

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Konetekniikan osasto
Energiatekniikan laitos

Matti Pellinen

MEKAANISEN METSÄTEOLLISUUDEN ENERGIANHANKINNAN VAIHTOEHDOT

Diplomityö, joka on opinnäytteenä jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 26. huhtikuuta 1996.

Työn tarkastaja: Prof. Carl-Johan Fogelholm
Työn ohjaaja: DI Ismo Nousiainen

Tekijä:	Matti Pellinen		
Työn nimi:	Mekaanisen metsäteollisuuden energianhankinnan vaihtoehdot		
Title in English:	Energy Alternatives in Mechanical Forest Industry		
Päivämäärä	26. huhtikuuta 1996	Sivumäärä:	75+30
Osasto:	Konetekniikan osasto Energiatekniikan laitos	Professuuri:	Ene-47
Työn valvoja:	Prof. Carl-Johan Fogelholm		
Työn ohjaaja:	DI Ismo Nousiainen		
<p>Mekaaninen metsäteollisuus synnyttää runsaasti puuperäisiä sivutuotteita, kuten kuorta, purua, haketta ja hiontapölyä. Sahojen ja vaneritehtaiden energiankulutus on usein niin alhainen, että omat sivutuotteet riittävät laitoksen lämpöenergian tarpeen tyydyttämiseen, sähkö ostetaan ulkoa. Sivutuotteet poltetaan kuivureissa ja höyry- tai kuumavesikattiloissa. Sähkön ja lämmön yhdistetty tuotanto on harvinaista.</p> <p>Sahojen tarvitsema lämpötila on n. 120°C. Lisäksi sahatavara-kuivaamojen lämpökuorma on hyvin tasainen. Pienet biopoltoainetta käyttävät voimalaitokset voisivat etenkin sahan yhteydessä tuottaa sekä lämpöä että sähköä, jos ne olisivat taloudellisia.</p> <p>Työssä tutkittiin sahateteollisuuslaitoksen energianhankintavaihtoehtoja tavanomaisilla kuumavesikattiloilla sekä uusilla, nettolämpöteholtaan 1-20 MW biopoltoainetta käyttävillä voimalaitosratkaisuilla. Näitä ovat: höyryturpiiniin perustuva pienvoimala, kaasutusdiesel, pyrolyysiöljy-diesel, pölypolttoturpiini, ORC-prosessi ja maakaasuturpiini. Vaihtoehtojen vertailemiseksi eri tilanteissa rakennettiin kustannuslaskentamalli. Mallilla tutkittiin mitkä voimalaitosratkaisut ovat nyt kannattavia tai millä edellytyksillä ne tulisivat kannattaviksi sahojen yhteydessä. Vertailuratkaisuna käytetään kuori- ja POR-kattilayhdistelmää sekä sähkön ostoa.</p> <p>Yleisesti käytettävä kuorikattilan ja raskasöljykattilan yhdistelmä ja sähkön ostoa on edelleenkin kilpailukykyisin ratkaisu sahan energianhankintaan. Alle 15 000 m³:n sahoilla on kannattavampaa käyttää haketta jos kuori voidaan myydä. Yli 300 000 m³/a tuottavilla sahoilla olisi mahdollista käyttää pienvoimalaa tai ORC-prosessia yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon.</p> <p>Jos investointikulut pienenevät 20 %, tulisi pienvoimala kannattavaksi myös n. 200 000 m³/a sahaavilla sahoilla. ORC-prosessi puolestaan kannattaisi jo noin 130 000 m³/a tuotannolla. Sähkön 20 %:n kallistumisella on samanlainen vaikutus. Jos edellytykset ovat olemassa, voitaisiin Suomen sahoille asentaa n. 17 pienvoimalaa tai 27 ORC-prosessia, eli n. 110 MW sähkötehoa.</p>			
Avainsanat:	bioenergia, diesel, kuori, kuumavesikattila, lämmöntuotanto, lämpöenergia, ORC-prosessi, pienvoimala, pölypolttoturpiini, sahateteollisuus		

Author:	Matti Pellinen		
Title of the thesis:	Energy Supply Alternatives for Mechanical Forest Industry		
Title in Finnish:	Mekaanisen metsäteollisuuden energianhankinnan vaihtoehdot		
Date:	April 26 1996	Number of pages:	75+30
Department:	Faculty of Mechanical Engineering Department of Energy Engineering	Professorship:	Ene-47
Supervisor:	Prof. Carl-Johan Fogelholm		
Instructor:	DI Ismo Nousiainen		
<p>Mechanical forest industry produces a lot of biomass by-products like bark, sawdust and wood chips. By-products are often enough for generating the heat needed in a sawmill or a veneer factory. Cogenerating heat and electricity is however rare.</p> <p>The temperature needed for lumber drying in sawmills, is only 120°C. On the other hand, the heat load of the drying units is rather stabile. Small-scale power plants, utilising sawmill by-products, could produce heat and electricity in sawmills, if it would be economically feasible.</p> <p>In this work different choices for supplying heat and electricity to the sawmill are investigated. One option is a hot water boiler burning different fuels. A novel possibility is to build a small-scale cogenerating power plant with a net thermal output of 1-20 MW. These plants may also use by-products or other fuels, in which case the by-products can be sold. The processes investigated here are: small-scale steam power plant, biomass gasifying diesel, pyrolysis oil diesel, wood-fired gas turbine (PGI system), Organic Rankine Cycle and gas turbine using natural gas. A model was created to research the various options and their costs for different sizes of sawmills. These are compared to the standard option of buying electricity and to use bark in a hot water boiler for generating heat.</p> <p>A primary boiler using bark and a secondary boiler using heavy fuel oil is the most common and often the most economic solution. However, it is cheaper to use wood chips instead of bark when production is 15 000 m³/a or less. In this case bark must be disposed of or sold. If production is 300 000 m³/a or more, it could be economically feasible to use small scale steam power plant or ORC-process for cogeneration.</p> <p>In case the investments become 20 % lower it would be economically feasible to use small scale steam power plant already at a production level of 200 000 m³/a and ORC-process with 130 000 m³/a of lumber production. This would mean 17 power plants or 27 ORC-processes producing up to 110 MW electricity, in Finland.</p>			
Keywords:	bark, bioenergy, biomass, boiler, diesel, heat, heat production, Organic Rankine Cycle, PGI system, sawmill, small-scale power plant		

SISÄLLYSLUETTELO

TERMIT JA LYHENTEET	6
ALKULAUSE.....	8
1. JOHDANTO	9
1.1 TAVOITTEET	9
1.2 MENETELMÄT	10
1.2.1 Tilastot	10
1.2.2 Laskentamalli.....	10
2. MEKAANISEN METSÄTEOLLISUUDEN TUOTANTO JA SYNTYVÄT SIVUTUOTTEET	11
2.1 SAHATAVARAN TUOTANTO	11
2.2 PUULEVYJEN TUOTANTO	13
2.2.1 Vaneri	14
2.2.2 Lastu- ja kuitulevy	14
2.3 TUOTANTOPROSESSIT	15
2.3.1 Sahateollisuus	15
2.3.2 Vaneriteollisuus	16
2.3.3 Lastulevyteollisuus	18
2.3.4 Kuitulevyteollisuus	19
2.4 YHTEENVETO	20
3. MEKAANISEN METSÄTEOLLISUUDEN ENERGIAN KULUTUS JA HANKINTA.....	22
3.1 TILASTOITU ENERGIAN KOKONAISKULUTUS.....	22
3.2 SAHATEOLLISUUS	26
3.2.1 Energian kulutus	27
3.2.2 Energian tuotanto	27
3.3 VANERITEHTAAT.....	28
3.3.1 Energian kulutus	28
3.3.2 Energian tuotanto	28
3.4 LASTULEVYTEHTAAT.....	29
3.4.1 Energian kulutus	29
3.4.2 Energian tuotanto	29
3.5 KUITULEVYTEHTAAT	30
3.5.1 Energian kulutus	30
3.5.2 Energian tuotanto	30
4. PIENET BIOPOLTTOAINEVOIMALAT VAIHTOEHTONA	32
4.1 SÄHKÖN- JA LÄMMÖNTUOTANNON YHDISTÄMINEN	32
4.2 PIENET BIOPOLTTOAINEVOIMALAT	32
4.2.1 Vastapainehöyryvoimalaitos.....	33
4.2.2 Kaasutus-dieselveimalaitos	34
4.2.3 Pyrolyysiöljy-dieselveimalaitos	35
4.2.4 Paineistettu puupölypoltto	37

4.2.5 ORC-energiamuunnin	38
4.3 YHTEENVETO	39
5. SAHALAITOKSEN ENERGIANHANKINNAN MALLI	41
5.1 MALLIN TAVOITTEET JA PERIAATTEET	41
5.1.1 Mitoituksen ja investointikulun arviointi	41
5.1.2 Muuttuvien kulujen arviointi	42
5.2 MALLIN TOIMINTA JA KÄYTTÖ KOHDITTAIN	43
5.2.1 Lähtöarvojen syöttö	43
5.2.2 Vakiolähtöarvot	44
5.2.3 Energiantuotannon vakiotiedot	46
5.2.4 Energiantuotannon pääomantarve	50
5.2.5 Energiantuotantokustannukset	50
5.2.6 Energian hankinnan kustannukset	50
5.2.7 Oheistiedoston käyttö	51
5.3 MALLIN LUOTETTAVUUS	52
5.3.1 Laskentaperiaatteet	52
5.3.2 Lähtöarvot	53
6. ERI ENERGIAN HANKINTAVAIHTOEHTOJEN KILPAILUKYKY	54
6.1 VERTAILU ERI SAHAKOKOLUOKISSA	54
6.1.1 Lämmön erillistuotanto	54
6.1.2 Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto	55
6.1.3 Sahatavaran energiakustannus	56
6.2 INVESTOINTIEN VAIKUTUS KILPAILUKYKYYN	57
6.2.1 Kuorikattila	58
6.2.2 POR-raskasöljykattila	59
6.2.3 Hakekattila	60
6.2.4 Pienvoimala	60
6.2.5 ORC-prosessi	61
6.3 MUUT KILPAILUKYKYYN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	62
6.3.1 Polttoaineiden hinnan vaikutus	62
6.3.2 Sähkön hinnan vaikutus	65
6.3.3 Energiakustannusten rakenne	67
7. UUSIEN VAIHTOEHTOJEN KÄYTTÖPOTENTIAALI	68
7.1 KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET NYKYTILANTEESSA	68
7.2 KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET KILPAILUKYKYYN MUUTTUESSA	69
7.2.1 Investointien pieneneminen	69
7.2.2 Sähkön kallistuminen	69
8. YHTEENVETO	71
9. LÄHDELUETTELO	73
LIITTEET	75

TERMIT JA LYHENTEET

C_e	ostosähkön hankintakustannus
C_{hu}	huippulämmön hankintakustannus
C_{pr}	peruslämmön hankintakustannus
c	sahatavaran energiakustannus, mk/m ³
E_{hu}	huippukattilalla tuotettu nettolämpöenergia vuodessa, MWh/a
E_{pa1}	pääpolttoaineen 1 määrä, MWh
E_{pa2}	pääpolttoaineen 2 määrä, MWh
E_{pa3}	käynnistys-, tuki- ja varapolttoaineen määrä, MWh
E_{pr}	perusprosessilla tuotettu nettolämpöenergia vuodessa, MWh/a
E_{prpa}	perusprosessin polttoaine-energia, MWh/a
E_{huipa}	huippukattilan polttoaine-energia, MWh/a
E^{C}	suhteellinen lämpöenergia
e_e	sähkön ominaiskulutus sahatavaran tuotannossa, kWh/m ³
e_h	lämmön ominaiskulutus sahatavaran tuotannossa, kWh/m ³
H_{pa}	polttoaineen hinta, mk/MWh
h_{pa}	polttoaineena käytettävän sivutuotteen kuiva-ainehinta, mk/t k.a.
I_e	sähkön myyntitulo
I_{kl}	kaukolämmön myyntitulo
I_{st}	käyttämättä jääneiden sivutuotteiden myyntitulo
k	huipputehon mitoituskerroin
N	sahatavaran vuotuinen tuotantomäärä, m ³ /a
P^{C}	suhteellinen lämpöteho
P	tavoitehuippulämpöteho, MW
P^*	nimellinen huippulämpöteho, MW
\bar{P}^{C}	suhteellinen keskiarvolämpöteho
\bar{P}	keskiarvolämpöteho vuoden aikana, MW
P_e	perusprosessin nettosähköteho, MW
P_{hu}	huippukattilan tavoitelämpöteho, MW
P_{hu}^*	huippukattilan lämpöteho, MW

ΔP_{hu}	huippukattilan pyöristysvirhe ylöspäin, MW
P_{pr}	perusprosessin tavoitelämpöteho, MW
P_{pr}^*	perusprosessin lämpöteho, MW
P_{prpa}	perusprosessin polttoaineteho, MW
Q	sahan tuottama lämpöenergia vuodessa, MWh/a
Q_h	sahan kuluttama kuivauslämpöenergia vuodessa, MWh/a
Q_k	tuotettu ja myyty kaukolämpö vuodessa, MWh/a
Q_i	tehollinen lämpöarvo, MJ/i-m ³
q_i	tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
q_{ik}	kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo, MJ/kg
r	perusprosessin rakennusaste
T_h	kuivauksen käyntiaika vuodessa, h/a
T_s	sahauksen käyntiaika vuodessa, h/a
T_{hu}	huippukattilan huipunkäyttöaika, h/a
T_{pr}	perusprosessin huipunkäyttöaika, h/a
t^{\ominus}	suhteellinen käyntiaika
u_1	pääpolttoaine 1 osuus
u_2	pääpolttoaine 2 osuus
u_3	käynnistys- vara- ja tukipolttoaineen osuus
v_{eh}	kuivauksen osuus sähköenergian kulutuksesta
ρ_{kit}	kuiva-tuoreirtotiheys (kuivapaino), kg/i-m ³
η_{pr}	perusprosessin kokonaishyötysuhde
W	sähköenergian kokonaiskulutus, MWh/a
W_{eh}	kuivauksen käyttämä sähköenergia, MWh/a
W_{es}	sahauksen käyttämä sähköenergia, MWh/a
W_k	kuiva-ainepitoisuus
W_v	vesipitoisuus
kpa	kiinteä polttoaine
ORC	Organic Rankine Cycle, orgaanista kiertoainetta käyttävä rankine-kiertoprosessi
POK	kevyt polttoöljy
POR	raskas polttoöljy

ALKULAUSE

Tämä työ liittyy mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimukseen. Toivon että lukija saa ideoita ja ajatuksia energiankäytön ja -tuotannon kehittämiseksi mekaanisen metsäteollisuuden piirissä.

Perusongelma ei mielestäni ole bioenergian “korkea hinta”, vaan fossiilisen “dinosaurusergian” näennäinen, rahassa laskettava, halpuus. Kun halutaan todella kestävää kehitystä, käytetään uusiutuvaa energiaa. Sen saatavuuden on arvioitu vaikeutuvan noin vuonna 5 000 001 996.

Kiitokset ennenkaikkea Ismo Nousiaiselle mielenkiintoisesta diplomityöaiheesta ja ohjauksesta. Kiitoksen ideoista ja avusta ansaitsevat myös Olli Pitkänen VTT Energiasta, Holger Forsen ja Veikko Tarvainen VTT Rakennustekniikasta, Osmo Oksanen Koskisen OY:stä sekä Esa Hakamäki Isojoen Saha OY:stä.

Espoossa 26. Huhtikuuta 1996

Matti Pellinen

1. JOHDANTO

TEKES:in bioenergian tutkimusohjelmassa on VTT:n ja Jyväskylän teknologiakeskuksen koordinoimana tutkittu kotimaisen puupolttoaineen korjuuta ja pienkäyttöä sähkön- ja lämmöntuotannossa. Jalostettaessa puuta sahatavaraksi ja levytuotteiksi mekaanisessa metsäteollisuudessa syntyy runsaasti puusta peräisin olevia sivutuotteita, kuorta, purua ja haketta. Vaikka pääsääntöisesti hake ja puru myydään muun metsäteollisuuden raaka-aineeksi, jää silti energiakäyttöön suuria määriä mm. kuorta. Mikäli markkinoilla olisi sopivan pienikokoisia ja investointikustannuksiltaan edullisia sähköä ja lämpöä tuottavia pienvoimaloita, voitaisiin suurempi osa tästä biomassasta muuntaa lämmön ohella sähköksi.

Mekaanisen metsäteollisuuden energiankäytön tutkimus on jäänyt vähälle koska lämpöenergia sivutuotteiden muodossa on ollut halpaa. Kuoresta olisi joka tapauksessa päästävä eroon, eikä sille ole juuri muita käyttötapoja kuin polttaminen. Parempaan taloudelliseen tulokseen on sahoilla päästy tehokkaammin optimoimalla sahausta ja vähentämällä kuivauksen laatutappioita. Sahatavaran tuotantokustannuksista energian osuus on vain 6-8 % (Juvonen 1986).

1.1 Tavoitteet

Työn tavoitteena on selvittää bioenergiaa käyttävien pienvoimalaitostekniikoiden soveltuvuutta yhdistettyyn sähkön- ja lämmöntuotantoon mekaanisessa metsäteollisuudessa. Jatkotutkimusten suuntaamiseksi tavoitteena on myös selvittää näiden tekniikoiden kilpailukykyyn vaikuttavia tekijöitä ja käyttöpotentiaalia Suomessa. Eri tekniikoiden käyttöpotentiaalini määrittämiseksi työssä tutkitaan mekaanisen metsäteollisuuden tuotannon jakautumista eri kokoluokkiin, syntyvien sivutuotteiden määriä sekä energian kulutusta ja hankintaa nykytilanteessa.

Työssä esitellään mekaanisen metsäteollisuuden suurimmat alat energiankäytön ja sivutuotteiden tuotannon kannalta. Yli 90 % mekaanisen metsäteollisuuden energiankulutuksesta tapahtuu saha- ja puulevyteollisuudessa, joissa syntyvien sivutuotteiden määrä on myös suurin. Sähkön ja lämmöntuotannon yhdistäminen soveltuu sitä huonommin, mitä korkeampaa lämpötilaa tarvitaan. Sahateollisuudessa kuivaukseen riittävä lämpötila on melko alhainen, 120°C. Sahateollisuuden tuotanto ja laitosten lukumäärä on suurempi kuin levyteollisuuden. Näistä syistä johtuen tarkastellaan tässä työssä enimmäkseen yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon soveltuvuutta sahaeteollisuuteen.

VTT:ssä tehtiin 1980-luvun alussa tiettävästi laajin Suomen mekaanisen metsäteollisuuden energiankäyttöä koskeva tutkimus. Siinä tarkasteltiin myös puutavaran jatkojalostuksen, mm. puusepän- ja puutaloteollisuuden energiankäyttöä. Vertaamalla aiempiin tuloksiin tässä työssä saatuja ominaiskulutuslukuja, voidaan ar-

vioida mahdollisia energiankäyttöön vaikuttaneita muutoksia puulevyteollisuudessa viimeisten 10-15 vuoden aikana.

Pienten biopolttoainetta käyttävien voimaloiden käyttöönottoa puoltavat monet tekijät. Kotimaiseen, uusiutuvaan polttoaineeseen perustuva lämmön- ja sähköntuotanto on riippumaton, luo työpaikkoja haja-asutusalueille sekä vähentää hiilidioksidipäästöjä, mikäli sillä korvataan fossiilisia polttoaineita. Hajautettu energiantuotanto on myös vikasietoista, yhden laitoksen ongelmat heijastuvat vain pienelle alueelle.

Seuraavassa esitellään työssä käytetyt menetelmät, luodaan katsaus mekaanisen metsäteollisuuden tuotantoon, sahalaitoksien kokojakautumaan sekä tuotantoprosesseihin. Sahalaitoksen koko, eli vuotuinen tuotantomäärä, on kaikkein oleellisin tieto arvioitaessa sivutuotteiden määrää ja lämpökuormaa, joista sahan energiaratkaisu riippuu.

1.2 Menetelmät

1.2.1 Tilastot

Mekaanisen metsäteollisuuden laitoksista vain suuret ja keskisuuret kuuluvat tilastoitavien piiriin. Koska pienten laitosten energiankäyttöä koskevia tietoja ei systemaattisesti kerätä, perustuu työssä tapahtuva tarkastelu teollisuus- ja sähkölaitostilastoista saataviin yleisiin tai laitoskohtaisiin tietoihin sekä osin suoraan laitoksilta saatuihin tietoihin. Ilmansuojeluilmoituksista on saatu laitoskohtaisia polttoainetietoja. Tilastoinnin ulkopuolella olevien pienten laitosten energiankäyttöä ja -hankintaa voidaan arvioida tyypillisten ominaistunnuslukujen perusteella, kun tiedetään laitosten tuotanto.

Koska vaneri- ja levytehtaita on Suomessa suhteellisen vähän, käytiin ne laitoskohtaisesti läpi jolloin jäljelle jäävän sahatöiden sektorin osuus koko mekaanisesta metsäteollisuudesta voitiin arvioida. Joiltakin levytehtailta saatiin tietoja puhelimitse. Ongelmia aiheuttivat integraatit, joiden energiankäyttö on selvillä kokonaisuutena, mutta ei niinkään tuotekohtaisesti. Integraattien energiankäyttö jaettiin eri tuotteiden tyypillisten ominaiskulutuslukujen avulla osiin tuotantomäärien mukaisesti. Noin 70 % Suomen vanerin ja lastulevyn tuotannon sähkönkulutuksesta saatiin tarkasti selville, loput laskettiin kokonaan tai osittain ominaiskulutuslukujen avulla lähtien tuotantomääristä. Julkisia tilastoja käytettiin rinnakkain oman tarkastelun ohella.

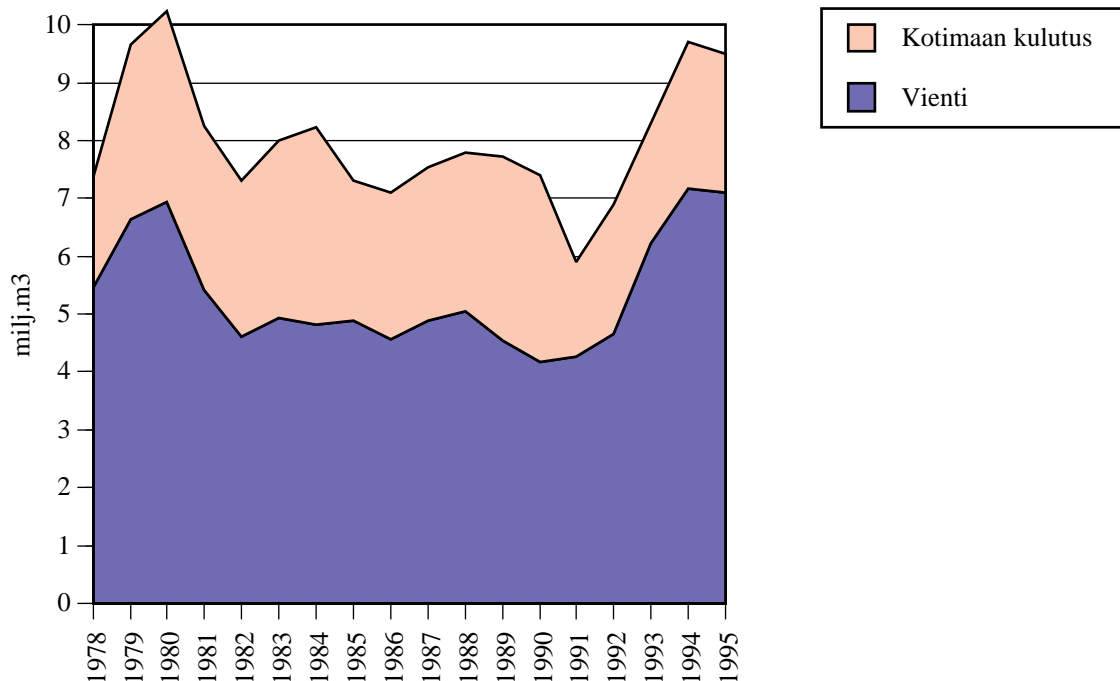
1.2.2 Laskentamalli

Sahan energianhankintavaihtoehtojen arvioimiseksi rakennetaan kustannuslaskentamalli. Mallin avulla on helppo vertailla eri tekniikoita keskenään ja arvioida niiden herkkyyttä muuttaville osatekijöille. Toisaalta mallin, kuten muidenkin tarkastelutapojen ongelmana on eri tekijöiden riittävä huomioiminen. Tekijöitä voidaan ottaa mukaan niin paljon kuin on käytettävissä aikaa mallin rakentamiseen ja riippuvuussuhteiden hakemiseen. Arvioitavaksi jää ovatko riippuvuudet oikeita ja kuinka laajoissa rajoissa mitäänkin muuttujaa voi vaihdella.

2. MEKAANISEN METSÄTEOLLISUUDEN TUOTANTO JA SYNTYVÄT SIVUTUOTTEET

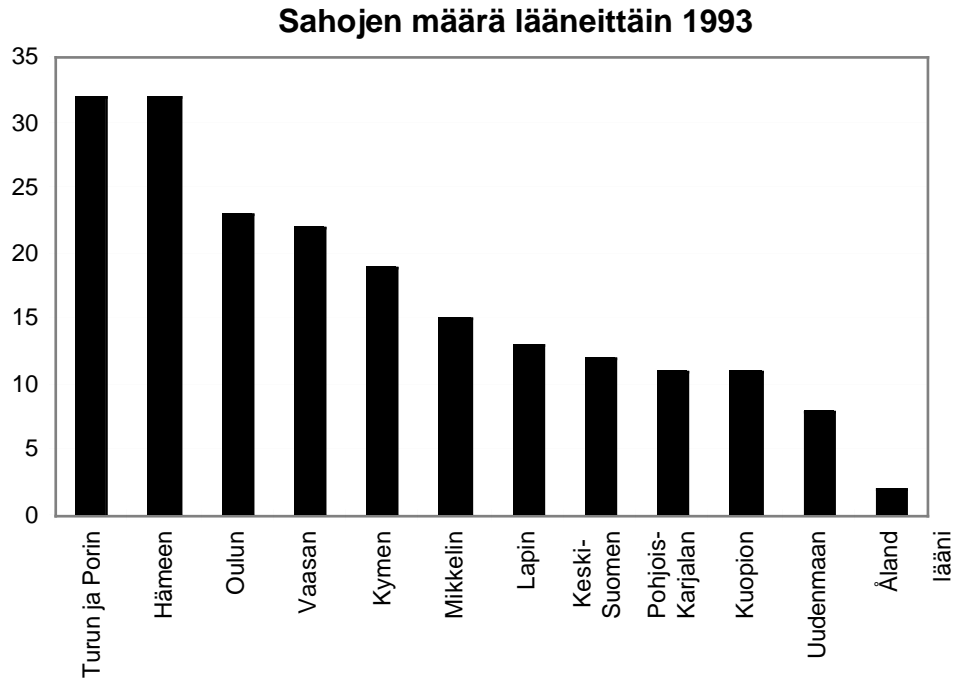
2.1 Sahatavaran tuotanto

Mekaaninen metsäteollisuus riippuvainen rakennusteollisuuden suhdanteista. Noin kaksi kolmasosaa sahatavaraa käytetään rakentamiseen. Vuonna 1994 sahatavaran tuotanto oli 9,7 milj.m³ josta viennin osuus oli 7,2 milj.m³. Päävientikohteet vuonna 1994 olivat suuruusjärjestyksessä: Iso-Britannia, Saksa, Alankomaat, Afrikka, Tanska ja Ranska, joihin vienti oli yli 75 % kokonaisviennistä. Kuvassa 2.1 on esitetty sahatavaran tuotanto ja vienti vuosina 1978-1995 (Metsäteollisuus ry. 1995a).

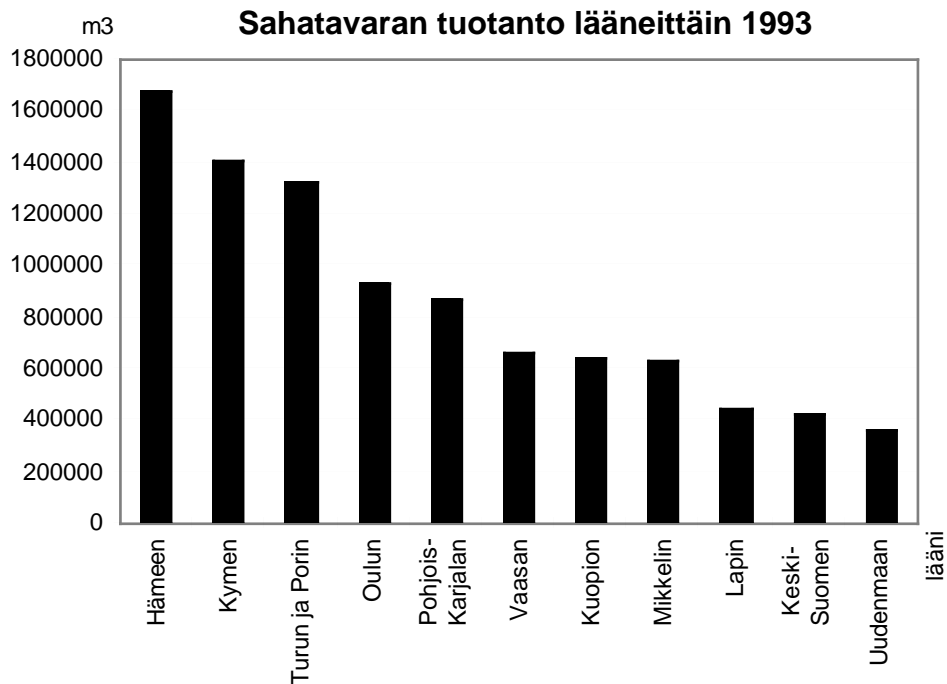


Kuva 2.1. Sahatavaran tuotanto Suomessa vuosina 1978-1995. 1990-luvun tuotannon kasvu pohjautuu vientiin, koska kotimainen kysyntä ei ole elpynyt yhtä nopeasti. Vuoden 1995 tuotanto perustuu arvioon (Metsäteollisuus ry. 1995a, 1979-1985).

Eniten sahauskapasiteettia on Hämeen, Kymen ja Turun ja Porin lääneissä, joissa myös suurimmat sahat sijaitsevat (kuva 2.3). Suuret sahat ovat usein integroituneet muun puunjalostuksen yhteyteen, jolloin sivutuotteita ei käytännössä tarvitse kuljettaa. Pienet ja keskisuuret sahat ovat tärkeitä paikallisia työllistäjiä ja ne ovat melko hajautuneina Etelä-Suomeen. Hajautuneisuus johtunee yksinkertaisesti siitä, että sahaus on kannattavaa toimintaa pienemmissäkin yksiköissä ja että raaka-ainetta on saatavilla lähes kaikkialla. Liitteessä 2 on luettelo Tilastokeskuksen toimipaikkarekisterin sahalaitoksista, joita on n. 200. Kuvaan 2.2 on toimipaikat laskettu lääneittäin.



Kuva 2.2. Sahojen sijoittuminen lääneihin (Tilastokeskus 1995d).



Kuva 2.3. Sahatavaran arvioitu tuotanto lääneittäin. Tuotantomäärät on eritelty tarkemmin liitteessä 2.

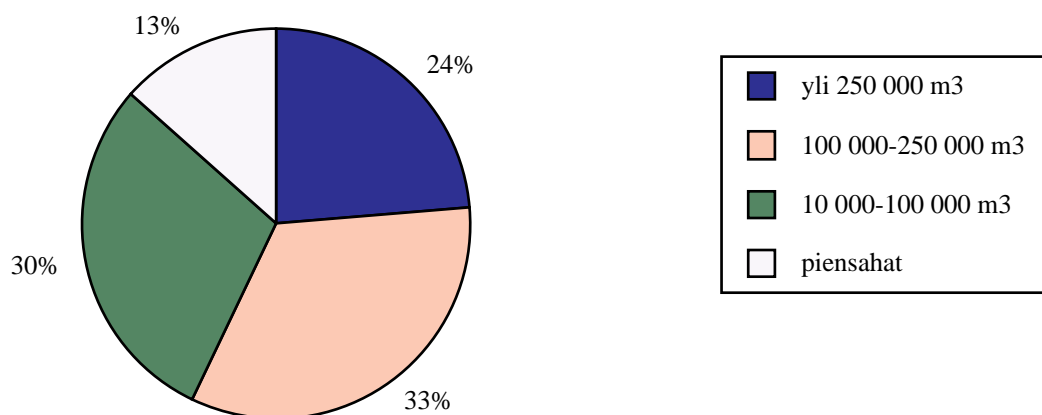
Sahauskapasiteetin jakautuminen eri kokoluokkiin

Yli 100 000 m³ vuosituotannon sahat tuottavat jo yli puolet kaikesta sahatavarasta Suomessa. Vuonna 1994 yli 100 000 m³ tuottaneiden sahojen (26 kpl) osuus koko maan tuotannosta oli 57 %. Seitsemän suurinta sahaa, jotka sahasivat yli 250 000 m³ vuonna

1994 tuottivat yhdessä 24 %, eli n. 2,3 milj.m³ Suomen sahatavarasta (Metsäteollisuus ry. 1995b). Sahan kapasiteetilla tarkoitetaan suurinta toteutettavissa olevaa tuotantomäärää annetulla työvuoromäärällä. Yleensä koneiden kapasiteetti ilmoitetaan kahdessa vuorossa. Kokoluokassa yli 10 000 m³ Suomen sahauskapasiteetin on arvioitu olevan n. 9,44 milj m³ (Koivuniemi 1988).

Tyypillinen keskisuuri suomalainen saha ilmoittaa kapasiteetiksi 20 000-30 000 m³. Kokoluokassa 40 000-100 000 m³ olevia sahoja on n. 30 kpl ja luokassa 10 000-40 000 m³ noin sata (Koivuniemi 1988). Teollisuustilastoihin kätään tietoja sahoilta, joilla työskentelee vähintään viisi henkilöä. Kaikista sahoista, varsinkaan piensahoista, ei ole kattavaa tilastoa.

Piensahaksi lasketaan laitos, jonka raakapuun käyttö on alle 10 000 m³ vuodessa ja jossa on alle viisi työntekijää. Tällaisia sahoja arvioitiin olevan Suomessa vuonna 1990 4 202 kpl. Vaikka piensahojen lukumäärä on vähentynyt on niiden tuotanto kasvanut parempien koneiden ja ammattimaisemman toiminnan myötä. Piensahojen tuotanto vuonna 1990 oli n. 1,2 milj.m³ joka oli tuolloin yli 30 % kotimaan kysynnästä. Vain alle 1 % tuotannosta menee vientiin (Siekkinen 1992).

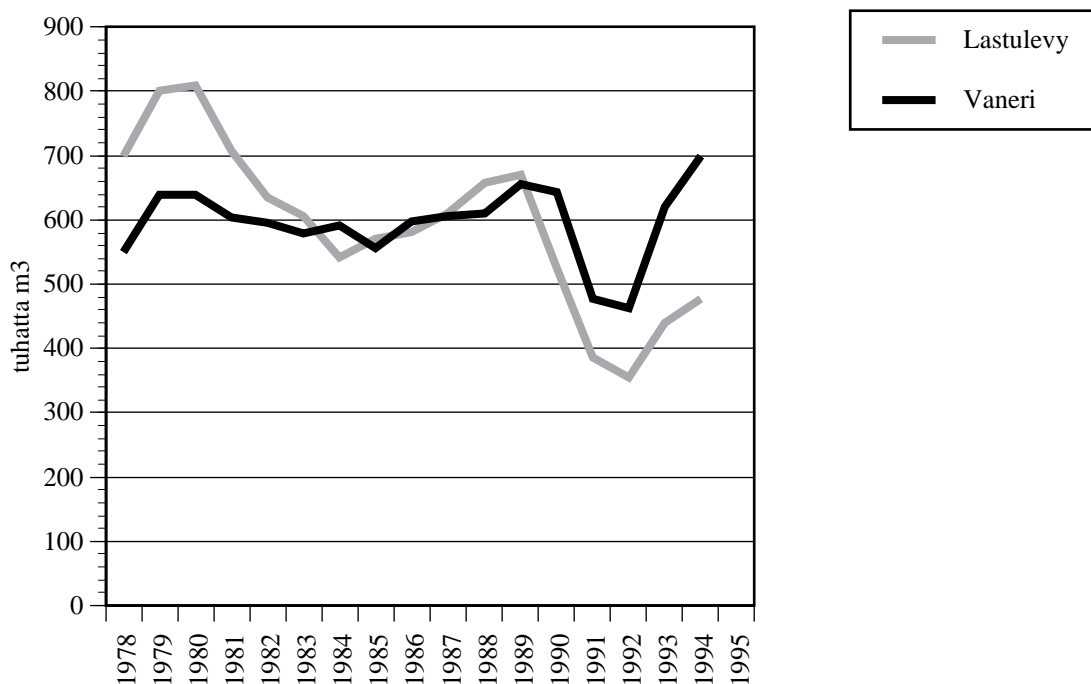


Kuva 2.4. Sahatavaran vuoden 1994 tuotannon, 9,7 milj.m³ jakautuminen eri kokoluokien laitoksiin. Piensahojen osudeksi on arvioitu 1,3 milj.m³, joka on jonkin verran enemmän kuin 1990. Kokoluokan 10 000-100 000 m³ suurten sahojen tuotanto tunnetaan (Metsäteollisuus ry. 1995b).

³ , jakautuminen eri kokoluokien laitoiksi.
³ , joka on jonkin verran enemmän kuin 1990.
³ osuus on sen jälkeen laskettu kun

2.2 Puulevyjen tuotanto

Vaneria käytetään enimmäkseen rakentamisessa. Vanerit ovat keveyteensä nähden lujia ja niille löydetään yhä erikoistuneempia käyttömuotoja tuotekehityksen myötä. Lastulevytuotannosta valtaosa käytetään kaluste- ja huonekaluteollisuudessa, loput rakentamisessa. 1990-luvun alun lamalla oli selvä vaikutus myös levytuotantoon (kuva 2.5). Vanerintuotanto oli 1994 n. 700 000 m³, vaneria ja viilua vietiin samaan aikaan 694 000 m³. Lastulevytuotanto oli 477 000 m³ ja sen vienti kaikkiaan 200 000 m³. Kuitulevytuotanto on trendinomaisesti vähentynyt vuosina 1984-94 vaikka suuria vaihteluita on ollut. 1980-luvun lopulla tuotanto nousi 108 000 tonniin (Metsäteollisuus ry. 1995a).



Kuva 2.5. Levytuotannon kehitys vuosina 1978-1994 (Metsäteollisuus ry. 1995a, 1979-1985).

2.2.1 Vaneri

Vuonna 1995 Suomessa oli 19 vaneri- tai viilutehdasta tai tehdasintegraattia, joiden kokonaiskapasiteetti oli n. 1,12 milj. m³. Noin 85 % kapasiteetista keskittyy Mikkelin, Keski-Suomen ja Hämeen lääneihin ja näissä yksittäisiin tehtaisiin. Kahden suurimman tehtaan, Suolahden ja Pellosniemen, kapasiteetti on 50 % koko maan kapasiteetista (Metsäteollisuus ry. 1995c).

Liitteeseen 1 on kerätty Suomen vaneria, viilua tai vastaavia tuotteita valmistavat tehtaot tai integraattilaitokset sekä niiden tuotannot vuonna 1993. Vanerintuotantokapasiteetti muuttuu kun tehtaita lopetetaan tai entisillä käynnistetään uusia tuotantolinjoja. Vuonna 1995 lopetettiin yksi ja 1994 kaksi vaneritehdasta. Jotkut tehtaot ovat keskittyneet erikoisvanereihin ja -aihioihin, ja niiden sähkön- tai lämmönkulutus saattaa tästä syystä poiketa muista.

2.2.2 Lastu- ja kuitulevy

Suomessa on viisi lastulevytehdasta tai lastulevyä tuottavaa integraattia ja niiden yhteenlaskettu kapasiteetti on n. 0,5 milj.m³. Suurin lastulevytehdas Puhoksella Pohjois-Karjalan läänissä keskittyy puhtaasti lastulevyyn. Se tuottaa n. 50 % kaikesta lastulevystä Suomessa. Muut merkittävät tehtaot ovat Keski-Suomessa ja Hämeessä. Yksi integraatti lopetti lastulevyn tuotannon 1994.

Kuitulevytehtaita on kaksi, Porin Pihlavassa ja Heinolassa. Niiden yhteinen kapasiteetti on 120 000 t vuodessa (Metsäteollisuus ry. 1995c).

2.3 Tuotantoprosessit

2.3.1 Sahateollisuus

Nykyisin sahat pyrkivät jo hankintavaiheessa huomioimaan tuotantotavoitteet ostamalla raaka-ainetukit määrämittäisinä. Tukkien varastointi voi tapahtua maalla tai vedessä. Vesivarastointi ja vedessä tapahtuva lajittelu vaativat varastoaltaan sulanapitoa talvisin. Tähän käytetään yleensä sopivaa jätelämpöä.

Kuori ja pelkkahake

Kuori suojaa tukkia varastoinnin aikana, mutta vaikeuttaa alkulajittelua. Kuorinta tapahtuu usein sahauksen yhteydessä ja lajittelu tehdään vielä kuorellisille tukeille. Kuorinta on välttämätöntä sivutuotteiden, sahanhakkeen ja purun, laadun ja jatkojalostuksen kannalta. Kuoren määrä on käytetystä rakaa-aineen $k\text{-m}^3$:stä n. 12 %. Kuorelle ei ole kehitetty energiakäytön lisäksi juuri muuta käyttöä. Sen energiasisältö riippuu ratkaisevasti kosteudesta, johon taas vaikuttavat tukin varastointi, kuljetus ja vuodenaika. Poltettaessa kuoren kuiva-ainepitoisuuden on oltava yli 35 %, ja polttoarvo nousee nopeasti aina 60 % kuiva-ainepitoisuuteen asti. Yleisesti käytettävillä erilaisilla mekaanisilla puristukseen perustuvilla kuivaajilla saavutetaan 40-43 %:n kuiva-ainepitoisuus.

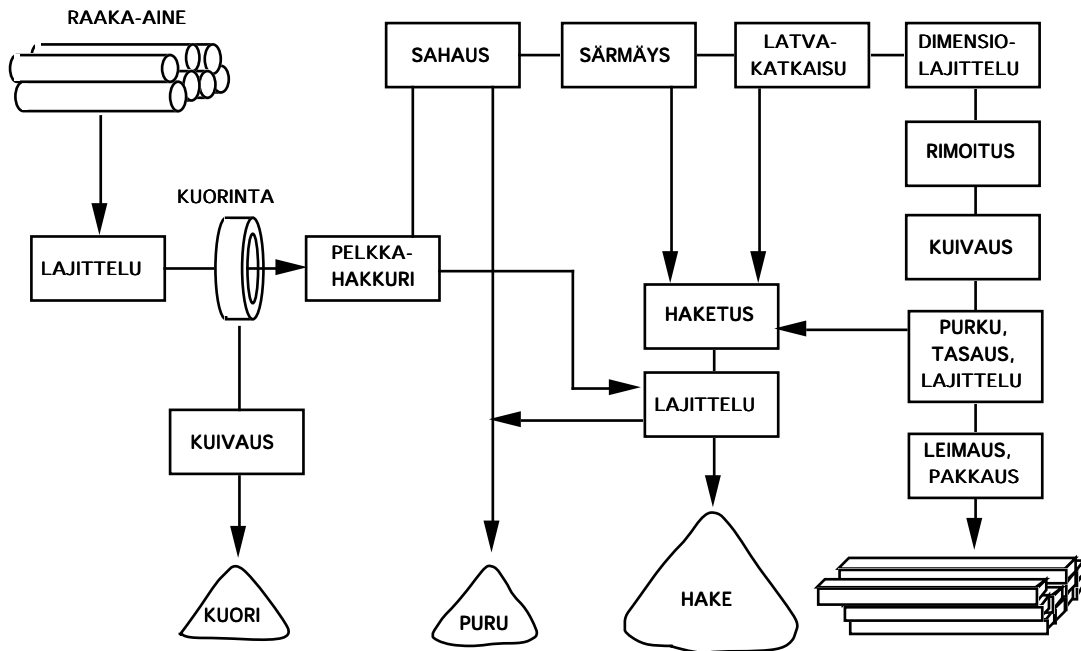
Pelkkahakkurilla haketetaan tukin sivut niin, että tukista saadaan seuraavassa vaiheessa sahattua lautoja ja lankkuja. Hakkurin avulla päästään parempaan kokonaistulokseen kuin pelkillä kehäsahoilla. Pelkkahakkurilta tuleva hake on tasalaatuista ja ohutta. Sen sijaan pelkkahakkurin pintaterät tuottavat lyhyttä haketta, jonka liukenemistappiot ovat sellunkeitossa suuremmat. Integraateissa, joissa on kuumahierrelinja, voi olla kannattavampaa ottaa pintakerros sahanpuruna. Tällöin saadaan sekä hyvälaatuinen pinta että hyvä kokonaistulos.

Sahauspuuru

Sahaus on sahatavaran tuotannon oleellisin työvaihe. Sahaustekniikoita ja niiden yhdistelmiä on lukuisia ja käytettävän menetelmän valintaa ohjaavat mm. puulaji ja tukin dimensiot sekä raaka-aineen, työvoiman ja pääoman saatavuus. Kehäsahaus perustuu liikkuvaan kehään pingoitettujen terien edestakaiseen pystysuoraan liikkeeseen. Vannesahauksessa terä sitävastoin on pyörivä, päättymätön, tasaisella nopeudella leikkaava nauha. Pyörösahassa terä pyörii akselinsa ympäri ja ulkokehän hampaat leikkaavat siihen syötettyä puuta. Näistä perusmenetelmistä monipuolisin on kehäsahaus, koska sillä voidaan tehdä hyvin erilaisia leikkauksia. Yleensä sahalaitoksissa käytetään useita perusmenetelmiä joko peräkkäin tai rinnakkain tuotantolinjoiksi asennettuina.

Sahanterän leikkaama puuainne poistuu puruna. Purun määrään vaikuttaa sahan tuotantopolitiikka, sahaustapa sekä terien paksuus. Pelkkahakkuri vähentää purun osuutta sivutuotteista mutta lisää hakkeen määrää. Puru käytetään nykyään lähes kokonaan kemiallisessa massanvalmistuksessa tai lastulevyteollisuuden raaka-aineena. Sen tärkein ominaisuus on raekoko joka vaikuttaa kuidun pitoisuuteen. Jos alle 1 mm raekoon osuus kasvaa liiaksi, ei purulla ole arvoa raaka-aineena. Yli 3 %:n kuoripitoisuus taas

muuttaa myös purun polttoaineeksi. Purun kosteuteen vaikuttaa tukkien varastointitapa, sydänpuun osuus ja vuodenaika.



Kuva 2.6. Sahatavaran tuotantoprosessin päävaiheet pelkistettynä. Alle puolet raaka aineesta saadaan lopputuotteena. Laitoksesta riippuen joitakin vaiheita, esim. kuoren kuivausta ei aina tarvita.

Särmäyshake

Särmäyksessä poistetaan sivulauta-aihiosta vajaasärmä. Särmäystä on optimoitu hyvinkin pitkälle hyvän taloudellisen tuloksen saavuttamiseksi. Särmäyksessä syntyy rimoja ja erilaisia sahatavaraksi kelpaamattomia haketettavia pätkiä. Sellun valmistukseen myytävä hake on yleensä seulottava jolloin siitä erotetaan alle 6 mm:n puru ja yli 32 mm:n tikut. Hakkeen arvo alenee, jos siinä on enemmän kuin 5 % näiden kokoluokkien partikkeleita. Kuorta ei hakkeessa saisi olla 1 % enempää.

Sahauksen ja särmäyksen jälkeen on edullista lajitella eri dimensiot kuivausta ja jatkokäsittelyä varten. Dimensiolajittelija on sahan kriittisin pullonkaula. Usein dimensiolajittelun yhteydessä kappaleen määrämittaa täyttämätön latva katkaistaan ja haketetaan. Kuivausta varten sahatavara rimoitetaan ilmaviksi paketeiksi, jotka kuivataan tarkoitukseen rakennetussa kuivaamossa. Kuivaamon lämmönkulutus on yleensä n. 90 % koko sahalaitoksen lämmönkulutuksesta ja sähköstäkin se käyttää n. 40 % (Juvonen 1986).

2.3.2 Vaneriteollisuus

Vanerituotteet valmistetaan liimaamalla yhteen päällekkäin asetettuja puuviilukerroksia. Vanerit jaetaan sis- ja ulkokäyttöön tarkoitettuihin vanereihin ja niitä jaotellaan myös rakenteen perusteella. Samaankin vaneriin voidaan käyttää eri puulajeja.

Vanerin raaka-aineeksi hankittaville tukeille on tiukat laatuvaatimukset. Tukkien käsittely alkaa haudonnalla, jonka tarkoituksena on lämmittää tukki sopivaan

sorvauslämpötilaan sekä pehmentää puuainesta muovautuvuuden parantamiseksi. Hautomossa tarvittava lämpötila on alhainen, joten haudontaan voidaan käyttää jäte-lämpöä. Hautomon osuus koko vaneritehtaan lämmönkulutuksesta on 5-20 %.

Kuorinta, katkaisu ja sorvaus

Myös vanerintuotannossa tukin kuorinnan ensisijainen tarkoitus on varmistaa sivutuotteena saatavan selluhakkeen kuorettomuus. Kuorinta myös vähentää sorvausterien kulumista. Kuorella voidaan tuottaa n. 40 % vaneritehtaan käyttämästä lämpöenergiasta.

Kuorinnan jälkeen tukki katkaistaan sorvauspölleiksi, jolloin syntyy n. 3-5 % häviö. Katkaisun optimoinnilla pyritään lisäämään viilun saantoa ja vähentämään häviötä.

Ennen viilun sorvausta on pölli pyöristettävä sylinterimäiseksi. Sorvauksessa pyörivää pölliä vasten syötetään leveää viiluterää sellaisella nopeudella, että saadaan syntymään tasapaksu viilu. Arvokkainta viilua syntyy pöllin uloimmista osista. Kaksikaraisilla sorveilla ulkokarat vetäytyvät aiemmin, jolloin pöllistä voidaan sorvata enemmän jäljelle jäävän purilaan ollessa pienempi. Pyöristyshukka ja sorvauksen jälkeiset purilaat muodostavat yhteensä n. 25-30 % raaka-aineen hävikistä.

Valmis viilumatto kuivataan joko arkkeina arkkikuivaajassa tai jatkuvatoimisessa mattokuivaajassa. Kuivaajat toimivat yleensä höyryllä kuivauslämpötilan ollessa n. 160°C. Kuivaajasta saatavaa jätelämpöä voidaan käyttää esim. ilmastoinnissa.

Lajittelu ja liimaus

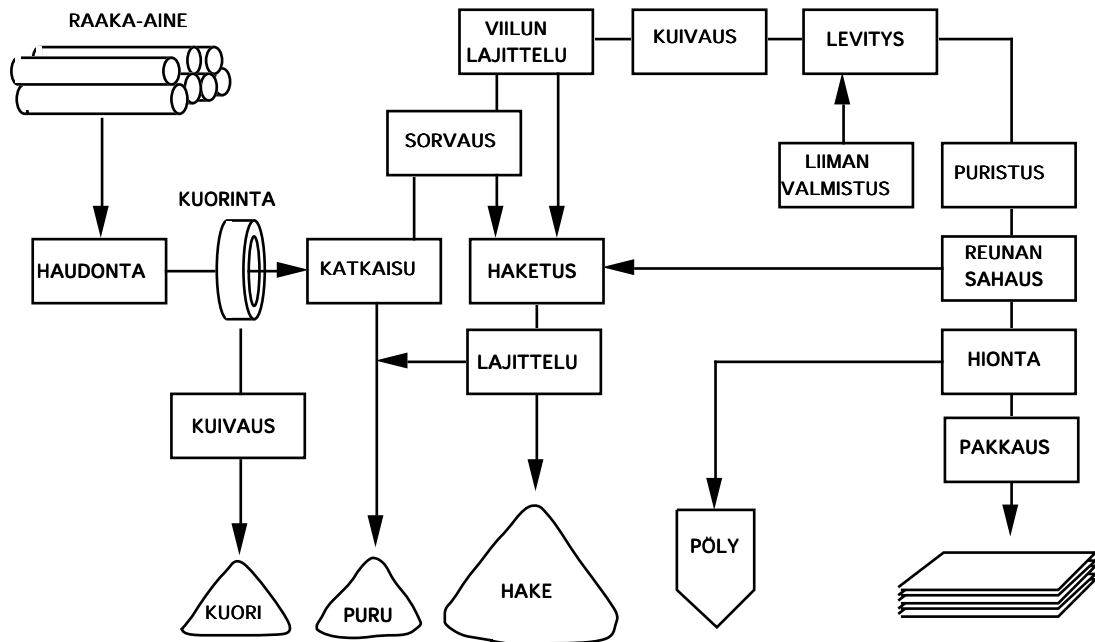
Viilun leikkauksessa viilusta tehdään arkkeja sekä poistetaan viallisia kohtia. Viilun laatua voidaan myös nostaa paikkauksella. Arkit lajitellaan mm. puulajin, laadun ja leveyden mukaan. Saumaamalla taas voidaan valmistaa yhtenäisestä arkkikoosta poikkeavia mittoja tai koota kapeampia arkkeja isommiksi. Viilun syynsuuntaisella jatkeella voidaan tehdä sorvipöllin pituutta pidempää viilua.

Liimaus on vanerin valmistuksen tärkeimpiä työvaiheita. Ennen viilujen yhteenpuristamista ne sivellään erityisellä liimalla levitinkoneessa, minkä jälkeen käsiteltyt viilut ladotaan levyaihioksi. Puristimessa viilupinoa lämmitetään ja painetaan kokoon, jolloin liima sitoo viilut toisiinsa vaneriksi. Liimauspuristimen jälkeen vanerin reunasta sahataan pois 3-5 cm leveät syrjät, levy viimeistellään hiomalla, sahataan myyntimittoihin ja pakataan.

Sivutuotteet

Vanerintuotannossa vain n. 27-32 % raaka-aineesta muuttuu lopputuotteeksi. Havupuuraaka-aineella hyötysuhde on hieman parempi. Tukin katkaisu- ja pyöristysjäte sekä purilaat haketetaan ja seulotaan selluhakkeeksi. Sorvattaessa eri puulajeja on myös sivutuotteet pidettävä erillään. Koska saanto on vielä pienempi kuin sahateollisuudessa, on tärkeää kiinnittää huomiota hakkeen laatuun ja hyötykäyttöön. Kuivaviilusta valmistettu hake ei sovellu sellunkeittoon kovin hyvin. Osa seulonnassa syntyvästä hienojakeesta voidaan käyttää lastulevyteollisuudessa tai polttaa. Kuori ja hionnassa

syntynyt pöly useimmiten poltetaan. Taulukkoon 1 on koottu yhteenveto sivutuotteiden määristä ja käytöstä (Juvonen 1985).



Kuva 2.7. Vanerin tuotantoprosessi pääpiirteissään. Raakapuusta muuttuu sivutuotteiksi jopa yli 70 %.

2.3.3 Lastulevyteollisuus

Lastulevy on puulastuista valmistettua levyä, jossa lastut on kiinnitetty toisiinsa sideaineen avulla lämpöä ja painetta hyväksikäyttäen. Suomen lastulevyteollisuus käyttää raaka-aineenaan valtaosin muun mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteita, mutta myös raakapuusta tehtyä metsähaketta käytetään. Lastulevyn valmistus ei aseta kovin tiukkoja vaatimuksia raaka-aineelle, kunhan vieraita aineita ei esiinny.

Tuotanto alkaa hakkeen seulonnalla ja puhdistuksella. Jos raaka-aine on pinotavaraa se voidaan lastuta suoraan haluttuun lastukokoon. Hake sen sijaan on lastuttava erityisessä hakelastuajassa. Levyn eri kerroksiin käytetään eri kokoista lastua. Lastuaminen sekä lastun kuljetus pneumaattisesti kuluttavat runsaasti sähköenergiaa.

Kuivaus ja levynpuristus

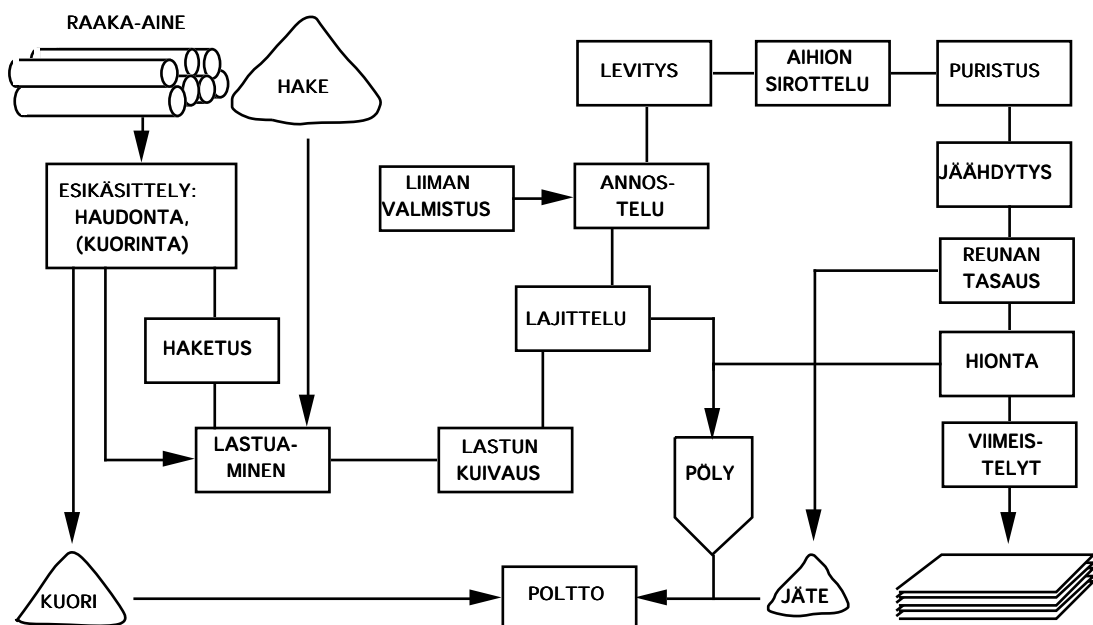
Lastun kuivaus sopivaan kosteuteen on tärkeä työvaihe. Liika kosteus voi höyrynpaineen takia aiheuttaa levyn halkeamisen kun taas liian kuivassa levyaihiossa lämpö ei siirry, eikä levyn keskiosa liimaannu. Lastua voidaan kuivata hyvinkin nopeasti ja kuumassa, ainoa rajoittava tekijä on syttymisvaara. Kuivaus on suurin energiankuluttaja lastulevyn valmistuksessa.

Valmis lastu liimoitetaan ja sirotellaan levyaihioksi. Tasalaatuisen aihion valmistus puristukseen on prosessin tärkeimpiä vaiheita. Sirottelu voidaan toteuttaa siten että lastun paikka aihossa määräytyy koon ja painon mukaan. Lopuksi aihio puristetaan kasaan sopivassa paineessa ja lämpötilassa, jolloin liima-aine sitoo lastut levyksi.

Viimeistely ja sivutuotteet

Valmis levy sahataan vakioimitoihin ja sen pinta hiotaan laadun ja paksuuden vakioimiseksi. Tässä vaiheessa syntyy merkittäviä määriä hiontapölyä. Pölyä syntyy jonkin verran myös muissa prosessin vaiheissa, mm. pintakerroslastujen jauhatuksessa. Pöly erotetaan kuljetusilmasta normaalisti sykloneilla tai sykloniryhmillä. Hienojakoinen pöly erotetaan tekstiilisuodattimilla. Pölyjärjestelmien yhteydessä on paloturvallisuuteen kiinnitettävä erityistä huomiota. Pöly poltetaan joko tehtaan omassa lastunkuivaajassa tai kuljetetaan muualle energiakäyttöön.

Ohuiden levyjen valmistuksesta syntyy eniten pölyä. Kun valmistetaan 1 m³ 15 mm:n levyä saadaan hiomapölyä 45-90 kg, mikä vastaa 0,77-1,53 GJ/m³. Pölyllä voidaan kehittää n. 50 % lastukuivurin käyttämästä energiasta, loppuosa tuotetaan öljyllä (Juvonen R., Pekkinen P. 1987).



Kuva 2.8. Lastulevyn tuotantoprosessin päävaiheet. Prosessin vaiheet voidaan toteuttaa eri tavoin, samoin raaka-aineen koostumus voi vaihdella. Esim. runkokuuta ei aina kuorita ja se voidaan lastuta suoraan haluttuun lastukokoon.

2.3.4 Kuitulevyteollisuus

Kuitulevy on lignoselluloosasta valmistettu levy, jonka paksuus on yleensä yli 1,5 mm. Levyä pitävät koossa kuitujen huopauttaminen sekä niiden sisäiset liimaavat ominaisuudet. Myös sideaineita voidaan käyttää.

Kuitulevyn raaka-aineena voidaan käyttää niin rankapuuta kuin hakettakin. Kaikkia sahateollisuuden sivutuotteita on mahdollista myös käyttää mikäli, ne eivät ole arvokkaampia sellun raaka-aineena. Kuoripitoisuus saa nousta aina 45 % saakka lopputuloksen ollessa vielä hyvä.

Yleensä raaka-aine kuidutetaan mekaanisesti joko jauhamalla tai hiomalla. Kuidutuksen jälkeen vesi- tai ilmasuspensiosta voidaan muodostaa kuituraina usein eri menetelmin, valukoneella, viiralla tai sylinterillä. Raina voidaan valmistaa myös ilmasirottelulla

samalla periaatteella kuin lastulevyaihio. Valmis raina puristetaan levyksi sopivaa painetta ja lämpötilaa käyttäen. Levyn ominaisuudet riippuvat pitkälti rainan muodostuksesta sekä puristusvaiheesta.

Kuitulevyn valmistus vaatii enemmän energiaa kuin lastulevyn ja huomattavasti enemmän kuin sahatavaran. Levyn sahausessa syntyvät hukkapalat ja sahausjäte voidaan monessa tapauksessa käyttää uudelleen raaka-aineena ja vähäinen osuus jäljelle jäävää raaka-aineksi kelpaamatonta sivutuotetta poltetaan. Suurin raaka-ainehäviö syntyy jauhatuksessa, jossa osa kuiduista siirtyy jätevesiin (Kaila 1964).

2.4 Yhteenveto

Kaikissa mekaanisen metsäteollisuuden prosesseissa tarvitaan lämpöenergiaa. Kaikissa myös syntyy polttoaineeksi kelpaavaa sivutuotetta. Saha- ja vaneriteollisuudessa sivutuotteita syntyy niin paljon että niillä voidaan tuottaa prosessien tarvitsema lämpöenergia kokonaan tai osittain. Usein energiaa tai sivutuotteita jää myös tämän jälkeen myytäväksi. Sopivan pienikokoisilla biopolttoainetta käyttävillä voimaloilla voitaisiin sivutuotteet muuntaa sähköksi ja lämmöksi.

Sahojen tapauksessa yhdistetty energiantuotanto on helpompaa koska tarvittava lämpötilataso on alhaisempi. Taulukkoon 1 on koottu mekaanisen metsäteollisuuden eri alojen tuottamien sivutuotteiden osuuksia raaka-aineen määrästä sekä niiden tyypillisiä käyttökohteita.

Taulukko 1. Saha- ja levyteollisuudessa syntyvien sivutuotteiden suhteelliset osuudet ja käyttö. Lukemat voivat vaihdella laitoksesta riippuen. Jotkut laitokset käyttävät itselleen ominaisia kertoimia sivutuotemääriensä arviointiin. Raaka-ainetaseeseen vaikuttaa kaikissa tapauksissa kuivuminen, joka on 2-5 % tilavuudesta (Juvonen, R., Johansson, P. E. 1986, Marjokorpi T. et al. 1983 sekä Indufor Oy 1994).

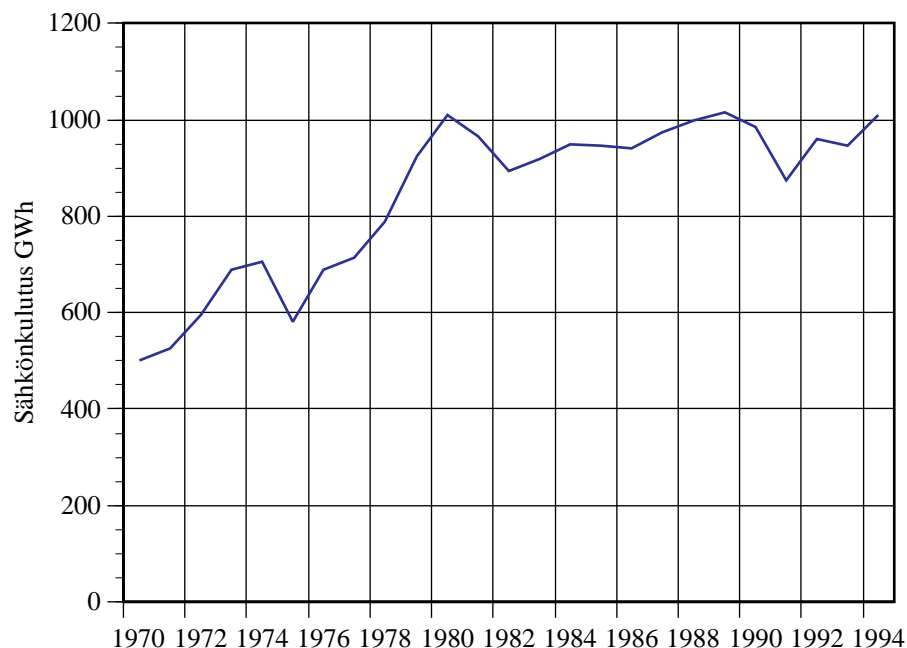
	osuus raaka- aineesta, %	osuus päätuot- teesta, k-m ³ /m ³	määrä 1000 m ³ 1993	käyttökohteita
SAHATEOLLISUUS				
kuori	12	0,24	1 984	poltto
puru	10-15	0,30	2 477	lastulevy / poltto
hake	27-32	0,63	5 227	selluhake
päätuotteen saanto	42-46			
VANERITEOLLISUUS				
kuori	10-12	0,44	248	poltto
pöllinpäät ja katkaisupuru	3,4-4,4	0,19		selluhake
pyörästysjäte ja purilaat	25,4-29,8	1,14	683*)	selluhake
kuiva viilujäte	8,2-8,8	0,32		selluhake / poltto
sahausreunat ja puru	5-6	0,19	311	poltto
hiomapöly		0,05		poltto
päätuotteen saanto	27-32			
LASTULEVYTEOLLISUUS				
hiomapöly		0,10		poltto
KUITULEVYTEOLLISUUS				
sahaus- ja palajäte	4-5			palautus / poltto
päätuotteen saanto	66-80			
			*) kaikki jalos- tuskelpoinen	

3. MEKAANISEN METSÄTEOLLISUUDEN ENERGIAN KULUTUS JA HANKINTA

Mekaanisen metsäteollisuuden energian kulutuksesta ei ole täysin kattavaa tilastointia. Erityisesti sahatavaran tuotannon polttoaineiden kulutuksen tilastointi on puutteellinen johtuen tuotannon jakautumisesta suureen määrään suhteellisen pieniä laitoksia. Seuraavassa tarkastellaan mekaanisen metsäteollisuuden energian kokonaiskulutusta tilastoinnin ja laskennallisesti keskimääräisten ominaiskulutusten perusteella.

3.1 Tilastoitu energian kokonaiskulutus

Mekaaninen metsäteollisuus, tilastoissa "Puutavaran paitsi puukalusteiden valmistus", käytti Suomessa vuonna 1993 945 GWh sähköä. Kun samaan aikaan massa- ja paperiteollisuus kulutti 19 455 GWh, oli mekaanisen sektorin osuus 4,6 % metsäteollisuuden ja 1,4 % koko Suomen sähkönkulutuksesta (65 544 GWh) (Tilastokeskus 1995a). Mekaanisen metsäteollisuuden tilastointu sähköenergian kulutus kasvoi 1970-luvulla kaksinkertaiseksi noin 1 000 GWh:iin. Tämän jälkeen sähköenergian kokonaiskulutus on vaihdellut välillä 850-1 000 GWh (kuva 3.1).

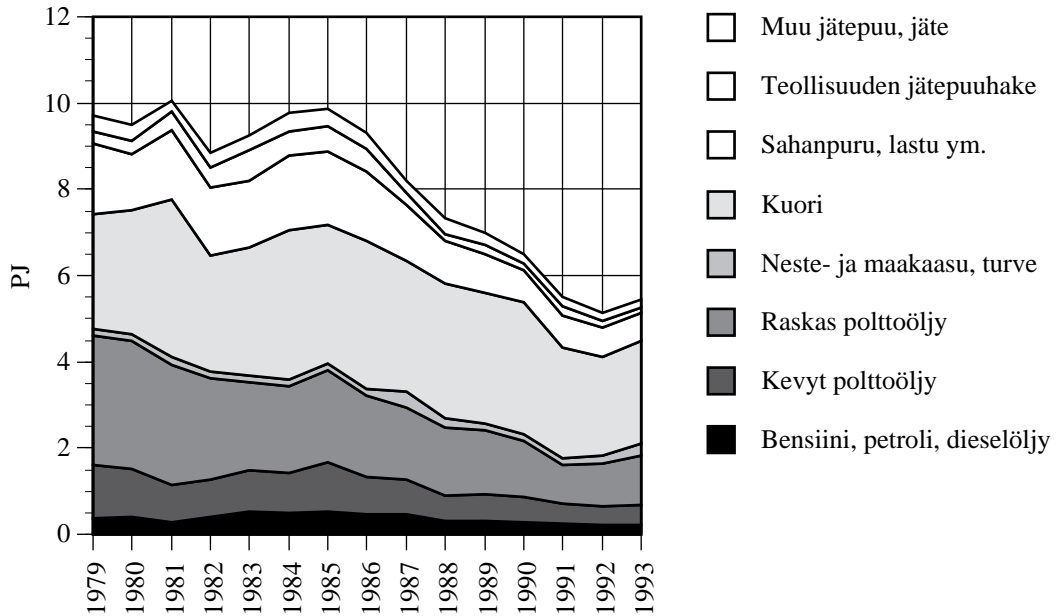


Kuva 3.1. Sähkönkulutus puutavaran paitsi puukalusteiden valmistuksessa 1970-1994 (Tilastokeskus 1995a).

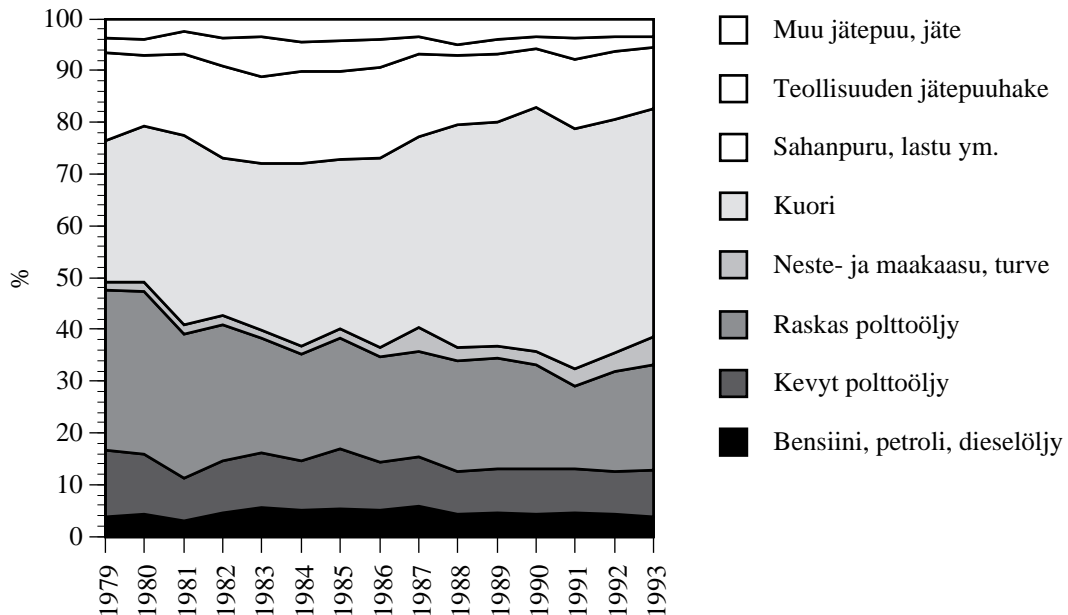
Teollisuustilaston mukaan puutavaran ja puutuotteiden valmistuksessa vuonna 1993 käytettiin polttoaineita lämpöarvoltaan yhteensä 5 452 TJ. Tästä määrästä sahojen ja vaneritehtaiden sivutuotteita, kuorta ja purua, oli yli puolet. Kun koko metsäteollisuus käytti vastaavana aikana polttoaineita 72 739 TJ, oli mekaanisen sektorin osuus 7,5 %

metsäteollisuuden ja 0,4 % koko Suomen polttoaineiden kulutuksesta (1 230 PJ) (Tilastokeskus 1995b).

Kuvassa 3.2 on esitetty mekaanisen metsäteollisuuden polttoaineiden käytön kehittyminen vuodesta 1979 vuoteen 1993. Kuvasta 3.3 taas käy selvemmin ilmi eri polttoaineiden merkitys ja osuus kokonaiskäytöstä vastaavana aikana. Kummassakin kuviossa vuoden 1981 raskaan polttoöljyn käyttö on laskettu vierekkäisten vuosien keskiarvona.

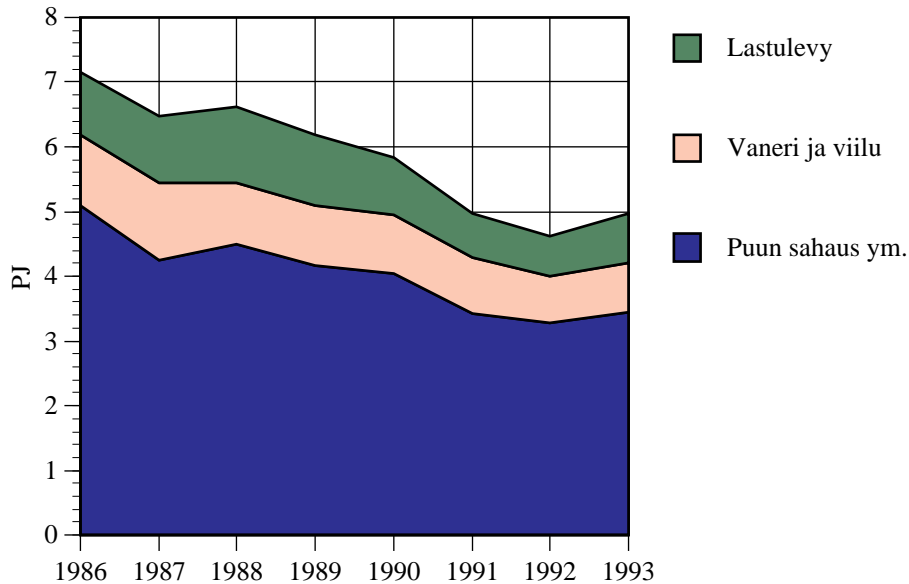


Kuva 3.2. Polttoaineiden käyttö lämpöarvon mukaan puutavaran ja puutuotteiden valmistuksessa 1979-1993. Uusiutuvien polttoaineiden osuus on ollut jatkuvasti noin puolet tai enemmän (Tilastokeskus 1980-1995).



Kuva 3.3. Mekaanisen metsäteollisuuden käyttämien polttoaineiden suhteelliset osuudet vuosina 1979-1993. Kuoren osuus on lisääntynyt selvästi ja fossiilisten polttoaineiden osuus puolestaan vähentynyt (Tilastokeskus 1980-1995).

Tilastoinnin perusteella mekaanisen metsäteollisuuden polttoaineiden kokonaiskulutus on laskenut viimeisen kymmenen vuoden aikana noin puoleen. Eri polttoaineiden kohdalla erityisesti öljyn, sahapurun ja muun jätepuun käyttö on laskenut tilastoinnin perusteella merkittävästi. Sen sijaan kuorijätteen energiakäyttö on pysynyt saman suuruisena. Kuvassa 3.4 on esitetty polttoaineiden käytön jakautuminen eri mekaanisen metsäteollisuuden aloille 1986-1993.



Kuva 3.4 Polttoaineiden kokonaiskäyttö eri aloilla vuosina 1986-1993. Volyymiltaan suurin sahateollisuus käyttää kaksi kolmasosaa kaikista polttoaineista. (Tilastokeskus 1995c).

Ominaiskulutus tietylle laitokselle saadaan jakamalla käytetty energiapanos saavutetulla tuotannolla. 1980-luvun alussa valmistuneessa mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimuksessa todettiin että sähkön ominaiskulutus on suursahoilla keskimääräistä suurempi. Vaneritehtaan ominaissähkönkulutus taas kasvaa jos jalostusaste tai raaka-aineen ominaiskäyttö kasvaa. Lastulevyn valmistuksessa ominaissähkönkulutusta vähensi lastulevyn keskipaksuuden suureneminen (Usenius 1982). Taulukkoon 2 on koottu tyypilliset ominaiskulutukset eri tuotteiden valmistuksessa.

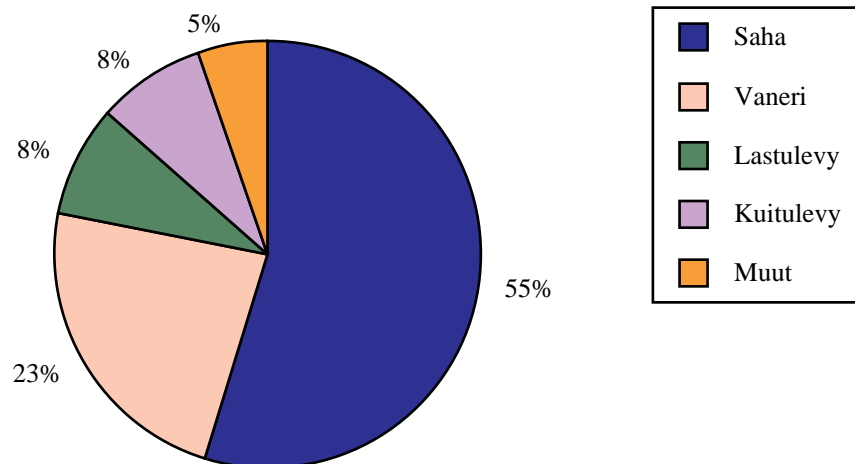
Taulukko 2. Lämmön ja sähkön ominaiskulutukset keskimäärin sekä sähköntarpeen suhde lämmönkulutukseen sahatavaran ja puulevyjen valmistuksessa (Juvonen 1987 ja Usenius 1982).

	sähkö	lämpö	sähkö / lämpö
	kWh/m ³	GJ/m ³	
Sahatavara	80,5	1,1	0,26
Vaneri	289	6,7	0,16
Lastulevy	150	2,7	0,20
Kuitulevy	639 kWh/t	7,9 GJ/t	0,29

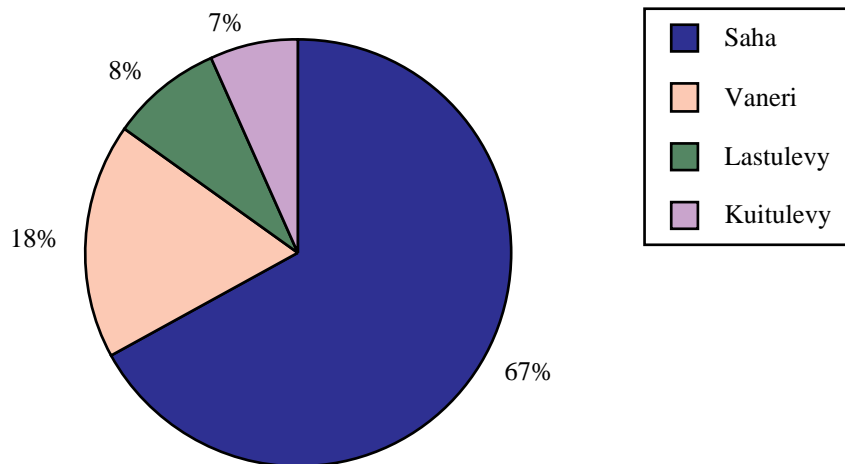
Ongelmia puulevyteollisuuden energiankäytön tarkastelussa aiheuttavat integraatit, joiden energiankäyttö on tilastoitu kokonaisuutena, mutta ei tuotekohtaisesti. Tässä

tarkastelussa integraattien energiankäyttö jaettiin eri tuotteiden tyypillisten ominaiskulutuslukujen avulla osiin tuotantomäärien mukaisesti. Noin 70 % Suomen vanerin ja lastulevyn tuotannon sähkönkulutuksesta saadaan tilastoinnin perusteella tarkasti selville. Loput joudutaan laskemaan kokonaan tai osittain keskimääräisten ominaiskulutuslukujen avulla lähtien ilmoitetuista tuotantomääristä. Kuvassa 3.5 on esitetty em. perusteilla saatu sähköenergian kokonaiskulutuksen jakautuminen mekaanisen metsäteollisuuden eri alojen kesken.

Lämmönkulutuksen arviointi on hankalampaa kuin sähkön. Laskien keskimääräisellä kattilahiötysuhteella lähtien polttoainetiedoista, saadaan kuitenkin eräs arvio. Tulosta voidaan verrata tuotannon vaatimaan lämpömäärään, jolloin saadaan myös ominaiskulutusluku lämmössä. Joiltakin laitoksilta saatiin todelliset ominaiskulutusluvut sekä sähkössä että lämmössä, jolloin käytettiin niitä. Kuvassa 3.6 on esitetty lämmönkäytön jakautuminen mekaanisen metsäteollisuuden eri alojen kesken. Taulukossa 3 on yhteenveto kaikista tuloksista, sekä vertailu vuoden 1979 tilanteeseen. Huomattava on, että sahateollisuuslaitosten suuresta määrästä johtuen niitä ei käyty laitoksittain läpi, vaan koko sahateollisuussektori arvioitiin ominaiskulutusluvuilla.



Kuva 3.5. Mekaanisen metsäteollisuuden vuoden 1993 sähkönkulutuksen (945 GWh) ja jakautuminen eri alojen kesken. Sahateollisuuden osuus on arvioitu ominaiskulutusluvulla 62,3 kWh/m³ (Usenius 1982, s. 60) vuoden 1993 tuotannosta, 8,3 Milj.m



Kuva 3.6. Mekaanisen metsäteollisuuden vuoden 1993 lämmönkulutuksen jakautuminen

eri alojen kesken. Sahateollisuuden osuus on arvioitu ominaiskulutusluvulla 330

kWh/m³ (Usenius 1982, s. 60) vuoden 1993 tuotannosta, 8,3 Milj.m

Taulukko 3. Yhteenveto mekaanisessa metsäteollisuudessa käytetystä energiasta aloitain vuonna 1993. Kulutusmäärissä on pyritty laskemaan ominaiskulutuslukujen avulla integraateissa eri tuotteiden osuus erikseen. Sahateollisuuden osuus on laskettu ominaiskulutusluvuilla sähkölle 62,3 kWh/m³ ja lämmölle 330 kWh/m³ (Usenius 1982 s. 60). Tuotannonalan ominaiskulutusluku on tuotannolla painotettu tehtaiden keskiarvo.

			Ominaiskulutus -93		Ominaiskulutus -79	
	Sähköä	Lämpöä	Sähkö	Lämpö	Sähkö	Lämpö
	MWh	GJ	kWh/m ³	kWh/m ³	kWh/m ³	kWh/m ³
Sahatavara	517402	9864000	(62,3)	(330)	62,3	330
Vaneri	220268	2632222	371	1232	297	1633
Lastulevy	79905	1248523	180	780	183	761
Kuitulevy	77197	99212	635 kWh/t	2268 kWh/t	638 kWh/t	2183 kWh/t
Muut	50229					
Yhteensä	945000	13843957				

Taulukosta 3 voidaan nähdä että vanerintuotannossa sähkön ominaiskulutus on kasvanut mutta lämmön vähentynyt. Tämä johtune jaloitusasteen ja automaation kasvusta. Lämmön ominaiskulutus sen sijaan kääntyi laskuun jo 1970-luvun lopussa (Juvonen R. 1985 s. 171). Tuolloin alkanut laskeva kehitys näyttää jatkuneen. Lastu- ja kuitulevyn ominaiskulutukset eivät näytä juuri muuttuneen.

3.2 Sahateollisuus

Sahatavaran tuotanto kuluttaa varsin vähän energiaa verrattuna muiden tavallisten rakennusmateriaalien tuotantoon. Esimerkiksi betonin tuotanto vaatii helposti yli kolminkertaisen energiapanoksen, teräsbetoni vielä enemmän. Sahalaitoksen energiantarve on siis suhteellisen helppo tyydyttää. Käytännössä sahalaitos voi olla lämmön suhteen täysin omavarainen, mikäli sivutuotteeksi jäävä kuori on riittävän kuivaa.

Lähtien sahatavaran tuotantomäärästä, 8,3 milj.m³ vuonna 1993, sekä ominaiskulutusluvuista (Taulukko 2.) voidaan karkeasti arvioida että sahateollisuudessa käytettiin 9 136 GJ lämpöä ja 2 408 GJ sähköä kyseisenä vuonna. Saha- ja levyteollisuus kuluttaa noin kymmenesosaa vastaavan energiamäärän massa- ja paperiteollisuudessa käytettävästä energiasta (Metsäteollisuus ry. 1995c).

3.2.1 Energian kulutus

Sahan suurin energiankuluttaja on kuivaamo. Se käyttää sahan lämpöenergiasta keskimäärin yli 85 %, vain 5-10 % käytetään muuhun kuten rakennusten lämmittämiseen. Sähköenergian kulutus on sekin pitkälti riippuvainen kuivaamosta mutta myös koneistustasosta ja automaatiosta. Lämminilmakuivaamon runsas sähkönkulutus johtuu puhaltimista, jotka kierrättävät lämmitettyä ilmaa puutavarapakettien läpi. Kuivaamo kuluttaa liki 40 % sahalaituksen käyttämästä sähköstä, joka samalla muuttuu lämmöksi.

Vaikka puutavaran kuivaamiseen on kehitetty eri tekniikoita on lämminilmakuivaus kamari- tai kanavakuivaamoissa silti yleisin menetelmä. Lämpö siirtyy lämminvesipattereista pattereiden läpi puhallettuun ilmaan ja siitä puutavaraan, jossa se höyrystää veden. Kuivumistapahtumaa valvotaan säätämällä ilman lämpötilaa ja kosteutta. Lämmöstä 65-90 % poistuu ilmanvaihdon ja 5-15 % kuivauskuormien mukana, loppu poistuu säteily- ja johtumishäviöinä.

3.2.2 Energian tuotanto

Yleensä sahat ostavat sähköenergian ja tuottavat itse tarvitsemansa kuivaamolämmön. Lämmöntuotantokapasiteetti mitoitetaan lähinnä kuivaamon mukaan. Vähänkään isommalla sahalla kuori on edullisin polttoaine kuivaamon lämmöntarpeen tyydyttämiseksi. Koska tarvittava lämpötila on alle 120°C riittää tarkoitukseen höyrykattilaa halvempi lämminvesikattila, joista parhaiten tehoalueelle 1-10 MW sopivat tulitorviputkikattilat. Kuoren kuivaus- ja käsittelylaitteet sekä kiinteän polttoaineen (kpa) kattilat ovat investoinneiltaan ja ylläpitokuluiltaan suuremmat kuin vastaavantehoinen öljykattila. Öljykattilaa käytetäänkin useimmiten kpa-kattilan rinnalla vastaamaan huipputehon tarpeesta. Mikäli saha perustaisi kaiken lämmöntuotannon öljylle voi sivutuotteista muodostua ongelma. Joissain markkinatilanteissa sahan kannattavuus saattaa riippua sivutuotteiden myynnistä ja poltosta.

5 000 m³ vuodessa sahaavalla sahalla on lämpöteho tarve n. 250 kW. Kamarikuivaamon lämmöntarve vaihtelee hyvinkin paljon mutta useimmat kamarit tasaavat kuormaa, kanavakuivaamon lämpökuorma on sen sijaan suhteellisen tasainen. Noin 5 MW:n teho riittää aina 100 000 m³:n tuotantoon asti. Suurin osa Suomen sahoista tarvitsee siis 0,2-3 MW:n lämmöntuotantokapasiteetin. Näissä kokoluokissa laitevalmistajia on vain muutamia.

Yleisimmät ongelmat hakkeen ja kuoren poltossa liittyvät kosteuteen ja polttoaineen laatuun. Stokeripolttoon perustuvat ratkaisut toimivat hyvin vain jos hake on kuivaa ja tasalaatuista. Stokeripolttimen ylärajana pidetään 300 kW, suuremmilla tehoilla käytetään useampaa poltinta tai arinapolttoa joko kiinteällä tai kehittyneemmällä mekaanisella arinalla. Useamman megawatin kokoluokissa on leijukerroskattila investoinneil-

taan edullisin (Oravainen 1994). Pienin kaupallinen kuorenpolttolaitos on kooltaan n. 1 MW. Pienempiäkin on mahdollista valmistaa, mutta ne ovat investoinneiltaan lähes samaa luokkaa kuin suuremmat.

Sähköä ei tiettävästi tuoteta minkään sahan lämmöntuotannon yhteydessä. Suuret metsäteollisuusintegraatit ovat kuitenkin asia erikseen. Niillä on usein oma voimala joka tuottaa höyryä, lämmintä vettä ja sähköä koko integraatille, saha mukaanlukien. Voimala käyttää sahan sivutuotteiden lisäksi muitakin integraatin tuottamia polttoaineita.

Saha voi myös toimia yhteistyössä biopolttainetta käyttävän voimayhtiön kanssa sen sijaan että sillä olisi omaa sähkön- tai lämmöntuotantoa. Näin on esim. Kuhmossa, Kuusamossa, Lieksassa ja Humppilassa. Kuhmon tapauksessa voimayhtiö toimittaa sahalle sähköä ja lämpöä ja saha yhtiölle polttoaineita. Pienvoimalaan kerätään ympäristöstä lisäpolttoainetta hakkeen muodossa. Voimala toimittaa myös kaukolämpöä taajamaan. Näin saha, pienvoimala ja taajama ovat kytköksissä toisiinsa käyttäessään uusiutuvaa energiaa. Monet sahat myyvät lähitaajamaan kaukolämpöä, mihin omat sivutuotteet voivat riittää senkin jälkeen kun oma lämmöntarve on tyydytetty.

3.3 Vaneritehtaat

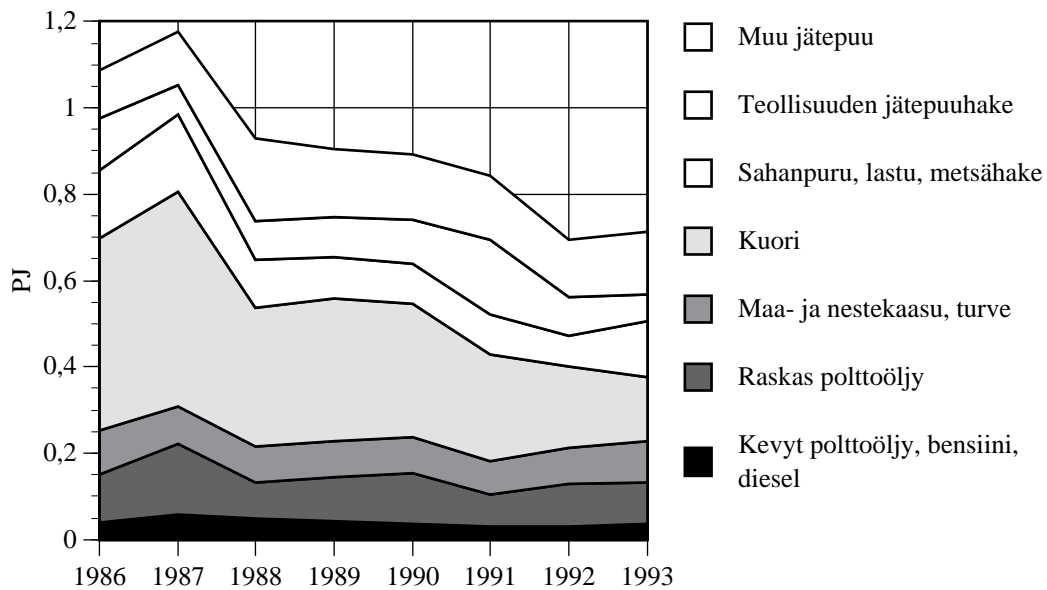
3.3.1 Energian kulutus

Vanerin tuotannossa eniten energiaa kuluu viilun kuivaukseen. Lämmön tärkeimmät käyttökohteet ovat kuivaus, yli 55 %, tukkihautomo 10-20 %, liimaus n. 10 % sekä lämmitys ja muu kulutus. Sähköä käytetään eniten sorvauksessa ja kuivauksessa, n. 50 %, muut työvaiheet ovat puunkäsittely, haketus ja kuorinta, n. 20 %, liimaus ja viimeistely n. 20 % sekä viilunkäsittely n. 10 % (Juvonen R. 1985, s. 174). Sähköenergian tarve kasvaa koneellistamisen ja automatisoinnin myötä.

Lämpöä käytetään enimmäkseen höyrynä. Viilunkuivauskone käyttää useimmiten 10-12 bar kylläistä höyryä, tai kuten Lappeenrannassa, maakaasua poltettaessa syntyviä kuumia savukaasuja. Kuivauskoneen poistoilmasta talteenotettua lämpöä käytetään yleensä tukkihautomossa.

3.3.2 Energian tuotanto

Etenkin kun vanerintuotannossa saanto on alhaisempi kuin sahauksessa, on vaneritehdas käytännössä täysin omavarainen lämpöenergian suhteen. Omavaraisuus on sitä suurempi, mitä vähemmän sivutuotteita voidaan myydä raaka-aineeksi, kuori jää silti jäljelle. Useat tehtaat ovat kiinteässä yhteistyössä läheisen voimalan kanssa, joka käyttää sivutuotteet polttoaineena ja tuottaa höyryä ja sähköä tehtaalle. Näin on ainakin Savonlinnassa, Kuopiossa, Säynätsalossa ja Suolahdella. Kaikki suuremmat vaneritehtaat käyttävät polttoaineinaan joko omia sivutuotteita tai öljyä. Kaakkois-Suomessa käytetään viilunkuivaukseen myös maakaasua. Kuvassa 3.7 on esitetty vaneritehtaiden ja vaneria valmistavien integraattien käyttämät polttoaineet vuosina 1986-1993.



Kuva 3.7. Vaneritehtaiden polttoaineiden käyttö vuosina 1986-1993. Uusiutuvien polttoaineiden ja sivutuotteiden osuus on hyvin merkittävä (Tilastokeskus 1995c)

3.4 Lastulevytehtaat

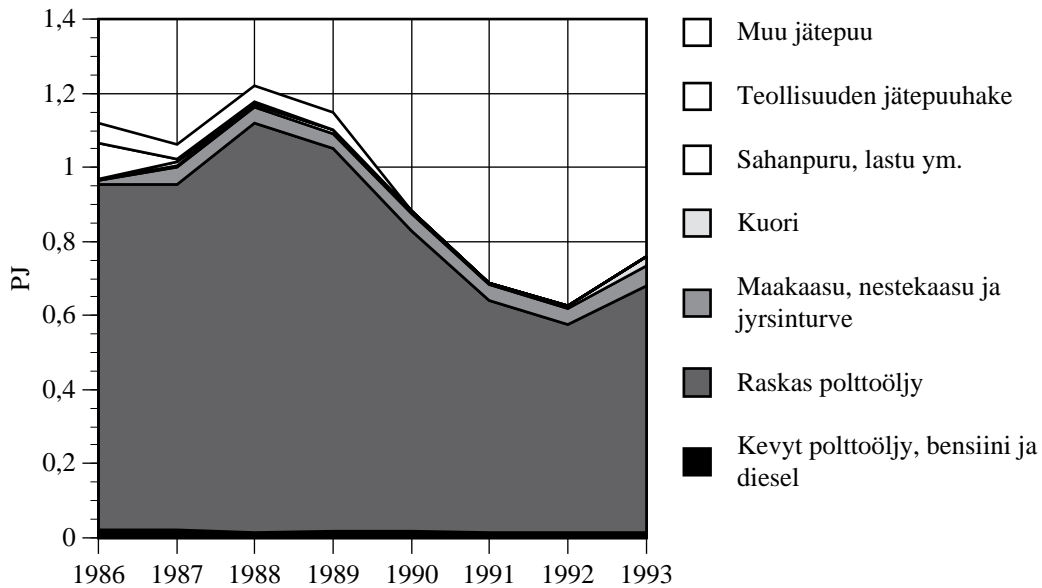
3.4.1 Energian kulutus

Lastulevyn valmistuksen alkuvaiheen prosesseissa kuluu sähköenergiasta noin puolet. Eniten sähköä tarvitaan raaka-aineen esikäsittelyssä ja lastuamisessa, n. 30 %. Lastun kuivaus kuluttaa n. 20 %, aihionmuodostus, liimaus ja puristus käyttää n. 10 %, levyn jälkikäsittely, mm. hionta n. 20 % ja jatkojalostus sekä muut tehdastoiminnot loput 20 % (Usenius & Koskela 1983).

Lämmönkäytöstä ylivoimaisesti suurin osuus kuluu lastun kuivaamiseen, lähes 80 %. 10 % käytetään levypuristimissa ja loput n. 10 % tilojen yleislämmitykseen ja ilmastointiin (Usenius & Koskela 1983).

3.4.2 Energian tuotanto

Suomen lastulevyä valmistavissa integraateissa ei tuoteta sähköä, Heinolan kuitulevytehdasta lukuunottamatta. Lastukuivurin käyttämiä kuumia savukaasuja tuotetaan suunnilleen puoliksi hiomapölyllä ja puoliksi öljyllä, myös maakaasua käytetään. Polttoaineiden käytöstä puhtaasti lastulevyn valmistuksessa koko Suomessa on vaikea antaa oikeaa jakautumaa, koska vain yksi tehdas valmistaa pelkkää lastulevyä, muut ovat integraatteja. Lisäksi hiomapölyn käyttöä ei ole tilastoitu. Se ei kuitenkaan riitä lastun kuivaukseen, joten noin puolet lämmöstä tuotetaan useimmiten öljyllä.



Kuva 3.8. Lastulevytehtaiden polttoaineiden käyttö vuosina 1986-1993. Raskaan polttoöljyn osuus on tilastoitujen polttoaineiden osalta suurin. Kuviosta puuttuu hiomapölyn käyttö, jonka osuus on öljyn suuruusluokkaa. Tätä jättepolttoainetta ei ole kuitenkaan tilastoitu (Tilastokeskus 1995c).

3.5 Kuitulevytehtaat

3.5.1 Energian kulutus

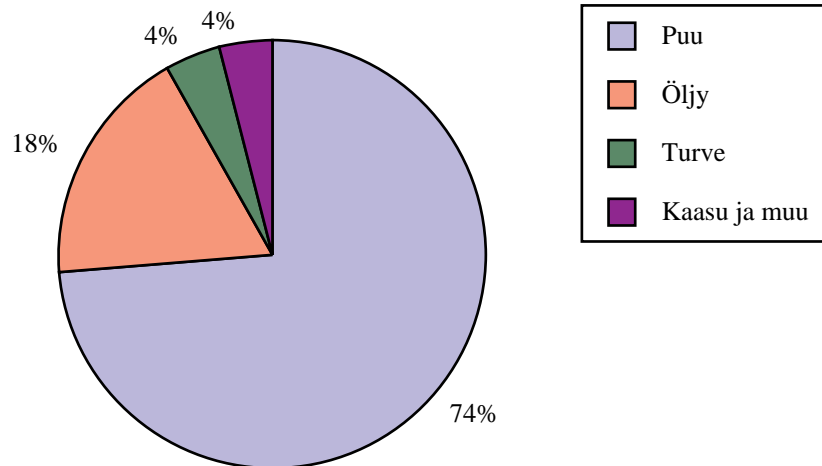
Sähköenergiasta 60-70 % käytetään kuitumassan valmistuksessa. Muista prosessin vaiheista levyn puristus ja kuivaus kuluttaa n. 15 % ja kaikki muut vaiheet vain 15 % (Usenius & Järvi 1983). Massan kemiallisella tai mekaanisella valmistuksella on huomattava merkitys myös sähköenergian ominaiskulutukselle.

Lämpöenergiaa tarvitaan eniten levyn puristuksessa ja kuivauksessa. Tähän työvaiheeseen käytetään poikkeuksetta yli puolet lämmöstä. Massan valmistus kuluttaa lämmöstä n. 20-30 %, loput levyjen lämpökäsittely ja muut työvaiheet. Lämpöä käytetään pääosin prosessihöyryinä.

3.5.2 Energian tuotanto

Molemmilla kuitulevytehtailla tuotetaan sähköä ja lämpöä. Vuonna 1993 tehtaat tuottivat yhteensä 22,4 GWh vastapainesähköä ja 284 GWh vastapainelämpöä. Tehdasvoimaloiden keskimääräinen rakennusaste sähköntuotannolla painotettuna oli n. 0,09. Oma sähköntuotanto kattoi omasta kulutuksesta vajaat 30 % (Sähkötarkastuskeskus 1994). Kuitulevytehtaiden polttoaineiden käyttö oli vuoden 1993 ilmansuojeluilmoitusten mukaan yhteensä 1 215 TJ. Jakautuma eri polttoaineisiin on esitetty kuvassa 3.9. Edellä mainituissa luvuissa ja polttoaineen käytössä on mukana Heinolan tehtaan lastulevytuotanto, jonka osuus jää kuitenkin alle kymmeneen prosenttiin koko tehtaan energiankulutuksesta. Tilastokeskus ei ilmoita kuitulevyn valmistuksessa käytetyn yhtään puuperäisiä polttoaineita vuonna 1993. Tämä voi johtua siitä että

voimalat on tilastoitu omana toimipaikkana, tai — kuten lastulevypölyn tapauksessa — jättepolttoainetta ei ole tilastoitu.



Kuva 3.9. Kuitulevytehtaiden polttoaineiden käyttö tehdasvoimaloiden ilmansuojeluilmoitusten mukaan 1993.

4. PIENET BIOPOLTTOAINEVOIMALAT VAIHTOEHTONA

4.1 Sähkön- ja lämmöntuotannon yhdistäminen

Ideaalisen lämpövoimakoneen hyötysuhde riippuu vain toimintalämpötiloista, jotka ovat aina äärelliset. Tästä seuraa että lämpöä ei voida muuttaa kokonaan työksi. Siksi lämpövoimaloissa syntyy väistämättä suuria määriä ylimääräistä lämpöä. Järkevintä on tehdä lämmöstä tuote ja kuljettaa se höyryn tai kaukolämpöveden välityksellä kuluttajille. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto nostaa polttoaineen jalostusastetta. Näin ollen runsaasti lämpöä käyttävissä kohteissa on järkevää tuottaa lämmön ohella sähköä, jota taas on helpompi siirtää muualle kulutukseen. Suomessa on pitkät perinteet sähkön ja lämmön yhteistuotannosta, koska kylmän ilmaston vuoksi lämpöä tarvitaan paljon.

Pienissä yksiköissä sähkön- ja lämmöntuotannon yhdistäminen on ongelmallista lähinnä ominaisinvestoinnin kohoamisen takia. Koska biopolttoaineiden energiasisältö fossiiliin polttoaineisiin verrattuna on alhainen, niitä ei yleensä kannata kuljettaa pitkiä matkoja. Biopolttoaineiden käyttämiseksi olisi kehitettävä edullisia ja hyvän hyötysuhteen omaavia pienvoimaloita jotta polttoaine voidaan jalostaa mahdollisimman pitkälle lähellä syntypaikkaansa. Jätteenä tai sivutuotteena syntyvät biopolttoainemäärät ovat ison mittakaavan energiantuotantoon liian pieniä.

Sähkömarkkinoiden vapautuminen antaa paremmat mahdollisuudet myydä ylimääräistä sähköä sekä kilpailuttaa sähkön myyjiä. Vuoden 1996 alkuun mennessä sähkömarkkinoiden avautuminen ei saanut suuria muutoksia aikaan (Sähkölaitosyhdistys 1996).

4.2 Pienet biopolttoainevoimalat

Lämpöä voidaan tuottaa perinteisten kuumavesikattiloiden lisäksi uusilla, yhdistetyillä prosesseilla. Nämä tuottavat lämpöä ja sähköä myös alle 20 MW kokoluokassa.

Pienvoimalaitoksella tarkoitetaan yleensä rankine-prosessia käyttävää höyryturpiinilaitosta kokoluokassa alle 30 MW sähkötehoa. Biopolttoaineita voidaan käyttää myös brayton-, diesel- tai stirling-prosesseissa, joiden pohjalle lämpövoimakone voidaan rakentaa sähköntuotantoa ajatellen.

Kaasuturpiinissa (brayton-prosessi) tai diesel-moottorissa kiinteää polttoainetta ei voida polttaa sellaisenaan, vaan se on muutettava kaasuksi tai nesteeksi, joka edelleen kaasutetaan palotilaan. Tällöin polttoaineen käsittelyvaiheet tekevät prosessista monimutkaisen ja kalliin sekä heikentävät kokonaistaloutta. Kiinteässäkin biopolttoaineessa palavista aineista on suuri osa kaasuuntuvia ja tuhkapitoisuus vaihtelee. Jos rankine-prosessi toteutetaan veden asemasta orgaanisella, matalan höyrystymislämmön omaavalla väliaineella, voidaan sähköä tuottaa alhaisemmista lämpötiloista pienemmällä teholla.

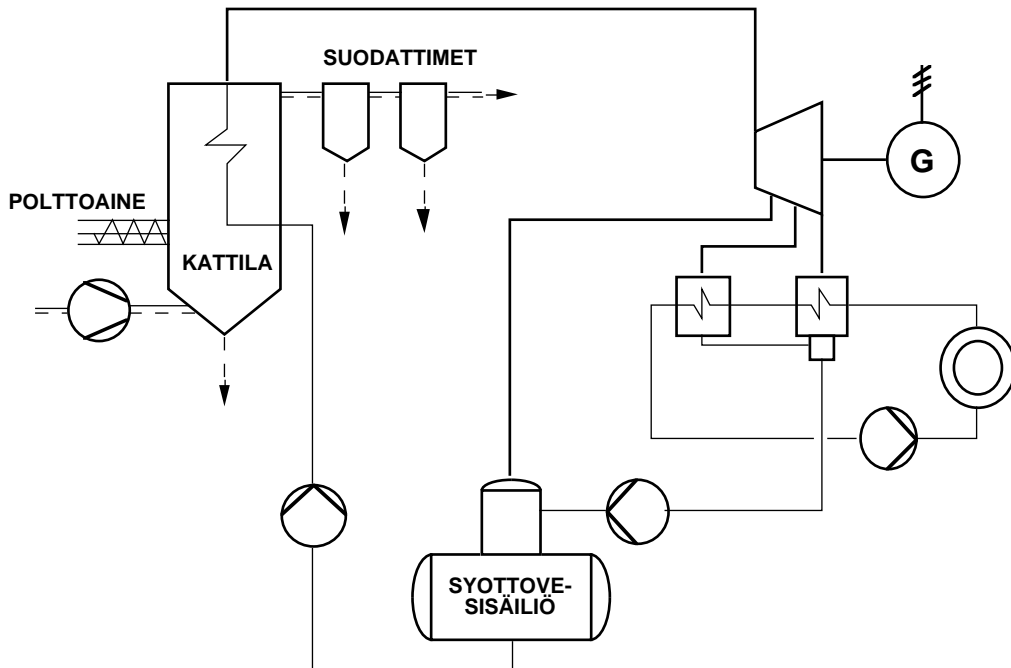
Stirling-koneen käyttöä on tutkittu Suomessa yllättävän vähän, vaikka sillä on toimintalämpötila-alueellaan parhas hyötysuhde.

Seuraavissa luvuissa esitellään jo kaupallistetut tai vielä kehitystyön alla olevat, mallissa laskettavat lämpövoimaprozessit ja niiden toimintaperiaatteet.

4.2.1 Vastapainehöyryvoimalaitos

Aiemmin uskottiin, että vettä kiertoaineenaan käyttävää rankine-prosessia ei voida rakentaa taloudellisesti alle 30 MW:n sähköteholle. Sittemmin prosessia ja höyryturpiineja on kehitetty niin että ominaisinvestointikulu kohoaa oleellisesti vasta 3-4 MWe pienemmissä yksiköissä. Vaikka 2 MWe:n turpiini on mahdollinen, ongelmaksi jää pienempien kattiloiden ja turpiinien heikompi hyötysuhde, mikä nostaa käyttökuluja (KTM 1982).

Konventionaalinen höyryvoimalaitos on koeteltua tekniikkaa. Alle 10 MWe vastapainvoimalaitoksia on rakennettu 1990-luvulla Suomeen useita, mm. Kuhmoon, Lieksaan, Kuusamoon, Kankaanpäähän, Pieksämäelle ja Suolahdelle. Näistä erityisesti on mainittava Kuhmon ja Lieksan laitokset, joiden polttoainehuolto perustuu enimmäkseen läheisen sahan sivutuotteisiin. Samoin saha käyttää merkittävän osan laitoksen tuottamasta lämmöstä, josta loput syötetään taajaman kaukolämpöverkkoon. Sahan ja muiden energiantarvitsijoiden yhteistyöllä on saatu riittävä lämpökuorma sekä riittävästi polttoainetta yhteistuotannolle. Lisäpolttoaineita ostetaan tarpeen mukaan (Helynen 1993).



Kuva 4.1. Höyryturpiiniin ja rankine-kiertoprosessiin perustuvan konventionaalisen vastapainvoimalan periaatekaavio. Tällä tekniikalla on toteutettu 1990-luvulla Suomeen useita pienvoimalaitoksia. Kattilana käytetään leijukeroskattilaa.

Kaikissa Suomeen rakennetuissa pienvoimaloissa on leijupeti- tai kierto-leijupetikattila. Pienvoimalaitos voi päästä aina 85 %:n kokonaishyötysuhteeseen, sähköntuotannon hyötysuhteen ollessa 25-30 %. Rakennusaste vaihtelee välillä 0,4-0,6. Suomen laitokset

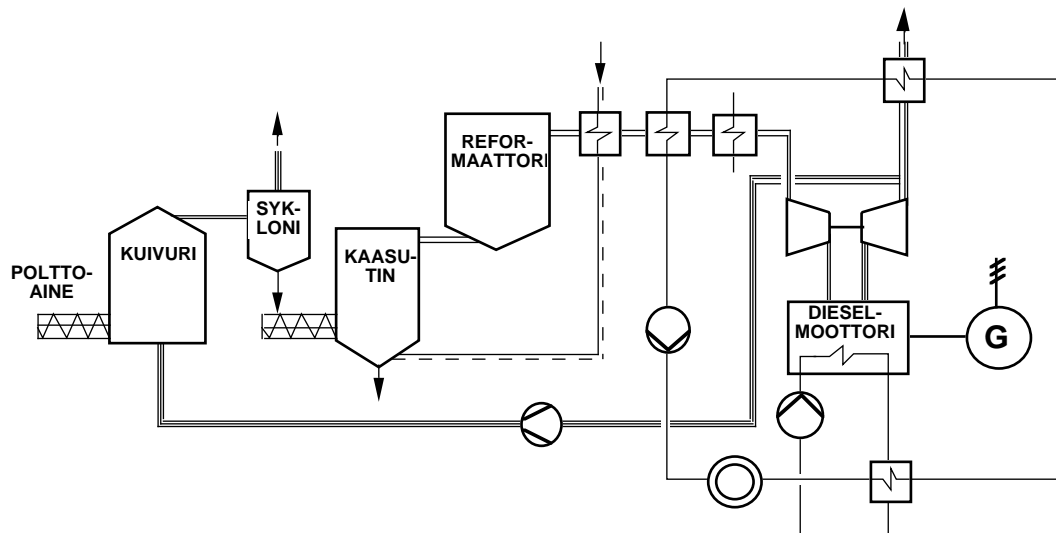
ovat nettolämpöteholtaan 15-25 MW ja sähköteholtaan 5-12,4 MW, niissä käytettävä tuorehöyry on tyypillisesti 60-80 bar, 490-510 °C (Helynen 1993).

Jos pienvoimalan miniminettolämpöteho on 15 MW saavutetaan näin suuri keskimääräinen lämpökuorma vasta sahoilla, joiden tuotanto on n. 300 000 m³. Tästä tuotantomäärästä syntyvä kuori ei todennäköisesti riittäisi yksinään pienvoimalan polttoaineeksi, vaan lisänä tarvittaisiin muita polttoaineita. Pienvoimala soveltuu siis vain suurille sahoille tai integraateille, joista löytyy runsaasti sekä sivutuotepolttoaineita että lämpökuormaa. Eri energiankuluttajien ja -tuottajien yhteistyönä molemmat edellytykset on helpommin saavutettavissa. Kokoluokassaan pienvoimala on toimiva ratkaisu. Jos prosessia on mahdollista edelleen pienentää 10 MW:n lämpötehoon tai alle, avautuu sille enemmän mahdollisuuksia, riippuen investointikustannuksista ja saavutettavissa olevasta huipunkäyttöajasta.

4.2.2 Kaasutus-dieselveimalaitos

Dieselmootoreissa on yleensä käytetty fossiilisia polttoaineita, mutta moottori voi toimia muullakin, riittävän korkean lämpöarvon omaavalla öljyllä tai kaasulla. Biopolttoaineen kaasutus voi tapahtua paineistettuna tai ilmanpaineisena. Ilmanpaineisessa kaasuttimessa biomassa pyrolysoituu n. 1 000 °C:n lämpötilassa. Pyrolyysin jälkeen hiiltojäännös ja kiintoaineet erotetaan sykloneissa ja palautetaan kaasuttimeen. Kaasuttimen lämpötila säilyy hiiltojäännöksen palaessa esilämmitetyllä ilmalla jota tuodaan alhaalta leijutuksen aikaansaamiseksi. Tuotekaasu sisältää mm. vetyä, hiilimonoksidia, vesihöyryä, metaania ja tervaa. Reformaattorissa kaasu saa kemiallisen tasapainon katalyytin vaikutuksesta ja sen lämpötila laskee n. 300°C. Ennen dieselmoottoria kaasua vielä jäähdytetään kaasutinilmalla ja kaukolämpövedellä n. 700°C:sta aina 40°C:een.

Koska kaasulla on fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna matalampi lämpöarvo, käytetään dieselissä syttymisen varmistamiseksi kevyttä polttoöljyä n. 10 % koko polttoaineen energiamäärästä. Lisäksi prosessissa otetaan lämpöä talteen dieselmoottorin savukaasuista ja moottoriblokin jäähdytysvedestä. Sähköntuotannossa päästään n. 39 %:n hyötysuhteeseen.



Kuva 4.2. Biomassan kaasutukseen perustuvan dieselvoimalan periaate.

Kaasutus-dieselvoimalaitoksia ei ole toteutettu tuotantokäyttöön. Koska poltettava kaasu valmistetaan paikan päällä on laitos monimutkainen ja vaatii pätevämpää käyttöhenkilökuntaa kuin pyrolyysiöljy-diesel. Toisaalta, koko polttoainekiertoa ajatellen kaasutus-diesel on yksinkertaisempi kuin pyrolyysiöljy-diesel, kun polttoainekaasu käytetään paikan päällä. Moottorissa nestemäinen polttoaine jokatapauksessa kaasutetaan. Mikäli kaasun puhdistukseen liittyvät ongelmat saadaan ratkaistua tuo kaasutus-diesel runsaasti uusia mahdollisuuksia ja soveltuu lämpötehonsa puolesta yli 100 000 m³ sahoille.

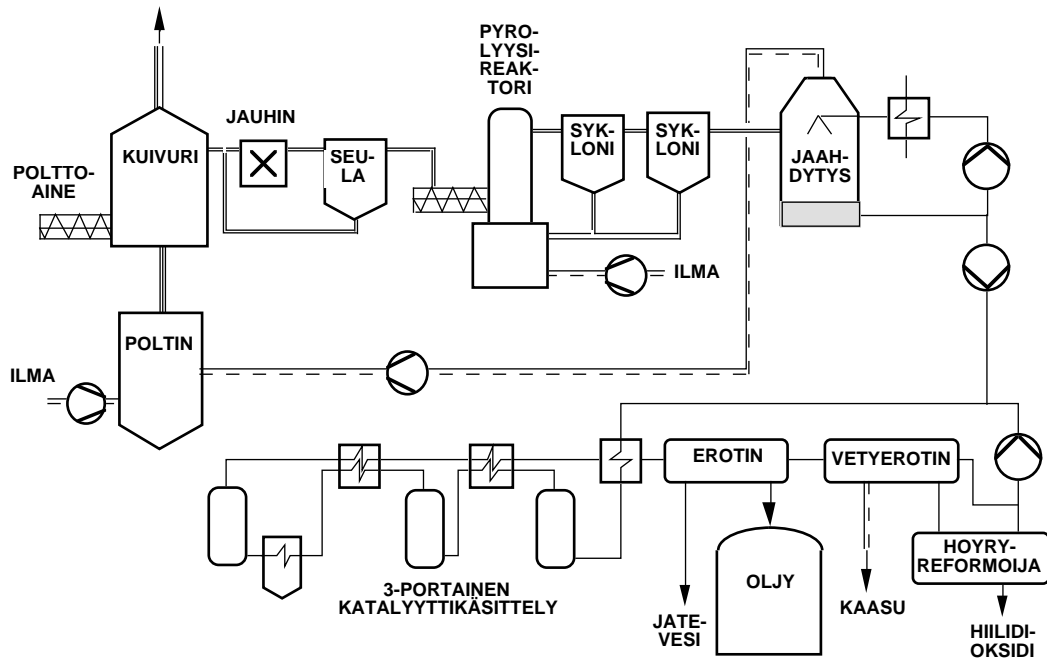
4.2.3 Pyrolyysiöljy-dieselvoimalaitos

Pyrolyysiöljy on tuote, jota saadaan lauhduttamalla biomassan pyrolyysissä syntyneitä kaasuja. Pyrolyysi voi tapahtua paineistetussa tai ilmanpaineisessa prosessissa. Pyrolyysiöljyn valmistuksessa menetetään n. 35 % polttoaineen sisältämästä energiasta. Vaikka energiahyötysuhde laskee saavutetaan pyrolyysiöljyn avulla useita etuja. Öljyn energiatiheys on suurempi kuin kiinteän polttoaineen, sen käsittely on helpompaa, eikä sen käyttö vaadi korkeasti koulutettua henkilökuntaa. Lisäksi sitä voidaan varastoida, joten öljyn tuotanto ja kulutus voivat olla täysin erillään. Öljyn tuotanto voi tapahtua edullisesti suuressa yksikössä kun taas käyttökohteet voivat olla pieniä ja sijaita hajallaan.

Ilmanpaineisessa, nopeassa pyrolyysiprosessissa puuhake jauhetaan ja kuivataan. Kuiva lastu syötetään nopeaan kiertoleijupetiin, jossa leijutusaineena toimii hiekka. Pyrolyysi tapahtuu alle sekunnissa reaktorin pyrolyysiosan 500°C lämpötilassa. Hiekka ja hiiltojäännös erotetaan kaasuista sykloneissa. Kiintoaine palautetaan reaktorin palamisosaan, missä hiiltojäännös palaa ja tuottaa 800-1 000 °C lämpötilan.

Kaasut, jotka sisältävät mm. tervaa, vettä ja kevyitä hiilivetyjä lauhdutetaan jäähdytystornissa noin 75°C:een. Lauhduttimessa kaasuihin ruiskutetaan lauhdetta, jota jäähdytetään lämmönvaihtimin. Kierrossa olevan lauhteen määrä on huomattavan suuri verrattuna tuotantovirtaamaan. Lauhtumattomat orgaaniset kaasut viedän lauhdutustorinista

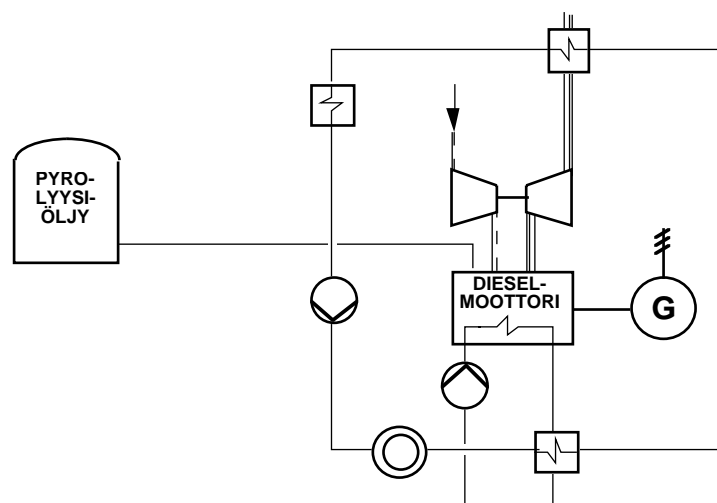
kattilaan, jossa niiden avulla tuotetaan polttoaineen kuivaamiseen tarvittava lämpö. Raakaöljy saatetaan kemialliseen tasapainoon katalyytin avulla, suodatetaan ja varastoidaan. Kuvassa 4.3 on esitetty pyrolyysiprosessi sekä öljyn katalyyttikäsittely pääpiirteissään (Beckman, D., et al 1990).



Kuva 4.3. Pyrolyysiöljyn valmistus ilmanpaineisessa flash-pyrolyysi prosessissa.

Prosessi kokonaisuudessaan on sängen monimutkainen, sitä tuskin voidaan ajatella rakennettavaksi sahan yhteyteen.

Pyrolyysiöljyä ja kaasutuskaasua käyttävissä dieselmoottoreissa ei ole periaatteellista eroa. Molemmille polttoaineille ruiskutus on asetettava erikseen, koska polttoaineiden palamis- ja korroosio-ominaisuudet ovat erilaiset. Polttoaineiden korroosiovaikutusten takia moottoreihin on tehtävä materiaali muutoksia, fossiilisille polttoaineille suunniteltuja koneita ei voida käyttää sellaisenaan. Wärtsilä Diesel kehittää pyrolyysiöljylle sopivaa moottoria.



Kuva 4.4. Pyrolyysiöljyä käyttävän dieselvoimalaitoksen periaatekaavio.

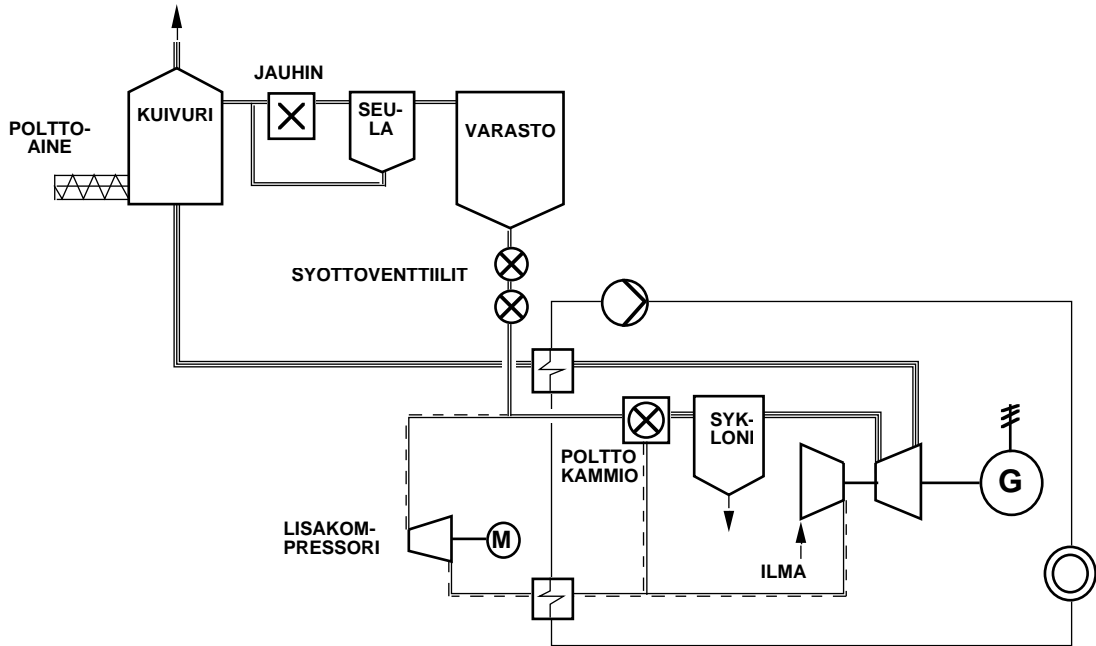
Kaupallista pyrolyysiöljy-dieselvoimalaa ei ole toteutettu. Ongelmat moottorissa liittyvät lähinnä korroosioon, mutta voimalan edellytyksenä on myös öljyn tuotanto riittävän suuressa mittakaavassa. Toistaiseksi on todettu ettei tuotetun öljyn hintaa saada kilpailukykyiseksi, vaikka suuren mittakaavan laitoksessa ei teknisiä ongelmia olisikaan. Pyrolyysiöljy-dieselvoimala ei vaadi pitkälle koulutettua henkilökuntaa mutta lämpökuorman suhteen se edellyttäisi vähintään 150 000 m³ sahaa. Edelleen, sivutuotteiden käyttö tai kuljetus kaasutukseen voisi tuottaa ongelmia.

4.2.4 Paineistettu puupölypoltto

Amerikkalaisen PGI (Power Generating Inc.) -yhtiö on kehittänyt paineistettuun puupölyn polttoon ja kaasuturpiiniin perustuvan prosessin. Siinä hienoksi jauhettu ja kuivattu puu poltetaan paineistetussa kammiossa, tuhka erotetaan kaasuista ja kaasut johdetaan 800-1 000 °C lämpötilassa turpiiniin. Turpiini käyttää kompressoria ja generaattoria. Jätelämmöllä lämmitetään kaukolämpövettä ja kuivataan polttoainetta. Koska turpiinista tulevat kaasut ovat vielä n. 400 °C lämpötilassa voidaan niillä edelleen tuottaa myös höyryä ja käyttää höyryturpiinia lisäsähkön tuotantoon. Prosessilla päästään noin 22 %:n sähköntuotanto- ja noin 70 %:n kokonaishyötysuhteeseen. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus on ollut mukana kehitystyössä ja tekniikkaa on suunniteltu tuotavaksi myös Suomeen.

Kehitystyön tavoitteena on tuottaa prosessiin perustuvia pienikokoisia moduleita, joiden sähköteho olisi 500 kW-3,5 MW. Tavoitteena on myös ollut käyttää tavanomaisia komponentteja laitteiston toteutuksessa, missä onkin onnistuttu. Syöttöventtiilit ovat vaatineet erityistä kehittelyä, niiden on jatkuvatoimisesti kyettävä syöttämään kiinteää polttoainetta paineistettuun ympäristöön ilman vuotoja. Toinen tärkeä alue on ollut turpiinin korkeapainepään eroosion ja korroosion vähentäminen sekä eroosiota aiheuttavien hiukkasten tehokas poisto ja sulamisen sekä kasautumisen esto. Tutkimukset on tehty lähinnä kuorettomalle puulle, jotta ensimmäiset tulokset olisivat laajalti hyödynnettävissä (McCarroll & Partanen 1993).

Tekniikan eräs etu on ettei se tarvitse vettä, eikä siis tuota jätevesiä. Laitteisto on myös suhteellisen kevyt tehoonsa nähden. Alustavin laskelmin on todettu että sähköntuotantokulu kokoluokassa alle 5 MWe jää alemmaksi kuin höyryturpiini- tai dieselratkaisuilla. Prosessi näyttää siis lupaavalta, vaikka tutkimukset on tähän mennessä tehty vain yhden tyyppiselle polttoaineelle. Sahalle prosessi voisi tuottaa n. 8 MW:n lämpötehon, mikä edellyttää n. 200 000 m³:n vuosituotantoa. Pienempiinkin kokoluokkiin voi olla mahdollista päästä, kaupallisessa käytössä pölypolttoturpiineja ei liene vielä missään.

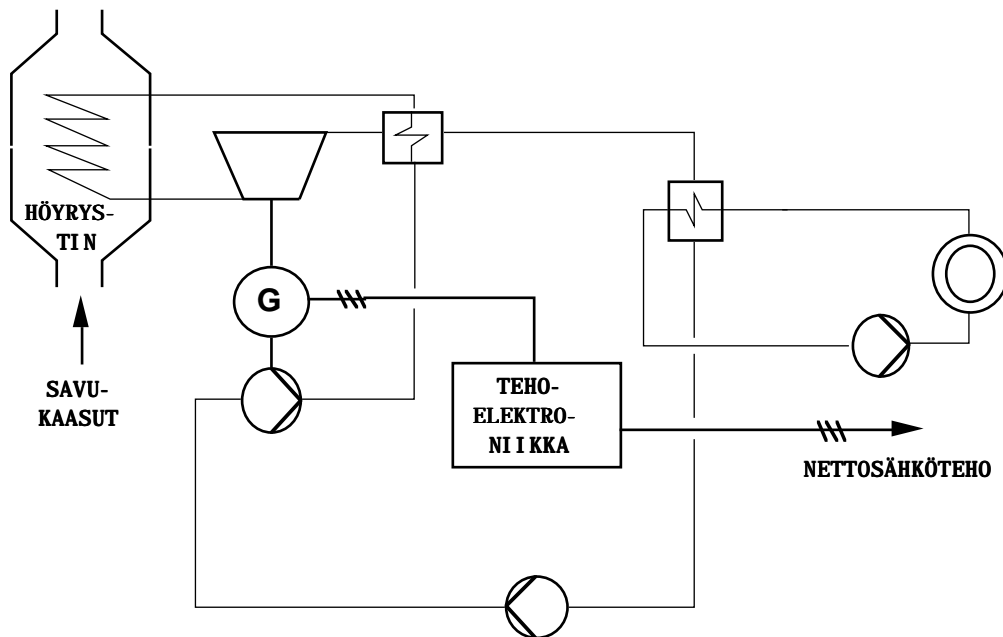


Kuva 4.5. Yhdysvalloissa kehitetyn pölypoltturpiinin periaatekaavio. Vähätuhkainen kiinteä polttoaine poltetaan ja hiukkaset erotetaan ennen kaasujen syöttöä kaasuturpiiniin.

4.2.5 ORC-energiamuunnin

ORC-prosessin (Organic Rankine Cycle) periaate on sama kuin konventionaalisen höyryvoimalan. Kiertoaaineena käytetään veden sijasta lämmönlähteen mukaan valittua orgaanista väliainetta, esim. tolueenia. Orgaanisen väliaineen ominaisuuksien ansiosta voidaan hyödyntää matalampia lämpötiloja, saavuttaa kompakti laitosrakenne ja parempi hyötysuhde.

Väliaine höyrystyy höyrystimessä 500-800 °C kuumilla savukaasuilla. Höyry ohjataan suurnopeusturpiiniin jossa se paisuu ja pyörittää samalla akselilla olevaa generaattoria ja syöttöpumppua. Ominaista ORC-prosessille on turpiinin suuri pyörimisnopeus. Uusimmissa moduleissa kukin roottori sisältää kaikki keskeiset osat: turpiinin, generaattorin ja syöttöpumpun. Roottori on hermeettisesti suljettu ja laakeroitu kiertoaineella. Generaattorin korkeataajuinen sähkö muunnetaan taajuusmuuttajilla sopivaksi sähköverkkoon. Väliaine lauhtuu ja lämmittää kaukolämpöä lauhduttimessa, josta syöttöpumppu siirtää sen jälleen höyrystimeen (KTM 1995).



Kuva 4.6. ORC-energiamuuntimen periaate. Kiertoaineena toimii veden sijasta orgaaninen yhdiste.

Suunniteltaessa kiinteän polttoaineen kattila alusta alkaen ORC-energiamuunninta ajatellen, voidaan päästä rakennusasteeseen 0,35. Tällöin esim. 3 MW:n kaukolämpökuormaa vastaisi 1 MW:n sähköteho. Jo noin 60 000 m³ vuodessa sahaavilla sahoilla saavutetaan 3 MW:n jatkuva lämpökuorma. Yhdellä 250 kW:n ORC-moduulilla voidaan hyödyntää jopa 1,5 MW:n lämpökuorma sähköntuotantoon, vastaten sahalla siis n. 30 000 m³:n vuosituotantoa. Investointikulu tässä kokoluokassa sähkötehoon suhteutettuna on n. 14 000 mk/kW, useampaa 250 kW:n yksikköä käytettäessä se pienenee lähes puoleen. Mikäli ORC-energiamuunnin asennetaan olemassaolevaan kattilaan jää rakennusaste pienemmäksi. Tällaisia muutosrakentamiskohteita arvioidaan Suomessa olevan useita kymmeniä, erityisesti sahoilla (KTM 1995).

4.3 Yhteenveto

Kehittynein esitellyistä yhdistetyistä lämmön ja sähköntuotannon prosesseista on pienvoimalaitos. Niitä on rakennettu lukuisia. Vaikka minimikoko on jatkuvasti pienentynyt, sen lämpöteho tulisi saada alle 10 MW:n, jotta käyttöpotentiaali laajenisi. ORC-prosessi on lupaava tekniikka. Se soveltuu keskisuurille sahoille ja on sarjatuotantona valmistettavina automaattisina moduleina edullinen. Näiden kahden etuna ja yksinkertaistavana tekijänä on, ettei niihin liity polttoaineen monimutkaista prosessointia. Dieseleissä sekä pölypolttoturpiinissa polttoaineen käsittely tulee väistämättä vaatimaan enemmän.

Muiden kuin pienvoimalatekniikan läpimurtoon vaikuttaa tässä vaiheessa ratkaisevasti pilot-laitosten rakentaminen. ORC-prosessilla tämä lienee hyvin lähellä (Tekniikka & talous 1996). Kun puhutaan kehittyvästä tekniikan osa-alueesta, on mahdollista että pe-

rusteiltaan uusia tekniikoita syntyy edelleen. Tällainen voisi olla esim. stirling-prosessiin pohjautuva bioenergiavoimala.

5. SAHALAITOKSEN ENERGIANHANKINNAN MALLI

5.1 Mallin tavoitteet ja periaatteet

Mallin tarkoituksena on arvioida sahateollisuuslaitoksen tuotannon määrästä lähtien tuotannossa tarvittavat sähkö- ja lämpöenergiapanokset ja niiden hinta. Saman lämpöenergiamäärän tuottamiseksi vertaillaan eri tekniikoihin perustuvia vaihtoehtoja. Tuotannosta voidaan myös arvioida syntyvien sivutuotteiden määrät. Kun laskentaan otetaan mukaan sivutuotteiden ominaisuudet ja raaka-ainearvo, voidaan arvioida niiden riittävyys ja arvo polttoainekäytössä. Jos laitoksen lämpökuorma on riittävän suuri ja vakaa, syntyy mahdollisuus tuottaa sähköä ja lämpöä uusilla, pienen kokoluokan yhdistetyillä prosesseilla biopolttoaineita käyttäen.

Malli on rakennettu Excel 5.0 -taulukkolaskentaohjelmalla. Käytännössä malli koostuu tiedostosta SAHAMAL.XLS, mutta siihen liittyvän PROSDATA.XLS-tiedoston kautta on helpompi päivittää investointikustannuksia. Mallin tärkeimmät sivut ovat liitteessä 3.

Malli toimii sahakokoluokissa 10 000-360 000 m³/a, mutta parhaiten kokoluokissa n. 20 000-300 000 m³/a. Pienillä sahoilla energiankäyttö ei ole mallin mukainen, suurilla sahoilla taas mallin periaate kahdesta lämmöntuottoprosessista ei välttämättä enää toimi.

5.1.1 Mitoituksen ja investointikulun arviointi

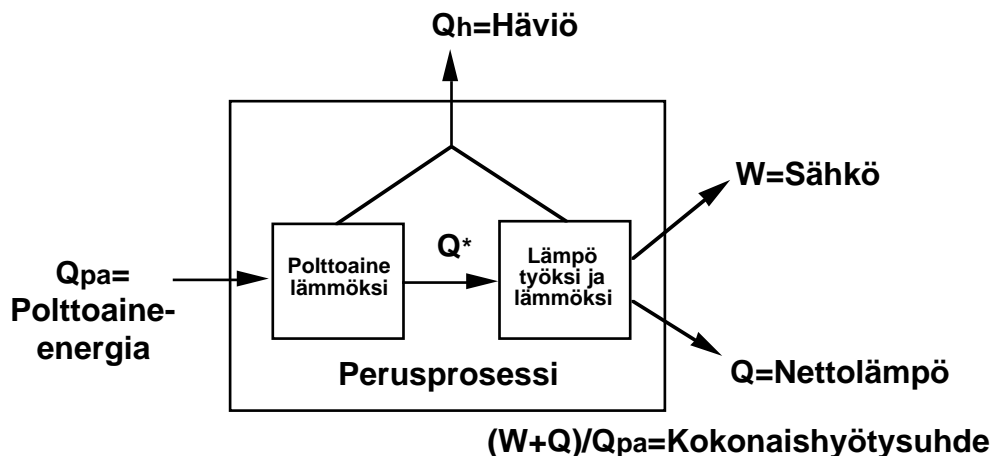
Sahan lämpökuorman pysyvyysskäyrä on lämmöntuotantokapasiteetin mitoituksen perusta. Malli käyttää suhteellista pysyvyysskäyrää, jota arvioidaan paloittain suorilla. Jos halutaan käyttää todellisen sahan pysyvyysskäyrää, on se ensin muutettava suhteelliseksi. Malli olettaa pysyvyyden olevan samaa muotoa kaikissa sahakokoluokissa, mutta käyttäjä voi muuttaa sitä kokoluokkaa vastaavaksi.

Pysyvyysskäyrää voidaan arvioida esim. seuraavat seikat huomioiden:

- keskimääräinen tehontarve n. 250 kW/5 000 m³
- huipputeho n. 1,5-2,0ertainen keskiarvoon verrattuna (mm. Salminen 1964 ja Esping 1977)
- talvella tehontarve n. 1,2ertainen verrattuna kesään
- sahan kuivaamotyypit: kamari, kanava
- varateho ja sesonki

Kamarikuivaamon tehontarve vaihtelee suuresti kuivauksen eri vaiheissa, kun taas kanavatyyppisen kuivaamon tehontarve on tasainen. Jos sahalla on molempia kuivaamotyyppisiä on lämpökuorma varsin tasainen ja vaihtelu aiheutuu kuivaamopakettien vaihtojen ajoituksesta. Isommilla sahoilla on yleensä molempia kuivaamotyyppisiä sekä useampia kattiloita. Kapasiteetin joustoa tarvitaan myös tuotantomäärän muuttuessa.

Lämpö ajatellaan tuotettavaksi lämpövoimakoneella eli perusprosessilla (kuva 4.1). Kun sähköä ei tuoteta se yksinkertaistuu pelkäksi kattilaksi, eli polttoaine lämmöksi -osaprosessiksi. Sahan lämmöntarve pyritään mahdollisimman suurelta osin kattamaan edullisella peruskuormaa ajavalla voimalaprosessilla. Sen huippukäyttöajan tulee olla suuri, mutta ei enempää kuin kuivauksen käyttöaika. Huippukuorma katetaan kaikissa tapauksissa raskasöljykattilalla, jonka käyttöaika pyritään puolestaan minimoimaan. Malli olettaa huippukattilaa tarvittavan aina.



Kuva 5.1. Lämpövoimakoneen periaate. Sahan kamalalta on oleellisinta tuottaa tarvittava nettolämpö luotettavasti ja edullisesti. Sähköteho voi yhtä hyvin supistua noltaan, jolloin koko prosessi yksinkertaistuu. Rakennusaste voi toisaalta olla miten pieni tahansa, koska lämpö on joka tapauksessa prosessin päätuote.

Investointikustannukset riippuvat suoraan perusprosessin ja huippukattilan koosta ja mitoitus vaikuttaa niiden suhteeseen. Investointikulut eri kokoluokissa on arvioitu ja laskettu erikseen tai käytetty tietoja VTT:n muista tutkimuksista. Kokoluokka määräytyy mallissa aina prosessin lämpötehon mukaan.

5.1.2 Muuttuvien kulujen arviointi

Lämmöntuotannon muuttuvat kulut muodostuvat polttoaineen hinnasta, omakäyttösähköstä, ym. pienemmistä kustannuksista. Tarvittavan vuotuisen lämpöenergiämäärän arvio perustuu sahan keskimääräiseen ominaislämmönkulutukseen. Tämä taas riippuu sahan tuotantorakenteesta, eri dimensioiden määristä ja kuivausasteesta. Energiämäärään vaikuttavat myös ulkoilman lämpötila ja kosteus. Koska mallin tavoitteena on eri energiantuotantotapojen vertailu ei energiamäärän laskemista näistä tekijöistä lähtien katsottu tarpeelliseksi. Ne voidaan ottaa huomioon pysyvyyssäyrässä.

Eri polttoaineiden hintaan saha ei voi juuri vaikuttaa. Sen sijaan sivutuotteiden arvo laitokselle riippuu vaihtoehtoisista käyttötavoista ja arvostuksesta. Esimerkiksi kuoren hävittäminen saattaa todellisuudessa aiheuttaa kustannuksia, mikäli sitä ei voida polttaa. Sivutuotteille annetaan arvo, jota käytetään kustannuksena tai tulona riippuen siitä myydäänkö sivutuote vai käytetäänkö se polttoaineena osittain tai kokonaan. Oletetaan siis että sivutuotteet voidaan aina joko myydä, hävittää tai polttaa, sekä että niitä voidaan tarvittaessa ostaa lisää. Jos sivutuotteelle ei anneta arvoa, ei kuitenkaan voi olettaa

että sitä voidaan hankkia ilmaiseksi lisää. Hävittäminen ei mallissa aiheuta kustannuksia.

5.2 Mallin toiminta ja käyttö kohdittain

Seuraavassa esitellään mallin yksityiskohtainen rakenne, muuttujat ja toiminta kohta kohdalta. Toiminnan tunteminen on käyttäjälle tärkeää mikäli mallin muuttujia halutaan vaihtaa tai kehittää mallia edelleen.

Kaikki lähtöarvot mallissa on alleviivattu ja niitä voi muuttaa. Ne eivät siis periaatteessa riipu muista arvoista mitenkään. Muut arvot saadaan laskentakaavojen perusteella. Ne, sekä tietyt lähtöarvot jotka käytännössä ovat vakioita, on lukittu jottei niitä muutettaisi vahingossa.

5.2.1 Lähtöarvojen syöttö

Käyttäjä syöttää laskentataulukkoon alleviivattujen lukujen arvot, mikäli niitä on tarve muuttaa. Tuotannon määrästä lasketaan aluksi sivutuotteiden määrät ja ominaisenergiankulutuslukujen avulla arvio tuotannon saavuttamiseksi tarvittavan vuotuisen sähkö- ja lämpöenergian määrästä. Sivutuotteiden arvo sahalle lasketaan kun tiedetään niistä saatava hinta kuiva-ainetonnia kohden. Huomattava on että kuiva-ainehinnasta riippuu myös sivutuotteen polttoainehinta toisin kuin muilla polttoaineilla, jotka ostetaan aina kokonaan.

Sähkö- ja lämpöenergian kokonaiskulutus lasketaan seuraavasti:

$$w = e_c N \quad \text{ja} \quad q_h = e_h N, \quad (1.)$$

missä w on tarvittava sähköenergia, q_h tarvittava lämpöenergia, e_c ja e_h sähkön ja lämmön ominaiskulutukset ja N tuotettu sahatavaramäärä vuodessa [m^3/a].

Muihin peruslähtötietoihin kuuluu arvio huippulämpötehon tarpeesta. Se lasketaan huipputehon mitoituskerroimen avulla seuraavasti:

$$p = \frac{kq_h + q_k}{T_h}, \quad (2.)$$

missä p on tarvittava huipputeho, k huipputehon mitoituskerroin, q_h tarvittava kuivauslämpöenergia, q_k myytävä kaukolämpö ja T_h kuivauksen käyntiaika.

Mitoitukseen vaikuttaa kaukolämmön myynti, jota katsotaan tapahtuvan aina tasaisella teholla kuivaamojen toimiessa. Käyttäjä antaa vuosittain myytävän kaukolämmön. Tuotettavalle lämpöenergialle käyttäjä voi antaa muun kuin mallin ehdottaman arvon.

Tarvittava lämmöntuotanto on siis yhteensä:

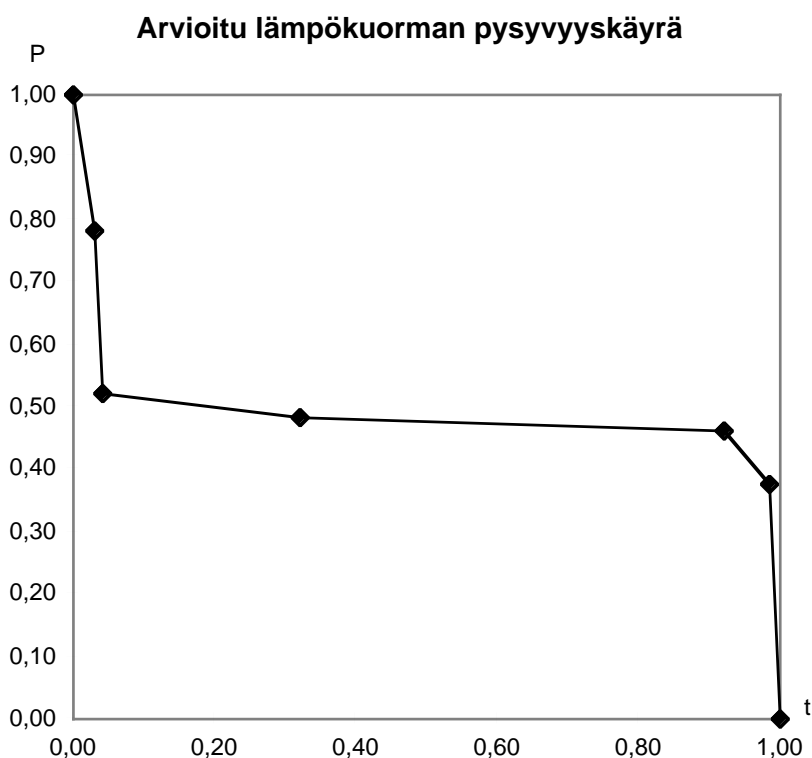
$$q = q_h + q_k \quad (3.)$$

Sahauksen ja kuivauksen käyntiajat vaikuttavat ratkaisevasti mallin toimintaan. Kuivauksen käyntiaika on samalla perusprosessin enimmäishuipunkäyttöaika. Oletetaan myös että ostosähkön päivähinta on voimassa sahauksen käyntiaikana ja yöhinta kuivauksen käyntiaikana.

5.2.2 Vakiolähtöarvot

Kohdassa 2.0 vakiolähtöarvot, sahalaitoksen sähkö- ja lämpöenergian kulutuksen jakautuminen osaprosesseihin syötetään prosentiosuuksina. Käyttäjän on huolehdittava, että osuuksien kokonaissumma on aina 100 %. Osuuksia ei yleensä ole tarpeen muuttaa. Sähköenergian osuuksista tärkein on kuivaus, sillä se määrää sahan tarvitseman sähkötehon yöaikaan. Lämpöenergian käytön jakautumisella ei ole laskennan kannalta merkitystä, lämpökuorman ajatellaan olevan suunnilleen vakio vuorokauden ympäri.

Tärkeimmät sahan lämpöenergiantarpeesta kertovat suureet, keskiarvoteho ja huipputeho, syötetään suhteellisen pysyvyyskäyrän avulla (kuva 5.2). Pysyvyyskäyrän syöttö tapahtuu pisteittäin, $(p_1, t_1), (p_2, t_2) \dots (p_i, t_i)$, todellista pysyvyyskäyrää aproksimoidaan siis suorilla. Näistä lasketaan lämpöenergian kertymä (kuva 5.3), joka kertoo pysyvyyskäyrän rajaaman pinta-alan tehon funktiona. Pysyvyyskäyrä syötetään eri lomakkeella kuin laskentamallin arvot (Liite 4.).



Kuva 5.2. Sahan lämpötehon suhteellinen pysyvyyskäyrä. Kun $t=1$ on päästy kuivauksen käyntiaikaan, kun $P=1$ on taas teho huipussaan. Kuvion avulla lasketaan lämpöenergian kertymä kullakin teholla.

Pysyvyyskäyrää seuraavalle suoralle muodostetaan yhtälö:

$$P^{\circ}(t^{\circ}) = \frac{(P_{n+1}^{\circ} - P_n^{\circ})}{(t_{n+1}^{\circ} - t_n^{\circ})} t^{\circ} + \left[P_{n+1}^{\circ} - \frac{(P_{n+1}^{\circ} - P_n^{\circ})}{(t_{n+1}^{\circ} - t_n^{\circ})} t_{n+1}^{\circ} \right] \quad (4)$$

Kunkin välin energia, eli ala, on:

$$E_n^{\circ} = (P_{n+1}^{\circ} - P_n^{\circ}) t_{n+1}^{\circ} + \frac{1}{2} [t_n^{\circ} - t_{n+1}^{\circ}] [(P_{n+1}^{\circ} - P_n^{\circ})], \quad (5)$$

jolloin koko tuotettu energiamäärä on alojen summa:

$$E_{tot}^{\circ} = \sum_{n=1}^{n=k} E_n^{\circ} \quad (6.)$$

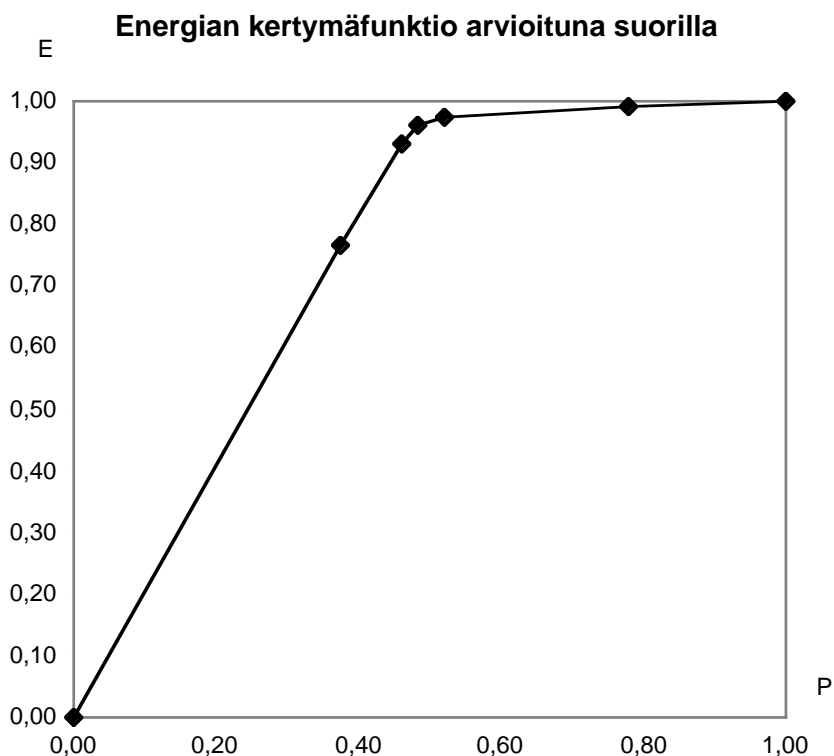
Ratkaistaan yhtälöstä $t_i^{\circ}(P^{\circ})$:

$$t_i^{\circ}(P^{\circ}) = \left[P^{\circ} - \left(P_{n+1}^{\circ} - \frac{(P_{n+1}^{\circ} - P_n^{\circ})}{(t_{n+1}^{\circ} - t_n^{\circ})} t_{n+1}^{\circ} \right) \right] / \frac{(P_{n+1}^{\circ} - P_n^{\circ})}{(t_{n+1}^{\circ} - t_n^{\circ})}. \quad (7.)$$

Energian kertymäfunktion arvo on kullakin välillä $P_n^{\circ} \leq P^{\circ} < P_{n+1}^{\circ}$:

$$E^{\circ}(P^{\circ}) = \sum_{n=1}^k E_n^{\circ} + (P^{\circ} - P_n^{\circ}) t_i^{\circ}(P^{\circ}) + \frac{1}{2} [t_n^{\circ} - t_i^{\circ}(P^{\circ})] [P^{\circ} - P_n^{\circ}] \quad (8.)$$

Kertymäfunktio on tarkka integraali pysyvyyskäyrästä. Ainoa virhe syntyy siis todellisen pysyvyyskäyrän aproksimoinnista suorilla. Malli arvioi pysyvyyskäyrää kuudessa osassa. Käyttäjä antaa P° :n, joka on perusprosessin tehon osuus huipputehosta. Kohtaa P° edeltävät energiaosuudet lasketaan yhteen kaavan 8 mukaisesti.



Kuva 5.3. Energian kertymäfunktio, eli integraali pysyvyyskäyrästä, aproksimoituna suorilla. Laskentaan käytetään tarkkaa pysyvyyskäyrän paloittain integrointia. Kertymä ilmoittaa mikä osuus energiasta kullakin teholla voidaan tuottaa.

Sivutuotteiden energiasisältö

Kostean puun ja kuoren tehollinen lämpöarvo voidaan laskea kaavalla (Kaivola 1979):

$$q_i = (1 - w_v) q_k - 2,443 w_v, \quad (9.)$$

missä q_k on kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo [MJ/kg] ja w_v vesipitoisuus.

Teholliselle lämpöarvolle irtokuutiometriä kohden on kaava (Kaivola 1979):

$$Q_i = \frac{1}{1 - w_v} \rho_{ki} q_i, \quad (10.)$$

missä ρ_{ki} on kuiva-tuoreirtotiheys eli kuivapaino [kg/i-m³].

Sijoittamalla yhtälö 9 yhtälöön 10, sekä sieventämällä, saadaan laskentakaava joka antaa irtokuutiometrin tehollisen energiasisällön megajouleina:

$$Q_i = \rho_{ki} \left[q_{ik} - \frac{1}{1 - w_v} 2,443 w_v \right] \quad (11.)$$

Polttoaineesta on siis mitattava tai muuten määritettävä kuiva-tuoreirtotiheys, joka riippuu partikkelikoosta sekä vesipitoisuus. Vesipitoisuuden sijaan voidaan käyttää arvoa $1 - w_k$, missä w_k on kuiva-ainepitoisuus. q_{ik} vaihtelee eri polttoaineilla, mutta on suunnilleen vakio kullekin puulajille ja polttoaineelle, arvo saadaan taulukoista. Keskimääräisen kuivapainon määrittäminen suurelle polttoainemäärälle sen sijaan on hankalaa. Mallissa oletetaan sahattavan pelkkää mäntyä.

Kun sivutuotteista saatava energiamäärä on laskettu, sitä käytetään omavaraisuuden ja käyttöasteen arviointiin niissä prosessivaihtoehdoissa, joissa sivutuotteen käyttö polttoaineena on mahdollista. Selluhaketta ei käytetä polttoainevaihtoehtona koska oletetaan että se myydään aina raaka-aineksi. Hakkeelle lasketaan vain viitteellinen hinta polttoainekäytössä.

Polttoaineena käytettävän sivutuotteen hinnalle [mk/MWh] saadaan seuraava riippuvuus:

$$H_{pa} = \frac{\rho_{ki} h_{pa} 3,6}{1000 Q_i}, \quad (12.)$$

missä h_{pa} on sivutuotteen arvo sahalla eli kuiva-ainehinta [mk/t k.a.].

5.2.3 Energiantuotannon vakiotiedot

Kohdasta 3.0 eteenpäin malli jakautuu prosessikohtaisiin sarakkeisiin, jotka ovat kaavoiltaan identtisiä ja toimivat itsenäisesti. Polttoaineita voidaan käyttää eri suhteissa. Annettaessa polttoaineiden osuuksia on pidettävä huolta että niiden summa on 100 %. Prosessin polttoainetta voi myös vaihtaa tekniikan ja annettujen polttoainevaihtoehtojen rajoissa. Polttoaineen nimi toimii poimintakriteerinä polttoaineen hinnalle joten muita kuin ennalta määrättyjä polttoaineita ei voi käyttää. Uusia polttoaineita ja niiden hintoja on mahdollista lisätä.

Todellisuudessa lämmöntuotantoprosessi on valittava markkinoilla olevien tehovaihtoehtojen joukosta. Mallissa tämä valinta toteutetaan keräämällä tehovaihtoehdot ja niihin liittyvät, kokoluokasta riippuvat tiedot listoihin, joista poimitaan kutakin mitoituslämpötehoa vastaava seuraavaksi suurempi nimellisteho ja siihen liittyvät muut tiedot.

Oletetaan että teholuokasta riippuvia tietoja ovat:

- laiteinvestoinnit
- rakennustekniset investoinnit
- kokonaishyötysuhde
- henkilötyön tarve.

Poimintajärjestely mahdollistaa markkinoilla olevien todellisten prosessien tietojen tai arvioitujen tietojen käytön laskennassa. Investointien riippuvuutta kokoluokasta ei ole tarpeen määrittää jos käytettävissä on riittävän tiheästi esimerkkitapauksia.

Teholuokasta mahdollisesti riippuvia tietoja voivat olla:

- sähköteho
- suunnittelukulut
- huoltokustannukset
- ylläpitokulut
- vakuutus-, varaus-, ym. kulut
- omakäyttösähkön tarve.

Näistä sähköteho lasketaan rakennussuhteen avulla, jonka katsotaan siis riippuvan vain tekniikasta muttei kokoluokasta:

$$P_c = r P_{pr}^* , \quad (13.)$$

missä r on rakennusaste ja P_{pr}^* perusprosessin nettolämpöteho (nimellisteho).

Muiden katsotaan olevan niin vähämerkityksellisiä, että ne voidaan laskea osuutena laite-, tai rakennusinvestoinneista tai, kuten omakäyttösähkön tapauksessa, polttoaineen käytön kautta.

Jokaisesta laitostyyppistä poimitaan esille lämpötehon minimi- ja maksimivaihtoehdot. Mikäli sahan tuotanto on niin suuri, ettei maksimitehovaihtoehto riitä, on sarakkeessa tuloksena virhe. Mikäli sahan tarve on hyvin pieni, saattaa pieninkin tehovaihtoehto olla ylimitoitettu. Teknisesti se ei ole virhe, mutta tuottaa kannattamattoman ratkaisun, mikä näkyy lyhyenä huipunkäyttöaikana ja kalliina energiana. Mallin suorittaman valinnan pätevyyttä voi arvioida tarkkailemalla mikä on tavoitemitoitustehon ja todellisen lämpötehon välinen ero: $P_{pr}^* - P_{pr}$. Mikäli pyörästysvirhe on arveluttavan suuri kannattaa teholuokkia ja varsinkin välikokoja lisätä.

Huippukattilan valinta suoritetaan perusprosessin valinnan jälkeen:

$$P_{hu} = P - P_{pr}^* \quad (14.)$$

Kun P_{hu} on selvillä, valitaan myös siitä seuraavaksi suurin POR-kattilakoko: $P_{hu}^* = P_{hu} + \Delta P_{hu}$, joten kokonaisuudessa lievää ylimitoitusta tapahtuu vain kerran: $P^* = P_{pr}^* + P_{hu} + \Delta P_{hu}$. P^* on nimellinen huipputeho ja ΔP_{hu} huippukattilan ylöspäin tapahtuva pyörästysvirhe.

Polttoaineteho ja -energia lasketaan kokonaishyötysuhteen avulla:

$$P_{prpa} = \frac{P_{pr}^*}{\eta_{pr}}, E_{prpa} = P_{prpa} T_{pr}, \quad (15.)$$

jolloin sähköntuotantoon tarvittava polttoaine-energia tulee huomioiduksi. Vastaavasti huippukattilalle.

Muut perusprosessin tiedot

Huippulämpötehon mitoituskerroin k kertoo mikä on sahalla tarvittava huippulämpöteho suhteessa keskimääräiseen suhteelliseen tehoon \bar{P}^{C} (yhtälö 16.). k kuvaa siis pysyvyyskäyrän (kuva 5.2) huipun korkeutta ja se voidaan laskea pysyvyyskäyrästä. Kerroin on yleensä 1,5-2,5. Se ei vaikuta suuresti investointikuluihin, koska tilapäinen huippulämmön tuotanto keskitetään edulliselle raskasöljykattilalle. Kahdella esimerkkisahalla mitoituskerroin oli 2,4 ja 2,8, tosin samaan aikaan näiden sahojen tuotanto oli vähäisempi.

$$k = \frac{1}{P^{\text{C}}} = \frac{P}{P} \quad (16.)$$

Suhteellinen keskiarvoteho \bar{P}^{C} lasketaan pysyvyyskäyrästä energially painotettuna keskiarvona:

$$\bar{P}^{\text{C}} = \frac{\sum_{n=1}^k \left(\frac{P_n^{\text{C}} + P_{n+1}^{\text{C}}}{2} \right)^2 (t_n^{\text{C}} - t_{n+1}^{\text{C}})}{\sum_{n=1}^k \left(\frac{P_n^{\text{C}} + P_{n+1}^{\text{C}}}{2} \right) (t_n^{\text{C}} - t_{n+1}^{\text{C}})} \quad (17.)$$

Perusprosessin tehon osuus huipputehosta määrittää perusprosessin ja huippukattilan välisen mitoituksen. Mitoitus on keskeinen ongelma investointikulujen ja lämmöntuotannon kannattavuuden kannalta. Perusprosessille on saatava mahdollisimman pitkä huipunkäyttöaika, enintään sama kuin kuivauksen toiminta-aika. Eli se pyritään mitoittamaan sopivan pieneksi. Toisaalta, perusprosessilla tulisi tuottaa mahdollisimman suuri osa tarvittavasta energiasta, jotta kalliimpaa polttoainetta käyttävää huippukattilaa tarvittaisiin mahdollisimman vähän. Eli se pyritään mitoittamaan sopivan suureksi. Liian suuri perusprosessi ei myöskään voi olla, koska siihen ei kannata turhaan investoida. Lisäksi osakuormalla ajo voi alentaa hyötysuhdetta ja johtaa vähentyneeseen sähköntuotantoon.

Perusprosessin ja huippukattilan välisessä mitoituksessa pyritään toteuttamaan:

$$P = P_{pr}^* + P_{hu} = k \bar{P} = k \frac{Q}{T_h} \quad (18.)$$

missä P_{pr}^* on perusprosessin nimellislämpöteho ja P_{hu} huippukattilan tavoitelämpöteho.

Tällöin

$$P_{pr} = P^{\text{C}} + \frac{Q_k}{T_h} \text{ ja} \quad (19.)$$

$$P_{hu} = P - P_{pr}^* = P (1 - P^{\text{C}}) - \frac{Q_k}{T_h}. \quad (20.)$$

Kaukolämpöteho tuotetaan siis aina perusprosessilla. Tavoitelämpötehojen P_{pr} ja P_{hu} kautta siirrytään käyttämään todellisia nimellistehoja P_{pr}^* ja P_{hu}^* . Perusprosessin tehon osuutta asetettaessa kannattaa tarkkailla mikä osuus energiasta sillä voidaan tuottaa, ja

mikä tulee olemaan huipunkäyttöaika. Energiaosuuden $E_{(P)}$ laskenta tapahtuu alempana kohdassa 7.0 apulaskenta kaavojen 4-8 mukaisesti.

Perusprosessin ja huippukattilan huipunkäyttöajat lasketaan seuraavasti:

$$T_{pr} = \frac{E_{pr}}{P_{pr}} \text{ ja } T_{hu} = \frac{E_{hu}}{P_{hu}} \quad (21.)$$

Henkilötyövuosien tarve poimitaan listoilta valitun prosessin kokoluokan mukaan. Laskentakorkoa ja -aikaa käytetään investointikulujen laskentaan alempana. Sähkön osto- ja myyntihintojen avulla lasketaan sähkönkäytön kustannukset tai tulot, päivä- ja yöaikaan, olettaen että sahaus toimii aina päiväsaikalla. Kaukolämmön myyntihinta määrää kaukolämmöstä saatavan tulon.

Lisäkulujen osuus investoinneista

Oletetaan että suunnittelu-, työmaa- ja yleiskustannukset, varaukset sekä huolto- ja vaikutuskustannukset voidaan laskea osuutena joko laite- tai rakennusinvestoinneista. Omakäyttösähkön tarve ja muut muuttuvat kustannukset lasketaan osuutena polttoaineen käytöstä. Lisäkulujen vaikutuksen yksittäisen prosessin osalta voi luonnollisesti poistaa merkitsemällä osuuden nolllaksi ja tarkentamalla poimintalistojen tietoja eri kokoluokissa.

Polttoaineet ja niiden hinnat

Kohtaan pottoaine voidaan syöttää vaihtoehtoisten polttoaineiden nimikkeet ja niiden hinnat. Nimikkeen avulla sen alapuolelta poimitaan hinnat pääpolttoaineille 1 ja 2 sekä käynnistys-, tuki- ja varapoltttoaineelle, kunkin prosessin kohdalle.

Polttoaineosuuksien u_1, u_2, u_3 avulla lasketaan kutakin polttoainetta tarvittava määrä:

$$E_{pa1} = u_1 E_{ppa}, \quad E_{pa2} = u_2 E_{ppa} \quad \text{ja} \quad E_{pa3} = u_3 E_{ppa}.$$

Mikäli jompi kumpi pääpolttoaine on omaa sivutuotetta, sen käytettävissä oleva enimmäismäärä ilmoitetaan. Määrän avulla lasketaan enimmäisomavaraisuus ao. polttoaineessa. Jos polttoaineosuus on suurempi kuin enimmäisomavaraisuus, sitä joudutaan ostamaan, jos taas pienempi, nousee todellinen omavaraisuus yli 100 %:n. Enimmäisomavaraisuutta voidaan käyttää etsittäessä sopivia polttoaineosuuksia niin, että sivutuotteet tulevat käytetyksi kokonaan tai halutulta osin. Polttoaineen käyttöaste on tässä myös hyödyksi.

Huippu- ja varakattilan tiedot

Huippukattilana käytetään raskasta polttoöljyä (POR) käytävää kuumavesikattilaa, joka mitoitetaan perusprosessin kokoluokan valinnan jälkeen (kaava 14.). Huippukattilan tiedot ovat samat kuin eräänä perusprosessivaihtoehtona olevan raskasöljykattilan. Polttoainetta ei voi huippukattilalle vaihtaa, sen sijaan sen laskentakorko tai pitoaika voidaan valita riippumatta perusprosessista. Huippukattilaksi valitaan kaikissa tilanteissa aina vähintään pienin vaihtoehto.

Sähkötase

Sähkötaseeseen lasketaan sahauskassa ja kuivauksessa tarvittava sähköenergia ja keskimääräinen teho:

$$w_{eh} = v_{eh} w \text{ ja } w_{es} = w - w_{eh}, \quad (22.)$$

missä v_{eh} on kuivauksen osuus sähköenergian kulutuksesta. Keskimääräinen teho on tällöin:

$$\overline{P_{eh}} = \frac{W_{eh}}{T_h} \text{ ja } \overline{P_{es}} = \frac{W_{es}}{T_s}. \quad (23.)$$

Sähkötaho päiväsaikaan on siis $\overline{P_{eh}} + \overline{P_{es}}$. Kustannusten laskemiseksi lasketaan sähkönkäyttö sekä -tuotanto yöllä ja päivällä. Päivä-, yö- ja kokonaistase kertoo etumerkillään mikä on sähkön tuotantotilanne. Negatiivinen merkitsee sahalta jäävän sähköä myytäväksi oman kulutuksen jälkeen.

5.2.4 Energiantuotannon pääomantarve

Eri prosessien pääomantarve poimitaan listalta kokoluokan mukaan. Koneiden ja laitteiden sekä rakennusteknisten töiden kustannukset on arvioitu listoihin erikseen. Nämä voivat koostua lukuisista alakohdista, mutta niiden kustannuksia ei eritellä. Käyttäjät voi antaa kustannuksille oman arvionsa, jolloin laskennassa käytetään sitä. Rakennusaikaisia korkoja ei lasketa, vaikka niillä voi olla jonkin verran enemmän merkitystä isoille laitoksille, joiden rakentaminen kestää kauan. Suunnittelu- ja valvontakustannukset lasketaan osuutena investoinneista, varaukset puolestaan osuutena sekä investoinneista että suunnittelusta ja valvonnasta. Investointikustannusten laskennan jälkeen voidaan tarkistaa mikä on vaihtoehdon sähkö- tai lämpötehon ominaisinvestointi. Avustuksilla voidaan vähentää perusprosessin pääoman tarvetta.

Huippukattilan investoinnit poimitaan erikseen, ja niistä lasketaan varaukset. Huippukattilaa ei avusteta. Kokonaispääoman tarve lasketaan, kun avustukset on vähennetty.

5.2.5 Energiantuotantokustannukset

Energiantuotantokustannuksissa lasketaan kiinteät kustannukset perusprosessille ja huippukattilalle erikseen. Pääomakustannukset lasketaan annuiteettimenetelmällä käyttäen edellä ilmoitettua laskentakorkoa ja -aikaa. Muut kiinteät kustannukset aiheutuvat käyttöhenkilökunnan palkoista, huollosta ja korjauksista sekä vakuutuksista. Huippukattilan ei arvioida tarvitsevan merkittävästi huoltoa. Lasketaan lisäksi erikseen kiinteiden kustannusten osuus lämmön hinnasta.

5.2.6 Energian hankinnan kustannukset

Energian hankinnan kustannukset aiheutuvat polttoaineiden ja sähkön hankinnasta sekä voimalaprosessin käytöstä. Muuttuvat kustannukset lasketaan jälleen erikseen sekä perusprosessille että huippukattilalle. Muuttuvat kustannukset ovat enimmäkseen polttoainekustannuksia, mutta myös polttoaineen ja tuhkan käsittelyn kustannuksia. Ne otetaan huomioon rivillä muut muuttuvat kustannukset, ja niiden katsotaan riippuvan polttoainemäärästä. Huippukattilan kaikki muuttuvat kustannukset aiheutuvat polttoaineesta.

Sähkön käytöstä aiheutuneet kustannukset lasketaan sen mukaan miten sähköä ostetaan. Sähkön myynti antaa puolestaan tuloja, joilla vähennetään sähkön ostokustannuksia. Itse tuotettu ja kulutettu sähkö arvostetaan ostosähkön mukaan, jota se korvaa. Siten voidaan laskea lämmölle hinta myös yhdistettyjä prosesseja käytettäessä. Kaikki myyntitulot polttoainekäytön ulkopuolelle jääneistä sivutuotteista, kaukolämmöstä ja sähköstä lasketaan yhteen.

Tulokset

Keskeisimmät tulokset esitetään tulosriveillä. Sekä kokonaiskustannukset että lämmön tuotantokustannus lasketaan molemmista voimaloista. Ostosähköä ei tarvita, jos sahasta tulee sähkön suhteen omavarainen. Myyntitulot vähennetään sekä kaikista energian hankintakustannuksista että pelkästään lämmön hankintakustannuksista. Tapauksissa missä saha tuottaa lämmön lisäksi sähköä, voidaan vertailla joko sahatavaran energiakustannuksia, kokonaiskustannuksia tai lämmön hintaa.

Sahatavaran energiakustannus muodostuu:

$$c = (c_{pr} + c_{hu} + c_e - I_{st} - I_e - I_{st}) / N, \quad (24.)$$

missä c_{pr} on peruslämmön, c_{hu} huippulämmön ja c_e ostosähkön hankintakustannus, I_{st} on kaukolämmön, I_e sähkön ja I_{st} polttoaineena käyttämättä jääneiden sivutuotteiden myyntitulo. Lämmön hankintakustannukset jakautuvat puolestaan kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin.

5.2.7 Oheistiedoston käyttö

Tiedot eri laitoskokoluokista syötetään PROSDATA.XLS -aputiedostossa erillisiin taulukoihin (Liite 5.). Taulukon tehtävänä on helpottaa tietojen syöttöä, tiedot voidaan yhtä hyvin syöttää suoraan mallin (SAHAMAL.XLS) poimintataulukoihin. Taulukoihin kootaan eri prosessien tietoja allekkain eri kokoluokissa. Pelkissä kuumavesikattiloissa kokoluokka on yksinkertaisesti kattilan nimellisteho, yhdistetyillä prosesseilla lämpöteho. Kokoluokkaa vastaava kone- ja laitekustannus, rakennustekniset kustannukset, kokonaishyötysuhde sekä vuotuinen ylläpitotyön määrä syötetään sarakkeittain. Muuta-sarakkeeseen voidaan lisätä huomautuksia.

Ennen käyttöä tiedot on lajiteltava kokoluokan mukaan pienenevään järjestykseen. Aputiedoston poimintakaavoilla poimitaan sarakkeiden tiedot ja siirretään ne muihin lomakkeisiin. Näistä tiedot on helpointa kopioida mallin varsinaisiin poimintataulukoihin. Näitä rutiineja ei käyttäjän tarvitse tehdä mikäli tietoja on tarpeeksi ja ne ovat ajan tasalla.

Kokoluokkia voi yksittäisellä prosessilla olla enintään 100. Prosessin käyttökelpoisuus määräytyy koon ylä- ja alarajojen mukaan, myös tehovaihtoehtoja on hyvä olla riittävän tiheässä. Malliin on koottu laitevalmistajilta todellisia, arvonlisäverottomia hintoja, sekä arvioitu kokemusten perusteella rakennusteknisiä kustannuksia. Joidenkin vaihtoehtojen kohdalla on käytetty samoja tai lähes samoja arvoja kuin mitä muissa tutkimuksissa, sekä arvioitu käyräsovituksella kustannusten kehittymistä kun teho kasvaa. Joidenkin

prosessien kaikki kustannukset on pakko arvioida, koska niitä ei ole kaupallisesti tarjolla.

5.3 Mallin luotettavuus

Edellä kuvatun kaltaiseen mikrotietokoneella toteutettuun malliin ja sen tuloksiin tulee suhtautua kriittisesti. Tietokoneelle rakennettu laskentamalli on erinomainen työkalu ja antaa oikeita tuloksia, jos laskettavat asiat ovat selkeässä riippuvuussuhteessa ja tekijöitä on vähän.

Sahan energianhankinnan kustannuslaskentamallissa on yhteensä yli 60 muuttujaa. Näistä 22:lla kuvataan sahaa ja sahausprosessia, 16:lla muodostetaan lämpökuorman pysyvyyskäyrä ja 26 muuttujalla kuvataan jokaista yksittäistä energianhankinnan ratkaisuvaihtoehtoa huippukattiloineen. On selvää että muuttujia on enemmän ja ettei niitä voi ottaa kaikkia huomioon kaikissa tapauksissa. Mallia ei tästä syystä tulisi käyttää muuhun kuin mihin se on suunniteltu.

5.3.1 Laskentaperiaatteet

Periaatevirhe syntyy jos mallissa on laskettu asioita toisin, kuin mitä todellisuudessa tapahtuu. Periaatevirhe voi olla tahaton tai tahallinen. Tahattomat virheet on tietenkin pyrittävä estämään huolellisella työllä ja toisaalta löytämään mallia käytettäessä mm. vertaamalla tuloksia todellisiin arvoihin. Tahallisia periaatevirheitä on puolestaan tehty mallin yksinkertaistamiseksi.

Periaatteellisia virheitä mallissa saattavat olla esimerkiksi seuraavat oletukset:

- sivutuotteen kosteus ja kuivapaino vakio
- päiväsähkön hinta sahausaikana
- yönsähkön hinta muuna kuin sahausaikana
- sähkötariffien sivuutus
- useiden eri muuttujien riippumattomuus kokoluokasta
- eri lämmöntuotto-prosessien rinnastus toisiinsa
- oletus aina tarvittavasta huippukattilasta
- pysyvyyskäyrän yksinkertaistus suoriksi

Näiden merkitys on erilainen. Mallin parantamiseksi tulisi ainakin sähkökustannukset laskea tarkempien kuluttajatariffien, päivä- ja yönsähkön hintojen mukaan. Eri prosessit voidaan rinnastaa lämpövoimakoneperiaatteen mukaisesti toisiinsa, mutta kokoluokasta riippuvia suureita saattaa olla enemmän. Ratkaisevan tärkeä tekijä on prosessin säädettävyys osakuormilla. Sitä ei ehkä ole otettu riittävästi huomioon ja malli saattaa ehdottaa tiettyä prosessia, vaikka se ei käytännössä tulisi toimimaan. Prosessien käytettävyydestä tulisi siltä osin olla enemmän tietoa.

Periaatteellinen virhe on myös jättää joitakin kustannuksiin vaikuttavia seikkoja kokonaan tarkastelematta. Tällainen voi olla esimerkiksi tuhkan käsittelystä aiheutuvat kustannukset. Pois on jätetty tekijöitä joiden on arveltu olevan vähämerkityksellisiä.

Periaatteelliset virheet vaikuttavat kaikkiin vaihtoehtoihin samalla tavalla. Ne eivät välttämättä vie pohjaa pois vaihtoehtojen vertailtavuudelta. Prosessien säädettävyyttä tai toimivuutta yleensä on hankala arvioida, koska useista ei ole rakennettu edes pilot-laitteita Suomessa. Yksittäistä tulosta kannattaa aina arvioida esim. huipunkäyttöajan perusteella. Mallia ei ole tarkoitettu investointipäätösten tueksi, vaan tarkemmat arviot on laskettava tapauskohtaisesti.

5.3.2 Lähtöarvot

Lähtöarvovirhe on helppo korjata, jos tarkempia lähtöarvoja on saatavilla. Lähtöarvoihin liittyvien virheiden vaikutusta voidaan arvioida mm. liitteessä 7 olevien kuvien avulla. Jos sähkön, työn, muuttuvien tai kiinteiden kustannusten osuus on suuri, on virhe näiden kustannusten lähtöarvoissakin merkittävä.

Investoinneilla ja polttoaineen hinnalla on lähes aina suuri merkitys. Siinäkin tapauksessa että oma sivutuote myydään, on myyntihinnan merkitys lopputulokselle yhtä suuri kuin polttoainehinnan. Investointikulut on pyritty arvioimaan toteutuneiden tapausten perusteella. Milloin toteutuneita hankkeita ei ole, on käytetty muiden tutkimusten arvioita.

Lähtöarvoista tulisi erityisen tarkasti arvioida

- investointikulut
- polttoaineen hinta
- sähkön hinta
- henkilötyön hinta ja määrä
- pysyvyyskäyrä
- perusprosessin tehon osuus huipputehosta
- kokonaishyötysuhde
- rakennusaste
- ominaiskulutusluvut
- sivutuoteosuudet
- kuoren kosteus

Jos esimerkiksi investointikulut on arvioitu huolettomasti, ei ole enää syytä pyrkiä suureen tarkkuuteen tekijöissä, jotka vaikuttavat lopputulokseen tuskin havaittavasti. Joissakin tekijöissä puolestaan pieni muutos saa suuren muutoksen lopputulokseen. Esimerkiksi kuoren kosteuden lisääntyessä siinä ei lopulta ole lämpöarvoa ollenkaan ja kaikki energia joudutaan ostamaan.

6. ERI ENERGIAN HANKINTAVAIHTOEHTOJEN KILPAILUKYKY

6.1 Vertailu eri sahakokoluokissa

Vertaillaan seuraavassa eri energianhankintavaihtoehtoja kun sahan tuotantomäärä kasvaa. Oletetaan lisäksi että kaukolämpöä ei myydä, kuorta ei arvoteta ja että purun energiahinta on 45 mk/MWh. Muut muuttujat sekä lämpökuorman pysyvyyskäyrä ovat samat kuin liitteissä 3 ja 4. Investointikustannukset ja voimalaitoskokoluokasta riippuvat muuttujat ovat liitteessä 5.

6.1.1 Lämmön erillistuotanto

Mallin vaihtoehtoina ovat seuraavat kuumavesikattilat:

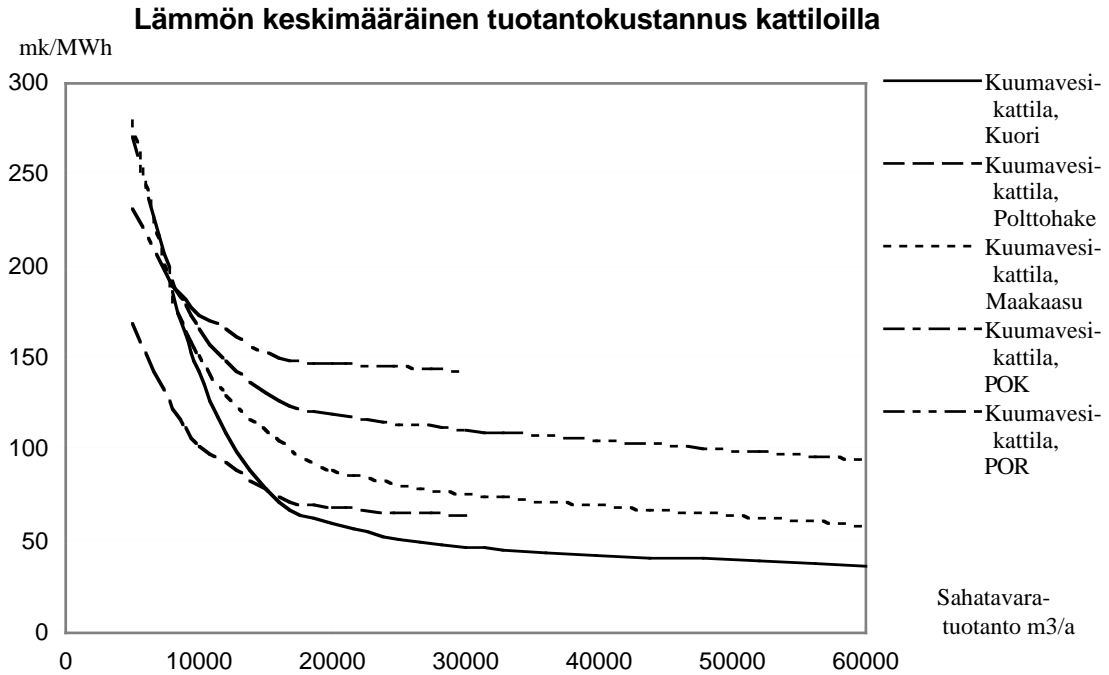
- kuorenpolttolaitos, kuori (puru), 0,25-23 MW
- hakekattila stokeripolttimella, polttohake, 0,25-1,5 MW
- maakaasukattila, 1-23 MW
- kuumavesikattila, kevyt polttoöljy (POK), 0,25-1,5 MW
- kuumavesikattila, raskas polttoöljy (POR), 0,25-23 MW

Maakaasua ei aina voi tarkastella todellisena vaihtoehtona sen alueellisen saatavuuden takia. Lisäksi pienelle käyttäjälle liittyminen, suhteessa kulutukseen, voi olla kallista. Myöskään POR-kattila ei alle 1 MW kokoluokissa ole todellinen ratkaisu päästörajoitusten takia. Alle 20 000 m³:n sahoilla lämmöntuotannon polttoainevaihtoehdot ovat käytännössä hake, kevyt polttoöljy tai kuori.

Jos kuorta ei arvoteta tulee kuorikattila mallin mukaan edullisimmaksi jo n. 15 000 m³:n tuotannolla. Kattilan koko on tällöin 750 kW. Kuorikattila pienemmillään sahoilla on houkutteleva jos kuoren hävitys aiheuttaa kustannuksia. Mallin kuorikattilat eivät enää alle 1 MW:n kokoluokassa ole halvempia, stokeripolttoon perustuvat hakekattilat sen sijaan ovat.

Alle 15 000 m³:n tuotannolla näyttäisi olevan edullisinta käyttää haketta, vaikka se joudutaankin ostamaan hintaan 57 mk/MWh. Sivutuotteena syntyvää selluhaketta ei missään oloissa käytetä polttoaineena. Toisaalta kuorijätteelle on aina tehtävä jotain. Tilanne pienillä sahoilla voi olla edullinen jos kuori voidaan myydä isompaan voimalaan. Tällöin kuoren käytölle ei ole teknisiä esteitä, ja saha voi hankkia tilalle polttohaketta. Pienissä yksiköissä lämmön tuotantokustannus kasvaa nopeasti. Alle 8000 m³:n (n. 500 kW) tuotantomäärillä olisi POK-kattila edullisempi kuin kuorikattila.

Kuvassa 6.1 on esitetty eri kokoluokan sahojen lämpöenergian keskimääräinen tuotantokustannus kun tuotanto tapahtuu pelkkää lämpöä tuottavilla kattiloilla. Peruskattila on pyritty mitoittamaan pysyvyyskäyrään niin, että huipunkäyttöaika tulee mahdollisimman pitkäksi. Tämä auttaa saavuttamaan taloudellisimman ratkaisun. Kuorikattilan polttoaineen käytössä on pyritty käyttämään kaikki oma kuori.



Kuva 6.1. Lämmön tuotantokustannus kuumavesikattiloilla eri sahatavaran tuotantomäärillä. Kuorikattilan ohella hakeratkaisu on edullinen, vaikka hake joudutaan ostamaan. Mallin suurin kokoluokka hake- ja POK (kevyt polttoöljy)-kattiloille on 1,5 MW. Teho riittää vielä 30 000 m³:n tuotantomäärälle.

to-

6.1.2 Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto

Kun saha tuottaa itse sähköä, arvostetaan se ostosähkön hintaiseksi siltä osin kuin sillä voidaan korvata ostosähköä. Voi myös syntyä tilanteita, joissa osa päivätehosta joudutaan ostamaan koska oman voimalan teho riittää vain kuivaamojen kulutukseen. Yöllä tapahtuvan myynnin ansiosta voi saha olla sähkön nettomyyjä vaikka teho ei päiväsaikaan riittäisi myyntiin tai edes omaan kulutukseen.

Kaukolämmön myyntiä ei tarkastella. Se muuttaisi määrästä riippuen asetelman kokonaan. Ostettavan yö- ja päivänsähkön hinta on sama. Myyntisähköstä saatava hinta on huomattavasti huonompi kuin mitä ostosähkö maksaa, etenkin yöllä. Erityisen kannattavaa on siis käyttää itse oma sähköntuotanto.

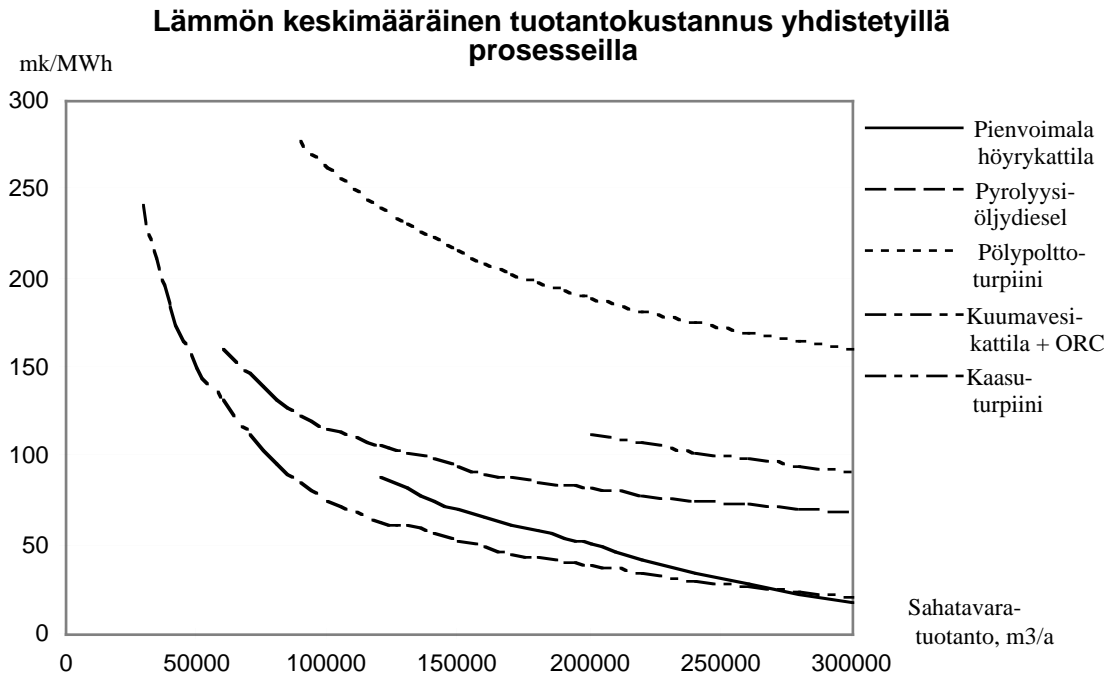
Tutkitaan yhdistetyssä tuotannossa nettolämpöteholtaan seuraavia vaihtoehtoja:

- pienvoimala rankine-höyryprosessilla, kuori, puru, 9-59 MW
- kaasutusdiesel, kuori, puru, 3-35 MW
- pyrolyysiöljydiesel, pyrolyysiöljy, POK, 3-35 MW
- pölypolttoturpiini, puru, hake, 3-35 MW
- savukaasukattila + ORC-prosessi, kuori, puru, 1-17,5 MW
- kaasuturpiini, maakaasu, 10-35 MW

Konventionaalinen pienvoimalaitos tulee mallin mukaan edullisemmaksi kuin kuorikattila yli 280 000 m³:n tuotannolla. Mikään muu prosessi ei näyttäisi olevan edullisempi kuin kuorikattilavaihtoehto tätä pienemmissä kokoluokissa.

ORC-prosessi on huomattavan kilpailukykyinen. Sen etu on pienemmät kokoluokat ja se tulee edullisemmaksi kuin pienvoimala alle 250 000 m³:n tuotannolla. Teknisesti sitä voitaisiin käyttää jopa alle 30 000 m³:n sahoilla.

Käytettävissä olevat minimitehot rajoittavat oleellisesti muiden kuin ORC-prosessin teknisiä mahdollisuuksia. Dieselmoottori ostettavalla pyrolyysiöljyllä on kilpailukykyisempi kuin kaasutusdiesel, pölypoltto- tai kaasuturpiini. Tosin näistä mitään ei voi pitää kannattavana vaihtoehtona ORC-prosessiin tai edes pienvoimalaan nähden. Kuvaan 6.2 on laskettu lämmön hinta sähköä tuottavilla prosesseilla.



Kuva 6.2. Lämmön hinta sähköä ja lämpöä tuottavilla prosesseilla kun itse tuotettu ja kulutettu sähkö arvostetaan ostosähkön hintaiseksi. Useimpia voimalaprosesseja ei ole olemassa riittävän pienissä kokoluokissa, ORC-prosessi on tästä poikkeus.

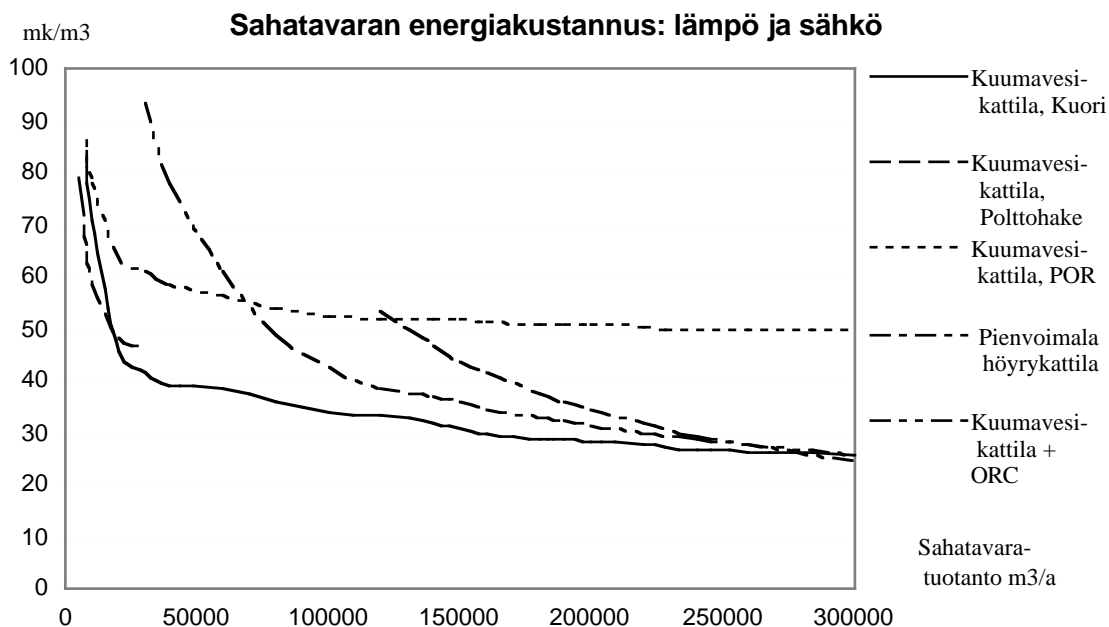
6.1.3 Sahatavaran energiakustannus

Sahatavaran energiakustannus saadaan kun kaikki energian tuotantoon ja hankintaan liittyvät kustannukset jaetaan sahatavaran tuotantomäärällä. Energiakustannus on selkeä suure verrattaessa eri energian hankintavaihtoehtoja toisiinsa.

Energiakustannusten osuus sahatavaran hinnassa on pieni. Jos sahatavaran tuotantokustannus on 800-900 mk/m³, saattaa energiakustannus olla 30-70 mk/m³, eli n. 6-8 %. Yli 100 000 m³:n sahoilla energiakustannukset muodostuvat kuorikattilaa käytettäessä lähes kokonaan sähköstä, lämmön osuus on vain muutamia markkoja. Alle 20 000 m³:n tuotantomäärillä lämmön osuus kasvaa nopeasti ja alle 14 000 m³:n sahoilla se on jo suu-rempi kuin sähkön.

Kuvassa 6.3 on tarkasteltu viittä edullisinta energian hankintavaihtoehtoa:

- kuumavesikattila, kuori
- kuumavesikattila, polttohake
- kuumavesikattila, POR
- pienvoimala, kuori ja puru, höyryprosessi
- kuumavesikattila, kuori ja puru, ORC-prosessi



Kuva 6.3. Sahatavaran energiakustannukset viidellä edullisimmalla vaihtoehdoilla.

Maakaasua ei ole otettu tähän kuvioon, koska se on alueellinen polttoaine.

Liitteessä 6 on kuva sahatavaran energiakustannuksista kaikilla tutkituilla vaihtoehdoilla.

6.2 Investointien vaikutus kilpailukykyyn

Investointikustannukset, tekniikan asettamat rajoitukset ja polttoaineen hinta vaikuttavat oleellisesti eri vaihtoehtojen kilpailukykyyn. Myös henkilötöiden osuus on joillakin prosesseilla merkittävä. Tekniikasta johtuen on kullakin prosessilla ominainen minimikokoluokka. Öljy- tai kaasukattiloilla tämä ei ole ongelma, vaan niitä voidaan rakentaa pienimmillekin lämpökuormille soveltuen. Kuorikattilalla sen sijaan on minimikokonsa, joka johtuu mm. automaattisen polttoaineen syötön vaatimuksista. Kokoluokan pienentäminen edelleen edellyttää laadukasta polttoainetta, mitä kuori ei ole missään oloissa. Yhdistetyillä prosesseilla minimikokoluokka määrää sahatuotannon alarajan jossa prosessi voidaan ottaa käyttöön.

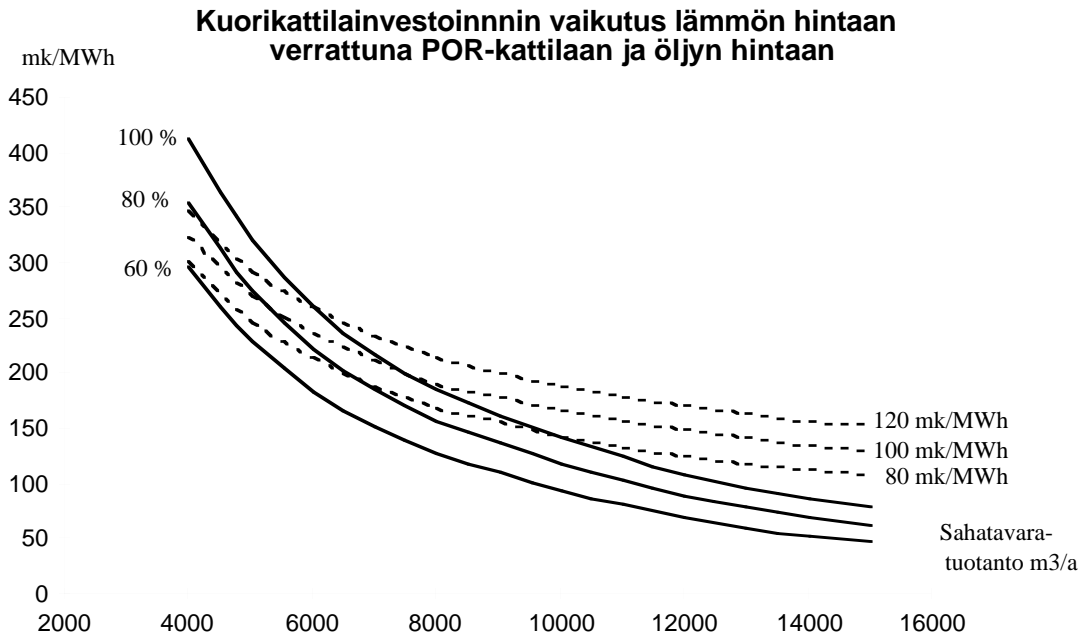
Minimi sahatavaratuotannot on arvioitu mallissa eri prosesseille seuraaviksi:

- kuumavesikattila, kuori, n. 10 000 m³/a
- pienvoimala, 100 000 m³/a
- kaasutusdiesel, 58 000 m³/a
- pyrolyysiöljydiesel, 58 000 m³/a
- pölypolttoturpiini, 58 000 m³/a
- kuumavesikattila + ORC, 19 000 m³/a
- kaasuturpiini, 190 000 m³/a

Teknisesti prosessi voi toimia minimikoossaan tai sen alle mutta se ei aina ole taloudellisesti järkevää. Toisaalta prosessi ei ehkä toimi pienemmissä kokoluokissa teknisesti vaikka olisikin taloudellisesti järkevä. Tekniikan kehittäminen, automatisointi sekä investointikustannusten pienentäminen ovat siis keskeiset tavoitteet. Seuraavissa kappaleissa esitellään mallin antamia tuloksia investointikustannusten vaikutuksesta verrattuna kuorikattilaan muutamien tärkeimpien prosessien osalta.

6.2.1 Kuorikattila

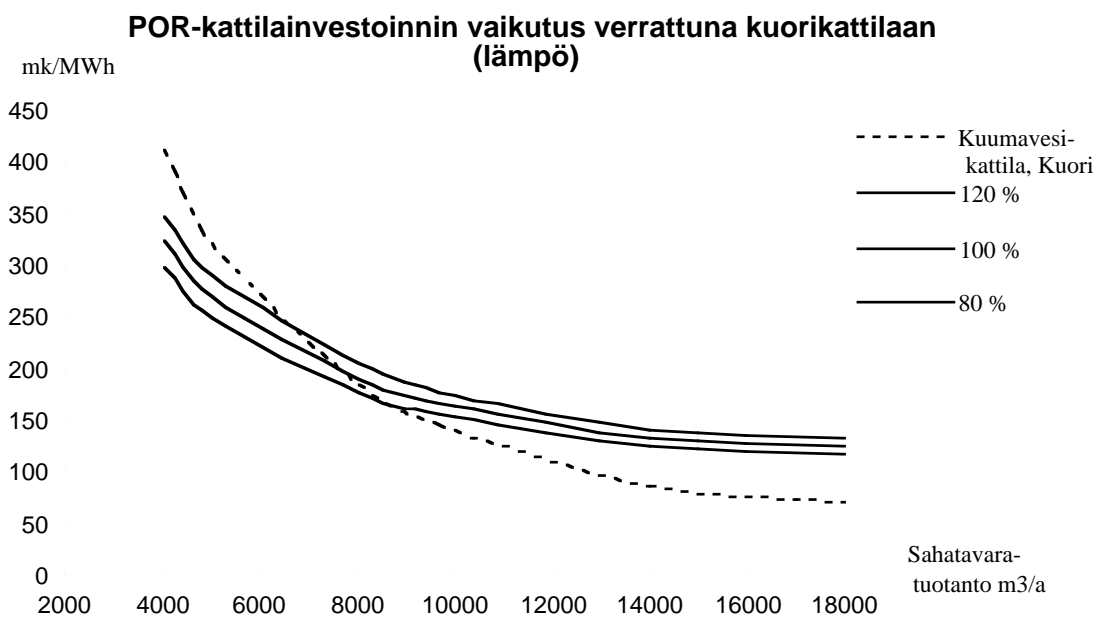
Monilla pienillä sahoilla ainoat vaihtoehdot lämmön tuottamiseksi ovat POR-kattila ja kuorikattila. Kuorikattilan ja yleensä kpa-kattiloiden kilpailukykyä pienissä kokoluokissa rajoittavat investointikulut. Öljypolttimet ja -kattilat ovat sen sijaan tavanomaista ja edullista tekniikkaa. Kuvaan 6.4 on laskettu kuorikattilan investointien muutoksen vaikutus lämmön hintaan. Samassa kuviossa verrataan kuorikattilalla ja POR-kattilalla tuotetun lämmön hintaa. Jos kuorikattilan investointeja saadaan pienennettyä samaan aikaan kun raskaan polttoöljyn hinta nousee, tulee kuorikattila edullisemmaksi yhä pienemmissä sahakokoluokissa.



Kuva 6.4. Kuorikattilainvestointien muutoksen vaikutus lämmön hintaan verrattuna POR-kattilaan ja öljyn hintaan. Öljyn hinnan noustessa kuorikattila tulee edullisempi pienemmilläkin sahoilla. Näin käy myös jos sen investointikulua voidaan vähentää.

6.2.2 POR-raskasöljykattila

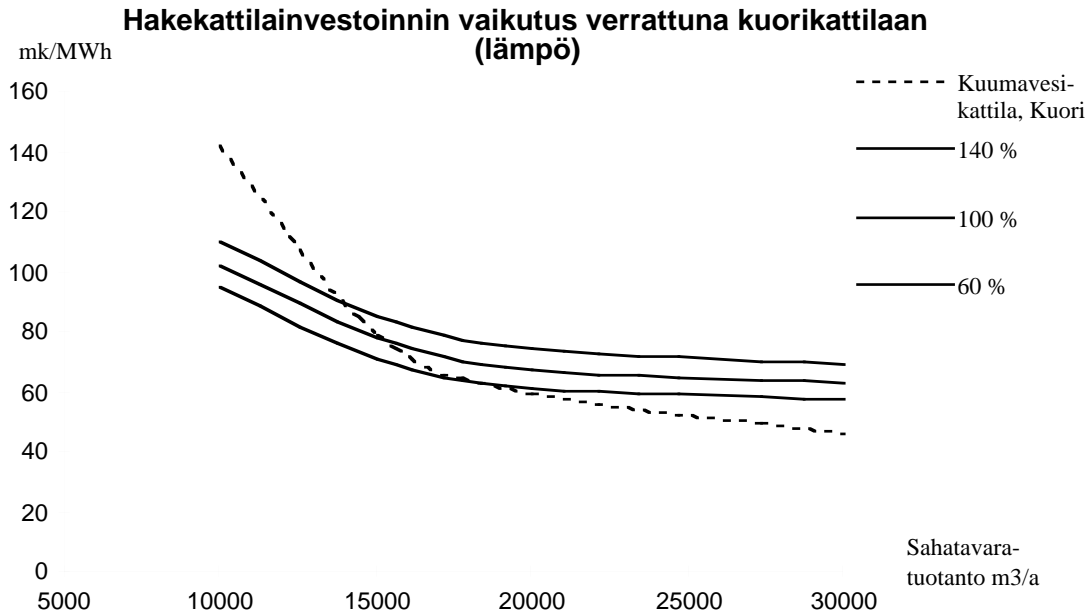
Investointikustannukset eivät vaikuta POR-kattilalla tuotetun energian hintaan kovin ratkaisevasti (kuva 6.5). Siihen vaikuttaa lähinnä polttoaineen hinta. Uusien POR-kattiloiden hinnoissa ei liene suuria eroja. Saha voi kuitenkin hankkia kattilan käytettynä, jolloin hinta saattaa olla alle puolet uuden kattilan investoinneista. Tällöin polttoaineen hinnan vaikutus vain korostuu.



Kuva 6.5. POR-kattilainvestointien vaikutus lämmön hintaan verrattuna kuorikattilaan.

6.2.3 Hakekattila

Hakekattilan kustannusrakenne on samanlainen kuin kuorikattilan. Investointi on korkea, mutta polttoaine halpaa. Kun kuorelle ei anneta hintaa, kuten mallin perustapauksessa, halpenee kokoluokan kasvaessa kuorikattilalla tuotettu energia nopeammin kuin hakekattilalla. Hakekattilan investoinneilla tähän on vaikea vaikuttaa (kuva 6.6).

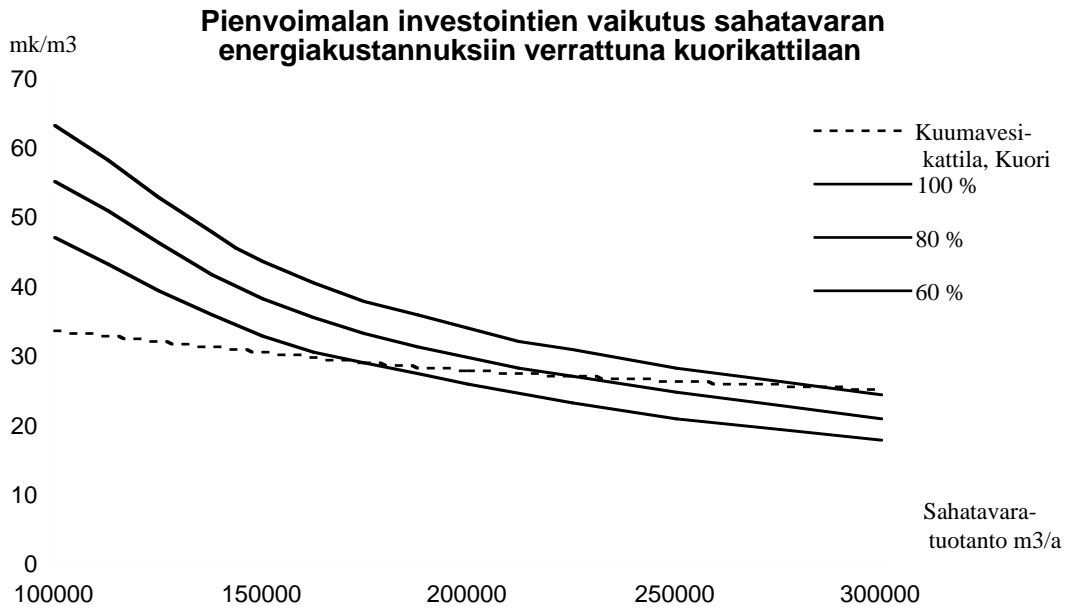


Kuva 6.6. Hakekattilan investointien vaikutus lämmön hintaan verrattuna kuorikattilaan.

Hankalamman polttoaineen takia kuorikattilan investoinnit eivät enää alle 1 MW:n kokoluokassa pienene. Hakekattilalla näin sen sijaan käy hyvinkin pieniin kokoluokkiin asti. Hyvälaatuista haketta voidaan polttaa automaattisilla stokeripolttimilla aina muutaman kymmenen kilowatin kattiloissa. Näin pieniä kattiloita mallissa ei käsitellä.

6.2.4 Pienvoimala

Mallin perustapauksen arvoilla laskettuna pienvoimala olisi kannattava vasta yli 300 000 m³:n sahoilla. Jos investointikulua voidaan vähentää 20 % tulisi pienvoimalan avulla sahatavaran energiakustannukset samoiksi kuin kuorikattilaratkaisulla jo hieman yli 200 000 m³:n tuotannolla (kuva 6.7).

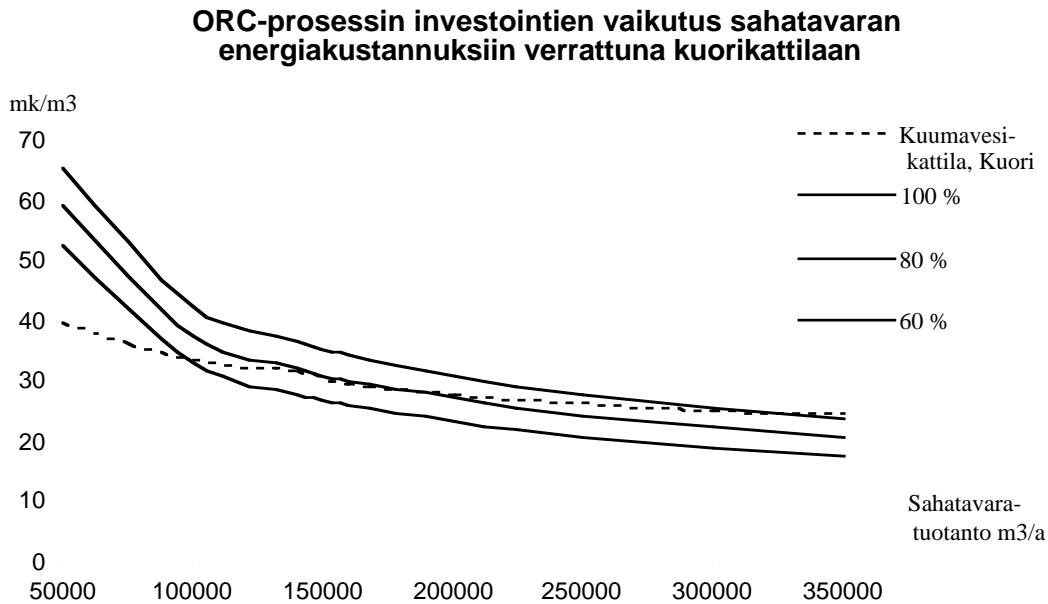


Kuva 6.7. Pienvoimalan investointien vaikutus sahatavaran energiakustannuksiin verrattuna kuorikattilaan. Investointien pieneminen tuo pienvoimalaratkaisun selkeästi lähemmäs pienempiä sahakokoluokkia. Pienvoimalaa voidaan silti pitää vain isojen sahojen ratkaisuna.

Pienvoimalan eduksi voitaneen laskea höyryntuotanto. Höyryä tarvitaan kuivaamoissa kuivauksen tasaamiseen ja halkeilun, eli laatutappioiden, vähentämiseen. Laatutappioiden vaikutus sahaustoiminnan tulokseen on hyvin merkittävä. Pienvoimalaa käytettäessä erillistä höyrynehitintä ei ehkä tarvita, koska höyry voidaan ottaa väliotona turpiinista tai ennen sitä.

6.2.5 ORC-prosessi

ORC-prosessi näyttää yhdistetyistä sähkön- ja lämmöntuotannon vaihtoehtoista edullisimmalta. ORC on suuremmissa kokoluokissa hyvin tasaväkinen pienvoimalan kanssa. On tosin muistettava ettei yhtään ORC-prosessia ole vielä liitetty lämmöntuotantoon Suomessa. Investointikulujen arviointi on siten hankalaa. Jokatapauksessa ORC tulisi olemaan teknisesti mahdollinen pienemmilläkin sahoilla, toisin kuin pienvoimala. Käytännössä prosessiin voi vielä liittyä teknisiä ongelmia mm. höyryntuotannon puhtaana- pidossa kuorta käytettäessä.



Kuva 6.8. ORC-prosessin investointien vaikutus sahatavaran energiahintaan verrattuna kuorikattilaan. ORC-ratkaisu on hyvin kilpailukykyinen alle 150 000 m³/a tuotannolla, kun jos investoimitt osoittautuvat alemmiksi kuin mitä mallissa on käytetty.

tuna

³ :n tuotannolla-

6.3 Muut kilpailukykyyn vaikuttavat tekijät

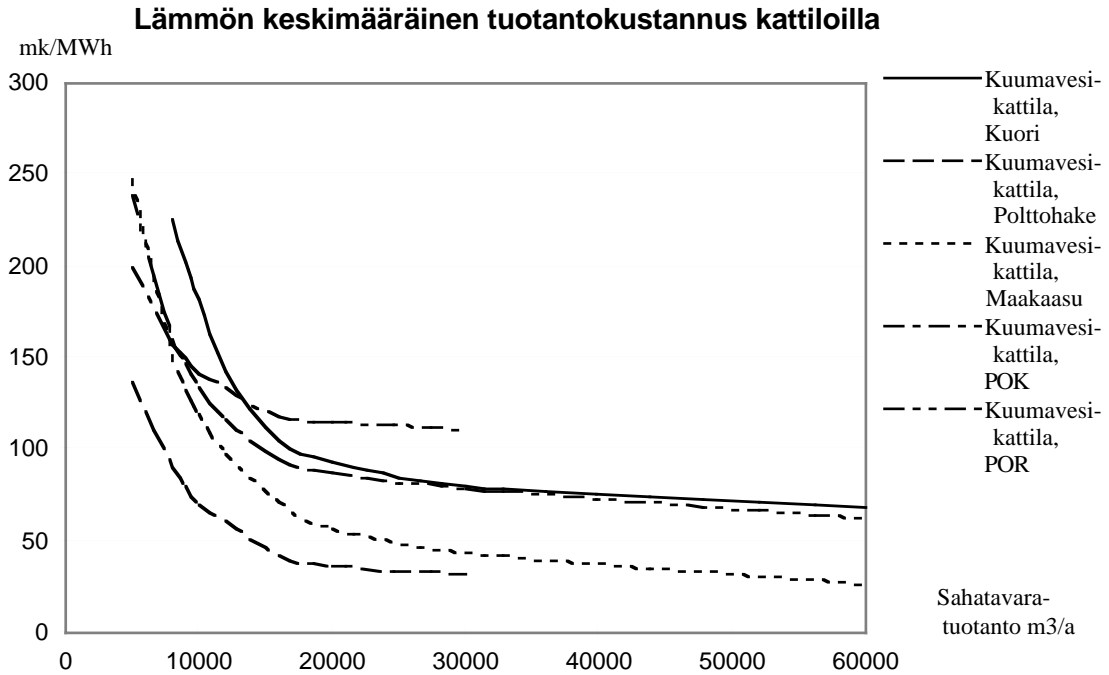
Investointikulujen ohella polttoaineen hinta on useimmiten toinen merkittävä tekijä prosessilla tuotetun energian hinnassa. Sähköä tuottavilla prosesseilla oleellinen kannattavuuteen vaikuttava seikka on omalla tuotannolla korvattavan ostosähkön ja mahdollisen myyntisähkön hinta.

Seuraavissa kappaleissa esitellään mallin antamat tulokset polttoaineiden ja sähkön hinnan merkityksestä tärkeimpien prosessien kilpailukykyille. Lisäksi tarkastellaan sahatavaran energiakustannusten rakennetta yleisimpiä ja lupaavimpia ratkaisuja käytettäessä.

6.3.1 Polttoaineiden hinnan vaikutus

On selvää että kuorikattilavaihtoehto on edullinen koska kuorelle ei lasketa hintaa. Kuori-puru -sekoituksen hinta määräytyy tällöin purun osuudesta, jos sille on laskettu arvo. Jos purua käytetään vain pieni osuus, kuten perustapauksessa, ei sillä ole suurta merkitystä. Sahalla syntyy aina erilaista muuta arvotonta lajittelematonta puujätettä, jota voidaan käyttää kuorikattilassa koska se ei kelpaa hakkeeksi eikä lastulevypuruksi. Tässä tapauksessa koko kuorikattilan käyttämä polttoaine-energia voidaan katsoa olevan ilmaista.

Jos kuorelle tai purulle annetaan arvo, oletetaan että se voidaan myös myydä tähän hintaan. Tällöin ostopolttoainetta käyttävien energianhankintavaihtoehtojen asema paranee, koska omat sivutuotteet jäävät myytäviksi. Kuvassa 6.9 on esitetty lämmön tuotantokustannukset kun purulle annetaan arvo 45 mk/MWh ja kuorelle 30 mk/MWh. Kuoren arvo on korkeahko mutta se näyttää selkeästi mihin hinnan kohoaminen johtaa.



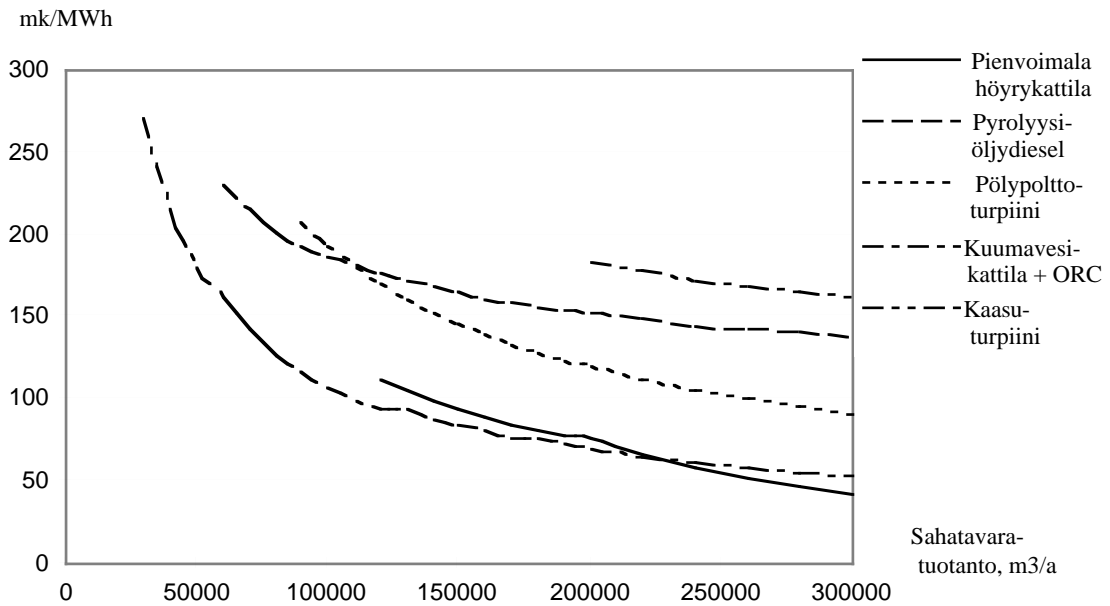
Kuva 6.9. Kattilavaihtoehtojen asema kun purun hinta on 45 mk/MWh ja kuoren 30 mk/MWh.

Kattiloiden tapauksessa kuorikattilan kilpailukykyyn ei vaikuta niinkään polttoaineen hinnan nousu, kuin se, että kuorta käyttämättömissä vaihtoehdoissa kuori voidaan myydä ja alentaa siten näiden vaihtoehtojen kokonaiskustannuksia. On siis olemassa sellainen sivutuotteiden hinta, joka ei enää edullisuudellaan riitä kompensoimaan kallimpaa kpa-voimalan käyttöä ja investointia. Tämä edellyttää että sivutuotteilla voidaan vaihtoehtoisesti hankkia ostopolttoaineita käytettäväksi investoinneiltaan ja käyttökuulultaan edullisemmassa voimalassa. Kuvassa 6.9 tämä tilanne on kuorikattilan ja POR-kattilan välillä kokoluokassa n. 30 000 m³.

Kun kuori voidaan myydä, vaikkapa vain hintaan 20 mk/MWh, tulee hakekattilan käyttö huomattavasti edullisemmaksi silloinkin kun hakkeen hinta on 57 mk/MWh. Tämä johtuu siitä että hakekattilan investoinnit ovat vain murto-osa vastaavan kokoisen kuorenpolttolaitoksen investoinneista, eikä se vaadi läheskään niin paljoa valvontatyötä. Hakekattila näyttäisi tässä tapauksessa edullisimmalta kaikissa kokoluokissaan 0,25-1,5 MW, eli n. 30 000 m³:n sahoille asti.

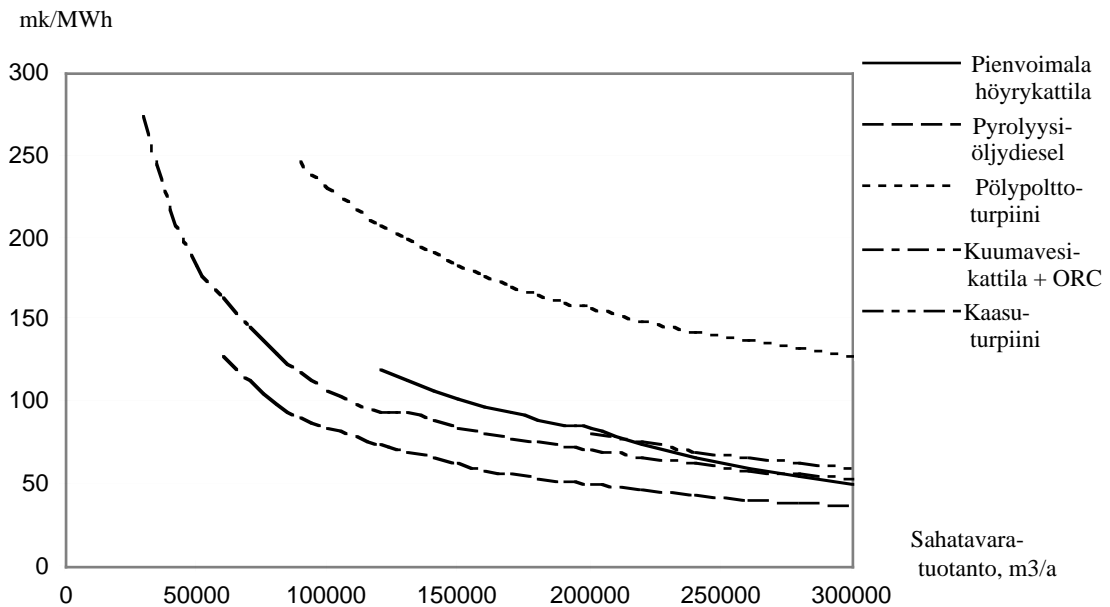
Yhdistetyillä prosesseilla (kuvat 6.10-6.11) tilanne on periaatteessa samanlainen kuin kuumavesikattiloilla. Sivutuotteita arvotettaessa prosessit, jotka eivät käytä niitä ollenkaan, ovat edullisemmassa asemassa.

Lämmön keskimääräinen tuotantokustannus yhdistetyillä prosesseilla



Kuva 6.10. Lämmön tuotantokustannus yhdistetyillä prosesseilla kun purun ja kuoren hinta on 0 mk/MWh.

Lämmön keskimääräinen tuotantokustannus yhdistetyillä prosesseilla



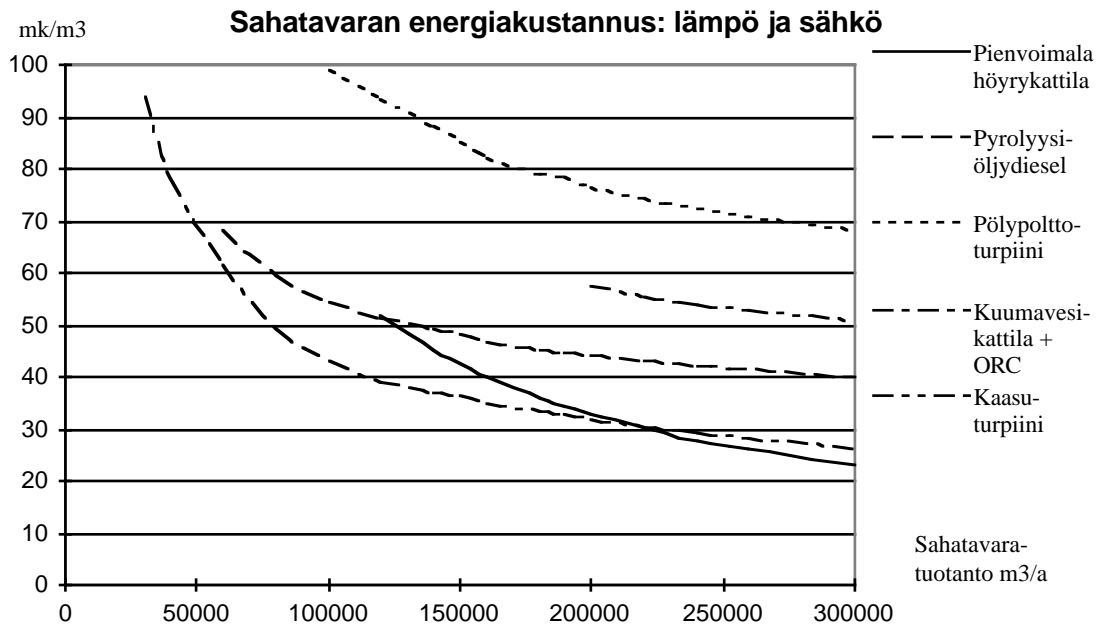
Kuva 6.11. Lämmön tuotantokustannus yhdistetyillä prosesseilla kun purun hinta on 45 mk/MWh ja kuoren 30 mk/MWh.

Edellä kuvassa 6.4 esiteltiin jo raskaan polttoöljyn hinnan vaikutusta. Kevyttä polttoöljyä useimmat vaihtoehdot käyttävät vain niukasti mm. käynnistyspolttoaineena, eikä se juuri vaikuta kokonaisuuteen. Maakaasua tai kevyttä polttoöljyä käyttävät vaihtoehdot voivat päästä edulliseen asemaan jos niiden polttoaineen hinta laskee samalla kun sahan

sivutuotteet voidaan myydä. Maakaasukattila on varsin edullinen vaihtoehto kun kaasua on saatavilla (Liite 6).

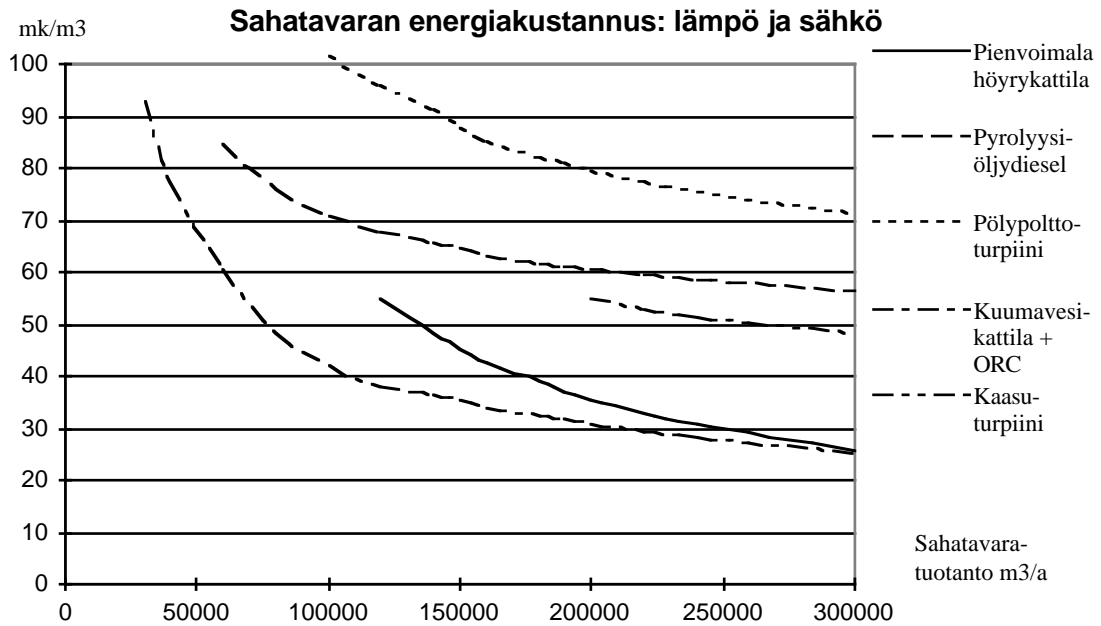
6.3.2 Sähkön hinnan vaikutus

Jos yhdistetty prosessi tuottaa sähköä paranee kannattavuus sähkön hinnan noustessa. Tällöin ylijäävästä sähköstä saadaan myös enemmän myyntituloja. Jos prosessi tuottaa sähköä juuri sopivasti omaan tarpeeseen, mutta ei enempää, ei sähkön hinnalla ole sahalle mitään merkitystä. Kaikissa muissa tapauksissa, joissa saha on sähkön netto-ostaja, on sähkön hinnalla suora vaikutus sahatavaran energiakustannuksiin.



Kuva 6.12. Energiakustannukset yhdistetyillä prosesseilla kun sähkön hinta nousee

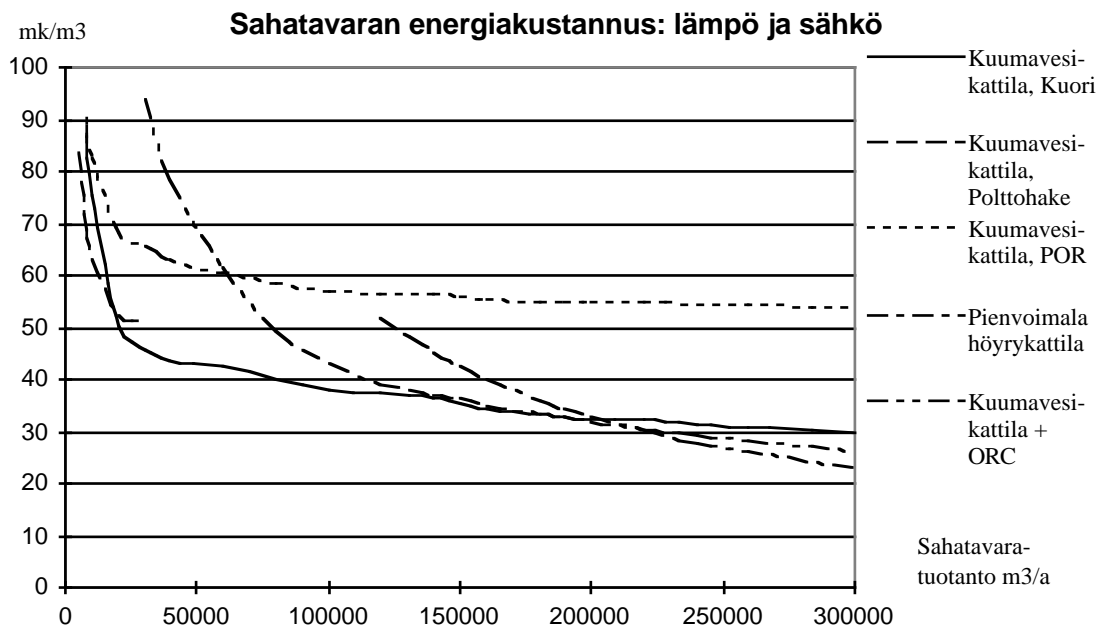
52 mk/MWh.



Kuva 6.13. Energiakustannukset yhdistetyillä prosesseilla kun sähkön hinta laskee

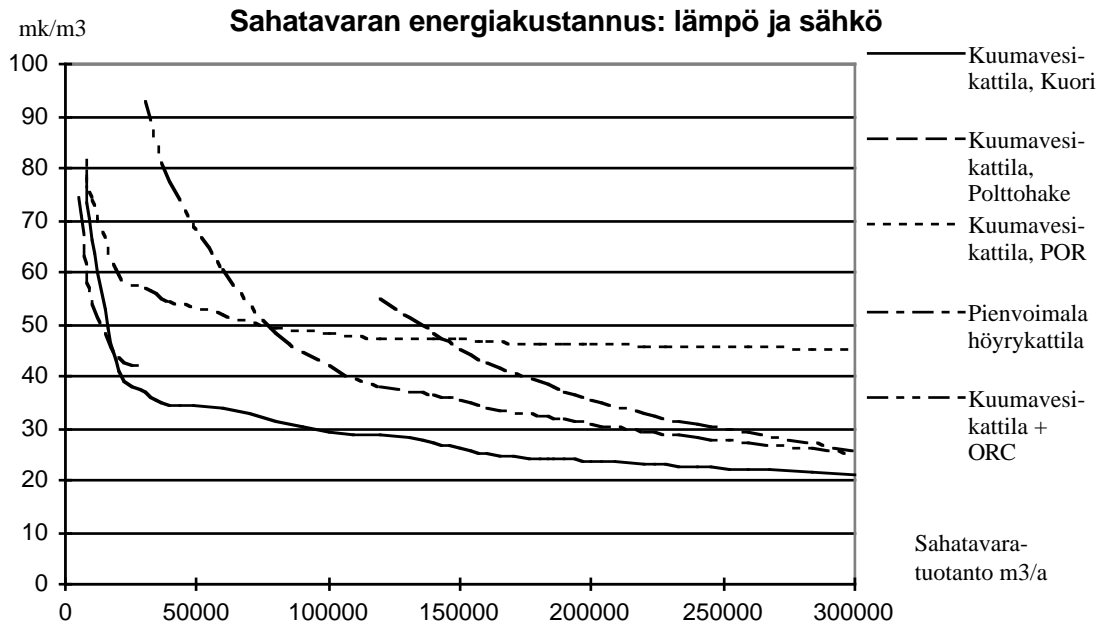
52 mk/MWh.

Sähkön hinnan muutos vaikuttaa hyvin yksiselitteisesti kuumavesikattiloiden tapauksessa. Kun yhdistetyn prosessin tuotanto korvaa kallimpaa ostosähköä, parantaa se prosessin asemaa. Vesikattilaratkaisuissa sähkön hinta taas siirtyy suoraan sahatavaran hintaan. Kun ostettavan päiväsähkön hinta nousee riittävästi, tulee ORC-prosessi varteenotettavaksi vaihtoehdoksi. Isoissa kokoluokissa taas pienvoimala selviää paremmin (kuvat 6.14-6.15).



Kuva 6.14. Sahatavaran energiakustannus kun päiväsähkön myyntihinta nousee 20 %

ja nousu on merkittävästi (52 mk/MWh) sama muissa hinnoissa. ORC-prosessi ja pienvoimala tulevat kuorikattilaakin edullisemmiksi.



Kuva 6.15. Sahatavaran energiakustannus viidellä edullisimmalla prosessilla kun pääväsähkön myyntihinta laskee 20 % ja muutos on merkittävästi (52 mk/MWh) sama muissa hinnoissa. Kuorikatilaratkaisu on entistäkin edullisempi.

6.3.3 Energiakustannusten rakenne

Sahatavaran energiakustannusten rakennetta tutkimalla nähdään mihin tekijöihin kannattaa yrittää vaikuttaa jotta yhdistettyjen prosessien kilpailukykyä voitaisiin tehokkaimmin parantaa. Sivutuotteiden ja sähkön myyntitulot on vähennettävä samassa suhteessa kaikista osakustannuksista. Tutkitaan mikä merkitys on ostosähköllä, työllä sekä muuttuvilla ja kiinteillä kuluilla. Muuttuvat kulut muodostuvat käytännössä polttoaineista. Kustannusrakennetta esittävät kuvat ovat liitteessä 7.

Kuori- ja POR-kattiloiden tapauksessa kiinteiden kustannusten osuus on suurin pienissä kokoluokissa. Koska kuorella ei ole arvoa, muodostuu sahatavaran energiakustannus pääosin sähköstä isommilla sahoilla kuorikatilaa käytettäessä. POR-kattilalla taas muuttuvien kustannusten osuus kasvaa suureksi isoissa kokoluokissa.

Yhdistetyille prosesseille on yhteistä suuri kiinteiden kustannusten osuus. Myös työn määrä saattaa olla merkittävä. Pienvoimalalle oli mallissa laskettu ympärivuorokautinen valvontatyö. Vaikka pienvoimala ja ORC-prosessi käyttäisikin omaa polttoainetta, ei kuori riitä niille, ja muuttuvia kuluja aiheutuu purun käytöstä. Investointikulun pienentäminen on tärkein tavoite yhdistettyjä prosesseja kehitettäessä.

7. UUSIEN VAIHTOEHTOJEN KÄYTTÖPOTENTIAALI

7.1 Käyttömahdollisuudet nykytilanteessa

Jos kuorta ei myydä ja sähkö on edullista, on kuorikattila ja POR-huippukattiloiden yhdistelmä edelleenkin lähes kaikilla sahoilla kilpailukykyisin lämmöntuotantotapa. Silti yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto pienvoimalalla tai ORC-prosessilla on vakaasti otettava vaihtoehto yli 200 000 m³/a sahaavilla sahoilla. Liitteessä 2 on tällaisia laitoksia 14 kpl. Jos ajatellaan että näistä viisi suurinta käyttäisi pienvoimalaa ja loput ORC-prosessia, voisi sähköntuotanto olla n. 270 GWh ja installoitu sähköteho noin 60 MW. Teho jakautuisi puoliksi kummallekin prosessille.

Jos saha voi myydä kaukolämpöä, on lämmöntuotanto varsin kannattavaa. Oletetaan, että kaukolämmön myynti on jossain määrin mahdollista kaikilta 150 000-200 000 m³/a tuottavilta sahoilta. Tällöin lämpökuorma olisi myös näillä sahoilla riittävän suuri pienvoimalalle tai ORC-prosessille. Laitoksia voitaisiin tämän kokoluokan sahoille rakentaa n. 10-15 kpl. Potentiaali lupaavimmille prosesseille voisi olla nykytilanteessakin yhteensä 25-30 laitosta. Se merkitsisi sähköntuotantona 300-400 GWh.

Käytännössä jokainen saha jo tuottaa tarvitsemansa lämmön. Yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto voi siis astua mukaan uudisrakentamisen, saneerauksen tai kapasiteetin laajentamisen yhteydessä. Vaikka laitos olisikin arvioitu kannattavaksi, voi suuren pääoman hankkiminen olla riskien takia hankalaa.

Riskejä ovat esimerkiksi:

- suhdanteiden vaikutus
- kaukolämmön kysynnän vaihtelut
- lisäpolttoaineen saatavuus ja hinta
- tekniset ongelmat, "lastentaudit"
- koulutetun työvoiman saanti

Ehkä tärkeimpänä ja vaikeasti ennustettavana ongelmana voidaan pitää suhdanteita. Voimalan käyttö osatehoilla vähentää kannattavuutta ja antaa yleensä huonomman hyötysuhteen. ORC-prosessi tosin on hyvin säädettävissä, mutta sitäkään kerran rakennettuna ei kannata seisottaa. Suhdanteet ovat koko maan tuotannossa vaikuttaneet niin, että lamavuosien tuotanto on ollut jopa 40 % vähemmän kuin huippuvuosina. Näin suuri pudotus yksittäisen sahan tuotannossa ja lämpökuormassa merkitsee jo kannattamatonta voimalaa. Tuotannon vaihtelu voidaan huomioida jo suunnitteluvaiheessa. Tällöin voimaloiden käyttömahdollisuudet vähenevät, koska tarvitaan suurempi tuotanto varmistamaan että huipunkäyttöaika pysyy korkeana.

Kovin pitkälle voimalan kannattavuutta ei kannata laskea kaukolämmön myynninkään varaan. Sen kulutus vaihtelee huomattavasti enemmän kuin sahan lämmönkulutus. Riskejä tulee edelleen myös tekniikasta. Vaikka koelaitoksia ja laskelmia olisi tehty, voi

kenttäoloissa paljastua mm. polttoaineen laadun vaihtelusta aiheutuvia hankaluuksia. ORC-prosessin valvojalta edellytetään lisäksi alikonemestarin pätevyyttä, joten työvoiman saantikin voi aiheuttaa ongelmia.

Muita tutkittuja yhdistettyjä prosesseja ei voi pitää nykytilanteessa kannattavina. Jos prosessi käyttää ostopolttoainetta, ja kannattavuus on laskettu sivutuotteiden myynnin varaan, on riski jälleen suuri. Sivutuotteiden menekki tulisi olla silloin turvattu.

7.2 Käyttömahdollisuudet kilpailukyvyn muuttuessa

7.2.1 Investointien pieneneminen

Kun pidetään pienvoimalan kannattavuusrajana 300 000 m³:n tuottoa, ei näin isoja sahoja ole Suomessa kuin n. 5 kpl. Mitä edellä arvioitiin pienvoimalan investointien vaikutuksesta, tulisi pienvoimala kannattavaksi jo n. 200 000 m³:n sahoilla jos investoinnit pienenevät 30 %. Tämän kokoluokan sahoja on jo 17 kpl. Näille asennetut pienvoimalat, yhteisteholtaan noin 80 MW, voisivat tuottaa vajaat 400 GWh.

ORC-prosessin mahdollisuudet kasvavat ratkaisevasti jos investoinnit pienenevät. Mallin mukaan n. 20 %:n vähennys investointikuluun toisi ORC-prosessin kannattavaksi 130 000 m³:n sahoilla. Potentiaalisten kohteiden määrä lisäytyisi näin noin 27:llä ja ORC-prosesseilla tuotettu sähköenergia kasvaisi 110 GWh:sta 270 GWh:iin. Prosessien installoitu teho kasvaisi 30 MW:sta 70 MW:iin. Vaikka ORC-prosessin henkilötöön ja investointien määrää kyettäisiin vähentämään samanaikaisesti, prosessi ei näytä kannattavalta alle 100 000 m³:n sahoilla. Tätä pienemmissä tehokokoluokissa yksikkökustannukset nousevat liian jyrkästi.

Tutkituista yhdistetyistä prosesseista mikään ei selviä kilpailussa kuorikattilan kanssa, ellei polttoaineena käytetä kuorta. Kaasutusdieselin investointien tulisi pudota 70 %, jotta se olisi kannattava, ja silloinkin yli 250 000 m³:n sahoilla.

Pölypolttoturpiiniin osalta arveltiin ettei se pysty epäpuhtauksien takia hyödyntämään kuorta, vaan ainoastaan purua. Mikäli purulla on myyntiarvoa, ei pölypolttoturpiiniin perustuva vaihtoehto ole milään investoinneilla kannattava kuorikattilaan verrattuna. Mikäli se kykenisi käyttämään kuorta, mahdollisuudet olisivat paremmat.

Kaasuturpiini ja maakaasukattila ovat vaihtoehtoja, jos kaasua on saatavilla. Maakaasukattila kilpailee kuorikattilan kanssa vain aivan pienimmissä kokoluokissa. Muuten se on edullisempi kuin POR-kattila.

7.2.2 Sähkön kallistuminen

Jos sähkön hintaa nostetaan edellä lasketulla tavalla, siirtyy pienvoimalan kannattavuus kohti pienempiä sahakokoluokkia. Vaikutus on likimain sama kuin jos investoinnit pienenisivät 30 %. Suomessa olisi viiden sahan sijasta 17 pienvoimalalle riittävän isoa sahaa. Näille installoidut pievoimalat olisivat teholtaan n. 80 MW ja niiden sähköntuotanto olisi n. 400 GWh.

ORC-prosessin kohdalla sähkön hinnan kohoaminen 52 mk/MWh toisi sen kuorikattilan kanssa kilpailukykyiseksi jo 130 000 m³:n tuotannolla. Koska tätä pienemmissä kokoluokissa ORC-vaihtoehdon kokonaiskustannukset nousevat jyrkästi, ei asetelmassa tapahdu suuria muutoksia vaikka investoinnit pienenisivät samalla kun sähkön hinta kohoaa. Sähkön hinnan kohoaminen lisäisi ORC-prosessin mahdollisuuksia noin 27 sahalla.

Ajatellaan, että sähkön hinnan noustua 17 suurinta, yli 200 000 m³:n sahaa, käyttää pienvoimalaa ja loput (15 kpl) 120 000-200 000 m³:n sahat ORC-prosessia. Sähkötuotannossa päästäisiin silloin noin 520 GWh:iin. Uusi installoitu sähköteho olisi noin 110 MW, josta pienvoimalatehoa 80 MW ja ORC-prosessitehoa 30 MW.

8. YHTEENVETO

VTT:n koordinoimassa bioenergian tutkimusohjelmassa on tutkittu bioenergian korjuuta ja käyttöä. Bioenergian käyttö vähentää hiilidioksidipäästöjä, tuo työtä sekä lisää omavaraisuutta. Suomessa ja muualla maailmassa on kehitetty eri termodynaamisiin prosesseihin perustuvia pieniä biopolttoainetta käyttäviä voimaloita. Jos ne olisivat kilpailukykyisiä, niitä voisi käyttää mekaanisessa metsäteollisuudessa jalostamaan kuorta ja purua lämmön ohella sähköksi.

Mekaaninen metsäteollisuus synnyttää tuotannossaan runsaasti puuperäisiä sivutuotteita. Esimerkiksi vanerintuotannossa on päätuotteen saanto raaka-aineesta vain n. 30 %, sahateollisuudessa n. 40 %. Sellun raaka-aineeksi kelpaava hake pääsääntöisesti myydään. Sahauksessa syntyvä puru käy useimmiten myös kaupaksi lastulevyn valmistukseen. Kuori, pöly ym. sivutuotteet käytetään lämmöntuotantoon. Mekaanisessa metsäteollisuudessa on pitkään käytetty bioenergiaa, mutta toistaiseksi vain lämmöntuotannossa.

Kaikki mekaanisen metsäteollisuuden valmistusprosessit käyttävät lämpöä. Levytehtaissa käytetyt lämpötilat ovat suurempia kuin sahateollisuudessa, joka käyttää n. 120°C vettä sahatavaran kuivaamiseen. Sahateollisuuden volyyymi on suurempi kuin levyteollisuuden. Alemmasta lämpötilasta, tasaisesta lämpökuormasta sekä sahateollisuuslaitosten suuresta määrästä johtuen Suomessa voisi olla lukuisia sahoja missä bioenergiaan perustuva yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto uusilla voimalaprosesseilla olisi kannattavaa pienissä, nettolämpötehoiltaan 1-20 MW:n laitoksissa.

Kannattavuuden laskemiseksi ja eri voimalavaihtoehtojen vertailemiseksi muuttuvissa kilpailutilanteissa suunniteltiin sahalaitoksen energianhankinnan kustannuslaskentamalli, jonka avulla pystyttiin helposti vertailemaan eri energianhankintavaihtoehtoja sahallalla. Eri polttoaineita käyttävien, vain lämpöä tuottavien kuumavesikattiloiden lisäksi käsiteltiin biopolttoainuvoimaloista höyryturpiiniin perustuvaa pienvoimalaa, kaasutusdieselä, pyrolyysiöljy-dieselä, pölypolttoturpiinia, ORC-prosessia ja kaasuturpiinia.

Lähes aina edullisimmaksi lämmöntuotantoratkaisuksi osoittautui kuorikattila ja POR-huippukattila. Yhdistelmä onkin yleisin käytössä oleva ratkaisu. Alle 15 000 m³ vuodessa sahaaville sahoille voi olla edullisempaa käyttää ostettavaa polttohaketta, jos kuorijäte ei muodostu ongelmaksi. Isoilla, yli 250 000 m³/a tuottavilla sahoilla ovat ORC-prosessi tai pienvoimala kilpailukykyisiä vaihtoehtoja. Niiden avulla saha voi vähentää sähkön ostosta aiheutuvia kustannuksia tai hankkia tuloja myymällä ylimääräistä tehoa esim. yöaikaan.

Kuorelle ei perustapauksessa laskettu arvoa, purulle annettiin arvo 45 mk/MWh. Kuorta käyttävissä vaihtoehtoisissa pyrittiin aina ensin käyttämään oma kuori ja vasta sitten oma puru. Peruslämmön ja huippulämmön tuotantokapasiteetit pyrittiin mitoittamaan niin, että huippukattilana toimivaa POR-kuumavesikattilaa tarvittaisiin mahdollisimman vä-

hän. Peruslämpöä tuottavan prosessin huipunkäyttöaika saatiin näin korkeaksi. Kuivauksen katsottiin toimivan 7000 h/a.

Erillislämmöntuotantoon liittyvä yllättävä tulos oli se että sahan voi olla kannattavaa myydä kuori ja käyttää itse ostohaketta. Mikäli kuori voidaan myydä, vaikkapa hintaan 20 mk/MWh, voidaan tällä tulolla ostaa tilalle polttohaketta ja käyttää sitä investointikustannuksiltaan edullisemmassa hakekattilassa. Kuorikattilan investointi ei tällöin rasita sahaa ja kuori tulee käytettyä isommassa voimalassa ilman pienestä kokoluokasta johtuvia teknisiä hankaluuksia.

Suomessa on noin 200 tilastokeskuksen toimipaikkarekisterissä olevaa sahaa. Näistä noin 50:llä on niin iso sahatavaratuotanto että yhdistetty sähkön- ja lämmöntuotanto biopolttoaineilla voisi periaatteessa olla mahdollista. Jos ORC-prosessin tai pienvoimalan investointikulut pienenevät 30 % saattaisi ORC-prosessin käyttö tulla Suomessa kannattavaksi n. 27 sahalla, joiden tuotanto ylittää 130 000 m³/a. Pienvoimala ei ole ORC:n kanssa yhtä kilpailukykyinen pienissä kohteissa, mutta investointien pienentyessä sekin voitaisiin periaatteessa ottaa käyttöön n. 17 sahalla. Jos sähkön hinta nousee n. 20 % on vaikutus sama kuin jos investoinnit pienenevät 30 %. Jos 17 suurinta sahaa käyttäisi pienvoimalaa ja loput yli 120 000 m³:n sahat ORC-prosessia, olisi näiden yhteenlaskettu sähköteho noin 110 MW ja sähköntuotanto noin 520 GWh.

Muiden tutkittujen voimalaprosessien kilpailukyvyn paranemiseksi niiden tulisi joko käyttää polttoaineenaan kuorta tai niiden investointien tulisi pienentyä ratkaisevasti. Edes investointien pienentyminen ei aina auta siinä tapauksessa että voimalaprosessi käyttää kalliimpaa ostopolttoainetta. Asetelma muuttuu yhdistetyn tuotannon eduksi jos sähkön hinta nousee. Alle 130 000 m³/a sahaavilla sahoilla on vaikeata saada mitään yhdistettyä prosessia kannattavaksi nousevien ominaiskustannusten takia.

9. LÄHDELUETTELO

- Beckman, D., et al 1990, *Techno-economic assessment of selected biomass liquefaction processes*, VTT Tutkimuksia 697, ESPOO 1990, ISBN 951-38-3719-X, ISSN 0358-5077, 256 s.
- Esping, B. 1977, Svenska Träforskningsinstitutet, *Handbok i virkestorkning*, STFI-meddelande, Serie A nr. 443 (TT:74), 663 s., s.408.
- Helynen Satu 1993, *Pienvoimalaitospotentiaali Suomessa*, Pienvoimalaitosseminaari, Jyväskylä 16.-17.3.1993, VTT Poltto- ja lämpötekniikan laboratorio, 1993.
- Indufor Oy 1994, *Sahakkeen mittausta ja arvo sekä sahan sivutuotteiden käyttö energiäntuotannossa*, Suomen Sahat ry:n teettämässä tutkimuksessa.
- Juvonen R., Kariniemi J. 1985, Suomen puuteollisuusinsinöörien yhdistys ry, *Vaneriteollisuus*, Mekaaninen metsäteollisuus 1, Valtion painatuskeskus, Helsinki 1985, ISBN 951-859-742-1.
- Juvonen R., Pekkinen P. 1987, Suomen puuteollisuusinsinöörien yhdistys ry, *Lastulevyteollisuus*, Mekaaninen metsäteollisuus 3, Valtion painatuskeskus, Helsinki 1987, ISBN 951-860-055-4.
- Juvonen, R., Johansson, P. E. 1986, Suomen puuteollisuusinsinöörien yhdistys ry, *Sahateollisuus*, Mekaaninen metsäteollisuus 2, Valtion painatuskeskus, Helsinki 1986, ISBN 951-859-690-5.
- Kaila Anjal 1964, Suomen puuteollisuusinsinöörien yhdistys ry., *Mekaaninen puuteollisuus II*, Kuitulevyteollisuus, Joensuu 1964.
- Kaivola Risto 1979, *Mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotetutkimus, Osaraportti 5*, Mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteiden arvo polttoaineena, Lappeenranta 1979, ISBN 951-763-098-0, 31 s., s. 5.
- Koivuniemi Tapani 1988, *Sahateollisuuden kapasiteetin ja pääomatarpeen välinen riippuvuudesta*, Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan laitos, Puun mekaanisen teknologian laboratorio, Tiedonanto 51, Espoo 1988.
- KTM 1982, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, *Turvetta ja puuta polttavien pienvoimalaitosten tekniset ratkaisuvaihtoehdot ja kannattavuus*, Sarja D:16, Valtion painatuskeskus, Helsinki 1982, ISBN 951-46-6530-9.
- KTM 1995, Kauppa- ja teollisuusministeriö, Energiaosasto, Lämpölaitosyhdistys, *Kiinteän polttoaineen lämpökeskuksen muuntaminen lämmön ja sähkön yhteistuo- tantonlaitokseksi ORC-energiamuuntimella*, Raportti H19/1995, ISSN 0784-0195.
- Marjokorpi T. et al. 1983, *Mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimus 1980-1982*, energiahuollon kirjallisuusselvitys, VTT Tiedotteita 179, Espoo 1983, ISSN 0358-5085, ISBN 951-38-1654-0.
- McCarroll Robert L. & Partanen William E. 1993, *On-site power generation for the future*, artikkelin julkaisusarjasta ei ole tietoja.
- Metsäteollisuus ry. 1995a, *Metsäteollisuuden vuosikirja 1995*, Espoo 1995, vuosikirjat 1979-1985, ISSN 0780-4717.

- Metsäteollisuus ry. 1995b, *Ympäristönsuojelun vuosikirja 1995*, Espoo 1995, ISSN 0789-9858.
- Metsäteollisuus ry. 1995c, *Avain Suomen metsäteollisuuteen*, Espoo 1995, ISSN 1238-4135.
- Oravainen Heikki 1994, VTT Energia, Poltto- ja konversiotekniikat, *Lämpölaitostekniikan kehitystarve kokoluokassa <2 MW*, Projekt ENE3115302, Jyväskylä 1994, Joensuun yliopiston metsäosastolle tehty tilaustyö.
- Salminen Kimmo 1964, Suomen puuteollisuusinsinöörin yhdistys ry., *Mekaaninen puuteollisuus I. Puutavaran keinokuivaus*, Joensuu 1964, s. 378.
- Siekinen V., & Pajuoja H. 1992, *Suomen piensahat 1990*, Metsäntutkimuslaitos Helsinki 1992, Folia Forestalia 784, Tampere 1992, ISSN 0015-5543, ISBN 951-40-1193-7.
- Sähkölaitosyhdistys ry 1996, lehdistötiedote 18.1.1996, Helsinki 1996.
- Sähkötarkastuskeskus 1994, Suomen sähkölaitosyhdistys ry., *Sähkölaitostilasto 1993*, Helsinki 1994, ISSN 0356-6803.
- Tekniikka & talous 1996, “*Keski-Suomi on kaukolämpökäytössä*”, Mika Hämäläinen, Nro. 12, 21.3.1996.
- Tilastokeskus 1980-1995, *Teollisuus* -sarjan julkaisut 1981-1987 sekä *Teollisuuden vuosikirja osa 1 vuosilta 1988-1995*, Helsinki, ISSN 1784-8226.
- Tilastokeskus 1994, *Teollisuuden vuosikirja osa 1 1994*, Helsinki 1994, ISSN 0784-8226, s. 183.
- Tilastokeskus 1995a, *Energiatilastot 1994*, Helsinki 1995, ISBN 951-727-125-5, ISSN 0784-9354, s. 76.
- Tilastokeskus 1995b, *Teollisuuden vuosikirja osa 1 1995*, Helsinki 1995, ISSN 1784-8226, s. 189.
- Tilastokeskus 1995c, *Julkaisemattomat tulosteet toimialan 14, “Puutavaran ja puutuotteiden valmistus”, alakohdista vuosilta 1986-1993*. Tilastokeskus, Heikki Pihlaja, Helsinki 1995.
- Tilastokeskus 1995d, *Toimipaikkarekisteri toimialan 1410 “Puun sahaus höyläys ja kylästäys”, toimipaikoista vuonna 1993*. Julkaisematon, Tilastokeskus, Heikki Pihlaja, Helsinki 1995.
- Usenius Arto 1982, *Mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimus 1980-1982*, Yhteenveto, VTT Tutkimuksia 137, Espoo 1982, ISSN 0358-5077, ISBN 951-38-1644-3, 168 s.
- Usenius Arto, Järvi Antti 1983, *Mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimus 1980-1982, Kuitulevyteollisuuden energiankulutus*, VTT Tutkimuksia 187, Espoo 1983, ISSN 0358-5077, ISBN 951-38-1808-X, 36 s., s. 17.
- Usenius Arto, Koskela Kyösti 1983, *Mekaanisen metsäteollisuuden energiatutkimus 1980-1982, Lastulevyteollisuuden energiankulutus*, VTT Tutkimuksia 200, Espoo 1983, ISSN 0358-5077, ISBN 951-38-1811-X, 45 s., s. 16.

LIITTEET

- Liite 1. Suomen puulevyä, -viilua tai vastaavia tuotteita valmistavat tehtaat ja integraatit 1993-1995. 1 s.
- Liite 2. Tilastokeskuksen toimipaikkarekisterin sahat ja niiden arvioitu kapasiteetti 1993. Luettelosta on pyritty poistamaan höyläystä ja kyllästystä harjoittavat laitokset, jotka kuuluvat samaan toimialaluokitukseen (1410) sahalaitosten kanssa. Sahalaitoksia jää näin jäljelle n. 200. Kapasiteettitietoja on kerätty mm. Metsäteollisuus ry:n julkaisuista (Metsäteollisuus ry 1995a-b). Liitteen kuvioon on yhdistetty listalla olevien kapasiteettien jakautuma. 4 s.
- Liite 3. Laskentamalli ja muuttujat. Sahatavaratuotantona on käytetty 250 000 m³. 9 s.
- Liite 4. Laskennassa käytetty sahan lämpökuorman arvioitu pysyvyyskäyrä. 1 s.
- Liite 5. Laskentamallissa käytetyt investoinnit ja muut kokoluokasta riippuvat muuttujat lämpötehon mukaan kokoluokittain. 11 s.
- Liite 6. Sahatavaran energiakustannukset, sähkö ja lämpö, eri energianhankintavaihtoehtoilla. 1 s.
- Liite 7. Sahatavaran energiakustannusten rakenne eräillä tutkituilla energianhankintavaihtoehtoilla. 3 s.

Suomen puulevyä, -viilua tai vastaavia tuotteita valmistavat tehtaat ja integraatit 1993-1995 (Integraateissa s=sahatavaraa, v=vaneria, l=lastulevyä).

	Yhtiö	Laitos	Tuotanto 1993 m ³
	VANERI:		
vl	Schauman Wood Oy	Pelloksen tehtaot Ristiina	71000
	Schauman Wood Oy	Savonlinnan tehdas	63000
	Schauman Wood Oy	Heinolan vaneritehdas	36700
	Schauman Wood Oy	Kuopion vaneritehdas	36430
	Schauman Wood Oy	Joensuun vaneritehdas	35000
	Schauman Wood Oy	Lahden tehdas	33000
	Schauman Wood Oy 1)	Viipurin vaneritehdas Lpr	32900
	Schauman Wood Oy	Kaukaan vaneritehdas	31926
	Schauman Wood Oy	Säynätsalo	30068
	Schauman Wood Oy	Viialan tehdas	21800
sv	Schauman Wood Oy 2)	Jyväskylä Lutakko	12400
	Finnforest Oy	Suolahti	42000
	Finnforest Oy	Punkaharju	42000
vl	Finnforest Oy	Keuruu	2700
svl	Koskisen Oy	Koskisen Oy	40000
sv	Visuvesi Oy	Visuvesi	22000
	Vammalan vaneri	Vammalan tehdas	15000
sv	Heinolan Aihiotuota Oy	Heinolan Saha ja puulevy	6200
svl	ISKU Oy	Lahti	8500
	Mahogany Oy	Lohja	7800
	Vilkon Oy	Hirvensalmi	3000
	YHTEENSÄ:		593424
	LASTULEVY:		
	Puhos Board Oy	Puhos	189500
vl	Finnforest Oy	Keuruu	104000
svl	Koskisen Oy	Järvelä	53000
vl	Schauman Wood Oy 2)	Pelloksen tehtaot	52000
l	Suomen Kuitulevy Oy	Heinola kuitu- & lastulevy	13900
svl	ISKU Oy	Lahti	32000
	YHTEENSÄ:		444400
	KUITULEVY:		m ³
	Suomen Kuitulevy Oy	Pihlavan tehdas	80000
l	Suomen Kuitulevy Oy	Heinola kuitu- & lastulevy	41500
	YHTEENSÄ:		121500

Tuotteen tuotanto lopetettiin: 1) 1995, 2) 1994.

Yritys	Toiminimi/ -paikka	Lääni	Paikkakunta	Koko 1993
Kaukas OY		5	Lappeenranta	400000
Metsä-Serla OY	Vilppulan saha	4	Vilppula	400000
Enso-Gutzeit OY	Honkalahden saha	5	Joutseno	350000
Yhtyneet sahat OY	Seikun saha	2	Pori	310000
Enso-Gutzeit OY	Kiteen saha	7	Puhos	300000
Tampella Forest OY	Tolkkisten saha	1	Tolkkinen	260000
Metsä-Serla OY	Metsä-Saimaan saha	5	Lappeenranta	250000
Wisaforest OY AB	Wisatimber	10	Jakobstad	235000
Enocell OY	Uimaharjun saha	7	Uimaharju	230000
Enso-Gutzeit OY	Varkauden saha	8	Varkaus	230000
Tavasttimber OY	Rengon saha	4	Renko	230000
Yhtyneet sahat OY	Korkeakosken saha	4	Korkeakoski	220000
Yhtyneet sahat OY	Kajaanin saha	11	Kajaani	215000
Yhtyneet sahat OY	Sotkamon saha	11	Vuokatti	215000
Koskisen OY	Järvelän saha	4	Järvelä	200000
Veitsiluoto OY	Veitsiluodon saha	12	Kemi	200000
Vierumäen teollisuus OY		6	Vierumäki	200000
Botnia Wood OY AB	Merikarvian saha	2	Merikarvia	180000
Vapo Timber OY	Kevätniemen saha	7	Lieksa	180000
Vapo Timber OY	Hankasalmen saha	9	Hankasalmi as	180000
Keiteleen teollisuussaha OY		8	Keitele	170000
Paloheimo OY	Riihimäen saha	4	Riihimäki	170000
Botnia Wood OY AB	Ent. Kemi OY saha	12	Kemi	160000
Enso-Gutzeit OY	Kotkan tehtaat Norjan saha	5	Kotka	160000
Kuhmo OY	Kuhmon saha	11	Kuhmo	160000
Kyro Wood OY	Timinsaaren saha	4	Kyröskoski	160000
Luvian saha OY		2	Luvia	140000
Metsä-Serla OY	Kyrön saha	2	Kyrö	140000
Aureskoski OY		4	Aureskoski	130000
Kuopion saha OY	Soinlahden saha	8	Soinlahti	125000
Botnia Wood OY AB	Teuvan saha	10	Teuva	120000
Kuopion saha OY	Kuopion saha	8	Kuopio	120000
Haminan veistosaha OY		5	Hamina	100000
Alavuden puunjalostustehdas OY		10	Alavus	96000
Enso-Gutzeit OY	Nurmeksen saha	7	Nurmes	90000
Haapajärven Ha-Sa OY		11	Haapajärvi	90000
Raunion saha OY		2	Koivukylä	90000
Tavasttimber OY	Kosken saha ent. Enso-Gutzeit	4	Koski	90000
A. Ahlström OY	Pihlavan saha	2	Pori	85000
ER-Saha OY		9	Viitasaari	85000
Innomer OY		6	Otava	85000
Yhtyneet sahat OY	Parkanon saha	4	Parkano	85000
Heinolan aihiotuote OY		6	Heinola	80000
Pölkky OY		11	Kuusamo	80000
Tampella Forest OY	Inkeröisten saha	5	Inkeroinen	80000
Olavi Räsänen OY	Kiepin saha	6	Mäntyharju	75000
Yhtyneet sahat OY	Kettulan saha	4	Juttila	75000
Iisalmen sahat OY	Peltosalmen saha	8	Peltosalmi	70000
Ulea OY	saha / Investointi	11	Taivalkoski	70000
Heinolan aihiotuote OY	Ent. Schauman Wood OY Jkl	9	Jyväskylä	65000
Yhtyneet sahat OY	Leivonmäen saha	9	Leivonmäki	60000
Asko OY	Forssan metsä ja saha	4	Forssa	50000
A. Santaholma OY		11	Kalajoki	40000
Ritaspuu OY		1	Hyvinkää	40000
Santion saha OY	Santion saha OY	2	Koski TL	40000
Veljet Kuusisto saha	laitila	2	Laitila	40000
Iisveden metsä OY	Iisvesi	8	Iisvesi	35000
Junnikkalan saha OY		11	Kalajoki	35000
Parme OY	Humppila	4	Humppila	35000
Vapo Timber OY	Paltamon saha	11	Paltamo	35000
Akonkosken saha OY		10	Töysä	30000
Kittilä Wood OY		12	Kittilä	30000

1=Uudenmaan lääni, 2=Turun ja Porin lääni, 4=Hämeen lääni, 5=Kymen lääni, 6=Mikkelin lääni, 7=Pohjois-Karjalan lääni, 8=Kuopion lääni, 9=Keski-Suomen lääni, 10=Vaasan lääni, 11=Oulun lääni, 12=Lapin lääni.

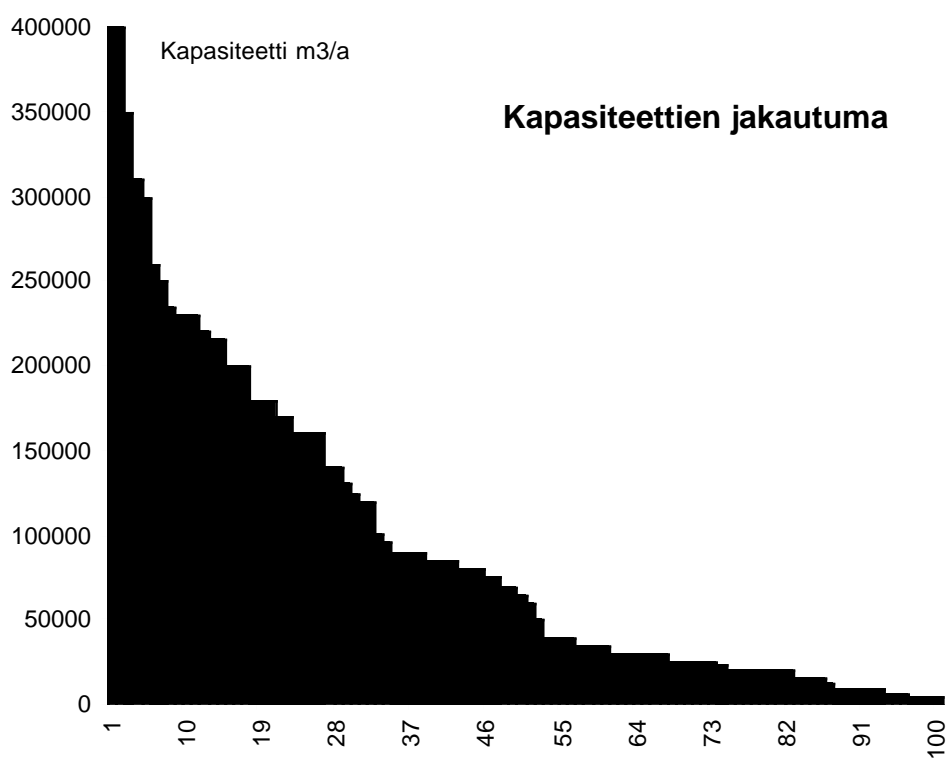
Yritys	Toiminimi/ -paikka	Lääni	Paikkakunta	Koko 1993
Käkikosken saha		1	Porlammi	30000
Laakkala Pentti Kaarlo		4	Vääksy	30000
Myllyahon saha ky		10	Kurejoki	30000
Visuvesi OY	Visuvesen saha	4	Visuvesi	30000
Vääksyn saha		4	Vääksy	30000
Haapakosken tehdas OY	Puunkäsittely	6	Haapakoski	25000
Heikinmäen saha OY		10	Soini	25000
Kairilan saha L ja J. Varjonmaa	Kairilankylä	2	Lassila	25000
Kinnaskoski ky		4	Vilppula	25000
Multian saha OY		9	Multia	25000
Vapo Timber OY	Peuravuonon saha	12	Ivalo	25000
Jet-Puu OY		10	Möttönen	24000
Forsen OY AB	Forsen OY AB	10	Terjärv	20000
Herralan saha ky	Herrala	4	Herrala	20000
Lapuan sähkö OY		10	Lapua	20000
Mikkolan saha OY		5	Kausala	20000
Raula & Kivimäki OY	Raulan saha OY	2	Hinnerjoki	20000
Tiaisen saha		5	Heituinlahti	20000
Viitalan saha		10	Peräseinäjoki	20000
Vilkon OY	Vilko	6	Hirvensalmi	20000
Luopajärven saha OY	Jalasjärvi	10	Luopajärvi	15000
Nurmi Martti Herman	Parkano	4	Parkano	15000
Pielaveden saha OY		8	Säviä	15000
Puutavaraliike Onni Kylänpää		2	Lappi TL	15000
Mäntsälän saha ky		1	Mäntsälä	13000
Carl Rundberg AB		13	Jomala	10000
Kampin saha ky		2	Lavia	10000
Koivulan saha ky		2	Roismala	10000
Kyyjärven saha OY		9	Kyyjärvi	10000
Metsäliitto SW OY	Eskolan puu	10	Eskola	10000
Myllyniemen saha OY		7	Uusi-Värtsilä	10000
Kitulankosken saha OY		10	Kitula	7000
Kouvolan saha OY		5	Kouvola	7000
Sorriin saha OY	Topeno	4	Topeno	7000
Haka-Wood OY AB	Permonen	9	Viitasaari	5000
Ilmajoen saha OY		10	Ilmajoki	5000
Matti Leinonen ky	saha	6	Anttola	5000
Sulkavan saha ky		6	Sulkava	5000
Ahopellon saha ky		10	Hernesmaa	
Arolan höyläämö ky		2	Vampula	
Arvopuu OY		5	Anajalankoski	
Botnia-Wood OY AB	Kaskinen	10	Kaskinen	
Deltamax OY	Kursu	12	Salla	
Enon höyläämö ky		7	Ahveninen	
Haapavesi OY		11	Haapavesi	
Hippeläisen saha ky		4	Rautajärvi	
HK-Tuotanto OY		5	Poitsila	
Höljäkkä OY		7	Höljäkkä	
Höylä- ja puutuote lautanen OY		1	Orimattila	
Ivalon puu ky	Petsamontie	12	Ivalo	
Jannpuu OY		11	Paltamo	
JR-Puu ky		8	Suonenjoki	
Jylhän saha OY		10	Jylhä	
Jylhän saha OY		10	Jylhä	
Kaakkois-Suomen listarakenne OY		5	Savitaipale	
Kalliolan mylly ja saha		2	Lokalahti	
Kartiopuu OY	Lappeenrannan toimipaikka	5	Lappeenranta	
Kaukas OY	Puutuotetehtaat	5	Luumäki	
Kellon saha ky		11	Kello	
Kemijärven puutuote		12	Kemijärvi	
Keski-Suomen Puukympit OY	Vaajakoski	9	Vaajakoski	
Keurak oy		9	Keuruu	

1=Uudenmaan lääni, 2=Turun ja Porin lääni, 4=Hämeen lääni, 5=Kymen lääni, 6=Mikkelin lääni, 7=Pohjois-Karjalan lääni, 8=Kuopion lääni, 9=Keski-Suomen lääni, 10=Vaasan lääni, 11=Oulun lääni, 12=Lapin lääni.

Yritys	Toiminimi/ -paikka	Lääni	Paikkakunta	Koko 1993
Kilpivaara OY		11	Kuusamo	
Kingwood OY		4	Nastola	
Kiuruveden saha OY		8	Kiuruvesi	
Koivulaihnen OY	Laihasen saha	4	Kolho	
Kokemäki Timber OY	Kuurola	2	Kokemäki	
Koneveisto Rautio OY		6	Mäntyharju	
Kontiolahden höyläämö ky		7	Kontiolahti as.	
Kontion saha OY	Kurkilahti	6	Anttola	
Kosken höyläämö ky		4	Koski HL	
Kovjoki såg		10	Kovjoki	
Kuolimon puu OY		5	Suomenniemi	
Kurtin saha OY		11	Kuusamo	
Kyyveden saha OY		6	Haukivuori	
Köminkosken saha ky		9	Haapamäki	
Lahten kaupunki	Saha ja kyllästämö	4	Lahti	
Laineen saha OY		2	Laitila	
Lampelan saha OY		12	Posio	
Lauri Nikander ky	Pilpala	4	Pilpala	
Liperin höyläämö ky		7	Rinteellä	
Lopen rakennuspuu OY	Sokala	4	Sokala	
Lumparlands Såg AB		13	Lumparland	
Lähteenkorvan saha OY		2	Kallträsk	
Marjolahden saha		4	Parkano	
Masan puu OY		2	Pori	
Messupuu OY		4	Tampere	
Metsä-Serla OY	Ukkolan saha	7	Ukkola	
Metsäliitto SW OY	Mustolan vestosaha	5	Lappeenranta	
Mäkilän saha	Mäkilän saha, Heinijoki	2	Yläne	
Nerkoon höyläämö OY		4	Linnankylä	
Noormarkun saha OY		2	Noormarkku	
Oulun rakennuspuu OY	Höylä	11	Oulu	
Paltamon höylä- ja puutuote ky		11	Paltamo	
Panelia Woods OY		1	Klaukkala	
Parkanon lista OY		4	Parkano	
Pintopuu OY		2	Eura	
Pitkäpuu OY		1	Kerava	
Pohjolan pylväs OY		2	Pertteli	
Porin pituuspaketointi OY		2	Pori	
Punkasalmen saha ja höylä OY		6	Punkasalmi	
Puulappi OY	Käpylä	12	Kittilä	
Puum. Rajamäki & Ruotsalainen	sahaus	10	Kauhajärvi	
Puutavaraliike L Nakolinna ky		2	Turku	
Puutavaraliike lappalainen OY		7	Eno	
Puutavaraliike P.Karvonen ky		11	Yli-ii	
Puutavaraliike Vuollet ky	Vuolteentie	10	Tervajoki	
Pyhännän rakennustuote OY	Pyhäsalmen saha	11	Pyhäsalmi	
Pyyn saha ja höyläämö		11	Oulainen	
Päras OY AB	Träimpregnering	10	Kronoby	
Raiskinmäen puu ky		4	Seinäjärvi	
Raiskion saha		2	Sarvela	
Raumantien puu OY		2	Pori	
Ravijoen saha		5	Ravijoki	
Renlund OY AB	Peltosen puutavara	4	Lahti	
Rounan saha OY	Marttilan saha	2	Marttila TL	
Rukapuu		11	Kuusamo	
Räättäriin ky		5	Lappeenranta	
Sahakonttori OY AB	Karhukorven saha	1	Nurmijärvi	
Saikkonen & Lusminki		12	Kemijärvi	
Salheikki OY		11	Ylikkieminki	
Savon voima OY	Alapitkän saha	8	Alapitkä	
Suolahden höyläämö ky		9	Suolahti	
T:mi Hakasen saha	Roismala	2	Roismala	

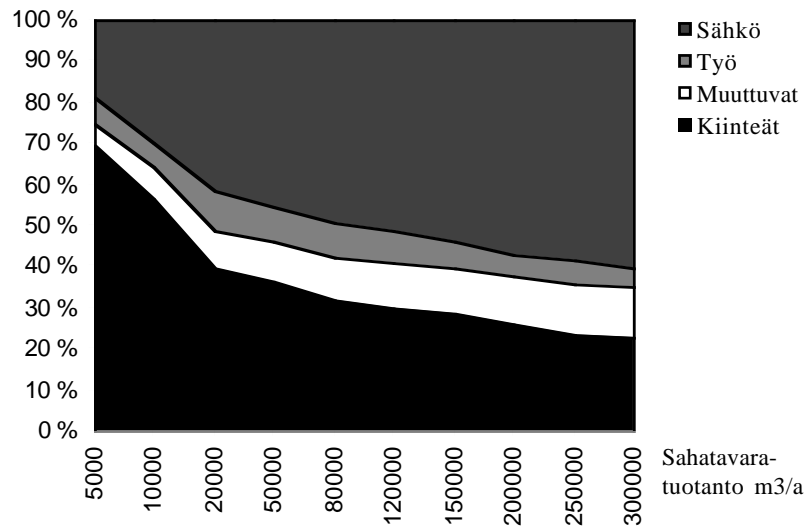
1=Uudenmaan lääni, 2=Turun ja Porin lääni, 4=Hämeen lääni, 5=Kymen lääni, 6=Mikkelin lääni, 7=Pohjois-Karjalan lääni, 8=Kuopion lääni, 9=Keski-Suomen lääni, 10=Vaasan lääni, 11=Oulun lääni, 12=Lapin lääni.

Yritys	Toiminimi/ -paikka	Lääni	Paikkakunta	Koko 1993
Talasniemen saha ja puutyö ky		6	Sysmä	
Tervolan saha ja höyläämö ky		12	Tervola Kaisajoki	
Tillman ky		11	Muhos	
Turun kaupunki	Halkosaha	2	Turku	
Vaatervuori OY		9	Rutalahti	
Valkealan saha ky		5	Valkeala	
Varkauden puu Timo Tenhunen ky		8	Varkaus	
Veisto-Rakenne Rautio OY	Kissakosken saha	6	Hirvensalmi	
Veistorakenne Rautia OY	Kokkoslahden saha	6	Anttola	
Veljekset Vaara ky		12	Tervola	
Veljet Kuusisto	Lapin saha	2	Karhunselkä	
Värivalmis OY		12	Kemi	
Yhtyneet sahat OY	Rauman saha	2	Rauma	
Ylivieskan saha ja höyläämö		11	Ylivieska	

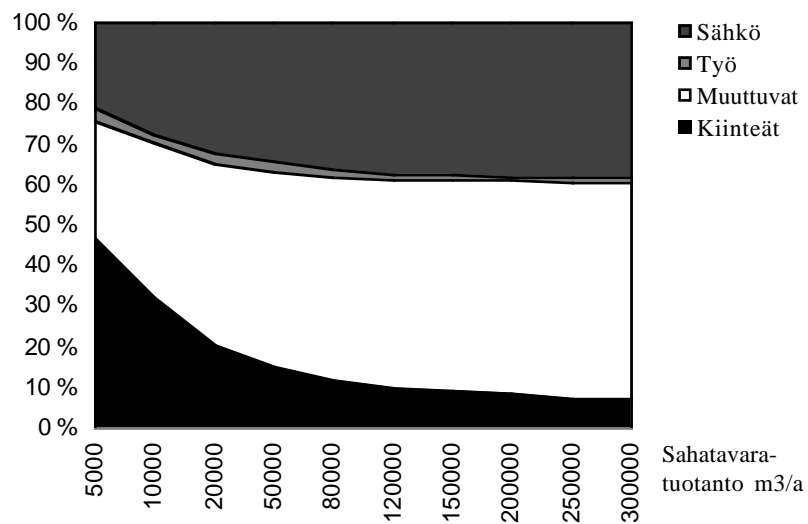


1=Uudenmaan lääni, 2=Turun ja Porin lääni, 4=Hämeen lääni, 5=Kymen lääni, 6=Mikkelin lääni, 7=Pohjois-Karjalan lääni, 8=Kuopion lääni, 9=Keski-Suomen lääni, 10=Vaasan lääni, 11=Oulun lääni, 12=Lapin lääni.

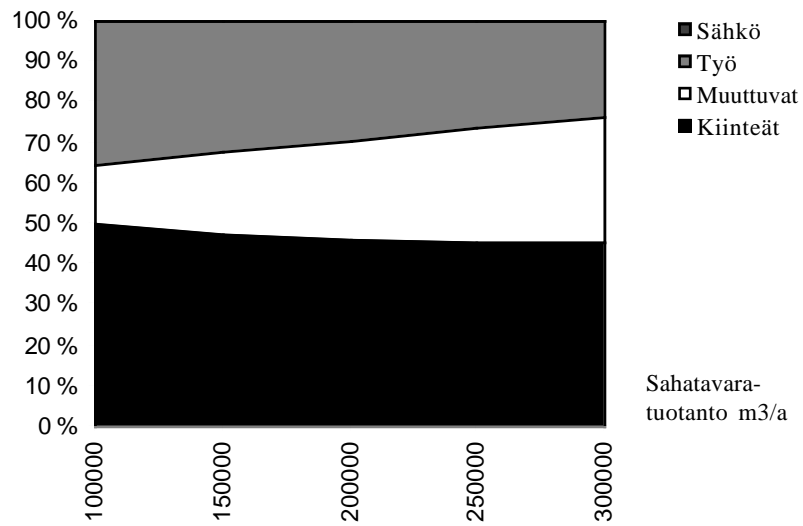
Sahatavaran energiakustannusten rakenne kuorikattilavaihtoehdossa



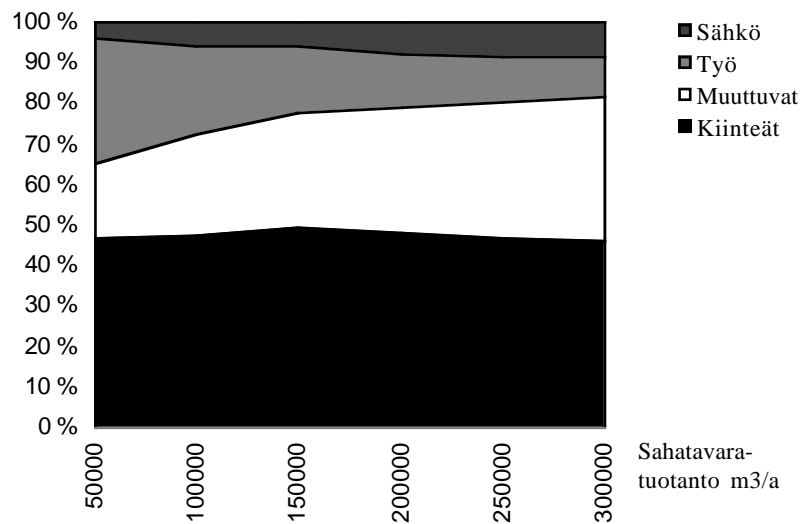
Sahatavaran energiakustannusten rakenne POR-kuumavesikattilalla



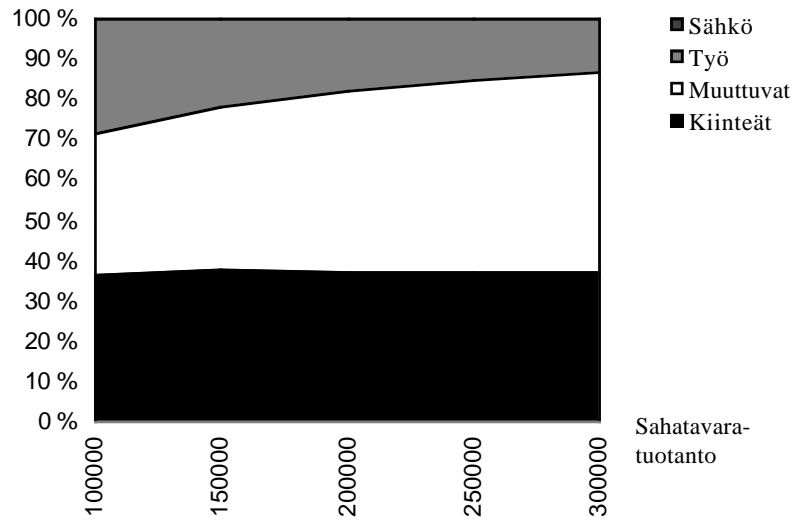
Sahatavaran energiakustannusten rakenne pienvoimalaratkaisussa



Sahatavaran energiakustannusten rakenne ORC-prosessiratkaisulla



**Sahatavaran energiakustannusten rakenne
pölypolttoturpiini -vaihtoehdolla**



**Sahatavaran energiakustannusten rakenne
kaasutusdiesel -vaihtoehdolla**

