin tuleva ilmavirta ei ehkä ollutkaan peräisin siitä paikasta, josta sen kuviteltiin tulevan. Koeputken alkupäähän tai yleensä koeputken ympäristöön oli saattanut syntyä siilon painumisen johdosta samantapaisia onkaloita, "rotanpesiä" kuin esimerkiksi poikkituntojen (26) alle, josta mainittiin jo aikaisemmin. Koeputkiin tullut ilma saattoikin näin ollen olla peräisin mistä tahansa putken lähiympäristöstä. Poikkituntojen (26) alle syntyneitä onka-

loa myöten saattoi tunnelin ilma virrata ulos tätä "rotan käytävää" myöten eli karata systeemistä saamatta juuri mitään hyödyllistä aikaan.

Puolustusvoimilta lainaksi saadulla savukoneella puhallettiin tekosavua tunneliin. Tällöin todettiin selviä vuotoja poikkituentojen (26) kohdalla ja alapohjassa. Runsaasti savutettaessa tekosavua tuli kyllä ulos melkein joka paikasta, mutta mainituista paikoista eniten.

Siiloa hakkeella täytettäessä otettiin hakkurin hakevirrasta säännöllisin aikaväleihin näytteitä. Lisäksi kuivatuksen jälkeen siiloa purettaessa otettiin näytteitä purkaussivulta oikeasta etulohkosta yhdeksästä eri korkeudesta pystysuunnassa niiltä kohdista, jotka ilmenevät kuvasta 13. Samoilta paikoilta otettiin myös muutamia näytteitä homesienien itiöviljelyä varten. Lisäksi otettiin polttolaitoksella purkauksen aikana tettu näyte, tasaisesti koko hakevirrasta, 10 näytettä kustakin kuormasta eli yhteensä 30 näytettä kustakin kuivatuserästä. Lisäksi polttolaitokselle menevät kuormat punnittiin ja kuutioitiin.

Siilon vieressä tehtiin koko ajan kuivatuskokeita useissa 15 m<sup>3</sup>:n suuruisissa konteissa (Nurmi 1987), joissa ei ollut tuuletusta. Näistä konteista saattoi siilon tuuletusilmaan levitä runsaammin sieni-itiöitä kuin mikä muuten olisi ollut aukealla peltoalueella tavanomaista.

#### 4. TIETOJA HAKETETUSTA PUUSTA JA KUIVUMISOLOSUHTEISTA

Kokeeseen valittiin tarkoituksellisesti vaikeahkosti kuivattavia pienpuueriä. Mikäli siis kuivattaminen näissä hake-erissä onnistuisi - niin ajateltiin - sama onnistuisi todennäköisesti myös helpommissa erissä. Kaadetun kaatotuoreen pienpuun laatu nähdään taulukosta 4. Siihen on lisäksi merkitty eräitä tuulta ja säätä koskevia keskiarvoja.

Taulukko 4. Tietoja haketetusta puusta ja kuivumisolosuh-  
teista.

	Erä		
	I	II	III
Pienpuun laatu	Silmulla olevaa kokopuuta	Lehdessä olevaa kokopuuta	Karsittua runkopuuta
<b>Puulajisuhteet:</b>			
ko/le/ha, %	40/50/10	40/45/15	30/60/10
$D_1$ , cm	5	5	13
Kääntöaika	9.4.1982	9.8.1982	7.6.1983
Haketusaika	19.4.1982	19.8.1982	17.6.1983
Purkausaika	5.7.1982	20.4.1983	20.1.1984
Kuivausaika, d	64 <sup>1)</sup>	254	228
Tuulen nopeus, $m/s$ <sup>2)</sup>	4,1	4,0	4,1
Lämpötila, °C <sup>2)</sup>	10,1	1,2	7,8
Suht. kosteus, % <sup>2)</sup>	67	76	78

1) Tuuletus keskeytyneenä akselirikon takia 2 viikkoa touko-  
kuussa.

2) Säätietöjen keskiarvot laskettu Helsinki-Vantaan lentoken-  
tän sääaseman mittauksen perusteella.

## 5. TUTKIMUKSEN TULOKSET

### 5.1. Mitatut tulokset

Haketuksen yhteydessä ja polttolaitoksella puretuista kuor-  
mista otettujen näytteiden perusteella saatiin taulukossa 5  
esitetyt tulokset. Tuloksiin vaikuttaneista tekijöistä mai-  
nittakoon, että ensimmäinen erä (I) joutui kuivatuksen krii-  
tillisimmässä vaiheessaan kärsimään akselikatkoa, joka py-  
säytti koneikon pariaksi viikoksi. Lisäksi siilon purkamis-  
vaiheessa havaittiin hakkeen kostuneen laajalti nurkissa,  
joissa sadevesi oli päässyt sisään tukipylväiden (23) ja ka-  
ton yhtymäkohdasta. Tämä vuoto tukittiin eikä se enää myöhem-  
min häirinnyt kokeita.

Toisessa erässä (II) oli myös vaikeuksia, koska viikon ver-  
ran kestänyt helle ja tuuleton sää auttoivat sienien ja ke-  
miallisten prosessien edistymistä, mikä havaittiin voimak-

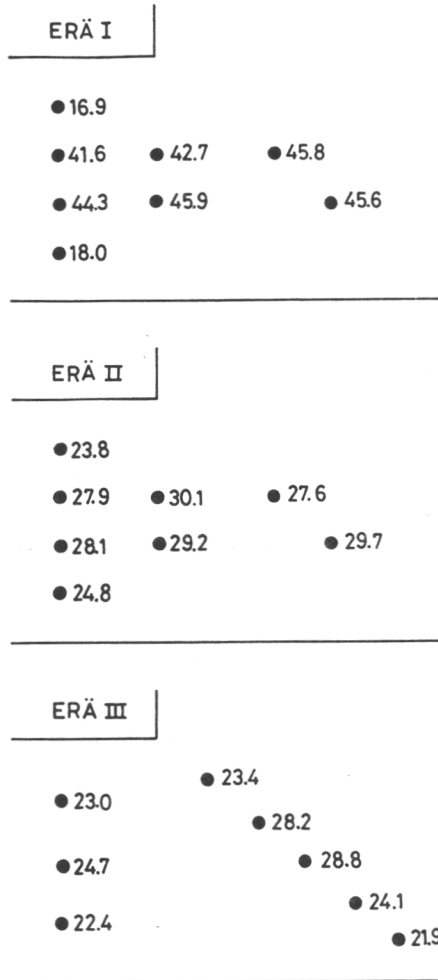
Taulukko 5. Hakkeen alku- ja päättekosteudet.

	Erä		
	I	II	III
Pienpuun laatu	Silmulla olevaa kokopuuta	Lehdessä olevaa kokopuuta	Karsittua runkopuuta
ko/le/ha, %	40/50/10	40/45/15	30/60/10
Alkukosteus, %	50,7	45,0	48,7
Päättekosteus, %	37,6	28,8	24,5

kaana hajuna ja kirjoittajan pään kipuna sekä mittaustuloksissa sisään asetetuista koeputkista. Lämpötila siilon sisällä ylitti tällöin runsaasti yli +30°C. Tyynen ilman jälkeen tulleet tuuliset säät pelastivat tilanteen.

Tässä vaiheessa kaivattiin apumoottoria, joka olisi pyörittänyt tuuletuslietsoa tyvenen aikana. Vaikka sähkömoottori olikin asennettu paikalleen tällaisia tilanteita varten oli voimavirran saanti paikalle vaikeata pitkän vetoetäisyyden ja turvallisuusnäkökohtien takia. Tuulettumista vaikeutti tässä tapauksessa myös raaka-aine, joka oli ns. viherhaketta. Sen lehtiosat tiivistivät hakkeen huonosti tuulettuvaksi, paakkumaiseksi massaksi.

Kolmannen erän (III) ensimmäinen polttolaitokselle ajettava purkauskuorma kastui jonkin verran sen takia, että tuuli oli heittänyt suojapeitteen yön aikana kasan päältä, ja lunta satoi hakkeeseen. Kosteudeksi saatiin tästä kuormasta 27,9 % ja muista 25,0 ja 23,0 %.



Kuva 13. Hakesiilon oikeaan etulohkoon sijoitettujen pystysuorien näytteenottolinjojen horisontaalinen sijainti ja saadut keskikosteudet (%).

Kuvasta 13 nähdään keskiarvot tuloksista, jotka on laskettu siilon oikeasta etulohkosta 50 cm:n välein siilon pystysuunnassa otetuista kosteusnäytteistä. Hakenäytteiden ottoapaikat horisontaalisesti jakaantuneena nähdään tarkemmin kuvasta. Tulokset on esitelty kustakin hake-erästä (I-III) erikseen.

Erissä II ja III keskikosteuksien jakaumat ovat samantapaisia, mutta erässä I, jota on kuivattu vähemmän aikaa, havaitaan keskellä vielä kosteaa haketta. Sen sijaan tuuletustunnelin ja ulkoseinän puolella oleva hake on lähes täysin kuivunut. Tämä antaa aiheutta sellaisellekin olettamukselle, että kosteilla säillä jatkuvasti tuuletettaessa vesi tiivistyy hakekerroksen puolivälin tienoille. Tämän takia tuuletuskoneisto on pysäytettävä kostean ajanjakson ajaksi. Ilmiötä voitaisiin helposti tutkia kuvassa 7 esitetyllä koejärjestelyllä.

Pesonen (1982) viljeli hake-erästä I otettuja näytteitä ja ilmoitti, että mitatut itiöpitoisuudet olivat suurempia kuin asuinhuoneista ( $1400 \text{ kpl/m}^3$ ) löydetyt, hieman pienempiä kuin hakkeen käsittelyn yhteydessä ( $0,1 - 1 \text{ milj. kpl/m}^3$ ) aiemmin yleensä mainitut ja huomattavasti pienempiä kuin maatiloilla ( $0,1 - 10 \text{ milj. kpl/m}^3$ ) mitatut pitoisuudet.

Pesonen (1984) analysoi Nevalaisen erästä III lähettämistä hakenäytteistä itiöitä  $13,4 \text{ milj. kpl/m}^3$ . Mittaustensa perusteella Pesonen katsoo, että haketta käsiteltäessä olisi käytettävä Työsuojeluhallituksen hyväksymää 2b-luokan henkilökohtaista hengityssuojainta. Ilman hengityssuojainta työskennelleet siilon purkajat sekä hakenäytteiden ottajat eivät kuitenkaan kertaakaan todenneet päänsärkyä ja muita homeölyyn aiheuttamia oireita.

Upinniemen polttolaitokselle vuosina 1982 ja 1983 sekä Vapon Hyvinkään polttolaitokselle 1984 toimitetut hake-erät olivat vastaanottajien Väinö Vuoren ja Reino Rannikon mukaan 'hyvän värisiä ja homeettomia'. Kirjoittajan omien havaintojen mukaan erät I ja III olivat hyvän värisiä, mutta erässä II, joka oli tehty viherhakkeesta, oli muutamia, arviolta  $50-100 \text{ dm}^3$ :n pesäkkeitä, joissa hake oli tummunut, paakkuista ja haisi homeelta.

Nevalainen (1988) mittasi tuulen painetta tyhjän siilon keskustunnelissa. Hän totesi, että tuulen virtausnopeus (m/s) tunnelista oli suunnilleen sama kuin tuulenopeus ulkona eli



sama kuin tuulennopeus ulkona eli se ilmavirta, joka liikutti Savonius-roottoria. Tämän kokeen aikana lietson tuuletuslavasto oli muotoiltu nelikaaripintaiseksi. Se muistutti kaaripintojensa puolesta ikäänkuin nelikaaripintaista Savonius-roottoria, jota pyöritettiin päinvastoin. Se painoi kaaripinnoillaan ilmaa tunnelista ulospäin.

## 52. Arvioidut tulokset

Tutkimuksessa pyrittiin arvioimaan Savonius-roottorin tuotosta (kWh) ja siilosta haihtunutta vesimäärää sekä vuosituotannolla punnittua tuulennopeutta. Arviot nähdään taulukosta 6.

Taulukko 6. Arvioita Savonius-roottorin tuotosta ja sen vaikutuksesta hakkeen kuivumiseen.

	Erä		
	I	II	III
Pienpuun laatu	Silmulla olevaa kokopuuta	Lehdessä olevaa kokopuuta	Karsittua runkopuuta
Savonius-turbiinin osuus vuosituotannosta, % <sup>1)</sup>	11	81	66
Eri nopeiden tuulien vuosituotannolla punniten arvioitu tuulen nopeus, m/s <sup>1)</sup>	4,9	6,8	6,4
Kokeen aikana siilosta haihtuneeksi arvioitu vesimäärä: yhteensä, kg	2300	2800	4300
kg/d	36	11	19
Siilosta haihdutetun veden kuivatuskustannuksen yläraja, mk/100 i-m <sup>2)</sup>	2300	1900	2600

1) Arviot koostettu Södergårdin (1978) esitysten perusteella.

2) Laskelmat on tehty Linnan ja Järvisen (1983) esittämien kaavojen mukaan erään 50 kW:n kattilan keskimääräisen hyötysuhteen perusteella.

Taulukossa 6 esitetty keskituuli (m/s) saattaa olla jonkin verran liian korkea, mutta sivulla 31 olevassa taulukossa 4 säähavaintoaseman tietojen perusteella laskettu aritmeettinen keskituuli (m/s) on puolestaan lukuarvoltaan varmastikin liian pieni sitä tarkoitusta varten, että keskituulen avulla yritetään ennustaa tuulirootto<sub>in</sub> keskituotosta (kWh). Tämä seikka johtuu siitä, että tuulen voiman kasvu lisääntyy suhteessa tuulen nopeuden kolmanteen potenssiin ( $v^3$ ).

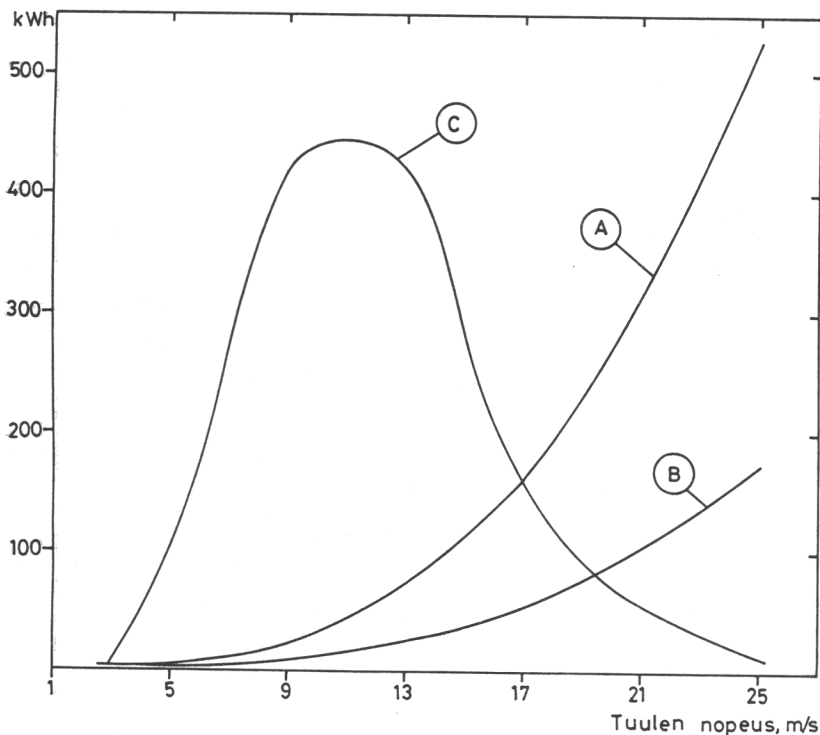
Linnan ja Järvisen (1983) mukaan taulukkoon 6 lasketut kuivauskustannusten taloudellista ylärajaa osoittavat eräkohtaiset markkamäärät ovat kiinnostavia. Tämän mukaan kaikista eristä yhteensä saatava kuivatushyöty on saattanut olla lähes 6800 mk eli 76 % siilon rakentamiskustannuksista, jotka Nevalainen (1988) on arvioinut tuuliturbiini mukaanluettuna 8900 mk:n suuruisiksi (v:n 1987 hintataso). Tämän mukaisesti koekuivaamon rakentamiskustannukset saataisiin kuoletettua jo neljännellä kuivatuskerralla.

Kokeilla ei ole ollut mahdollista selvittää, mikä kuivatushyödyssä on tuuliturbiinin osuus ja minkälainen kuivatushyöty saataisiin, jos hakkeen annettaisiin kuivua siilossa ilman minkäänlaista aputuuletusta. On selvää, että hake kuivuisi tällaisessakin tapauksessa melko hyvin, koska siilon keskustunneli toimii jo sinänsä hyvänä tuulettajana ja siilon ulkoseinillä oleva hake kuivuu hyvin aivan itsestäänkin. Voidaan myös kysyä, eikö ilmanvaihto siilossa olisi aika runsas, jos siilon keskustunnelia jatkettaisiin esim. mustasta muovista tehdyllä tornirakenteella. Ainakin aurinkoisella säällä ilma virtaisi voimakkaasti ylöspäin ja vetäisi korvausilmaa ulkoa hakkeen läpi. Tällä tavallakin hake varmaan kuivaisi siilossa.

Kuvassa 14 nähdään käyrällä A tuuliroottorista teoreettisesti saatava maksimituotos ( $C_p = 0,592$ ,  $\rho = 1,247 \text{ kg/m}^3/10^\circ\text{C}/760 \text{ mm Hg}$ ,  $A = 3,8 \text{ m}^2$ ). Käyrältä B voidaan lukea, mitä puolestaan kolmikaaripintainen Savonius-roottori ( $C_p = 0,2$ ) tuottaa sa-

moissa olosuhteissa eri tuulennopeuksilla. Käyrä C esittää, miten energian kokonaistuotanto jakaantuu vuoden aikana eri nopeuksilla puhaltavien tuulien osalle.

Selvä huipputuotanto saadaan noin 10 m/s puhaltavista tuulista. Huomattavasti saadaan myös energiaa tuulista, jotka ylittävät tuon rajan. Kestävyyssyistä on propelliroottoreita jarrutettava yli 11 m/s puhaltavilla tuulilla, minkä takia nopeiden tuulien energiaa ei voida kokonaan hyödyntää näillä koneilla. Savonius-roottori kestää nopeankin tuulen jarruttelelta. Siitä esimerkkinä on kokeessa käytetty turbiini, joka on koepaikallaan pyörinyt yhtämittaisesti pysähtymättä yli 2,5 vuotta ilman korjauksia ja huoltoa.



Kuva 14. Tuulen teoreettinen voima, kWh (A) ja kolmikaaripintaisen Savonius-roottorin siitä ottama teho, kWh (B) sekä saman Savonius-roottorin vuositeho (kWh/a) jakaantuminen tuulennopeuden funktiona.

Kokeessa käytetyn Savonius-roottorin pyyhkäisyypinta oli  $3,8 \text{ m}^2$ . Nevalaisen (1988) esityksen mukaan tuulenpaine siilon keskustunnelissa on roottorin käydessä suunnilleen sama kuin ulkona. Tämän perusteella voitaneen arvioida, miten tuuletuksen ilmavirran nopeus vähenee siilon ulkoseinää kohti.

Koska ei ole mitään tietoa hiljaisella nopeudella kulkevan ilmavirtauksen virtausvastuksesta polttihakkeessa, merkitään ilmavirran virtausvastusta hakkeessa  $q_u$ :lla. Tällöin ilmavirran nopeus siilosta ulostullessaan on suunnilleen

$$v_{u1} = 0,13q_u V, \quad (7)$$

jossa  $v_{u1}$  on tuuletusvirran suuruus siilosta ulostullessaan (m/s),  $q_u$  virtausvastuskerroin ja  $v$  tuuliturbiinia pyörittävän tuulen nopeus (m/s).

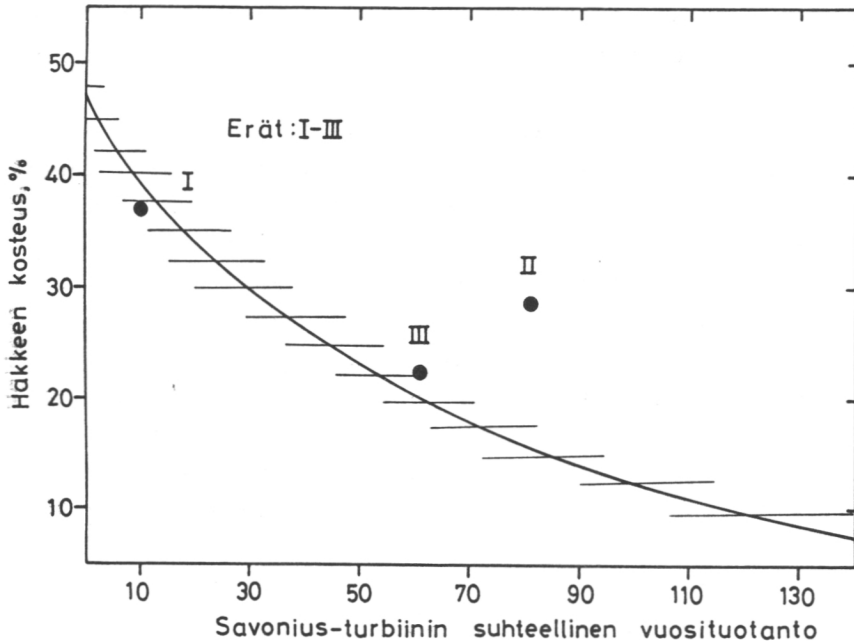
Käytännössä on tärkeätä tietää, miten kauan hake-erän kuivatukseseen tarvitaan aikaa, kun pyritään haluttuun määräkosteuteen. Kolmen erilaisen koe-erän perusteella tällaisten johdotösten tekemiseen ei tietenkään ole kovin suuria mahdollisuuksia. Ratkaisumallia on siitä huolimatta hahmoteltu ja arvio esitetään kuvassa 15. Sen mukaan saatetaan kuvitella, että kuivumiskäyrä kulkee jossain vaakaviivoitetulla alueella ja todennäköisesti käyräviivaisesti siten, että kuivuminen saattaa aivan alussa olla ensin suhteellisen nopeaa ja myöhemmin puunsyiden kyllästymispisteen alapuolella hyvinkin hidasta (vrt. esim. Skaar 1972 tai Shelton 1976).

Kuvasta 15 voidaan havaita, että viherhake-erä (II) kuuluu aivan toisenlaiseen kuivumissarjaan kuin erät I ja III. Tämä on luonnollista, koska viherhakkeen ilmanläpäisevyys on huono.

Kuvasta 15 selviää, että kokeessa käytetty hakkeen kuivatusmenetelmä on hidas. Kuivatuksen tehoa voidaan kuitenkin hahmottaessa jouduttaa monin tavoin. Esimerkiksi tuuliroottorin tehoa voidaan lisätä ja lietson puhallusominaisuuksia parantaa. Ostoenergiaa voidaan lisäksi käyttää tuuletusilman

lämmittämiseen. Tällainen lisälämpö voidaan tuoda siiloon pienin pääomakustannuksin, jos käytetään esim. ns. lämpöjoh-toa. Tämä voidaan sijoittaa tuuletusvirtaan eli se asennetaan sisätunnelin seinään, josta lisälämpö menee kokonaisuudessaan ilmavirran mukana suoraan hakkeeseen. Johtoa on saatavana eri tehoisena, esim. 500 W/20 m.

Jos esimerkiksi kokeen viimeinen erä (III) olisi haluttu kuivattaa nopeasti 15 %:n kosteuteen olisi siitä pitänyt poistaa vielä noin 2000 kg vettä. Silloin olisi siiloon voitu tuoda ostolämpöä esim. 2000 kWh. Sen hinta olisi ollut sil-loin noin 4 mk/i-m<sup>3</sup>.



Kuva 15. Tutkimuksessa käytetyn Savonius-roottorin suhteellisen vuosituotannon ja siilossa kuivatetun hakkeen kosteuden riippuvuuden arvio. Eristä I, II ja III mitattuja pääteosteuksia kokeiden päättyessä (•).

## 6. PÄÄTELMIÄ

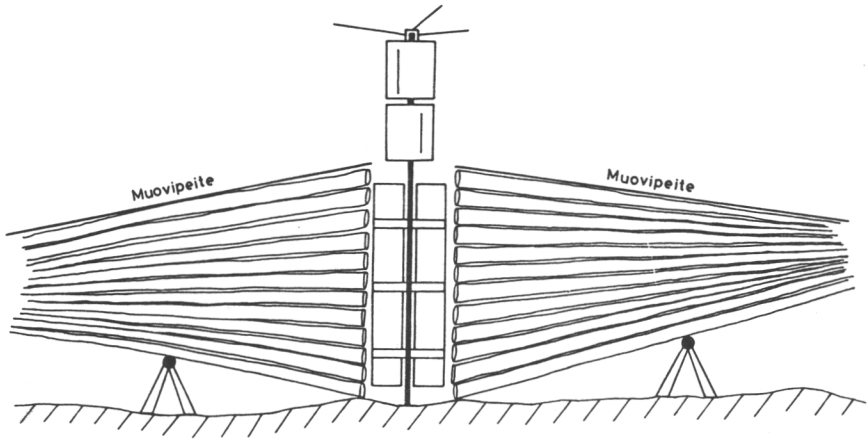
Kokeilu lienee ensimmäinen yritys käyttää tuulivoimaa hakkeen kuivatukseen tuuliroottoriin suoraan kytketyn lietson avulla. Kokeilu on varsin vaatimaton - vaikkakin pitkäaikainen - kuivumisprosessin luonteesta johtuen.

Koska polttohake on selvästi kuivunut ja sen homesienikannat pysyneet kurissa, haketta on voitu varastoida pitkään ilman varastointitappioita. Menetelmää kannattaisi enemmänkin selvittää. On esitetty ajatus (Puunkäsittelyaseman... 1985), että kirjoittajan edellä esittämä kylmäilmatuuletuksen periaate olisi sovelias puunkäsittelyasemille hakkeen kuivatusta ja varastointia varten. Menetelmä saattaisi sopia suurkuluttajille polttohakkeen varmuusvarastointiin, esim. pahimpien pakkaskausien aikana, jolloin polttohake usein pyrkii jäätymään tai sen joukkoon tahtoo joutua lunta ja jäätä.

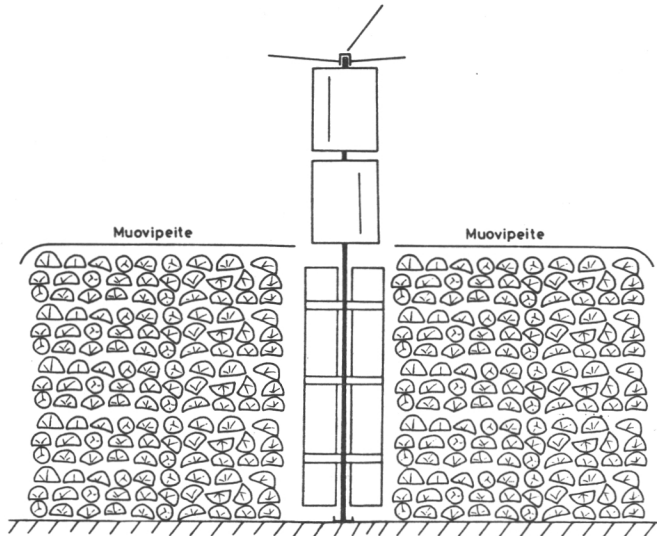
Luonnollisesti olisi syytä tutkia erilaisten tuuliroottoreitten ja tuuletuslietsojen ominaisuuksia erilaisissa siilomalleissa.

Kirjoittajan mielestä nämä tutkimukset olisi suoritettava huomioon ottaen aikaisemmin esitetyt näkökohdat (ks. s. 20 ja kuva 7). Tällöin saataisiin vertailukelpoisia tuloksia, joiden perusteella olisi mahdollisuus tehdä reaalisia johtopäätöksiä eri sovellutusten paremmuusjärjestyksestä. Vertauskelpoisissa tutkimusolosuhteissa tulisi verrata esimerkiksi polttohake-eriä, joissa tuuletusta siilossa ei käytetä ollenkaan tai joissa käytetään erilaisia, esimerkiksi sähkömoottorituuletusmenetelmiä.

Koska Savonius-roottori esim. kahdesta käytetystä, päällekkäin asetetusta öljytynnyristä rakennettuna tulee huokeaksi, voidaan ajatella polttohakerankojen kuivaamista esim. rasiinkaadon jälkeen - joko metsässä tai polttolaitoksella - kuvan 16 mukaisesti. Myös halkoja tai nalikoita voitaisiin kuivata vastaavalla tavalla (kuva 17).



Kuva 16. Malli varastoitujen polttohakerankojen kuivattamiseksi Savonius-tuuliturbiinin avulla. - Käytännössä rangat on sijoitettava siten, että Savonius-turbiinin tuuletuslavasto joutuu kokonaan rankojen ympäröimään pystytunneliin.



Kuva 17. Savonius-tuuliturbiini, jota on käytetty kuvan 16 tapaan halkojen kuivattamiseen.



## 7. TIIVISTELMÄ

Kokeellisesti on selvitelty Savonius-tyyppisen tuuliroottorin käyttömahdollisuuksia polttohakkeen kuivaamisessa. Kolme hake-erää kuivattiin 100 m<sup>3</sup>:n suuruudessa pystysiilossa, jossa tuuliturbiinin lietso-osa sijaitsi siilon keskellä, noin 5 m korkeassa pystytunnelissa. Tuuletusvirta kulki tällöin keskustunnelista suunnilleen vaakasuorassa suunnassa hakkeen läpi ulkoilmaan. Tuuletusvirta hakkeen sisällä oli erittäin heikko. Menetelmä näyttää soveltuvan ympärivuotiseen kuivaamiseen lähinnä sellaisissa tapauksissa, joissa kuivatusaika voi olla pitkä ja joissa on tärkeää saada hake samalla säilymään pitkänkin varastoinnin aikana halvalla.

## KIRJALLISUUS - REFERENCES

- Alhojärvi, P. 1981. Hakkeen keinokuivatus. Työtehoseuran metsätiedotus 15. 6 s.
- Blackwell, B., Sheldahl, R. & Feltz, L. 1977. Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotors. Sandia Laboratories Sand76-0130 (July 1977). 107 s.
- Fagerholm, N-E. 1986. Termodynamiikka. Tekijä ja Otakustantamo. Gummerus Oy:n kirjapaino. Jyväskylä. 382 s.
- How to construct a cheap wind machine for pumping water (Savonius rotor). The Brace Institute of McGill University in Montreal. 8 s.
- Ilmanvaihtolaitosten ilmavirtojen tarkastusohjeet. 1978. Rakennushallitus. 77 s.
- Isomäki, O., Kaukonen, A., Salminen, K. & Uimonen, M. 1964. Puutavaran keinokuivaus. I. Mekaaninen puuteollisuus. Suomen puuteollisuusinsinöörien yhdistys r.y. s. 301-386.
- Kares, M. & Linna, V. 1983. Polttohakkeen puhallinkuivatus pientaloissa ja maataloilla. KTM, Energiaosasto ja Sitra. Tutkimusraportti 25B. 81 s.
- König von, F. 1973. Windenergie in praktischer Nutzung. Udo Pfriemer Verlag. München. 182 s.

- Le Gourieres, D. 1982. Wind Power Plants. Pergamon Press. Oxford. 285 s.
- Lindsey, C. 1974. Windmills. A bibliographical guide. Julk. C.F. Lindsey, 15. Bournemouth, London, SW19.
- Linna, V. & Järvinen, T. 1983. Hakkeen keinokuivatuksen tekniset ratkaisut ja taloudellisuus. Abstract: Technical solutions and economy of the artificial drying of wood chips. KTM, Energiaosasto ja Sitra. Tutkimusraportti 25A. 114 s.
- Mikkonen, T. 1981. Koneellinen kuivatus ja aurinko. Vilja-Heinä-Hake. Insinööritoimisto Lämpöetu, om. Taito Mikkonen. Tampere. 93 s.
- Mollier h,s-Diagram. 1969. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. R.Oldenbourg. München.
- Nevalainen, T. 1988. Polttohakkeen varastointi Savonius-roottorilla varustetussa Nisula-siilossa. Metsäntutkimuslaitos, metsäteknologian tutkimusosasto. Moniste.
- Nisula, P. 1974. Makroilmaston vaikutus varastoidun pinotavaran painoon. Summary: Effect of microclimate on the weight of stored cordwood. Folia Forestalia 218. 23 s.
- 1980. Näkökohtia polttohakkeen kuivaamisesta. Abstract: Aspects of the drying of fuel chips. Folia Forestalia 440. 14 s.
- Nurmi, J. 1987. Polttohakkeen kuivaus traktorikonteissa. Summary: Drying of fuel chips and chunks in wooden bins. Folia Forestalia 687. 40 s.
- Optimaalisen tuuliturbiinin aerodynaamiset perusteet. 1984. Kauppa- ja teollisuusministeriön energiaosasto. Oy Finergia Ab:n tutkimusraportti. Tuulos. Moniste. 100 s.
- Peck, E. 1962. Drying Lumber by Solar Energy. Forest products laboratory, Forest Service. U.S. Department of Agriculture. 2 s.
- Pesonen, M. 1982. Raportti tehdyistä itiömäärityksistä. Metsäntutkimuslaitos, metsäteknologian tutkimusosasto. Konekirjoite. 8 s.
- 1984. Itiöanalyysi. Metsäntutkimuslaitos, metsäteknologian tutkimusosasto. Moniste. 1 s.
- Putnam, P.C. 1982. Putnam's power from the wind. Van Nostrand Reinhold Company. New York. 456 s.

- Puunkäsittelyaseman toimintaedellytykset ja kannattavuus. 1985. Kanta-Hämeen seutukaavaliitto. Kehittämistoimisto Oy Erg Ab:n julkaisu II: 144. Hämeenlinna. 87 s.
- Sahatavaran kuivausmenetelmien vertailu. 1976. Sitra. Metsäteollisuuden energiatutkimus 12. 7 s.
- Savonius, S. J. 1928. The wind rotor in theory and practice. Savonius Co. Helsingfors. 37 s.
- Schmidt, E. 1956. Einführung Technische Thermodynamik. Springer-Verlag. Berlin/Göttingen/Heidelberg. 515 s.
- Shankar, P.N. 1976. The Effects of Geometry and Reynolds Number on Savonius Type Rotors. National Aeronautical Laboratory, Bangalore, India, AE-TM-3-76.
- Shelton, J. 1976. The woodburnes encyclopedia. Section one: Wood as Energy. Wermont Crossroads Press. Waitsfield. 126 s.
- Skaar, C. 1972. Water in wood. Syracuse wood science series 4. Syracuse University Press. New York. 218 s.
- Södergård, B. 1978. Vindkraftboken. Grafiska Gruppen Egnellska. Stockholm. 91 s.







ISBN 951-40-0812-X  
ISSN 0358-4283

Helsinki 1988. Valtion painatuskeskus