



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

AKI KONTTURI  
UUSIUTUVAN ENERGIAN HYÖDYNTÄMINEN PARIHUVILAN  
ENERGIANTUOTANNOSSA  
Diplomityö

Tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 8. joulukuu-  
ta 2010

# TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**KONTTURI, AKI:** Uusiutuvan energian hyödyntäminen parihuvilan energiantuotannossa

Diplomityö, 86 sivua, 3 liitesivua

Huhtikuu 2011

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Työn tarkastaja: Lehtori Risto Mikkonen

Avainsanat: Uusiutuva energia, aurinkokenno, tuulivoima, polttokenno, aurinkokeräin, lämpöpumppu, polttopuu, kiinteistön energiantarve, energiaratkaisu

Tässä diplomityössä tarkastellaan uusiutuvien energiamuotojen hyödyntämismahdollisuuksia parihuvilan energiantarpeen kattamiseksi. Suunnitteilla oleva rakennus täyttää nykyiset asuinrakennukselle asetetut rakentamismääräykset. Työn keskeisenä tavoitteena on kartoittaa uusiutuvien energiateknologioiden käyttöpotentiaali rakennuksen energiantuotannossa ja löytää kiinteistölle uusiutuvaa energiaa hyödyntävä kustannustehokas energiaratkaisu.

Yleiskuvan luomiseksi esitetään rakennuksen suunnittelu- ja sijaintitiedot, joiden perusteella selvitetään kiinteistön sähkö- ja lämpöenergian tarve. Uusiutuvista sähköenergiantuotantomuodoista perehdytään aurinko-, tuuli- ja polttokennoteknologioiden teoreettiseen taustaan ja tarkastellaan näiden soveltuvuutta energiantuotantoon kiinteistön sijaintipaikalla. Huomiota kiinnitetään myös varavoimaan sekä sähköenergian varastoimiseen akkuihin ja vetyyn. Pienikiinteistön lämmöntuotantomenetelmistä tarkastelun alaisena ovat polttopuun lämpöarvo ja käyttö, aurinkokeräinten ja lämpöpumppujen rakenne ja toimintaperiaate sekä sähköenergian käyttö lämmöntuotannossa. Lisäksi tarkastellaan lämpöenergian varastoimiseen liittyviä kysymyksiä.

Rakennuksen energia-analyysin perusteella kiinteistölle suunnitellaan yhdeksän erilaista energiaratkaisua, joista viidessä sähköenergia hankitaan verkkoyhtiön sähköliittymän kautta ja neljässä energiantuotanto perustuu kiinteistön omaan energiajärjestelmään. Lopuksi kustannuslaskelmaan nojaten ehdotetaan kiinteistölle soveltuvaa energiaratkaisua ja jatkotoimia.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**KONTTURI, AKI:** Utilization of Renewable Energy Production for a Double Cottage

Master of Science Thesis, 86 pages, 3 Appendix pages

April 2011

Major: Alternative Electric Energy Technology

Examiner: Lecturer Risto Mikkonen

Keywords: Renewable energy, solar cell, wind power, fuel cell, solar collector, heat pump, fire wood, energy solution

This thesis work focuses on utilization of renewable energy sources to cover the energy needs of a two apartment cottage. The building is designed to fulfil current building regulations of a common dwelling-house in Finland. The main goal is to examine the potential to use the renewable energy technologies and find a suitable and cost effective energy solution for the building at the site.

To create a basic background the planning and location information are handled first. Electrical and heat energy needs of the cottage are calculated based on planning, location and usage information. Theoretical background of solar cell, wind power and fuel cell technologies are covered and the usage of these technologies for electricity production at the location are analysed. Attention is also given to reserve power and the storage of electrical energy to batteries and hydrogen. From a theoretical point of view the heating value and usage of fire wood, the structure and working principle of solar collectors and heat pumps, and the usage of electricity for heating purposes are considered. Also, some methods for storing heat energy are brought up.

According to the energy analysis of the building, nine separate energy solutions are designed, in five of which electrical energy is bought from the electrical network of the local electric company and in four of which the energy production is based on real estate's own production unit. Finally, based on the cost analysis of each energy solution, a suitable solution for the building is proposed and guidelines are given for further actions.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Elektroniikan laitoksen Sähkömagneetiikan yksikössä syksyn 2010 ja alkutalven 2011 välisenä aikana. Aihe työn tekemiselle syntyi omasta mielenkiinnostani pienkiinteistöjen energiantuotantojärjestelmiä kohtaan. Tämän työn selvitys on tehty yhden kiinteistön näkökulmasta eivätkä tulokset välttämättä sellaisenaan soveltu muihin kohteisiin. Käytettyjä menetelmiä voidaan toki soveltaa muidenkin kiinteistöjen energiaratkaisuja pohdittaessa. Toivon, että tekemästäni selvityksestä olisi hyötyä ja iloa lukijoille ja aihepiiristä kiinnostuneille.

Haluan esittää lämpimät kiitokseni lehtori Risto Mikkoselle työn tarkastamisesta ja ohjaamisesta sekä selkeistä ja mielenkiintoisista luennoista opintojeni aikana. Haluan kiittää myös lehtori Aki Korpelaa sekä tähän työhön liittyvän lausunnon antamisesta että opintojeni aikana saamastani asiallisesta ja kannustavasta palautteesta. Kiitokset kuuluvat myös arkkitehti Niklas Lähteenmäelle tässä työssä käsiteltävän kiinteistön pohjakuvan piirtämisestä sekä Finnwind Oy:n toimitusjohtaja Ismo Kantoselle tuuli- ja aurinkoenergiasovelluksiin liittyvistä arvokkaista kokemuksista ja neuvoista.

Lopuksi haluan kiittää vaimoani Katjaa innostamisesta opintojeni suorittamiseen. Hän on omalla työllään mahdollistanut ajankäyttöni tämän työn tekemiseen.

Hattulassa 1.3.2011

Aki Kontturi  
Kettumäentie 36  
13880 Hattula

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	1
2	TARKASTELTAVA KIINTEISTÖ.....	3
3	SÄHKÖN TUOTANTO .....	5
3.1	AURINKOKENNOT.....	5
3.1.1	<i>Aurinkokennon toimintaperiaate</i> .....	6
3.1.2	<i>Piistä valmistetut aurinkokennot</i> .....	7
3.1.3	<i>Ohutkalvokennot</i> .....	8
3.1.4	<i>Väriainekennot</i> .....	9
3.1.5	<i>Aurinkokennon tuottama energia</i> .....	9
3.1.6	<i>Aurinkoenergian saatavuus</i> .....	12
3.2	TUULIVOIMA .....	15
3.2.1	<i>Tuulivoimalatyypit</i> .....	15
3.2.2	<i>Tuulen ja tuulivoimalan teho</i> .....	17
3.2.3	<i>Tuulivoimalan toiminta ja säätö</i> .....	17
3.2.4	<i>Tuulivoimalan ympäristövaikutukset</i> .....	18
3.2.5	<i>Tuuliolosuhteet</i> .....	19
3.2.6	<i>Tuulivoimalan tuottama energia</i> .....	21
3.3	POLTTOKENNOT .....	23
3.3.1	<i>Polttokennon toimintaperiaate</i> .....	24
3.3.2	<i>Polttokennotyypit</i> .....	25
3.3.3	<i>Polttokennon hyötysuhde ja tuottama energia</i> .....	28
3.3.4	<i>Polttoaineen saatavuus</i> .....	30
3.4	VARAVOIMA.....	31
3.5	SÄHKÖENERGIAN VARASTOINTI.....	32
3.5.1	<i>Akut</i> .....	32
3.5.2	<i>Vety</i> .....	35
4	LÄMMÖN TUOTANTO.....	37
4.1	PUU.....	37
4.1.1	<i>Polttopuun lämpöarvo</i> .....	37
4.1.2	<i>Polttopuun energiasisältö ja hinta</i> .....	39
4.2	AURINKOKERÄIMET .....	40
4.2.1	<i>Aurinkolämpöjärjestelmän toiminta ja rakenne</i> .....	40
4.3	SÄHKÖ.....	42
4.4	LÄMPÖPUMPUT.....	43

4.5	LÄMMÖN VARASTOINTI .....	45
4.5.1	<i>Varaavat tulisijat</i> .....	46
4.5.2	<i>Lattia</i> .....	46
4.5.3	<i>Vesi</i> .....	47
5	KIINTEISTÖN ENERGIAN TARPEEN MÄÄRITTÄMINEN .....	49
5.1	LÄMMÖN TARVE .....	49
5.2	SÄHKÖN TARVE .....	55
5.3	KIINTEISTÖN ENERGIAN TARVE .....	59
6	KIINTEISTÖN ENERGIAN TUOTANNON TARKASTELU .....	61
6.1	SÄHKÖLIITTYMÄN SISÄLTÄVÄT JÄRJESTELMÄT .....	61
6.2	OMAVARAISET JÄRJESTELMÄT .....	65
7	ENERGIAVAIHTOEHTOJEN KUSTANNUKSET.....	72
7.1	SÄHKÖLIITTYMÄN SISÄLTÄVIEN JÄRJESTELMIEN KUSTANNUKSET .....	73
7.2	OMAVARAISTEN JÄRJESTELMIEN KUSTANNUKSET .....	75
8	KIINTEISTÖN ENERGIA RATKAISUN VALINTA.....	78
	LÄHTEET .....	81
	LIITE 1: RAKENNUKSEN POHJAKUVA.....	87
	LIITE 2: OTE KIINTEISTÖN RAKENNUSPAIKAN KAAVASTA .....	88
	LIITE 3: AURINKOPANEELIEN MARKKINAHINTOJA .....	89

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$\alpha$	kohtauskulma
$\beta$	eksponentti tuulen nopeuden korkeusriippuvuusyhtälössä
$\Gamma(n)$	yleinen gammafunktio muuttujan arvolla $n$
$\varepsilon$	säteilypinnan emissiviteetti
$\zeta$	lämpöpumpun lämpökerroin
$\zeta_{\max}$	lämpöpumpun lämpökertoimen maksimiarvo
$\eta$	hyötysuhde
$\lambda$	lämmönjohtavuus, $W/(m \cdot K)$
$\mu_f$	polttoaineen hyödyntämiskerroin
$\rho_i$	ilman tiheys, $kg/m^3$
$\rho_b$	betonin tiheys, $kg/m^3$
$\rho_v$	veden tiheys, $kg/m^3$
$\sigma$	Stefan-Boltzmannin vakio
$A$	pinta-ala, $m^2$
$A_i$	rakennusosan $i$ pinta-ala, $m^2$
$A_w$	Weibull-jakauman määräparametri, $m/s$
$a$	annuiteettitekijä
$c$	ominaislämpökapasiteetti, $kJ/(kg \cdot K)$
$c_b$	betonin ominaislämpökapasiteetti, $kJ/(kg \cdot K)$
$c_{pi}$	ilman ominaislämpökapasiteetti, $J/(kg \cdot K)$
$c_{pv}$	veden ominaislämpökapasiteetti, $J/(kg \cdot K)$
$c_t$	tiilen ominaislämpökapasiteetti, $kJ/(kg \cdot K)$
$\bar{D}$	ilmanvastuksen suunta
$dT$	lämpötilaero, $K$
$dx$	johtumistien pituus, $m$
$E_w$	tuulen liike-energia, $J$
$e$	Neperin luku
$F$	Faradayn vakio
$\bar{F}$	voiman suuntavektori
$f$	täytekerroin

$G$	auringonsäteilyn intensiteetti, $W/m^2$
$g_f$	Gibbsin vapaa energia, $kJ/mol$
$H_{iv}$	ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö, $W/K$
$H_{vi}$	vuotoilman ominaislämpöhäviö, $W/K$
$\sum H_{joht}$	rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö, $W/K$
$h_o$	vertailukorkeus, $m$
$h_1$	tarkastelukorkeus, $m$
$h$	konvektion lämmönsiirtymiskerroin, $W/(m^2 \cdot K)$
$\Delta h$	moolinen entalpian muutos, $kJ/mol$
$I$	virta, $A$
$I_D$	diodin virta, $A$
$I_L$	auringonsäteilyn aurinkokennossa tuottama virta, $A$
$I_o$	pn-liitoksen saturaatiovirta, $A$
$I_{sc}$	oikosulkuvirta, $A$
$i$	laskentakorkokanta
$k$	Boltzmannin vakio
$k_w$	Weibull-jakauman muotoparametri
$kg/m^3$	polttopuun massa kiintokuutiometriä kohti
$kg/p-m^3$	polttopuun massa pinokuutiometriä kohti
$kg/i-m^3$	polttopuun massa irtokuutiometriä kohti
$\bar{L}$	nostovoiman suuntavektori
$M_{ar}$	puun kosteusprosentti
$m$	massa, $kg$
$N$	elektronien lukumäärä
$n$	ainemäärä, $mol$
$n_a$	lämmön talteenoton vuosihyötysuhde
$n_{50}$	ilmanvuotoluku paine-eron ollessa $50 Pa$ , $1/h$
$P$	teho, $W$
$P_{max}$	maksimiteho, $W$
$P_w$	tuulivoimalan teho, $W$
$Q$	lämpöenergia, $J$
$Q_{joht}$	rakenteiden läpi johtuva lämpöenergia, $kWh$
$Q_l$	lämpöpumpun tuottama lämpöenergia, $kWh$
$Q_{lkv}$	vedenlämmityksen tarvitsema energia, $kWh$
$p$	kaasun paine, $Pa$



$q$	alkeisvaraus
$q_c$	konvektiivinen lämpövirta, $W$
$q_{cal}$	puun kalorimetrinen lämpöarvo, $MJ/kg$
$q_j$	johtumislämpövirta, $W$
$q_{net}$	tehollinen lämpöarvo, $MJ/kg$
$q_{net,ar}$	kostean puun tehollinen lämpöarvo, $MJ/kg$
$q_{net,d}$	kuivan puun tehollinen lämpöarvo, $MJ/kg$
$q_r$	säteilemällä siirtyvä lämpövirta, $W$
$q_{vp}$	poistoilmavirta, $m^3/s$
$q_{vv}$	vuotoilmavirta, $m^3/h$
$R_\Omega$	resistanssi, $\Omega$
$R$	yleinen kaasuvakio
$T$	lämpötila, $K$
$T_h$	lämpöpumpun höyrystimen lämpötila, $K$
$T_{kv}$	kylmän veden lämpötila, $K$
$T_l$	lämpöpumpun lauhduttimen lämpötila, $K$
$T_{lkv}$	lämpimän käyttöveden lämpötila, $K$
$T_p$	pinnan lämpötila, $K$
$T_s$	sisäilman lämpötila, $K$
$T_u$	ulkoilman lämpötila, $K$
$T_\infty$	ympäristön lämpötila, $K$
$t$	aika, $h$
$\Delta t$	aikajakson pituus, $h$
$U_i$	rakennusosan $i$ lämmönläpäisykerroin, $W/(m^2 \cdot K)$
$\bar{U}_m$	liikkeestä aiheutuvan ilmavirtauksen suuntavektori
$\bar{U}_o$	tuulen suuntavektori
$\bar{U}_w$	suhteellinen tuulen suuntavektori
$V$	jännite, $V$
$V_g$	kaasun tilavuus, $m^3$
$V_i$	rakennuksen ilmatilavuus, $m^3$
$V_{lkv}$	lämpimän käyttöveden kulutus, $m^3$
$V_m$	todellinen tyhjäkäyntijännite, $V$
$V_{oc}$	tyhjäkäyntijännite, $V$
$v$	tuuliturbiinille tulevan tuulen nopeus, $m/s$

$v_a$	tuulen keskinopeus, $m/s$
$v_{h_o}$	tuulen nopeus referenssikorkeudella $h_o$ , $m/s$
$v_{h_1}$	tuulen nopeus tarkastelukorkeudella $h_1$ , $m/s$
$v_w$	tuuliturbiinista lähtevän tuulen nopeus, $m/s$
$W$	työ, $J$
$W_k$	lämpöpumpun kompressorin ottama sähköenergia, $kWh$
$W_p$	aurinkokennon maksimiteho, $W$
$W(v)$	Weibull-jakauman arvo tuulen nopeudella $v$
$y$	investoinnin pitoaika, $a$
AFC	alkalipolttokenno
$a - Si$	amorfinen pii
CHP	yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto
CIGS	kupari-inidiumgalliumdiselenidi
COP	lämpöpumpun lämpökerroin
DMFC	suorametanolipolttokenno
HHV	ylempi lämpöarvo
JRC	Euroopan komission yhteinen tutkimuskeskus
LHV	alempi lämpöarvo
MCFC	sulakarbonaattipolttokenno
NTP	normaali lämpötila ja paine
PAFC	fosforihappopolttokenno
PEMFC	kiinteäpolymeeripolttokenno
PVGIS	auringonsäteilyn tietojärjestelmä
SOFC	kiinteäoksidipolttokenno
U-arvo	rakenneosan lämmönläpäisykerroin, $W/(m^2 \cdot K)$

# 1 JOHDANTO

Euroopan Unioni on asettanut tavoitteekseen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen 20%:lla vuoden 1990 tasosta ja uusiutuvan energian käytön kasvattamisen 20%:iin energian kokonaiskulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Suomen valtioneuvosto hyväksyi 6. marraskuuta 2008 pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategian, jossa uusiutuvan energian käyttöä pyritään lisäämään. Kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen on keskeinen syy uusiutuvan energian käytön lisäämistavoitteelle. Suomen tavoitteena on nostaa uusiutuvan energian osuutta energiantuotannossa 9,5% vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä, jolloin uusiutuvalla energialla katettaisiin 38% Suomen energiankulutuksesta. Tavoite on vaativa ja sen toteutumiseksi uusiutuvan energian käyttömahdollisuuksia on tarkasteltava yhteiskunnan kaikilla osa-alueilla, myös rakentamisessa.

Tässä diplomityössä tarkastellaan uusiutuvan energian hyödyntämismahdollisuuksia suunnitteluvaiheessa olevan parihuvilan energiatarpeen kattamiseksi. Työn tavoitteena on löytää ympärivuotiseen käyttöön suunnitellulle kiinteistölle uusiutuvaa energiaa hyödyntävä kustannustehokas energiaratkaisu. Vaikka selvitys on tehty yhden pienkiinteistön näkökulmasta, voidaan käytettyjä menetelmiä ja tuloksia soveltaa muidenkin pienikiinteistöjen energiaratkaisujen suunnittelussa.

Luvussa kaksi kuvataan lyhyesti tarkasteltavan kiinteistön suunnittelutiedot, sijainti ja käyttötarkoitus. Kolmannessa luvussa paneudutaan pienikiinteistölle soveltuvien sähköenergian tuotantoteknologioiden teoreettiseen taustaan. Uusiutuvista energiantuotantomuodoista tarkastellaan aurinkoenergiaa, tuulivoimaa ja polttokennoja. Huomiota kiinnitetään myös varavoimaan sekä sähköenergian varastoimismahdollisuuksiin.

Luvussa neljä käsitellään pienikiinteistön lämmöntuotantomenetelmiä teoreettisesta lähtökohdasta. Tarkastelun alaisena ovat polttopuun lämpöarvo ja käyttö, aurinkokehäntien ja lämpöpumppujen rakenne ja toimintaperiaate sekä sähköenergian käyttö kiinteistön lämmöntuotannossa. Lisäksi tarkastellaan lämmön varastoimiseen liittyviä kysymyksiä.

Viidennessä luvussa selvitetään tarkasteltavan kiinteistön energiantarve. Lämmöntarpeen laskennassa käytetään rakenteiden, ilmanvaihdon ja vuotoilman suunnitteluarvoja. Sähköenergian tarve määritetään kiinteistön sähkölaitteiden kulutuksen ja oletetun käytön perusteella. Lämpimän veden tuotannon energiantarve selvitetään kiinteistön käytön ja tilastoarvojen perusteella.

Luvussa kuusi valitaan erilaisia vaihtoehtoja tarkasteltavan kiinteistön energiantuotannon toteuttamiseksi. Tarkasteltavat energiavaihtoehdot jakautuvat omavaraisiin järjestelmiin, joissa kiinteistön tarvitsema energia tuotetaan kiinteistön omilla energiantuo-

tantolaitteilla sekä järjestelmiin, joissa tarvittava sähköenergia ostetaan paikallisen jakeluverkkoyhtiön sähköverkosta.

Luvussa seitsemän tarkastellaan kiinteistön energiavaihtoehtojen kustannuksia annuiteettimenetelmällä ja luvussa kahdeksan pohditaan kiinteistön energiaratkaisun valintaan liittyviä kysymyksiä. Lopuksi ehdotetaan tarkastellun kiinteistön energiantuotantomenetelmäksi soveltuvaa energiaratkaisua.

## 2 TARKASTELTAVA KIINTEISTÖ

Uusien rakennusten energiatehokkuusvaatimukset ovat kiristymässä. Suuntauksen taustalla ovat Kioton ilmastopöytäkirja ja Suomen energia- ja ilmastostrategia, jotka tähtäävät kasvihuonekaasupäästöjen hillitsemiseen. Suomen vuotuisesta energiankäytöstä rakennusten käyttämä osuus oli ympäristöministeriön mukaan lähes 40% vuonna 2003 [65]. Uusien rakennusten energiatehokkuusvaatimuksia käsitellään Suomen rakentamismääräyskokoelman osissa C3, C4, D2, D3 ja D5. Vuoden 2010 alusta voimaan tulleet uudistuneet määräykset kiristivät uusien rakennusten energiatehokkuutta 25-30% vuoden 2007 vaatimuksista. Vuoden 2012 alusta voimaan astuu jälleen uudet määräykset, joissa energiatehokkuusvaatimukset kiristyvät edelleen. Tässä työssä käsiteltävä rakennuskohde täyttää vuoden 2010 alusta voimaan tulleet määräykset. [44]

Tarkasteltava kohde on suunnitteluvaiheessa oleva kahden perheen ympärivuotiseen käyttöön tarkoitettu huvilarakennus. Rakennuspaikka sijaitsee Itä-Suomen läänissä Ilo-mantsin kunnan alueella. Rakennus koostuu kahdesta toisissaan kiinni olevasta huoneistosta, jotka ovat pinta-alaltaan  $85\text{ m}^2$  (osa 1) ja  $48\text{ m}^2$  (osa 2). Huoneistoista suuremmassa tulee asumaan jatkuvasti kaksi henkilöä. Pienempi huoneisto on suunniteltu nelihenkinen perheen ympärivuotiseen loma-asuntokäyttöön. Lomahuoneiston oletettuja käyttövuorokausia on 60 vuodessa, joista kesä- ja heinäkuussa molemmissa 15, loka- ja joulukuussa molemmissa 10 sekä helmi- ja huhtikuussa molemmissa 5 vuorokautta.

Rakennuksen perustamistapa on normaali maanvarainen kivijalka ja lattia. Kantavana seinärakenteena on hirsirunko sisäpuolisella lisäeristyksellä ja sisäpaneelilla täydennettynä. Kattorakenteena ovat kattotuolit yläpohjaeristeellä ja peltikatteella varustettuna. Rakennuksen suunnittelun perustiedot on esitetty taulukossa 2.1 ja pohjakuvan luonnos liitteessä 1.

**Taulukko 2.1.** Parihuvilan perustiedot Suomen rakentamismääräyskokoelmassa määritetyllä tavalla laskettuna [44].

	Osa 1 (vakituinen)	Osa 2 (loma)	Koko kiinteistö
Rakennustilavuus ( $m^3$ )	340	166	506
Kerroksen tasoala ( $m^2$ )	106	52	158
Kerroskorkeus ( $m$ )	3,2	3,2	3,2
Huonekorkeus ( $m$ )	2,55	2,55	2,55
Lattia pinta-ala ( $m^2$ )	85	48	133
Yläpohjan pinta-ala ( $m^2$ )	85	48	133
Ilmatilavuus ( $m^3$ )	212	119	331
Julkisivun pinta-ala ( $m^2$ )	79	51	130
Ikkunapinta-ala ( $m^2$ )	14,6	14	28,6
Ovipinta-ala ( $m^2$ )	6,3	2,1	8,4
Ulkoseinien pinta-ala ( $m^2$ )	58	35	93

Rakennuksen energiantarve määritetään luvussa 5. Lämpöhäviöitä selvitetäessä otetaan huomioon rakennuksen vaipan, vuotoilman sekä ilmanvaihdon aiheuttamat lämpöhäviöt suunnittelutietojen pohjalta. Lämmityksen energiantarve selvitetään Ilmatieteenlaitoksen julkaiseman Joensuun lämmitystarveluvun kuukausiarvojen perusteella. Lämmitystarveluvun vuorokausiarvo saadaan vähentämällä  $17^{\circ}\text{C}$  sisälämpötilasta ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvo. Kuukausiarvo saadaan laskemalla kuukauden vuorokausiarvot yhteen. Lämmitystarveluvun laskennassa oletetaan, että lämmitys lopetetaan, kun ulkolämpötilan vuorokausikeskiarvo ylittää keväällä  $+10^{\circ}\text{C}$  ja syksyllä  $+12^{\circ}\text{C}$ . [46] Kiinteistön sähköntarve arvioidaan valitsemalla kiinteistöön normaali nykyaikainen kodintekniikka, jonka käyttöaika on arvioitu asukaskyselyllä. Jatkuvasti päällä olevien laitteiden, kuten jääkaapin tai pakastimen osalta on tyydytty valmistajan ilmoittamaan vuotuisen energiankulutukseen. Lämpimän käyttöveden kulutukselle käytetään Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D5 henkilöperusteisia taulukkoarvoja.

Tontti, jolle rakennus rakennetaan, on  $1,5\text{ ha}$  suuruinen ja sijaitsee mäen etelärinteessä rajoittuen jokeen. Mäen pohjoispuolella on täysikasvuista puustoa, itä- ja eteläpuolella sijaitsevan jokialueen rannassa puusto on vähäistä. Länsipuolella on kasvavaa metsää. Rakennuspaikan ympäristön avoin sijainti etelän suuntaan ja mäen tuoma korkeus muuhun ympäristöön nähden luovat potentiaalia uusiutuvien energiantuotantomuotojen hyödyntämiseen rakennuksen energiantuotannossa. Ote alueen rantakaavasta on liitteenä 2.

## 3 SÄHKÖN TUOTANTO

Tässä luvussa tarkastellaan pienkiinteistön sähköntuotantoon soveltuvia uusiutuvia energiamuotoja ja niiden teoreettista taustaa. Käsittelyyn valittuja teknologioita ovat aurinkokennot, tuulivoima ja polttokennot. Kunkin teknologian osalta käsittely aloitetaan lyhyellä rakenteen ja toimintaperiaatteen esittelyllä, jonka jälkeen tarkastellaan sähköntuotantomahdollisuuksia kiinteistön sijaintipaikalla. Lopuksi huomio kiinnitetään varavoiman saantiin ja sähköenergian varastointiin.

### 3.1 Aurinkokennot

Aurinkokenno on laite, joka muuttaa auringon säteilyenergiaa suoraan sähköenergiaksi. Sähköenergian tuotantolaitteena aurinkokennolla on monia hyviä ominaisuuksia. Aurinkokenno toimii äänettömästi ja saasteettomasti. Se voidaan sijoittaa osaksi rakennuksen seinä- tai kattopintoja, minkä vuoksi aurinkokennon käyttö ei aiheuta ympäristöllisiä eikä esteettisiä haittoja. Aurinkokenno ei sisällä liikkuvia mekaanisia osia, minkä seurauksena se on laitteena kestävä, luotettava ja lähes huoltovapaa. [1]

Merkittävimmän markkina-aseman ovat saavuttaneet moni- ja yksikiteisestä piistä valmistetut aurinkokennot. Näiden ensimmäisen sukupolven aurinkokennojen etuna on kohtalaisen korkea hyötysuhde. Kiteisten piikennojen valmistus vaatii kuitenkin runsaasti materiaalia ja energiaa. Tämän johdosta niiden hinta on edelleen korkea viime vuosien lisääntyneestä tuotannosta huolimatta. [2]

Aurinkokennojen valmistus ohutkalvotekniikalla vähentää materiaalitarvetta ja valmistuskustannuksia. Näitä toisen sukupolven aurinkokennoja valmistetaan useista eri materiaaleista, joista amorfista piistä hyödyntävät kennot ovat yleisesti markkinoilla. Nämä kennot eivät hyötysuhteeltaan ole yltäneet ensimmäisen sukupolven kennojen tasolle. Lisäksi amorfisesta piistä valmistettujen kennojen ominaisuuksien on havaittu heikkenevän jo muutaman kuukauden käytön jälkeen. Toisen sukupolven aurinkokennojen tuotanto on lisääntynyt, mutta ne eivät ole onnistuneet saavuttamaan markkinoiden valta-asemaa. [1]

Aurinkokennojen tutkimus keskittyy nykyisin nanotekniikkaan perustuviin kolmannen sukupolven aurinkokennoihin, joilla pyritään toisen sukupolven kennoja edullisempaan hintaan ja ensimmäisen sukupolven kennoja korkeampaan hyötysuhteeseen. Vuoden 2010 Millenium-teknologiapalkinnon sai väriaineherkistetty aurinkokennoteknologia, joka lupaa edullisempia aurinkokennoja. Nämä ensimmäiset Grätzel-kennoiksi kutsutut sovellukset ovat tulleet jo markkinoille. Todellista läpimurtoa saadaan kuitenkin vielä odottaa. [20]

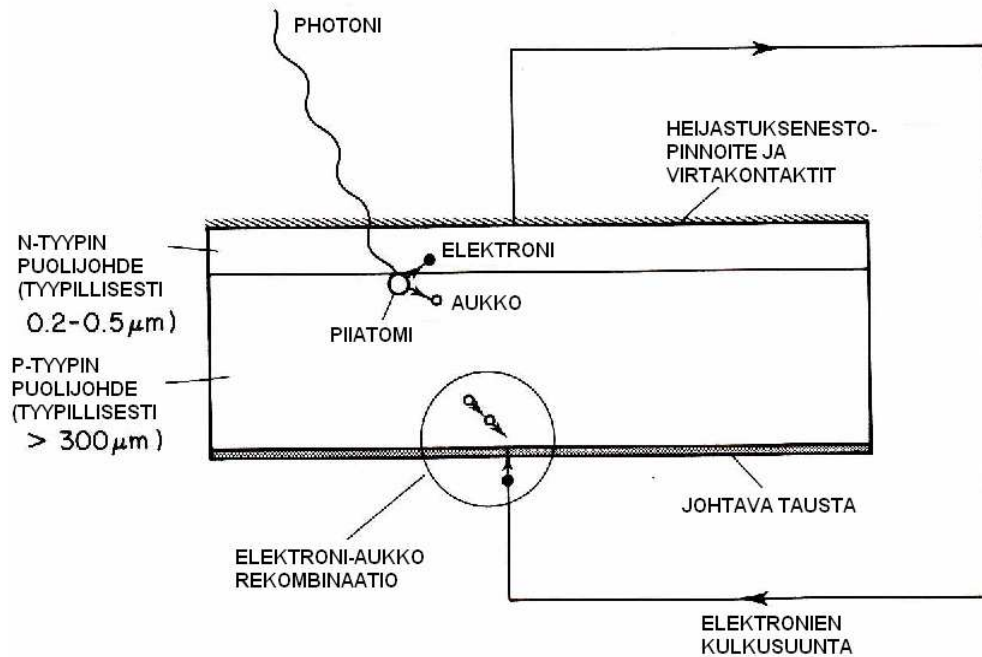
### 3.1.1 Aurinkokennon toimintaperiaate

Ensimmäisen ja toisen sukupolven aurinkokennot perustuvat puolijohdeiden käyttöön. P-tyyppin puolijohde voidaan valmistaa sekoittamalla alkuaineiden jaksollisen järjestelmän neljännen ryhmän alkuaineeseen, kuten piihin, hieman kolmannen ryhmän alkuainetta, kuten booria. Näin syntyy materiaali, jonka kiderakenteessa atomien valenssikuorilla ei ole riittävästi elektroneja oktetitirakenteen muodostamiseen ja sinne jää aukkoja. N-tyyppin puolijohde voidaan valmistaa sekoittamalla neljännen ryhmän alkuaineeseen viidennen ryhmän alkuainetta, kuten fosforia, jolloin materiaalin kiderakenteen valenssikuorille jää ylimääräisiä elektroneja. Kun p- ja n-tyyppin puolijohde liitetään toisiinsa, täyttävät n-puolen ylimääräiset elektronit p-puolen aukkoja synnyttäen sisäisen sähkökentän. [1; 3]

Puolijohdeaurinkokennon toiminnan perustana on valosähköinen ilmiö pn-liitoksen rajapinnalla. Auringonsäteilyn voidaan ajatella muodostuvan pienistä energiahiukkaskista, fotoneista. Säteilyn osuessa puolijohdemateriaaliin osa fotoneista luovuttaa energiansa materiaalin elektroneille ja mahdollistaa elektronien irtoamisen atomeista ja siirtymisen johtavuusvyölle. Näin syntyy elektroni-aukko-pareja, jotka kulkeutuvat eri suuntiin pn-liitoksen sisäisen sähkökentän vaikutuksesta. N-puolelle kulkeutuvat elektronit voidaan johtaa ulkoisen kuorman kautta p-puolelle, jolloin virtapiiri saadaan suljettua ja virta kulkemaan. [1]

Puhdas pii heijastaa yli 30% siihen tulevasta valosta. Tämän vuoksi aurinkokennot pinnoitetaan esimerkiksi pii- tai titaniumdioksidilla säteilyn heijastumisen vähentämiseksi. Lisäksi kennopinta teksturoidaan muodostamalla siihen mikrotason kartioita. Tällöin heijastunut säteily osuu helposti toiseen kartioon ja saa uuden mahdollisuuden tunkeutua kennomateriaaliin. Aurinkokennon rakennetta ja toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 3.1. [4]





**Kuva 3.1.** Piiaurinkokennon toiminta perustuu elektroni-aukko-parien muodostumiseen auringonsäteilyn fotonien tuodessa tarvittavan energian. Elektronit ja aukot kulkeutuvat eri suuntiin pn-liitoksen sähkökentän vaikutuksesta. Elektronit johdetaan ulkoisen piirin kautta p-puolelle, jossa ne voivat rekombinoitua aukkojen kanssa. [3]

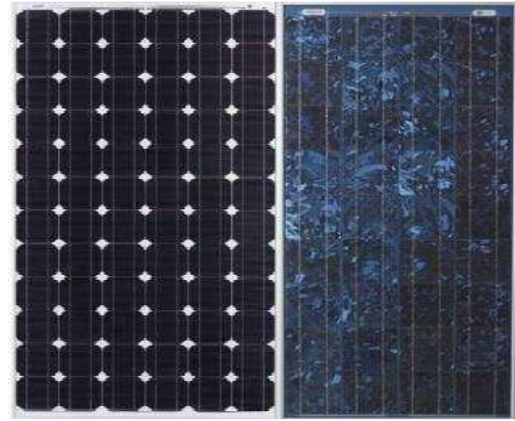
### 3.1.2 Piistä valmistetut aurinkokennot

Yksikiteiset piikennot on perinteisesti valmistettu paljon energiaa vaativalla Czochralski-menetelmällä. Menetelmä perustuu sulan piin kiteytymisprosessiin, jossa ohut ydintanko vedetään sulan piimassan läpi. Tuotteena saadaan tanko erittäin puhdaskiteistä piitä, joka sahataan ohuiksi kiekkoiksi ja jatkokäsitellään aurinkokennonmoduulin valmistusta varten. Yksikiteisestä piistä valmistetuilla aurinkokennoilla ei ole kiteiden rajapintoja, missä auringonsäteilyn synnyttämät vapaat elektronit voisivat rekombinoitua. Markkinoilla olevien yksikidekennojen hyötysuhde on 15-17%. Aurinkokennojen hinta ilmoitetaan yleensä kennosta standardiolosuhteissa saatavaa maksimitehoa kohti. Yksikiteisten piikennojen hinta on  $3,60 - 5,70 \text{ €/}W_p$  (liite 3). [1; 3]

Aurinkokennoja valmistetaan monikiteisestä piistä valamalla ne harkoiksi, sahaamalla ohuiksi levyiksi ja jatkokäsittelemällä valmiiksi kennoiksi samaan tapaan kuin yksikiteiset piikennotkin. Valmistusprosessi on kuitenkin yksikiteiseen kennoon verrattuna yksinkertaisempi ja edullisempi. Kiteiden raekoko on saatu kohtuullisen suureksi ja kiteet suuntautumaan yhdensuuntaisesti, jotta säteily pääsee helpommin tunkeutumaan rakeeseen. Monikiteisestä piistä valmistetuissa kennoissa on kuitenkin kiteiden rajapintoja, joilla elektronit voivat rekombinoitua, jolloin liikkuva elektroni menetetään. Monikiteisten aurinkokennojen hyötysuhde on 13-15% ja hinta  $3,25 - 4,70 \text{ €/}W_p$  (liite 3). [1]



**Kuva 3.2.** Monikiteisestä piistä valmistettu harkko ja yksikiteinen piitanko sekä niistä valmistetut aurinkokennot [11].

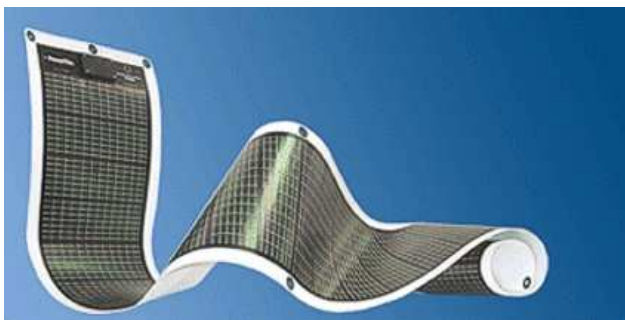


**Kuva 3.3.** Yksi- ja monikiteisestä piistä valmistetut aurinkokennomoduulit. Monikiteisen piin (oik.) kiderajat ovat selvästi näkyvillä [12].

Jotta aurinkokenno voisi tuottaa sähkövirtaa, on fotonin absorboitettava materiaalissa ja luovutettava energiansa materiaalin elektronille. Fotonin absorboitumisen todennäköisyyteen vaikuttaa mm. fotonin aallonpituus ja materiaalin paksuus. Kiteisestä piistä valmistetut aurinkokennot ovat paksuudeltaan  $300 \mu\text{m}$  luokkaa, paitsi materiaalin haurauden ja käsiteltävyyden, myös maksimaalisen absorption varmistamisen vuoksi. Näistä syistä materiaalitarvetta ja siten hintaa ei voida merkittävästi vähentää. [2]

### 3.1.3 Ohutkalvokennot

Ohutkalvokennot valmistetaan kerrostamalla puolijohdemateriaalia halutun alustan päälle. Käytettyjä materiaaleja ovat kupari-inidiumgalliumdiselenidi (CIGS), cadmiumtelluridi (CdTe) ja amorfinen pii (*a-Si*). Nämä materiaalit ovat hyviä absorboimaan auringonsäteilyä ja ohutkalvokennojen valoa absorboivan kerroksen paksuus onkin vain  $1 - 3 \mu\text{m}$  luokkaa. Ohutkalvokennot koostuvat yleensä monesta päällekkäisestä kerroksesta, joilla pyritään varmistamaan kennoon saapuneen säteilyn maksimaalinen absorboituminen. Näin fotonit saadaan muodostamaan vapaita elektroneja mahdollisimman paljon. [2]



**Kuva 3.4.** Ohutkalvokennomoduuli [13].

Ohutkalvokennot ovat rakenteensa vuoksi kestäviä ja ne voidaan valmistaa taipuisan materiaalin kuten muovin tai metallikelmun päälle, mikä lisää mahdollisuuksia kennojen sijoittamiseen rakenteisiin. Kennojen valmistuskustannukset ovat huokeammat ki-teisiin piikennoihin verrattuna vähäisemmän materiaalitarpeen ja vähemmän energiaa vaativan valmistusmenetelmän vuoksi. Markkinoilla olevien CdTe- ja CIGS-kennojen hyötysuhde on 10% luokkaa ja valmistusmäärät ovat lisääntymässä [62]. Amorfista piitä käytetään yleisesti varsinkin elektroniikkasovelluksissa vaikka niiden hyötysuhde jää alle 10% tason. Ohutkalvokennot ja niiden valmistusmenetelmät ovat jatkuvan kehityksen kohteena. Ohutkalvokennojen osuus aurinkokennojen markkinoista näyttääkin tulevaisuudessa lisääntyvän. [2]

### 3.1.4 Väriainekennot

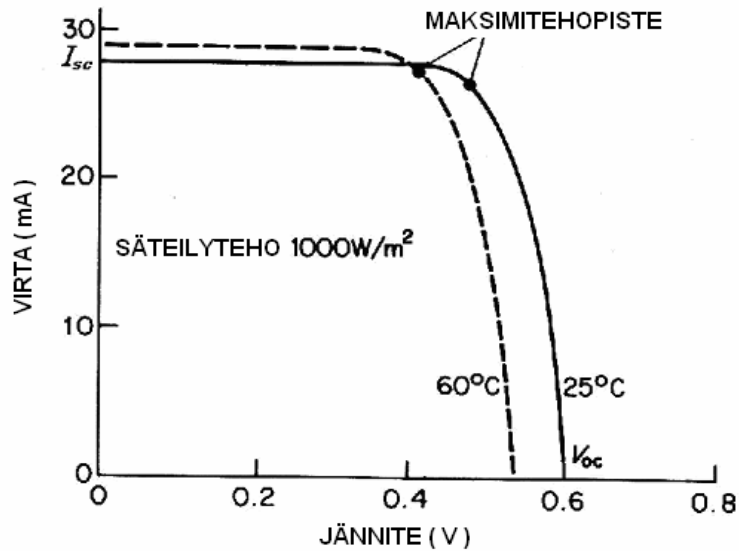
Väriaineaurinkokenno koostuu johtavalle alustalle kiinnitetystä huokoisesta puolijohde-elektrodista, nestemäisestä katalyytistä ja vastaelektrodista, jotka ovat sijoitettu esimerkiksi lasilevyjen väliin. Huokoisen puolijohteen pinnalle on kiinnitetty väriainemolekyylejä, joissa valon absorptio tapahtuu. Absorption seurauksena elektronit pääsevät siirtymään huokoiseen puolijohteeseen, josta edelleen ulkoisen piirin kautta vastaelektrodille. Vastaelektrodilla elektronit kiinnittyvät katalyyttiin ja kulkeutuvat sen mukana takaisin väriainemolekyylille. Huokoisena puolijohdemateriaalina käytetään tyypillisesti tinadioksidia ( $\text{TiO}_2$ ) ja elektrolyyttinä jodiyhdisteitä, jotka muodostavat liuotuksessa hapetin-pelkistin-pareja ( $\text{I}^-/\text{I}_3^-$ ). [2]

Väriaineaurinkokennoja voidaan valmistaa yksinkertaisella valmistusmenetelmällä kohtuullisen edullisista ja hyvin saatavissa olevista materiaaleista. Tinadioksidi sivel-lään esimerkiksi johtavan muovin tai metallilevyn päälle, kuivataan ja uutetaan väriai-neella. Kun päälle asennetaan vastaelektrodina toimiva johtava muovikalvo ja väli kos-tutetaan elektrolyyttiliuoksella, on aurinkokenno valmis käytettäväksi. Valmistuskus-tannuksia pienentää myös se, että kalliita puhdistiloja ei tarvita. Näiden kolmannen su-kupolven kennojen hyötysuhde on saatu laboratorio-olosuhteissa yli 10% tason, mutta kokemuksia kenttäolosuhteista on vielä vähän. Haasteita ovat muun muassa hyötysuh-teen parantaminen, väriaineen kestävyys ja elektrolyytin stabiilisuus sääoloja vastaan kymmeniä vuosia jatkuvassa käytössä. Kolmannen sukupolven kennot ovat vielä tutki-musasteella ja suuren mittakaavan kaupallisia sovelluksia saadaan vielä odottaa. [2; 66]

### 3.1.5 Aurinkokennon tuottama energia

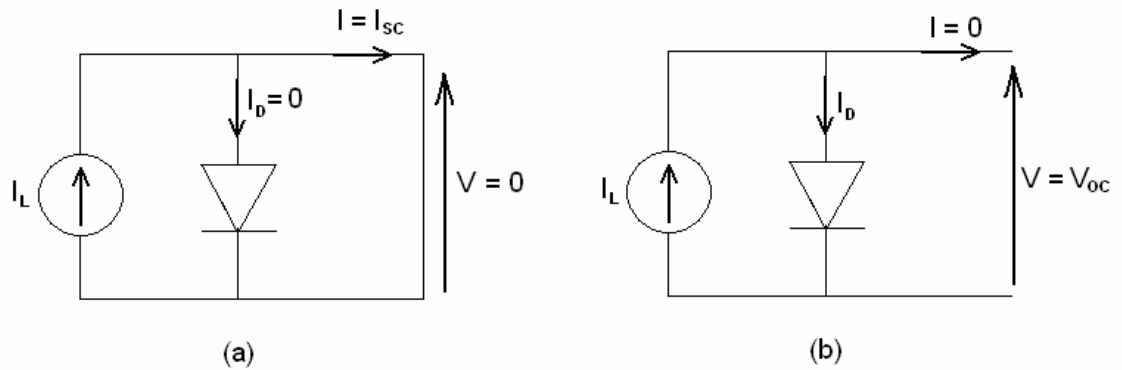
Aurinkokennon toiminta testataan standardoidussa testiolosuhteessa, jossa auringonsä-teilyn intensiteetti on  $1000 \text{ W/m}^2$ , kennon lämpötila  $25^\circ\text{C}$  ja ilmamassan paksuus  $1,5 \text{ AM}$ . Ilmamassan paksuudella tarkoitetaan säteilyn ilmakehässä kulkeman matkan suhdetta Maan ilmakehän kohtisuoraan paksuuteen. Muuttamalla ulkoisen kuorman resistanssia nolasta äärettömään eli oikosulusta avoimeen piiriin saadaan selville ken-non virta-jännite-käyrä, joka on tyypillisesti kuvan 3.5 kaltainen yhden neliösenttimetrin

kennolle. Avoimen piirin jännitettä kutsutaan tyhjäkäyntijännitteeksi  $V_{oc}$  ja vastuksettoman piirin virtaa oikosulkuvirraksi  $I_{sc}$ . Kennon maksimiteho  $P_{max}$  saadaan pisteessä, jossa virran ja jännitteen tulo on suurin. [1]



**Kuva 3.5.** Tyypillinen aurinkokennon virta-jännite-käyrä kahdessa eri lämpötilassa. Kennon lämpötilan noustessa tyhjäkäyntijännite laskee ja oikosulkuvirta suurenee. Myös maksimitehopisteen paikka muuttuu. [3]

Aurinkokennon toimintaa voidaan havainnollistaa kuvan 3.6 mukaisella auringonsäteilyyn reagoivan virtalähteen ja diodin rinnankytkennällä. Auringonsäteilyn tuoman energian vaikutuksesta osa kennomateriaalin elektroneista pääsee siirtymään johtavuusvyölle ja aikaansaa virran  $I_L$ . Diodin virta  $I_D$  kuvaa kennomateriaalissa rekombinoituvia varauksenkuljettajia, jotka pienentävät ulkoisen piirin virtaa  $I$ . Oikosulkutilanteessa  $I_D$  on nolla, jolloin kennon virta on oikosulkuvirran  $I_{sc}$  suuruinen. [4]



**Kuva 3.6.** Aurinkokennon sijaiskytkentä koostuu yksinkertaisimmillaan virtalähteen ja diodin rinnankytkennästä.  $I_L$  on auringonsäteilyn tuottama virta,  $I_D$  diodin päästösuuntainen virta ja  $I_{sc}$  oikosulkuvirta. Kohta (a) esittää oikosuljettua ja kohta (b) avoimen piirin tilannetta, jossa  $V_{oc}$  on tyhjäkäyntijännite. [4]

Kuvasta 3.6. nähdään, että aurinkokennon tuottama virta  $I$  saadaan auringonsäteilyn tuottaman virran  $I_L$  ja diodivirran  $I_D$  erotuksena. Jänniteriippuvuus saadaan esittämällä virta  $I_D$  diodin virta-jännite-yhtälön muodossa, jolloin aurinkokennon tuottamaksi virraksi saadaan

$$I = I_L - I_o \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right), \quad (3.1)$$

missä  $I_o$  on pn-liitoksen saturaatiovirta,  $q$  on alkeisvaraus,  $V$  kennon jännite,  $k$  Boltzmannin vakio ja  $T$  kennon lämpötila. Lausekkeesta havaitaan kennon virran  $I$  olevan samansuuntainen diodin saturaatiovirran  $I_o$  kanssa. Saturaatiovirta aiheutuu elektronien siirtymisestä johtavuusvyölle lämpöliikkeen seurauksena ja pn-liitoksen sisäisen sähkökentän erottaessa syntyneen elektroni-aukko-parin. Neperin luvun eksponentista nähdään, että kennon lämpötilan noustessa virta lähestyy auringonsäteilyn tuottaman virran  $I_L$  arvoa ja toisaalta jännitteen kasvaessa riittävästi kennon tuottama virta romahtaa. Jännitteen  $V$  ollessa nolla on virta suurimmillaan oikosulkuvirran suuruinen ( $I = I_L = I_{sc}$ ), jonka arvo on suuresti riippuvainen kennoon tulevan auringonsäteilyn intensiteetistä. Tämä on luonnollista, sillä mitä enemmän fotoneja absorboituu, sitä enemmän elektroni-aukko-pareja syntyy. [2; 4]

Tyhjäkäyntijännitteen lämpötilariippuvuutta voidaan arvioida ratkaisemalla yhtälöstä 3.1 jännite. Tyhjäkäyntitilanteessa paneelin virta  $I$  on nolla, jolloin tyhjäkäyntijännitteeksi saadaan

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_o} + 1\right). \quad (3.2)$$

Tyhjäkäyntijännitteen lausekkeen perusteella näyttäisi siltä, että kennon lämpötilan nousu lisäisi tyhjäkäyntijännitettä. Lämpötilan nousu kasvattaa kuitenkin saturaatiovirtaa  $I_o$  siinä määrin, että luonnollisen logaritmin arvo pienenee, mikä puolestaan aiheuttaa tyhjäkäyntijännitteen alenemisen lämpötilan noustessa. Lämpötilan vaikutusta virtaan ja jännitteeseen on havainnollistettu kuvassa 3.5. [2; 4]

Kennosta saatava maksimiteho ilmoitetaan tyhjäkäyntijännitteen  $V_{oc}$  ja oikosulkuvirran  $I_{sc}$  avulla täyterrointa  $f$  käyttäen

$$P_{\max} = f V_{oc} I_{sc}. \quad (3.3)$$

Täyterroin kuvastaa aurinkokennossa tapahtuvia rekombinaatiohäviöitä sekä virtapiirissä tapahtuvia ohmisia lämpöhäviöitä. Täytekertoimen arvon voidaankin ajatella olevan kennomateriaalin toimintakyvyn mitta. Aurinkokennon hyötysuhdetta pienentävät lisäksi kennon pinnalta heijastunut säteily ja fotonien lämmöksi muuttuva energia. [3; 4]

Lausekkeita tarkastelemalla havaittiin, että kennon lämpötilan kasvu pienentää jännitettä ja suurentaa virtaa. Tarkasteltaessa tehoa, nämä muutokset kompensoivat toisiaan ainakin osittain, mutta vaikuttavat maksimitehopisteen paikkaan kuten kuvasta 3.5 käy ilmi. Säteilyn intensiteetin muutokset puolestaan vaikuttavat suuresti kennon virtaan ja siten maksimitehopisteen paikkaan. Näiden johdosta aurinkopaneelit ovat yleensä varustettu maksimitehopisteen seuranta-automaatiikalla, jolloin paneeleista saatava hyöty paranee. Paneelin hyötysuhde saadaan maksimitehon ja paneelille tulevan säteilytehon suhteena

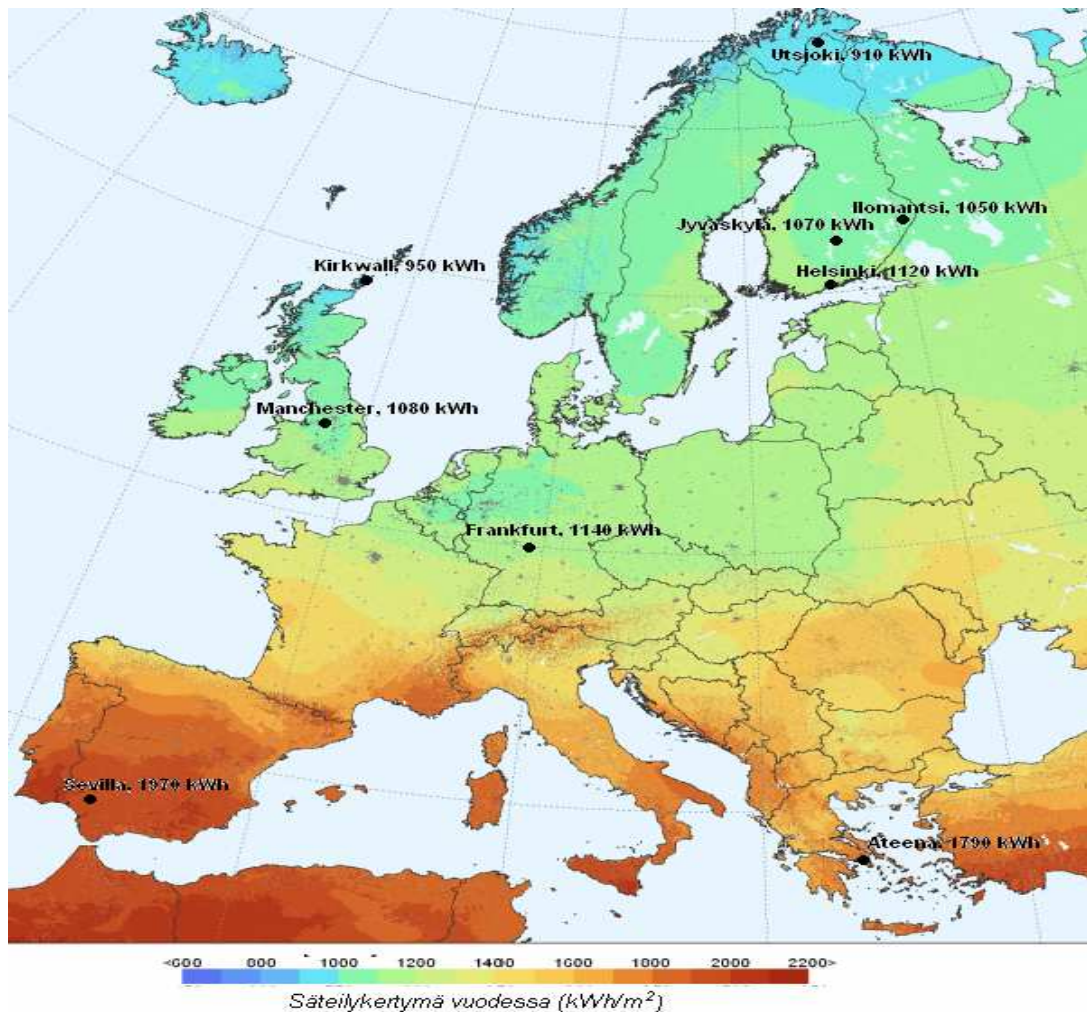
$$\eta = \frac{P_{\max}}{GA}, \quad (3.4)$$

missä  $G$  on säteilyn intensiteetti neliometriä kohti ja  $A$  on paneelin pinta-ala. [2]

### 3.1.6 Aurinkoenergian saatavuus

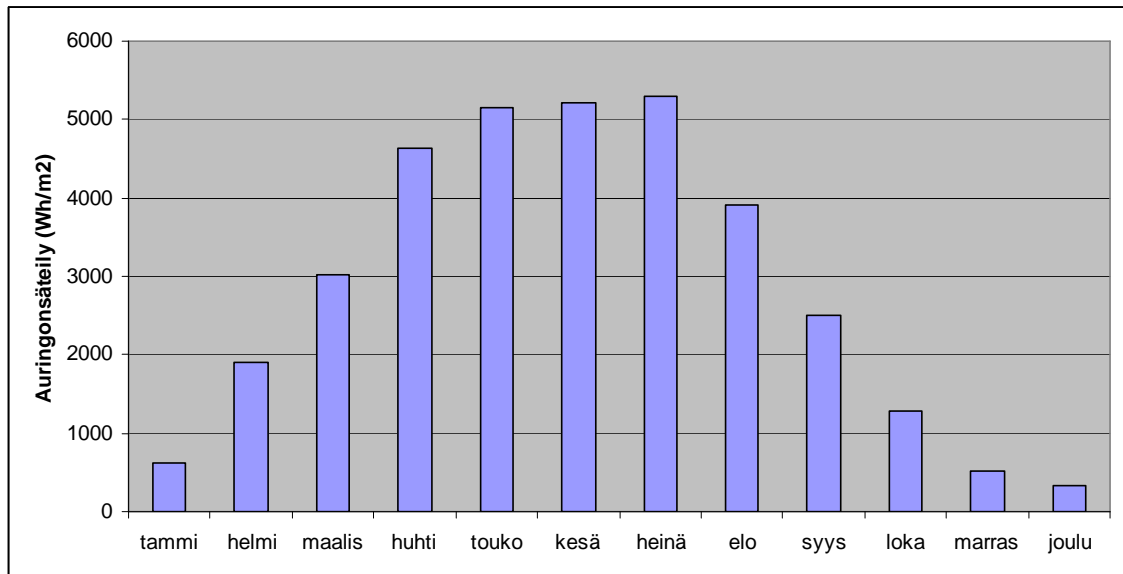
Aurinkopaneelin tuottaman sähköenergian määrään ja siten sähkön hintaan vaikuttaa merkittävästi paneelille tulevan auringonsäteilyn määrä. Paneelille tulevan säteilyn määrään voidaan vaikuttaa kääntämällä paneelin kallistus- ja atsimuuttikulmaa auringon aseman mukaan. Kun järjestelmältä halutaan huoltovapautta, suunnataan paneeli etelään, jolloin atsimuuttikulma on nolla astetta ja optimoidaan paneelitasen kallistuskulma parasta vuosituotantoa vastaavaksi leveyspiiristä riippuen. Auringonsäteilyn määrää Euroopassa voidaan arvioida Euroopan komission yhteisen tutkimuskeskuksen (JRC)

tuottaman tietojärjestelmän (PVGIS) avulla. Järjestelmän tiedot perustuvat eri puolilla Eurooppaa olevien 566:n eri havaintoaseman tietoihin vuosilta 1980-1990. [5]



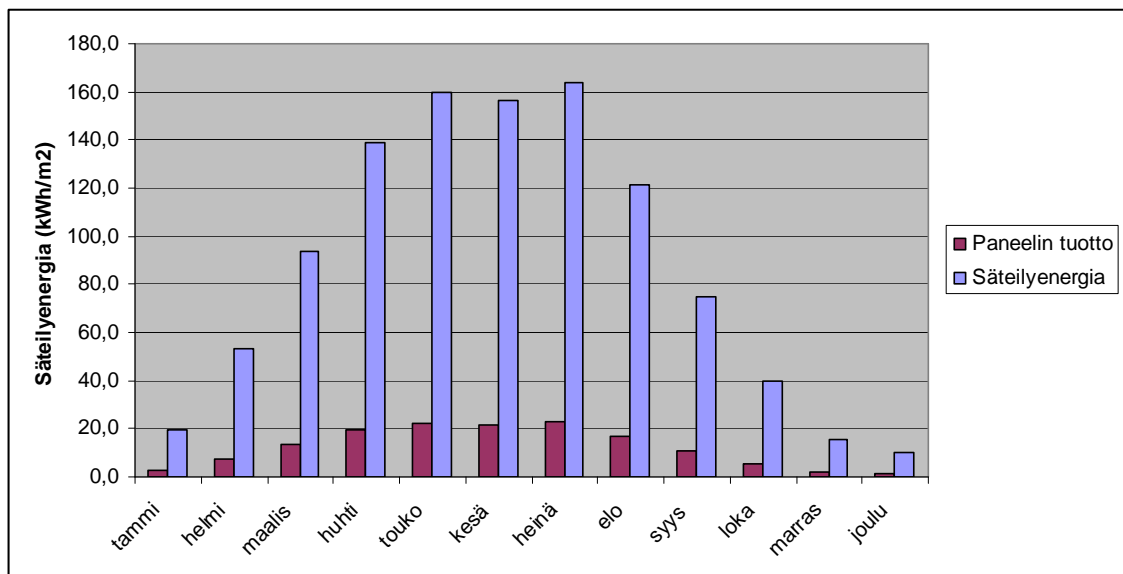
**Kuva 3.7.** Auringonsäteilyn vuotuinen energia optimaalisessa kallistuskulmassa olevalle neliömetrin tasolle Euroopassa [5].

Kuvasta 3.7 nähdään vuotuinen auringonsäteilyn kertymä optimaalisessa kallistuskulmassa olevalle etelään suunnatulle kiinteälle tasolle Euroopassa. Eniten auringonsäteilyä saadaan Välimeren alueella, jossa säteilyenergian määrä lähentelee  $2000 \text{ kWh}$  vuodessa neliömetrille. Olosuhteet Suomessa ovat varsin samankaltaisia kuin Saksassa tai Iso-Britanniassa. Helsingin, Manchesterin ja Frankfurtin vuotuinen säteilyenergia on  $1100\text{-}1200 \text{ kWh}$  neliömetrille, kun taas Kirkwallin ja Utsjoen säteilykertymät ovat  $900\text{-}950 \text{ kWh}$  neliometriä kohti. [5]



**Kuva 3.8.** Auringonsäteilyn keskimääräinen päivittäinen kertymä neliometriä kohti optimaalisessa kallistuskulmassa olevalle tasolle eri kuukausina Ilo-mantsissa. [5]

Saatavilla olevan auringonsäteilyn päivittäinen keskimääräinen määrä kiinteästi asennetulle optimaalisessa kallistuskulmassa ( $43^\circ$ ) olevalle tasolle Ilo-mantsissa eri kuukausina näkyy kuvasta 3.8. Päivittäisistä säteilymääristä voidaan laskea vuotuinen säteilykertymä. Auringonsäteilyä tulee Ilo-mantsiin vuodessa noin  $1050 \text{ kWh}$  neliometriä kohden. Tämä säteilyenergia jakautuu eri kuukausille kuvan 3.9 osoittamalla tavalla. [5]



**Kuva 3.9.** Auringon säteilyenergian ja aurinkopaneelin ( $\eta = 14\%$ ) tuotannon kuukausijakauma neliometriä kohti optimaalisessa kallistuskulmassa olevalle tasolle Ilo-mantsissa [5].

Kuvasta 3.8 havaitaan, että kesällä auringonsäteilyn määrä on noin  $5 \text{ kWh/m}^2$  loppu-kauden vuorokaudessa kun joulukuussa jäädyään  $0,3 \text{ kWh}$ :iin neliometriä kohti. Vaihtelu



säteilyn määrässä on suurta myös kuukauden päivien kesken sääoloista ja pilvisyydestä riippuen. Tästä auringonsäteilyn päivittäisestä ja vuosittaisesta vaihtelusta koituu merkittäviä haasteita aurinkoenergian hyötykäytön suunnittelulle. Talvella lämmön- ja valaistustarpeen ollessa suurimmillaan on auringonsäteilyä saatavilla vähiten. Jos aurinkoenergiaa aiotaan hyödyntää pilvisinä päivinä tai kesäkuukausien ulkopuolella, johtaa se väistämättä energiavaraston tarpeeseen. Tämä on vahvistettavissa myös kuvan 3.9 kuukausittaisista säteilymääristä. Touko-, kesä- ja heinäkuun säteilyenergian kertymä on noin  $480\text{ kWh}$  neliömetrille, kun marras-, joulukuun ja tammikuun kertymä on vain  $44\text{ kWh}$  neliömetrille.

Kuvan 3.8 ja 3.9 avulla voidaan arvioida aurinkopaneelin sähköenergiantuotantoa vuosi- ja päivätasolla. Jos oletetaan aurinkopaneelin toimivan 14% hyötysuhteella saadaan vuosituotannoksi  $147\text{ kWh}$  paneelineliometriä kohti, josta touko-heinäkuussa saadaan  $67\text{ kWh}$  ja marras-tammikuussa kaikkiaan  $6\text{ kWh}$ . Kesäpäivän tuotanto olisi  $700\text{ Wh}/\text{m}^2$  luokkaa ja joulukuussa paneelineliometrillä saataisiin noin  $40\text{ Wh}$  sähköenergiaa päivässä. Aurinkopaneelin vuosituotannon jakauma neliometriä kohti on havainnollistettu kuvassa 3.9.

## 3.2 Tuulivoima

Ihmiskunta on hyödyntänyt tuulen energiaa jo vuosisatojen ajan. Aluksi tuulta hyödynnettiin purjehtimisessa, myöhemmin tuulimyllyjä käytettiin veden pumppaamiseen ja viljan jauhamiseen. Sähköntuotantoon tuulimyllyjä alettiin kokeilla 1800-luvun lopulla, mutta vasta 1970-luvun alun öljykriisin seurauksena tuuliturbiineja alettiin toden teolla kehittää. Tuulivoimalat voidaan jakaa turbiinin pyörimisakselin perusteella vaakaja pystyakselisiin tuulivoimaloihin. [6]

Maailmanlaajuisesti vuoden 2009 loppuun mennessä asennetun tuulivoiman yhteenlaskettu nimellisteho oli noin  $159\text{ GW}$ , josta Euroopassa oli noin  $76\text{ GW}$  [63]. Vuoden 2010 loppuun mennessä Suomeen oli asennettu tuulivoimaa noin  $169\text{ MW}$  ja sen vuosituotanto oli noin  $280\text{ GWh}$  vuonna 2009 [64]. Kansallisena tavoitteena on kasvattaa tuulivoiman vuosituotantoa arvoon  $6\text{ TWh}$  vuoteen 2020 mennessä. Tämä edellyttää noin  $2000\text{ MW}$ :n lisärakentamisen tuuliselle rannikkoalueelle. Myös kesämökki- ja omakotikäyttöön soveltuvien pienten tuulivoimaloiden rakentamisen odotetaan lisääntyvän. [7]

### 3.2.1 Tuulivoimalatyypit

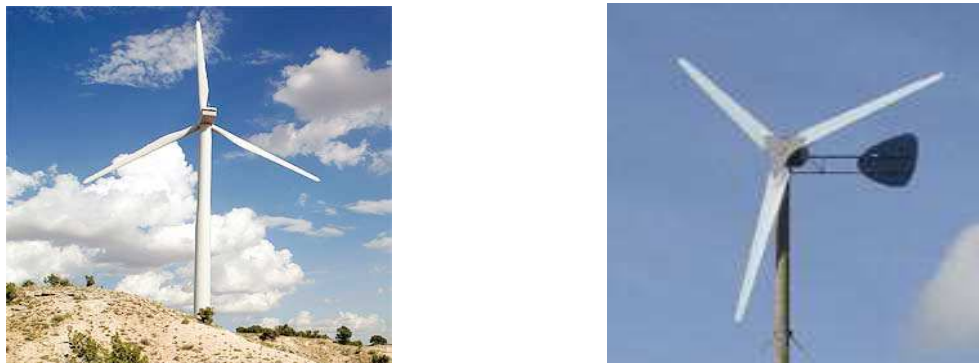
Pystyakselituulivoimalan turbiinin pyörimisakseli on maanpinnan normaalin suuntaisen. Turbiineissa käytetään erityyppisiä laparakenneratkaisuja, joiden toiminta perustuu ilmapvirtauksen nostovoimaan. Lapoja on yleensä kaksi. Pystyakselivoimaloiden hyvänä puolena on, että generaattori, vaihteisto ja muut säätöjärjestelmät voidaan sijoittaa maanpinnalle, jolloin niiden huoltaminen on helpompaa. Lisäksi turbiinin suuntaa ei tarvitse kääntää tuulen suunnan muuttuessa. Erilaisia laparakenneratkaisuja on esitetty kuvassa

3.10. Pystyakselivoimaloiden haasteena on lapakulman säätäminen nostovoiman optimoimiseksi lavan asennon jatkuvasti muuttuessa. Lisäksi pyörivä lapa jää joka kierroksella tuulesta katsoen maston taakse sekä joutuu kulkemaan puoli kierrosta vastatuuleen. Nämä seikat ovat vaikuttaneet siihen, että pystyakselivoimaloista ei ole saatu taloudellisesti kilpailukykyisiä vaaka-akselivoimaloiden kanssa. [1; 3]



**Kuva 3.10.** Pystyakselisia tuuliturbiineja valmistetaan erimuotoisilla lapamalleilla [14; 15; 16; 17].

Vaaka-akselisessa tuulivoimalassa turbiinin pyörimisakseli on nostettu maston päähän ja se on maanpinnan suuntainen. Lajoja on yleensä kaksi tai kolme ja niiden toiminta perustuu ilmavirtauksen nostovoimaan. Lavat voidaan sijoittaa tornin etu- tai takapuolelle tuulen suunnasta katsoen. Vaaka-akselisen tuulivoimalan etuna on lapakulman helppo muunneltavuus, jolloin turbiinin toimintaa voidaan säätää tuuliolosuhteiden mukaan. Haittapuolena on, että generaattori ja vaihteisto joudutaan sijoittamaan tornin päälle, mikä hankaloittaa huoltoa ja edellyttää vahvaa tornin rakennetta. Lisäksi voimalassa on oltava säätöjärjestelmä, joka kääntää turbiinin suuntaa tuulen suunnan mukaan. Esimerkkejä vaaka-akselivoimaloista on esitetty kuvassa 3.11. [6; 8]



**Kuva 3.11.** Vaaka-akselisia tuuliturbiineja. Pienemmissä turbiineissa lavat suunnataan peräsimen avulla. [10; 18]

### 3.2.2 Tuulen ja tuulivoimalan teho

Tuulivoimala saa energiansa tuulen liike-energiasta

$$E_w = \frac{1}{2}mv^2, \quad (3.5)$$

missä  $m$  on turbiinin läpi kulkevan ilman massa ja  $v$  turbiinille tulevan tuulen nopeus. Tuulen liike-energiasta kuluu turbiinin pyörittämiseen

$$\Delta E_w = \frac{1}{2}m(v^2 - v_w^2), \quad (3.6)$$

missä  $v_w$  on turbiinista lähtevän tuulen nopeus. Ilmoittamalla lausekkeen 3.6 massa turbiinin läpi kulkevan ilman tiheyden ja tilavuuden avulla saadaan tuulivoimalan tehoksi

$$P_w = \frac{1}{4}\rho_i A(v + v_w)(v^2 - v_w^2), \quad (3.7)$$

missä  $\rho_i$  on ilman tiheys ja  $A$  lapojen pyyhkäisyypinta-ala. Tuulen nopeus turbiinin kohdalla saadaan turbiinille tulevan tuulennopeuden  $v$  ja turbiinista lähtevän tuulennopeuden  $v_w$  aritmeettisena keskiarvona. Lauseke saa suurimman arvonsa, kun  $v_w = \frac{v}{3}$ , jolloin teoreettiseksi maksimitehoksi saadaan

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho_i A v^3. \quad (3.8)$$

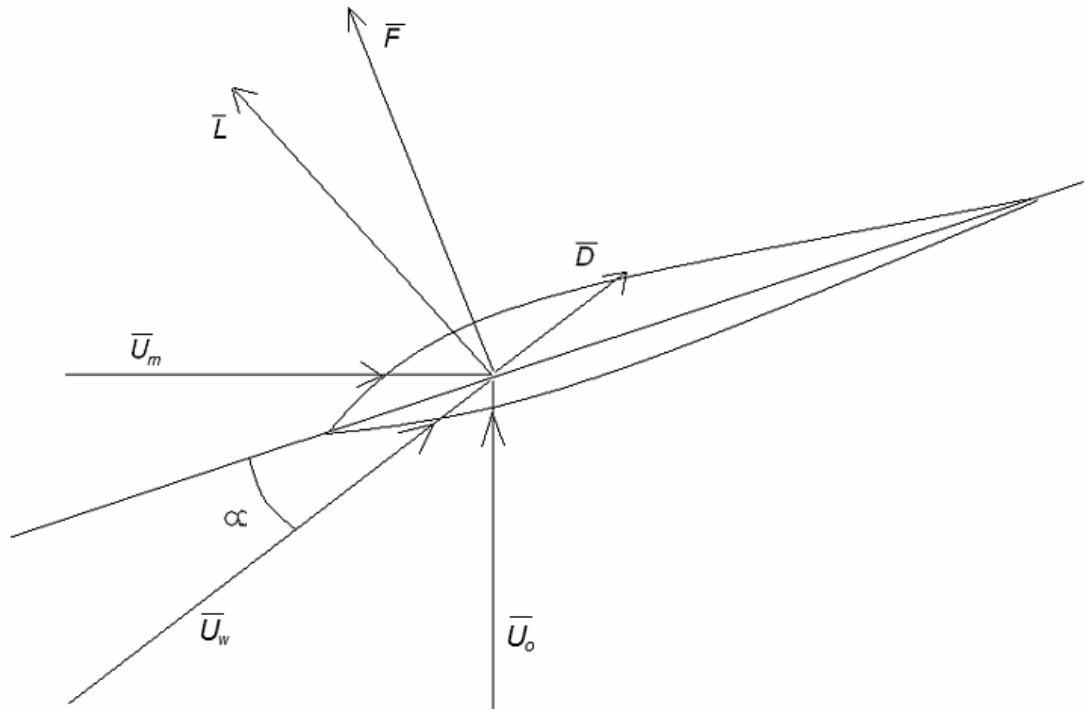
Tuulivoimalan teho ei siis voi ylittää 16/27 tuulen tehosta eli hyötysuhteen teoreettinen maksimi on 59%, mitä kutsutaan myös Betzin luvuksi. [3]

Tuulivoimalan maksimitehon lausekkeesta 3.8 nähdään, että teho on suoraan verrannollinen turbiinin pyyhkäisyypinta-alaan ja tuulen nopeuden kuutioon. Mitä enemmän voimalalta vaaditaan tehoa sitä pidemmät lavat siinä tulee olla. Lauseke kertoo myös sen, että voimalan sijoituspaikan valintaan tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä tuulen nopeuden kaksinkertaistuminen kahdeksankertaistaa tuotannon.

### 3.2.3 Tuulivoimalan toiminta ja säätö

Ilmavirtauksen kulkiessa lapaprofiilin ympäri syntyy lavan pinnoille paine-eroja, jotka aiheuttavat lapaan voimavaikutuksia. Tuuliturbiinin toiminta perustuu ilmavirtauksen

lapaprofiiliin aiheuttamaan nostovoimaan. Lapaan kohdistuvien voimien suuntia on havainnollistettu kuvassa 3.12. Nostovoiman suuruuteen vaikuttavat lavan muoto ja koko, ilmavirtauksen nopeus ja tiheys sekä lavan ja ilmavirran välinen kohtauskulma. On huomattava, että kohtauskulman suuruuteen vaikuttaa myös lavan pyörimisnopeus. [1]



**Kuva 3.12.** Liikkuvaan lapaan kohdistuvien voimien suunnat.  $\bar{U}_o$  on tuulen suunta,  $\bar{U}_m$  lavan liikkeestä aiheutuva virtaus ja näiden yhteisvaikutuksesta aiheutuva suhteellinen tuulen suunta  $\bar{U}_w$ . Ilmavirtaus aiheuttaa lapaan vektorin  $\bar{F}$  suuntaisen voiman, joka voidaan jakaa ilmanvastuskomponenttiin  $\bar{D}$  ja tälle kohtisuoraan nostovoimakomponenttiin  $\bar{L}$ . Kulmaa  $\alpha$  sanotaan kohtauskulmaksi. [1]

Tuuliturbiinin pyörimistä voidaan säätää vaikuttamalla kohtauskulman suuruuteen lapaa kääntämällä. Kohtauskulman kasvaessa riittävästi ilmavirtaus irtoaa lapaprofiilista, nostovoima romahtaa ja lapa sakkaa. Säätämällä kohtauskulmaa voidaan voimalan toiminta säätää vastaamaan tehontarvetta ja suojata voimalaa myrskytuulta vastaan. Pienissä voimaloissa lapakulmasäädön toteuttaminen ei ole taloudellisesti kannattavaa, vaan lavat ovat asennettu kiinteään kulmaan. Myrskysuojaus onkin yleensä toteutettu kääntämällä lavat pois tuulesta peräsimen avulla tuulen nopeuden yltyessä liiaksi. [1; 9]

### 3.2.4 Tuulivoimalan ympäristövaikutukset

Tuulivoimalan sijoituspaikkaa harkittaessa on otettava huomioon tuulivoimalan vaikutukset ympäristöön. Kun energiaa tuotetaan tuulivoimalla, voidaan sen ajatella korvaa-

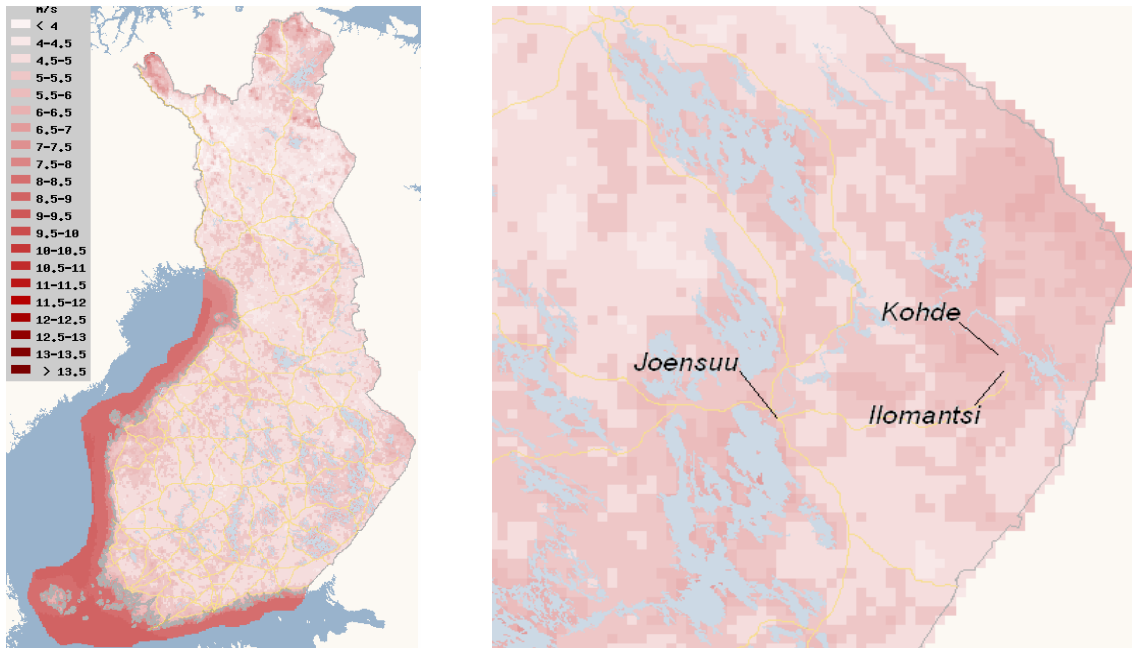
van fossiilisilla polttoaineilla tuotettua energiaa. Tuulivoiman käytöstä ei aiheudu hiilidioksidipäästöjä, radioaktiivista jätettä, savua, pienhiukkasia tai happosateita. Näiden tekijöiden valossa tuulivoima on varsin ekologinen ja yleisesti hyväksytty vaihtoehto. [1; 10]

Tuulivoiman mahdollisia haittavaikutuksia ovat melu, sähkömagneettiset häiriöt, lintukuolemat, valon välkyntä ja maisemalliset tekijät. Tuulivoimalasta aiheutuu mekaanista ja aerodynaamista melua, jonka suuruus 150 metrin etäisyydellä voi olla 45 dB luokkaa. Melu on pienempää alhaisilla tuulen nopeuksilla, mutta silloin tuulen aiheuttama taustäänikin on hiljaisempi ja voimalan ääni voi olla häiritsevempi kuin kovemalla tuulella. Tuulivoimala saattaa myös aiheuttaa häiriöitä radio- ja tv-laitteiden toimintaan, etenkin lapojen ollessa metallirakenteiset. Tuulivoimala saattaa aiheuttaa lintukuolemia lintujen lentäessä pyöriviin lapoihin, varsinkin lintujen muuttoreittien varrella. Koska tuulivoimala on asennettava varsin korkealle maasta tuotannon tehostamiseksi, muuttaa se väistämättä maisemaa. Lisäksi lapojen lukumäärä, koko, väri ja liike herättävät helposti huomiota. Pyörivät lavat aiheuttavat liikkuvan varjon, joka voi olla häiritsevää varjon langetessa ihmisten asuinpaikkaan. Tuulivoimalan aiheuttamia haittavaikutuksia voidaan merkittävästi pienentää sijoituspaikan huolellisella valinnalla. [1; 10]

### 3.2.5 Tuuliolosuhteet

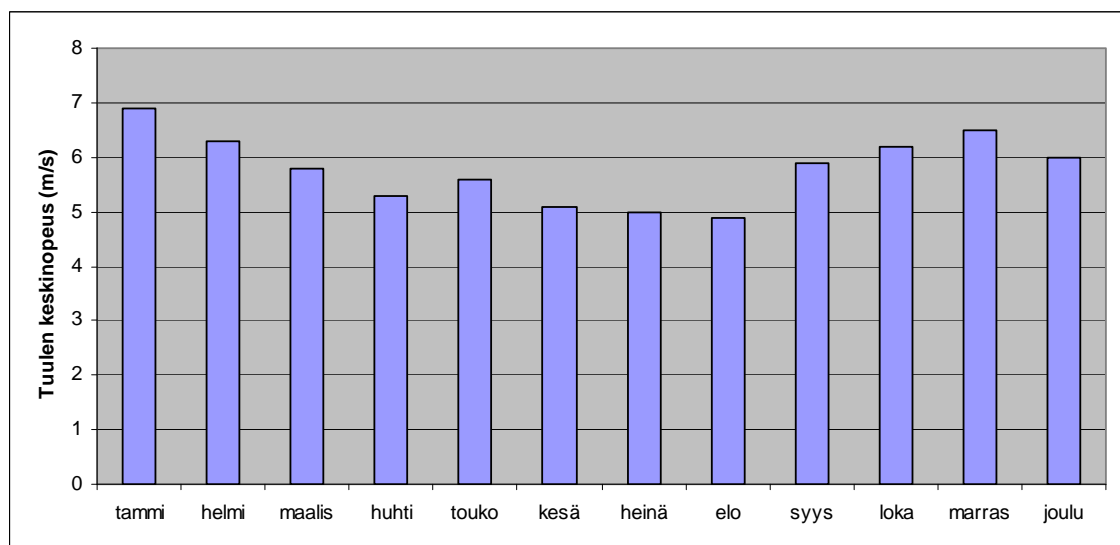
Koska tuulivoimalan tuotanto riippuu merkittävästi turbiiniin tulevan tuulen nopeudesta, on tuulivoimalan sijoituspaikan tuulisuudella suuri merkitys voimalan kannattavuuteen. Ennen suurempia investointeja sijoituspaikalla kannattaisi suorittaa tuulimittauksia jopa usean vuoden ajan. Usein investointi halutaan tehdä nopeasti, jolloin pitkäkestoisiin mittauksiin ei ole aikaa. Sijoituspaikan tuuliolosuhteita voidaan arvioida tuuliatlaksen perusteella.

Suomen tuuliatlas on ilmatieteenlaitoksen mittaustietojen pohjalta tehty tietokone-mallinnus Suomen tuulioloista. Tuuliatlaksessa Suomen pinta-ala on jaettu 2,5 x 2,5 neliökilometrin ruutuihin, joiden tuulioloja on mallinnettu 50 metristä aina 400 metrin korkeudelle saakka. Kuvassa 3.13 on yleiskuva tuulisuudesta Suomessa 50 metrin korkeudella. [19]



**Kuva 3.13.** Tuulen vuotuisia keskinopeuksia Suomessa 50 metrin korkeudella maan pinnasta. Oikeanpuoleisessa kuvassa suurennos Itä-Suomen alueesta, jossa työssä tarkasteltava kohde sijaitsee. [19]

Arvioitaessa Suomen tuulioloja kuvan 3.13 perusteella havaitaan, että tuulivoiman sijoittamisen kannalta ylivoimaisesti parasta aluetta on koko Suomen rannikkoalue. Tuulennopeuden vuotuinen keskiarvo on 9-10  $m/s$  luokkaa ja Pohjanlahden peräosissa-kin vain hieman vähemmän. Ilomantsin tuuliolotkin ovat kohtuulliset. Kuvan 3.13 suurennoksesta nähdään, että vuotuinen tuulennopeuden keskiarvo on tarkasteltavassa koh- teessa 5,5 - 6  $m/s$  luokkaa. Suomen sisämaa-alueista vain pohjoisimman Suomen tunturi-alueilla on suuremmat tuulen keskinopeudet.



**Kuva 3.14.** Tuulen keskinopeuksien kuukausittainen jakauma 50 m korkeudella tarkas- teltavassa kohteessa Ilomantsissa [19].

Kuvassa 3.14 on havainnollistettu tuulen keskinopeuden kuukausittaista jakaumaa tarkasteltavassa kohteessa Ilomantsissa. Tammikuun havaitaan olevan tuulisin. Tällöin tuulen keskinopeus ylittää lähelle  $7 \text{ m/s}$ . Loka-, marras-, joului- ja helmikuussakin päästään yli  $6 \text{ m/s}$  keskiarvon. Kesäkuukausina tuulee selvästi vähiten. Tällöin tuulen keskinopeus on  $5 \text{ m/s}$  luokkaa.

### 3.2.6 Tuulivoimalan tuottama energia

Tuulen keskinopeusjakauman avulla voidaan arvioida tuulivoimalan tuotantoa kuukausittain ja vuositasolla. On kuitenkin huomioitava, että keskiarvon käyttäminen tuulen nopeuden mittana antaa tuotannolle vain suuruusluokka-arvion. Tämä johtuu siitä, että tuulivoimalan teho on verrannollinen tuulen nopeuden kuutioon, kuten kaavasta 3.8 käy ilmi. Jos esimerkiksi tuulen nopeus olisi  $7 \text{ m/s}$ , olisi voimalan tuotanto 12,7-kertainen verrattuna sellaisen päivän tuotantoon, jolloin tuulen nopeus olisi  $3 \text{ m/s}$  ja 2,7-kertainen keskiarvonopeuden  $5 \text{ m/s}$  päivätuotantoon.

Tuulennopeuden vaihtelut voidaan huomioida todennäköisyysjakauman avulla. Eri tuulennopeuksien todennäköisyyttä voidaan varsin tarkasti arvioida kaksiparametrisella Weibull-jakaumalla

$$W(v) = \frac{k_w}{A_w} \left( \frac{v}{A_w} \right)^{k_w-1} e^{-\left( \frac{v}{A_w} \right)^{k_w}}, \quad (3.9)$$

missä  $k_w$  on muotoparametri,  $A_w$  määräparametri ja  $v$  tuulen nopeus. Muotoparametrin avulla saadaan Weibull-jakauman muoto vastaamaan mitattua tuulen nopeusjakaumaa. Koska tuulimittauksissa tilastoidaan eri suunnista puhaltavat tuulet erikseen, saa muotoparametri samalla mittaustaikalla erisuuria arvoja eri suunnista puhaltaville tuulille. Myös vuodenajat aiheuttavat vaihtelua muotoparametrin arvoihin. Muotoparametri liittyykin maaston muodon ja rosoisuuden vaikutukseen tuulen nopeusjakaumassa. Tuuliatlaksista saa yksityiskohtaisia lukuarvoja kutakin karttaruutua koskien. Tarkasteltavan kiinteistön sijaintipaikalla voidaan arvioida  $k_w \approx 2$ . Kun tuulen keskinopeus  $v_a$  tiedetään, saadaan määräparametri  $A_w$  lausekkeesta

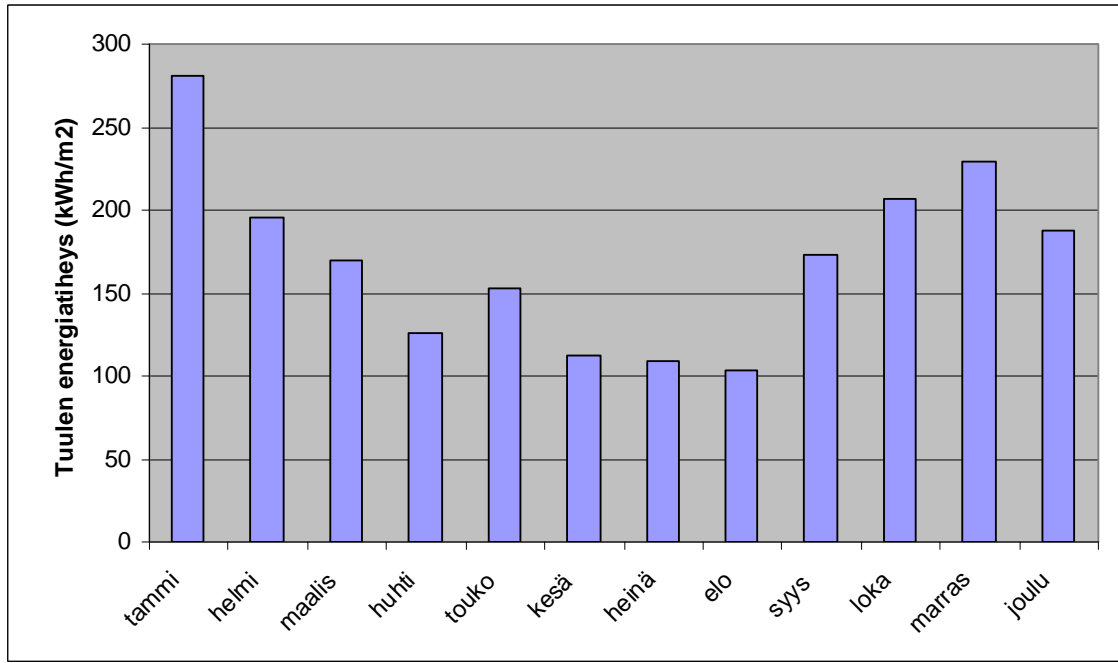
$$A_w = \frac{v_a}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k_w}\right)}, \quad (3.10)$$

missä  $\Gamma(n)$  on yleinen gammafunktio, jonka arvo on  $\Gamma(1,5) = 0,885$ . [19]

Tuulen voimalaan tuoma energia saadaan integroimalla tuulen tehon, Weibull-todennäköisyyden ja ajan tulo:

$$E_w = \frac{1}{2} \rho_i A t \int W(v) v^3 dv . \quad (3.11)$$

Kuvassa 3.15 on tuulitietojen perusteella laskettu saatavilla oleva tuulen energia eri kuukausina Ilomantsissa.



**Kuva 3.15.** Saatavilla olevan tuulen energian  $2050 \text{ kWh/m}^2$  jakautuminen eri kuukausille Ilomantsissa.

Vuotuinen tuulen energiasisältö on noin  $2050 \text{ kWh}$  neliometriä kohti. Jos tuulivoimalan ajatellaan toimivan 30% hyötysuhteella, olisi sen vuosituotanto  $615 \text{ kWh/m}^2$ . Tämä jakautuisi niin, että loka-maaliskuussa saataisiin noin  $380 \text{ kWh/m}^2$  ja huhtisyyskuussa noin  $235 \text{ kWh/m}^2$ . Merkittävää on, että voimalan tuotanto on talvella selvästi suurempaa, jolloin valaistuksen ja lämmöntarve on suurempaa kuin kesällä.

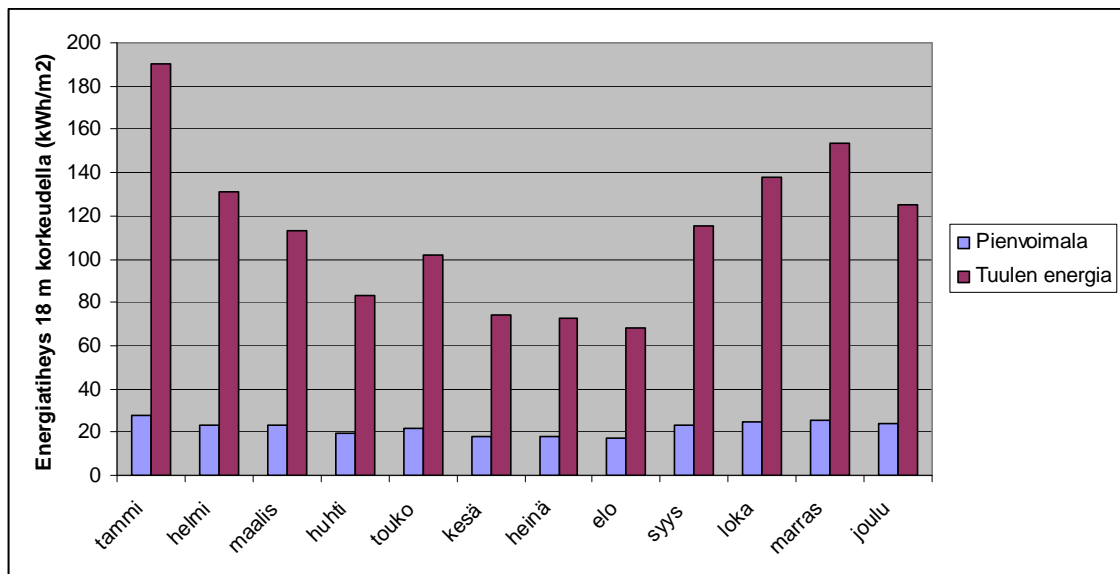
Pientuulivoimalan nostaminen 50 metrin korkeuteen ei ole mielekäästä paitsi maisemallisista myös kustannussyistä. Maan pintaa lähestyttäessä maaston muodon, puiden, kasvillisuuden ja rakennusten aiheuttama rosoisuus vaikuttavat tuulen nopeuteen ja siten tuulivoimalan tuotantoon. Korkeudella  $h_1$  tuulen nopeutta  $v_{h_1}$  voidaan arvioida kokeellisesti määritetyllä yhtälöllä

$$v_{h_1} = v_{h_o} \left( \frac{h_1}{h_o} \right)^\beta , \quad (3.12)$$

missä  $v_{h_o}$  on tuulen nopeus referenssikorkeudella  $h_o$ . Eksponentin  $\beta$  arvo on riippuvainen maaston rosoisuudesta. Maa-alueille voidaan käyttää arvoa 0,14. [3]



Kaavan 3.12 avulla saadaan saatavissa olevaksi tuulen energiasisällöksi 18 metrin korkeudella maan pinnasta  $1367 \text{ kWh}/\text{m}^2$  vuodessa, mikä jakautuu eri kuukausille kuvan 3.16 mukaisesti. Samassa kuvassa on esitetty tälle korkeudelle asennetun pyyhkäisyypinnaltaan  $18,9 \text{ m}^2$  pientuulivoimalan sähköenergian tuotanto kaavalla 3.11 lasketuna. Pientuulivoimalan turbiinin on oletettu käynnistyvän tuulen nopeuden ylittäessä  $2,0 \text{ m}/\text{s}$  ja myrskysuojauksen kääntävän lavat pois tuulesta, kun tuulen nopeus ylittää  $10 \text{ m}/\text{s}$ .



**Kuva 3.16.** Tuulen energiasisältö ja pientuulivoimalan tuottama energia 18 metrin korkeudella maan pinnasta.

Kuvasta 3.16 nähdään 18 metrin korkeudelle sijoitetun pientuulivoimalan vuosituotannon  $266 \text{ kWh}/\text{m}^2$  jakautuminen eri kuukausille. Voimalan on oletettu tuottavan sähköä 30% hyötysuhteella turbiinin pyöriessä. Jos pientuulivoimalan lavan pituus olisi 2,45 metriä, tuottaisi voimala energiaa noin  $5012 \text{ kWh}$  vuodessa. Tästä energiasta lokakuussa saataisiin noin  $2800 \text{ kWh}$  ja huhti-syyskuussa noin  $2200 \text{ kWh}$ . Talvikauden tuotanto olisi siten kesäaikaa suurempaa.

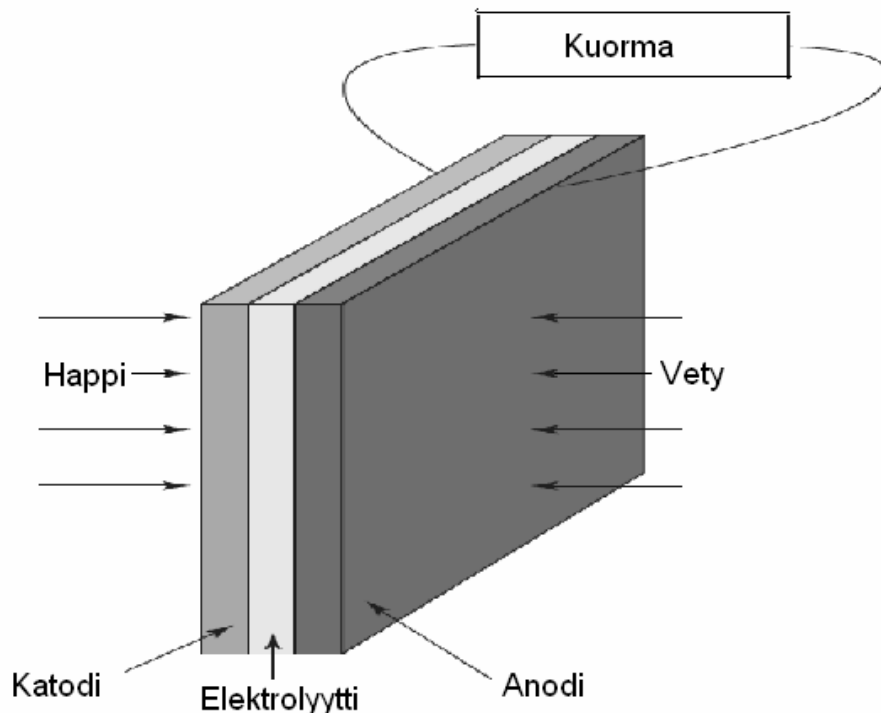
### 3.3 Polttokennot

Polttokenno on sähkökemiallinen laite, joka muuttaa polttoaineiden kemiallista energiaa suoraan sähköenergiaksi. Ensimmäiset polttokennot esiteltiin 170 vuotta sitten, mutta vasta 1960-luvun avaruussovellusten myötä polttokennojen tekniikkaa alettiin kehittää. Polttokennot ovat toiminnassaan hiljaisia ja lähes päästöttömiä, minkä johdosta niiden käytöstä ei koidu merkittävästi ympäristöhaittoja. Lisäksi polttokennot toimivat hyvällä hyötysuhteella eivätkä sisällä liikkuvia osia, joiden ansiosta järjestelmä on mekaanisesti varsin luotettava. [21]

Polttokennojen yleistymisen hidasteena ovat uudehko teknologia ja käyttöön rajoittuminen muutamaan vuoteen. Vedyn valmistus ja varastointi vaativat myös oman infrastruktuurinsa, jotka ovat vielä kehitysasteella. Polttokennojen korkeahko hinta hidastaa omalta osaltaan polttokennojen laajamittaista käyttöönottoa energiaratkaisuissa. [21]

### 3.3.1 Polttokennon toimintaperiaate

Polttokenno koostuu katodista, anodista ja niiden välisestä elektrolyytistä. Polttokennon perusrakennetta on havainnollistettu kuvassa 3.17.



*Kuva 3.17. Periaatekuva polttokennon rakenteesta [20].*

Polttokennoja on erityyppisiä, mutta niiden toiminnan perustana on hapen ja vedyn kemiallinen reaktio [21]



Yleensä polttoaineena toimiva vety syötetään kaasumaisena anodille ja happea sisältävä ilma katodille. Elektrodeilla tapahtuvat sähkökemialliset reaktiot mahdollistavat elektronien johtamisen ulkoisen piirin kautta, jolloin sähkövirta saadaan kulkemaan. Polttokennon tuottamaa virtaa rajoittaa polttoainekaasun, elektrodin ja elektrolyytin välinen kosketuspinta-ala sekä elektrodien suuri etäisyys toisiinsa nähden. Kosketuspinta-alan lisäämiseksi elektrodien mikrorakenne tehdään huokoiseksi, jolloin elektrolyytin ja kaasun kosketuspinta-ala voi kasvaa monituhatkertaiseksi ulkomittoihin verrattuna.

Elektrodien välimatka saadaan lyhyeksi levymäisellä rakenteella, joiden väliin ohut elektrolyyttikerros asennetaan. [21]

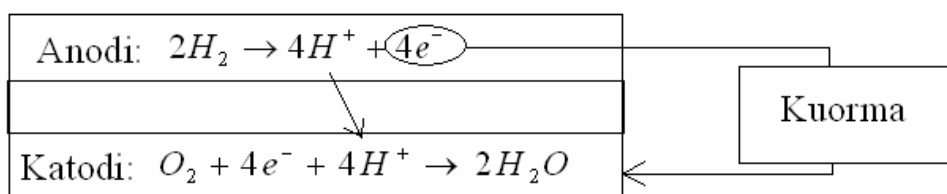
Yksittäisen polttokennon jännite on  $0,7V$  luokkaa, joten kennoja kytketään sarjaan sopivan jännitetason saamiseksi. Yksittäiset kennot liitetään toisiinsa bipolaarilevyillä, jotka toimivat elektrodien tukirakenteena, muodostavat sähköä johtavan pinnan elektrodien välille ja mahdollistavat vedyn sekä hapen syötön elektrodeille. Bipolaarilevyjen moninaisten vaatimusten vuoksi niiden kustannukset muodostavat merkittävän osan koko kennoston kustannuksista. [21]

### 3.3.2 Polttokennotyypit

Polttokennot luokitellaan usein elektrolyytin perusteella. Nykyisellään tutkimuksen ja kehityksen kohteena on kuusi polttokennotyyppiä: Kiinteäpolymeerikenno (PEMFC), suorametanolikenno (DMFC), alkalipolttokenno (AFC), fosforihappokenno (PAFC), sulakarbonaattikenno (MCFC) ja kiinteäoksidipolttokenno (SOFC).

#### 3.3.2.1 Kiinteäpolymeeripolttokenno (PEMFC)

Kiinteäpolymeerikenno on rakenteeltaan yksinkertainen ja kompakti kiinteän ja ohuen polymeerielektrolyytin ansiosta. Kenno ei sisällä korroosiota edistäviä nesteitä ja sen toiminta on asennosta riippumaton, joten se soveltuu myös liikuteltaviin kohteisiin. Kennon toimintalämpötila on tyypillisesti alle  $100^{\circ}C$ , minkä johdosta kemialliset reaktiot ovat hitaita. Alhaisen toimintalämpötilan ansiosta kenno käynnistyy kuitenkin nopeasti. Reaktionopeuden kasvattamiseksi elektrodeilla käytetään katalyyttinä arvokasta platinaa, jota modernit kennot tarvitsevat noin  $0,2mg/cm^2$ . Kennon virrantiheys on  $1A/cm^2$  luokkaa. Kennotyyppiä käytetään kannettavien laitteiden lisäksi ajoneuvosovelluksissa sekä yhdistetyn sähkön- ja lämmöntuotannon (CHP) laitteissa. [21]



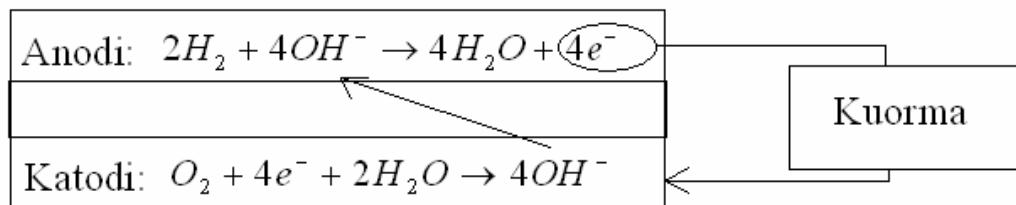
**Kuva 3.18.** Kiinteäpolymeerikennon elektrodeilla tapahtuvat reaktiot. Elektrolyytti päästää positiiviset ionit lävitseen muttei elektroneja, jolloin katodin ja anodin välille muodostuu potentiaaliero minkä vaikutuksesta elektronit kiertävät ulkoisen piirin kautta katodille. [21]

Kiinteäpolymeerikennon polttoainevedyn tulee olla melko puhdasta platinakatalyytin toiminnan kannalta. Polttoaineena voidaan käyttää myös metanolia, jolloin PEM kennoa kutsutaan suorametanolipolttokennoksi (DMFC). Kennotyyppi on houkutteleva

helposti saatavilla olevan ja hyvän energiatiheuden omaavan polttoaineen vuoksi. Nestemäisen metanolin varastointi ja käyttö onnistuu samaan tapaan kuin bensiinin. Kemialliset reaktiot kennon elektrodeilla tapahtuvat kuitenkin hitaasti. Lisäksi nestemäinen metanoli liukenee veteen ja kulkeutuu kiinteän polymeerin läpi katodille alentaen kennon jännitettä. Näiden ominaisuuksien johdosta kennosta saatava teho jää vetypolttoainetta käyttävää PEM kennoa pienemmäksi. Suorametanolikennot ovatkin parhaimmillaan sovelluksissa, joiden energiantarve on pieni mutta pitkäkestoinen. Tällaisia ovat esimerkiksi kannettavat tietokoneet ja viestintälaitteet. [21]

### 3.3.2.2 Alkalipolttokenno (AFC)

Alkalipolttokennon elektrolyytinä toimii edullinen kaliumhydroksidi. Operointilämpötila on mallista riippuen  $80 - 230^{\circ}\text{C}$ , mutta kennotyyppi luokitellaan matalan lämpötilan kennoksi.



**Kuva 3.19.** Alkaalipolttokennon elektrodeilla tapahtuvat reaktiot. Elektrolyytin läpäisevät  $\text{OH}^-$  ionit. Kennon tuottama vesi syntyy anodilla toisin kuin PEM-kennossa. [21]

Yksittäisen kennon käyttöjännite saadaan parhaimmillaan  $0,8\text{V}$  tasolle ja virrantiheys  $1\text{ A/cm}^2$  tuntumaan. Kun elektrodimateriaaleina voidaan käyttää yleisiä metallilaituja kuten nikkeliä, muodostaa kennotyyppi houkuttelevan vaihtoehdon muihin kennotyyppihin nähden. Kaliumhydroksidi reagoi kuitenkin helposti hiilidioksidin kanssa, muuttaen kennon koostumista ja heikentäen sen toimintakykyä. Näin ollen kennolle syötettävän vedyn ja hapen tulee olla puhdasta, mikä lisää omalta osaltaan käyttökustannuksia ja heikentää kennon luotettavuutta. [21]

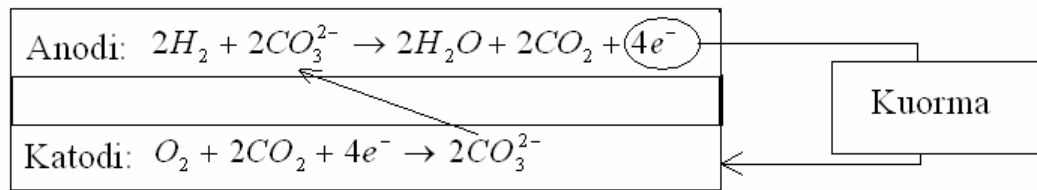
### 3.3.2.3 Fosforihappopolttokenno (PAFC)

Fosforihappokenno on pitkälle kehittynyt ja laajalti markkinoilla oleva polttokennotyyppi. Useita  $200\text{ kW}$  järjestelmiä on käytössä teollisuudessa ja julkisissa rakennuksissa maailmanlaajuisesti. Fosforihappo elektrolyytinä sietää hyvin hiilidioksidia, minkä johdosta ilmaa voidaan käyttää hapettimena. Huokoisilla elektrodeilla käytetään platinakatalyyttiä reaktioiden nopeuttamiseksi ja kennon toimintalämpötila on  $200^{\circ}\text{C}$  tuntumassa. Reaktiot kennon elektrodeilla ovat samat kuin kiinteäpolymeerikennollakin (kuva 3.18.). Platinakatalyytin toiminnan kannalta polttoainavedyn tulee olla puhdasta. Kennotyyppillä on saavutettu  $0,3\text{ W/cm}^2$  tehotiheyksiä kennojännitteen ollessa  $0,7\text{ V}$

tasolla. Fosforihappokennot ovat osoittautuneet kestäviksi ja luotettaviksi järjestelmiksi ja ne ovatkin saavuttaneet vakaan markkina-aseman. [21]

### 3.3.2.4 Sulakarbonaattipolttokenno (MCFC)

Sulakarbonaattikennon elektrolyytinä toimii litiumin ja kaliumin tai litiumin ja natriumin karbonaatit. Kennon operointilämpötila on  $600 - 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jolloin nikkelikatalyytti riittää hyvän reaktionopeuden saavuttamiseksi. Korkea lämpötila mahdollistaa myös vetypolttoaineen sisäisen reformoinnin maakaasusta, jolloin erillistä ulkoista reformointiyksikköä ei tarvita. [21]

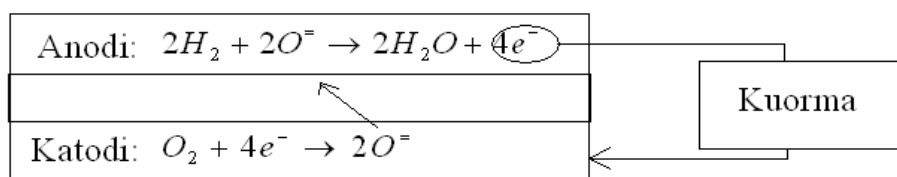


**Kuva 3.20.** Sulakarbonaattikennon elektrodeilla tapahtuvat reaktiot vetypolttoainetta käytettäessä. Elektrolyytti läpäisee  $CO_3^{2-}$  ioneja elektronien kiertäessä ulkoisen piirin kautta. [21]

Sulakarbonaattikennon tyypillinen tehotiheys on  $0,16\text{ W/cm}^2$ , kennojännitteen ollessa  $0,8\text{ V}$  tuntumassa. Polttoaineena voidaan vedyn sijaan käyttää myös hiilimonoksidia. Kennotyyppin käynnistäminen vaatii kennoston lämmittämisen operointilämpötilan tuntumaan, mikä on tehtävä hitaasti mekaanisten rasitusten minimoimiseksi. Niinpä kennotyyppi soveltuu parhaiten kohteisiin, joissa vaaditaan jatkuvaa ja tasaista energiantuotantoa. [21]

### 3.3.2.5 Kiinteäoksidipolttokenno (SOFC)

Kiinteäoksidipolttokennon elektrolyytinä on tyypillisesti zirkonium-pohjainen kiinteä yhdiste. Kennon operointilämpötila on polttokennojen korkein, noin  $800 - 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , minkä seurauksena kemiallisten reaktioiden nopeus on hyvä eikä kalliita katalyyttimateriaaleja tarvita.



**Kuva 3.21.** Kiinteäoksidikennon elektrodeilla tapahtuvat reaktiot. Happi-ionit läpäisevät elektrolyytin. [21]

Korkea lämpötila mahdollistaa polttoaineen sisäisen reformoinnin maakaasusta, mutta polttoaine ja ilma on esilämmitettävä ja toisaalta kennostoa on jäädytettävä, mikä lisää systeemin monimutkaisuutta. Kennotyypillä on parhaimmillaan saavutettu  $0,65W/cm^2$  tehosiheyksiä ja  $1A/cm^2$  virrantiheyksiä. Korkea operointilämpötila edellyttää keraamisten materiaalien käyttöä ja hyvää eristystä. Kennotyypin sovelluskohteita on viime vuosina tutkittu. [21] Wärtsilä Oy on rakentanut  $20kW$  kaatopaikkakaasua käyttävän CHP-järjestelmän Vaasaan vuoden 2009 lopulla ja samankokoisen metanolia polttoaineena käyttävän järjestelmän laivakäyttöön vuonna 2010. Järjestelmien toiminta on ollut lupaavaa ja lisää sovelluskohteita ja tuloksia on odotettavissa. [23; 24]

### 3.3.3 Polttokennon hyötysuhde ja tuottama energia

Polttokennon toiminta perustuu vedyn ja hapen reagoidessa vapautuvan energian muuttamiseen sähköenergiaksi. Reaktiossa vapautuvan kemiallisen energian määrä on riippuvainen ainakin lämpötilasta, polttoainekaasun konsentraatiosta ja paineesta, minkä johdosta polttokennon hyötysuhteen yksikäsitteinen määrittäminen on ongelmallista. Polttoaineeseen sitoutuneen kokonaisenergian, entalpiian, voidaan ajatella koostuvan Gibbsin (vapaasta) energiasta ja aineeseen sitoutuneesta lämmöstä. Prosessista saatavan työn maksimimäärä vastaa Gibbsin vapaan energian muutosta, kun paineen tai tilavuuden muutostyö jätetään huomioimatta. Polttokennosta saatavan sähköenergian suurin mahdollinen määrä on siten reaktiossa vapautuvan Gibbsin vapaan energian suuruinen. Reaktioyhtälön 3.13 perusteella Gibbsin vapaan energian muutokseksi saadaan

$$\Delta g_f = (g_f)_{H_2O} - (g_f)_{H_2} - (g_f)_{O_2}, \quad (3.14)$$

missä  $g_f$  on Gibbsin vapaa energia yksikössä  $kJ/mol$ . [21]

Tarkasteltaessa kiinteäpolymeerikennon anodilla tapahtuvaa reaktiota (kuva 3.18.) havaitaan, että yhtä anodille syötettyä vetymolekyyliä kohti vapautuu kaksi elektronia, jotka kiertävät ulkoisen piirin kautta katodille, jossa muodostuu yksi molekyyli vettä. Näin ollen syötettäessä anodille yksi mooli vetyä, kulkee ulkoisen piirin kautta  $2N$  elektronia, jonka varaus on  $-2Nq = -2F$ , missä  $q$  on alkeisvaraus ja  $F$  Faradayn vakio. Tämän varauksen siirtämiseksi tehty työ  $W = -2FV$ , missä  $V$  on kennojännite, on tuotetun sähköenergian suuruinen. Jos systeemi on häviötön, vastaa tämä Gibbsin vapaan energian muutosta, joten

$$\Delta g_f = -2FV_{oc}, \quad (3.15)$$

missä  $V_{oc}$  on tyhjäkäyntijännite. [21]

Polttokennon hyötysuhde voidaan määrittellä tuotetun sähköenergian suhteena kaavasta 3.15 saatavaan Gibbsin vapaan energian muutokseen. Toimivan polttokennon hyötysuhteen määrittämistä hankaloittaa se, että Gibbsin vapaan energian muutos ei ole vakio, vaan riippuu muun muassa lämpötilasta, paineesta ja reaktioaineiden olomuodosta. [21]

Polttokennon hyötysuhdetta arvioidaan myös vertaamalla tuotetun sähköenergian määrää siihen lämpöön, joka polttoainevedystä saataisiin polttamalla. Reaktiossa 3.13 vapautuvaa kokonaislämpöä kuvaa reaktioaineiden entalpian muutos  $\Delta h$ , jonka arvo riippuu veden olomuodosta. Alempi lämpöarvo (LHV) saadaan höyrylle  $\Delta h = -241,83 \text{ kJ/mol}$  ja ylempi (HHV) nestemäiselle vedelle  $\Delta h = -285,84 \text{ kJ/mol}$ . Mikäli reaktion 3.13 koko entalpian muutos voidaan muuttaa sähköenergiaksi vastaa entalpian muutos tehdyn työn määrää, jolloin

$$\Delta h = -2FV_{oc} \Leftrightarrow V_{oc} = -\frac{\Delta h}{2F}. \quad (3.16)$$

Yhtälö 3.16 on ratkaistu myös tyhjäkäyntijännitteen suhteen, jonka arvoksi saadaan  $1,48 \text{ V}$  ylempää lämpöarvoa käytettäessä ja  $1,25 \text{ V}$  alemmaa lämpöarvoa käytettäessä. [21]

Käytännön tyhjäkäyntijännite jää kaavan 3.16 antamaa teoreettista arvoa pienemmäksi polttokennossa tapahtuvien häviöiden vaikutuksesta, joita ovat konsentraatio-, vuotovirta-, aktivointi- ja ohmiset häviöt. Konsentraatiohäviöt ovat seurausta reagoivien aineiden (vedyn ja hapen) pitoisuuksien pienenemisestä kennoelektrodien pinnoilla. Polttoaineen kulutuksen (piirin virran) kasvaessa reaktiot lisääntyvät, jolloin konsentraation pieneneminen rajoittaa virran kasvua ja pienentää jännitettä. Vuotovirtahäviöt ovat seurausta siitä, että osa vetypolttokennosta läpäisee elektrolyyttikalvon ilman ionisoitumista, eikä siten synnytä virtaa. Vuotovirtahäviöt ovat merkityksellisimpiä matalan lämpötilan kennoille. Aktivointihäviöt ovat seurausta elektrodeilla tapahtuvien reaktioiden hitaudesta. Vaikka kennon nettovirrantiheys olisi nolla, tapahtuu kennon pinnoilla reaktioita ja varauksia siirtyy elektrolyytin läpi molempiin suuntiin. Tätä varausten liikettä kutsutaan siirtymävirrantiheydeksi. Kennon virrantiheyden kasvaessa siirtymävirrantiheyttä suuremmaksi elektrodien pinnalla syntyvä ylijännite kasvaa pienentäen kennojännitettä. Jännitettä pienentävä vaikutus on suurempaa matalan lämpötilan kennoille, joiden elektrodeilla reaktiot tapahtuvat hitaammin kuin korkeamman lämpötilan kennoilla. Ohmisilla häviöillä tarkoitetaan kennojen välisten virtauslevyjen ja elektrodien resistansseissa sekä elektrolyytin läpi kulkevien ionien kohtaamassa resistanssissa tapahtuvia jännitehäviöitä. [21]

Toimivan polttokennon hyötysuhde voidaan helposti määrittää mittaamalla polttokennon todellinen tyhjäkäyntijännite  $V_m$  ja vertaamalla sitä lausekkeen 3.16 antamaan arvoon. Polttoaineen hyödyntämiskertoimen  $\mu_f$  avulla voidaan huomioida se, että

kaikki kennoon syötetty vety ei reagoi anodilla. Näin polttokennon hyötysuhde saadaan muotoon [21]

$$\eta = \mu_f \frac{V_m}{V_{oc}}. \quad (3.17)$$

Polttokennon energiantuotantoa voidaan arvioida yllä olevan perusteella. Jos polttokennon jännitteen oletetaan olevan  $0,7V$  ja polttoaineen hyödyntämiskertoimen  $0,95$  saadaan kaavalla 3.17 hyötysuhteeksi  $45\%$  (HHV). Koska vetykaasun moolimassa on  $2,016\text{ g/mol}$  sisältää  $1\text{ kg}$  vetykaasua  $496\text{ mol}$  vetyä, jonka reagoidessa polttokennossa saadaan vapautuvaksi kokonaislämmöksi alempaa lämpöarvoa käytettäessä  $496\text{ mol/kg} \cdot 241,8\text{ kJ/mol} = 119,9\text{ MJ/kg}$ . Polttokennon toimiessa  $45\%$  hyötysuhteella kilogrammasta vetyä saataisiin sähköenergiaa  $0,45 \cdot 119,9\text{ MJ/kg} = 53970\text{ kJ/kg} = 15,0\text{ kWh/kg}$ .

Yllä olevasta tuloksesta nähdään, että vetykaasu voitaisiin painonsa puolesta helposti kuljettaa kohteeseen, sillä esimerkiksi  $1000\text{ kWh}$  sähköenergian tuottamiseen tarvittaisiin vain  $67\text{ kg}$  vetyä. Tosin olettaessa vetykaasulle ideaalikaasun moolitilavuus  $22,41\text{ l/mol}$  (NTP) [42], vie  $1\text{ kg}$  vetykaasua  $11,1\text{ m}^3$  tilavuuden ja siis  $1000\text{ kWh}$  tuottamiseen tarvittaisiin noin  $740\text{ m}^3$  vetykaasua. Näin ollen kaasu tulisi paineistaa kuljetusta varten, jolloin paineastia nousee ylimääräiseksi kustannuseräksi. Polttokennoteknologian yleistymisen haasteena onkin polttoaineen valmistus ja varastointi.

### 3.3.4 Polttoaineen saatavuus

Vety on kaikille polttokennotyypeille hyvin soveltuva polttoaine. Vetyä voidaan valmistaa pääsääntöisesti kemiallisesti, termokemiallisesti tai sähkökemiallisesti.

Kemiallisia vedyn valmistusmenetelmiä ovat höyryreformointi ja erilaiset kaasutusprosessit. Teollisesti vetyä valmistetaan maakaasun höyryreformoinnilla noin  $850^\circ\text{C}$  lämpötilassa ja  $25\text{ bar}$  paineessa. Myös nestemäisiä hiilivetyjä voidaan käyttää. Menetelmä on hyvin tunnettu ja suurin osa teollisuudessa käytettävästä vedystä valmistetaan höyryreformoinnilla. Polttoaineiden kaasutuksella tarkoitetaan prosessia, jossa nestemäinen tai kiinteä polttoaine reagoi korkeassa yli  $800^\circ\text{C}$  lämpötilassa kaasuttavan aineen kanssa muodostaen kaasuseoksen. Polttoaineena voidaan käyttää esimerkiksi biomassaa tai fossiilista polttoainetta ja kaasuttavana aineena happea tai esimerkiksi ilmaa. Edellytyksenä palamiskelpoisen kaasuseoksen muodostumiselle on, että prosessiin tuodaan happea vähemmän mitä täydellinen palaminen vaatii. [21; 22]

Termokemiallisissa vedyntuotantomenetelmissä vesi muunnetaan kemiallisiksi yhdisteiksi, joista vety voidaan edelleen erottaa. Tämän hetken lupaavin menetelmä on General Atomicsin 1970-luvulla kehittämä prosessi, joka perustuu rikin ja jodin yhdis-



teiden käyttöön. Prosessi on kolmivaiheinen ja vaatii yli  $800^{\circ}\text{C}$  lämpötilan, joten kyse on teollisen mittakaavan prosessista. [22]

Sähkökemialliset menetelmät perustuvat sähkövirran kemiallisiin reaktioihin veden kanssa, jossa reaktiotuotteena saadaan vetyä ja happea. Prosessia kutsutaan elektrolyysiksi ja reaktiotuotteena saadaan varsin puhdasta vetyä. Elektrolyysin haittapuolena vedyn tuotannossa on sen vaatima sähköenergian tarve. [22]

Vedyn valmistusmenetelmistä pienkohteeseen soveltuisi ainoastaan elektrolyysi, muiden menetelmien vaatiman korkean lämpötilan vuoksi. Sähköenergian muuttaminen vetypolttoaineeksi edellyttäisi sähköenergian ylitarjontaa. Tämä on hetkittäin mahdollista tuuli- ja aurinkoenergiasovelluksissa hyvien olosuhteiden vallitessa, kun muuta kulu- tusta on vähän. Tällöin vetyä voitaisiin käyttää energiavarastona ja hyödyntää myö- hemmin polttokennossa.

Polttokennoissa voidaan vedyn lisäksi käyttää muitakin polttoaineita, joista omako- tiluokan sovelluksiin soveltuisi ainakin metanoli helpon varastoitavuutensa takia. Jos polttoaine on ostettavissa valmiissa säiliössä, periaatteessa mikä tahansa käytössä ole- valle polttokennolle soveltuva polttoaine voisi tulla kysymykseen. Tällöin polttoaineen- valintaan vaikuttavina tekijöinä olisivat hinta, turvallisuus ja ympäristöystävällisyys.

### 3.4 Varavoima

Kiinteistön sähköverkon käyttövarmuus nousee yhdeksi tarkastelukohdaksi, etenkin tuuli- ja aurinkoenergiasovelluksissa. Sähköverkon käytettävyys voidaan varmistaa va- ravoimalaitoksen avulla. Pääasiallisen sähköntuotannon perustuessa vaihtoehtoiseen paikallistuotantoon, voidaan varavoimalaitokseksi tulkita julkinen sähkönjakeluverkko. Tämä edellyttää kiinteistön liittämistä paikallisen sähköverkonhaltijan jakeluverkkoon, josta aiheutuvat hinnaston mukaiset liittymis- ja käyttökustannukset. Sähkön laatu ja käyttövarmuus noudattavat eurooppalaisia standardeja ja ovat erittäin hyvää tasoa.

Varavoima voidaan tuottaa myös paikallisesti muista järjestelmistä riippumattomalla laitteistolla. Tällöin laitteisto perustuu polttomoottorin ja generaattorin yhdistelmään tarvittavine ohjaus- ja valvontakojeistoineen ja apujärjestelmineen. [25] Omakotiluokan varavoimaksi soveltuu aggregaatti, joka on teollisesti valmistettu, valmis ja kompakti sähköntuotantolaitteisto. Polttoaineena aggregaateissa käytetään yleisesti bensiiniä ja diesel- tai polttoöljyä. Aggregaatteja valmistetaan monen tehoisia ja kokoisia ja ne ovat laajasti markkinoilla.

Aggregaatin hyötysuhdetta ja sähkön tuotantokustannuksia voidaan arvioida valmis- tajan ilmoittaman polttoaineenkulutuksen ja ulostulotehon avulla. Esimerkiksi Honda GX-7503H bensiiniaggregaatin kulutus on  $2,1\text{ l/h}$  kuorman ollessa  $3\text{ kW}$  [26]. Vertaa- malla tuotettua sähköenergiaa  $3\text{ kWh}$  polttoaineen (bensiniin) energiaan  $9\text{ kWh/l}$  saa- daan hyötysuhteeksi 33% [7, s. 203]. Tuotetun sähköenergian hinta on riippuvainen polttoaineen hinnasta sekä investointi- ja huoltokustannuksista, joita tarkastellaan myö- hemmin.

### 3.5 Sähköenergian varastointi

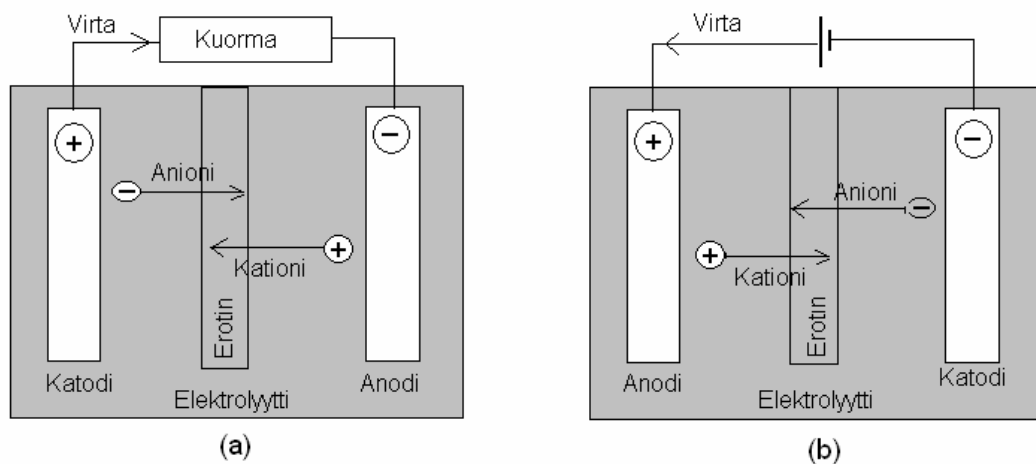
Sähköenergian tarve ja kulutus vaihtelevat päivä-, viikko- ja kuukausitasolla. Suuremmissa kokonaisuuksissa, kuten kaupungeissa, yksittäisten kulutuspisteiden vaihtelut tasaavat toisiaan, sillä kulutushuiput eivät ajoitu samalle kohdalle. Yksittäisissä omakotitaloissa näin ei ole laita, vaan sähkön tarve vaihtelee merkittävästi. Jos tuotanto perustuu aurinko- ja tuulivoimaan, vaihtelee tuotantokin suuresti olosuhteista riippuen. Varavoiman ohella sähköenergian varastointi nousee tällöin merkittävään rooliin kiinteistön sähköhuollon kannalta.

Sähköenergiaa voidaan välillisesti varastoida toiseen energiamuotoon, josta se voidaan muuttaa tarvittaessa takaisin sähköksi. Tällaisia energiamuotoja ovat vauhtipyörien kineettinen energia, nesteen potentiaalienergia, muuntaminen vetypolttoaineeksi tai ilman paineistus. Sähköenergian suora varastointi on mahdollista suprajohtaviin materiaaleihin ja sähkökemiallisesti kondensaattoreihin ja akkuihin. Tässä yhteydessä tarkastellaan tarkemmin akkuja sekä vedyn tuotantomahdollisuutta. [27]

#### 3.5.1 Akut

Sähkökemiassa anodiksi kutsutaan elektrodia, jolla hapettumisreaktio tapahtuu ja katodiksi elektrodia, jolla pelkistymisreaktio tapahtuu. Akkujen tapauksessa hapettumis- ja pelkistymisreaktiot tapahtuvat eri elektrodeilla riippuen siitä puretaanko vai ladataanko akkua. Tästä syystä elektrodeja kutsutaan positiivi- ja negatiivielektrodeiksi, jolloin sekaantumisvaaraa ei ole. [28]

Akun toiminnalliset osat ovat positiivinen ja negatiivinen elektrodi sekä elektrolyytti. Lisäksi tarvitaan erottimet estämään elektrodien välinen kosketus sekä kenno, johon edellä mainitut osat sijoitetaan. Kytkemällä kennoja sopiva määrä sarjaan ja kapseloidulla kokonaisuudeksi saadaan halutulla jännitetasolla toimiva akku. Kuvassa 3.22 on havainnollistettu akkukennon rakenne ja toimintaperiaate. [28; 29]



**Kuva 3.22.** Akkukenno koostuu elektrodeista, elektrolyytistä ja erottimesta. Virran suunta akkua purettaessa (a) on vastakkainen lataamiseen (b) nähden. [29]

Negatiivisella elektrodimateriaalilla tulee olla hyvä sähkönjohtavuus. Lisäksi sen tulee olla kemiallisesti pysyvää ja helposti käsiteltävää. Tyypillisesti käytettyjä metalleja ovat sinkki ( $Zn$ ), cadmium ( $Cd$ ), lyijy ( $Pb$ ) ja litium ( $Li$ ). Positiivisen elektrodin sähkökemiallisen potentiaalın tulee olla mahdollisimman korkea ja materiaalin kemiallisesti pysyvää. Tyypillisiä materiaaleja ovat esimerkiksi mangaanin, nikkelin ja lyijyn oksidit ( $MnO_2$ ,  $NiOOH$ ,  $PbO_2$ ) sekä bromidi ( $Br_2$ ) tai happi ( $O_2$ ). Akkutyypien ominaisuuksia on koottu taulukkoon 3.1. [28; 29]

**Taulukko 3.1.** Akkujen ominaisuuksia [27].

Akku	Energiatiheys	Latausaika	Edut	Haitat
Lyijyakut ( $PbO$ )	20-50Wh/kg	8-15 h	Suuri purkausteho, edullinen	Painava, huono hyötysuhde
Nikkeli-kadmium-akut ( $NiCd$ )	40-70Wh/kg	2-5 h	Pitkäikäinen, edullinen	Jäteongelma ( $Cd$ )
Nikkeli-sinkki-akut ( $NiZn$ )	50-60Wh/kg	3-8 h	Kestää alhaisia lämpötiloja, edullinen	Lyhytikäinen
Litiumakut ( $Li$ )	170Wh/kg	1-10 h	Pieni koko, edullinen	Räjähdysvaara
Sinkki-bromidi-akut ( $ZnBr_2$ )	60-70Wh/kg	5-8 h	Hyvä energiatiheys	Suuri koko, kallis
Metalli-ilma-akut ( $Fe, Zn, Al$ )	180Wh/kg	5-10 h	Suuri energiatiheys	Oheislaitteiden tilantarve, kallis

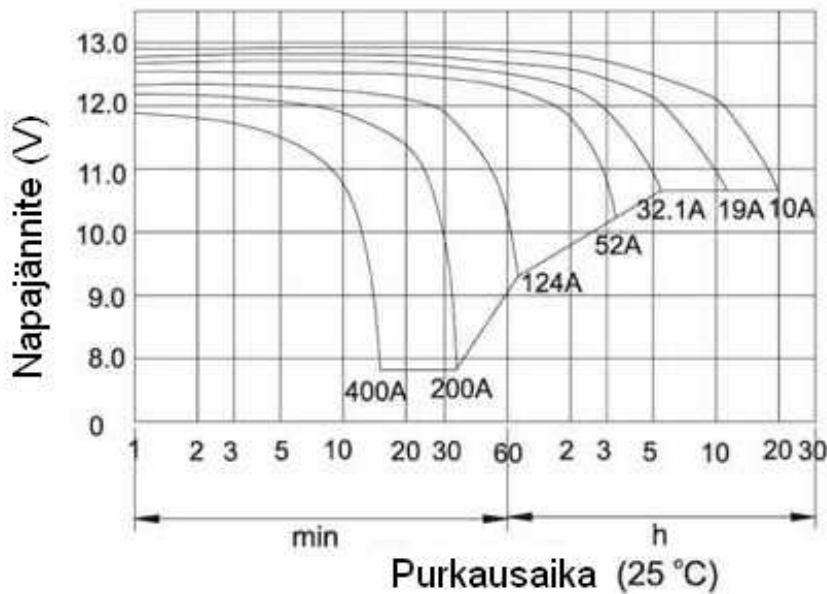
Lyijyakku on ehkä parhaiten tunnettu akkutyyppe, jonka yleinen käyttö johtuu monipuolisista käyttöominaisuuksista. Se pystyy hetkellisesti antamaan suuria virtoja, mutta sitä voidaan purkaa pitkiä aikoja pienellä virralla. Lyijyakun kennojännite on korkea, yli 2V, joten kuuden kennon sarjaan kytkennällä saavutetaan 12V akku. Purkauksen ja varauksen välinen jännite-ero on pieni ja akkua voidaan menestyksellisesti käyttää sekä kylmällä että lämpimällä säällä. [28]

Lyijyakun positiivinen elektrodi on lyijydioksidia ( $PbO_2$ ) ja negatiivinen elektrodi lyijyä ( $Pb$ ), jotka akkua purettaessa reagoivat elektrolyytinä toimivan rikkihapon ( $H_2SO_4$ ) kanssa muodostaen lyijysulfaattia ja vettä:



Akkua ladattaessa reaktioyhtälö kulkee vastakkaiseen suuntaan. [28; 29]

Akun kapasiteetilla tarkoitetaan sitä sähkömäärää, joka akusta voidaan purkaa. Tämä ilmoitetaan ampeeritunteina ja on virran integraali ajan suhteen. Siten esimerkiksi 60 Ah:n akkua voidaan periaatteessa purkaa 3 A virralla 20 tunnin ajan kennojännitteen laskematta liiaksi. Purkausaika on kuitenkin riippuvainen lämpötilasta sekä purkausvirran suuruudesta. Äärilämpötiloissa akusta saatava sähkömäärä pienenee ja suurella virralla purettaessa purkausaika lyhenee. Tätä on havainnollistettu kuvassa 3.23.



**Kuva 3.23.** Leader CT200-12 akun purkauskäyrät eri purkausvirran arvoilla [30].

Kuvassa 3.23 on esimerkki 12 voltin lyijyakkun purkauskäyrästä. Käyrästä havaitaan, että kyseisestä 200 Ah:n akusta saadaan nimellinen sähkömäärä 10 A:n virralla ja 20 tunnin purkausajalla napajännitteen laskiessa 10,5 volttiin. Purkausvirran kasvaessa 124 A:iin laskee napajännite 10,5 volttiin tunnissa, jolloin saatu sähkömäärä on vain 124 Ah. Samaisen akun datalehdessä käy ilmi, että lämpötilan laskiessa  $-15^{\circ}\text{C}$ :een akun kapasiteetti laskee 65%:iin nimellisarvosta, joka on saatu  $25^{\circ}\text{C}$ :een lämpötilassa. [30]

Akun valinnassa on kiinnitettävä huomiota sähköisten ominaisuuksien lisäksi akun käyttötapaan. Akun rakenne, koko ja kemialliset ominaisuudet vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan. Käynnistysakut pystyvät antamaan suuren tehon lyhytaikaisesti, ajovoima-akut kestävät toistuvia syviä purkauksia, suljetut akut vaativat vähäistä huoltoa ja vapaa-ajan akut on suunniteltu jatkuvaan lataus-purkaus käyttöön. [28]

### 3.5.2 Vety

Kohtuullisen kokoiseen akustoon varastoidulla sähkömäärällä voidaan kiinteistössä tasata tuotannon ja kulutuksen välistä eroa muutaman päivän ajan. Energian siirtoon eri vuodenaikojen välillä se soveltuu huonommin. Yksi tähän tarkoitukseen soveltuva keino voisi olla sähköenergian varastoiminen vetyyn. Vedyn energiasisältö painoyksikköä kohti on houkutteleva  $39,4 \text{ kWh/kg}$  ja tilavuusyksikköä kohti  $3,5 \text{ kWh/m}^3$  (NTP), kun vastaava luku lyijyakulla on  $0,05 \text{ kWh/kg}$ . [27]

Vedyn varastointi normaalipaineeseen vaatii suuren tilavuuden:  $11,1 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Tämän vuoksi käytettyjä varastoimismuotoja ovat nesteytys, paineistus tai varastoiminen metallihydrideihin tai hiilikuituihin yhdisteeksi. Vety nesteytyy  $20 \text{ K}$  lämpötilassa, joten nesteyttäminen vaatii hyvän kylmälaitteiston lisäksi paljon energiaa ja on täten kallista. Varastoiminen metallihydridiin vaatii myös kalliin metallihydridivaraston. Hiilikuituvastot ovat vielä tutkimusasteella. Paineistus teräs- tai komposiittiasiaan voisi onnistua omakotikiinteistössä kohtuullisin kustannuksin. [27]

Vetykaasu noudattaa normaaliolosuhteissa ideaalikaasun tilanyhtälöä

$$pV_g = nRT, \quad (3.19)$$

missä  $p$  on paine,  $V_g$  kaasun tilavuus,  $n$  ainemäärä mooleina,  $R$  yleinen kaasuvakio ja  $T$  lämpötila. Kaavasta 3.19 nähdään, että vakiolämpötilassa  $pV_g$  on vakio. Puristettaessa  $1 \text{ kg}$  vetykaasua normaalilämpötilassa  $0,1 \text{ m}^3$  tilavuuteen saadaan kaavalla 3.19 kaasun paineeksi  $112 \text{ bar}$ . Kaasun paineistamiseksi tehty työ saadaan paineen tilavuusintegraalina

$$W = - \int_{V_{g1}}^{V_{g2}} \frac{p_1 V_{g1}}{V} dV = -p_1 V_{g1} \ln \left( \frac{V_{g2}}{V_{g1}} \right). \quad (3.20)$$

Koska vedyn tilavuus on  $11,1 \text{ m}^3/\text{kg}$  saadaan kaavalla 3.20 vetykilon paineistamiseksi  $112 \text{ bar}$  paineeseen tehtäväksi työkseksi  $1,5 \text{ kWh}$ . Jos vielä oletetaan kompressorin kokonaishyötysuhteeksi  $50\%$ , tarvitaan vetykilon paineistamiseksi  $3,0 \text{ kWh}$  sähköenergiaa.

Arvioidaan vielä vetykaasun tuottamiseen elektrolyysillä kuluvaa energiamäärää. Vetykaasun valmistaminen vedestä reaktioyhtälön 3.13 käänteiseen suuntaan vaatii reaktioentalpian verran,  $\Delta h = 285,84 \text{ kJ/mol}$ , energiaa. Koska yhteen kilogrammaan vetyä menee noin  $496$  moolia, tarvitaan vetykaasukilon valmistamiseksi energiaa  $39,4 \text{ kWh/kg}$ . Jos elektrolyyseri toimisi  $70\%$  kokonaishyötysuhteella sähköenergiaa kuluisi noin  $56 \text{ kWh/kg}$ . Yhden vetykaasukilon tuottaminen ja paineistaminen  $112 \text{ bar}$  paineeseen vaatisi siis noin  $60 \text{ kWh/kg}$  sähköenergiaa.

Kohdassa 3.3.3 arvioitiin, että 1 kg :sta vetykaasua saataisiin polttokennolla poltettaessa 15,0 kWh sähköenergiaa. Jos kiinteistön sähkönkulutus olisi 800 kWh kuukaudessa, vaatisi se noin 53 kg vetykaasua, joka 112 bar paineistettuna vaatisi 5,3 m<sup>3</sup> painesäiliön. Tällaisen säiliön voisi helposti upottaa maahan, jolloin siitä ei aiheutuisi esteettisiä haittoja. 53 kg vetykaasun tuottaminen vaatisi sähköenergiaa noin 3000 kWh. Tästä valmiista sähköenergiasta kuluisi siis 73% vedyn tuottamiseen, varastointiin ja muuttamiseen takaisin sähköksi. Näin ollen sähkön varastoiminen vetyyn on kannattavaa vain, jos tuotettua sähköenergiaa ei voida muuten käyttää. Tällöin muuten hukkaan menevästä sähköenergiasta saataisiin talteen 27%.

## 4 LÄMMÖN TUOTANTO

Kiinteistössä lämpöenergiaa tarvitaan lämpimän käyttöveden tuottamiseen ja asuintilojen lämmittämiseen. Asuintilojen lämmitykseen osallistuvat varsinaisten lämmitysjärjestelmien lisäksi auringosta saatava passiivinen lämpöenergia, ihmisten kehostaan luovuttama lämpö sekä lämpimän käyttöveden häviöt. Suomessa asuintilojen jäähdystarve on vähäistä. Rakennuksen lämpöhäviöt muodostuvat rakennuksen vaipan, ilmanvaihdon ja lämminvesijärjestelmän häviöistä. [31] Työssä tarkasteltavan kiinteistön lämpöenergian tarve selvitetään tarkemmin luvussa 5.

Tässä luvussa käsitellään pienkiinteistöön soveltuvia lämmitysmuotoja. Aluksi tarkastellaan lämmön tuottamista puun pienpoltolla sekä aurinkokeräinten avulla. Sitten huomio kiinnitetään sähkön käyttöön lämmityksessä ja perehdytään lämpöpumppujen toimintaperiaatteeseen ja erilaisiin sovelluksiin. Lopuksi pohditaan lämpöenergian varastoimismahdollisuuksia rakenteisiin ja veteen.

### 4.1 Puu

Biomassa syntyy yhteyttämisprosessissa, jossa kasvit valmistavat hiilidioksidista ja vedestä auringon energian avulla sokereita. Kasvien solut muokkaavat niistä edelleen monimutkaisempia yhdisteitä, jotka sisältävät hiiltä, happea ja vetyä. Näistä aineista muodostuu myös puun rakennusaineiksi selluloosaa ( $C_6H_{10}O_5$ ), hemiselluloosaa ja ligniiniä, joiden osuudet puun kuivamassasta ovat vastaavasti 40-50%, 20-35% ja 20-30%. Hemiselluloosa sisältää erilaisia sokereita ja ligniini runsaasti hiiltä. Happea puussa on noin 43%, hiiltä 50% ja vetyä 6%. [32;33]

#### 4.1.1 Polttopuun lämpöarvo

Lämpöä puusta saadaan polttamalla, jolloin energiaa vapautuu reaktioyhtälöiden



mukaisesti. Yhtälön 4.1 reaktioentalpia hiilikiloa kohti on  $32,8 MJ/kg$ . Vastaavasti yhtälön 4.2 reaktioentalpia vetykiloa kohti on  $142,2 MJ/kg$ . [33]

Puun kalorimetrisellä lämpöarvolla  $q_{cal}$  tarkoitetaan palamisessa vapautuvaa kokonaislämpöä ja se on puulajista riippumatta  $20,5 MJ/kg$ . Koska polttopuu sisältää aina

myös kosteutta, osa lämmöstä kuluu veden höyrystämiseen. Tehollisessa lämpöarvossa  $q_{net}$  tämä lämpöenergia on huomioitu. Kuivan puun tehollinen lämpöarvo  $q_{net,d}$  saadaan lausekkeella

$$q_{net,d} = q_{cal} - 2,443 \cdot \frac{9H}{100}, \quad (4.3)$$

missä  $H$  on puun vetytitoisuus prosentteina. Kostean puun teholliselle lämpöarvolle  $q_{net,ar}$  pätee

$$q_{net,ar} = q_{net,d} \cdot \frac{100 - M_{ar}}{100} - 2,443 \cdot \frac{M_{ar}}{100}, \quad (4.4)$$

missä  $M_{ar}$  on puun kosteusprosentti. Kaavoissa 4.3 ja 4.4 esiintyvä kerroin 2,443  $MJ/kg$  on veden höyrystymislämpö  $25^\circ C$  lämpötilassa. Kaavassa 4.3 vedyn prosenttiosuus kerrotaan luvulla 9. Tämä johtuu siitä, että kun yksi vetykaasumooli ( $H_2$ ), jonka moolimassa on  $2 g/mol$ , palaessaan kaavan 4.2 mukaisesti muodostaa yhden moolin vettä ( $H_2O$ ), moolimassaltaan  $18 g/mol$ , on syntyneen veden määrä 9 kertainen vedyn määrään nähden. Osa reaktiossa vapautuvasta lämmöstä menee tämän syntyneen veden höyrystämiseen. Kaavalla 4.3 saadaan kuivan puun teholliseksi lämpöarvoksi  $19,2 MJ/kg$ . [32]

Käytännössä polttopuu sisältää aina kosteutta. Ulkoilmassa kuumana kesäpäivänä kosteus laskee aina 15 %:iin ja nousee syksyä kohti jopa 25%:iin. Jos pilkkeitä pidetään muutama päivä lämpimässä tilassa, laskee kosteus takaisin 15%:iin. [33] Taulukossa 4.1 on esitetty kaavalla 4.4 lasketut lämpöarvot yhdelle kilogrammalle puuta, joka sisältää erilaisen määrän kosteutta.

**Taulukko 4.1.** Polttopuun tehollisia lämpöarvoja puun erilaisilla kosteusprosentteilla.

Puun kosteusprosentti	$q_{net,ar}$ ( $MJ/kg$ )	$q_{net,ar}$ ( $kWh/kg$ )
30	12,7	3,53
25	13,8	3,83
20	14,9	4,13
15	16,0	4,43
10	17,0	4,73

Käytännössä asuinkiinteistöissä poltettavan polttopuun kosteus lienee noin 18%, jolloin sen teholliseksi lämpöarvoksi kaavalla 4.4 saadaan  $15,3 MJ/kg$  eli  $4,25 kWh/kg$ . Koska tulisijoissa poltettaessa palaminen ei ole täydellistä eikä kaikkea syntynyttä lämpöä saada varastoitua tulisijan rakenteisiin ja siirrettyä edelleen huoneilmaan, voidaan



lämmöntuotannon hyötysuhteeksi arvioida 75%. Näin ollen energialaskelmien perustana voidaan pitää  $3,2 kWh/kg$  lämpöarvoa. [33]

#### 4.1.2 Polttopuun energiasisältö ja hinta

Polttopuun kauppa massaperusteisesti ei ole mielekäästä, sillä kosteus lisää massaa ja heikentää lämpöarvoa. Kaupan perustuessa pilkkeen tilavuuteen tätä ongelmaa ei ole. Tällöin määrääväksi tekijäksi nousee tiheys, jolle käytetään kolmea yksikköä:  $kg/m^3$  (massa kiintokuutiometriä kohti),  $kg/p - m^3$  (massa pinokuutiometriä kohti) ja  $kg/i - m^3$  (massa irtokuutiometriä kohti). Kiintokuutio vastaa nimensä mukaisesti täyttä puuta. Pino- ja irtokuution tiheys on riippuvainen pilkkeen koosta. Tavallisesti pilkkeen pituus on 30-40 cm ja halkaisija alle 10 cm. Tällöin yksi pinokuutiometri on noin 0,67 kiintokuutiota ja yksi irtokuutiometri noin 0,4 kiintokuutiota. [32]

Puun tiheys vaihtelee puulajeittain ja kasvupaikasta riippuen. Tuntemalla eri puulajien tiheydet ja käyttämällä lämpöarvona käyttökostean (18%) puun tehollista lämpöarvoa  $4,25 kWh/kg$  voidaan selvittää pilkkeen energiatiheys eri tilavuusyksikköjä kohti. Taulukossa 4.2 on esitetty yleisimpien puulajien keskimääräiset tiheydet kuivalle ja 18% kosteuden omaavalle puulle sekä vastaavat energiatheydet.

**Taulukko 4.2.** Kuivan ja käyttökostean (18%) pilkkeen tiheydet ja energiasisällöt [32].

Puulaji	Tiheys (kosteus 0%)	Tiheys (kosteus 18%)			Energiatiheys (kosteus 18%)		
	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{kg}{m^3}$	$\frac{kg}{p - m^3}$	$\frac{kg}{i - m^3}$	$\frac{kWh}{m^3}$	$\frac{kWh}{p - m^3}$	$\frac{kWh}{i - m^3}$
Koivu	490	598	400	239	2540	1702	1016
Mänty	390	476	319	190	2022	1355	809
Kuusi	380	463	310	185	1970	1320	788
Leppä	360	439	294	176	1866	1250	747
Haapa	360	439	294	176	1866	1250	747

Taulukon 4.2 avulla voidaan selvittää kiinteistön polttopuun tarve, kun tarvittava lämpöenergian määrä tiedetään. Jos esimerkiksi polttamalla puuta 75% hyötysuhteella on tarkoitus tuottaa  $8000 kWh$  lämpöenergiaa vuodessa, tarvitaan koivupilkettä 6,3 tai leppäpilkettä 8,5 pinokuutiometriä. Kiinteistön välittömässä yhteydessä tulisi olla vastaavan kokoinen varasto puun säilyttämistä ja kuivaamista varten.

Suomessa on polttopuuta hyvin saatavilla. Pilkkeen etuna muihin lämmöntuotantomuotoihin on sen teon ja käytön tutuus, hyvä kuivuminen ja säilytettävyyys sekä helppo käsiteltävyyys. Kaikki kotimaiset puulajit soveltuvat hyvin polttopuiksi, joskin koivu on suosittua suuren tiheydensä ja räiskymättömän palamisen ansiosta. [32] Polttopuulla tuotetun lämpöenergian hinnan selvittäminen on suoraviivaista ostopuuta käytettäessä.

Koivupilkkeen keskihinta Ilomantsissa syksyllä 2010 oli noin 42 € irtokuutio, jolloin siitä saatavan lämpöenergian hinnaksi 75% hyötysuhteella poltettaessa tulee  $5,5 \text{ snt} / \text{kWh}$  [34].

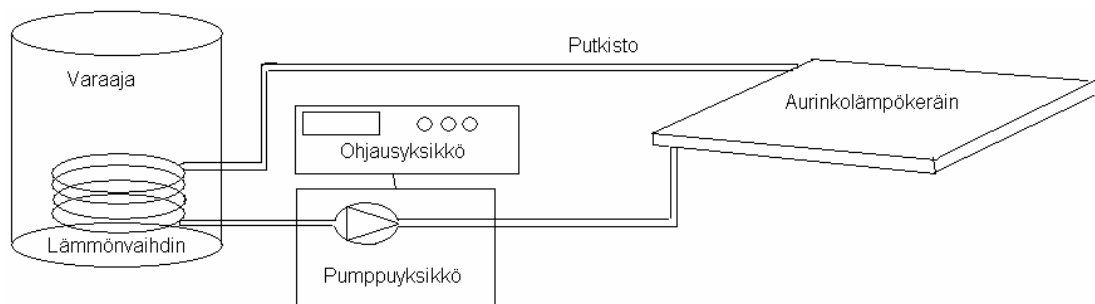
Usein polttopuut hankitaan omasta tai tuttavien metsästä itse tehden, jolloin hinnan määrittäminen on hankalampaa. Polttopuut voidaan saada metsänhoidollisten töiden sivutuotteena, jolloin työkustannuksetkin ovat pienet. Tällöinkin puusta saataisiin myydessä markkinahinta, joten sen käyttäminen lämmöntuotannon hinnan laskennassa on perusteltua.

## 4.2 Aurinkokeräimet

Aurinkoenergiaa voidaan hyödyntää aktiivisesti tai passiivisesti. Passiivisella hyödyntämisellä tarkoitetaan auringon säteilyenergian keräämistä ja varastointia kiinteistön rakenteisiin ilman lisälaitteita, kun aktiivisessa hyödyntämisessä energiaa kerätään siihen suunnitellulla laitteistolla. Aktiivisia aurinkoenergialaitteita ovat auringonsäteilyä sähköksi muuttavat aurinkopaneelit ja lämmöksi muuttavat aurinkolämpökeräimet. [35]

### 4.2.1 Aurinkolämpöjärjestelmän toiminta ja rakenne

Aurinkolämpöjärjestelmän pääosat ovat aurinkokeräin, putkisto, varaaja, lämmönvaihdin, pumppuyksikkö ja ohjausyksikkö. Järjestelmän toiminnan perusajatus on se, että aurinkokeräin siirtää auringon säteilyenergian tuoman lämmön väliaineeseen, joka pumpataan putkistossa varaajaan, jonne lämpö varastoidaan lämmönvaihtimen välityksellä. Ohjausyksikkö säätelee väliaineen kierrätysnopeutta tarpeen mukaan. Aurinkolämpöjärjestelmän perusrakennetta on havainnollistettu kuvassa 4.1. [35]



**Kuva 4.1.** Aurinkolämpöjärjestelmän perusrakenne [35].

Aurinkokeräimen lämmönsiirtotehtävää varten on suunniteltu erilaisia ja –mallisia aurinkokeräimen geometrioita. Keskittämissä keräimissä käytetään heijastavia pintoja säteilyintensiteetin kohdistamiseksi viivalle tai pisteeseen. Tasokeräimet ovat nimensä mukaisesti tasomaisia keräyslevyjä. Tyhjiöputkikeräimissä säteilyn vastaanottava pinta on sijoitettu tyhjiöidyn lasiputken sisään. Erityyppisiä keräimiä on esitetty kuvassa 4.2. [35]



**Kuva 4.2.** Aurinkolämpökeräinten erilaisia geometrioita. Vasemmalla viivalle keskittävä, keskellä taso- ja oikealla tyhjiöputkikeräin. [39;40;41]

Aurinkolämpökeräimen säteilyä keräävän pinnan eli absorbaattorin tulee olla hyvä lämmönjohde, jotta kerätty lämpö siirtyisi tehokkaasti lämmönsiirtoaineeseen. Samalla absorbaattorin itsensä ympäristöön säteilemän lämmön tulisi olla mahdollisimman vähäistä. Tasokeräimissä absorbaattorina käytetään kupari- ja alumiinilevyä, jotka ovat selektiivipinnoitettuja. Selektiivipinnoite päästää lävitsee absorbaattorille tulevan energiapitoisemman lyhytaaltoisen säteilyn, mutta heijastaa jo energiaa menettäneen pitempiaaltoisen säteilyn takaisin absorbaattoriin. Näin selektiivipinnoite vähentää aurinkokeräimen lämpösäteilyhäviöitä. [35]

Lämpöenergia voi siirtyä johtumalla, konvektiivisesti väliaineesta toiseen tai säteilemällä. Arvioitaessa aurinkolämpökeräimen tuottamaa lämpöenergiaa on huomio kiinnitettävä näihin mekanismeihin. Aurinkokeräimen lämpötase muodostuu auringosta ja ympäristöstä tulevasta lämpösäteilystä, keräimen omasta lämpösäteilystä ympäristöön, konvektiivisesta lämmönsiirrosta keräimen pinnan ja ympäristön välillä sekä lämmön siirtymisestä johtumalla keräimen kiinnitysrakenteiden kautta ympäristöön. Lisäksi lämpöä poistuu keräimestä lämmönsiirtoväliaineen mukana.

Materiaalissa johtumalla siirtyvä lämpövirta  $q_j$  saadaan lausekkeella

$$q_j = \lambda A \frac{dT}{dx}, \quad (4.5)$$

missä  $\lambda$  on materiaalin lämmönjohtavuus (yksikkö  $W/mK$ ),  $A$  on johtumistien pinta-ala,  $dT$  lämpötilaero ja  $dx$  johtumistien pituus. Konvektiiviselle lämpövirralle  $q_c$  pinnan ja ympäristön välillä pätee

$$q_c = hA(T_p - T_\infty), \quad (4.6)$$

missä  $h$  on lämmönsiirtymiskerroin (yksikkö  $W/m^2K$ ),  $A$  pinnan pinta-ala,  $T_\infty$  ympäristön lämpötila ja  $T_p$  pinnan lämpötila. Pinnasta ympäristöön säteilemällä siirtyvä lämpövirta  $q_r$  saadaan lausekkeella

$$q_r = \varepsilon \sigma A (T_p^4 - T_\infty^4), \quad (4.7)$$

missä  $\varepsilon$  on säteilypinnan emissiviteetti ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ),  $A$  pinnan pinta-ala ja  $\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ ). [36]

Aurinkokeräimeen tulevan auringon säteilyenergian määrää voidaan arvioida säteilytilastojen perusteella. Neliömetrille tulevan auringonsäteilyn määrää on tarkasteltu luvussa 3.1.6, jossa vuotuiseksi säteilykertymäksi Ilomantsissa saatiin  $1050 \text{ kWh}$ . Yhtälöistä 4.5-4.7 nähdään, että aurinkokeräimen häviöiden määrä on riippuvainen paitsi ympäristön lämpötilasta myös keräimen rakenteesta ja geometriasta, ja on siten keräin-kohtainen. Myös putkisto- ja pumppaushäviöt heikentävät omalta osaltaan lämmöntuotantoa. Aurinkolämpöjärjestelmän ominaistuotto on tasokeräimillä tyypillisesti  $250\text{-}400 \text{ kWh/m}^2$  vuodessa [35]. Tyhjiöputkikeräimillä päästään tasokeräimiä hieman suurempaan ominaistuottoon.

### 4.3 Sähkö

Kiinteistöjen lämmöntuotanto jakautuu Suomessa paikallispolttoaineiden, kuten puun tai polttoöljyn, kaukolämmön, sähkölämmityksen ja lämpöpumpplämmityksen kesken. Eniten käytetty lämmitysmuoto on kaukolämpö, jonka osuus lämpömarkkinoista on 49%. Sähkölämmitys on toiseksi yleisin lämmitysmuoto 14%:n markkinaosuudella. [7]

Kiinteistöjen sähkölämmitys perustuu sähkövastusten käyttöön. Sähkö voidaan muuttaa lämmöksi vastuksessa teholla

$$P = R_\Omega I^2, \quad (4.8)$$

missä  $R_\Omega$  on vastuksen resistanssi ja  $I$  vastuksen läpi kulkeva virta. Vastuksessa sähköenergia muuttuu kokonaan lämmöksi ja häviöitä aiheutuu ainoastaan vastuksen kytkentäjohtimissa ja liitoksissa. Näiden osuus on kuitenkin vastuksen tehoon nähden pieni.

Lämpimän veden tuottamiseen käytetään varaajaan sijoitettavaa vastusta, josta lämpö siirtyy konvektiivisesti veteen varaajan sisällä. Tuotettua lämmintä vettä voidaan käyttää lämpimänä käyttövetenä tai kierrättää patteri- tai lattialämmitysputkistossa asuintilojen lämmittämiseksi. [7]

Huoneilmaa voidaan lämmittää suoraan radiaattoreiden välityksellä, joita on kolmea perustyyppiä: tasoradiaattoreita sekä virtaus- ja sekalämmittimiä. Tasoradiaattorit ovat pinta-alaltaan suurimmat ja niiden vastukset on sijoitettu suljetun pinnan sisään. Virtauslämmittimissä on sisäiset ilmakeinavat, joissa olevaa ilmaa lämmitetään vastusten avulla. Lämmennyt ilma laajenee ja kohoaa ylös, jolloin uutta ilmaa kulkeutuu alhaalta tilalle. Nykyisin yleisesti käytetty lämmitintyyppi on sekalämmitin, jossa lämpiävän

tasopinnan lisäksi ovat sisäiset ilmanvirtauskanavat. Lisäksi on puhalluslämmittimiä, jotka ovat puhaltimella varustettuja virtauslämmittimiä. Puhaltimen tuottaman äänen vuoksi niitä käytetään usein tiloissa, joissa ei jatkuvasti oleskella. Lämmittimet varustetaan termostaatilla sopivan lämmitystason ylläpitämiseksi. [7]

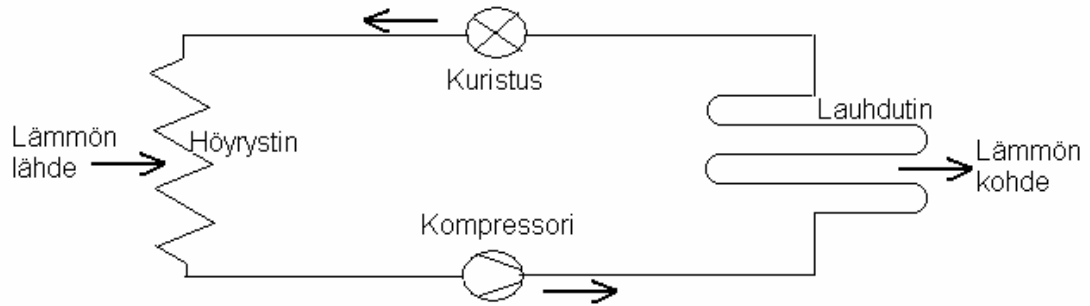
Sähkölämmitys voidaan toteuttaa joko suorana sähkölämmityksenä, jolloin huoneilma lämmitetään lämmittimillä heti lämpötilan niin vaatiessa. Varaavassa sähkölämmityksessä vastusten tuottamaa lämpöenergiaa varastoidaan veteen tai rakenteisiin silloin, kun sähkön hankintahinta on edullista (yöllä) ja lämpövarastoa puretaan sähkön hinnan ollessa korkeampi (päivällä). Näiden välimuotona ovat osittain varaavat järjestelmät, joissa lämpövaraston koko ei ole riittävä kylmimpään vuodenaikaan. [7]

Sähkölämmitysjärjestelmien investointikustannukset ovat usein kohtuulliset muihin lämmitysmuotoihin verrattuna. Sähkölämmitysjärjestelmä ei vaadi erillistä lämmönjakohuonetta, mikä osaltaan madaltaa alkuinvestointia. Lisäksi lämmittimet ovat kestäviä eivätkä aiheuta suuria huoltokustannuksia. Investoinnin jälkeiset kustannukset koostuvatkin lähinnä käytetyn sähköenergian hankintakustannuksista.

## 4.4 Lämpöpumput

Lämpöpumpuksi kutsutaan laitetta, joka siirtää lämpöä matalammassa lämpötilassa olevasta lämmön lähteestä korkeammassa lämpötilassa olevaan kohteeseen. Lämpöpumpuja nimetään lämmön lähteen ja kohteen mukaan. Esimerkiksi maalämpöpumpun lämmön lähteenä on maaperään varastoitunut lämpö ja ilmalämpöpumppu hyödyntää ilmassa olevaa lämpöä. Lämmön kohteena on yleensä huoneilma tai vesi. Lämpöpumpujen toimintaperiaate on lämmön lähteestä ja kohteesta riippumatta samanlainen. [43]

Lämpöpumpun toiminnan perustana on pumpussa kiertävän kylmäaineen faasimuutos nesteen ja kaasun välillä. Jäähdytettävässä tilassa sijaitsevalla höyrystimellä kylmäaine höyrystyy alhaisessa paineessa ja ottaa faasimuutokseen tarvittavan lämmön ympäristöstään. Kompressori nostaa syntyneen kaasun painetta, jolloin putkistotilavuuden pysyessä vakiona havaitaan ideaalikaasun tilanyhtälöstä 3.16 myös lämpötilan nousevan. Kaasun siirtyessä lämmitettävässä tilassa sijaitsevalle lauhduttimelle, kaasu luovuttaa korkeammassa paineessa höyrystymislämmön ympäristöönsä ja nesteytyy. Paineenalennusventtiilin (kuristin) jälkeen kylmäaine siirtyy jälleen höyrystimelle. Lämpöpumpun toimintaperiaatetta ja kylmäaineen kiertoa on havainnollistettu kuvassa 4.3. [37]



**Kuva 4.3.** Lämpöpumpun toimintaperiaate [37].

Lämpöpumpun toimintakyvyn mitta on lämpökerroin  $\zeta$  (COP), joka määritellään kohteeseen tuotetun lämpöenergian  $Q_l$  ja kompressorin tarvitseman sähköenergian  $W_k$  suhteena

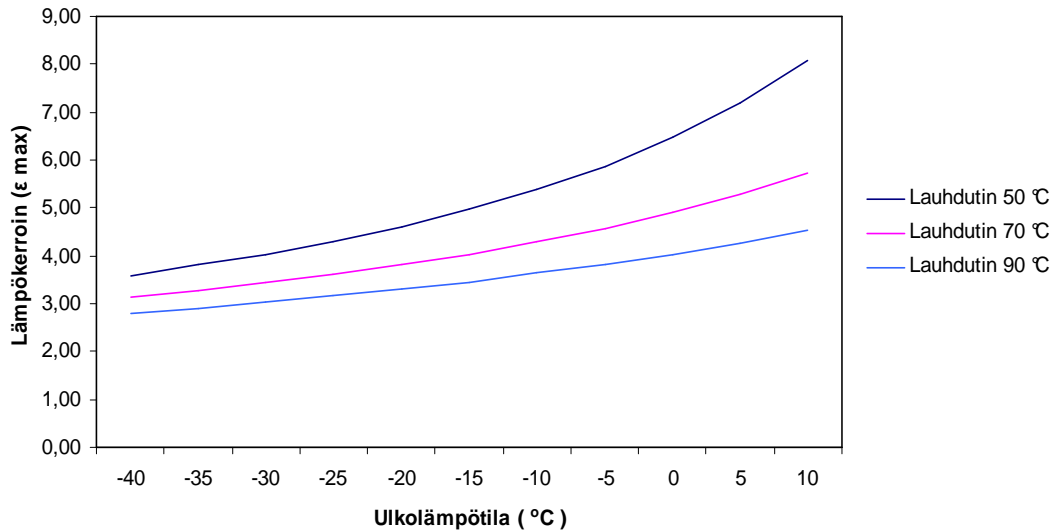
$$\zeta = \frac{Q_l}{W_k}. \quad (4.9)$$

Esimerkiksi lämpökertoimen ollessa 3 ja kompressorin tarvitseman sähkötehon  $1 \text{ kW}$ , tuottaa pumppu lämpöä  $3 \text{ kW}$  teholla. Lämpöpumpun toimintaperiaate noudattaa Carnot-kiertoprosessia, jonka mukaisesti lämpökertoimen teoreettiseksi maksimiksi saadaan

$$\zeta_{\max} = \frac{T_l}{T_l - T_h}, \quad (4.10)$$

missä  $T_l$  on lauhduttimen lämpötila ja  $T_h$  höyrystimen lämpötila. [37]

Kaavasta 4.10 havaitaan, että lämpöpumpun lämpökerroin on riippuvainen sekä höyrystymis- että lauhdumislämpötilasta. Jos lauhduttimen lämpötila pyritään pitämään vakiona, on lämpöpumpun lämmitysteho riippuvainen höyrystimen lämpötilasta. Kuvas-  
sassa 4.4 on esitetty kaavalla 4.10 saatu lämpökertoimen teoreettinen maksimi höyrystimen lämpötilan funktiona lauhduttimen lämpötilan pysyessä vakiona.



**Kuva 4.4.** Höyrystimen lämpötilan (ulkolämpötilan) vaikutus lämpökertoimen teoreettiseen maksimiarvoon lauhduttimen kolmella eri lämpötilalla.

Kuvasta 4.4 havaitaan lämpökertoimen olevan suurempi lauhduttimen lämpötilan ollessa alhaisempi. Käyttötarve määrää kuitenkin lauhduttimen lämpötilatason. Jos pumppua käytetään lämpimän veden tuotantoon, on lauhduttimen lämpötilan oltava vähintään  $70\text{ °C}$ . Huoneilman lämmittämisessä voidaan käyttää hieman alhaisempaa lämpötilaa. Lämpötilaeron ( $T_l - T_h$ ) kasvaessa kasvaa myös lauhduttimen ja höyrystimen välinen paine-ero, mikä lisää kompressorin rasitusta ja energiankulutusta sekä heikentää lämpökerrointa. Lämpöpumpun todellinen lämpökerroin jää noin 50%:iin teoreettisesta arvosta. [37; 43]

Lämpöpumppuja on suunniteltu eri käyttötarkoituksiin lämmön lähteestä ja kohteesta riippuen. Ilmalämpöpumput ovat lämpöpumppujärjestelmistä yksinkertaisimpia. Niissä höyrystin sijaitsee ulkoilmassa ja lauhdutin sisäilmassa, jolloin pumpun toimies- sa lämpö siirtyy ulkoilmasta sisäilmaan. Järjestelmän kiertosuunta voidaan myös muuttaa, jolloin pumppu toimii sisäilman jäädyttäjänä. Ilma-vesilämpöpumput siirtävät lämpöä ulkoilmasta vesivaraajaan, poistoilmalämpöpumput ottavat höyrystymislämmön poistoilmasta ja maalämpöpumput maaperän tai pohjaveden lämpöenergiasta. Maalämpöjärjestelmän etuna ilmalämpöpumppuihin on se, että syvällä maaperässä ympäristön lämpötila ei merkittävästi vaihtelee vuodenaikojen mukaan ja pumput pystyvät tuottamaan tarvittavan lämmön hyvällä lämpökertoimella myös talvella. [7]

## 4.5 Lämmön varastointi

Lämpöenergiaa voidaan varastoida nostamalla varastoitavan aineen lämpötilaa, kemiallisena reaktioenergiana tai faasimuutosenergiana. Asuinkiinteistöissä lämpöenergiaa varastoidaan yleensä rakenteisiin, kuten varaaviin tulisijoihin, betonilattiaan tai veteen. [27]

### 4.5.1 Varaavat tulisijat

Suomessa on arvioitu olevan yli miljoona tulisijaa, joissa poltetaan yli 6 miljoonaa kuutiometriä polttopuuta vuodessa. Puun käytöllä on tärkeä merkitys energiahuollon päästökuormituksen määrään. Puu käyttää kasvaessaan saman verran hiilidioksidia kuin siitä palaessa vapautuu, joten polttopuun käyttö on hiilidioksidineutraalia. Kevyissä tulisijoissa ei ole varaavaa massaa ja puuta poltetaan lämmön tarpeen mukaan. Varaavissa tulisijoissa yleisin polttotapa on panospoltto, jossa tulipesässä poltetaan kerralla verrattain suuri määrä pilkkeitä. Jotta asuintiloissa säilyisivät viihtyisät lämpöolosuhteet, varastoidaan osa poltossa syntyneestä lämmöstä tulisijan tiilimassaan. [33]

Tulisijan turvallinen käyttö edellyttää riittävää ilman saantia ja savukaasujen hallittua poistoa. Savuhormin toiminta käynnistyy moitteettomasti hormin ilmanpaineen ollessa 2-5 Pa huoneen painetta alempi. Palamisessa syntyvien palokaasujen vaikutuksesta paine-ero kasvaa nopeasti 25-30 Pascaliin. Palamisilmaa tarvitaan 120-160 m<sup>3</sup> tunnissa palamisen vaiheesta ja tulisijan koosta riippuen [38]. Ilmanvaihtoon on siten syytä kiinnittää huomiota tulisijaa suunniteltaessa. Koneellisissa ilmanvaihtojärjestelmissä on usein takkakytkin, jolla huoneistoon voidaan tuoda riittävästi ilmaa hyvän palamisen ja savukaasujen poiston varmistamiseksi. [33]

Varaavina tulisijoina käytetään perinteisesti tiilistä paikalla muurattuja tulisijoja, joskin valumassasta valmistetut kaupalliset tulisijat ovat yleistyneet. Lämmön varastointi tulisijan rakenteisiin perustuu tulisijamateriaalin lämpötilan nostoon huonelämpötilaa korkeammaksi. Tulisijan lämmityksessä varastoituneen lämpöenergian  $Q$  määrä on

$$Q = cm\Delta T, \quad (4.11)$$

missä  $c$  on materiaalin ominaislämpökapasiteetti (tiilelle  $c_t = 0,8 \text{ kJ/kg K}$ ),  $m$  on tulisijan massa ja  $\Delta T$  tulisijan materiaalin lämpötilan muutos [42].

Jos tulisijassa poltetaan 10 kg polttokuivaa (kosteus 18%) koivupilkettä on muodostuneen lämmön määrä 153 MJ. Tulisijan rakenteisiin tästä siirtyy noin 75% eli 115 MJ [33]. Jos tiilitulisijan massa on 2500 kg, saadaan kaavalla 4.11 tulisijamateriaalin lämmön nousuksi 58°C.

### 4.5.2 Lattia

Usein asuinrakennusten lattia muodostuu styroksin päälle valetusta betonilaatasta, jonka päälle pintamateriaalit on asennettu. Lattialämmitysjärjestelmässä lattian betonivalun sisään on sijoitettu huonekohtaisesti sähkövastukset tai putkisto lämpimän veden tai ilman kierrättämistä varten. Lattiavalua voidaan käyttää lämpöenergian varastoimiseen tekemällä lattialaatasta riittävän paksu (10-15 cm) ja sijoittamalla lämmitysvastukset tai –putkisto laatan puolivälin tuntumaan. Pintaan sijoitettaessa laatan pintalämpötila nou-



see kasvattaen konvektiivista lämmönsiirtoa huoneilmaan, jolloin lattiaan varastoituva lämpöenergia pienenee.

Betonin ominaislämpökapasiteetti on  $c_b = 0,92 \text{ kJ/kg K}$  ja tiheys  $\rho_b = 1500 \text{ kg/m}^3$  [42]. Näin ollen yhden lattianeliömetrin massa on  $150 \text{ kg}$  valun vahvuuden ollessa  $10 \text{ cm}$ . Jos lattian betonivalun lämpötilan sallitaan nousevan  $10^\circ\text{C}$ , saadaan kaavalla 4.10 lattiaan varastoituneeksi lämmöksi  $Q = 1,38 \text{ MJ/m}^2$ . Jos lattianvalun vahvuutta kasvatetaan  $15 \text{ cm}$ :iin, saadaan varastoituneeksi lämmöksi  $Q = 2,07 \text{ MJ/m}^2$ . Lattiava-lua voidaankin käyttää merkittävässä määrin lämmön varastointiin ja tasaiseen jakeluun kiinteistön eri tiloihin.

### 4.5.3 Vesi

Kiinteistöissä vettä tarvitaan ruuanlaittoon, peseytymiseen ja pyykinpesuun. Talousveden lisäksi vettä voidaan käyttää kiinteistön lämmönjakoon vesipatteri- tai lattialämmitysjärjestelmän mukaisesti sekä lämpöenergian varastointiin. Vedellä on hyvä lämmön varaamiskyky. Sen ominaislämpökapasiteetti on  $4,2 \text{ kJ/kg}$  [42]. Koska kiinteistöön tulevan veden lämpötila on  $4^\circ\text{C}$  tuntumassa, lämmitetään käyttövesi varaajassa yleensä yli  $60^\circ\text{C}$  lämpötilaan. Lämpimän käyttöveden varaajan koko määräytyy veden tarpeen mukaan.

Veden kulutus vaihtelee käyttötottumusten mukaisesti. Omakotikiinteistöissä vedenkulutus on noin  $120 \text{ l/vrk}$  henkilöä kohti [7 s. 156]. Jos omakotikiinteistössä käytetään lämmintä ( $38^\circ\text{C}$ ) vettä  $90 \text{ l/vrk}$  henkeä kohti, saadaan kaavalla 4.11 sen lämmittämiseen tarvittavaksi energiaksi  $12,9 \text{ MJ/vrk}$ . Lämpimän käyttöveden tuottamiseen tarvitaan siten vuodessa noin  $4690 \text{ MJ}$  eli noin  $1300 \text{ kWh}$  lämpöenergiaa henkeä kohti.

Jos vettä käytetään lämmönjakeluun, määräytyy sen tilavuus veden lämmitystavasta ja siitä, kuinka paljon järjestelmään halutaan lämmön varaamiskykyä. Sähkövastuksella lämmitettäessä vettä voidaan lämmittää lämmöntarpeen mukaan. Tällöin lämmityskattilan vesitilavuus on pieni, esimerkiksi  $3 \text{ litraa}$ , jolloin  $9 \text{ kW}$  sähkövastuksella saavutetaan  $5$  asteen lämpötilan nousu noin  $7$ :ssä sekunnissa ja tarvittava veden pumppausnopeus on  $0,43 \text{ l/s}$ . Lisäämällä kattilan vesitilavuutta voidaan lämmön varauskykyä kasvattaa vesimassan lämpökapasiteetin mukaisesti. Käytettäessä lämmitykseen suuritehoista lämmityskattilaa varustetaan lämmitysjärjestelmä erillisellä varaajalla, jota käytetään lämmön varastointiin. Esimerkiksi poltettaessa  $10 \text{ kg}$  polttokuivaa koivupilkettä  $75\%$  hyötysuhteella lämpiää  $390 \text{ kg}$  vesimassa noin  $70$  astetta. Varastoitua lämpöä voidaan purkaa lämmitysputkistoon vähitellen tarpeen mukaan.

Vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän suunnittelun lähtökohdana on kiinteistön lämmitysenergian ja -tehon tarve. Järjestelmän tulee pystyä vastaamaan eri vuodenaikojen aiheuttamiin lämmitysvaatimuksiin sekä lämmitystavan aiheuttamaan lämmön varastointitarpeeseen. Lämmitysenergian hankinnan hinnanvaihtelut voivat aiheuttaa myös tarvetta lämmönvarastointiin. Sopiva vesivaraajan koko voidaan määrittää kiinteistön

lämmitysjärjestelmän, lämpimän veden käytön ja lämmön varastointitarpeen huolellisella analyysillä.

## 5 KIINTEISTÖN ENERGIANTARPEEN MÄÄRITTÄMINEN

Tässä luvussa määritetään tarkasteltavan parihuvilan sähkön ja lämmön tarve. Aluksi selvitetään rakennuksen vaipan, vuotoilman ja ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö (yksikkönä  $W/K$ ) rakenneosien lämmönläpäisykertoimien ( $U$ -arvojen) sekä vuotoilman ja ilmanvaihdon suunnitteluarvojen perusteella. Lämpöenergian tarve määritetään koko rakennuksen ominaislämpöhäviön avulla. Lämpöhäviöt ovat suuresti riippuvaisia huoneiston sisä- ja ulkolämpötilasta, kuten lämmönsiirron kaavoista 4.5–4.7 voidaan havaita. Mitoittavana sisälämpötilana käytetään  $17^{\circ}C$ . Lomahuoneiston osalta sisälämpötila oletetaan laskettavaksi  $8^{\circ}C$ :een niiden lämmityskauden päivien ajaksi, jolloin huoneistossa ei oleskella. Ihmisten tuottaman lämmön, valaistuksen ja kiinteistölaitteiden lämpöhäviöiden sekä passiivisen aurinkoenergian oletetaan nostavan sisälämpötilan normaalille mukavuustasolle  $21^{\circ}C$ :een tuntumaan. Ulkolämpötila on selvitetty ilmatieteenlaitoksen julkaiseman lämmitystarveluvun kuukausiarvojen perusteella. [46; 47]

Sähkönkulutus on tässä työssä jaettu talous- ja kiinteistösähköksi. Taloussähköllä tarkoitetaan keittiökalusteiden, pyykinpesun ja muun kodin talouslaitteiden sekä elektroniikan kuluttamaa sähköenergiaa. Kiinteistösähköllä tarkoitetaan valaistuksen, ilmanvaihdon, lämminvesivaraajan ja muiden kiinteistötoimien kuluttamaa sähköenergiaa. Vaikka veden lämmittämiseen tarvittava energia sisältyykin arvioituun kiinteistösähkön kulutukseen, on lämpimän veden käyttö ja sen tuottamiseen tarvittava lämmitysenergia arvioitu erikseen.

### 5.1 Lämmön tarve

Vuoden 2010 alusta voimaan tulleissa rakentamismääräyksissä uusien rakennusten ominaislämpöhäviötä verrataan vertailurakennuksen ominaislämpöhäviöön. Suunniteltu rakennus täyttää lämpöhäviövaatimukset, kun rakennuksen ominaislämpöhäviö on korkeintaan vertailurakennuksen ominaislämpöhäviön suuruinen. Parihuvilan rakenteiden lämmönläpäisykertoimet ( $U$ -arvot), rakenteiden tiiviys ja ilmanvaihdon lämmön talteenotto on suunniteltu niin, että rakennus täyttää nykyiset ympärivuotisesti käytössä olevan asuinrakennuksen lämpöhäviövaatimukset. [44]

Rakennuksen vaippa koostuu ulkoseinistä, ovista ja ikkunoista sekä ylä- ja alapohjasta. Ulkoseinien pinta-ala lasketaan sisämittojen mukaan ikkunoiden ja ovien kokonaisala vähentäen. Ylä- ja alapohjan pinta-ala saadaan sisämittojen perusteella. Rakennus-

teiden lämmönläpäisykertoimet saadaan suunnitteluarvoista. Rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö  $\sum H_{joht}$  saadaan kaavalla

$$\sum H_{joht} = \sum U_i A_i, \quad (5.1)$$

missä  $U_i$  on rakennusosan  $i$  lämmönläpäisykerroin  $\left(\frac{W}{m^2 K}\right)$  ja  $A_i$  rakennusosan  $i$  pinta-ala. [48]

Ilmanvuotoja rakennukseen aiheutuu suoraan huokoisten rakenteiden läpi sekä eri rakenteiden rajapintojen välisten saumojen kautta. Rakennuksen tiiviyyttä kuvaava ilmanvuotoluku  $n_{50}$  ilmoittaa kuinka monta kertaa rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu tunnissa, kun rakennuksen sisä- ja ulkopuolella on  $50 Pa$  paine-ero. Ilmanvuotoluvun perusteella määritetään rakennuksen vuotoilmavirta  $q_{vv}$  kaavalla

$$q_{vv} = \frac{n_{50} V_i}{25}, \quad (5.2)$$

missä  $V_i$  on rakennuksen ilmatilavuus. Vuotoilman ominaislämpöhäviö  $H_{vi}$  saadaan kaavalla

$$H_{vi} = \rho_i c_{pi} q_{vv}, \quad (5.3)$$

missä  $\rho_i$  on ilman tiheys  $1,2 kg/m^3$ ,  $c_{pi}$  ilman ominaislämpökapasiteetti  $1000 J/kgK$  ja  $q_{vv}$  vuotoilmavirta. [48]

Asuinrakennuksen ilmanvaihto katsotaan riittäväksi, kun rakennuksen ilmatilavuus vaihtuu kerran kahden tunnin aikana. Koska korvausilma on ulkoilmaa, vaatii sen lämmittäminen jatkuvasti energiaa. Jatkuvasti toimivan ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö  $H_{iv}$  saadaan kaavalla

$$H_{iv} = \rho_i c_{pi} q_{vp} (1 - n_a), \quad (5.4)$$

missä  $q_{vp}$  on poistoilmavirta ja  $n_a$  lämmön talteenoton vuosihyötysuhde. Taulukkoon 5.1 on laskettu parihuvilan rakenteiden, vuotoilman ja ilmanvaihdon ominaislämpöhäviöt ja niiden summa kaavojen 5.1–5.4 avulla molempien huoneistojen sekä koko rakennuksen osalta. [48]

**Taulukko 5.1. Koko rakennuksen ja molempien huoneistojen ominaislämpöhäviöt.**

OSA 1 (Vakituiseissa käytössä oleva huoneisto)			
Vaippa	Ala ( $m^2$ )	$U$ -arvo ( $W / m^2 K$ )	$H_{joht}$ ( $W / K$ )
Ulkoseinät	58,2	0,17	9,89
Yläpohja	85,3	0,09	7,68
Alapohja	85,3	0,16	13,65
Ikkunat	14,6	0,8	11,68
Ovet	6,3	1,0	6,30
Vaippa yht.			49,19
	Ilmanvuotoluku $n_{50}$ (1/h)	Vuotoilmavirta $q_{vv}$ ( $m^3 / s$ )	$H_{vi}$ ( $W / K$ )
Vuotoilma	2,5	0,0059	7,05
	Poistoilmavirta $q_{vp}$ ( $m^3 / s$ )	LTO vuosihyötysuhde $n_a$ (%)	$H_{iv}$ ( $W / K$ )
Ilmanvaihto	0,029	45	19,39
Ominaislämpöhäviö $H_{joht,osa1}$			75,6

OSA 2 (Lomakäytössä oleva huoneisto)			
Vaippa	Ala ( $m^2$ )	$U$ -arvo ( $W / m^2 K$ )	$H_{joht}$ ( $W / K$ )
Ulkoseinät	34,9	0,17	5,93
Yläpohja	48	0,09	4,32
Alapohja	48	0,16	7,68
Ikkunat	14	0,8	11,20
Ovet	2,1	1	2,10
Vaippa yht.			31,23
	Ilmanvuotoluku $n_{50}$ (1/h)	Vuotoilmavirta $q_{vv}$ ( $m^3 / s$ )	$H_{vi}$ ( $W / K$ )
Vuotoilma	2,5	0,0033	3,96
	Poistoilmavirta $q_{vp}$ ( $m^3 / s$ )	LTO vuosihyötysuhde $n_a$ (%)	$H_{iv}$ ( $W / K$ )
Ilmanvaihto	0,016	45	10,88
Ominaislämpöhäviö $H_{joht,osa2}$			46,1

KOKO KIINTEISTÖ			
Vaippa	Ala ( $m^2$ )	$U$ -arvo ( $W / m^2 K$ )	$H_{joht}$ ( $W / K$ )
Ulkoseinät	93,05	0,17	15,82
Yläpohja	133,3	0,09	12,00
Alapohja	133,3	0,16	21,33
Ikkunat	28,6	0,8	22,88

Ovet	8,4	1	8,40
Vaippa yht.			80,42
	Ilmanvuotoluku $n_{50} (1/h)$	Vuotoilmavirta $q_{vv} (m^3/s)$	$H_{vi} (W/K)$
Vuotoilma	2,5	0,0092	11,0
	Poistoilmavirta $q_{vp} (m^3/s)$	LTO vuosihyötysuhde $n_a (%)$	$H_{iv} (W/K)$
Ilmanvaihto	0,046	45	30,28
Ominaislämpöhäviö $\sum H_{johi}$ (vertailuarvo 122)			121,7

Taulukossa 5.1 esitetyt lämmönläpäisykerrointen arvot noudattavat rakennusmääräysten vertailuarvoja muiden rakenteiden paitsi ikkunoiden osalta. Ikkunoissa on käytetty  $U$ -arvoa 0,8 vertailuarvon 1,0 sijaan. Tämä johtuu rakennuksen vertailuarvoa suuremmasta ikkunapinta-alasta, jolloin valitsemalla paremmin lämpöä pitävät ikkunat saadaan kokonaislämpöhäviö kompensoitua. Samalla ilmanvuotoluvun suunnitteluarvoksi voidaan valita 2,5, mikä on hieman suurempi vertailuarvoon 2,0 nähden. Tällä varmistetaan tiiviysmittauksen onnistuminen, sillä käytettäessä neljää pienempää ilmanvuotolukua on rakennuksen tiiviys osoitettava jälkikäteen mittaamalla tai muulla hyväksyttävällä menettelyllä. Ilmanvaihdon vuosihyötysuhteelle käytetään vertailuarvoa 0,45, mikä vastaa nykyaikaisella lämmön talteenotolla varustettua ilmanvaihtokonetta. [44]

Rakenteiden läpi johtuva lämpöenergia saadaan ominaislämpöhäviöiden perusteella kaavalla

$$Q_{johi} = \sum H_{johi} (T_s - T_u) \Delta t / 1000, \quad (5.5)$$

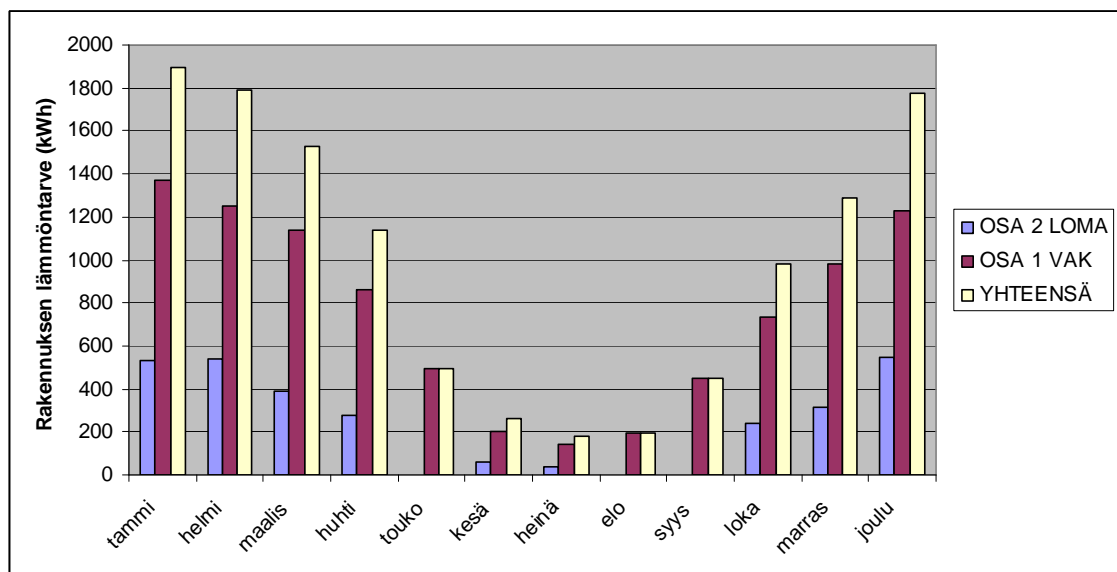
missä **Error! Objects cannot be created from editing field codes.** on sisäilman,  $T_u$  ulkoilman lämpötila ja  $\Delta t$  aikajakson pituus tunteina. Jakajalla 1000 suoritetaan yksikkömuunnos kilowattitunneiksi. Ulkoilman lämpötila on laskettu Joensuun lämmitystarveluvun kuukausiarvojen perusteella. Maanvastaisen lattian osalta ulkolämpötilana käytetään maan kuukausittaista keskilämpötilaa. Taulukossa 5.2 on esitetty lämpöhäviölaskelmassa tarvittavat ulkolämpötilatiedot sekä kuukausittaiset lämpöhäviöt. [45; 48]

**Taulukko 5.2.** Ulkolämpötilojen kuukausikeskiarvot ja rakennuksen lämpöhäviöt kuukausittain. [45]

kuukausi	tamm	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Lämmitys tarveluku	837	762	670	479	231	43	12	55	237	434	598	759
ulkolämpötila (°C)	-10,00	-10,21	-4,61	1,03	9,55	15,57	16,61	15,23	9,10	3,00	-2,93	-7,48
maanlämpötila (°C)	5	4	3	2	2	3	5	6	7	8	8	7

Lämpöhäviöt (kWh)												
Osa1 (Vak)	1367	1253	1139	860	496	202	140	194	451	737	978	1231
Osa2 (Loma)	531	540	389	275	0	59	39	0	0	242	312	547
Kiinteistö	1898	1793	1528	1136	496	260	178	194	451	979	1290	1778
Rakennuksen lämpöhäviöt vuodessa 11982 kWh												

Taulukon 5.2 tietojen pohjalta voidaan arvioida rakennuksen lämmitystarvetta eri vuodenaikoina. Asuinhuoneiston lämmöntarve on 9050 kWh ja lomahuoneiston 2940 kWh. Rakennuksen vuotuiseksi lämmitysenergian tarpeeksi saadaan noin 12000 kWh. Loka-kuusta maaliskuuhun lämmitystarve on 9300 kWh eli noin 78% vuotuisesta lämmitysenergian tarpeesta ja joulukuusta helmikuuhun 5500 kWh eli 46% vuotuisesta tarpeesta. Rakennuksen lämmitystarvetta eri kuukausina on havainnollistettu kuvassa 5.1.



**Kuva 5.1.** Rakennuksen vuotuisen lämmöntarpeen (12000 kWh) jakautuminen eri kuukausille.

Lämpimän käyttöveden kulutus määritetään henkilöiden lukumäärän mukaan. Pientalossa asuvan henkilön keskimääräinen lämpimän veden kulutus on 50 litraa vuorokaudessa [48]. Vedenlämmityksen tarvitsema energia  $Q_{lkv}$  saadaan kaavalla

$$Q_{lkv} = \rho_v V_{lkv} c_{pv} (T_{lkv} - T_{kv}) / 3600, \quad (5.6)$$

missä  $\rho_v$  on veden tiheys  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $V_{lkv}$  lämpimän käyttöveden kulutus,  $c_{pv}$  veden ominaislämpökapasiteetti  $4,2 \text{ kJ/kgK}$ ,  $T_{lkv}$  lämpimän veden lämpötila ja  $T_{kv}$  kylmän veden lämpötila. Jakajalla 3600 suoritetaan yksikkömuunnos kilowattitunneiksi. Lämmönousuksi varaajassa ( $T_{lkv} - T_{kv}$ ) voidaan olettaa  $50^\circ\text{C}$ . Kaavalla 5.6 lasketut lämpimän käyttöveden tuottamiseen tarvittavat kuukausienergiat ja varaajan lämpöhäviöt on esitetty taulukossa 5.3. Jos varaajan tilavuudeksi oletetaan 300 litraa, on lämpöhäviöte-

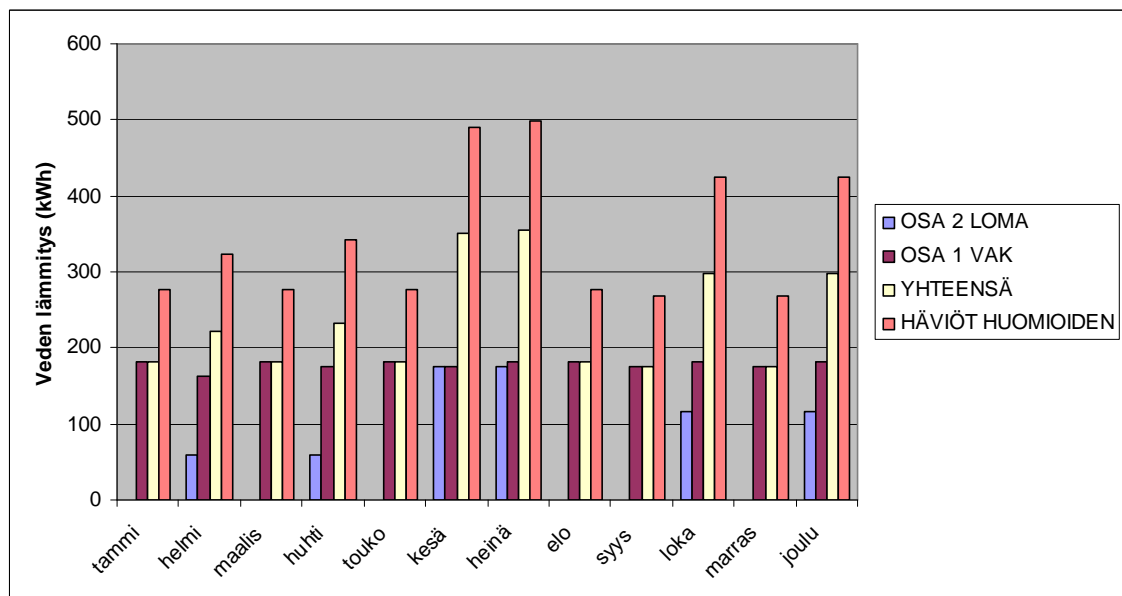
ho noin 150W . Varaajan lämpöhäviöihin kuuluva energia saadaan lämpöhäviötehon ja käyttäjän tulona. [48]

**Taulukko 5.3.** Lämpimän käyttöveden tuottamiseen tarvittavan energian jakautuminen eri kuukausille ja lämminvesivaraajan häviöt.

kuukausi	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Osa1 (Vak)	181	163	181	175	181	175	181	181	175	181	175	181
Osa2 (Loma)	0	58	0	58	0	175	175	0	0	117	0	117
Kiinteistö	181	222	181	233	181	350	356	181	175	298	175	298
Varaajan häviöt	96	102	96	108	96	139	142	96	93	127	93	127
Yhteensä	277	324	277	342	277	489	498	277	268	424	268	424

Kiinteistön lämpimän veden energiantarve 2829 kWh, varaajan häviöiden kanssa yhteensä 4143 kWh.

Taulukosta 5.3 havaitaan, että kiinteistössä tarvitaan lämpimän käyttöveden tuottamiseen noin 2800 kWh energiaa vuosittain. Tämän kokonaisenergian jakautumista huoneistojen kesken ja eri kuukausille on havainnollistettu kuvassa 5.2.



**Kuva 5.2.** Lämpimän käyttöveden energiantarve kuukausittain.

Kuvasta 5.2 havaitaan lämpimän käyttöveden tuottamiseen tarvittavan energian tasainen jakautumien vuoden eri kuukausille vakituudessa käytössä olevan huoneiston osalta. Vaihtelua veden lämmitysenergian tarpeeseen aiheuttaa lomahuoneiston käytön epätasainen jakautuminen eri kuukausille. Lämpimän veden tuottamiseen kuluu eniten energiaa kesäaikaan (noin 350 kWh/kk), jolloin lomahuoneistoissa oleskellaan eniten. Loka- ja joulukuussa energiantarve on noin 300 kWh/kk. Käytännössä lämminvesivaraajan lämpöhäviöt lisäävät lämpimän käyttöveden energiantarvetta. Lisäämällä lämpimän käyttöveden tuottamiseen tarvittavaan energiaan huoneistojen varaajien häviöt saadaan kiinteistön lämpimän käyttöveden energiantarpeeksi 4143 kWh vuodessa, mikä jakautuu



kuukausittain taulukossa 5.3 esitetyllä tavalla. Tätä jakaumaa on havainnollistettu myös kuvassa 5.2.

## 5.2 Sähkön tarve

Asuinkiinteistössä sähköenergiaa tarvitaan erilaisten kiinteistölaitteiden, kuten ilmanvaihdon tai valaistuksen, käyttämiseen ja ohjaukseen sekä erilaisten talouslaitteiden, kuten liedien tai viihde-elektroniikan, toimintaan. Lisäksi sähköenergiaa voidaan käyttää lämmitykseen. Tarkasteltavan parihuvilan sähkönkulutus määritetään valitsemalla huoneistoille normaali nykyaikainen kodinlaitevarustus ja arvioimalla niiden vuotuista käyttöaika- ja vuosikulutuksen. Valittu varustus käyttöaika-arvioineen ja vuosikulutuksineen on esitetty taulukossa 5.4.

**Taulukko 5.4.** Huoneistojen kodinlaitteet ja niiden käyttöön tarvittavat vuosienenergiat.[49; 50; 51; 52]

Laite	Malli/Määrä	Teho (W)	OSA 1 (Vak)		OSA 2 (Loma)	
			Aika (h/vrk)	E (kWh/a)	Aika (h/vrk)	E (kWh/a)
JK	UPO 31850	109	4,4	175		
Pakastin	UPO SP284	95	7,6	263	4,4	33
APK	UPOXLPlusD90D	1700	0,35	220	0,35	36
MikroAU	UPO M 770	1150	0,2	84	0,2	13,8
Liesi	UPO Ci 1000	10750	1	840	1	138
Ltuuletin	UPO E6031	300	1	110	1	18
S_uuni	UPO Ci 1000	2350	0,5	429	0,5	70,5
PyykinPK	UPO Pk 2600	2250	0,3	228	0,3	37,5
TV	32FLD785LM	180	3,5	230	2	21,6
Muut				200		33
<b>Talous yht.</b>				<b>2779</b>		<b>401</b>
<i>SisäVAL</i>	20 kpl (a 15W)	300		300		16
<i>UlkoVAL</i>	7kpl (a 20W)	140		60		3,8
<i>LVV</i>	1 kpl (300l)	3000		3258		886
<i>IVKone</i>	Enervent Pingvin	130	24	729	24	410
<i>Autolämm</i>	2 kpl (a 500W)	1000	2h/kerta	88	2h/kerta	8
<i>vesipumppu</i>	Ratko A2/1	750	0,07	25	0,14	8,4
<b>Kiinteistö yht</b>				<b>4461</b>		<b>1332</b>

Taulukon 5.4 aika-arvioissa jääkaapin ja pakastimen koneiston vuorokautinen käyntiaika on laskettu valmistajan ilmoittaman vuosienenergiakulutuksen perusteella. Loma-huoneistoon on valittu jääkaappipakastin, jonka arvot ovat pakastimen kohdalla. Astianpesukonetta oletetaan käytettävän kerran joka toinen päivä. Liettä oletetaan käytettävän keskimäärin 2,3 kW teholla taulukon liitännätehosta poiketen. Sähköuunin, pyykinpesukoneen ja television energiankulutus perustuu käyttöaika-arvioihin. Kohdassa muut on arvioitu muun kodinelektroniikan kuten tietokoneen käytön tai matkapuhelimen latauksen energiantarve. Valaistusta on oletettu tarvittavan marraskuusta maaliskuuhun 7 h vuorokaudessa, syys-, loka-, huhti- ja toukokuussa 4 h vuorokaudessa ja muuna aikana 1 h vuorokaudessa. Käyttöaikana valaistuksesta on oletettu olevan puolet päällä samanaikaisesti. Lampuiksi on valittu nykyaikaiset energiansäästölamput. Läm-

minvesivaraajan energiantarve on veden lämmitystarve kulutuksen mukaan huoneistoille jaettuna ja varaajan lämpöhäviöt käyttöajan mukaan jaettuna. 300 litran varaajan lämpöhäviötehoksi on oletettu 150 W [48]. Autolämmitystä on oletettu käytettävän vakituksessa asunnossa jouluihelmikuussa 12 kertaa kuukaudessa ja marras- sekä maaliskuussa 4 kertaa kuukaudessa. Lomahuoneistossa autolämmitystä on oletettu tarvittavan joulukuussa 5 kertaa ja helmikuussa 3 kertaa. Lomahuoneistossa lämmitettäviä auto-paikkoja on yksi. Vesipumpun käyntiaika on saatu vedenkulutuksen 120 l/vrk henkeä kohden ja pumpun tuoton 43 l/min mukaan [49]. Taulukon 5.4 pohjalta laskettu talous- ja kiinteistösähkön vuotuinen tarve on esitetty taulukossa 5.5.

**Taulukko 5.5.** Rakennuksen talous- ja kiinteistösähkön vuositarve (kWh).

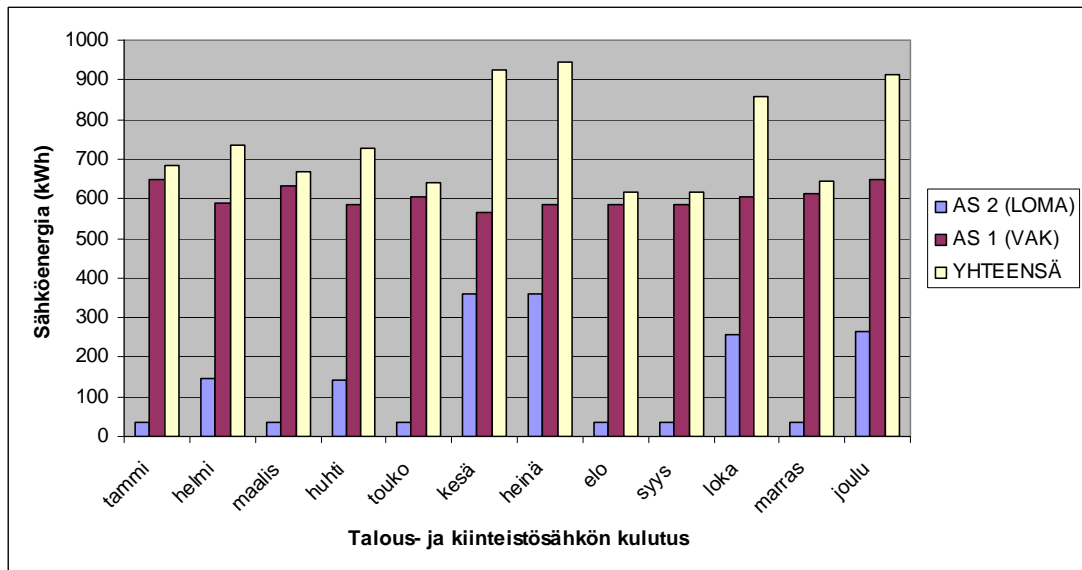
	Osa 1 (vak)	Osa 2 (loma)	Koko rakennus
Talous	2779	401	3180
Kiinteistö	4461	1332	5792
Yhteensä	7239	1733	8972

Taulukon 5.5 arvoista havaitaan, että koko rakennuksen vuotuinen sähkönkulutus on hieman vajaa 9000 kWh, josta taloussähkön osuus on 35% ja kiinteistösähkön 65%. Sähkön kokonaistarpeesta vakituksessa käytössä olevan huoneiston osuus on 81% ja lomahuoneiston 19%. Huoneistojen talous- ja kiinteistösähkön vuosikulutus jakautuu eri kuukausille käyttökohteen ja -tarpeen perusteella. Koska taloussähkö sisältää niiden laitteiden sähkönkulutuksen, joita käytetään huoneistossa oleskellessa, jakautuu sen kulutus tasaisesti käyttöpäivien mukaan. Kiinteistösähkönkulutus sisältää vuodenaikojen mukaan vaihtelevaa kulutusta (valaistustarve, autonlämmitys), käytön mukaan vaihtelevaa kulutusta (LVV, vesipumppu) ja käytöstä lähes riippumatonta kulutusta (ilmanvaihtokone). Talous- ja kiinteistösähkön tarpeen jakautuminen eri kuukausille on esitetty taulukossa 5.6.

**Taulukko 5.6.** Sähkön vuotuisen kokonaistarpeen sekä talous- ja kiinteistösähkön jakautuminen eri kuukausille kilowattitunteina.

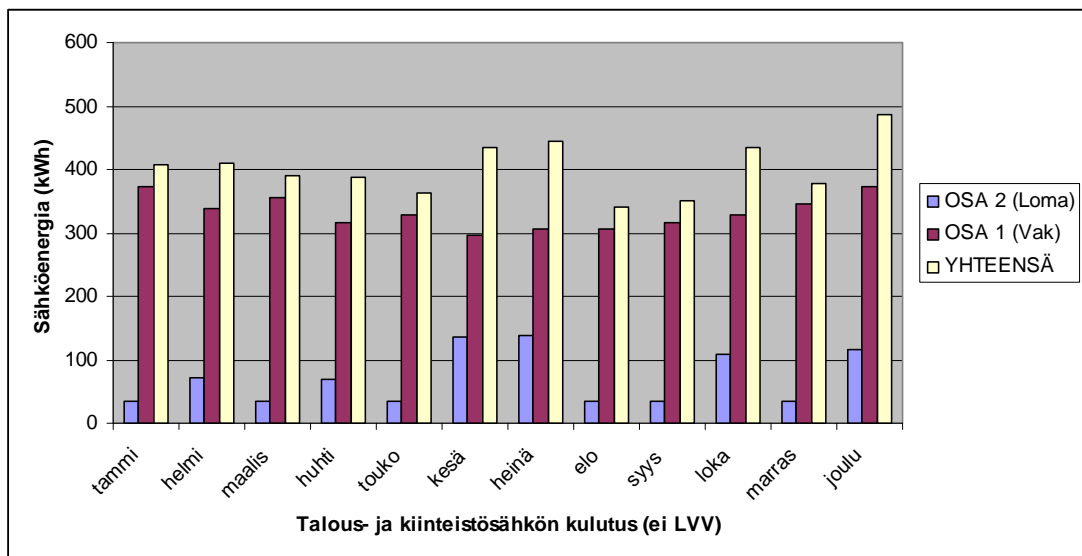
Osa 1 (vak)	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Talous	236	213	236	228	236	228	236	236	228	236	228	236
Kiinteistö	412	375	396	356	368	336	348	348	356	368	384	412
Yhteensä	648	588	632	585	604	565	584	584	585	604	612	648
Osa 2 (loma)	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Talous	0	33	0	33	0	100	100	0	0	67	0	67
Kiinteistö	35	113	35	110	35	258	259	35	34	188	34	197
Yhteensä	35	146	35	144	35	358	359	35	34	255	34	263
Koko rak.	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Talous	236	247	236	262	236	329	336	236	228	303	228	303
Kiinteistö	447	488	431	467	403	594	607	382	390	557	418	609
Yhteensä	683	734	667	728	639	923	943	618	618	860	646	912

Molempien huoneistojen ja koko rakennuksen vuotuisen sähkötarpeen jakautumista eri kuukausille on havainnollistettu kuvassa 5.3.



**Kuva 5.3.** Kiinteistön sähkötarpeen jakautuminen eri kuukausille.

Kuvasta 5.3 havaitaan sähkön kuukausittaisen tarpeen vaihtelevan karkeasti 600 kWh ja 950 kWh välillä. Sähkötarpeen kokonaismäärässä näkyy selvästi lomahuoneiston käytön vaikutus. Suurin sähkötarve on kesällä sekä loka- ja joulukuussa, jolloin lomahuoneistossa oleskellaan eniten. Muuna aikana sähkötarve on kohtuullisen tasaista pysytellen 600 kWh ja 740 kWh välillä. Lämpimän veden tuottamiseen tarvittava energia 4140 kWh on 46% sähkön kokonaistarpeesta. Jos lämmintä käyttövetä ei tuoteta sähköllä, tasoittuu sähkötarpeen kuukausijakauma hieman. Tällöinkin lomahuoneiston käyttöajat erottuvat selvästi muusta ajasta. Kuvassa 5.4 on esitetty kiinteistön sähkötarpeen jakauma, kun lämpimän veden tuottamiseen ei käytetä sähköenergiaa.

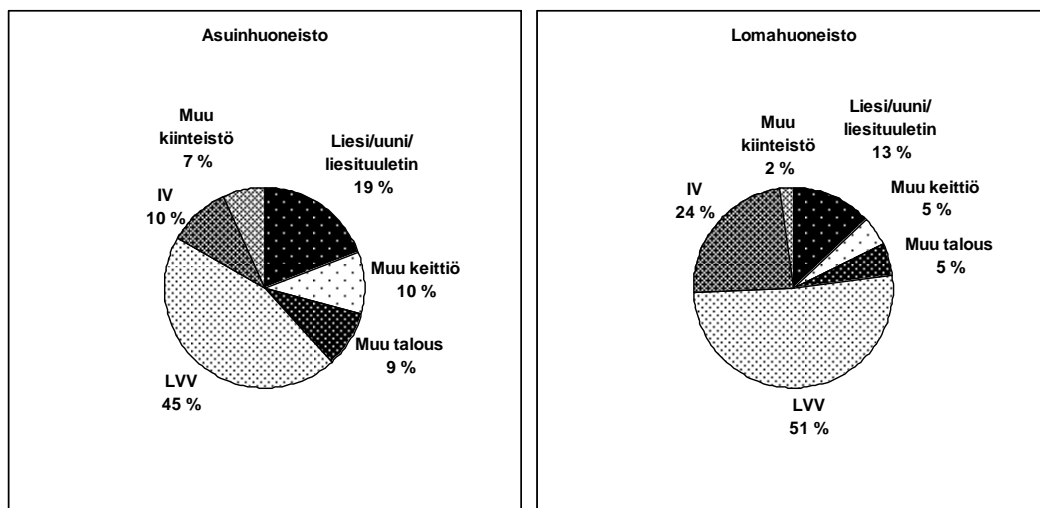


**Kuva 5.4.** Kiinteistön sähkötarve, kun sähköä ei käytetä veden lämmitykseen.

Jos vedenlämmitys hoidetaan ilman sähköä, havaitaan kuvasta 5.4 kiinteistön vuotuisen sähköntarpeen laskevan lähes 4800 kWh:iin. Tällöin suurin sähköntarve on joulukuussa 490 kWh, kesä-, heinä- ja lokakuussa tarve on hieman vajaa 450 kWh. Muiden kuukausien aikana sähköntarve on kohtuullisen tasaista 350-400 kWh:n tasoa.

Tarkastelemalla huoneistojen sähköntarvetta erikseen havaitaan taulukosta 5.5, että vakituksessa käytössä olevan huoneiston vuotuinen sähkönkulutus on hieman yli 7200 kWh, josta kiinteistösähköä 4460 kWh ja taloussähköä 2780 kWh. Taloussähkön kulutus on 38% ja kiinteistösähkön 62% huoneiston sähköntarpeesta. Kiinteistösähkön suuri suhteellinen määrä selittyy lämpimän veden tuottamiseen käytetyllä sähköenergialla. Asuinhuoneiston veden lämmittämiseen käyttämä sähköenergia on 3260 kWh, mikä vastaa 73% kiinteistösähkön kokonaismäärästä ja 45% huoneiston sähkönkulutuksen kokonaismäärästä.

Lomahuoneiston vuotuinen sähkönkulutus on 1730 kWh, josta kiinteistösähköä on 1330 kWh ja taloussähköä 400 kWh. Taloussähkön kulutus on siten 23% ja kiinteistösähkön 77% huoneiston vuotuisesta kokonaiskulutuksesta. Kiinteistösähköstä kuluu lämpimän veden tuottamiseen 890 kWh, mikä on 67% huoneiston kiinteistösähkön tarpeesta ja 51% sähkön kokonaistarpeesta. Lomahuoneiston taloussähkön pienempi suhteellinen osuus sähköntarpeesta asuinhuoneistoon nähden selittyy sillä, että talouslaitteita ei käytetä poissa ollessa. Kiinteistölaitteista taas ilmanvaihtokoneen on toimittava myös poissa ollessa, mikä lisää lomahuoneiston kiinteistösähkön suhteellista osuutta. Sähkönkulutuksen laitekohtaista jakaumaa molempien huoneistojen osalta on havainnollistettu kuvassa 5.5.



**Kuva 5.5.** Huoneistojen sähkönkulutuksen jakautuminen eri laiteryhmiin kesken.

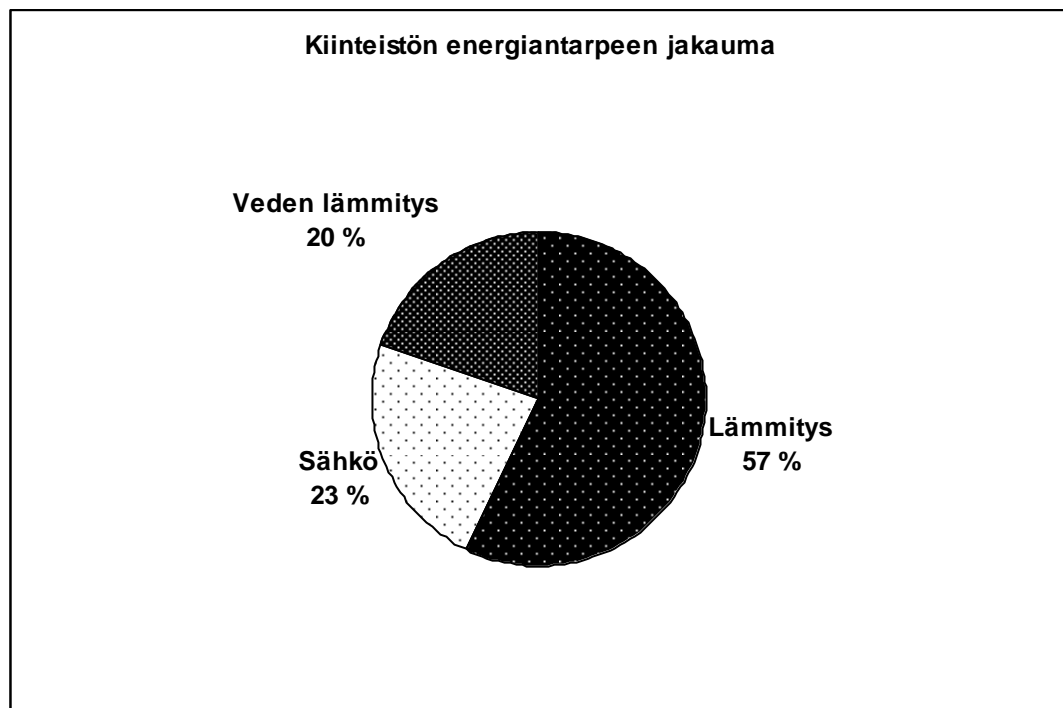
Kuvan 5.5 laiteryhmäkohtaisista sähköntarpeen jakaumista nähdään eri laiteryhmiin osuus huoneistojen sähköntarpeesta. Talous- ja kiinteistösähkön tarpeesta kahta suurinta laiteryhmiä on tarkasteltu erikseen. Taloussähköstä lieden sähköenergian tarve on suurin ja sähköuunin toiseksi suurin. Yhteensä nämä vastaavat 50% vakituksessa käytössä olevan huoneiston ja 57% lomahuoneiston taloussähköntarpeesta. Taloussähkön jäljelle

jäävä osuus jakautuu melko tasan muiden keittiölaitteiden ja muiden talouslaitteiden kesken. Kiinteistösähkön toiseksi suurin tarve lämpimän veden tuottamisen jälkeen on ilmanvaihdolla, joka vastaa 31% lomahuoneiston ja 16% vakituksessa käytössä olevan huoneiston kiinteistösähkön tarpeesta.

Koko kiinteistön suurimmat sähkönkuluttajat ovat lämmin käyttövesi (46%), liesi/uuni/liesituuletin (18%) ja ilmanvaihtokone (13%). Kunkin osuus kiinteistön sähkön kokonaistarpeesta on suluissa. Etsittäessä kiinteistön mahdollisia sähkönsäästökohteita nämä kolme sähköenergiantarvetta ovat potentiaalisimmat ehdokkaat.

### 5.3 Kiinteistön energiantarve

Kohtien 5.1 ja 5.2 perusteella kiinteistön vuotuinen energian kokonaistarve on noin 21000 kWh. Tästä lämmön osuus on noin 12000 kWh, sähkön osuus ilman veden lämmitystä 4830 kWh ja lämpimän veden tuottamisen osuus varaajan lämpöhäviöt huomioiden 4140 kWh. Kiinteistön kokonaisenergian tarvetta on havainnollistettu kuvassa 5.6.



**Kuva 5.6.** Kiinteistön vuosienergian jakautuminen.

Kuvasta 5.6. havaitaan, että huoneilman ja veden lämmityksen energiantarve yhdessä muodostaa 77% kiinteistön kokonaisenergiantarpeesta. Kiinteistön sähköntarpeen määrään vaikuttaa olennaisesti se, kuinka paljon huoneilman lämmitykseen ja lämpimän veden tuottamiseen käytetään sähkövastuksia. Lämminvesivaraajissa on lähes poikkeuksetta sähkövastus riittävän lämpötilatason varmistamiseksi ja ylläpitämiseksi riippumatta varsinaisesta vedenlämmitysjärjestelmästä. Sähkön tarvetta voidaan kuitenkin vähentää esilämmittämällä vettä muilla energialähteillä. Uusiutuvia energiamuotoja

hyödynnettäessä sähköntarve on olennainen mitoitustekijä. Sähköä ja lämpöä tulisi olla käytettävissä riittävästi silloin, kuin sitä tarvitaan. Kiinteistön energiantuotantojärjestelmän pitää pystyä luotettavasti vastaamaan tähän haasteeseen.

## 6 KIINTEISTÖN ENERGiantuotannon TARKASTELU

Tässä luvussa tarkastellaan erilaisia vaihtoehtoja kiinteistön energiantarpeen kattamiseksi. Vuositasolla kiinteistön lämmitykseen todettiin tarvittavan energiaa noin  $12000\text{ kWh}$ , veden lämmitykseen  $4140\text{ kWh}$  ja sähkölaitteiden sekä valaistuksen käyttöön  $4830\text{ kWh}$ . Aluksi tarkastellaan vaihtoehtoja, joissa kiinteistöön tuodaan tarvittava sähköenergia paikallisen verkkoyhtiön sähköverkosta. Kiinteistön omilla energiantuotantoratkaisuilla pyritään tällöin vähentämään ostosähkön määrää. Molempiin huoneistoihin on suunniteltu rakennettavaksi tulisijat paitsi peruslämmönlähteeksi myös tunnelmallisista syistä. Tämän vuoksi energiantuotantoa tarkastellaan aina tulisijojen kanssa. Toisena lähtökohtana tarkastellaan energiantuotantovaihtoehtoja, joissa kiinteistön oma energiantuotantojärjestelmä pystyisi kattamaan koko kiinteistön energiantarpeen. Tällöin kiinteistöä ei liitettäisi paikallisen verkkoyhtiön sähköverkkoon.

### 6.1 Sähköliittymän sisältävät järjestelmät

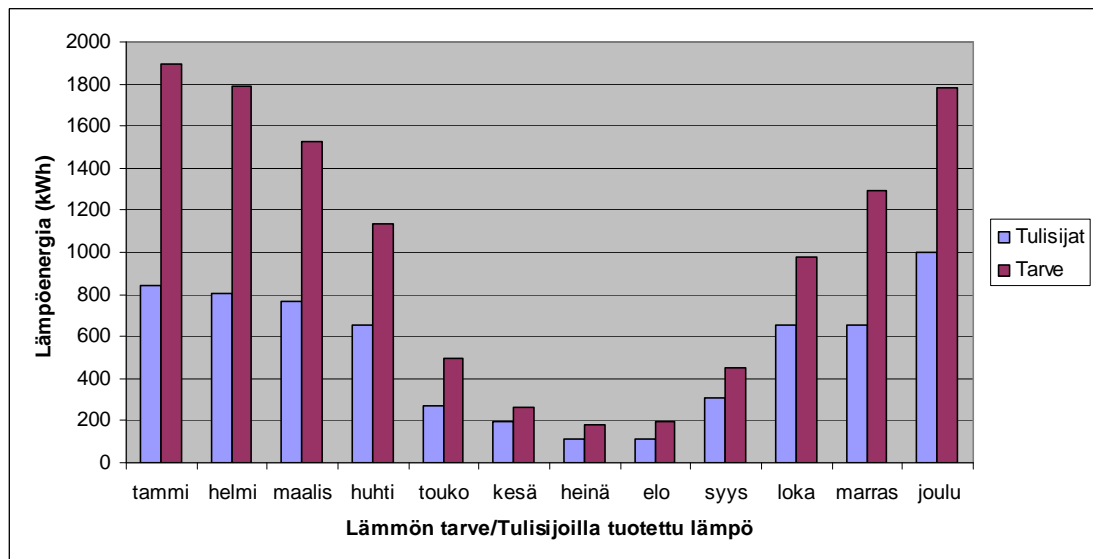
Kiinteistön liittäminen paikallisen sähköyhtiön jakeluverkkoon on normaali tapa hankkia kiinteistöön tarvittava määrä sähköenergiaa. Sähkö tuotetaan eri puolilla maata olevissa voimalaitoksissa kantaverkkoon, josta paikallinen sähköyhtiö jakaa sähköenergian pienkuluttajille oman jakeluverkkonsa kautta. Laajassa järjestelmässä sähköenergia voidaan tuottaa tarpeen mukaan ja kulloinkin edullisimmalla tuotantomuodolla, jolloin kustannustehokkuus sekä huoltovarmuus ovat korkeaa tasoa. Lisäksi sähkön laatu täyttää eurooppalaiset standardit ja kuluttaja voi huoletta kuluttaa tarvitsemansa sähköenergian omilla sähkölaitteillaan.

Kiinteistön energianhuollon perusvaihtoehdoksi valitaan sähköliittymä, josta ostetaan kiinteistössä kulutettava sähköenergia kokonaisuudessaan. Lämmitykseen käytettävää sähköenergian tarvetta pienennetään tulisijoilla tuotetulla lämmöllä. Tulisijoja oletetaan lämmitettävän asuinhuoneistossa 150 kertaa ja lomahuoneistossa 16 kertaa vuodessa lämmöntarpeen mukaan. Lämmityskertojen ja tuotetun lämmön jakautuminen eri kuukausille on esitetty taulukossa 6.1. Poltettavan puun määräksi on oletettu  $12\text{ kg}$  lämmityskertaa kohden, jolloin polttopuuta tarvitaan noin  $2000\text{ kg}$  vuodessa.

**Taulukko 6.1.** Kiinteistön tulisijojen lämmityskerrat ja tuotettu lämpö eri vuodenaikoina.

kuukausi	tammi	helmi	maalis	huhti	touko	kesä	heinä	elo	syys	loka	marras	joulu
Osa1 (Vak)	22	18	20	15	7	4	2	3	8	12	17	22
Osa2 (Loma)		3		2		1	1			5		4
Lämpö kWh	845	806	768	653	269	192	115	115	307	653	653	998
Tulisijoilla tuotettu lämpö yhteensä 6374 kWh.												

Taulukosta 6.1 havaitaan, että lämmityskertojen määrää ei mukavuussyistä merkittävästi voida nostaa. Lämmityskertoja on oletettu olevan kerran päivässä talven kovimmilla pakkasilla ja muuna aikana harvemmin. Puun poltolla tulisijoissa havaitaan kiinteistöön saatavan 6374 kWh lämpöä vuodessa, joka on 53% kiinteistön lämmöntarpeesta. Tulisijoilla tuotetun lämmön osuutta kiinteistön kuukausittaisesta lämmöntarpeesta on havainnollistettu kuvassa 6.1.



**Kuva 6.1.** Tulisijoilla tuotettu lämpö ja lämmöntarve eri kuukausina.

Se osa kiinteistön lämmöntarpeesta, jota ei saada katettua tulisijoja lämmittämällä havaitaan kuvasta 6.1. Tämän lisälämmön tarve on 5608 kWh ja se tuotetaan energia-vaihtoehdossa 1 sähköverkosta ostettavalla sähköenergialla. Lisäksi ostettavaa sähköenergiaa tarvitaan lämpimän käyttöveden tuottamiseen 4143 kWh ja muuhun talous- ja kiinteistösähköön 4829 kWh. Ostettavan sähköenergian kokonaismääräksi tulee siten 14580 kWh. Vaihtoehdossa 1 tarvitaan siis:

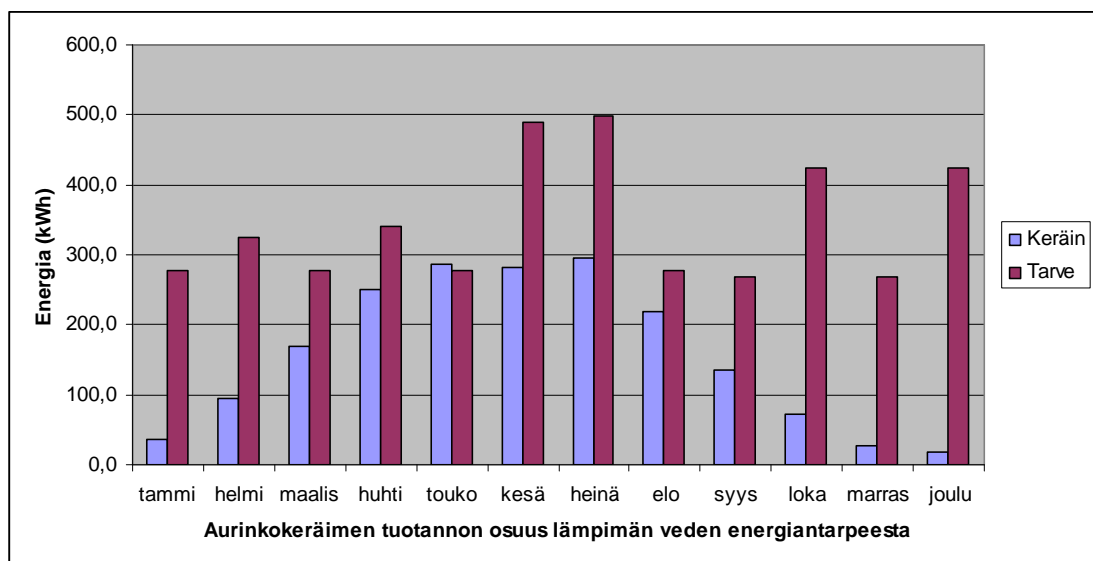
- polttopuuta 2000 kg
- sähköradiaattorit
- ostosähköenergiaa 14580 kWh.



Ostettavan sähköenergian määrää voidaan pienentää tuottamalla ilmalämpöpumpulla lämmöntarpeesta se osa, jota tulisijoilla ei voida kattaa. Jos tarvittava lisälämpö  $5608 \text{ kWh}$  tuotetaan lämpöpumpulla lämpökerroinella 3, tarvitaan lämmitykseen sähköenergiaa  $1869 \text{ kWh}$ . Näin ollen ostosähkön tarve pienenee  $3739 \text{ kWh}$ , jolloin ostettavan sähköenergian kokonaismääräksi saadaan  $10841 \text{ kWh}$  vuodessa. Näin saadaan energiavaihtoehto 2, jossa tarvitaan:

- polttopuuta  $2000 \text{ kg}$
- ilmalämpöpumppu (lämpökerroin 3)
- sähköradiaattorit (varalla)
- ostosähköenergiaa  $10841 \text{ kWh}$ .

Ostettavan sähköenergian määrään voidaan edelleen vaikuttaa tuottamalla lämmintä käyttövedtä aurinkokeräimillä. Aurinkokeräinten pinta-ala on valittava niin, että keräinten tuottaman lämpimän veden määrä ei ylitä kulutusta minään vuodenaikana. Tällöin keräinten tuottama lämmin vesi voidaan kokonaisuudessaan hyödyntää. Oletettaessa aurinkokeräimen hyötysuhteeksi 30% ja tarkastelemalla kuvan 5.2 lämpimän veden kulutuksen sekä kuvan 3.8 auringon säteilyenergian jakaumia havaitaan toukokuun arvojen asettuvan aurinkokeräinten mitoituksen perustaksi. Toukokuussa auringon säteilyenergian määrä on noin  $160 \text{ kWh/m}^2$  ja lämpimän veden energiatarve varaajan häviöt huomioiden noin  $280 \text{ kWh}$ . Käyttöveden lämmitykseen tarvittava energia saataisiin katettua toukokuussa  $6 \text{ m}^2$  tasokeräimillä. Muina aikoina keräinten tuotto olisi kulutusta pienempää.  $6 \text{ m}^2$  tasokeräimillä tuotetun lämmön osuutta lämpimän käyttöveden energiatarpeesta on havainnollistettu kuvassa 6.2.



**Kuva 6.2.** Aurinkokeräimillä tuotetun lämmön osuus lämpimän käyttöveden energiatarpeesta.

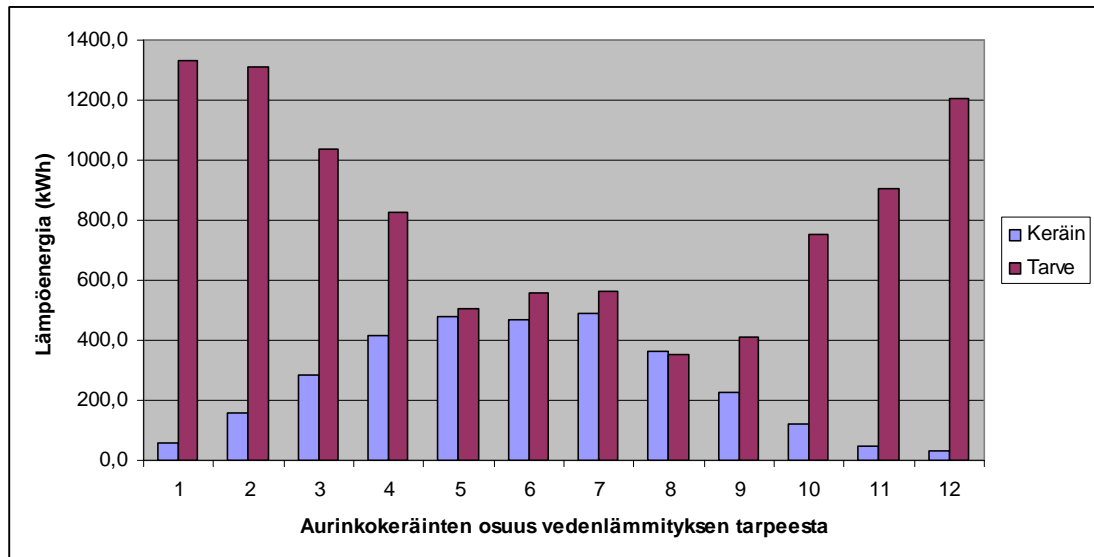
Kuvasta 6.2. nähdään  $6\text{ m}^2$  aurinkokeräimen vuosituotannon  $1886\text{ kWh}$  jakautuminen eri kuukausille. Aurinkokeräimillä voidaan kiinteistössä kattaa noin 46% lämpimän käyttöveden tarvitsemasta energiasta. Tämä vähentää suoraan ostettavan sähköenergian määrää, joten veden lämmittämiseen tarvittaisiin vielä  $2257\text{ kWh}$  ostosähköä. Kun tähän lisätään ilmalämpöpumpun tarvitsema sähköenergia  $1869\text{ kWh}$  ja muu sähköntarve  $4829\text{ kWh}$ , saadaan ostettavan sähköenergian määräksi  $8955\text{ kWh}$ . Näin ollen päädytään energiavaihtoehtoon 3, jossa tarvitaan:

- polttopuuta  $2000\text{ kg}$
- ilmalämpöpumppu (lämpökerroin 3)
- sähköradiaattorit (varalla)
- $6\text{ m}^2$  aurinkokeräinjärjestelmä (hyötysuhde 30%)
- ostosähköenergiaa  $8955\text{ kWh}$ .

Asentamalla kiinteistöön vesikiertoinen lattialämmitysjärjestelmä voidaan lämmöntuotantoon käyttää ilma-vesilämpöpumppua tai maalämpöpumppua. Nämä lämpöpumput pystyvät suurelta osin tuottamaan myös lämpimän käyttöveden, joskin lauhduttimen lämpötilan kasvaessa lämpökerroin pienenee kuten kuvasta 4.4 käy ilmi. Jos lämpöpumpulla tuotetaan  $5608\text{ kWh}$  lämpöä sekä lämpimän veden tuottamiseen tarvittava energia  $4143\text{ kWh}$  kokonaisuudessaan lämpökertoimella 2,8, saadaan tarvittavan sähköenergian määräksi  $3483\text{ kWh}$ . Lisäksi sähköenergiaa tarvitaan talous- ja kiinteistösähkölaitteisiin  $4829\text{ kWh}$ . Näin saadaan energiantuotannolle vaihtoehto 4, jossa tarvitaan:

- polttopuuta  $2000\text{ kg}$
- ilma-vesi- tai maalämpöpumppujärjestelmä (lämpökerroin 2,8)
- vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä
- ostosähköenergiaa  $8312\text{ kWh}$ .

Vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä mahdollistaa myös aurinkokeräinten tuottaman lämpöenergian hyödyntämisen paitsi lämpimän käyttöveden tuottamisessa myös lämmönjakelussa. Kiinteistön lämpimän käyttöveden energiatarpeen jakauma on esitetty kuvassa 5.2 ja lämmöntarpeen jakauma kuvassa 5.1. Poistamalla näistä tulisijoilla tuotettu lämpöenergia saadaan kiinteistön vedenlämmitykseen tarvittavan energian kuukausiarvot, joita voidaan hyödyntää aurinkokeräimen mitoittamista varten. Tämä lämpöenergian tarpeen jakauma on luettavissa kuvasta 6.3.



**Kuva 6.3.** Kiinteistön vedenlämmitystarve ja aurinkokeräimillä ( $10\text{ m}^2$ ) katettava osuus.

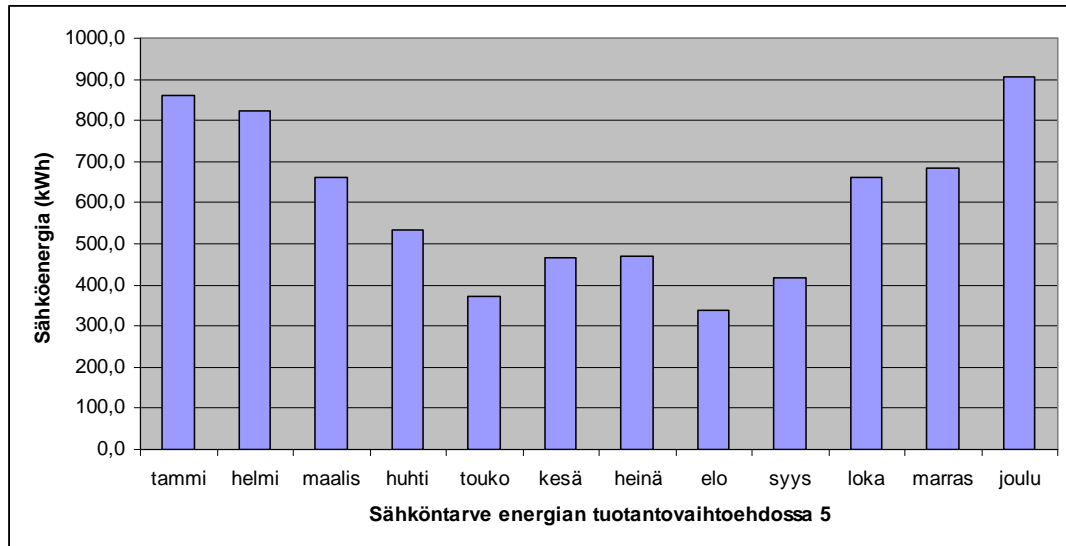
Vertaamalla kiinteistön vedenlämmitystarvetta kuvan 3.8 auringonsäteilytietoihin osoittautuu aurinkokeräinten pinta-alan mitoittavaksi kuukaudeksi toukokuu, jolloin vedenlämmitystarve on  $504\text{ kWh}$ . Aurinkokeräinten tuottaessa  $48\text{ kWh/m}^2$  (hyötysuhteella 30%), saadaan sopivaksi keräinpinta-alaksi noin  $10\text{ m}^2$ . Tällaisen keräimen vuosituotanto olisi  $3144\text{ kWh}$ , mikä on 32% tarvittavasta lisälämmön ja lämpimän veden energiatarpeen yhteismäärästä  $9751\text{ kWh}$ . Keräimen tuotannon jakautuminen eri kuukausille on nähtävissä kuvassa 6.3. Loput käyttö- ja lämmitysveden energiatarpeesta  $6607\text{ kWh}$  voitaisiin kattaa ilma-vesilämpöpumpulla, jolloin lämpökertoimella 2,8 siihen tarvittaisiin sähköenergiaa  $2360\text{ kWh}$ . Sähköenergiaa tarvittaisiin lisäksi talous- ja kiinteistösähköksi  $4829\text{ kWh}$ . Yhdistämällä nämä aurinkokeräimet edelliseen energiantuotantovaihtoehtoon saadaan vaihtoehto 5, jossa tarvitaan:

- polttopuuta  $2000\text{ kg}$
- vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä
- ilma-vesi- tai maalämpöpumpujärjestelmä (lämpökerroin 2,8)
- $10\text{ m}^2$  aurinkokeräinjärjestelmä (hyötysuhde 30%)
- ostosähköenergiaa  $7189\text{ kWh}$ .

## 6.2 Omavaraiset järjestelmät

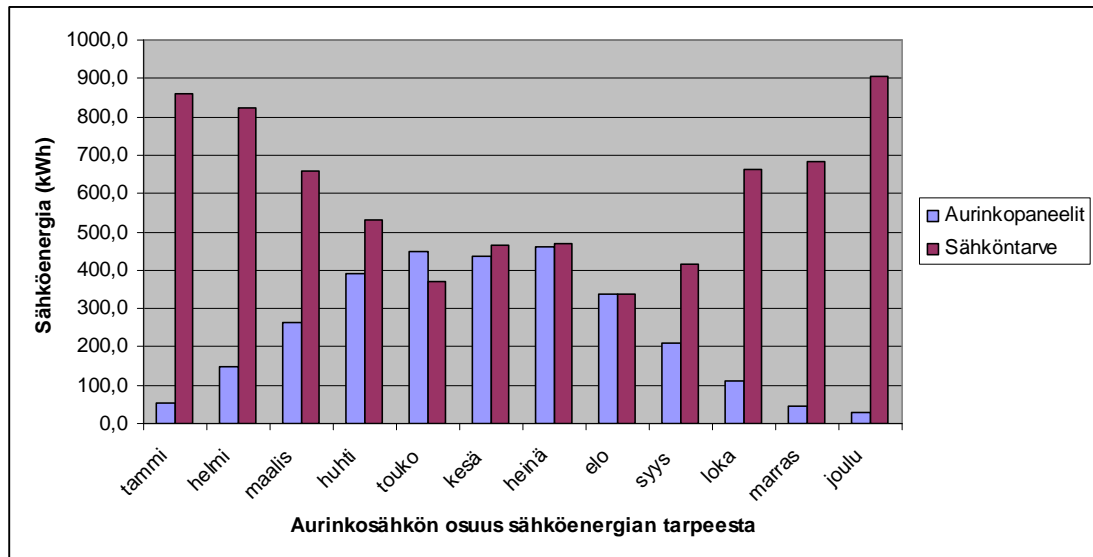
Kiinteistön omavaraisessa energiantuotannossa tarvittava sähkö- ja lämpöenergia tuotetaan kiinteistön omilla järjestelmillä eikä liittymää verkkoyhtiön sähköverkkoon tarvita. Tarkasteltavassa kiinteistössä sähköenergiantuotantoon soveltuisi ainakin aurinko- ja tuulienergia. Tuotetun sähköenergian määrän tulisi vastata melko hyvin kulutusta, jolloin tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen riittäisi sopiva akusto.

Jotta investoitava sähköenergiajärjestelmä olisi kohtuullisen kokoinen ja hintainen tulisi sähköntarve olla kohtuullinen. Edellä tarkastelluista vaihtoehdoista ostosähköenergia on pienin vaihtoehdossa 5, jossa ostosähköenergian tarve  $7189 \text{ kWh}$  jakautuu eri kuukausille kuvan 6.4 mukaisesti.



**Kuva 6.4.** Sähköenergian tarpeen jakautuminen tuotantovaihtoehdossa 5.

Vertaamalla kuvan 6.4 sähköntarpeen jakaumaa ja kuvan 3.8 auringonsäteilyn jakaumaa havaitaan, että sähköntarpeen kattaminen pelkällä aurinkoenergialla johtaa mitoitusongelmaan. Toukokuun sähköenergian tarve  $370 \text{ kWh}$  voitaisiin kattaa  $17 \text{ m}^2$  aurinkopaneeleilla, jos järjestelmän hyötysuhteeksi oletetaan 14%. Joulukuun energiantarpeen  $907 \text{ kWh}$  kattamiseksi tarvittaisiin reilut  $620 \text{ m}^2$  vastaavia aurinkopaneeleja. Kesäaikaan sähköenergia voitaisiin tuottaa melko hyvin  $20 \text{ m}^2$  aurinkopaneelijärjestelmällä. Muuna aikana tyydyttäisiin varavoimaan. Näin päädytään energiavaihtoehtoon 6, jossa sähköenergian tuotanto jakautuisi  $20 \text{ m}^2$  aurinkopaneelijärjestelmän ja aggregaatin kesken kuvan 6.5 mukaisesti.

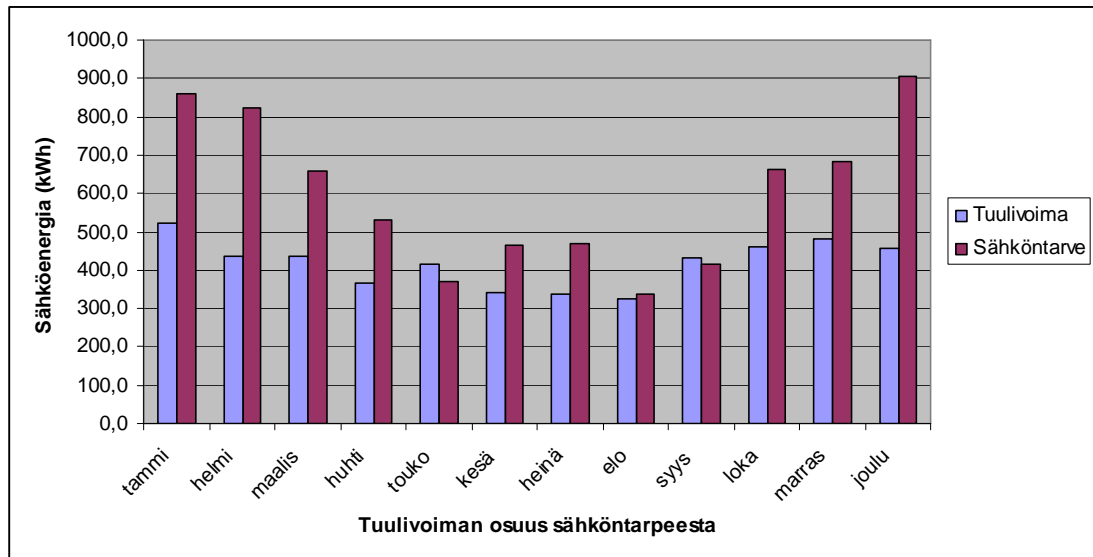


**Kuva 6.5.** Aurinkovoimalla tuotetun sähköenergian osuus sähkötarpeesta tuotantovaihtoehdossa 6. Vaje katettaisiin aggregaattilla.

Kuvan 6.5 jakaumassa aurinkopaneelilla tuotettaisiin vuodessa  $2935 \text{ kWh}$  ja aggregaattilla  $4330 \text{ kWh}$  sähköenergiaa. Toukokuussa aurinkopaneelien tuotanto ylittäisi kulutuksen  $76 \text{ kWh}$ , joka osittain voitaisiin käyttää akkujen lataamiseen. Tämä ei luultavasti vähentäisi aggregaatin käyttötarvetta muina kuukausina. Kesäaikaan aggregaattia tarvittaisiin hyvin vähän, kun taas talvella aurinkoenergian tuotanto on vähäistä. Näin ollen vaihtoehdossa 6 tarvitaan:

- polttopuuta  $2000 \text{ kg}$
- vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä
- ilma-vesi- tai maalämpöpumpputjärjestelmä (lämpökerroin 2,8)
- $10 \text{ m}^2$  aurinkokeräinjärjestelmä (hyötysuhde 30%)
- $20 \text{ m}^2$  aurinkosähköjärjestelmä (hyötysuhde 14%)
- akusto
- aggregaatti.

Muita vaihtoehtoja pohdittaessa energiavaihtoehdon 5 ostosähköenergia voitaisiin aurinkoenergian sijaan tuottaa tuulivoimalla. Pientuulivoimalan tuotantoa on tarkasteltu luvussa 3.2. Tuulivoimala, jonka turbiinin lavan pituus on  $2,45 \text{ m}$  ja maston korkeus  $18 \text{ m}$  tuottaisi kiinteistön sijaintipaikalla  $5012 \text{ kWh}$  sähköenergiaa, jos voimala toimiesaan muuntaa 30% tuulen energiasta sähköksi. Tämän tuotannon jakautuminen eri kuukausille ja osuus sähkön tarpeesta  $7189 \text{ kWh}$  on esitetty kuvassa 6.6.



**Kuva 6.6.** Tuulivoimalla tuotetun sähköenergian osuus sähköenergian tarpeesta tuotantovaihtoehdossa 7.

Kuvasta 6.6 havaitaan tuulivoimalan kohtuullisen tasainen tuotanto eri vuodenaikoina toisin kuin on aurinkoenergian tapauksessa. Tuotanto on talvella hieman kesää suurempaa suuremmasta tuulisuudesta johtuen. Saatavilla olevan tuuliturbiinin koko soveltuu hyvin tarkasteltavaan kiinteistöön, sillä tuotanto ylittää tarpeen vähäisessä määrin touko- ja syyskuussa. Tuolloinkin osa sähköenergian ylijäämästä voitaisiin käyttää akuston lataamiseen ja lämpimän käyttöveden tai lämmitysjärjestelmän veden lämmitykseen, jolloin tuulivoimalan koko tuotanto saataisiin hyödynnettyä. Kattamatta jäänyt sähköenergia tuotettaisiin vaihtoehdossa 7 aggregaatilla, jonka vuosituotanto olisi  $2236 \text{ kWh}$ . Energiavaihtoehdossa 7 tarvitaan:

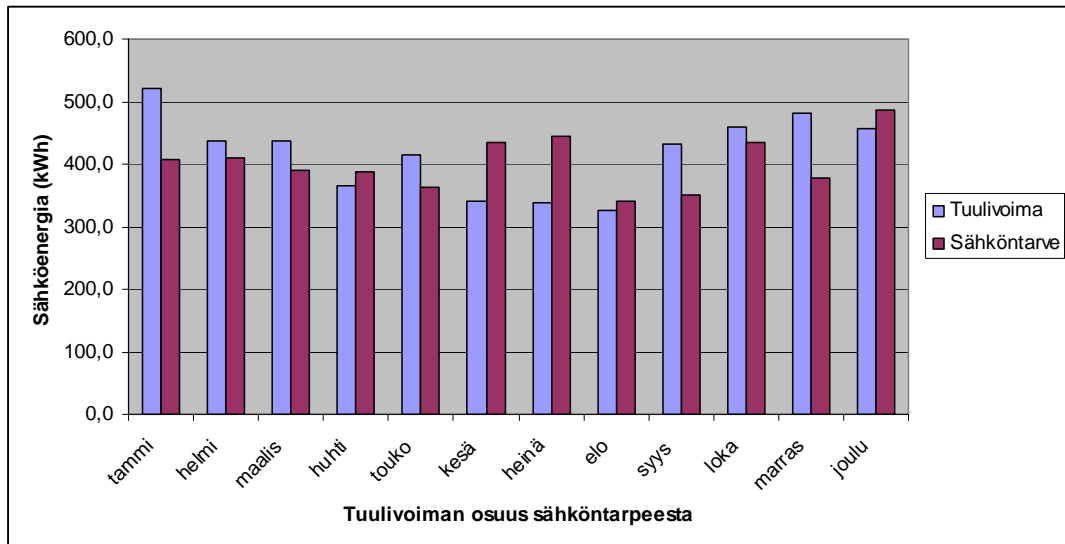
- polttopuuta  $2000 \text{ kg}$
- vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä
- ilma-vesi- tai maalämpöpumpujärjestelmä (lämpökerroin 2,8)
- $10 \text{ m}^2$  aurinkokeräinjärjestelmä (hyötysuhde 30%)
- tuulivoimala  $18 \text{ m}$  mastolla ja  $2,45 \text{ m}$  lavalla (hyötysuhde 30%)
- akusto
- aggregaatti.

Kuvasta 6.6 havaitaan, että kesällä sähkötarve ylittää tuulivoimalan tuotannon. Tällöin aurinkoenergiaa olisi hyvin tarjolla, joten täydentämällä järjestelmää aurinkopaneeleilla voitaisiin varavoiman käyttötarvetta pienentää. Kesäkuun sähkötarve tuulivoimalan tuotannon jälkeen on  $125 \text{ kWh}$  ja heinäkuun  $132 \text{ kWh}$ . Tämä vaje voitaisiin tuottaa noin  $5,7 \text{ m}^2$  aurinkopaneeleilla. Kuvasta 6.6 havaitaan, että jo tuulivoimalan tuotanto ylittää tarpeen touko- ja syyskuussa, joten aurinkoenergian lisäys menisi noina kuukausina hukkaan. Tarkastelemalla  $3\text{-}6 \text{ m}^2$  aurinkosähköjärjestelmiä käyttämättä jäisi 31-

34% tuotetusta sähköenergiasta.  $6\text{ m}^2$  järjestelmällä saavutettaisiin omavaraisuus toukokuun väliseksi ajaksi eikä varavoimaa tällöin tarvittaisi. Vuositasolla aggregaatilla tuotettu sähköenergian määrä pienenesi  $583\text{ kWh}$  ja olisi  $1653\text{ kWh}$ . Asennettaessa  $3\text{ m}^2$  aurinkopaneeleita varavoimalla tuotettavan sähköenergian määrä pienenesi  $305\text{ kWh}$ . Koska aurinkopaneelien koon kasvattamien kolmesta neliömetristä kuuteen ei juuri vaikuta käyttämättä jäävän energian suhteelliseen osuuteen ja  $6\text{ m}^2$  järjestelmällä varavoimaa ei tarvittaisi viiden kuukauden aikana, valitaan aurinkopaneelien määräksi  $6\text{ m}^2$ . Näin saadaan energiavaihtoehto 8, jossa tarvitaan

- polttopuuta  $2000\text{ kg}$
- vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä
- ilma-vesi- tai maalämpöpumppujärjestelmä (lämpökerroin 2,8)
- $10\text{ m}^2$  aurinkokeräinjärjestelmä (hyötysuhde 30%)
- tuulivoimala  $18\text{ m}$  mastolla ja  $2,45\text{ m}$  lavalla (hyötysuhde 30%)
- $6\text{ m}^2$  aurinkopaneelijärjestelmä (hyötysuhde 14%)
- akusto
- aggregaatti.

Jos kiinteistöön hankittaisiin puukattila, voitaisiin puuta polttamalla tuottaa tarvittava lämmin käyttövesi sekä lämmitysvesi. Lämmityksen ja lämpimän käyttöveden energiantarve on kiinteistössä  $16125\text{ kWh}$  lämminvesivaraajan häviöt huomioiden. Tästä energiasta tuotetaan tulisijoissa  $6374\text{ kWh}$ , joten puukattilalla tuotettavan energian määräksi jää  $9751\text{ kWh}$ . Oletettaessa polttopuusta saatavaksi energiaksi  $3,2\text{ kWh/kg}$  saadaan puukattilassa tarvittavan polttopuun määräksi  $3050\text{ kg}$  ja vuotuisen polttopuutarpeen määräksi noin  $5040\text{ kg}$ . Kiinteistön sähköenergian tarve koostuisi tällöin muusta talous- ja kiinteistösähköstä, jonka suuruus on  $4829\text{ kWh}$ . Tämä voitaisiin melko hyvin kattaa vastaavanlaisella tuulivoimalalla kuin edellisessäkin tuotantovaihtoehdossa. Tuulivoimalan tuotannon ja sähköntarpeen jakaumat on esitetty kuvassa 6.7.



**Kuva 6.7.** Tuulivoimalan tuotanto ja sähköenergian tarve vaihtoehdossa 9.

Kuvasta 6.7 havaitaan, että hoidettaessa lämmitys ja lämpimän käyttöveden tuotto puun poltolla kattaa tuulivoimalan tuotanto sähköntarpeen seitsemänä kuukautena vuodessa. Varavoimaa tarvittaisiin muuna aikana vain  $268\text{ kWh}$ . Tuulivoimalla tuotettu ylimääräinen sähköenergia  $451\text{ kWh}$  voitaisiin käyttää vedenlämmitykseen ja siten vähentää vuotuista polttopuun tarvetta noin 140 kilogrammalla. Määrä on kuitenkin pieni polttopuun kokonaistarpeeseen nähden. Energiantuotantovaihtoehdossa 9 tarvitaan:

- polttopuuta  $4900\text{ kg}$
- vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä
- puukattilajärjestelmä
- tuulivoimala  $18\text{ m}$  mastolla ja  $2,45\text{ m}$  lavalla (hyötysuhde 30%)
- akusto
- aggregaatti.

Polttokennoja voitaisiin käyttää kiinteistön energiaratkaisussa kolmella tavalla. Pienitehoisella matalan lämpötilan polttokennolla voitaisiin ladata akustoa aurinko- tai tuulivoimajärjestelmän rinnalla silloin, kun aurinkoa tai tuulta ei ole tarjolla ja lataustarvetta ilmenee. Suurempitehoista ( $1\text{--}5\text{ kW}$ ) polttokennojärjestelmää voitaisiin käyttää kiinteistön sähköenergian tuottamiseen aurinko- tai tuulivoimajärjestelmän tapaan. Tehollaan noin  $3\text{--}8\text{ kW}$  korkean lämpötilan polttokennojärjestelmää voitaisiin käyttää yhdistettyyn sähkön- ja lämmön tuotantoon.

Pienikiinteistön energiankulutus vaihtelee merkittävästi päivän mittaan ja eri vuodenaikoina. Tästä aiheutuu ongelmia etenkin korkean lämpötilan polttokennojärjestelmän käytölle. Jos tuotettua energiaa ei haluttaisi hukata, täytyisi polttokennon toiminta välillä pysäyttää tai akuston kokoa kasvattaa. Jäähtyneen kennon käynnistäminen vaatisi taas kennon lämmittämisen toimintalämpötilan tuntumaan, mikä rasittaisi itse kennoa ja tarvitsisi energiaa ja työtä. Matalan lämpötilan kennojärjestelmällä tätä ongelmaa ei ole,



tosin kiinteistön tarvitsema lämpö täytyisi tuottaa muilla menetelmillä. Polttokennojärjestelmän tuottamaa sähköenergiaa voitaisiin toki käyttää lämmöntuotantoon, mikä puolestaan vaatisi suurempitehoisen järjestelmän. Lisäksi polttoaineen saatavuus ja varastointi metanolia lukuun ottamatta ovat jakeluinfraktuurin puutteen vuoksi työläitä ja polttokennojen käyttöikä jää jatkuvassa käytössä muutama vuoteen. Kun pienikiinteistön kokoluokan polttokennojärjestelmiä on markkinoilla niukasti tarjolla, täytyisi sellainen räätälöidä kiinteistöön mittatilaustyönä, jolloin hinta nousee väistämättä korkeaksi. Näistä syistä polttokenno ei vielä vaikuta kovin houkuttelevalta vaihtoehdolta pienikiinteistön pääenergiajärjestelmäksi.

Pienitehoiset polttokennot voisivat toimia esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmän rinnalla varavoiman tavoin. Esimerkiksi Hydrocell Oy myy teholtaan 10W alkalipolttokennoa, jonka ulostulojännitteeksi ilmoitetaan 14,4 voltia hintaan 1560 €. Massaltaan 11 kg ja kapasiteetiltaan 220 ampeeritunnin vetyhydridisäiliön hinta 2430 euroa. [67] Näin ollen käytettäessä sähkölaitteita vaikkapa 60W sähköteholla ja 12 voltin akkujännitteellä on virtapiirin virta 5 ampeeria, jolloin säiliön kapasiteetti riittäisi 44 tunnin käyttöön. Pienen polttokennojärjestelmän lisääminen kiinteistön energiaratkaisuun vähentäisi aggregaatin käyttöä, mutta ei poistaisi sen tarvetta kokonaan. Näistä syistä polttokennolaitteistolla tuotetun sähköenergian hinta on vielä liian korkea käytettäväksi pienkohteissa, joissa perinteisiä sähköenergiateknologioita on mahdollista käyttää.

Tarkasteltavan kiinteistön energiantarpeen tuottamiseksi soveltuisi mikä tahansa edellä esitetyistä yhdeksästä energiavaihtoehdoista. Liittyminen paikallisen sähköyhtiön verkkoon toisi käyttövarmuutta ja käytön huolettomuutta. Omavarainen järjestelmä edellyttäisi laitteiston toiminnan tarkastelua ja oman työn suurempaa osuutta. Laitteiston rikkoutuessa täytyisi varautua sähkön käytön säännöstelyyn ja sähkön tuottamiseen varavoimalla. Toki myrskyjen seurauksena verkkoyhtiönkin sähkönjakeluun voi tulla useiden päivien keskeytyksiä. Näissä tapauksissa korjaustyöt alkavat kuitenkin välittömästi eikä huoltoa tarvitse odotella, mikä voi olla laita esimerkiksi yksittäisen tuulivoimalan korjaustapauksessa. Yksi merkittävä tekijä kiinteistön energiaratkaisua valittaessa ovat energian kustannukset.

## 7 ENERGIAVAIHTOEHTOJEN KUSTANNUKSET

Kaikissa investointiratkaisuissa kustannukset ovat merkittävä osa päätöksentekoa, eikä pienkiinteistön energiaratkaisu muodosta tässä suhteessa poikkeusta. Toki investointiin vaikuttavat muutkin asiat kuten ekologisuus, esteettisyys, toimintavarmuus tai käytön helppous, joiden rahallinen määrittäminen on hankalampaa. Koska kukin edellisen luvun tuotantovaihtoehto pitää sisällään erilaisia teknologioita kiinteistön lämpö- ja sähköenergian tuottamiseksi, tarkastellaan kunkin vaihtoehdon kokonaiskustannuksia tuotantotavasta riippumatta. Näkökulma investointiin poikkeaa siten vaikkapa tuotantolaitoksen näkökulmasta, jossa investoinnin kustannuksia eri tuotantomuotojen välillä tarkasteltaisiin tuotettua energiaa kohti. Pienikiinteistön omistaja on puolestaan kiinnostunut vuosikustannuksista, joilla hänen kiinteistönsä energiatarve voidaan tuottaa. Tällöin eri energiavaihtoehtojen kokonaisuuksia on myös helpompi verrata toisiinsa.

Tässä yhteydessä kustannuksia tarkastellaan annuiteettimenetelmällä, jossa alkuinvestointi jaetaan vuosikustannuksiksi kertomalla se annuiteettitekijällä  $a$ , joka saadaan kaavalla

$$a = \frac{i(1+i)^y}{(1+i)^y - 1}, \quad (7.1)$$

missä  $i$  on laskentakorkokanta prosentteina ja  $y$  investoinnin pitoaika vuosina. Kun alkuinvestoinnin vuosikustannuksiin lisätään vuotuiset käyttökustannukset, saadaan vuotuiset kokonaiskustannukset. [53]

Investointien pitoajaksi on valittu 20 vuotta, sillä tarkasteltavan kiinteistön asuinhuoneistoon muuttavat henkilöt ovat äskettäin siirtyneet eläkkeelle. Laskentakorkokannaksi on valittu 2%. Eri vaihtoehtojen alkuinvestointien hinnat on arvioitu esimerkinhinoista asennuksineen ja järjestelmineen yksityiskohtiin puuttumatta. Korostettakoon, että hinnat ovat arvioita eivätkä edusta tietyn valmistajan tuotteita. Lopulliset hinnat tarkentuisivat tarjouspyyntövaiheessa. Esimerkinhinnat antavat kuitenkin riittävät suuruusluokka-arviot eri vaihtoehtojen kustannuksista, joiden perusteella tarjouspyynnöt voidaan toteuttaa.

## 7.1 Sähköliittymän sisältävien järjestelmien kustannukset

Energiavaihtoehdossa 1 kiinteistö liitetään Pohjois-Karjalan Sähkön verkkoon. Kiinteistön rakennuspaikan etäisyys lähimmästä muuntajasta on noin 600 metriä, jolloin kiinteistö sijaitsee verkkoyhtiön määrittämällä vyöhykkeellä 2+. Liittymismaksu  $3 \times 25$  A:n liittymälle on 5600 € [54]. Lämmönjakoon tarvitaansähkötiaattorit (n.12 kpl) ja kaapelointi, joiden hinta-arvio asennuksineen on 3200 € [55]. Järjestelmän käyttökustannukset muodostuvat sähköenergian hinnasta ja siirtohinnasta veroineen ja kuukausimaksuineen sekä polttopuun ostohinnasta. Pohjois-Karjalan Sähkön verolliset hinnat yleis-sähkötuotteen osalta pienasiakkaalle ilmenevät taulukosta 7.1.

**Taulukko 7.1.** PKS Oiva yleissähkön siirron ja energian hinnat veroineen  $3 \times 25$  A:n liittymälle 1.1.2011 alkaen uudessa käyttökohteessa [56, 57].

Tuote	Siirto		Energia	
PKS OIVA	14,75 €/kk	5,85 snt/kWh	3,37 €/kk	6,59 snt/kWh

Nyt voidaan laskea kiinteistön energiantuotantovaihtoehdon 1 vuosikustannukset kaavan 7.1 annuiteetikertoimen ja edellisten tietojen avulla. Tulokset on koottu taulukoon 7.2.

**Taulukko 7.2.** Energiavaihtoehdon 1 kustannukset [34, 54, 55, 56, 57].

Alkuinvestointi	Hinta (€)	Annuiteetti (€/a)	Käyttökustannus	Hinta (€/a)	Vuosikustannus (€/a)
sähköliittymä	5600		puu ( $8,33 i - m^3$ )	350,06	
radiaattorit	3200		ostosähkö (14580 kWh)	2031,19	
Yhteensä	8800	538,18		2381,25	2919,43

Energiavaihtoehdossa 2 edelliseen lisätään ilmalämpöpumppu, mikä kasvattaa alkuinvestointia ja vähentää ostettavan sähköenergian määrää 10841 kWh:iin vuodessa. Kiinteistöön soveltuvan ilmalämpöpumpun hinta asennettuna on noin 2000 € [58]. Vaihtoehdon 2 kustannukset on esitetty taulukossa 7.3.

**Taulukko 7.3.** Energiavaihtoehdon 2 kustannukset [34, 54, 55, 56, 57, 58].

Alkuinvestointi	Hinta (€)	Annuiteetti (€/a)	Käyttökustannus	Hinta (€/a)	Vuosikustannus (€/a)
sähköliittymä	5600		puu ( $8,33 i - m^3$ )	350,06	
radiaattorit	3200		ostosähkö (10841 kWh)	1566,06	
il.pumppu	2000				
	10800	660,49		1916,12	2576,61

Energiavaihtoehdossa 3 käyttökustannuksia pienennetään edelleen investoimalla aurinkokeräinjärjestelmään, jolla voidaan tuottaa lämmintä käyttövedettä. Noin  $6\text{ m}^2$  tasokeräinjärjestelmän hinta asennuksineen on 3000 € [59] ja sopivan energiavaraajan lisäkustannus tavalliseen lämminvesivaraajaan nähden noin 1000 € [55]. Aurinkokeräinjärjestelmän ansiosta ostettavan sähköenergian määrä pienenee  $8955\text{ kWh}$  :iin vuodessa. Vaihtoehdon 3 kustannukset on koottu taulukkoon 7.4.

**Taulukko 7.4.** Energiavaihtoehdon 3 kustannukset [34, 54, 55, 56, 57, 58, 59].

Alkuinvestointi	Hinta (€)	Annuiteetti (€/a)	Käyttökustannus	Hinta (€/a)	Vuosikustannus (€/a)
sähköliittymä	5600		puu ( $8,33\text{ i} - \text{m}^3$ )	350,06	
radiaattorit	3200		ostosähkö ( $8955\text{ kWh}$ )	1331,44	
il.pumppu	2000				
aurinkokeräin	3000				
e.varaaja ( $500\text{ l}$ )	1000				
	14800	905,12		1681,50	2586,62

Energiavaihtoehdossa 4 lämmönjakojärjestelmäksi tulisijojen ohella valittiin vesikiertoinen lattialämmitys, jonka investointikustannus asennuksineen on 3500 € [55]. Tarvittava lämpö ja lämmin käyttövesi tuotetaan tässä vaihtoehdossa ilma-vesilämpöpumpulla, jonka hinta asennettuna on 6300 € [55]. Koska lämmintä vettä käytetään myös lämmönjakoon, valitaan energiavaraajan kooksi 1500 litraa tasaamaan mahdollisia lämpötilanvaihteluja. Tämän hinta on 2200 € [55]. Ostettavan sähköenergian määrä pienenee  $8312\text{ kWh}$  :iin vuodessa eikä sähköradiaattoreita tarvita. Näin päädyttiin taulukossa 7.5 esitettyihin kustannuksiin.

**Taulukko 7.5.** Energiavaihtoehdon 4 kustannukset [34, 54, 55, 56, 57].

Alkuinvestointi	Hinta (€)	Annuiteetti (€/a)	Käyttökustannus	Hinta (€/a)	Vuosikustannus (€/a)
sähköliittymä	5600		puu ( $8,33\text{ i} - \text{m}^3$ )	350,06	
vesikiert. lämm.	3500		ostosähkö ( $8312\text{ kWh}$ )	1251,45	
i/vesil.pumppu	6300				
e.varaaja ( $1500\text{ l}$ )	2200				
	17600	1076,36		1601,51	2677,87

Energiavaihtoehdossa 5 edelliseen järjestelmään lisätään aurinkokeräinjärjestelmä lämpimän käyttöveden ja lämmitysveden tuottamista varten. Noin  $10\text{ m}^2$  tasokeräinjärjestelmän hinta asennuksineen on 4000 € [59], minkä vaikutuksesta ostettavan sähköenergian määrä pienenee  $7189\text{ kWh}$  :iin vuodessa. Tällöin kustannukset muodostuvat taulukon 7.6 kaltaiseksi.

**Taulukko 7.6. Energiavaihtoehdon 5 kustannukset [34, 54, 55, 56, 57, 59].**

Alkuinvestointi	Hinta (€)	Annuiteetti (€/a)	Käyttökustannus	Hinta (€/a)	Vuosikustannus (€/a)
sähköliittymä	5600		puu ( $8,33 i - m^3$ )	350,06	
vesikiert. lämm.	3500		ostosähkö (7189 kWh)	1111,75	
i/vesil.pumppu	6300				
aurinkokeräin	4000				
e.varaaja (1500 l)	2200				
	21600	1320,99		1461,81	2782,79

Tarkastellaan vielä aurinkosähkö- ja tuulivoimalan lisäämisen kannattavuutta energiavaihtoehtoihin, joissa kiinteistö on liitetty verkkoyhtiön sähköverkkoon. Tällöin näillä järjestelmillä tuotettu sähköenergia vähentää suoraan verkosta ostettavaa sähköenergiaa, mutta ei vaikuta sähkön siirron ja energian perusmaksuihin. Yhden neliömetrin kokoisen aurinkopaneelin arvioitu vuosituotanto kiinteistön sijaintipaikalla on 147 kWh (luku 3.1). Teholtaan yhden neliömetrin aurinkopaneeli on noin  $130 W_p$  ja hankintahinnaltaan vähintään 450 € (liite 3). Aurinkosähköjärjestelmään tarvitaan aurinkopaneelien lisäksi akusto, lataussäädin, tarvittavat johdot ja asennustyö. Kokonaisuuden hinta-arvio  $6 m^2$  järjestelmälle on 6000 € ja  $20 m^2$  järjestelmän 16500 € [60]. Vuosituotannot ovat vastaavasti noin 880 kWh ja 2940 kWh. Kaavalla 7.1 saadaan alkuinvestoinnin annuiteetiksi (2%, 30 a) yhden neliömetrin paneelille 20,10 €/a ja järjestelmille 268 €/a ( $6 m^2$ ) ja 737 €/a ( $20 m^2$ ). Näin ollen paneelilla tuotetun sähköenergian hinnaksi saadaan 13,7 snt/kWh. Vastaavasti järjestelmäkokonaisuus huomioiden saadaan 30,5 snt/kWh ( $6 m^2$ ) ja 25,1 snt/kWh ( $20 m^2$ ).

Pientuulivoimalan osalta tilanne on vastaavan kaltainen. Nimellisteholtaan 4 kW pientuulivoimajärjestelmän hinta-arvio on 16200 € [9]. Kaavalla 7.1 saadaan alkuinvestoinnin annuiteetiksi 2% korolla ja 30 vuoden pitoajalla noin 990 €. Tuotetun sähköenergian määräksi luvussa 3.2. arvioitiin kiinteistön sijaintipaikalla 5012 kWh. Näin ollen tuotetun sähköenergian hinnaksi saadaan 19,8 snt/kWh. Lyhyemmällä pitoajalla hinnat ovat luonnollisesti korkeammat.

## 7.2 Omavaraisten järjestelmien kustannukset

Omavaraisissa energiajärjestelmissä kiinteistön tarvitsema energia tuotetaan kiinteistön omilla järjestelmillä. Lähtökohta on, että pienkiinteistön omavaraiset sähköenergian tuotantojärjestelmät ovat arvokkaita, joten pyritään vaihtoehtoihin, joissa tarvittava sähköenergian määrä olisi kohtuullinen. Näin tarvittavan sähköntuotantojärjestelmän koko ja varavoiman tarve olisi mahdollisimman pieni.

Sähköliittymän sisältävistä vaihtoehdoista sähköenergian tarve on pienin vaihtoehdossa 5, jossa sähköenergiaa tarvitaan 7189 kWh vuodessa. Kiinteistön energiantuotantovaihtoehdossa 6 mahdollisimman suuri osa tästä sähköenergian tarpeesta katetaan

aurinkopaneelien tuottamalla sähköenergialla - kuitenkin niin, että aurinkopaneelien tuotanto voidaan kokonaan hyödyntää. Tällöin aurinkopaneelien pinta-alaksi tulee noin  $20\text{ m}^2$  ja järjestelmän hinnaksi noin 16500 € [60]. Tarvitava varavoima 4330 kWh tuotetaan aggregaatilla, jonka hinta-arvio on 2000 € [61]. Sähköliittymää ei tarvita. Vaihtoehdon 6 kustannukset on koottu taulukkoon 7.7.

**Taulukko 7.7.** Energiavaihtoehdon 6 kustannukset [34, 55, 59, 60, 61].

Alkuinvestointi	Hinta (€)	Annuiteetti (€/a)	Käyttökustannus	Hinta (€/a)	Vuosikustannus (€/a)
vesikiert. lämm.	3500		puu ( $8,33\text{ i} - \text{m}^3$ )	350,06	
i/vesil.pumppu	6300		varavoima (4330 kWh)	2165	
aurinkokeräin	4000				
e.varaaja (1500 l)	2200				
aurinkopaneelit	16500				
aggregaatti	2000				
	34500	2109,91		2515,06	4624,96

Energiavaihtoehdossa 7 kiinteistön tarvitsema sähköenergia tuotetaan nimellistehollaan 4 kW pientuulivoimalalla, jonka lavan pituus on 2,45 m ja maston korkeus 18 m. Tuulivoimalan hinta asennettuna on 16200 € sisältäen akuston [9]. Tuuliolot kiinteistön sijaintipaikalla ovat hyvät ja varavoiman tarve pienenee 2236 kWh:iin. Vaihtoehdon 7 kustannukset on esitetty taulukossa 7.8.

**Taulukko 7.8.** Energiavaihtoehdon 7 kustannukset [9, 34, 55, 59, 61].

Alkuinvestointi	Hinta (€)	Annuiteetti (€/a)	Käyttökustannus	Hinta (€/a)	Vuosikustannus (€/a)
vesikiert. lämm.	3500		puu ( $8,33\text{ i} - \text{m}^3$ )	350,06	
i/vesil.pumppu	6300		varavoima (2236 kWh)	1118	
aurinkokeräin	4000				
e.varaaja (1500 l)	2200				
tuulivoimala	16200				
aggregaatti	2000				
	34200	2091,56		1468,06	3559,62

Vaihtoehdossa 7 tuulivoimalla ei saatu tuotettua kiinteistön energiantarvetta kesäaikaan, jolloin aurinkoenergiaa on hyvin tarjolla. Energiavaihtoehdossa 8 kesän sähköenergian tarve katetaan aurinkopaneelien tuottamalla sähköenergialla. Tarvittavan aurinkopaneelijärjestelmän pinta-ala on  $6\text{ m}^2$  ja hinta 6000€ [60]. Tuotannon ja kulutuksen välinen epätasapaino johtaa kuitenkin siihen, että osa tuotetusta energiasta keväällä ja syksyllä menee hukkaan. Hukatun energian suuruus on 297 kWh. Varavoiman tarve pienenee aurinkopaneelijärjestelmän ansiosta 1653 kWh:iin vuodessa. Vaihtoehdon 8 kustannukset on esitetty taulukossa 7.9.

**Taulukko 7.9.** Energiavaihtoehdon 8 kustannukset [9; 34; 55; 59; 60; 61].

Alkuinvestointi	Hinta (€)	Annuiteetti (€/a)	Käyttökustannus	Hinta (€/a)	Vuosikustannus (€/a)
vesikiert. lämm.	3500		puu ( $8,33 i - m^3$ )	350,06	
i/vesil.pumppu	6300		varavoima (1653 kWh)	826,5	
aurinkokeräin	4000				
aurinkopaneelit	6000				
e.varaaja (1500 l)	2200				
tuulivoimala	16200				
aggregaatti	2000				
	40200	2458,50		1176,56	3635,06

Energiavaihtoehdossa 9 kiinteistön tarvitsema lämpö ja lämmin käyttövesi tuotetaan puun poltolla puukattilassa, jonka hankintahinta sopivan energiavaraajan kanssa asennettuna on 6200 € [55]. Energiavaraajan kooksi valitaan 2000 litraa, jolloin puukattilaa ei tarvitse lämmittää niin usein. Sähköenergiaa tarvitaan muun kiinteistö- ja taloussähkön kattamiseksi 4829 kWh vuodessa. Tämä voidaan tuottaa melko hyvin pientuulivoimalalla, jonka hinta on 16200€ [9]. Varavoiman tarpeeksi jää vain 268 kWh vuodessa. Vaihtoehdon 9 kustannusten yhteenveto on esitetty taulukossa 7.10.

**Taulukko 7.10.** Energiavaihtoehdon 9 kustannukset [9; 34; 55; 61].

Alkuinvestointi	Hinta (€)	Annuiteetti (€/a)	Käyttökustannus	Hinta (€/a)	Vuosikustannus (€/a)
vesikiert. lämm.	3500		puu ( $20,5 i - m^3$ )	861,00	
puukattila	2000		varavoima (268 kWh)	134	
tuulivoimala	16200				
e.varaaja (2000 l)	2600				
aggregaatti	2000				
	26300	1608,42		995,00	2603,42

Luvussa 6.2. pohdittiin polttokennon liittämistä osaksi kiinteistön energiajärjestelmää. Pienitehoisen akunlatauskäyttöön suunnitellun alkalipolttokennon metallihydridisäiliön hinnaksi todettiin 2430 €. Säiliöstä polttokennolla saatavaksi sähkömääräksi ilmoitetaan 220 ampeerituntia, joten 12 voltin akkujännitteellä säiliöllisestä saataisiin 2,64 kWh sähköenergiaa. Pelkän säiliöllisen osuus tuotetun sähköenergian hinnasta olisi siten noin 920 €/kWh. Näin ollen vaikuttaisi siltä, että polttokennojärjestelmän käyttökohteet ovat toistaiseksi erityissovelluksissa, joissa sähköenergian tuotanto on muuten hankalaa. [67]

## 8 KIINTEISTÖN ENERGIARATKAISUN VALINTA

Kuvasta 5.6. nähdään tarkasteltavan kiinteistön energiatarpeen jakautuminen lämmityksen, lämpimän veden tuottamisen ja sähköenergian kesken. Lämpimän veden tuottaminen ja kiinteistön lämmitys vaativat yhdessä 77% kiinteistön käyttämästä energiasta. Kiinteistön energiaratkaisua valittaessa tullaan samalla päättämään siitä, miten kiinteistön lämmitys ja lämmin käyttövesi tuotetaan. Lämmitysjärjestelmän valinta vaikuttaa merkittävästi kiinteistön tarvitsemaan sähköenergian määrään. Sähköenergian tarve puolestaan vaikuttaa omavaraisten sähköntuotantojärjestelmien suuruusluokkaan ja hintaan sekä sähköverkkoon liittymisen kannattavuuteen.

Kiinteistön sijainnilla on oma merkityksensä sähköliittymän kannattavuuteen. Jos sähköverkko ei sijaitse valmiiksi tontin nurkalla, liittymän investointikustannukset voivat nousta merkittävän suureksi. Tarkastellun kiinteistön sijainti on sellaisella etäisyydellä sähköverkosta, että liittymäkustannus on paikallisen sähköyhtiön liittymähintojen kalleimmasta päästä. Liittymispäätökseen vaikuttavat kustannusten lisäksi sähkön toimitusvarmuus, laitteiston käytön yksinkertaisuus ja huollon tarve.

Tarkasteltavista vaihtoehdoista sähköliittymä sisältyy viiteen ensimmäiseen energiavaihtoehtoon. Näistä vaihtoehdoista edullisimmaksi 20 vuoden pitoajalla tulee vaihtoehto 2, jossa suoraa sähkölämmitystä täydennetään ilmalämpöpumpulla. Vaihtoehdon houkuttelevuutta lisää kohtuullinen alkuinvestoinnin suuruus sekä laitteiston käytön helppous ja yksinkertaisuus. Kysymyksiä herättää lämpöpumpun kompressorin kestävyys 20 vuoden ajan jatkuvassa käytössä.

Energiavaihtoehdon 3 aurinkokeräimen lisäys lämpimän veden tuottamiseksi ei juuri vaikuta vuosikustannuksiin, vaikka pienentääkin ostettavan sähköenergian määrää. Tilanne voi tulevaisuudessa muuttua sähköenergian hinnan noustessa. Investoiminen aurinkokeräinjärjestelmään voitaisiin tehdä ekologisista perusteista jo nyt, mutta järjestelmän voi myös helposti asentaa jälkikäteen. Näin ollen tämän vaihtoehdon voi jättää rakennusvaiheessa valinnaiseksi.

Vaihtoehdossa 4 lämmönjako perustuu vesikiertoiseen lämmitysjärjestelmään. Tämän energiavaihtoehdon vuosikustannus on noin 100 € edellisiä vaihtoehtoja kalliimpi. Vaihtoehdon valintaa puoltaa kuitenkin lämmitysjärjestelmän helpompi muunneltavuus tulevaisuudessa. Ostettavan sähköenergian kustannukset voivat tulevaisuudessa muuttua, jolloin investoiminen toiseen lämmitysmuotoon voi tulla ajankohtaiseksi. Vesikiertoisessa lämmitysjärjestelmässä lämmitysmuodon muutos on kohtuullisen yksinkertaista, sillä remontti kohdistuu vain lämmityskattilaan lämmönjakojärjestelmän säilyessä entisenä.



Aurinkosähkö- tai tuulivoimajärjestelmän lisääminen sähköliittymän sisältäviin vaihtoehtoihin ei ole toistaiseksi kannattavaa. Kiinteistön sijaintipaikalla aurinkosähköllä tuotetun sähköenergian hinnaksi luvussa 7.1 saatiin vähintään 25,1 *snt/kWh* ja pientuulivoimalla tuotetun sähköenergian hinnaksi 19,8 *snt/kWh*. Hinnat ovat suuria verkko-yhtiön tarjoamaan hintaan 12,44 *snt/kWh* nähden.

Omavaraisista energiantuotantjärjestelmistä edullisin on vaihtoehto 9, jossa lämmitys ja lämmin käyttövesi tuotetaan polttopuulla ja sähköenergian tarve katetaan pientuulivoimalalla. Se osa tarvittavasta sähköenergiasta, jota ei saada tuotettua tuulivoimalla, voidaan kattaa aggregaatilla, joka samalla toimii varavoimana kriisitilanteissa. Muut omavaraiset järjestelmät ovat selvästi kalliimpia sekä investointi- että käyttökustannuksiltaan, joten niiden valinta hylätään.

Kustannussyyt ohjaavat siten kiinteistön energianjärjestelmän valinnan tehtäväksi vaihtoehtojen 2, 4 ja 9 kesken. Vertaillaan näiden vaihtoehtojen kustannuksia myös 30 vuoden pitoajalla. Tulokset ovat taulukossa 8.1.

**Taulukko 8.1.** Energiavaihtoehtojen 2, 4 ja 9 vuosikustannukset 20 ja 30 vuoden pitoajalla 2% korkokannalla laskettuna.

Vaihtoehto	Inv. (€)	Annuiteetti (€/a)		Käyttökust. (€/a)	Vuosikustannus (€/a)	
		2%, 20 a	2%, 30 a		2%, 20 a	2%, 30 a
2	10800	660,49	482,22	1916,12	2577	2398
4	17600	1076,36	785,84	1601,51	2678	2387
9	26300	1608,42	1174,29	995,00	2603	2169

Taulukosta 8.1 havaitaan, että 2% vuosikorolla ja 20 vuoden pitoajalla tarkasteltuna vaihtoehto 2 on vuosikustannuksiltaan edullisin. Vaihtoehto 9 on 26 € ja vaihtoehto 4 noin 100 € kalliimpi vaihtoehtoon 2 nähden. 30 vuoden pitoajalla tarkasteltuna vaihtoehto 9 on edullisin. Vaihtoehto 4 on tätä noin 220 € ja vaihtoehto 2 noin 230 € kalliimpi. Näin ollen lyhyemmällä ajanjaksolla tarkasteltuna kannattaisi valita vaihtoehto 2 ja pidemmällä vaihtoehto 9.

Vuosittaisten kustannusten ollessa kohtuullisen lähellä toisiaan valintaan vaikuttavat muut tekijät nousevat merkittävään rooliin. Vaihtoehdon 2 perustuessa konventionaaliiseen laitteistoon ja ostosähköenergiaan on järjestelmä luotettava, turvallinen ja helppokäyttöinen. Asukkaiden ikääntyessä näitä seikkoja ei ole syytä vähätellä. Pienasiakas voi myös halutessaan ostaa uusiutuvilla energialähteillä tuotettua sähköenergiaa, joten ekologisin perustein sähköliittymää ei ole syytä hylätä. Huolta aiheuttavat mahdollisesti kohoava sähköenergian ostohinta sekä ilmalämpöpumpun kestävyys.

Energiavaihtoehto 4 on joustavampi vaihtoehtoon 2 nähden, sillä vesikiertoinen lämmönjakojärjestelmä mahdollistaa lämmitystavan muuttamisen jälkikäteen. Muuten vaihtoehdot ovat keskenään samankaltaiset.

Vaihtoehdossa 9 sähköntuotanto perustuu suuressa määrin pientuulivoimalan tuotantoon, jonka toimintavarmuus ja kestävyys pidemmällä ajanjaksolla jäisi nähtäväksi. Laitteiston rikkoutuessa varavoimana toimivan aggregaatin turvin kuitenkin selvittäisiin

korjaus- tai huoltojakson yli. Kiinteistön lämmityksen ja lämpimän veden tuotannon perustuessa polttopuun käyttöön vaatii lämmitys lähes päivittäistä työpanosta ainakin kylmänä vuodenaikana. Toisaalta lämmönsäätö onnistuu sääoloista riippumatta. Kiinteistön sijaitessa harvaan asutulla seudulla polttopuuta on lähellä runsaasti saatavilla eivätkä pienhiukkaspäästöt aiheuta naapurustolle ongelmia. Energiavaihtoehto 9 on myös varsin ekologinen vaihtoehto, sillä kiinteistön energiantuotanto on lähes kokonaan hiilidioksidivapaata. Fossiilista polttoainetta tarvitaan vähäisessä määrin varavoiman käyttöön ja polttopuun tuotantoon. Ympäristökysymykset puoltavat siten vaihtoehdon 9 valintaa.

Käsitellyistä energiavaihtoehtoista ehdottaisin kiinteistön energiajärjestelmäksi vaihtoehtoa 9, pitkän tähtäimen kustannusten sekä ekologisten syiden nojalla. Lopullinen päätös kuuluu tietysti kiinteistön omistajille. Vaihtoehtojen 2 ja 4 järjestelmistä kannattaisi myös pyytää lopullinen tarjous, jolloin kustannukset tarkentuvat ja lopullinen päätös voidaan toteuttaa.

## LÄHTEET

- [1] Boyle, G. (ed.). Renewable Energy. Power for Sustainable Future. Oxford 1998, Oxford University Press. 477 p.
- [2] Luque, A., Hedegus, S. (ed.). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Chichester England 2003, John Wiley & Sons Ltd. 1138 p.
- [3] Taylor, R., H. Anternative Energy Sources. Bristol 1983, Adam Hilger Ltd. 310 p.
- [4] Lasnier, F., Ang, T., G. Photovoltaic Engineering Handbook. New York 1990, IOP Publishing Ltd. 548 p.
- [5] Photovoltaic Geographical Information System. European Commission Joint Research Centre. [WWW]. [viitattu 15.10.2010]. Saatavissa: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/info/faq.htm>.
- [6] Spera, D., A. (ed). Wind Turbine Technology. New York 1994, Asme Press. 638 p.
- [7] Vuorinen, A. Energiankäyttäjän käsikirja. Espoo 2009, Ekoenergo Oy. 204 s.
- [8] World Energy Council. New Renewable Energy Resources. London 1994, Kogan Page. pp. 1-231.
- [9] TuuleT188 tuulivoimalan yleisesite. Finnwind Oy. [WWW]. [viitattu 17.10.2010] Saatavissa: [http://www.finnwind.fi/web-content/esitteet/TuuleT188\\_yleisesite\\_fin.pdf](http://www.finnwind.fi/web-content/esitteet/TuuleT188_yleisesite_fin.pdf).
- [10] IEA CADDET. Mini-Review of Wind Energy 1995. UK 1995. CADDET Centre for Renewable Energy, ETSU. 88 p.
- [11] Aurinkopaneelit. Eurosolar Oy. [WWW]. [viitattu 13.10.2010] Saatavissa: [http://www.eurosolar.fi/kuvat/TP\\_02\\_piitanko\\_net.jpg](http://www.eurosolar.fi/kuvat/TP_02_piitanko_net.jpg).
- [12] Aaltoyliopiston teknillinen korkeakoulu. Uusiutuvat energiajärjestelmät. [WWW]. [viitattu 13.10.2010] Saatavissa: <http://www.tkk.fi/Units/AES/projects/renew/pv/images/Si.jpg>.

- [13] Powerfilm aurinkopaneelin tuotokuva. Marinea verkkokauppa. [WWW]. [viitattu 13.10.2010]. Saatavissa: [http://www.marinea.fi/shop/images/powerfilm\\_0801\\_c32.jpg](http://www.marinea.fi/shop/images/powerfilm_0801_c32.jpg).
- [14] H-WAWT tuuliturbiinin verkkokuva. [WWW]. [viitattu 23.10.2010]. Saatavissa: <http://img.youtube.com/vi/CZ1KN0fKqyA/0.jpg>.
- [15] NV-5K tuuliturbiinin verkkokuva. [WWW]. [viitattu 23.10.2010]. Saatavissa: <http://www.2020solar.com/uploads/NV-5K%20Wind%20Turbine/NV-5K-Darrieus-Turbine.jpg>.
- [16] Darrieus tuuliturbiinin verkkokuva. [WWW]. [viitattu 23.10.2010]. Saatavissa: <http://www.gunessistemleri.com/img/Darrieus.jpg>.
- [17] VAWT tuuliturbiinin verkkokuva. [WWW]. [viitattu 23.10.2010]. Saatavissa: [http://image.ec21.com/image/jochin/oimg\\_GC03614084\\_CA03614085/Vawt\\_Wind\\_Turbine\\_400W\\_3\\_6KW.jpg](http://image.ec21.com/image/jochin/oimg_GC03614084_CA03614085/Vawt_Wind_Turbine_400W_3_6KW.jpg).
- [18] HAWT tuuliturbiinin verkkokuva. [WWW]. [viitattu 23.10.2010]. Saatavissa: <http://www.windturbinesnow.com/images/horizontalaxis-windturbine.jpg>.
- [19] Suomen tuuliatlas. [WWW]. [viitattu 24.10.2010]. Saatavissa: <http://tuuliatlas.fmi.fi/fi/>.
- [20] Technology Academy Finland. [WWW]. [viitattu 25.10.2010]. Saatavissa: <http://www.millenniumprize.fi/en/2010-prize/professor-michael-graetzel/>.
- [21] Larminie, J., Dicks, A. Fuel Cell Systems Explained, Second Edition. Chichester, England 2003. John Wiley & Sons, Ltd. 406 p.
- [22] Leppänen, J. Ene-59.022 Energiatalouden erikoistyö ja seminaari: Ydinenergiapohjainen vetytalous. 4.5.2004. [WWW]. [viitattu 30.10.2010]. Saatavissa: <http://www.tkk.fi/Yksikot/Energiatalous/kurssit/Ene59020/Leppanen.pdf>.
- [23] Wärtsilä Oyj Abp. Lehistötiedote 22.2.2010. [WWW]. [viitattu 29.10.2010]. Saatavissa: <http://www.wartsila.com/,fi,press,0,pressrelease,FA065BB3-0626-4FD1-889C-6DC2359DF20D,A3DC410D-C245-4996-A79B-8DFF76C99F54,,.htm>.
- [24] Seppälä, J. Wärtsilä asensi polttokennon laivaan. Tekniikka ja Talous [verkkolehti] 11.6.2010. [viitattu 29.10.2010]. Saatavissa: <http://www.tekniikkatalous.fi/metalli/article429253.ece>.
- [25] Sähkötieto ry. Varavoimalaitokset, ST-käsikirja 31. Espoo 2000, Otavan kirjapaino Oy. 118 s.

- [26] Honda GX 390-7503H polttoaineenkulutuskäyrä. [WWW]. [viitattu 5.11.2010]. Saatavissa: [http://www.hsaoy.com/Apua/Polttoaineenkulutus/PAKM\\_Honda\\_GX390.pdf](http://www.hsaoy.com/Apua/Polttoaineenkulutus/PAKM_Honda_GX390.pdf).
- [27] Energia Suomessa, Tekniikka, talous ja ympäristövaikutukset. Helsinki 2004, Edita. 396 s.
- [28] Hämeenoja, E. Akkuopas. Tampere 1993, Kirjapaino Öhring. 76 s.
- [29] Dell, R., Rand, D. Understanding Batteries. Cambridge, UK 2001, The Royal Society of Chemistry. 223 p.
- [30] Leader CT200-12 akkuesite. [WWW]. [viitattu 6.11.2010]. Saatavissa: [http://www.akkupojat.fi/files/tuotteet/pdf\\_340.pdf](http://www.akkupojat.fi/files/tuotteet/pdf_340.pdf).
- [31] Hellgren, M., Heikkinen, L., Suomalainen, L. Energia ja ympäristö. Helsinki 1996, Hakapaino Oy. 213 s.
- [32] Knuuttila, K. (toim.). Puuenergia. Jyväskylä 2003, Gummerus Kirjapaino Oy. 115 s.
- [33] Hyytiäinen, H. Pientalojen tulisijat. Tampere 2000, Tammer-Paino Oy. 91 s.
- [34] Mottinetti. [verkkotyökalu]. [viitattu 12.11.2010]. Saatavissa: [www.mottinetti.fi](http://www.mottinetti.fi).
- [35] Erkkilä, V. Aurinkolämpöopas rakentajille ja suunnittelijoille. Jyväskylä 2003, Gummerus Kirjapaino Oy. 64 s.
- [36] Bejan, A., Kraus, A. D. Heat Transfer Handbook. England 2003, John Wiley & Sons. 1480 p.
- [37] Sundell, L., Kauhanen, K., Kansikas, R. Energiavaihtoehdot. Jyväskylä 1981, Gummerus Kirjapaino Oy. 146 s.
- [38] Leppänen, P. Rakennan energiaa säästävän pientalon. Tampere 1994, Tammer-Paino Oy. 62 s.
- [39] Sylinterikeräimen verkkokuva. [WWW]. [viitattu 19.11.2010]. Saatavissa: [http://www.euro-energy.net/infrastructures/gfx25/index-Picture-5-DCS\\_Acurex.jpg](http://www.euro-energy.net/infrastructures/gfx25/index-Picture-5-DCS_Acurex.jpg).
- [40] Tasokeräimen verkkokuva. [WWW]. [viitattu 19.11.2010]. Saatavissa: <http://www.acetec.fi/images/De%20Dietrich/Aurinkokeraimet.jpg>.

- [41] Tyhjiöputkikeräimen verkkokuva. [WWW]. [viitattu 19.11.2010]. Saatavissa: [http://ideastoenlighten.files.wordpress.com/2010/02/solar\\_heater1.jpg](http://ideastoenlighten.files.wordpress.com/2010/02/solar_heater1.jpg).
- [42] Seppänen, R., Kervinen, M., Parkkila, I., Karkela, L., Meriläinen, P. MAOL taulukot. Keuruu 2006, Otavan Kirjapaino Oy. 167 s.
- [43] International Energy Agency. Heat Pump Systems. A Technology Review. Ranska 1982, OECD. 199 p.
- [44] Ympäristöministeriö. Tasauslaskentaopas 2010. Rakennuksen lämpöhäviöiden määräysten mukaisuuden osoittaminen. [WWW]. [viitattu 26.11.2010]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=369891&lan=FI>.
- [45] Ilmatieteenlaitos. Lämmitystarveluku vertailukaudella 1971-2000. [WWW]. [viitattu 27.11.2010]. Saatavissa: [http://ilmatieteenlaitos.fi/saa/tilastot\\_148.html](http://ilmatieteenlaitos.fi/saa/tilastot_148.html).
- [46] Ilmatieteenlaitos. Lämmitystarveluku verkkodokumentti. [WWW]. [viitattu 29.11.2010]. Saatavissa: [http://ilmatieteenlaitos.fi/tuotteet/kauppa\\_11.html](http://ilmatieteenlaitos.fi/tuotteet/kauppa_11.html).
- [47] Motiva Oy. Kiinteistöjen energianhallinta. [WWW]. [viitattu 29.11.2010]. Saatavissa: [http://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/energiankayton\\_tehostaminen/kiinteistojen\\_energianhallinta](http://www.motiva.fi/julkinen_sektori/energiankayton_tehostaminen/kiinteistojen_energianhallinta).
- [48] D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. Ympäristöministeriö, 2007.
- [49] Mamec Oy. RATKO-pumppujen esite. [WWW]. [viitattu 1.12.2010]. Saatavissa: [http://www.mamec.fi/files/140/Ratko\\_luotettava\\_jaatymaton.pdf](http://www.mamec.fi/files/140/Ratko_luotettava_jaatymaton.pdf).
- [50] Upo Kodinkoneet verkkosivusto. [WWW]. [viitattu 25.11.2010]. Saatavissa: <http://www.upo.fi/>.
- [51] Oy Vestel Scandinavia Ab/Finlux. Finlux 32FLD785LM verkkoesite. [WWW]. [viitattu 25.11.2010]. Saatavissa: <http://www.finlux.fi/tuotteet/785-sarja/32fld785lm/>.
- [52] Enervent Oy. Enervent Pingvin ilmanvaihtokoneen verkkodokumentti. [WWW]. [viitattu 25.11.2010]. Saatavissa: <http://www.enervent.fi/unit.asp?menuid=20110&langid=1&countryid=100&modelid=1>.

[53] Haverila, M., J., Uusi-Rauva, E., Kouri, I., Miettinen, A. Teollisuustalous. Tampere 2005, Tammer-Paino Oy. s. 195-207.

[54] Liittymätuotehinnasto. Pohjois-Karjalan Sähkö Oy. [WWW]. [viitattu 5.1.2011]. Saatavissa: [www.pks.fi/Sivu/liittymismaksut](http://www.pks.fi/Sivu/liittymismaksut).

[55] Lämmitystuotteet hintoineen. Taloon.com rautakauppa. [WWW]. [viitattu 5.1.2011]. Saatavissa: <http://kauppa.taloon.com/PublishedService?file=&pageID=3&action=view&groupID=599&OpenGroups=599>.

[56] Sähköenergian siirtohinnasto. Pohjois-Karjalan Sähkö Oy. [WWW]. [viitattu 5.1.2011]. Saatavissa: <http://www.pks.fi/Sivu/hinnastot>.

[57] PKS OIVA yleissähköenergian hinnasto. Pohjois-Karjalan Sähkö Oy. [WWW]. [viitattu 5.1.2011]. Saatavissa: [http://www.pks.fi/Sivu/PKS\\_OIVA](http://www.pks.fi/Sivu/PKS_OIVA).

[58] Toshiba Daiseikai 10ND ilmalämpöpumpun hinnasto. Ilmalämpöpumppu.fi. [WWW]. [viitattu 7.1.2011]. Saatavissa: <http://www.ilmalampopumppu.fi/tarjous.htm>.

[59] Aurinkokeräinjärjestelmien hinnasto. JTV-energia Ky. [WWW]. [viitattu 7.1.2011]. Saatavissa: <http://www.jtv-energia.fi/tasokerainjarjestelmat.html>.

[60] Aurinkosähköjärjestelmien esite. Finnwind Oy. [WWW]. [viitattu 8.1.2011]. Saatavissa: [http://www.finnwind.fi/web-content/esitteet/Aurinko\\_C\\_sarja\\_yleisesite\\_fin.pdf](http://www.finnwind.fi/web-content/esitteet/Aurinko_C_sarja_yleisesite_fin.pdf).

[61] Kipor aggregaattien hinnasto. Kipor Finland. [WWW]. [viitattu 8.1.2011]. Saatavissa: <http://www.kiporfinland.fi/sivut/hinnasto-2011>.

[62] Q-Cells. Q-Smart 75-95 Solar Module Portfolio. [WWW]. [viitattu 4.2.2011]. Saatavissa: [http://www.q-cells.com/en/solar\\_modules/module\\_portfolio/qsmart/qsmart\\_75-95/index.html](http://www.q-cells.com/en/solar_modules/module_portfolio/qsmart/qsmart_75-95/index.html).

[63] European Wind Energy Assosiation. World Wind Energy Report. [WWW]. [viitattu 5.2.2011]. Saatavissa: [http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009\\_s.pdf](http://www.wwindea.org/home/images/stories/worldwindenergyreport2009_s.pdf)

[64] VTT. Suomen tuulivoimatilastot. [WWW]. [viitattu 5.2.2011]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/?lang=fi>.

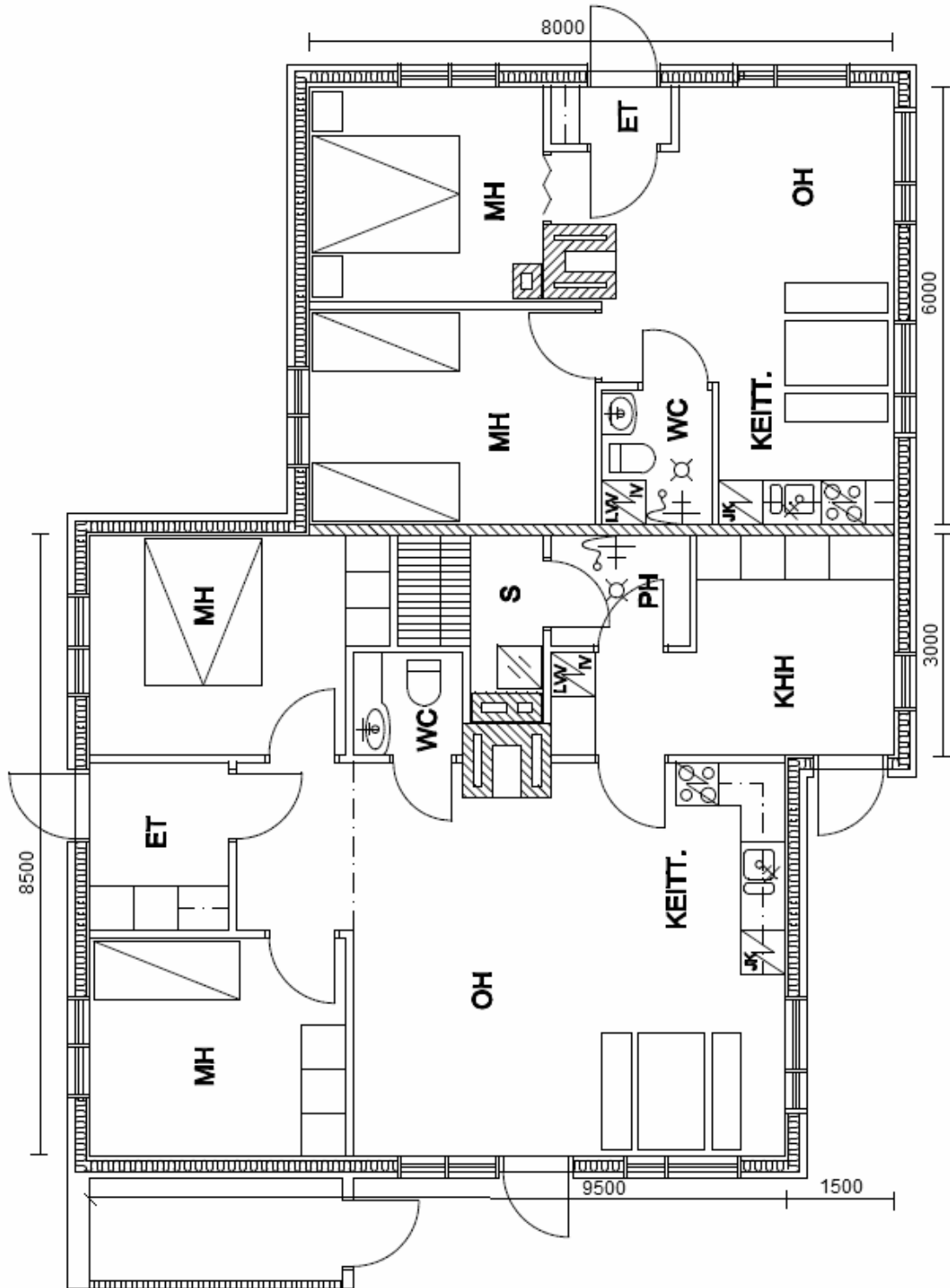
[65] Ympäristöministeriö. Kansallinen rakennuspoliittinen ohjelma. Helsinki 2003, Edita Prima Oy. 39 s. [WWW]. [viitattu 5.2.2011]. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=4132&lan=fi>.

[66] Alatarvas, R. Kolmannen sukupolven aurinkokennot kovassa nousukiidossa. Tietysti.fi [Suomen Akatemian verkkolehti ] 13.7.2010. [viitattu 5.2.2011]. Saatavissa: <http://www.aka.fi/fi/T/Tiede uutiset2/Tata-tutkimme/Kolmannen-sukupolven-aurinkokennot-kovassa-nousukiidossa-/>.

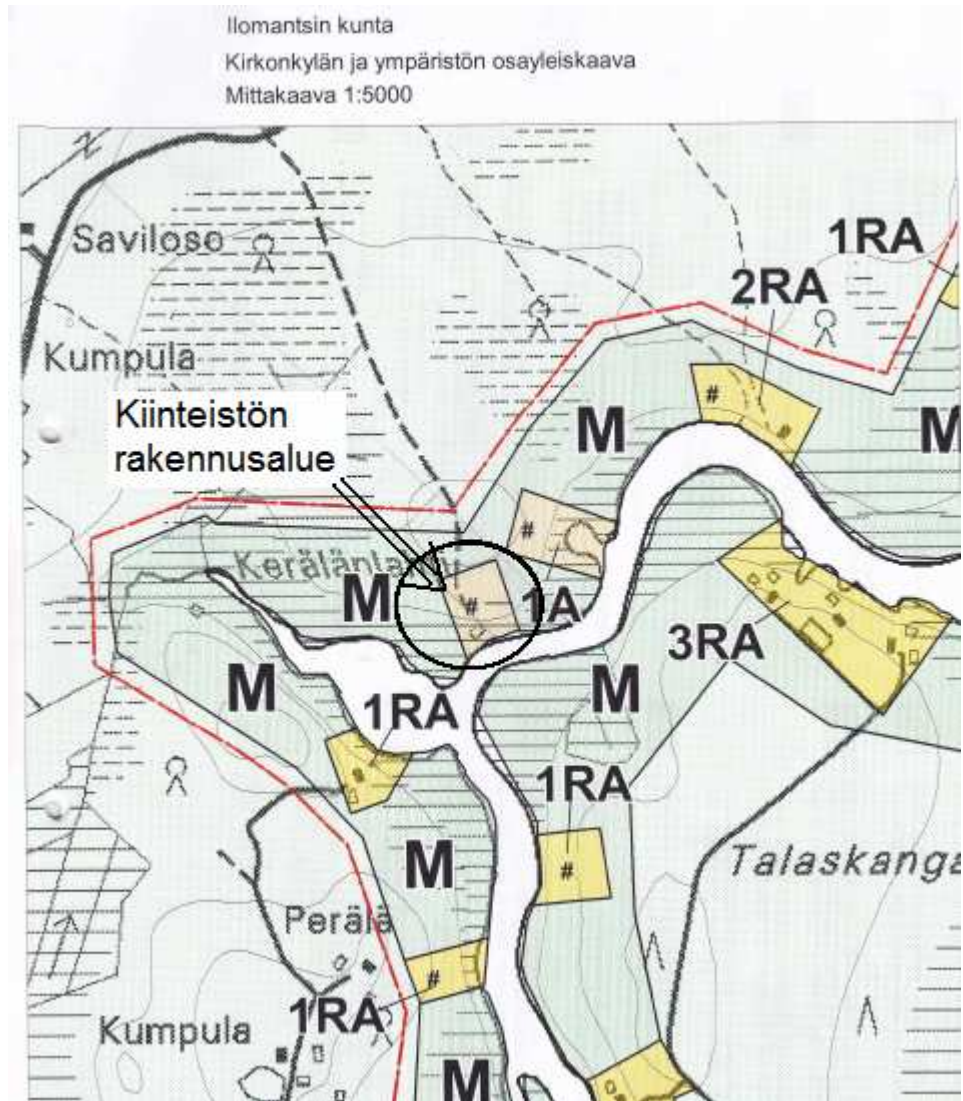
[67] Oy Hydrocell Ltd. Polttokennojen verkkosivusto. [WWW]. [viitattu 12.2.2011]. Saatavissa: <http://www.hydrocell.fi/fi/polttokennot/hc-100.html>.



## LIITE 1: RAKENNUKSEN POHJAKUVA



## LIITE 2: OTE KIINTEISTÖN RAKENNUSPAIKAN KAAVASTA



## LIITE 3: AURINKOPANEELIEN MARKKINAHINTOJA

Malli (Valmistaja)	Kenno- tyyppi	Teho ( $W_p$ )	Hinta (€)	Hinta ( $€/W_p$ )	Myyjä
Kiina	monikide	130	495	3,81	Akkupojat Oy [1]
KD-135 (Kyocera, Japani)	monikide	135	620	4,59	
SunSet-85	monikide	85	350	4,12	
YL-180 (Yingli Solar, Kiina)	monikide	180	585	3,25	Suntekno Oy [2]
GPV-85 (GPV, Ruotsi)	yksikide	85	325	3,82	
SM-85 (Solara, Saksa)	yksikide	85	365	4,29	
SPR-90 (Sinisol, Saksa)	yksikide	100	445	4,45	
TFF 90S (Centrosolar, Saksa)	yksikide	90	360	4,00	
KD-135 (Kyocera, Japani)	monikide	135	580	4,30	Eurosolar Oy [3]
KD-185 (Kyocera, Japani)	monikide	185	660	3,57	
SR-85	monikide	85	320	3,76	
SR-135	monikide	135	520	3,85	
Blue Solar 80	yksikide	80	290	3,63	
KD-135 SX (Kyocera, Japani)	monikide	135	566,1	4,19	JN-Solar Oy [4]
KD-185 GH (Kyocera, Japani)	monikide	185	875	4,73	
HIP-230 HDE4 (Sanyo, Japani)	yksikide	230	1320	5,74	
KD-135 GH (Kyocera, Japani)	monikide	135	570	4,22	ThermoSun Eco Oy [5]
SR-135	monikide	135	520	3,85	
SunSet AS 95 HPC	yksikide	95	460	4,84	
HIP 230 (Sanyo, Japani)	yksikide	230	1190	5,17	
SPR-90	yksikide	100	445	4,45	

Hintatiedot:

[1] Akkupojat Oy. Aurinkopaneelien hinnasto. [WWW]. [Viitattu 4.2.2011]. Saatavissa: <http://www.akkupojat.fi/index.php/site/aurinkopaneelit/aurinkopaneelit-2>.

[2] Suntekno Oy. Aurinkopaneelien hinnasto. [WWW]. [Viitattu 4.2.2011]. Saatavissa: <http://www.suntekno.fi/index.jsp?pid=202&gid=69&id=432&gategory=&product=Aurinkopaneeli> hinnasto.

[3] Eurosolar Oy. Aurinkopaneelien hinnasto. [WWW]. [Viitattu 4.2.2011]. Saatavissa: <http://www.eurosolar.fi/hinnasto/?kategoria=16>.

[4] JN-Solar. Aurinkopaneelien hinnasto. [WWW]. [Viitattu 4.2.2011]. Saatavissa: [http://www.jn-solar.fi/index.php?main\\_page=index&cPath=1](http://www.jn-solar.fi/index.php?main_page=index&cPath=1).

[5] ThermoSunEco Oy. Aurinkopaneelien hinnasto. [WWW]. [Viitattu 4.2.2011]. Saatavissa: [http://www.thermosun.fi/epages/Kaupat.sf/fi\\_FI/?ViewAction=View&ObjectID=97644466](http://www.thermosun.fi/epages/Kaupat.sf/fi_FI/?ViewAction=View&ObjectID=97644466).