

Juhamatti Meetteri

**LYPSYKARJANAVETAN ENERGIAOMAVARAISUUDEN KEHIT-
TÄMINEN**

LYPSYKARJANAVETAN ENERGIAOMAVARAISUUDEN KEHIT- TÄMINEN

Juhamatti Meetteri
Opinnäytetyö
Syksy 2021
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Juhamatti Meetteri

Opinnäytetyön nimi suomeksi: Lypsykarjanavetan energiaomavaraisuuden kehittäminen

Opinnäytetyön nimi englanniksi: Improvement of Energy Self-sufficiency in a Milking Barn

Työn ohjaaja: Veli-Matti Mäkelä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2021

Sivumäärä: 118 + 7 liitettä

Työn kohteena on Siikalatvan kunnassa sijaitseva vanha lypsykarjanavetta, jota tullaan laajentamaan sukupolvenvaihdoksen yhteydessä. Työssä selvitetään erilaisia mahdollisuuksia energiaomavaraisuuden kehittämiseen osana navetan modernisointia. Työssä tarkastellaan maidon ja lietelannan sisältämän lämpöenergian hyödyntämistä navetan lämpöenergiatarpeeseen. Lisäksi työssä selvitetään aurinkosähkön hyödyntämismahdollisuuksia navetan sähkön ja lämmöntarpeeseen sekä lämmöntalteenoton ja aurinkosähkön yhdistämistä hybridiratkaisuksi. Työssä esitellään omavaraisten energiantuotantoratkaisujen tekniikkaa ja selvitetään alustavasti niiden kannattavuutta.

Työssä arvioidaan uudistetun navetan sähkö- ja lämpöenergiatarve laskemalla navetan eri toimintojen energiankulutukset. Lisäksi lasketaan maidon, lietelannan ja aurinkopaneelien energiantuotantopotentiaalit. Navetan energiankulutustietojen pohjalta mitoitetaan ja tutkitaan järjestelmien sopivuutta kohteeseen. Järjestelmien kannattavuutta arvioidaan tutkimalla niiden kustannuksia ja laske-
malla investoinneille takaisinmaksuajat.

Navetan lämpöenergiatarve on noin 39 MWh ja sähköenergian 55 MWh vuodessa. Maidosta jäähdytyksessä poistettava lämpöenergia on noin 23 MWh ja lietelannassa on potentiaalia jopa 53 MWh:n vuotuisen lämmöntuottoon. Maidon esijäähdytys on kannattava investointi, mikäli jäähdytyksessä syntyvällä lämpimällä vedellä katsotaan olevan arvoa. Myös maidon lämmöntalteenotto kylmäkoneella ja aurinkopaneeli-investointi sähkön- ja lämmöntuotannossa ovat taloudellisesti kannattavia ratkaisuja energiaomavaraisuuden parantamiseksi. Lietelannan LTO:n kannattavuuden arviointi on hankalampaa, koska järjestelmät suunnitellaan eri kohteisiin yksilöllisesti ja tapauskohtaisesti. Mikäli maatilalla on navetan lisäksi muitakin lämmön käyttökohteita, voi lietelannan LTO maalämmönkeruupiirin kanssa olla varteenotettava vaihtoehto ja sitä kannattaa tutkia tarkemmin.

Asiasanat: energiatehokkuus, omavaraisuus, lämmöntalteenotto, aurinkosähkö, kestävä kehitys

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
SISÄLLYS	4
1 JOHDANTO	5
2 NAVETAN ENERGIANTARVE	6
2.1 Lämmin käyttövesi	6
2.2 Tilojen lämmitys	11
2.3 Valaistus	13
2.4 Lypsy	18
2.5 Maidon jäähdytys	20
2.6 Ruokinta	22
2.7 Lannanpoisto	23
2.8 Ilmanvaihto	25
2.9 Veden pumppaus	28
2.10 Navetan kokonaisenergiantarve	31
3 LÄMMÖNTALTEENOTTO JA MAIDON ESIJÄÄHDYTYS	36
3.1 Maidon esijäähdytys	36
3.2 Lämmöntalteenotto maidosta	46
3.3 Lämmöntalteenotto lehmien lietelannasta	59
3.4 Maidon ja lietelannan yhdistetty LTO	72
3.5 LTO-ratkaisujen kannattavuus	81
4 AURINKOSÄHKÖ	84
4.1 Aurinkopaneelit sähköntuotannossa	84
4.2 Aurinkopaneelit sähkön- ja lämmöntuotannossa	98
4.3 Aurinkopaneelit yhdessä lämmöntalteenoton kanssa	103
4.3.1 Aurinkopaneelit ja maidon lämmöntalteenotto	104
4.3.2 Aurinkopaneelit ja lietelannan lämmöntalteenotto	104
5 YHTEENVETO	105
LÄHTEET	109
LIITTEET	118

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön kohteena on Siikalatvan kunnassa sijaitsevan maatilán navetta. Maatilan vanhaa, parinkymmenen lypsylehmán parsinavettaa halutaan laajentaa ja modernisoida se yhden lypsyrobotin pihattonavetaksi. Vanhassa navetassa ei ole käytössä mitään energiataloutta parantavia ratkaisuja, eikä niihin ole ollut tarvetta. Nykyinen navetta on pieni ja varustelutaso matala, ja näin energiankulutus on ollut hyvin maltillista. Vanhaan navettaan on tarkoitus tehdä peruskorjaus ja laajentaa sitä rakentamalla uudet osastot lypsyrobotille, nuorkarjalle, maitohuoneelle ja henkilöstötiloille. Navetan modernisoinnissa varustelutaso nousee ja samoin käy myös energiankulutukselle, minkä vuoksi laajennuksen yhteydessä navetan energiaomavaraisuutta halutaan parantaa.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää mahdollisuuksia navetan energiaomavaraisuuden kehittämiseen. Työn ensimmäisessä osassa tutkitaan uuden navettakokonaisuuden energiankulutusta lämmön- ja sähköntarpeen osalta. Tarkastelu rajataan käsittelemään ainoastaan navettarakennusta. Toisessa osassa tutkitaan erilaisia energiaomavaraisuusratkaisuja ja niihin liittyviä tekniikoita sekä tarkastellaan niiden sopivuutta uuteen navettaan energiankulutusselvityksen perusteella. Omavaraisuusratkaisuista tutkitaan maidon esijäähdytystä ja lämmön talteenottoa maidosta ja lietelannasta. Niiden lisäksi tutkitaan aurinkosähkön hyödyntämistä navetan sähkön- ja lämmöntarpeen kattamiseen sekä aurinkosähkön yhdistämistä lämmöntalteenottoratkaisujen kanssa hybridijärjestelmänä. Energiantuotanto ja -talteenottoratkaisujen kannattavuutta pohditaan myös taloudellisesta näkökulmasta.

2 NAVETAN ENERGIANTARVE

Navetassa kuluu lämpöenergiaa lämpimän käyttöveden ja tilojen lämmitykseen. Navetan tärkeimpiä sähköenergiaa kuluttavia toimintoja ovat valaistus, automaattinen robottilypsy, maidon jäähdytys, eläinten ruokinta, lannanpoisto, ilmanvaihto ja veden pumppaus. (1, s. 38.) Tässä osiossa lasketaan pihattonavetan lämpö- ja sähköenergiantarpeet tärkeimpien toimintojen osalta. Energiantarpeet laskeaan, jotta navetan energiaomavaraisuusvaihtoehtoja voidaan tutkia ja mitoittaa. Lähtötietoina laskentaan on saatu navetan lämpimän käyttöveden arvioitu vuotuinen kulutus, eläinten määrät ja ilmanvaihdon toteutustapa. Lisäksi laskentaa varten on saatu tiedot navetan pohjaratkaisusta, eläinten ruokintaketjusta sekä lannanpoistojärjestelmästä.

2.1 Lämmin käyttövesi

Lypsykarjatiloiilla tarvitaan lämmintä käyttövettä (LKV) muun muassa lypsyihin ja navetan tuotantotilojen pesuihin (1, s. 28). Lämpimän käyttöveden tarkasteluun sisältyy pelkästään lypsyn ulkopuolisen lämpimän vedentarpeen energiankulutus. Lypsyyntä tarvittava kuuma vesi otetaan tarkasteluun mukaan lypsyn energiankulutuslaskelmissa, koska lypsyrobotin oletetaan lämmittävän tarvitsemansa veden erikseen.

On arvioitu, että lämmintä käyttövettä kuluu navetassa vuoden aikana 300 m^3 (2). Pidetään LKV:n tavoitelämpötilana $55 \text{ }^\circ\text{C}$:ta ja kaivokylmän veden lämpötilana $5 \text{ }^\circ\text{C}$:ta. Näin lämpimän ja kylmän veden lämpötilaero on $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Veden ominaislämpökapasiteetti on $4,2 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ja tiheys 1000 kg/m^3 . Veden lämmittämiseen kuuluva vuotuinen nettoenergiantarve voidaan laskea kaavalla 1 (3).

$$Q_{LKV,netto} = \frac{\rho_{LKV} \times C_{p,LKV} \times V_{LKV} \times \Delta T_{LKV}}{3600} \quad \text{KAAVA 1}$$

$Q_{LKV,netto}$ = lämpimän käyttöveden nettoenergiantarve (kWh/vuosi)

ρ_{LKV} = veden tiheys (kg/m^3)

$c_{p,LKV}$ = veden ominaislämpökapasiteetti (kJ/kg°C)

V_{LKV} = lämpimän käyttöveden määrä (m³/vuosi)

ΔT_{LKV} = veden lämpötilan muutos (°C)

3600 = yksikönmuunnoskerroin kilojouleista kilowattitunneiksi

Sijoittamalla veden arvot kaavaan lämpimän käyttöveden nettoenergiantarpeeksi saadaan

$$Q_{LKV,netto} = \frac{1000 \frac{kg}{m^3} \times 4,2 \frac{kJ}{kg^\circ C} \times 300 \frac{m^3}{vuosi} \times 50^\circ C}{3600} = 17500 \frac{kWh}{vuosi}$$

Lämpimän käyttöveden tuotannossa ja käytössä syntyy lämpöhäviöitä. Työssä on otettu huomioon LKV:n siirron, varastoinnin ja kierrätyksen lämpöhäviöt. Lämpimän käyttöveden siirtohäviöitä syntyy LKV:n jakojohdoissa. LKV:n siirtohäviöt lasketaan kaavalla 2 (3, s. 43).

$$Q_{LKV,siirto} = \frac{Q_{LKV,netto}}{\eta_{LKV,siirto}} - Q_{LKV,netto} \quad \text{KAAVA 2}$$

$Q_{LKV,siirto}$ = lämpimän käyttöveden siirtohäviö (kWh/vuosi)

$Q_{LKV,netto}$ = lämpimän käyttöveden nettoenergiantarve (kWh/vuosi)

$\eta_{LKV,siirto}$ = lämpimän käyttöveden siirron hyötysuhde

Kun lämpimän käyttöveden siirron hyötysuhteena käytetään arvoa 0,86 (3, s. 44), saadaan kaavaan 2 sijoittamalla LKV:n vuotuiseksi siirtohäviöksi

$$Q_{LKV,siirto} = \frac{17500 \frac{kWh}{vuosi}}{0,86} - 17500 kWh = 2848,837 \frac{kWh}{vuosi} \approx 2849 \frac{kWh}{vuosi}$$

Lämmön varastoinnin häviöitä syntyy käyttövesivaraajassa. Lämpimän käyttöveden varastoinnin vuotuinen häviö on 1100 kWh, kun varaajan tilavuus on 1000 l

ja varaajan eristevahvuus 100 mm (3, s. 45). Lämpimän käyttöveden kiertojohdossa syntyy myös kiertohäviöitä. Kiertohäviöt lasketaan kaavalla 3 (3, s. 45).

$$Q_{LKV,kierto} = (\phi_{LKV,kierto,omin} L_{LKV} + \phi_{LKV,lämmitys,omin} n_{lämmityslaitte}) \times \frac{t_{LKV,pumppu} \times 365}{1000} \quad \text{KAAVA 3}$$

$Q_{LKV,kierto}$ = lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviö (kWh/vuosi)

$\phi_{LKV,kierto,omin}$ = lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviön ominaisteho (W/m)

L_{LKV} = lämpimän käyttöveden kiertojohdon pituus (m)

$\phi_{LKV,lämmitys,omin}$ = lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden ominaisteho (W/kpl)

$n_{lämmityslaitte}$ = lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden lukumäärä (kpl)

$t_{LKV,pumppu}$ = lämpimän käyttöveden kiertojohdon pumpun käyttöaika (h/vrk)

$\phi_{LKV,kiertohäviö,omin}$ = lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviön ominaisteho (W/m)

Lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviön ominaistehona käytetään arvoa 6 W/m. Oletetaan, ettei lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjä lämmityslaitteita ole. Lämpimän käyttöveden kiertojohdon pituus voidaan laskea kaavalla 4 (3, s. 46).

$$L_{LKV} = L_{LKV,omin} \times A_{lämmitys,netto} \quad \text{KAAVA 4}$$

L_{LKV} = lämpimän käyttöveden kiertojohdon pituus (m)

$L_{LKV,omin}$ = lämpimän käyttöveden kiertojohdon ominaispituus (m/m²)

$A_{lämmitys,netto}$ = navetan nettopinta-ala (m²)

Arvioidaan navetan nettopinta-alaksi 865 m² (2). Valitaan kiertojohdon ominaispituudeksi 0,2 m/m² (3, s. 46). Kiertojohdon pumpun käyttöaika on 24 tuntia vuorokaudessa. Kaavat 3 ja 4 yhdistämällä ja sijoittamalla niihin lähtöarvot saadaan lämpimän käyttöveden kiertohäviöiksi

$$Q_{LKV,kierto} = \left(6 \frac{W}{m} \times 0,2 \frac{m}{m^2} \times 865 m^2\right) \frac{24 \frac{h}{vrk} \times 365 \frac{vrk}{vuosi}}{1000} = 9092,88 \frac{kWh}{vuosi} \approx 9093 \frac{kWh}{vuosi}$$

Kun LKV:n häviöt on selvitetty, lasketaan LKV:n kokonaisenergiatarve kaavalla 5 (3, s. 43).

$$Q_{lämmitys,LKV} = Q_{LKV,netto} + Q_{LKV,siirto} + Q_{LKV,varastointi} + Q_{LKV,kierto} \quad \text{KAAVA 5}$$

$Q_{lämmitys,LKV}$ = lämpimän käyttöveden lämpöenergian tarve (kWh/vuosi)

$Q_{LKV,netto}$ = lämpimän käyttöveden nettoenergiatarve (kWh/vuosi)

$Q_{LKV,siirto}$ = lämpimän käyttöveden siirtohäviö (kWh/vuosi)

$Q_{LKV,varastointi}$ = lämpimän käyttöveden varastoinnin häviö (kWh/vuosi)

$Q_{LKV,kierto}$ = lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviö (kWh/vuosi)

Sijoittamalla kaavaan lasketut häviöt saadaan navetan lämpimän käyttöveden lämpöenergian tarpeeksi

$$\begin{aligned} Q_{lämmitys,LKV} &= 17500 \frac{kWh}{vuosi} + 2848,837 \frac{kWh}{vuosi} + 1100 \frac{kWh}{vuosi} + 9092,880 \frac{kWh}{vuosi} \\ &= 30541,717 \frac{kWh}{vuosi} \approx 30542 \frac{kWh}{vuosi} \end{aligned}$$

Lämpimän käyttöveden energiankulutusprofiili

LKV:n lämmönkulutusprofiili on tehty hyödyntäen koulun Hybridijärjestelmätoimintojaksolla annettuja rivitalorakennuksen lämpimän käyttöveden energiankulustietoja (4). Kulustiedoista on saatu lämpimän käyttöveden tehontarpeet

vuoden jokaiselle tunnille. Rivitalorakennuksen lämpimän käyttöveden tuntiset tehontarpeet yhteen laskemalla on saatu kyseisen rakennuksen vuotuista LKV:n energiantarvetta vastaava arvo. Rivitalon LKV:n energiantarve on vuodessa yhteensä noin 97 559 kWh (4). Kun vuoden jokaisen tunnin tehontarve ja vuoden tuntisten tehojen summa on tiedossa, voidaan jokainen tuntinen tehontarve jakaa LKV:n tuntisten tehojen summalla. Näin saadaan jokaiselle tunnille sen energiankulutuksen osuus vuoden kokonaisenergiantarpeesta (kuva 1).

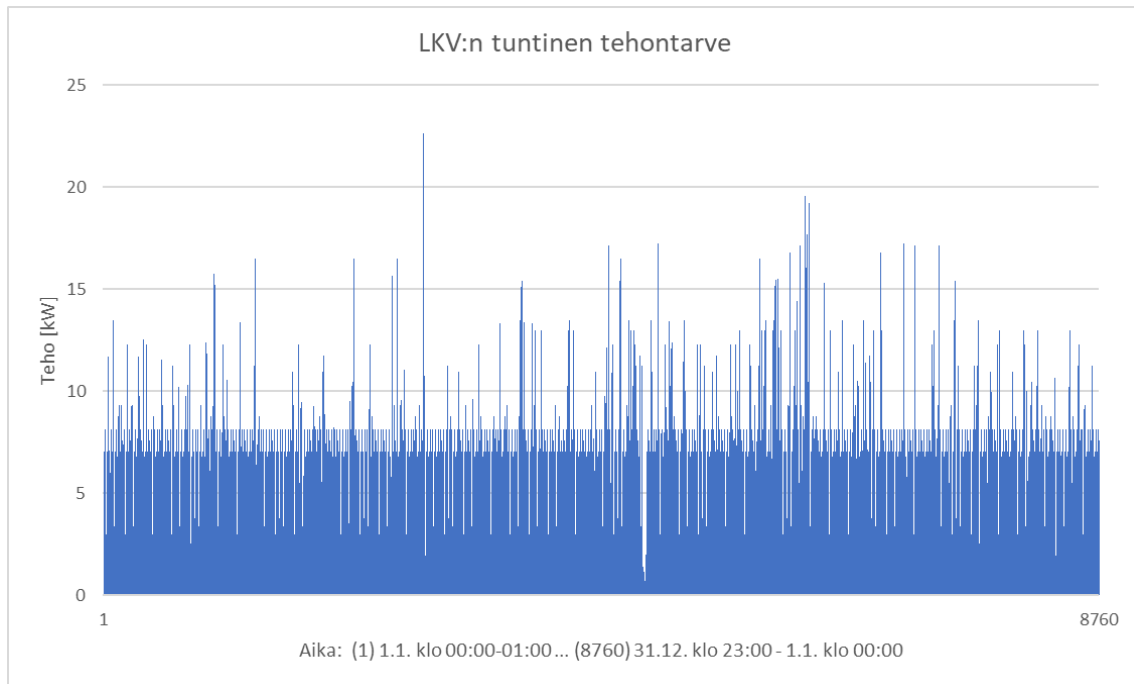
öytä Fontti Tasaus

fx = $\$T\$17*\$S23$

	Q	R	S	T	U
		Navetan LKV:n energiantarve		30541,71721 kWh	
Vuoden tunnit	LKV:n tuntinen teho, rivitalo	Rivitalon LKV:n tuntisen tehojen summasta	Navetan LKV:n tuntinen tehontarve		
	kW	%	kW		
1	0,173	0,0002 %	= $\$T\$17*\$S23$		
2	0,173	0,0002 %	0,054		
3	4,420	0,0045 %	1,384		
4	6,153	0,0063 %	1,926		
5	21,667	0,0222 %	6,783		
6	14,733	0,0151 %	4,612		
7	22,533	0,0231 %	7,054		
8	11,267	0,0115 %	3,527		
9	7,800	0,0080 %	2,442		

KUVA 1. LKV:n tuntisten tehojen määrittäminen MS Excelillä

Navetan lämpimän käyttöveden lämmitykseen kuluu vuodessa energiaa yhteensä 30 542 kWh. Käytetään navetan LKV:n tuntisen tehontarpeen osuuksina samoja osuuksia kuin rivitalossa. Näin saadaan määritettyä navetan LKV:n tuntiset tehontarpeet vuoden jokaiselle tunnille kertomalla tunnin energiantarpeen osuus navetan vuotuisella LKV:n energiantarpeella. LKV:n tehontarveprofiili on kuvassa 2.



KUVA 2. LKV:n tuntinen teho

2.2 Tilojen lämmitys

Navetan eläintiloja ei tarvitse erikseen lämmittää. Lypsykarja pitää tilat riittävän lämpiminä omalla lämmöntuotannollaan (2). Navetan toimistotiloja täytyy kuitenkin lämmittää kylmillä keleillä. Toimistotilojen lämmitysenergiatarve on arvioitu yksinkertaisesti käyttäen apuna pientaloille tarkoitettua Motivan Lämmitystapojen vertailulaskuria (5). Laskuriin syötetään vähintään rakennuksen pinta-ala, huonekorkeus, asukasmäärä sekä rakennuksen ikä ja maantieteellinen sijainti. Laskuriin syötetyt arvot ja sen antama lämmitysenergian kokonaistarve on kuvassa 3.

Rakennuksen tiedot

Haluun määrittää lämmitysenergian kulutustiedot: Rakennuksen tiedoilla Antamalla vuosikulutuksen

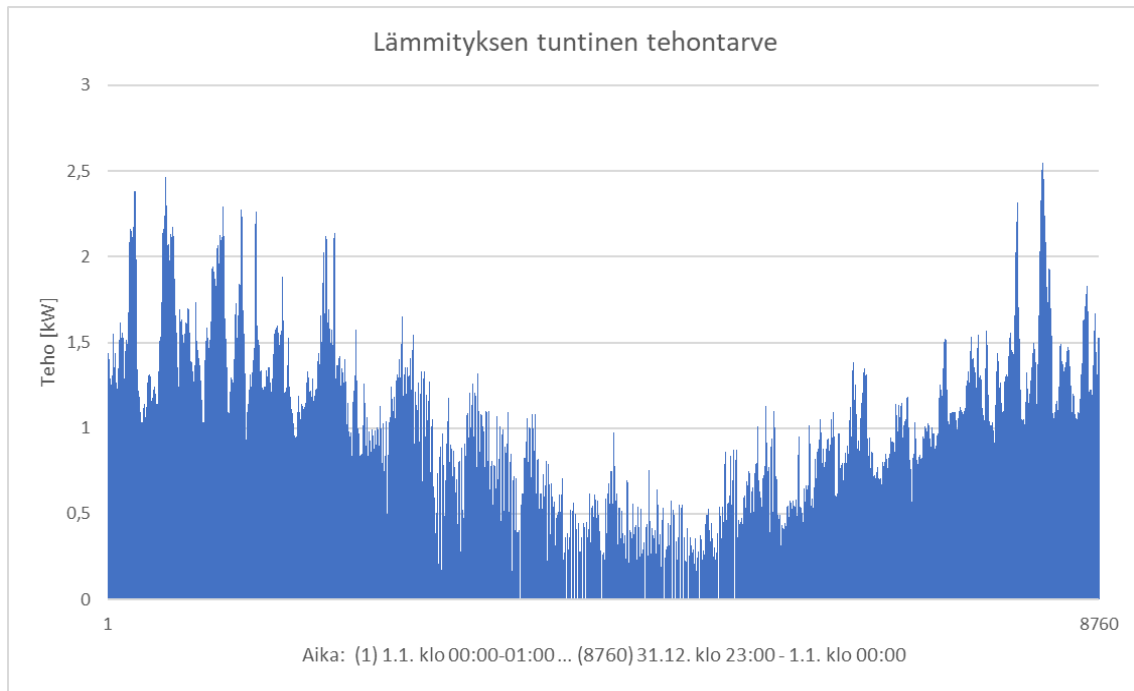
1. Rakennuksen tiedot	Lämmitysenergian tarve vuodessa
Rakennuksen pinta-ala <input type="text" value="58"/> m ²	Käyttöveden lämmitysenergia <input type="text" value="0"/> kWh/a
Huonekorkeus (m) <input type="text" value="3.4"/> m	Lämmitysenergian kokonaistarve <input type="text" value="7690.79996"/> kWh/a vuodessa
Asukasmäärä <input type="text" value="0"/>	
Rakennuksen energiatehokkuus tai ikä <input type="text" value="2010-"/>	
Rakennuksen sijainti <input type="text" value="Itä Maan keskiosat"/>	

KUVA 3. Lämmitysenergiantarpeen laskentatyökalu (5)

Kuvasta nähdään, että toimistotilojen pinta-ala on 58 m² ja huonekorkeus 3,4 m. Rakennus vastaa nykyistä tavanomaista rakentamismääräykset täyttävää taloa. Navetta sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla, joten rakennuksen sijainniksi valitaan maan keskiosat. (2.) Laskuriin syötettävä rakennuksen asukkaiden lukumäärä vaikuttaa laskurin antamaan käyttöveden lämmitysenergiantarpeeseen. Navetan käyttöveden energiankulutus on kuitenkin arvioitu riittävän tarkasti jo lämpimän käyttöveden energiankulutuslaskelmissa, joten asukasmääräksi valitaan nolla. Laskurin mukaan toimistotilojen lämmitysenergiantarve on noin 8000 kWh/v.

Tilojen lämmityksen energiankulutusprofiili

Toimistotilojen lämmityksen energiankulutusprofiili on tehty samalla menetelmällä kuin LKV:n kulutusprofiili. Rivitalon tuntisten lämmitysenergiantarpeiden osuudet koko vuoden lämmitysenergiantarpeesta vastaavat navetan tuntisten lämmitysenergiantarpeiden osuuksia navetan koko vuoden lämmitysenergiantarpeesta. Tilojen lämmityksen tehontarveprofiili on kuvassa 4.



KUVA 4. Tilojen lämmityksen tuntinen teho

2.3 Valaistus

Navetassa oikeanlainen valaistus on tärkeää. Sillä on vaikutusta työskentelyn turvallisuuteen sekä eläinten ja työntekijöiden viihtyvyyteen (1, s. 22). Maa- ja metsätalousministeriön asetus määrää lypsykarjarakennuksen eläin- ja lypsyosastojen valaistuksen vähimmäisvoimakkuudesta taulukossa 1 esitetyllä tavalla.

TAULUKKO 1. Valaistuksen vähimmäisvoimakkuudet eläin- ja lypsyosastoilla (6, taulukko 9)

Kohde	Lux[Lx]
Eläintilan yleisvalaistus	150 ¹⁾
Lypsyasema ja -robotti	250 ²⁾
Nuoren karjan tila	100 ¹⁾

¹⁾ 2 metrin korkeudella

²⁾ utarekorkeudella

Valaistusvoimakkuus kuvaa valonlähteen voimakkuutta valaistavalle pinnalle. Sen yksikkö luxi (lx) on valaistusvoimakkuus, jonka yhden lumenin valovirta tuottaa jakautuessaan tasaisesti yhden neliömetrin alueelle. (7.) Valaistusvoimakkuus heikkenee, mitä kauempana valonlähde on valaistavasta pinnasta. Kun etäisyys kaksinkertaistuu, valaistusvoimakkuus pienenee neljäsosaan. (8.) Valaistusvoimakkuus lasketaan kaavalla 6 (9, s. 134).

$$E = \frac{\phi}{A}$$

KAAVA 6

E = valaistusvoimakkuus (lx)

ϕ = valovirta (lm)

A = pinta-ala (m²)

Yleisvalaistuksessa valovoimakkuuden ohjearvo tulee saavuttaa kahden metrin korkeudella. Oletetaan, että lamput ovat kolmen metrin korkeudella ja metrin etäisyydellä lampusta saavutetaan 150 lx. Eläintilojen pinta-ala on arvioitu 750 m²:ksi. Yleisvalaistuksen valovirta voidaan laskea kaavaa 6 soveltamalla. Sijoittamalla kaavaan lähtöarvot saadaan eläintilan yleisvalaistuksen valovirraksi

$$\phi_{\text{yleisvalaistus}} = 150 \text{ lx} \times 750 \text{ m}^2 = 112500 \text{ lm}$$

Nuorkarjalle valaistusvoimakkuus on oltava 100 lx ja nuorkarjan navettapinta-ala on noin 50 m². Nuorkarjan valaistuksen valovirraksi saadaan 5 000 lm. Lypsyrobotin valaistuksen valaistusvoimakkuus on oltava utarekorkeudelta mitattuna 250 lx. Oletetaan lypsyrobotin valonlähteen olevan kolmen metrin korkeudella olevat kattovalaisimet. Arvioidaan utarekorkeuden olevan noin metrin korkeudella lattiatasosta. Jotta lampuilla saavutetaan metrin korkeudelta lattiatasosta 250 lx:n valaistusvoimakkuus, täytyy valaistusvoimakkuuden olla kahden metrin korkeudella utarekorkeuteen verrattuna nelinkertainen eli 1000 lx. Kun lypsyrobotialueen pinta-alaksi arvioidaan noin 70 m², saadaan tarvittavaksi valovirraksi 70 000 lm.

Lypsykarjanavetoissa on usein myös yövalaistus. Tällöin valaistuksen on tarpeen olla himmeämpää päivävalaistukseen verrattuna. Yövalaistukseksi suositellaan alle 50 lx:n valaistusvoimakkuutta lehmän silmän korkeudelta mitattuna. (10.) Arvioidaan lehmien silmien olevan noin 1,5 m:n korkeudella lattiatasosta, kun lehmä on pystyssä. Jotta 1,5 m:n korkeudella saavutetaan kattovalaisimilla 50 lx, täytyy kahden metrin korkeudella saavuttaa vielä 100 lx. Yövalaistus on käytössä koko navetan alueella, joten valaistavaksi pinta-alaksi arvioidaan noin 870 m². Yövalaistuksen valovirraksi saadaan 87 000 lm.

Myös navetan toimisto- ja valvontatiloja täytyy valaista. Työalueiden valaistusvoimakkuudeksi vaaditaan 300 lx (11, s. 16). Arvioidaan työalueen olevan puolenmetristä metrin korkeudella lattiatasosta ja lamppujen olevan kolmen metrin korkeudella. Kahden metrin korkeudessa valaistusvoimakkuuden on oltava 600 lx. Arvioidaan, että 38 m²:n työalueella saadaan laskettua toimistotilojen valaistuksen koko energiankulutus riittävän tarkasti. Näin valovirraksi saadaan 22 800 lm.

Oletetaan, että navettainvestoinnissa valaistus toteutetaan led-valaisimilla, jotka ovat energiatehokkaita ja pitkäikäisiä. Led-valaisimien valotehokkuus on noin 160 lm/W (12). Valaistuksen sähkötehontarve on laskettu kaavalla 7.

$$P = \frac{\phi}{\text{Valotehokkuus}_{LED}}$$

KAAVA 7

P = sähkötehotarve (W)

ϕ = valovirta (lm)

$Valotehokkuus_{LED}$ = led-valaisinten valotehokkuus (lm/W)

Sijoittamalla kaavaan eläintilan yleisvalaistuksen arvot saadaan sähkötehotarpeeksi

$$P_{yleisvalaistus} = \frac{112500 \text{ lm}}{160 \frac{\text{lm}}{\text{W}}} = 703,125 \text{ W} \approx 703 \text{ W}$$

Lypsyrobottialueen valaistuksen sähkötehotarpeeksi saadaan noin 438 W, nuorkarjan noin 31 W, yövalaistuksen noin 544 W ja toimistotilojen alueen sähkötehotarpeeksi noin 143 W. Valaistuksen päiväaikainen tehotarve on yhteensä 1 315 W

Oletetaan, että navetassa on käytössä pitkäpäivän valaistusohjelma. Tässä valaistusohjelmassa päivävalaistuksen käyttöaika on 16 tuntia ja yövalaistuksen kahdeksan tuntia vuorokaudessa (10). Arvioidaan navetan toimistotilojen valaistuksen käyttöajaksi kuusi tuntia vuorokaudessa. Päivävalaistuksen vuotuiseksi käyttöajaksi valitaan kahdeksan kuukautta. Huhtikuun lopun ja elokuun lopun välisenä aikana vuorokauden valoisa-aika on yli 16 tuntia (13). Oletetaan, ettei tällöin päivävalaistukselle ole tarvetta. Päivävalaistus on käytössä eläintiloissa 3 872 tuntia ja toimistotiloissa 1 452 tuntia vuodessa. Yövalaistus on käytössä samalla ohjelmalla ympäri vuoden. Yövalaistusta käytetään vuodessa 2920 tuntia. Valaistuksen sähköenergiankulutus voidaan laskea kaavalla 8.

$$E_s = \frac{P \times t}{1000}$$

KAAVA 8

E_s = sähköenergiankulutus (kWh)

P = sähkötehotarve (W)

t = käyttöaika (h/vuosi)

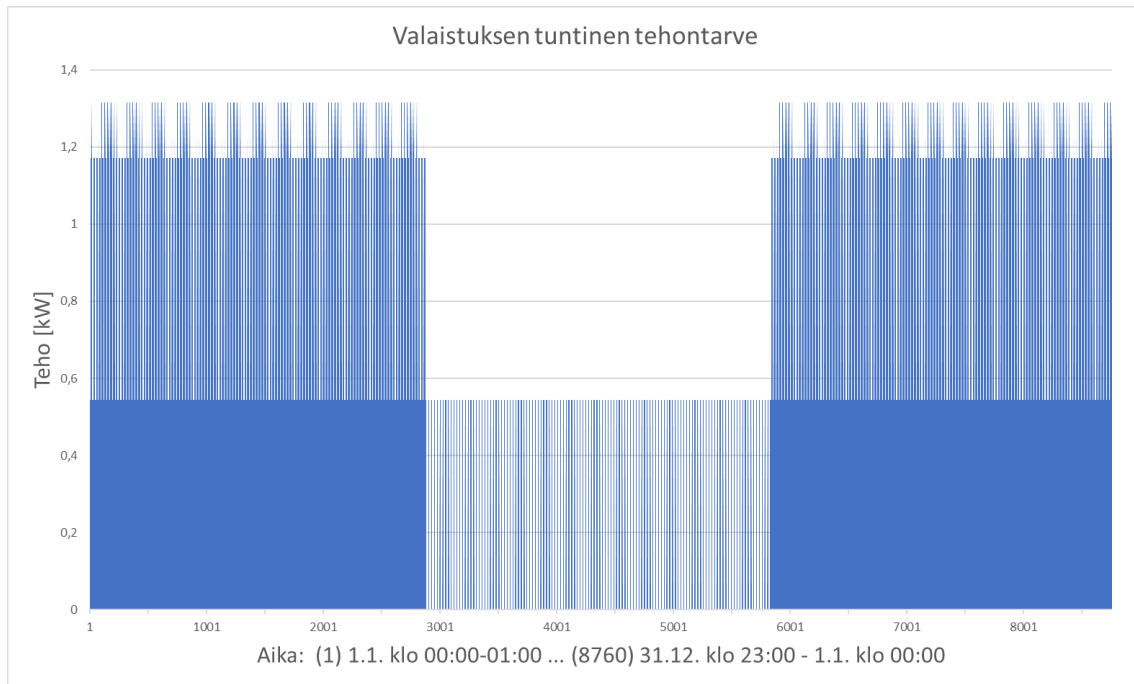
Esimerkiksi sijoittamalla kaavaan eläintilojen yleisvalaistuksen sähkötehtäjä ja käyttöaika saadaan vuotuisesti sähköenergiankulutukseksi

$$E_{s,yleisvalaistus} = \frac{703,125 \text{ W} \times 3872 \frac{\text{h}}{\text{vuosi}}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{kW}}} = 2722,5 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}} \approx 2723 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

Lypsyrobotin alueen valaistuksen vuotuinen energiankulutus on 1 694 kWh, nuorkarjan 1 21 kWh, yövalaistuksen 1 588 kWh ja toimistotilojen alueen 207 kWh. Navetan valaistuksen vuotuinen kokonaissähköenergiantarve saadaan laske-
malla yhteen jokaisen valaistusalueen vuotuiset sähköenergiantarpeet. Navetan valaistuksen kokonaissähköenergiantarve on vuodessa 6 332 kWh.

Valaistuksen energiankulutusprofiili

Navetan eläintilojen päivävalaistus on käytössä syyskuun alusta huhtikuun loppuun klo 6–22. Eläintilojen päivävalaistuksen tuntinen tehontarve on yhteensä 1 172 W. Navetan henkilöstö- ja toimistotilojen valaistuksen vuorokautinen käyttöaika on aamulla klo 6–9, päivällä klo 14–16 ja illalla klo 21–22. Toimistotilojen tuntinen tehontarve on 143 W. Eläintilojen yövalaistuksen käyttöaika on klo 22–6. Yövalaistuksen tuntinen tehontarve on 544 W. Laskemalla eri tilojen tuntiset tehot yhteen saadaan valaistuksen tuntinen tehontarve vuoden jokaiselle tunnille. Valaistuksen tehontarveprofiili on kuvassa 5.



KUVA 5. Valaistuksen tuntinen tehontarveprofiili

2.4 Lypsy

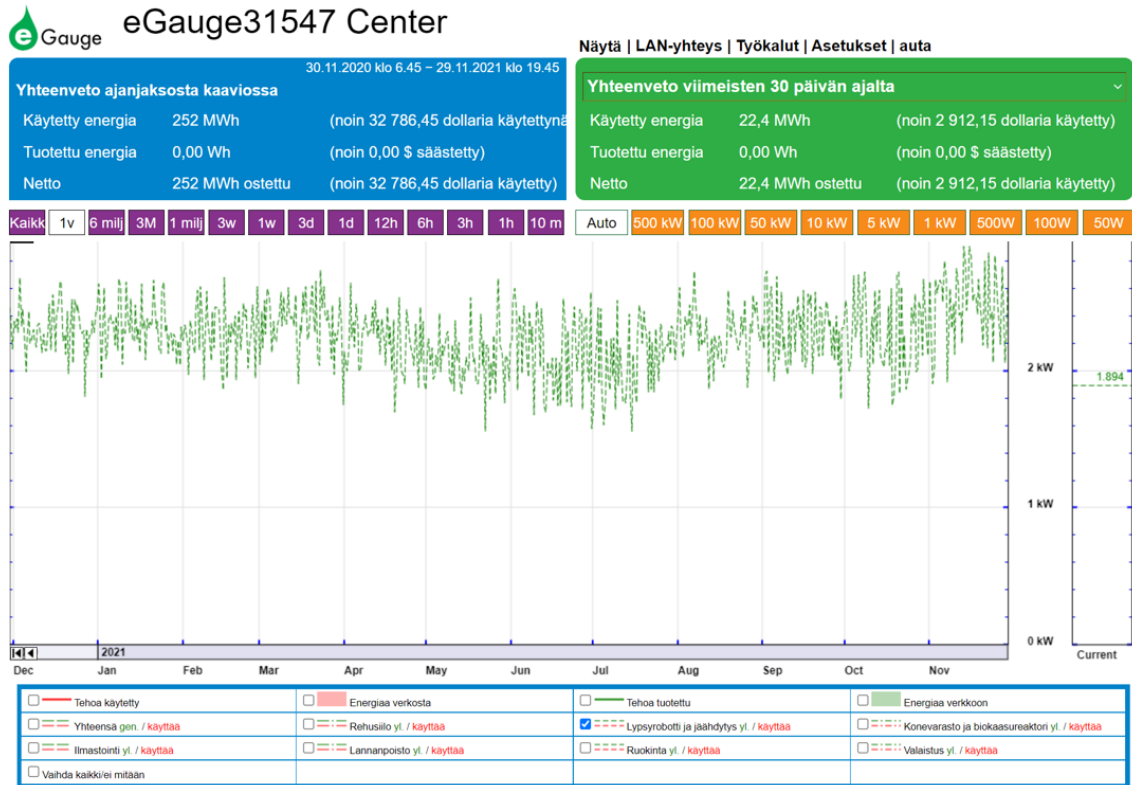
Navetassa on yksi lypsyrobotti. Lypsyrobotin energiankulutukset vaihtelevat 200–500 kWh vuodessa lehmää kohti (14). Navetan lypsyrobotin energiankulutukseksi arvioidaan 350 kWh/lehmä/vuosi. Navetan lehmälukumäärä on 46 (2). Näin lypsyrobotin vuotuinen energiankulutus on 16 100 kWh.

Veden lämmittämiseen kuluu automaattilypsyssä energiaa lehmää kohti 89–184 kWh vuodessa (1, s. 27). Veden lämmityksen energiankulutuksena pidetään 136,5 kWh/lehmä/vuosi. Automaattilypsyn veden lämmityksen vuotuiseksi energiankulutukseksi saadaan yhteensä 6 279 kWh/vuosi.

Automaattilypsyn energiankulutusprofiili

Lypsyn energiankulutusprofiili on laadittu hyödyntämällä Haapajärven ammattiotopiston Erkkilän opetusmaatilän lypsyrobotin energiankulutusmittauksia. Erkkilän opetusmaatilalla on mitattu energiankulutusta kesäkuusta 2017 lähtien, jolloin maatilalle asennettiin energiakulutusta seuraamaan eGauge-mittari (15). Ope-

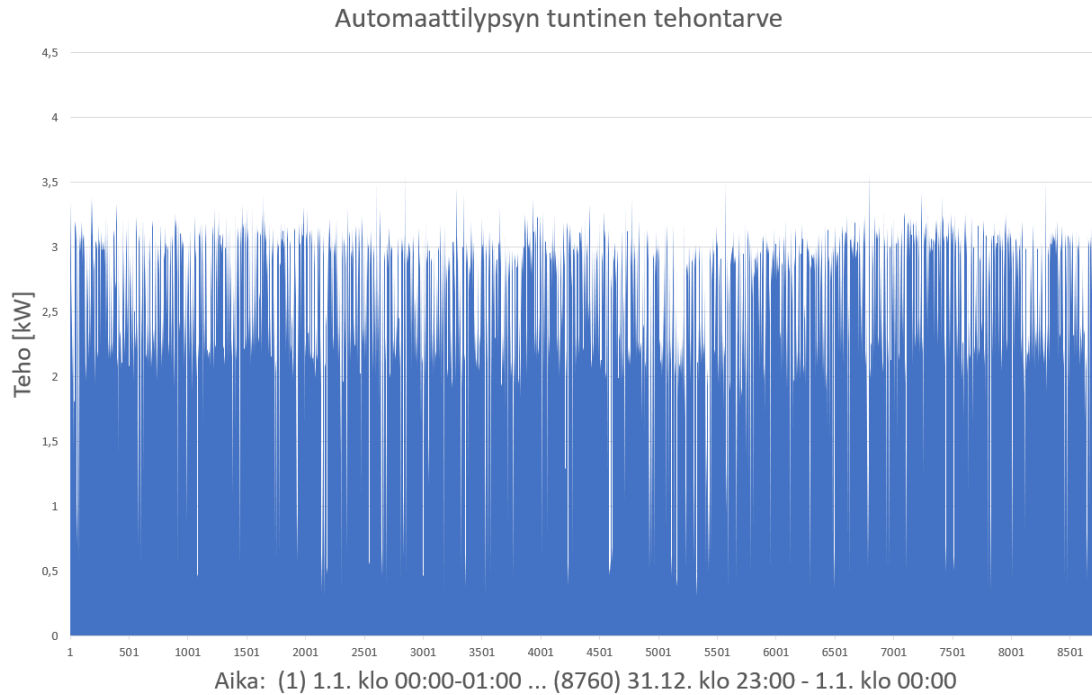
tusmaatilan energiankulutusta voi seurata reaaliaikaisesti eGauge.net-verkkosivuilta. Mittari mittaa muun muassa lypsyrobotin tuntista tehoa ja tuntiset tehot saa ladattua eGauge-ohjelmasta Excel-tiedostomuotoon. Kuvassa 6 on eGauge-näkymä Erkkilän opetusmaatilan lypsyrobotin tehontarpeesta.



KUVA 6. eGauge-näkymä Erkkilän opetusmaatilan lypsyrobotin tehontarpeista vuoden ajalta (16)

Lypsyrobotin tuntiset tehot yhteen laskemalla saadaan lypsyrobotin vuotuinen sähköenergiantarve. Erkkilän opetusmaatilan lypsyrobotin energiankulutus on vuoden pituisen mittausjakson aikana yhteensä 19 832 kWh (15). Jakamalla mittausjakson jokaisen tunnin energiankulutus koko mittausjakson energiankulutuksella saadaan laskettua jokaisen tunnin energiankulutuksen osuus kokonaisenergiankulutuksesta. Hyödynnetään näitä samoja suhdelukuja tässä työssä navetan lypsyrobotin tunnissa kulutetun energian laskemiseen.

Automaattilypsyn vuotuinen kokonaisenergiankulutus on lypsyrobotin ja veden lämmityksen energiankulutuksen summa, joka on 22 379 kWh vuodessa. Kertomalla energiainkokonaiskulutus tunnin energiainkulutuksen osuudella saadaan tuntista tehontarvetta vastaava arvo. Lypsyrobotin tuntinen tehontarveprofiili on kuvassa 7.



KUVA 7. Automaattilypsyn tuntinen tehontarveprofiili

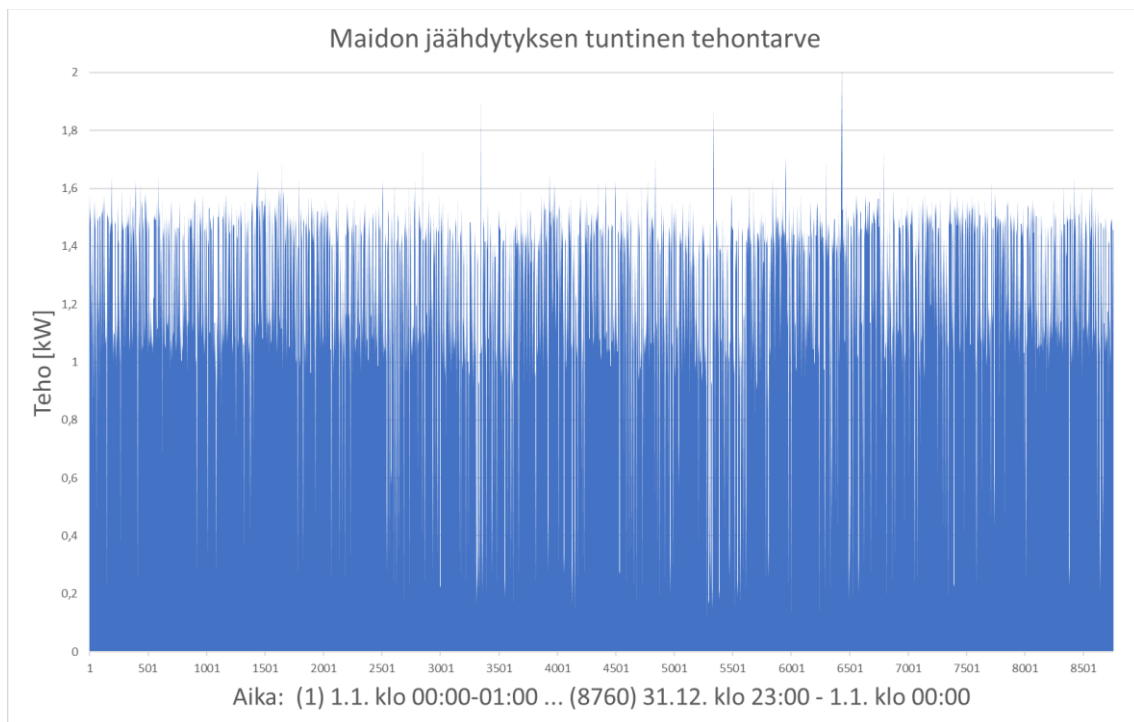
2.5 Maidon jäähdytys

Maidon jäähdytys ilman esijäähdytystä kuluttaa energiaa noin $16,8 \text{ Wh/l}_{\text{maito}}$ (17). Maidon jäähdytyksen energiainkulutusta tutkittaessa selvitetään lehmien vuotuinen maidontuotannon määrä. Yhdestä lehmästä saadaan maitoa 30–60 kg vuorokaudessa (18). Valitaan lehmän vuorokautiseksi maidontuotannoksi 40 kg. Maidon tiheytenä voidaan pitää $1,034 \text{ kg/l}_{\text{maito}}$ (19, esimerkki 2). Kun jaetaan lehmän vuorokautinen maidontuotanto maidon tiheydellä, saadaan lehmän vuorokautiseksi maidontuotantomääräksi noin 38,7 l. Lehmän vuotuinen maidontuotantomäärä on noin 14 120 l. Lehmistä saadaan maitoa yhteensä 649 516 l/v.

Kertomalla lehmistä saatu vuotuinen maitomäärä maitolitrin jäähdytykseen tarvittavalla energialla saadaan maidon jäähdytyksen vuotuiseksi energiankulutukseksi noin 10 912 kWh.

Maidon jäähdytyksen energiankulutusprofiili

Maidon jäähdytystarvetta on silloin kun sitä lypsetään sekä varastoidaan navetan tilatankissa. Maidon jäähdytyksen energiantarpeen tuntisina osuuksina, jäähdytyksen kokonaisenergiantarpeesta, käytetään samoja osuuksia kuin automaattilypsyssä on käytetty. Lasketaan tuntisten osuuksien ja jäähdytyksen kokonaisenergiankulutuksen tulo, jolloin saadaan maidon jäähdytyksen tuntisia tehontarpeita vastaavat arvot jokaiselle vuoden tunnille. Maidon jäähdytyksen tuntiset tehontarpeet on esitetty kuvassa 8.



KUVA 8. Maidon jäähdytyksen tuntinen tehontarveprofiili

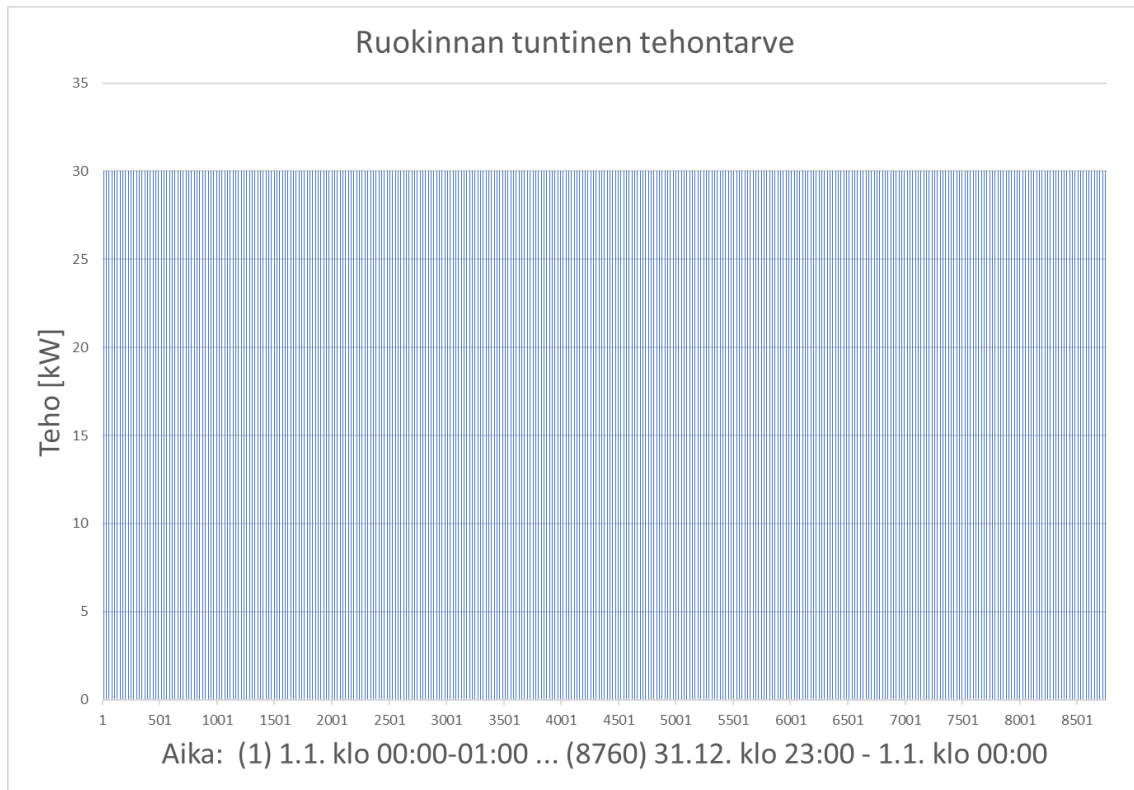
2.6 Ruokinta

Lehmien ravinto perustuu pääasiassa nurmesta tehtyyn säilörehuun (20). Rehu pakataan pelloilla pyöröpaaleihin ja kuljetetaan navetan rehustamoon. Rehustamossa pyöröpaalit avataan paketistaan ja murskataan sopivan kokoisiksi jakeiksi sähkömoottorilla pyörivällä apemyllyllä. (2.) Rehuun voidaan sekoittaa apemyllyssä muun muassa viljaa, kivennäisaineita ja vitamiineja (20). Murskattu rehu-seos eli ape kuljetetaan pienkuormaajalla eläinten ruokintapöydälle, jossa se jaetaan tasaisesti lehmien ravinnoksi (2). Tässä työssä tutkitaan vain navetan energiankulutusta, joten ruokinnan energiankulutuksessa huomioidaan vain apemyllyn sähköenergiankulutus.

Apemyllyn sähkömoottorin tehoksi on valittu 30 kW (21). Apemyllyn käyttöajaksi arvioidaan yksi tunti vuorokaudessa ja sen oletetaan toimivan täydellä teholla aina, kun sitä käytetään. Näin apemylly kuluttaa sähköenergiaa 30 kWh/vrk. Apemyllyn vuotuinen sähköenergiankulutus on 10 950 kWh.

Ruokinnan energiankulutusprofiili

Apemyllyn hetkellinen tehontarve on suuri, joten sen käytöstä aiheutuu selvä sähkönkulutuspiikki. Appeen valmistuksen arvioidaan tapahtuvan jokaisena aamuna klo 7–8. Apemyllyn tuntiset tehontarpeet on esitetty kuvassa 9.



KUVA 9. Ruokinnan tuntinen tehontarveprofiili

2.7 Lannanpoisto

Navetan lantakäytävillä on ritiläpalkit, joiden läpi eläinten lanta putoaa syviin lietekuiluihin. Lietekuiluista lanta valutetaan lietekaivoon. Lantakäytävän ritiläpalkkien päälle jäänyt lanta poistetaan ja palkit pestään säännöllisesti automaattisella robottikaapimella (kuva 10). (2.) Lannanpoistossa kuluu näin sähköenergiaa vain robottikaapimen toimintaan.



KUVA 10. DeLaval robottikaavin RS450S (22)

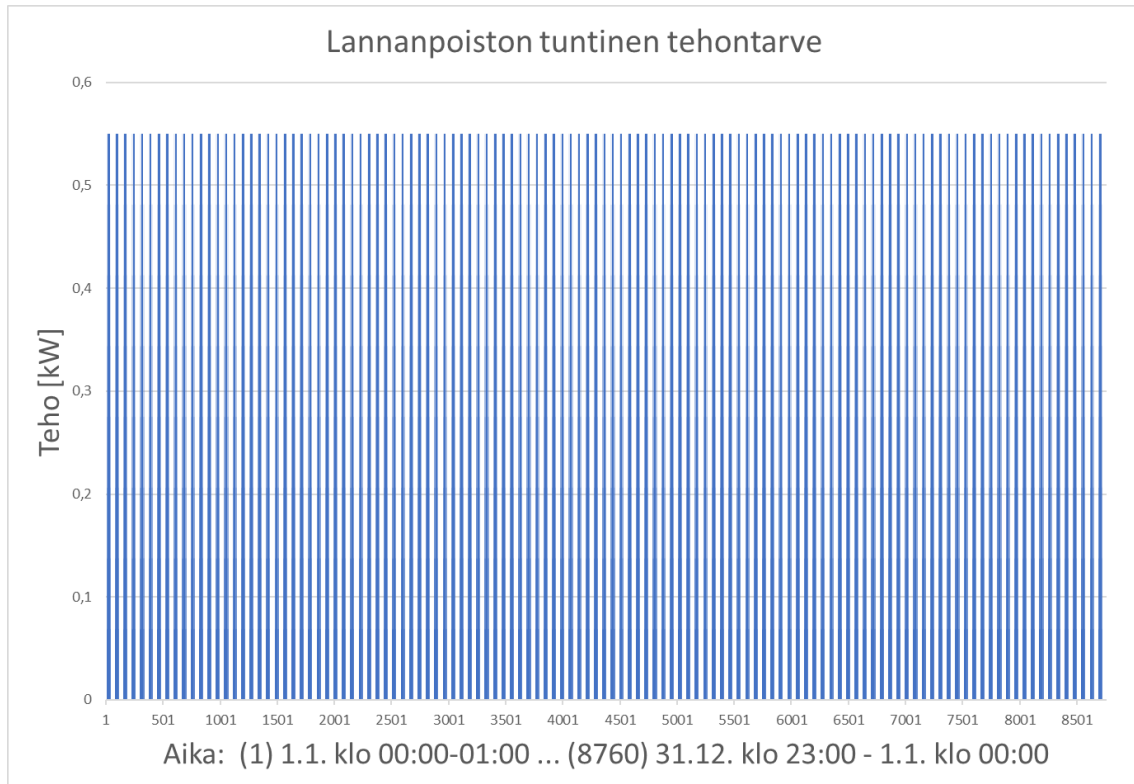
Robottikaapimen energiankulutuksen laskennassa hyödynnetään esimerkkipaavinta, jonka ajomoottorin ja ohjausmoottorin tehot ovat 165 W eli yhteensä 330 W (23). Robottikaavin on liikkeellä yli 60 % vuorokaudesta (22). Robottikaapimen käyttöajaksi valitaan 15 tuntia vuorokaudessa. Robottikaapimen energiankulutus vuorokaudessa voidaan laskea kaavalla 8. Sijoittamalla kaavaan robottikaapimen moottorien yhteisteho ja kaapimen käyttöaika saadaan vuorokauden sähköenergiankulutukseksi noin 5 kWh. Robottikaapimen vuotuinen energiankulutus on 1 807 kWh.

Lannanpoiston energiankulutusprofiili

Robottikaavin on akkukäyttöinen, joten sen energiankulutus tapahtuu latausajana. Aina kun kaavin ei ole liikkeellä, se on kytkettynä laturiin. Robottikaapimen latausajaksi jää vuorokaudesta yhdeksän tuntia. Oletetaan latauksen kestävän yhtä kauan kuin kaavin on kytkettynä laturiin. Jakamalla kaapimen vuorokautinen

energiankulutus sen latausajalla saadaan kaapimen latauksen sähkötehontarve. Robottikaapimen latauksen tuntinen sähkötehontarve on 550 W.

Jaetaan robottikaapimen latausaika kolmeen kertaan vuorokaudessa. Näin kaavin on latauksessa kolme tuntia kerrallaan. Valitaan kaapimen latausajoiksi klo 2–5, 10–13 ja 18–21. Robottikaapimen tuntiset tehontarpeet on esitetty kuvassa 11.

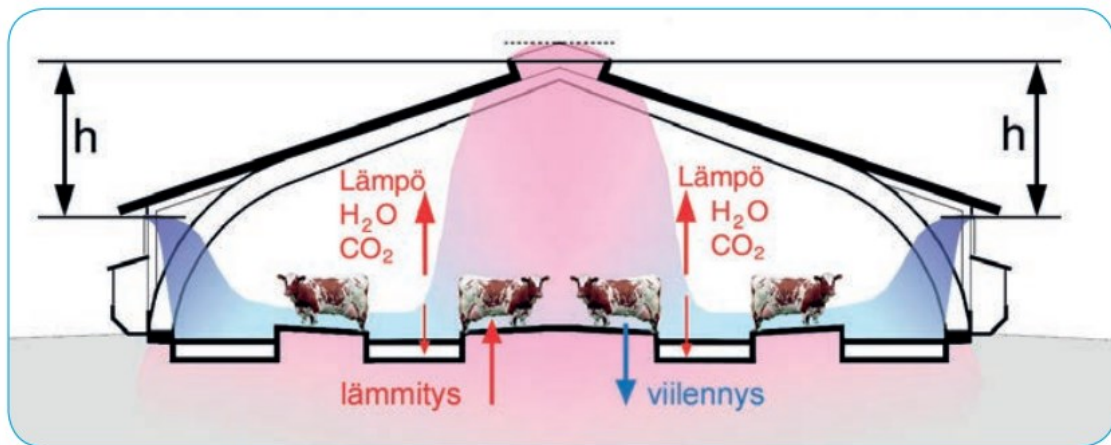


KUVA 11. Lannanpoiston tuntinen tehontarveprofiili

2.8 Ilmanvaihto

Navetan eläintiloissa ilmanvaihto tapahtuu painovoimaisesti. Painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta perustuu navetan sisä- ja ulkoilman väliseen tiheyseroon. Navetan sisällä eläimet lämmittävät ilmaa omalla lämmöntuotannollaan. Eläinten lisäksi myös laitteet ja lattia luovuttavat lämpöä ilmaan. Lämmennyt ilma on kevyempää ja se nousee navetan yläosiin ja poistuu sitten poistoilma-aukkojen kautta ulos. Lämmenneen ilman tilalle virtaa tuloilma-aukoista viileämpää ulkoilmaa, ja näin syntyy hormivaikutus. Hormivaikutuksen voimakkuus riippuu tulo- ja

poistoaukkojen korkeuserosta sekä sisä- ja ulkolämpötilojen erosta. Myös tuulella on vaikutusta ilman vaihtumiseen. Painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaa voidaan säätää ilma-aukkoja avaamalla ja sulkemalla. Lämpimillä keleillä poistoilma-aukot sulkemalla ja tuloaukot avaamalla pyritään saamaan aikaan läpiveto, joka jäähdyttää navettaa. Kesäjähdytystä ja ilman liikkuvuutta parantamaan voidaan painovoimaisen ilmanvaihdon rinnalla joutua käyttämään ilman vaakapuhaltimia tai helikopterisekoitinta (24, s. 4–5). Automaattisesti toimivan painovoimaisen ilmanvaihdon periaate on esitetty kuvassa 12.



KUVA 12. Painovoimainen ilmanvaihto (24, s. 5)

Painovoimaisen ilmanvaihdon laitteet eivät kuluta juuri lainkaan sähköenergiaa, joten niitä ei huomioida laskuissa (24, s. 7). Ilmanvaihdon energiankulutuksen tarkastelun kohteena on navetan henkilöstötilat ja rehustamo, joissa on koneellinen ilmanvaihto. Ilmanvaihdon sähköenergiankulutukseen vaikuttaa muun muassa ilmanvaihtojärjestelmän valinta, paine-ero, ilman virtausmäärä, laitteiden hyötysuhteet ja käyttöajat. Ilmanvaihtopuhaltimen paineen korotus on 30 Pa ja puhaltimen kokonaishyötysuhde 40 %. (1, s. 25.) Ilman tilavuusvirta on 20 dm³/s/m² (25). Ilmanvaihtokoneen käyttöaika on 8 760 h/v. Puhaltimen sähköenergiankulutus voidaan laskea kaavalla 9 (3, s. 58).

$$W_{\text{puhallin}} = \frac{\Delta p_{\text{puhallin}} \times q_v}{\eta_{\text{puhallin, kok}} \times 1000} \times \Delta t$$

KAAVA 9

W_{puhallin} = puhaltimen sähköenergian kulutus (kWh/vuosi)

$\Delta p_{\text{puhallin}}$ = puhaltimen paineen korotus (Pa)

q_v = puhaltimen ilmavirta (m^3/s)

$\eta_{\text{puhallin,kok}}$ = puhaltimen kokonaishyötysuhde (-)

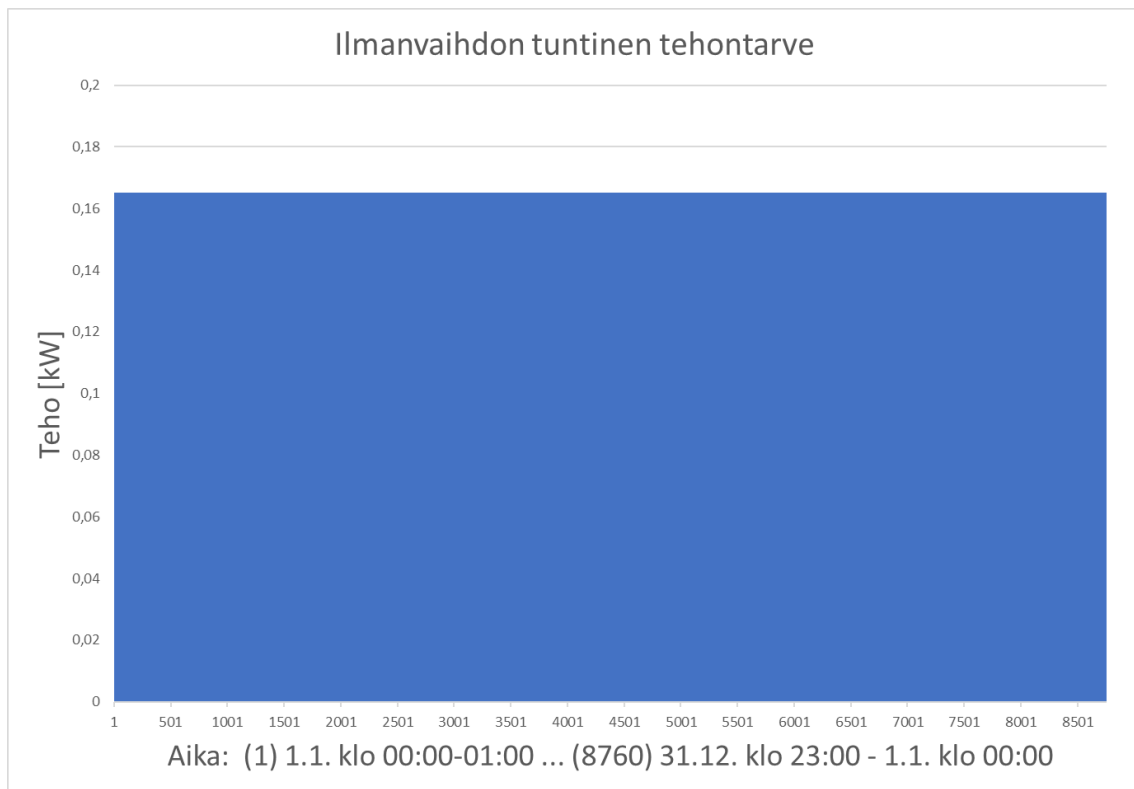
Δt = käyttöaika (h/vuosi)

Navetan toimistotilojen ja maitohuoneen pinta-ala on 58 m^2 ja rehustamon 52 m^2 (2). Sijoittamalla kaavaan lähtöarvot saadaan ilmanvaihtopuhaltimen sähköenergiankulutukseksi

$$W_{\text{puhallin}} = \frac{30 \text{ Pa} \times [(58 + 52) \text{ m}^2 \times 0,02 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}]}{0,4 \times 1000} \times 8760 \frac{\text{h}}{\text{vuosi}} = 1445,4 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$
$$\approx 1445 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

Ilmanvaihdon energiankulutusprofiili

Ilmanvaihto on käynnissä koko ajan. Jakamalla ilmanvaihdon vuotuinen sähköenergiankulutus sen käyttöajalla saadaan ilmanvaihdon tuntiseksi tehontarpeeksi 165 W . Ilmanvaihtokoneen tuntiset tehontarpeet on esitetty kuvassa 13.



KUVA 13. Ilmanvaihdon tuntinen tehontarveprofiili

2.9 Veden pumppaus

Navetassa kuluu vettä muun muassa eläinten juomana, lämpimänä käyttövetenä ja lypsyrobotin toiminnoissa (1, s. 25). Eniten vettä kuluu juomavetenä, koska lehmä voi juoda jopa 150 litraa vettä päivässä (18). Vettä kuluu paljon ja veden pumppaus kuluttaa sähköenergiaa. Vedenkulutus lasketaan eläinten juomaveden, lypsyn vedenkulutuksen sekä lämpimän käyttöveden tarpeen perusteella.

Pidetään juomaveden päivittäisenä kulutuksena 141 litraa eläintä kohti. Eläimiä on navetassa keskimäärin 64 kappaletta. Vuorokaudessa vettä kuluu eläinten juomavedeksi 9 024 litraa ja vuodessa lähes 3 294 m³. Lypsyrobotin päivittäisenä vedenkulutuksena pidetään 12,5 l/lehmä (1, s. 26). Kun lehmiä on 46 kappaletta, lypsyrobotti kuluttaa päivässä vettä 575 l ja vuodessa noin 210 m³. LKV:n vedenkulutus on 300 m³/v. Navetan vuotuinen vedenkulutus on yhteensä 3 804 m³.

Veden pumppauksen tehontarvetta laskettaessa tulee tietää veden tilavuusvirta, paine-ero sekä pumpun kokonaishyötysuhde (1, s. 26). Oletetaan laskennan yksinkertaistamiseksi, että pumppaus on jatkuvaa ja tasaista ympäri vuoden. Pumpun käyttöaika on 8 760 tuntia vuodessa. Veden tilavuusvirtaus voidaan laskea kaavalla 10.

$$q_{v,vesi} = \frac{V_{vesi}}{t} \quad \text{KAAVA 10}$$

$q_{v,vesi}$ = veden tilavuusvirta (m³/s)

V_{vesi} = veden tilavuus (m³)

t = aika (s)

Sijoittamalla kaavaan lähtöarvot saadaan veden tilavuusvirraksi

$$q_{v,vesi} = \frac{3803,635 \text{ m}^3}{(8760 \times 3600) \text{ s}} = 12,061 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \approx 12 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Kokonaispaine-ero koostuu veden korkeusaseman muutoksen aiheuttamasta paine-erosta, putkiston virtausvastuksista ja mahdollisesta vastapaineesta. Vastapaineena pidetään 300 kPa:a. Pumppauksen nostokorkeudeksi, jolla voitetaan veden korkeusaseman muutoksen aiheuttama paine-ero ja putkiston virtausvastukset, valitaan 32,5 m. (1, s. 26.) Lasketaan pumppauksen nostokorkeudesta aiheutuva paine hydrostaattisen paineen kaavalla 11 (1, s. 10).

$$p_{hydr.} = \rho gh \quad \text{KAAVA 11}$$

ρ = veden tiheys (kg/m³)

g = painovoimakiihtyvyys (m/s²)

h = pumppauksen nostokorkeus (m)

Veden tiheys on 1000 kg/m³ ja painovoimakiihtyvyys 9,81 m/s². Sijoittamalla arvot kaavaan saadaan nostokorkeudesta aiheutuvaksi paineeksi

$$p_{hydr.} = 1000 \frac{kg}{m^3} \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 32,5 m = 318825 Pa$$

Pumppauksen paine-ero on nostokorkeudesta aiheutuvan paineen ja vastapaineen summa eli 618 825 Pa. Pumpun kokonaishyötysuhteena pidetään 50 %:a. Veden pumppauksen tehontarve voidaan laskea kaavalla 12. (1, s. 10.)

$$P_{vesi} = \frac{q_{v,vesi} \times \Delta p_{tot}}{\eta_{p,tot}} \quad \text{KAAVA 12}$$

P_{vesi} = veden pumppauksen tehontarve (W)

$q_{v,vesi}$ = veden tilavuusvirta (m³/s)

Δp_{tot} = paine-ero (Pa)

$\eta_{p,tot}$ = pumpun kokonaishyötysuhde

Sijoittamalla kaavaan arvot saadaan veden pumppauksen tehontarpeeksi

$$P_{vesi} = \frac{12,061 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \times 618825 Pa}{0,5} = 149,276 W \approx 149 W$$

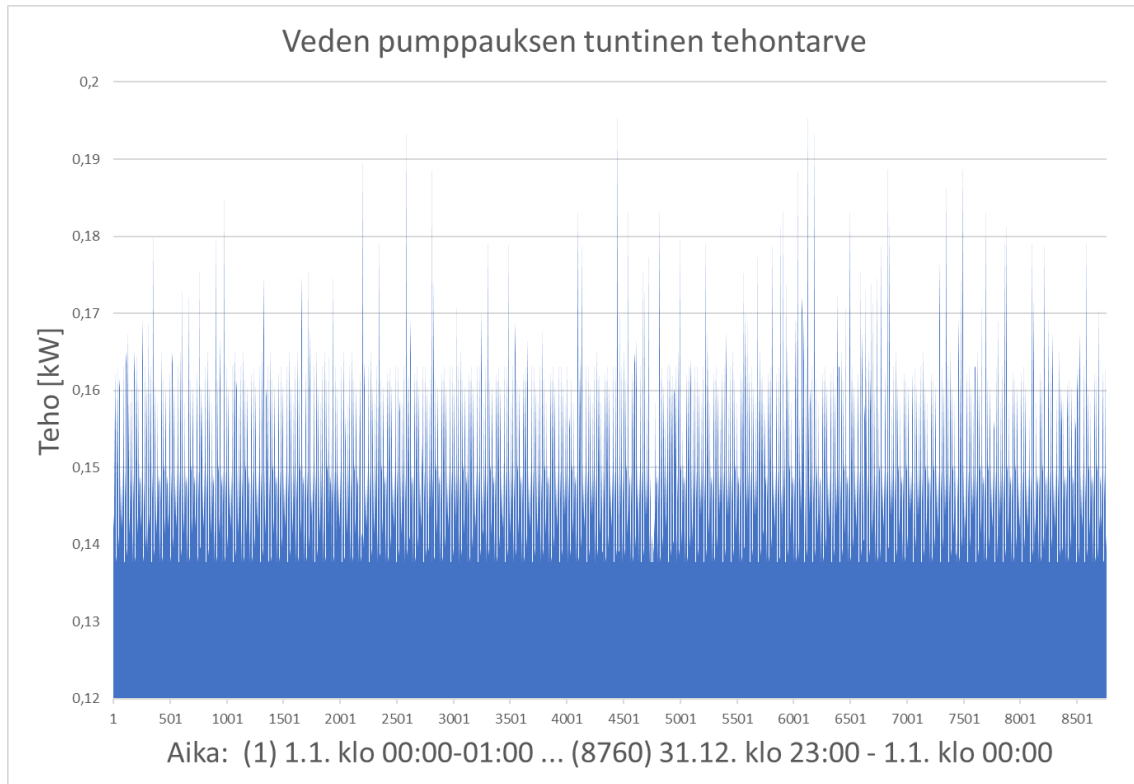
Veden pumppauksen vuotuinen energiankulutus voidaan laskea kaavalla 8. Sijoittamalla kaavaan arvot saadaan pumppauksen energiankulutukseksi

$$E_s = \frac{149,276 W \times 8760 h}{1000 \frac{W}{kW}} = 1307,658 kWh \approx 1308 kWh$$

Veden pumppauksen energiankulutusprofiili

Eritellään juomaveden ja LKV:n pumppauksen energiankulutukset niiden tilavuusosuuksien mukaan. Juomaveden pumppauksen energiankulutukseen sisältyy lypsyrobotin kuluttaman veden pumppauksen energiankulutus. Juomaveden pumppauksen vuotuinen energiantarve on noin 1 205 kWh ja tuntinen tehontarve oletetaan vakioksi. Juomaveden pumppauksen tuntinen tehontarve on 138 W. Lämpimän käyttöveden pumppauksen vuotuinen energiankulutus on noin 103

kWh. LKV:n pumppauksen tuntisten tehontarpeiden osuudet ovat samat kuin LKV:n tuntisten lämpötehojen osuudet. Veden pumppauksen tuntiset tehontarpeet on esitetty kuvassa 14.



KUVA 14. Veden pumppauksen tuntinen tehontarveprofiili

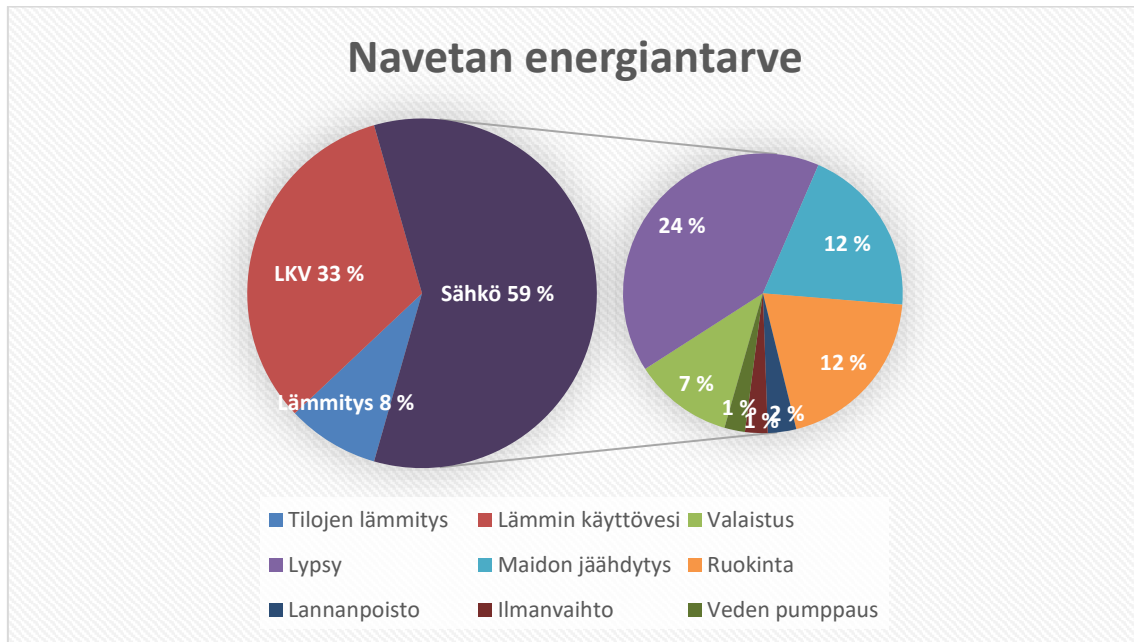
2.10 Navetan kokonaisenergiantarve

Navetan lämpöenergian kokonaistarve on lämpimän käyttöveden ja tilojen lämmityksen energiantarpeiden summa. Lämpöenergian kokonaistarve on yhteensä noin 38,5 MWh/v. Navetan sähköenergian kokonaistarve on vastaavasti sähköenergian kulutuskohteiden energiantarpeiden summa. Sähköenergian kokonaistarve on yhteensä noin 55,1 MWh/v. Navetan kokonaisenergiantarve on noin 93,7 MWh/v. Navetan energiantarpeen yhteenveto on taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Navetan vuotuinen energiantarve

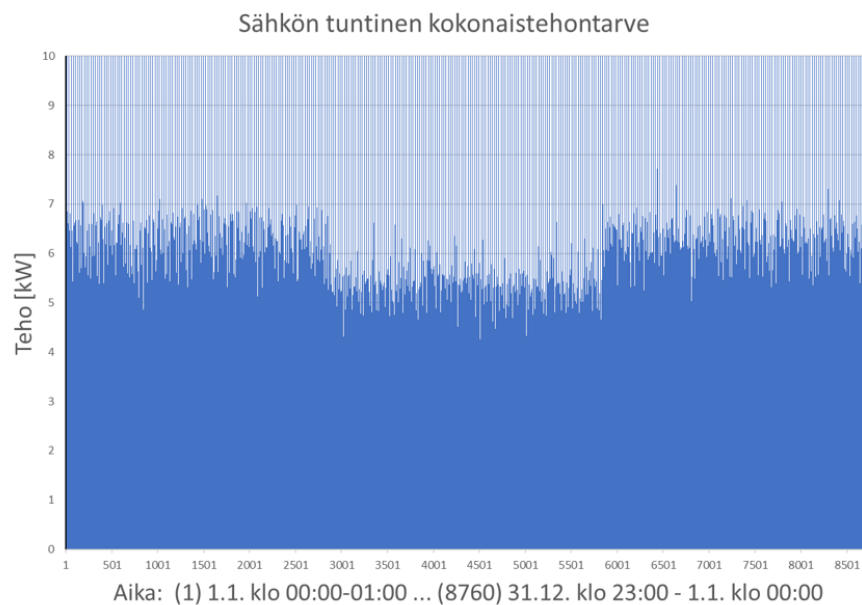
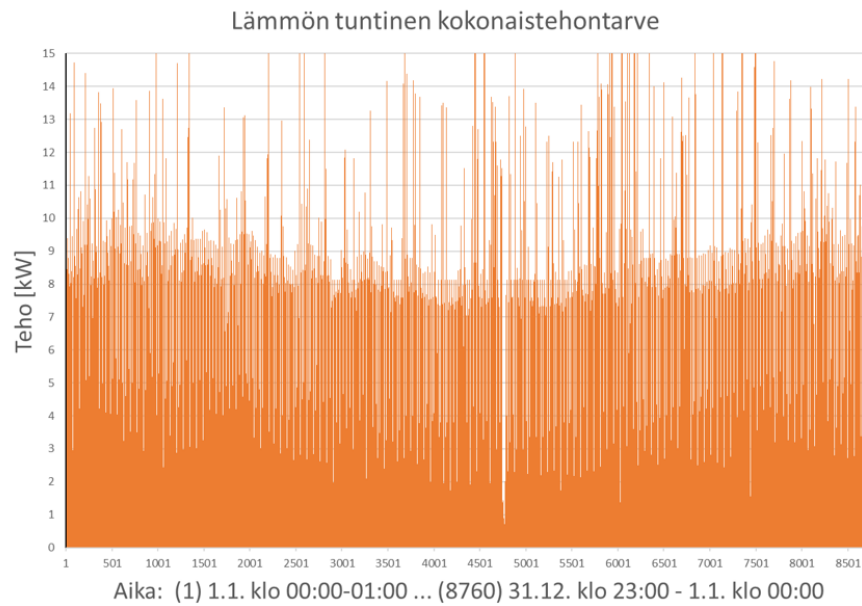
Navetan vuotuinen energiantarve (kWh)	
Lämpöenergia yhteensä	38542
Tilojen lämmitys	8000
Lämmin käyttövesi	30542
Sähköenergia yhteensä	55133
Valaistus	6332
Lypsy	22379
Maidon jäähdytys	10912
Ruokinta	10950
Lannanpoisto	1807
Ilmanvaihto	1445
Veden pumppaus	1308
Lämpö- ja sähköenergia yhteensä	93675

Lämpöenergian osuus navetan kokonaisenergiatarpeesta on noin 41 % ja sähkön 59 %. Suurin yksittäinen energiankuluttaja on lämmin käyttövesi. Toiseksi suurin energiankulutus on lypsällä ja sen jälkeen tulevat maidon jäähdytys ja eläinten ruokinta. Navetan eri toimintojen energiantarpeiden osuudet ovat kuvassa 15.



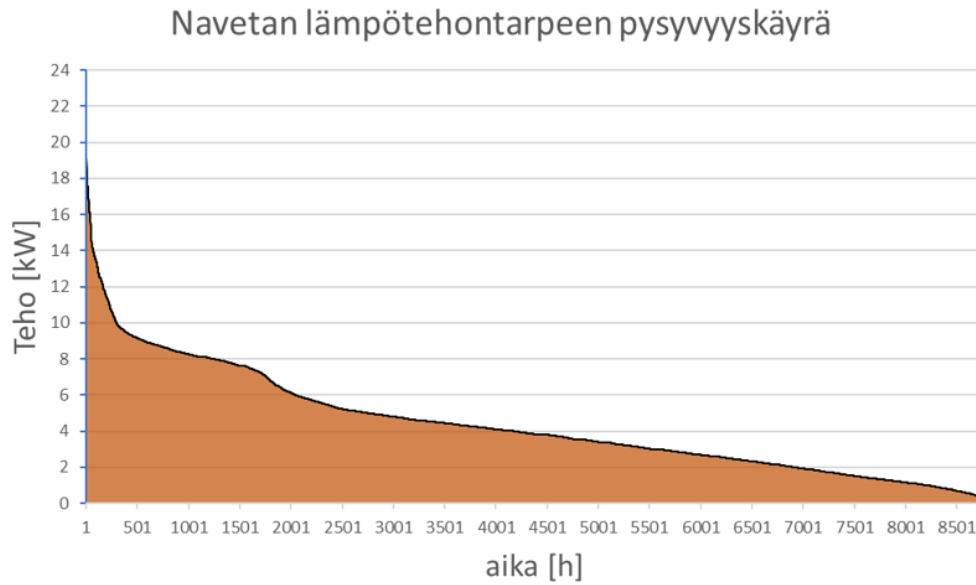
KUVA 15. Navetan eri toimintojen energiantarpeiden osuudet kokonaisenergiantarpeesta

Lämpimän käyttöveden ja tilojen lämmityksen tuntiset tehot yhteen laskemalla saadaan lämmön tuntiset kokonaistehontarpeet. Vastaavasti laskemalla navetan eri toimintojen tuntiset sähkötehot yhteen, saadaan sähkön tuntiset kokonaistehontarpeet. Lämmön ja sähkön tuntiset tehontarveprofiilit ovat kuvassa 16.



KUVA 16. Lämmön ja sähkön tuntiset kokonaistehontarpeet

Navetan lämmön ja sähkön tuntisista tehokuormituksista on tehty vuoden pysyvyyskäyrät. Ne kertovat ajan, kuinka monta tuntia vuodessa tietty teho on ylitetty. Pysyvyyskäyrät on tehty laittamalla vuoden tuntiset tehot järjestykseen suurimmasta pienimpään. Pysyvyyskäyrät ovat kuvassa 17.



KUVA 17. Navetan vuotuisten lämpö- ja sähkötehojen pysyvyyskäyrät.

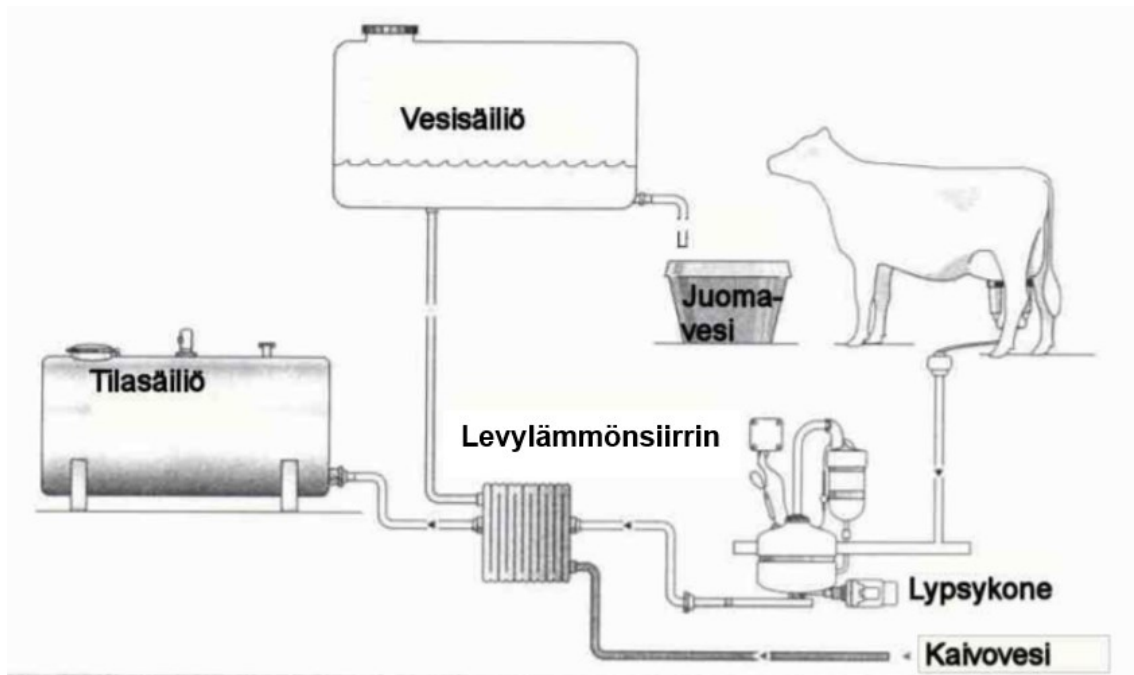
Kuvasta voidaan muun muassa nähdä, että vuotuinen sähkötehontarve on noin 90 % vuodesta korkeintaan 6,5 kW. Korkeimman 6,5 kW:n tehon ylittävän kymmenyksen aikana energiantarve on 29 % kokonaisenergiantarpeesta.

3 LÄMMÖNTALTEENOTTO JA MAIDON ESIJÄÄHDYTYKSEN

Navetan energiaomavaraisuus tarkoittaa tilannetta, jossa navetta tuottaa yhtä paljon energiaa kuin sitä kuluu navetan toimintoihin (26). Tässä osassa selvitetään energiaomavaraisuuden kehitysmahdollisuuksia navetan laajennuksen yhteydessä. Omavaraisuusratkaisuista tutkitaan maidon ja lietelannan sisältämän lämpöenergian talteen ottamista ja hyödyntämistä navetan lämpöenergiatarpeen kattamiseen. Maidon esijäähdytyksen ja lämmöntalteenoton (LTO) ratkaisuja pohditaan myös taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta.

3.1 Maidon esijäähdytys

Maidon tuotannon energiatehokkuutta voidaan parantaa maidon esijäähdytyksellä. Lypsyssä maito kerätään yhteen ja pumpataan maitopumpulla tilatankkiin jäähdytettäväksi ja varastoitavaksi. Maito voidaan esijäähdyttää lisäämällä maitopumpun ja tilatankin väliin lämmönsiirrin. Siinä maitoa jäähdyttävänä aineena, toimii kylmä kaivovesi. Lämmönsiirtimessä eli esijäähdyttimessä maidon luovuttama lämpö siirtyy kaivoveteen. Maitoa voidaan jäähdyttää lämmönsiirtimessä ennen tilatankkiin menoa noin 15–20 °C. (17.) Lämmönsiirtimen koko mitoitetaan maidon virtauksen mukaan. Tavoitteena mitoituksessa on, että lämmönsiirtimen läpi virtaavan veden määrä on noin kaksinkertainen suhteessa maidon virtaukseen, jolloin maito jäähtyy lähelle veden lämpötilaa. (27.) Maidon virtaus tulisi pystyä säätämään mahdollisimman hitaaksi, jotta maidon lämpö ehtisi siirtyä veteen. Se voidaan toteuttaa säätäväkierroksisella maitopumpulla. (17.) Kuvassa 18 on esimerkki maidon esijäähdytyksen toteutuksesta.



KUVA 18. Maidon esijäähdytysjärjestelmä (28, s. 20)

Maidon esijäähdytyksessä lämmennyttä vettä syntyy paljon. Lämmenneelle vedelle tulisi löytää käyttökohde, jotta sekin saataisiin hyödynnettyä. Lämmitetty kaivovesi voidaan hyödyntää esimerkiksi eläinten juomavetenä, mikä onkin esijäähdytyksessä lämmenneen veden yleisin käyttökohde navetoissa. Eläinten juomavettä ei ole välttämätöntä lämmittää, mutta on tutkittu, että kaivokylmän juomaveden lämmitys noin 10–17 °C:seen lisää lehmien juontihalukkuutta. (29, s. 6.) Juomaveden lämmitys voi parantaa lehmien maidon tuottoa ja näin lisätä myös maatalousyrittäjän tuloja (27). Esijäähdytyksessä lämmitettyä vettä on myös mahdollista hyödyntää lämpimän käyttöveden lämmityksessä. Lämmennyt vesi ei ole riittävän lämmintä sellaisenaan. Se on kuitenkin esilämmitettyä, joten varsinaiseen LKV:n lämmitykseen käyttökuumaksi kuluu näin vähemmän energiaa. Esijäähdytyslämmönsiirtimen jälkeen vesi ohjataan veden varastosäiliöön. Tämän jälkeen vesi voidaan pumpata esimerkiksi eläinten juoma-altaisiin tai lämminvesivaraajaan. (27.)

Maidossa on vielä esijäähdytyksen jälkeen liikaa lämpöä, joten maitoa täytyy jäähdyttää lopulliseen varastointilämpötilaan tilatankin kylmäkoneella. Kylmäkone toimii samalla periaatteella kuin lämpöpumput, mutta tavoitteena on tässä

tapauksessa poistaa lämpöä eli jäädyttää maitoa ja säilyttää sitä riittävän kylmänä. Kylmäkoneen toiminta kuluttaa sähköenergiaa, mutta maidon esijäähdetyksen ansiosta kylmäkoneen jäähdystarve pienenee ja energiankulutus siten myös vähenee. (29, s.1–5.)

Tutkittaessa maidon esijäähdetyksen hyötyjä tarkastellaan ensin lehmien maidontuotantoa. Aiemmin maidon jäähdetyksen energiankulutusta arvioitaessa on laskettu maidon vuosituotanto, joka on noin 650 m³. Lehmän normaali ruumiinlämpö on noin 39 °C (30), joka on myös maidon alkulämpötila. Maidon lämpötila laskee ennen esijäähdytintä noin 5 °C lämpöhäviöiden takia, joten maidon tulo-lämpötila esijäähdyttimeen on 34 °C (27). Maidon lämpötila esijäähdetyksen jälkeen, ennen tilatankkiin menoa, on 17 °C. Maidon lämpötilan muutos esijäähdyt-timessä on näin 17 °C. (17.) Tilatankissa maito jäähdytetään 4 °C:seen ja se pi-detään siinä lämpötilassa maidon noutoon asti (29, s. 2).

Maidosta veteen siirtyvä energiamäärä saadaan laskettua, kun tiedetään esijäähd-tyttimen läpi kulkevan maidon määrä, tiheys, ominaislämpökapasiteetti ja mai-don lämpötilan muutos esijäähdyttimessä. Maidon määrä ja lämpötilan muutos on selvitetty aiemmin. Maidon ominaislämpökapasiteettina voidaan pitää 4,1 kJ/kg°C (31, tehtävä 7.4) ja tiheytenä 1 034 kg/m³. Maidon esijäähdetyksessä veteen siirtyvä energia saadaan laskettua kaavalla 1. Sijoittamalla maidon arvot kaavaan 1 saadaan maidosta veteen siirtyväksi energiaksi

$$Q_{\text{maidon EJ}} = \frac{1034 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times 649,516 \frac{\text{m}^3}{\text{vuosi}} \times 17^\circ\text{C}}{3600} = 13002,922 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

$$\approx 13003 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

Maidon esijäähdyttimen läpi kulkee vettä kaksinkertainen määrä suhteessa mai-toon. Näin esijäähdyttimen läpi kulkevan veden määrä on noin 1300 m³/v. Veden tiheys on 1000 kg/m³ ja ominaislämpökapasiteetti 4,2 kJ/kg°C normaaliolosuh-teissa. Kun tiedetään lisäksi maidosta veteen siirtyvän energian määrä, voidaan kaavaa 1 soveltaen laskea veden lämpötilan muutos esijäähdyttimessä. Sijoitta-malla veden arvot kaavaan saadaan lämpötilan muutokseksi

$$\Delta T_{\text{vesi EJ}} = \frac{13002,922 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}} \times 3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1299,033 \frac{\text{m}^3}{\text{vuosi}} \times 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}}} = 8,580^\circ\text{C} \approx 8,6^\circ\text{C}$$

Esijähdyttimelle tulevan veden lämpötila on 5 °C ja se lämpenee 8,6 °C. Esijähdyttimestä poistuvan veden lämpötila on siis 13,6 °C.

Jäähdytettäessä maidon lämpötila on laskettava 34 °C:sta 4 °C:seen, joten lämpötilan muutos on 30 °C. Maidosta jäähdytyksellä poistettava kokonaisenergia voidaan laskea kaavalla 1. Sijoittamalla kaavaan maidon lähtöarvot saadaan tulokseksi

$$Q_{\text{jäähdytys,kok.}} = \frac{1034 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times 649,516 \frac{\text{m}^3}{\text{vuosi}} \times 30^\circ\text{C}}{3600 \frac{\text{kJ}}{\text{kWh}}} = 22946,333 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

$$\approx 22946 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

Kun tiedetään maidon jäähdytettävä kokonaisenergiasisältö ja esijähdytyksessä maidosta poistuva lämpöenergia, saadaan näiden erotuksesta maitoon esijähdytyksen jälkeen jäävä lämpömäärä. Maidosta täytyy siis vielä poistaa vuodessa noin 9 943 kWh lämpöenergiaa. Maidon loppujäähdytys tapahtuu tilatankin kylmäkoneella.

Maidon jäähdytys kuluttaa noin 10 912 kWh sähköenergiaa vuodessa. Kun tiedetään lisäksi, kuinka paljon energiaa maidosta on poistettava, voidaan laskea tilatankin kylmäkoneen kylmäkerroin kaavalla 13.

$$COP_{C, KK} = \frac{Q_{\text{jäähdytys,kok.}}}{E_{kk, \text{maidon jäähdytys}}}$$

KAAVA 13

$COP_{C, KK}$ = tilatankin kylmäkoneen kylmäkerroin eli jäähdytyksen hyötysuhde (-)

$Q_{\text{jäähdytys,kok.}}$ = maidosta jäähdytyksellä poistettava kokonaisenergia (kWh/vuosi)

$E_{kk, \text{maidon jäähdytys}}$ = tilatankin kylmäkoneen sähköenergiankulutus (kWh/vuosi)

Sijoittamalla kaavaan jäähdytyksen energiankulutus ja maidosta poistettava energia saadaan kylmäkoneen kylmäkertoimeksi

$$COP_{C, KK} = \frac{22946,333 \frac{kWh}{vuosi}}{10911,876 \frac{kWh}{vuosi}} = 2,103 \approx 2,1$$

Kun tiedetään maidosta esijäähdytyksen jälkeen poistettavan energian määrä sekä tilatankin kylmäkoneen kylmäkerroin, voidaan kaavaa 13 soveltamalla laskea, kuinka paljon sähköenergiaa kylmäkone kuluttaa esijäähdytetyn maidon jäähdyttämiseen varastointilämpötilaan. Sijoittamalla arvot kaavaan 13 saadaan lopputulokseksi

$$E_{kk, jälkijäähdytys} = \frac{9943,411 \frac{kWh}{vuosi}}{2,103} = 4728,480 \frac{kWh}{vuosi} \approx 4728 \frac{kWh}{vuosi}$$

Maidon esijäähdytyksellä jäähdytyksen energiankulutusta lisää maitoa jäähdyttävän veden pumppauksen sähköenergiankulutus. Oletetaan laskennan yksinkertaistamiseksi, että veden pumppaus on tasaista ja jatkuvaa ympäri vuoden. Veden tilavuusvirta voidaan laskea kaavalla 10. Esijäähdyttimen läpi pumpattavan veden tilavuusvirraksi saadaan

$$q_{v, vesij E J} = \frac{1299,033 \frac{m^3}{vuosi}}{8760 \frac{h}{vuosi} * 3600 \frac{s}{h}} = 4,12 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Vesipumpun tuottamana paine-erona voidaan pitää 619 kPa:a. Vesipumpun hyötysuhteena voidaan pitää 50 %:a. Kun tiedetään pumpulta vaadittu paine-ero, veden tilavuusvirtaus ja käyttöaika, voidaan pumppauksen sähköenergiankulutus laskea kaavoja 8 ja 12 soveltaen. Sijoittamalla arvot kaavaan saadaan pumppauksen sähköenergiatarpeeksi

$$E_{\text{vesipumppu}} = \frac{618825 \text{ Pa} \times 4,12 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \times 8760 \frac{\text{h}}{\text{vuosi}}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{kW}} \times 0,5} = 446,597 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

$$\approx 447 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

Maidon jäädytyksen sähköenergian vuotuinen kulutus esijäädytyksellä on tilatankin kylmäkoneen ja veden pumppauksen summa, joka on yhteensä 5 175 kWh/v. Maidon esijäädytyksellä saadaan siis vähennettyä navetan sähköenergiankulutusta 5 737 kWh eli 52,6 % vuodessa.

Maidon esijäädytyslämmönsiirrin täytyy pestä säännöllisesti lämpimällä vedellä, joten maidon esijäädytys lisää veden lämmityksen energiantarvetta. LKV:n energiantarve kasvaa maidon esijäädytyksen takia noin 1 000 kWh:lla vuodessa (29, s. 6.) Maidon esijäädytyksen nettoenergiansäästöksi saadaan näin 4 737 kWh, joka on 43,4 % maidon jäädytyksen energiankulutuksesta ilman esijäädytystä. Tämän lisäksi saadaan lämmitettyä lehmien juomavettä, mikä voi parantaa maidontuotosta. Juomaveden lämmitys pitää myös juomavesilinjat lämpiminä. Se vähentää kondenssiveden muodostumista metallisten vesiputkien pinnoille, jolloin putket pysyvät kuivempina ja korroosion riski vähenee. Lisäksi maidon esijäädytyksellä saadaan pidettyä maito huone viileämpänä, koska tilatankin kylmäkoneen maito huoneeseen lauhduttama lämpö vähenee. (27.)

Maidon esijäädytysjärjestelmän kannattavuutta tutkitaan takaisinmaksuajan menetelmällä. Esijäädytysjärjestelmän investointi- ja käyttökustannuksia sekä syntyviä säästöjä verrataan suoran verkkosähköenergian kustannuksiin. Maidon esijäädytysjärjestelmän verottomana hintana pidetään 4 500 €. Järjestelmän hintaan sisältyy lämmönsiirrin, veden varastosäiliö, vesipumppu ja paineastia. (32.) Esijäädytysjärjestelmän asennuksen hinnaksi arvioidaan 750 € ja vuotuisiksi huoltokustannuksiksi 4 % järjestelmän hankintahinnasta (33, s. 62). Huoltokustannukset ovat siten 180 €/v. Investoinnin käyttöikäksi arvioidaan 17 vuotta, joka vastaa kaukolämmön lämmönjakokeskuksen lämmönsiirtimen teknistaloudellista käyttöikää (34). Kaukolämmönsiirtimen käyttöikä voi käytännössä olla

huomattavasti pidempikin, mutta oletetaan, että maidon ominaisuudet ovat kuitenkin lämmönsiirtimelle kaukolämpövettä haasteellisemmat. Investoinnin kokonaishinta 17 vuoden käyttöaikana on 8 310 €. Verkkosähkön yksikköhintana pidetään 14 snt/kWh.

Maidon jäädytyksen vuotuinen kustannus ilman esijäädytysjärjestelmää on noin 1 528 €. Maidon jäädytys esijäädytyksellä kuluttaa noin 6 175 kWh sähköenergiaa vuodessa, kun esijäädytyslämmönsiirtimen pesuihin kuluva lämpöenergia ajatellaan katettavan verkkosähköllä. Ostoenergian hinnaksi tulee noin 865 € vuodessa. Maidon jäädytyksen vuotuinen kustannus esijäädytysjärjestelmällä on laskettu kaavalla 14.

$$\text{Energian hinta} = \frac{\text{Investoinnin kokonaiskustannus}}{\text{Investoinnin käyttöaika}} + \text{Lisäenergian hinta KAAVA 14}$$

Energian hinta = energian hinta investoinnilla (€/vuosi)

Investoinnin kokonaiskustannus = investoinnin hankintahinta ja käytönaikaiset kulut (€)

Investoinnin käyttöaika = investoinnin käyttöikä (vuosi)

Lisäenergian hinta = sähköverkosta ostettavan lisäenergian hinta (€/vuosi)

Sijoittamalla arvot kaavaan saadaan maidon jäädytyksen vuotuiseksi kustannukseksi

$$\begin{aligned} \text{Energian hinta}_{\text{maidon EJ}} &= \frac{8310 \text{ €}}{17 \text{ (vuosi)}} + 864,51 \frac{\text{€}}{\text{vuosi}} = 1353,33 \frac{\text{€}}{\text{vuosi}} \\ &\approx 1353 \frac{\text{€}}{\text{vuosi}} \end{aligned}$$

Esijäädytysinvestoinnin vuotuinen säästö saadaan vähentämällä ilman investointia syntyvistä vuotuisista kustannuksista kustannukset, jotka syntyvät investoinnilla. Vuotuiseksi säästökseen saadaan noin 175 €. Investoinnin takaisinmaksuaika voidaan laskea kaavalla 15.

$$\text{Investoinnin takaisinmaksuaika} = \frac{\text{Investoinnin kokonaiskustannus}}{\text{Investoinnin vuotuinen säästö}} \text{ KAAVA 15}$$

Investoinnin takaisinmaksuaika = aika, jolloin investoinnista saadut säästöt kattavat investoinnista aiheutuneet kulut (vuosi)

Investoinnin kokonaiskustannus = investoinnin hankintahinta ja käytönaikaiset kulut (€)

Investoinnin vuotuinen säästö = energian hinnasta ilman investointia vähennettynä energian hinta investoinnilla (€/vuosi)

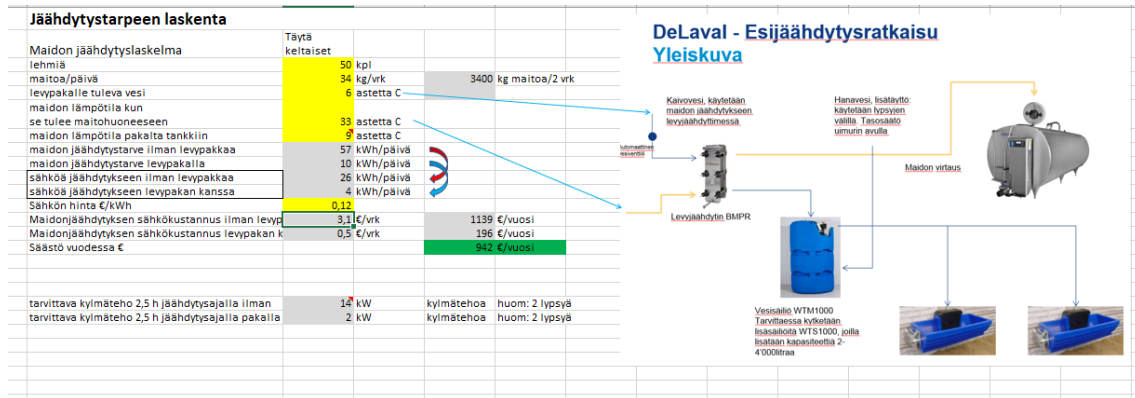
Sijoittamalla kaavaan arvot saadaan takaisinmaksuajaksi

$$\text{Investoinnin takaisinmaksuaika}_{\text{maidon EJ}} = \frac{8310 \text{ €}}{174,33 \frac{\text{€}}{\text{vuosi}}} = 47,7 \text{ vuotta}$$

Investoinnin takaisinmaksuajasta voidaan nähdä, että se on huomattavasti pidempi kuin investoinnin käyttöikä. Siksi investointi maidon esijäähdytysjärjestelmään ei tällä laskentatavalla ole kannattavaa. Investointiin sijoitetun pääoman vuotuinen tuotto on investoinnin takaisinmaksuajan käänteisluku. Investointiin sijoitetun pääoman tuotto on 2,1 %.

On kuitenkin huomioitava, ettei investoinnin kannattavuuslaskennassa ole otettu huomioon maidon esijäähdytyksessä syntyvän lämpimän veden arvoa. Jos esimerkiksi eläinten juomavesi halutaan joka tapauksessa lämmittää, investoimalla maidon esijäähdyttimeen voidaan säästää lämpöenergiaa 13 003 kWh/v. Jos tämä lämpöenergia tuotetaan sähköllä, sen kustannukseksi tulee vuodessa 1 820 €. Ilman esijäähdytystä maidon jäähdytys ja eläinten juomaveden lämmitys sähköllä maksavat yhteensä 3 348 €/v. Kun tästä summasta vähennetään kustannus, joka syntyy esijäähdytysinvestoinnilla, saadaan vuotuisesti säästöksi noin 1 995 €. Tällä laskentatavalla investointi muuttuu kannattavaksi. Sen takaisinmaksuaika laskee noin 4,2 vuoteen ja pääoman tuotto nousee 24 %:iin vuodessa.

DeLavalilta saatuun budjettitarjoukseen on laskettu DeLavalin oma arvio maidon esijäähdytyksen säästöpotentiaalista. Vertailun vuoksi DeLavalin oma jäähdytystarpeenlaskenta on esitetty kuvassa 19.



KUVA 19. Delavalin jäähdytystarpeen laskenta sekä esijäähdytysratkaisun yleiskuva (32)

Kuvasta nähdään, että DeLavalin lähtöarvot eroavat hieman tämän työn arvoista ainakin lehmien määrän, maidontuotannon, veden ja maidon lämpötilaerojen sekä sähkön hinnan osalta. Taulukosta 3 nähdään, kuinka tässä työssä esitetyt laskelmat muuttuvat, kun niissä käytetään samoja lämpötiloja ja sähkön hintaa kuin kuvassa 19.

TAULUKKO 3. Vaihtoehtoinen maidon jäähdytystarpeen laskelma

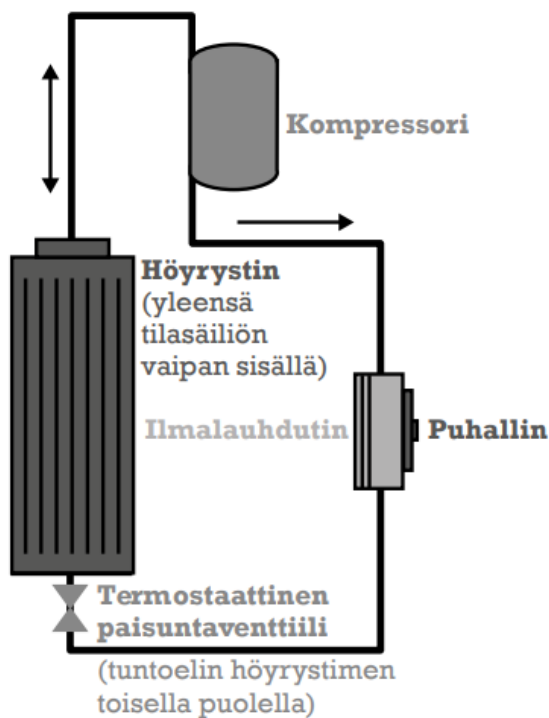
Kuvaus	Lukuarvo	Yksikkö	Huomioita
Maidon lämpötila ennen esijäähdytystä	33	°C	
Maidon lämpötila esijäähdytyksen jälkeen	9	°C	
Maidon lämpötilan muutos esijäähdyttimessä	24	°C	
Maidon tavoitelämpötila tilatankissa	4	°C	
Maidon lämpötilan muutos yhteensä	29	°C	
Kaivoveden lämpötila ennen esijäähdytintä	6	°C	
Veden lämpötilan muutos esijäähdyttimessä	12,1	°C	
Kaivoveden lämpötila esijäähdyttimen jälkeen	18,1	°C	
Maidosta poistettava lämpöenergia yhteensä	22181	kWh/vuosi	
Esijäähdytyksessä maidosta poistuva energia	18357	kWh/vuosi	
Esijäähdytyksen jälkeen maidosta poistettava energia	3824	kWh/vuosi	
Maidon jälkijäähdytyksen sähköenergiankulutus	1881	kWh/vuosi	
Sähköenergiankulutus ilman esijäähdytystä	10912	kWh/vuosi	
Sähköenergiankulutus esijäähdytyksellä	3328	kWh/vuosi	
Juomaveden lämmityksen energiankulutus	18357	kWh/vuosi	
Esijäähdytysjärjestelmän hinta	4500	€	
Asennuksen hinta	750	€	
Huoltojen hinta koko käyttöaikana	3060	€	
Investoinnin kustannus yhteensä	8310	€	
Sähkön hinta	0,12	€/kWh	
Maidon jäähdytyksen kustannus ilman esijäähdytystä	1309	€/vuosi	Ei juomaveden lämmitystä
Maidon jäähdytyksen kustannus esijäähdytyksellä	888	€/vuosi	
Esijäähdytys investoinnin säästö	421	€/vuosi	
Investoinnin takaisinmaksuaika	19,7	vuotta	
Sijoitetun pääoman tuotto-%	5,1 %	vuodessa	
Maidon jäähdytyksen kustannus ilman esijäähdytystä	3512	€/vuosi	Juomaveden lämmityksellä
Maidon jäähdytyksen kustannus esijäähdytyksellä	888	€/vuosi	
Esijäähdytys investoinnin säästö	2624	€/vuosi	
Investoinnin takaisinmaksuaika	3,2	vuotta	
Sijoitetun pääoman tuotto-%	31,6 %	vuodessa	

Taulukosta nähdään, ettei maidon esijäähdytysinvestointi ole edelleenkään kannattava tämän työn lähtöarvoilla, ellei laskuissa huomioida eläinten juomaveden lämmityspotentiaalia. On muistettava, että tässä esitetty ratkaisu on vain yksi esimerkki maidon esijäähdytysjärjestelmästä. Järjestelmiä on erilaisia, joten niiden hinnatkin vaihtelevat. Myös arvioitujen huoltokustannusten suuri osuus investoinnin kokonaiskustannuksista voi vaikuttaa ratkaisevasti kannattavuusarvioon. Joidenkin tutkimusten mukaan maidon esijäähdytysjärjestelmä on todettu kannattavaksi, vaikka laskuissa on huomioitu vain investointikulut ja maidon jäähdytyksen alentunut sähköenergiankulutus. Tutkimuksissa järjestelmien takaisinmaksuajat ovat vaihdelleet 1,5 vuodesta 4,5 vuoteen. (35.) Navetan laajennusinvestoinnin

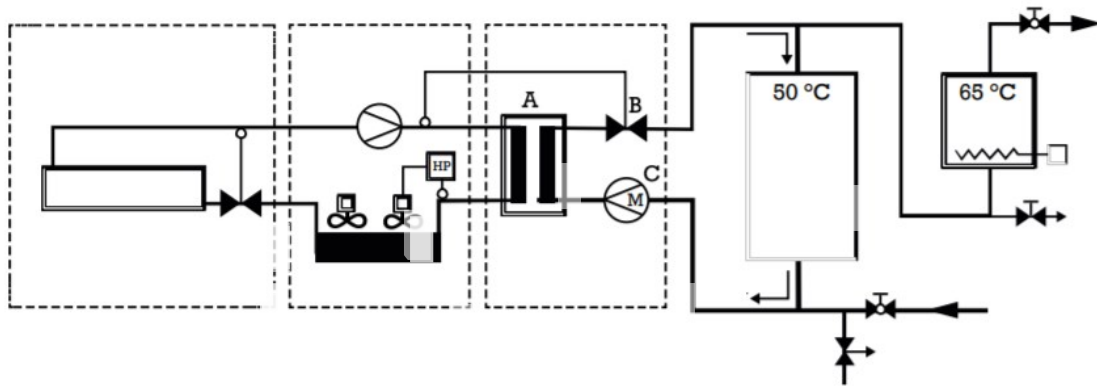
yhteydessä onkin syytä tehdä tarkemmat laskelmat maidon esijäähdytyksen kannattavuudesta.

3.2 Lämmöntalteenotto maidosta

Maidon lämmöntalteenotossa tilatankin kylmäkoneen kylmäaineeseen siirtynyt maidon lämpöenergia otetaan talteen. Se voidaan toteuttaa käyttämällä kylmäainepiirin lauhttimena perinteisen maitohuoneen ilmaan lauhtuttavan lämmönsiirtimen (kuva 20) sijasta tai sen rinnalla LTO-lämmönsiirintä. Siinä kylmäaineeseen sitoutunut lämpöenergia lauhdutetaan ilman sijasta jäähdyttävänä aineena toimivaan veteen. Veteen siirtynyt lämpö hyödynnetään esimerkiksi lämpimänä käyttövetenä. (29, s. 2–7.) Esimerkki maidon LTO:n prosessikaaviosta on kuvassa 21.



KUVA 20. Perinteisen maidon jäähdytyksen toimintaperiaate (29, s. 3)



Maidonlämmöntalteenotto. Vasemmalla tilasäiliö ja oikealla lämminkäyttövesisäiliö. A) Levylämmönvaihdin, B) Venttiili ja C) Kiertovesipumppu. (Wedholms AB)

KUVA 21. Maidon LTO:n prosessikaavio (29, s. 7)

Tässä työssä on ajatuksena, että tuotetaan mahdollisimman paljon lämpöä LTO:lla, ja ylituotettu lämpöenergia varastoidaan energiavaraajaan. Loput navetan lämmöntarpeesta katetaan sähköverkosta ostettavalla sähköenergialla.

Maidon lämmöntalteenottoa on tutkittu tarkastelemalla aluksi maidon sisältämän energian määrää. Maidosta poistetaan jäädytyksessä yhteensä 22 946 kWh/v lämpöenergiaa, kun jäädytettävän maidon lämpötilan muutos on 30 °C. Tilatankin kylmäkone kuluttaa tähän energiaa 10 912 kWh/v. Maidon jäädytyksessä kylmäkoneen kylmäaineeseen siirtyy maidosta poistettava lämpöenergia kokonaisuudessaan sekä noin 85 % jäädytykseen kuluneesta sähköenergiasta (29, s. 6). Kylmäaineeseen sitoutunut lämpöenergia lasketaan kaavalla 16.

$$Q_{\text{kylmäaine}} = Q_{\text{jäädytys,kok.}} + \gamma_{\text{sähköenergia}} \times E_{kk} \quad \text{KAAVA 16}$$

$Q_{\text{kylmäaine}}$ = kylmäkoneen kylmäaineeseen sitoutunut lämpöenergia (kWh/vuosi)

$Q_{\text{jäädytys,kok.}}$ = maidosta jäädytyksellä poistettava kokonaisenergia (kWh/vuosi)

$\gamma_{\text{sähköenergia}}$ = kylmäaineeseen sitoutuneen lämpöenergian osuus jäädytykseen kuluneesta sähköenergiasta (-)

E_{kk} = kylmäkoneen tarvitsema sähköenergia (kWh/vuosi)

Sijoittamalla arvot kaavaan saadaan kylmäaineeseen sitoutuneeksi lämpöenergiaksi

$$Q_{\text{kylmäaine}} = 22946,333 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}} + 0,85 \times 10911,876 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}} = 32221,428 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

$$\approx 32221 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

Kylmäaineen sisältämästä lämmöstä siirtyy veteen 30–60 % riippuen LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhteesta (29, s. 6). LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhteeksi arvioidaan 45 %. Kylmäaineesta veteen siirtyvä lämpöenergia lasketaan kaavalla 17.

$$Q_{LTO} = \eta_{\text{lämmönsiirrin}} \times Q_{\text{kylmäaine}}$$

KAAVA 17

Q_{LTO} = kylmäaineesta veteen siirtyvä lämpöenergia (kWh/vuosi)

$\eta_{\text{lämmönsiirrin}}$ = LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde (-)

$Q_{\text{kylmäaine}}$ = kylmäkoneen kylmäaineeseen sitoutunut lämpöenergia (kWh/vuosi)

Sijoittamalla arvot kaavaan saadaan veteen siirtyväksi lämpöenergiaksi

$$Q_{LTO} = 0,45 \times 32221,428 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}} = 14499,643 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}} \approx 14500 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

Maidon LTO:n tuntinen lämpötehontuotto riippuu maidon jäähdytyksen tuntisesta sähkötehortarpeesta. Maidon LTO:n tunnissa tuotetun lämpöenergian suhde koko vuoden lämpöenergian tuottoon on yhtä suuri kuin maidon jäähdytyksen saman tunnin sähköenergian kulutus suhteessa koko vuoden maidon jäähdytyksen energiankulutukseen. Näin voidaan laskea kylmäkoneen kuluttaman tuntisen sähkötehon avulla lämmöntalteenoton tuottama tuntinen lämpöteho. Esimerkiksi vuoden ensimmäisen tunnin maidon jäähdytyksen energiankulutus on 1 569 Wh ja koko vuoden energiankulutus yhteensä 10 912 kWh. Tällöin, maidon jäähdytyksen energiankulutusprofiilin mukaisesti, vuoden ensimmäisen tunnin energiankulutuksen suhde koko vuoden energiankulutukseen on noin 0,014 %. Näin

saadaan laskettua vuoden jokaiselle tunnille maidon LTO:n tuntinen lämpöteho kaavalla 18.

$$\phi_{LTO,h} = \frac{y_h \times Q_{LTO}}{t_h}$$

KAAVA 18

$\phi_{LTO,h}$ = maidon LTO:n tuntinen lämpöteho (kW)

y_h = maidon jäähtymisen yhden tunnin energiankulutuksen suhde koko vuoden energiankulutukseen (-)

Q_{LTO} = maidon LTO:n vuotuinen energiantuotto (kWh/vuosi)

t_h = aika (h)

Sijoittamalla kaavaan arvot saadaan maidon LTO:n vuoden ensimmäisen tunnin lämpötehoksi

$$\phi_{LTO,1.h} = \frac{0,00014376 \times 14499,643 \text{ kWh}}{1 \text{ h}} = 2,084 \text{ kW} \approx 2,1 \text{ kW}$$

Navetan lämmityksen ja lämpimän käyttöveden tuntiset tehontarpeet on laskettu vuoden jokaiselle tunnille. Lämmön tuntisista tehontarpeista vähentämällä LTO:n tuntiset lämpötehot saadaan maidon LTO:n jälkeen jäävä lisätehontarve. Esimerkiksi vuoden ensimmäisen tunnin lämpötehontarve on noin 1,5 kW, joten siitä vähennettynä vuoden ensimmäisen tunnin maidon LTO:n lämpöteho saadaan tulokseksi noin -0,6 kW. Erotus on negatiivinen, joten LTO:lla tuotettu lämpöteho on suurempi kuin tunnin lämpötehontarve. Tällöin energiaa saadaan kyseisenä tuntina tuotettua enemmän kuin sitä kuluu. Ylimääräinen lämpöenergia varastoidaan lämminvesivaraajaan, mikäli varastointikapasiteettia on tarpeeksi.

Vuoden kolmannen tunnin lämpötehontarve on puolestaan 2,8 kW ja LTO:n lämpöteho noin 1,9 kW. Näiden erotus on 0,9 kW, joten LTO:n jälkeen jää vielä lämpötehontarvetta. Vuoden aikana lisälämpöenergiantarve LTO:n jälkeen on yhteensä noin 24 000 kWh. LTO:lla voidaan kattaa lämpöenergiantarpeesta 14 500 kWh/v, joka on noin 37,6 % navetan kokonaislämmöntarpeesta. Maidon lämmöntalteenotolla ei saada vähennettyä maidon jäähtymisen sähkönkulutusta, mutta

navetan lämmöntarpeen osalta voidaan säästää LTO:lla katettu lämpöenergia-määrä.

Lämpöenergiaa hyödynnetään lämpimänä vetenä, jota on voitava varastoida. Lämmintä vettä on oltava käytettävissä myös silloin, kun lämpöä ei voida tuottaa. Kun navetan toimisto- ja tarkkailutiloja täytyy lämmittää, myös se voidaan toteuttaa vesikiertoisella lämmitysjärjestelmällä. LTO:lla tuotettua lämmintä vettä kerätään ensin erilliseen lauhdesäiliöön, josta lämmin vesi siirretään lämminvesivaraajaan. (27.) Varastokapasiteetin tilavuus vaikuttaa siihen, kuinka paljon lämpöenergiaa voidaan enimmillään varastoida. Veden varastointitilavuuden muuttuessa myös talteen saadun lämpöenergian määrä muuttuu. Siksi valitulla varastointikapasiteetin suuruudella on jonkun verran vaikutusta tämän työn tuloksiin.

DeLavalilta saatu budjettitarjous sisältää maidon esijäähdytysjärjestelmän lisäksi myös tarjouksen maidon LTO-järjestelmästä. Järjestelmään kuuluu 500 l:n lauhdesäiliö (32). Näin kokonaisvarastointikapasiteetiksi muodostuu energiantarpeenlaskennassa käytetyn 1 000 l:n lämminvesivaraajan kanssa 1500 l. Kaavalla 1 voidaan laskea täyden 1500 l:n varastointikapasiteetin energiasisältö, kun veden tiheys on 1000 kg/m³, ominaislämpökapasiteetti 4,2 kJ/kg°C ja lämpötilaero 50 °C. Sijoittamalla arvot kaavaan varaajan energiasisällöksi Q_{LVV} saadaan

$$Q_{LVV} = \frac{1,5 \text{ m}^3 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (55 - 5)^\circ\text{C}}{3600} = 87,5 \text{ kWh}$$

Varaajan tuntinen lämpötehon maksimituotto on 87,5 kW, kun laskennan tarkasteluajaväli on yksi tunti. Varastointikapasiteetin kokoa tärkeämpää on kuitenkin saada mahdollisimman tasaista lämmöntuotantoa ympäri vuoden. Varaajakapasiteetin kasvattaminen esimerkiksi kaksinkertaiseksi ei merkittävästi nosta energian omakäyttöastetta eli hyödyksi saadun energian määrää suhteessa sen tuotantoon. Varastointikapasiteetin hetkellinen energiasisältö on vuoden kokonaisenergiantarpeeseen verrattuna niin pieni, että energiantuotannon katkettua varaajasta riittää energiaa vain lyhyeksi aikaa. Esimerkiksi tammikuun ensimmäisen vuorokauden kokonaislämpöenergiantarve on noin 113 kWh. Silloin pelkkä varastoitu energia ei riitä edes vuorokauden lämpöenergiantarpeen kattamiseen.

Jos taas lämmöntuotanto on kohtuullisen tasaista, pienempikin varastointikapasiteetti riittää kattamaan hetkellisen tarvittavan lämpötehon. Navetan laskennallinen huippulämpötehon tarve on hieman alle 24 kW.

Lämpimän käyttöveden energiantarpeeksi on arvioitu 30 542 kWh/v ja tilojen lämmitysenergiantarpeeksi 8 000 kWh/v. Yhteensä lämpöenergian kokonaistarve vuodessa on siis 38 542 kWh. Navetan tuntisten lämpötehon tarpeiden ja maidon LTO:n tuntisten lämpötehon tuottojen avulla on tehty taulukon 4 mukainen Excel-laskentataulukko koko vuoden pituiselle tarkasteluajalle.

TAULUKKO 4. Maidon LTO:n laskentataulukko vuoden ensimmäiseltä vuorokaudelta

Maidon LTO:n laskentataulukko (1. tammikuuta)												
Vuoden tunnit järjestyksessä 1.1. - 31.12.	Navetan lämpötehon tarve yhteensä	Maidon LTO:n tuntinen lämpöteho	Lämpötehon tarve maidon LTO:n jälkeen	Lämpötehon tarve maidon LTO:n tuotannon ja varastokapasiteetin jälkeen	Varastokapasiteetilla katettu tehontarve	Varastoitu lämpöenergia (max 87,5 kWh)	Energian lisäys varastokapasiteettiin	Käytettävissä oleva lämpöteho	Maidon LTO:n tuotolla + varastokapasiteetilla katettu lämpöteho	Maidon LTO:n tuotolla katettu lämpöteho	Varastokapasiteetilla katettu lämpöteho	Maidon LTO:lla ylituotettu lämpöteho
	kW	kW	kW	kW	kW	kWh	kWh	kW	kW	kW	kW	kW
1	1,495	2,084	0,000	0,000	0,000	0,590	0,590	2,084	1,495	1,495	0,000	0,000
2	1,485	1,937	0,000	0,000	0,000	1,042	0,453	2,527	1,485	1,485	0,000	0,000
3	2,804	1,934	0,870	0,000	0,870	0,173	0,000	2,976	2,804	1,934	0,870	0,000
4	3,336	2,163	1,173	1,000	0,173	0,000	0,000	2,336	2,336	2,163	0,173	0,000
5	8,182	1,861	6,321	6,321	0,000	0,000	0,000	1,861	1,861	1,861	0,000	0,000
6	6,006	2,031	3,975	3,975	0,000	0,000	0,000	2,031	2,031	2,031	0,000	0,000
7	8,448	1,968	6,480	6,480	0,000	0,000	0,000	1,968	1,968	1,968	0,000	0,000
8	4,921	1,985	2,936	2,936	0,000	0,000	0,000	1,985	1,985	1,985	0,000	0,000
9	3,841	2,080	1,760	1,760	0,000	0,000	0,000	2,080	2,080	2,080	0,000	0,000
10	7,018	1,838	5,181	5,181	0,000	0,000	0,000	1,838	1,838	1,838	0,000	0,000
11	3,533	2,098	1,434	1,434	0,000	0,000	0,000	2,098	2,098	2,098	0,000	0,000
12	7,211	1,778	5,433	5,433	0,000	0,000	0,000	1,778	1,778	1,778	0,000	0,000
13	3,209	1,517	1,693	1,693	0,000	0,000	0,000	1,517	1,517	1,517	0,000	0,000
14	5,088	1,357	3,731	3,731	0,000	0,000	0,000	1,357	1,357	1,357	0,000	0,000
15	4,801	1,600	3,201	3,201	0,000	0,000	0,000	1,600	1,600	1,600	0,000	0,000
16	9,387	2,052	7,335	7,335	0,000	0,000	0,000	2,052	2,052	2,052	0,000	0,000
17	6,382	1,899	4,482	4,482	0,000	0,000	0,000	1,899	1,899	1,899	0,000	0,000
18	8,797	1,992	6,805	6,805	0,000	0,000	0,000	1,992	1,992	1,992	0,000	0,000
19	4,570	1,372	3,198	3,198	0,000	0,000	0,000	1,372	1,372	1,372	0,000	0,000
20	4,190	1,280	2,910	2,910	0,000	0,000	0,000	1,280	1,280	1,280	0,000	0,000
21	2,947	1,513	1,434	1,434	0,000	0,000	0,000	1,513	1,513	1,513	0,000	0,000
22	2,312	1,641	0,671	0,671	0,000	0,000	0,000	1,641	1,641	1,641	0,000	0,000
23	1,807	1,970	0,000	0,000	0,000	0,163	0,163	1,970	1,807	1,807	0,000	0,000
24	1,551	1,944	0,000	0,000	0,000	0,555	0,392	2,107	1,551	1,551	0,000	0,000
...

Taulukkoon on laskettu navetan tuntinen lämpötehon tarve, joka jää jäljelle saman tunnin maidon LTO:lla tuotetun tuntisen tehon jälkeen. Taulukkoon on laskettu myös varaajaan varastoitu tuntinen lämpöenergia. Jos LTO:n tehontuotto on ollut suurempaa kuin tehontarve, on varaajan tuntinen energiasäilytys kasvanut. Tässä on huomioitu, että hetkellisen varastoidun energian määrä ei voi ylittää varaajan hetkellistä maksimikapasiteettia, joka on 87,5 kWh. Jos LTO:n tehontuotto on ollut tehontarvetta pienempi, on tunnin varastokapasiteetti pienentynyt tarpeen ja tuoton erotuksen verran. Jos LTO:n tehontuotto yhdessä varastokapasiteetin

kanssa ei ole riittänyt kattamaan tehontarvetta, on kyseisen tunnin varastokapasiteetin arvo tippunut 0 kWh:iin, eli se on tyhjentyt kokonaan. Jäljelle jäänyt tehontarve katetaan ostosähköllä. Mikäli tunnilta on jäänyt jäljelle ylimääräistä lämpöenergiaa enemmän kuin varastoon on energiaa mahtunut, on varastokapasiteetin ylittävä osuus taulukossa ylituotettua lämpöä. Vain navetan tuntisen lämpötehontarpeen ylittävä LTO:n tehontuotto on määritelty tehonlisäykseksi varastokapasiteettiin, vaikka todellisuudessa kaikki tuotettu energia kasvattaakin varaajan energiasisältöä. On myös huomioitava, että todellisuudessa lämpöä ei ylituoteta, vaan sitä tuotetaan maksimissaan vain sen verran kuin sitä tarvitaan.

Maitoa on jäähdytettävä huolimatta siitä, onko lämmölle tarvetta vai ei. Mikäli lämpöä on saatavilla maidosta enemmän kuin sille on tarvetta tai sitä voidaan varastoida, ylimääräinen lämpö lauhdutetaan LTO-lämmönsiirtimestä erillisessä jälkilauhduttimessa. Tuntinen käytettävissä oleva lämpöteho on maidon lämmöntalteenotolla tuotettu tuntinen teho yhdistettynä edellisen tunnin energiavaraajan kapasiteetilla tuotettavan tuntisen tehon kanssa. Taulukkoon on laskettu myös LTO:n hetkellisen tuoton ja varastointikapasiteetin avulla katettu lämpöteho. Siihen on myös eritelty, kuinka suuri osuus on katettu suoraan LTO:n tuotolla ja epäsuorasti varastokapasiteetilla. Taulukosta 5 voidaan tarkastella maidon LTO-laskennan tuloksia vuositasonalla.

TAULUKKO 5. Maidon LTO-laskennan yhteenveto, kun LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 45 %

Maidon LTO			
Energiantarve	Määrä	Yksikkö	
Vuoden lämpöenergian tarve yhteensä	38542	kWh/vuosi	
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö	
Maidon LTO:n lämpöenergiantuotanto vuodessa	14500	kWh/vuosi	
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n energiaa varastoon	839	kWh/vuosi	5,8 %
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
LTO:lla katettu kokonaisenergia	14500	kWh/vuosi	37,6 %
LTO:lla suorasti katettu lämpöenergia	13661	kWh/vuosi	35,4 %
LTO:lla epäsuorasti katettu lämpöenergia	839	kWh/vuosi	2,2 %
Hukkaenergia	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n hyödyntämätön lämpöenergia	0	kWh/vuosi	0,0 %
Sähkön kauppa	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen	24042	kWh/vuosi	62,4 %
Omakäyttöasteet			
Maidon LTO:n omakäyttöaste	100,0 %		
Maidon LTO	Määrä	Yksikkö	
Maidon LTO-lauhduttimen (lämmönsiirtimen) hyötysuhde	45 %		
LTO:lla tuotannon keskiteho (mediaani)	1,80	kW	
LTO:lla tuotannon maksimi teho	2,75	kW	
LTO:n COPh	3,00		
LTO:n kylmäkoneen kompressorin laskennallinen maksimiteho	2,1	kW	
Maidon LTO-investoinnin kustannus ALV 0%	7400	€	Investointi sisältää: Tilatankin kylmäkone, Lämmönsiirrin, 500 litran varastosäiliö, asennus, vuosihuollot
Maidon LTO käyttöikä	12	vuotta	
Kustannukset ja säästöt			
Sähkökauppa	Määrä	Yksikkö	
Sähkön markkinahinta	0,14	€/kWh	
Sähkön kustannus ilman investointeja	5396	€/vuosi	
Sähkön kustannus LTO:lla	3983	€/vuosi	
LTO-investoinnin säästö vuodessa	1413	€/vuosi	
LTO-investoinnin 12v. säästö sähkölaskussa	16959	€/12v.	
LTO-investoinnin takaisinmaksuaika	5,2	vuotta	
LTO-investointiin sijoitetun pääoman tuotto	19,1 %	vuodessa	

Taulukosta nähdään muun muassa navetan vuotuinen kokonaislämpöenergian-tarve, maidon LTO:lla vuodessa tuotettu kokonaislämpöenergian määrä sekä va-rastoidun energian määrä ja sen osuus LTO:n lämmöntuotannosta. Taulukossa on lisäksi LTO:lla vuoden aikana katettu kokonaisenergian määrä sekä LTO:n hetkellisellä tuotolla ja varastokapasiteetilla katettu vuotuinen energia sekä näi-den suhteelliset osuudet navetan vuotuisesta lämpöenergian tarpeesta. Taulu-kossa on myös LTO:n tuotannossa syntynyt ylituotetun lämpöenergian määrä ja sen osuus LTO:n tuotannosta, vuotuinen verkosta ostettava sähköenergia nave-tan lopun lämmöntarpeen kattamiseen ja sen osuus lämpöenergian tarpeesta

sekä maidon LTO:n omakäyttöaste. Omakäyttöaste kuvaa maidon LTO:n hyötykäyttöön saadun energian suhdetta LTO:n kokonaislämpöenergiantuotantoon. Maidon lämmöntalteenoton omakäyttöaste on 100 %, eli kaikki tuotettu lämpöenergia saadaan käytettyä hyödyksi navetan oman lämpöenergiantarpeen kattamiseen.

Taulukosta nähdään myös DeLavalilta saadun budjettitarjouksen hinta-arvion perustuva kokonaishinta maidon LTO-laitteistoinvestoinnille ja sen karkea kannattavuusarvio. DeLavalin tarjouksen mukaan investointiin sisältyvän tilatankin kylmäkoneen veroton hinta oheiskomponentteineen, LTO-lämmönsiirtimineen ja 500 litran lauhdesäiliöineen on 3900 € (32). Tässä on arvioitu asennuksen maksavan noin 1100 €. Vuosittaisten huoltoimenpiteiden on arvioitu maksavan 200 €/v eli yhteensä 2400 € 12 vuoden käyttöaikana. Näin investoinnin kokonaishinnaksi tulee 7400 € investoinnin käyttöaikana.

Sähkön kokonaishintana sähköverkosta ostettaessa pidetään 14 snt/kWh. Kun navetan lämpöenergiantarve on 38 542 kWh/v, lämpöenergian hinta kokonaan sähköverkosta ostettaessa on 5 396 €/v. LTO-investoinnin lämpöenergian vuotuinen hinta 12 vuoden käyttöajalta saadaan laskettua kaavalla 14. Sijoittamalla arvot kaavaan maidon LTO:lla lämpöenergian vuotuiseksi hinnaksi saadaan

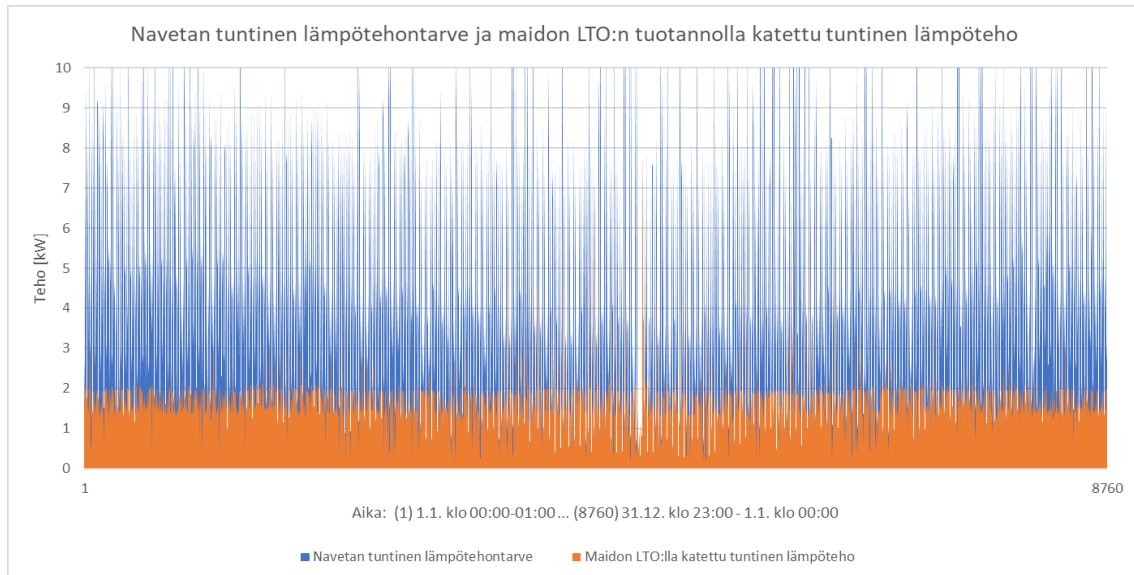
$$\text{Energian hinta}_{\text{maidon LTO}} = \frac{7400 \text{ €}}{12 \text{ vuotta}} + 24042 \text{ kWh} \times 0,14 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 3983 \text{ €}$$

Tuotettaessa lämpöä maidon LTO:lla vuotuisesti säästöksi muodostuu suoran verkkosähkön hinnan sekä LTO-investoinnin ja lisäsähkön hinnan välisen erotuksen mukaisesti 1 413 €. Se tarkoittaa lähes 17 000 €:n säästöä investoinnin 12 vuoden käyttöaikana. Investoinnin takaisinmaksuaika lasketaan kaavalla 15. Sijoittamalla kaavaan arvot saadaan maidon LTO-investoinnin takaisinmaksuajaksi

$$\text{Investoinnin takaisinmaksuaika}_{\text{maidon LTO}} = \frac{7400 \text{ €}}{1413 \frac{\text{€}}{\text{vuosi}}} = 5,2 \text{ vuotta}$$

Kuvassa 22 on esitetty navetan lämpötehotarpeet vuoden jokaiselle tunnille siinä, että sekä maidon LTO:n tuotolla katetut tuntiset lämpötehot oranssilla värillä.

Maidon LTO:n lämmöntuotto on hyvin tasaista ympäri vuoden ja sopii hyvin lämmön pohjakuorman kattamiseen. Kaikki maidon LTO:lla tuotettu lämpöenergia saadaan hyödynnettyä oman lämmöntarpeen kattamiseen.



KUVA 22. Navetan tuntinen lämpötehotarve ja maidon LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho

Edellä laskettu maidon LTO:n lämmöntuotantopotentiaali on hyvin varovainen arvio todellisesta potentiaalista. DeLavalin mukaan yhdestä litrasta 35 °C:ista maitoa voisi saada jopa 0,7 litraa 53 °C:ista lämmintä vettä (32). Se tarkoittaisi tässä työssä arvioidulla maidon tuotantomäärällä ja kaivokylmän veden 6 °C:n lämpötilalla laskettuna, kaavaan 1 sijoitettuna

$$Q_{\text{lämmin vesi}} = \frac{649,516441 \frac{(\text{maito})\text{m}^3}{\text{vuosi}} \times 0,7 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (53 - 6)^\circ\text{C}}{3600}$$

$$= 24930,60606 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}} \approx 24900 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}}$$

Tästä syystä on tarkasteltu myös tilanteita, jossa tilatankin kylmäkoneen kylmäainepiirin LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde olisi 60 % sekä vertailun vuoksi myös 100 %. Maidon LTO:n vuotuiset arvot ovat taulukon 6 mukaiset 60 %:n hyötysuhdeella.

TAULUKKO 6. Maidon LTO-laskennan yhteenveto, kun LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 60 %

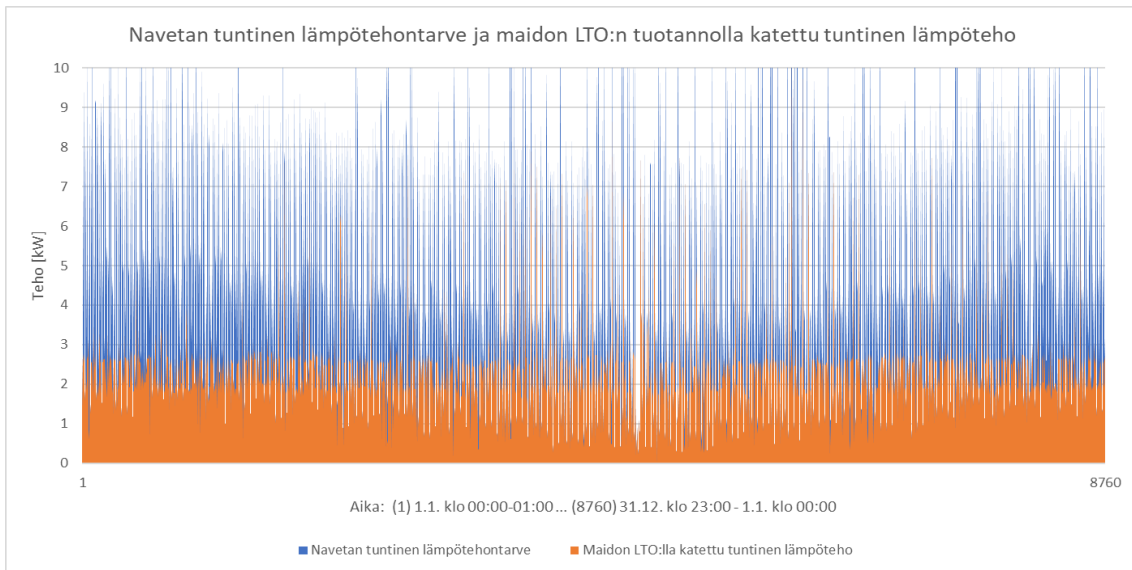
Maidon LTO				
Energiantarve	Määrä	Yksikkö		
Vuoden lämpöenergian tarve yhteensä	38542	kWh/vuosi		
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö		
Maidon LTO:n lämpöenergiantuotanto vuodessa	19333	kWh/vuosi		
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta	
LTO:n energiaa varastoon	1823	kWh/vuosi	9,4 %	
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta	
LTO:lla katettu kokonaisenergia	19333	kWh/vuosi	50,2 %	
LTO:lla suorasti katettu lämpöenergia	17510	kWh/vuosi	45,4 %	
LTO:lla epäsuorasti katettu lämpöenergia	1823	kWh/vuosi	4,7 %	
Hukkaenergia	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta	
LTO:n hyödyntämätön lämpöenergia	0	kWh/vuosi	0,0 %	
Sähkön kauppa	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta	
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen	19209	kWh/vuosi	49,8 %	
Omakäyttöasteet				
Maidon LTO:n omakäyttöaste	100,0 %			
Maidon LTO	Määrä	Yksikkö		
Maidon LTO-lauhduttimen (lämmönsiirtimen) hyötysuhde	60 %			
LTO:lla tuotannon keskiteho (mediaani)	2,40	kW		
LTO:lla tuotannon maksimi teho	3,67	kW		
LTO:n COPh	3,00			
LTO:n kylmäkoneen kompressorin laskennallinen maksimiteho	2,1	kW		
Maidon LTO-investoinnin kustannus ALV 0%	7400	€	Investointi sisältää: Tilatankin kylmäkone, Lämmönsiirrin, 500 litran varastosäiliö, asennus, vuosihuollot	
Maidon LTO käyttöikä	12	vuotta		
Kustannukset ja säästöt				
	Sähkökauppa	Määrä		Yksikkö
	Sähkön markkinahinta	0,14		€/kWh
	Sähkön kustannus ilman investointeja	5396		€/vuosi
	Sähkön kustannus LTO:lla	3306		€/vuosi
	LTO-investoinnin säästö vuodessa	2090		€/vuosi
	LTO-investoinnin 12v. säästö sähkölaskussa	25079		€/12v.
	LTO-investoinnin takaisinmaksuaika	3,5		vuotta
	LTO-investointiin sijoitetun pääoman tuotto	28,2 %	vuodessa	

Taulukosta nähdään, että LTO-lämmönsiirtimen 60 %:n hyötysuhteella saataisiin energiaa hyötykäyttöön yli 19 000 kWh/v. Se tarkoittaisi yli puolta navetan kokonaislämpöenergiatarpeesta. Sähköverkosta ostettavan lisälämmitysenergian määrä laskisi lähes 5 000 kWh/v ja sähköenergian hinta lähes 700 €/v. Investoinnin takaisinmaksuaika lyhenisi näin 3,5 vuoteen. Maidon LTO:n vuotuiset arvot ovat taulukon 7 mukaiset lämmönsiirtimen 100 %:n hyötysuhteella.

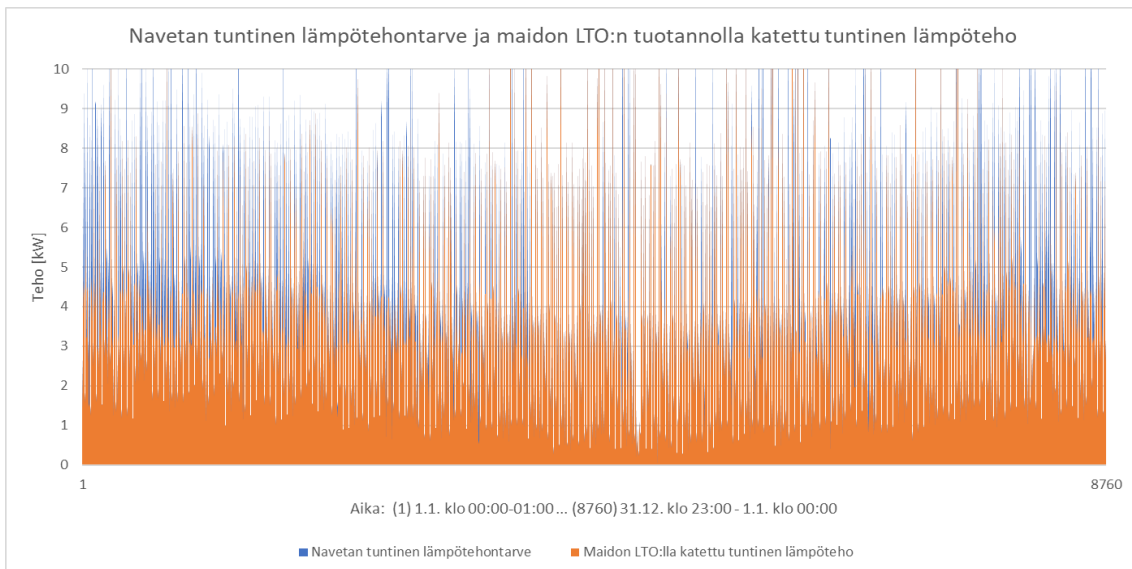
TAULUKKO 7. Maidon LTO-laskennan yhteenveto, kun LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 100 %

Maidon LTO			
Energiantarve	Määrä	Yksikkö	
Vuoden lämpöenergian tarve yhteensä	38542	kWh/vuosi	
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö	
Maidon LTO:n lämpöenergiatuotanto vuodessa	32221	kWh/vuosi	
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n energiaa varastoon	6549	kWh/vuosi	20,3 %
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
LTO:lla katettu kokonaisenergia	32184	kWh/vuosi	83,5 %
LTO:lla suorasti katettu lämpöenergia	25638	kWh/vuosi	66,5 %
LTO:lla epäsuorasti katettu lämpöenergia	6546	kWh/vuosi	17,0 %
Hukkaenergia	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n hyödyntämätön lämpöenergia	34	kWh/vuosi	0,1 %
Sähkön kauppa	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen	6357	kWh/vuosi	16,5 %
Omakäyttöasteet			
Maidon LTO:n omakäyttöaste	99,9 %		
Maidon LTO	Määrä	Yksikkö	
Maidon LTO-lauhduttimen (lämmönsiirtimen) hyötysuhde	100 %		
LTO:lla tuotannon keskiteho (mediaani)	4,00	kW	
LTO:lla tuotannon maksimi teho	6,12	kW	
LTO:n COPh	3,00		
LTO:n kylmäkoneen kompressorin laskennallinen maksimiteho	2,1	kW	
Maidon LTO-investoinnin kustannus ALV 0%	7400	€	Investointi sisältää: Tilatankin kylmäkone, Lämmönsiirrin, 500 litran varastosäiliö, asennus, vuosihuollot
Maidon LTO käyttöikä	12	vuotta	
Kustannukset ja säästöt			
Sähkökauppa	Määrä	Yksikkö	
Sähkön markkinahinta	0,14	€/kWh	
Sähkön kustannus ilman investointeja	5396	€/vuosi	
Sähkön kustannus LTO:lla	1507	€/vuosi	
LTO-investoinnin säästö vuodessa	3889	€/vuosi	
LTO-investoinnin 12v. säästö sähkölaskussa	46670	€/12v.	
LTO-investoinnin takaisinmaksuaika	1,9	vuotta	
LTO-investointiin sijoitetun pääoman tuotto	52,6 %	vuodessa	

Taulukosta nähdään, että maidon LTO:lla voisi teoreettisesti tuottaa yli 32 000 kWh lämpöenergiaa vuodessa. Tästä energiasta voitaisiin saada hyödyksi jopa 99,9 %. Kuvista 23 ja 24 nähdään navetan tuntiset lämpötehot ja maidon LTO:n tuotannolla katetut tuntiset lämpötehot 60 %:n ja 100 %:n lauhdutushyötysuhteilla.



KUVA 23. Navetan tuntinen lämpötehotarve ja maidon LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho, kun LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 60 %



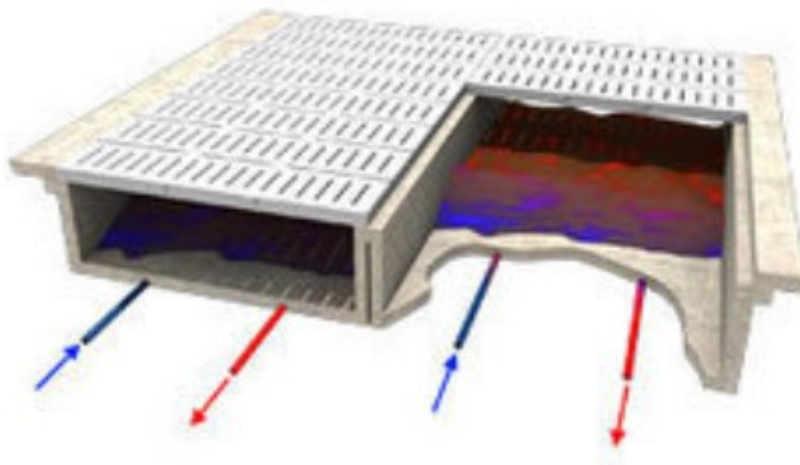
KUVA 24. Navetan tuntinen lämpötehotarve ja maidon LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho, kun LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 100 %

Laskujen perusteella voidaan maidon LTO-järjestelmää pitää kannattavana investointina. Maidon LTO-investointi on myös suhteellisen helppo ja yksinkertainen toteuttaa. Investointia suunniteltaessa siitä kannattaa kuitenkin tehdä tarkempi kannattavuusarvio, jossa huomioidaan yksityiskohtaisemmin kaikki mah-

dolliset kannattavuuteen vaikuttavat tekijät. Kannattavuuden tarkemmassa arvioinnissa tulisi myös ottaa huomioon rahan arvon muutokset ja energian hintojen kehitys investoinnin aikana. Myös kiinteistön arvonnousulla on vaikutusta investoinnin kannattavuuteen.

3.3 Lämmöntalteenotto lehmien lietelannasta

Lietelannasta lämpöä otetaan talteen lämpöpumpputekniikalla. Tavoitteena on saada talteen lietteessä olevaa lämpöenergiaa, joka muutoin jäisi hyödyntämättä. Talteen otettua lämpöenergiaa voidaan hyödyntää esimerkiksi rakennusten, lämpimän käyttöveden ja eläinten juomaveden lämmityksessä. (36.) Jos lietelannan LTO:lla halutaan lämmittää tiloja, rakennuksessa tulee olla vesikiertoinen lämmitysjärjestelmä. Lietelannan LTO-järjestelmän toimintaperiaate on sama kuin maidon lämmöntalteenotossa. Lämpöä otetaan talteen lietekouruissa tai -altaassa olevasta lehmien lannasta maidon sijasta (kuva 25).



KUVA 25. Lietekourujen pohjavalussa oleva lämmönkeruuputkisto (35)

Lietelannan LTO:n rinnalle asennetaan yleensä myös maalämmönkeruupiiri, koska lietelannasta ei voida ottaa lämpöä talteen ympärivuotisesti. Lietelannan LTO siis vaatii vuoden kylmimpien kuukausien ajaksi rinnalleen toisen lämmönkeruupiirin tai lämmönlähteen. Näin varmistetaan, etteivät lietelanta ja lantakourut pääse jäähtymään liikaa tai jopa jäätymään. Jäljelle jäänyt lämmöntarve

voidaan kattaa varaajan sähkövastuksilla. Ainakin sikatalouden puolella lannan jäähdyttämisen vähentää merkittävästi hajuhaittoja sekä ammoniakki- ja hiilidioksidipäästöjä. (37, s. 13; 33.)

Lämmönkeruupiiri upotetaan lietekourujen pohjavaluun noin 10 cm:n syvyyteen. Kouruissa on aina tietty määrä lietettä, joten ne toimivat myös lietteen varastona. Lannan siirtoon tarvitaan mahdollisesti poisto- ja sekoituspumppu, jotta lämmönkeruu olisi tehokasta. Lämmönkeruupiirin putkien halkaisija on noin 50 mm, jossa on 30-prosenttinen teollisuusalkoholi kiertävänä aineena. Lantapiirin pituus on yhteensä joitakin satoja metrejä. (37, s. 21–25.) Lämpöpumpun lämpökertoimena voidaan pitää noin kolmea (36).

Lämpöpumpun eniten kuluville osille, kuten kiertopumpuille ja kompressorille, täytyy suorittaa huoltotoimenpiteitä vuoden tai kahden välein. Vuosihuollon keskihinta on noin 240 €. Hintaa lisäävät korjaukset, materiaalikulut ja varaosat. (37, s. 32.) Mitä pienempi lämpöpumpun teho on, sitä suuremmiksi menot kasvavat tuotettua lämpöyksikköä kohti. Usein lietalannan LTO-järjestelmä mitoitetaan kattamaan maalämmön tavoin vain osa todellisesta tehon tarpeesta, esimerkiksi noin 40–60 % huipputehontarpeesta, jolloin sillä saadaan katettua 80–90 % vuotuisesta lämmitysenergiatarpeesta. (37, s. 11.)

Lietelannan lämmöntalteenoton hyödyntämistä lämmöntuotannossa on tutkittu kolmella vaihtoehdolla. Ensimmäisessä vaihtoehdossa oletetaan, että lannan koko saatavissa oleva energiasisältö saadaan talteen. Toisessa tapauksessa lannan energiasisällöstä saadaan talteen 60 % ja viimeisessä vain 45 %. Navetan lämpöenergia tuotetaan lietalannan lämmöntalteenotolla ja loput energiantarpeesta katetaan verkosta ostettavalla sähköenergialla. Vesivaraajassa on sopivan kokoiset sähkövastukset, joilla vesi voidaan lämmittää käyttölämpötilaan. Ylimääräinen lämpöenergia varastoidaan samoin, kuin maidon LTO:n tapauksessa. Lämpimän veden varastointitilavuus on yhteensä 1500 l ja sen energiakapasiteetti 87,5 kWh. Laskelmien lämpöenergian tuntiset tehontarpeet ovat samat kuin maidon LTO-laskuissa.

Lietelannan tuotto on 1 358 m³/v. Lannan tiheys on noin 991 kg/m³ (38). Lietteestä noin 90 % on vettä, joten lietelannan ominaislämpökapasiteettina pidetään veden ominaislämpökapasiteettia (39, s. 46). Kun tuore liete saapuu lietekouruihin, sen lämpötilan arvioidaan olevan 37 °C. Lannan tavoitelämpötilaksi jäädytyksen jälkeen valitaan 7 °C (40). Näin lannan lämpötilan muutos on 30 °C. Lannan laskennallinen vuotuinen energiasisältö voidaan laskea kaavalla 1. Sijoittamalla kaavaan arvot saadaan lannan energiasisällöksi

$$Q_{lanta} = \frac{991 \frac{kg}{m^3} \times 1357,977 \frac{m^3}{vuosi} \times 4,2 \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \times 30^{\circ}C}{3600} = 47101,425 \frac{kWh}{vuosi}$$

$$\approx 47101 \frac{kWh}{vuosi}$$

Arvioidaan, että lietelannasta on mahdollista kerätä lämpöä yhdeksänä kuukautena vuodessa, maaliskuusta marraskuuhun. Lehmien lannantuotto on tasaista ja säännöllistä ympäri vuoden. Vuodessa on tunteja yhteensä 8 760, joista lietelannan lämmöntalteenoton käyttöaika on 6 600 tuntia. Lannan energiasisältö LTO:n käyttöaikana lasketaan kaavalla 19.

$$Q_{lanta,t_{LTO}} = \frac{Q_{lanta}}{t_{vuosi}} \times t_{LTO} \quad \text{KAAVA 19}$$

$Q_{lanta,t_{LTO}}$ = lietelannan energiasisältö LTO:n käyttöaikana (kWh/vuosi)

Q_{lanta} = lietelannan vuotuinen energiasisältö (kWh/vuosi)

t_{vuosi} = vuoden tunnit (h)

t_{LTO} = LTO:n vuotuinen käyttöaika (h)

Sijoittamalla kaavaan lähtöarvot saadaan lannan energiasisällöksi LTO:n käyttöaikana

$$Q_{lanta,t_{LTO}} = \frac{47\,101,425 \frac{kWh}{vuosi}}{8\,760 \frac{h}{vuosi}} \times 6600 \frac{h}{vuosi} = 35487,375 \frac{kWh}{vuosi}$$

$$\approx 35\,487 \frac{kWh}{vuosi}$$

Kylmäkoneen kylmäkerroin on tässä 2. Se tarkoittaa, että lämpöpumpun kompressorin tarvitsema sähköteho on puolet lämpöpumpun tuottamasta kylmätehosta. Lannan jäädyttämiseen kuluva vuotuinen sähköenergia saadaan kaavaa 13 soveltamalla. Sijoittamalla kaavaan lannan energiasisältö ja kylmäkerroin saadaan lämpöpumpun vuotuiseksi energiantarpeeksi

$$E_{Kompressori} = \frac{35\,487,375 \frac{kWh}{vuosi}}{2} = 17743,688 \frac{kWh}{vuosi} \approx 17744 \frac{kWh}{vuosi}$$

Oletetaan, että lannan lämpöenergian lisäksi kaikki lämpöpumpun toimintaan kuluva sähköenergia sitoutuu kylmäaineeseen lämpöenergiana. Kun lämpöpumpun kylmäkerroin on 2, sen lämpökerroin on 3. Näin kaavaa 13 soveltamalla voidaan laskea lietelannan LTO:lla tuotettu vuotuinen lämpöenergia. Sijoittamalla saadaan lietelannan LTO:lla tuotetuksi vuotuiseksi lämpöenergiaksi

$$Q_{LTO} = 17744,688 \frac{kWh}{vuosi} \times 3 = 53231,063 \frac{kWh}{vuosi} \approx 53\,231 \frac{kWh}{vuosi}$$

Oletetaan, että lietelannan lämmöntalteenotossa energiaa kuluu myös lietteen kierrätykseen ja poistoon pumppaamalla. ERKKA-tutkimushankkeeseen osallistuneen lypsykarjatilan, jossa on maalämmön ja lietelämmön keruujärjestelmä, pumppauksen ja kierrätyksen sähköenergiankulutus on ollut yhteensä noin 524 kWh/v. Tutkimustilan vuotuinen lannan tuotto on 2 350 m³/v. (37, s. 21.) Kun tutkimustilan vuotuinen pumppauksen energiankulutus lasketaan lannan tilavuusyksikköä kohti, saadaan tulokseksi noin 0,223 kWh/m³. Kun samalla arvolla kerrotaan tämän työn navetan vuotuinen lannan määrä, saadaan pumppauksen vuotuiseksi energiankulutukseksi noin 303 kWh.

Lietelannan LTO:n kokonaissähköenergiankulutus on lämpöpumpun ja lannan pumppauksen vuotuisten sähköenergiankulutusten summa eli 18 047 kWh/v. Lietelannan LTO:n sähköenergiankulutus on jaettu tasaisesti lämpöpumpun käyttöajalle ja sen mukaan on tehty lämpöpumpun tuntinen tehontarveprofiili. Lämpöpumpun käyttöajan tuntinen sähkötehontarve lasketaan kaavalla 20.

$$P_{LTO,h} = \frac{E_{kompessori} + E_{pumppaus}}{t_{LTO}} \quad \text{KAAVA 20}$$

$P_{LTO,h}$ = lämpöpumpun tuntinen tehontarve (kW)

$E_{kompessori}$ = lämmöntalteenottopumpun kompressorin vuotuinen sähköenergiantarve (kWh/vuosi)

$E_{pumppaus}$ = lannan pumppauksen vuotuinen sähköenergiantarve (kWh/vuosi)

t_{LTO} = LTO:n vuotuinen käyttöaika (h/vuosi)

Sijoittamalla kaavaan arvot lietelannan LTO:n käyttöajan tuntiseksi kokonaissähkötehontarpeeksi saadaan

$$P_{LTO,h} = \frac{17743,688 \frac{kWh}{vuosi} + 302,991 \frac{kWh}{vuosi}}{6600 \frac{h}{vuosi}} = 2,734 \text{ kW} \approx 2,7 \text{ kW}$$

Lietelannan LTO:n tuntinen lämpötehontuotto on kolminkertainen tuntiseen sähkötehontarpeeseen verrattuna. LTO:n tuntinen lämpötehontuotto voidaan laskea kaavalla 21.

$$\phi_{LTO,h} = \frac{Q_{LTO}}{t_{LTO}} \quad \text{KAAVA 21}$$

$\phi_{LTO,h}$ = LTO:n tuntinen lämpötehontuotto (kW)

Q_{LTO} = lietelannan LTO:lla tuotettu lämpöenergia (kWh/vuosi)

t_{LTO} = LTO:n vuotuinen käyttöaika (h/vuosi)

Sijoittamalla kaavaan arvot lietelannan tuntiseksi lämpötehontuotoksi saadaan

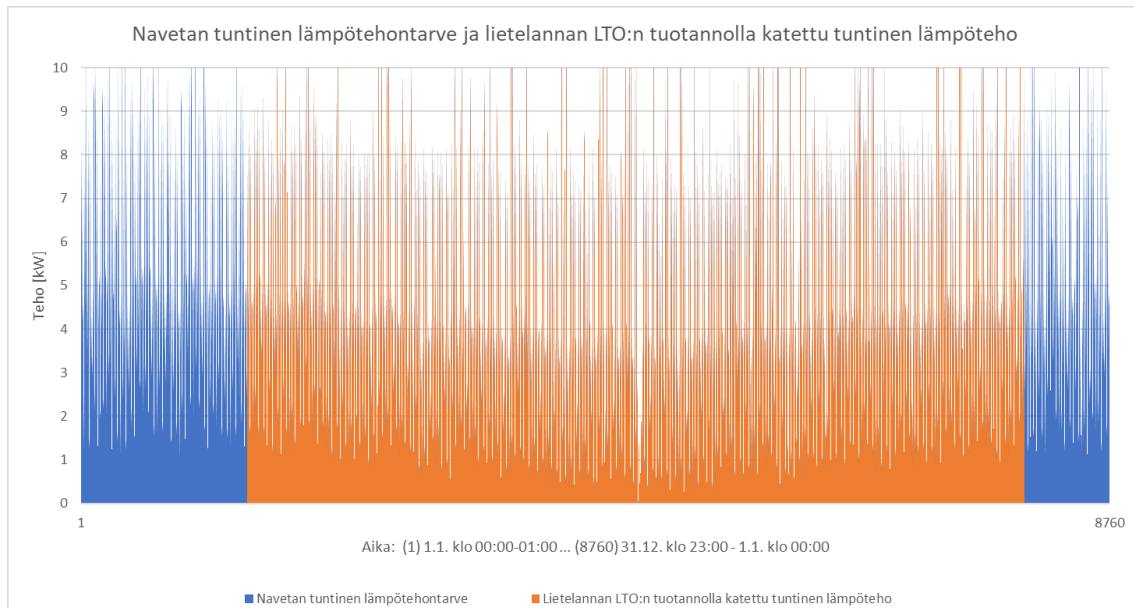
$$\phi_{LTO,h} = \frac{53231,063 \frac{kWh}{vuosi}}{6600 \frac{h}{vuosi}} = 8,065 kW \approx 8,1 kW$$

Navetan tuntisten lämpötehtötarpeiden ja lietalannan LTO:n tuottaman tuntisen lämpötehon avulla on tehty vastaava Excel-laskentataulukko kuin maidon LTO-osiossa (taulukko 4). Sen pohjalta on tehty yhteenvetotaulukko (taulukko 8).

TAULUKKO 8. *Lietelannan LTO-laskennan yhteenveto, kun lannasta saadaan koko energiasisältö talteen*

Lietelannan LTO			
Energiantarve	Määrä	Yksikkö	
Vuoden lämpöenergiatarve yhteensä	38542	kWh/vuosi	
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö	
LTO:n lämpöenergiantuotanto vuodessa	53231	kWh/vuosi	
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n energiaa varastoon	1527	kWh/vuosi	2,9 %
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
LTO:lla katettu kokonaisenergia	28012	kWh/vuosi	72,7 %
LTO:lla suorasti katettu lämpöenergia	26484	kWh/vuosi	68,7 %
LTO:lla epäsuorasti katettu lämpöenergia	1527	kWh/vuosi	4,0 %
Hukkaenergia	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n hyödyntämätön lämpöenergia	25219	kWh/vuosi	47,4 %
Sähkön kauppa	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen	10530	kWh/vuosi	27,3 %
Lietelannan LTO:n sähköenergiatarve (sis. lannan pumppaus)	18047	kWh/vuosi	
Omakäyttöasteet			
Lietelannan LTO:n omakäyttöaste	52,6 %		
LTO-lämpöpumpun arvoja	Määrä	Yksikkö	
Lannan energiasisällöstä hyötydyksi	100 %		
Laskennallinen tuntinen lämpötehtötuotto	8,1	kW	
Kompressorin laskennallinen tuntinen sähkötehtötarve	2,7	kW	
LTO:n todellinen sähkökulutus (ei lämmön ylituottoa. Sisältää lannan pumppauksen)	9640	kWh/vuosi	

Taulukosta nähdään, että lietalannassa on potentiaalia tuottaa huomattavasti enemmän lämpöenergiaa, kuin mitä sille on tarvetta. Vaikka lietalannasta saadaan kaikki hyöty irti, ei sillä saada katettua navetan lämpöenergiatarpeesta kuin reilu 28 000 kWh/v. Se on tarpeesta vajaa 73 %. Tämä johtuu siitä, ettei lietalannan LTO:a voida käyttää jatkuvasti ympäri vuoden. Kuvassa 26 on esitetty navetan tuntinen lämpötehtötarve ja lietalannan LTO:n lämmöntuotannolla katettu tuntinen lämpöteho, kun lannasta saadaan kaikki mahdollinen energia talteen.



KUVA 26. Navetan tuntinen lämpötehtarve ja lietalannan LTO:lla katettu tuntinen lämpöteho, kun lannan lämmöstä saadaan 100 % talteen

Kuvasta nähdään, että otettaessa lämpöä lannasta talteen, sillä saadaan katettua helposti koko lämpöenergiantarve. Kuitenkin vuoden kylmimpiä kuukausia varten lietalannan LTO tarvitsee rinnalleen vaihtoehtoisen lämmönkeruupiirin, jotta lämpöä olisi jatkuvasti saatavilla. Yleensä lietalannan LTO-investoinnin yhteydessä asennetaan samalla kertaa maalämmönkeruupiiri lantapiirin rinnalle. Lantakourujen keruupiirin rinnalla maalämpöpiiristä on hyötyä myös lämmön varastoinnissa maaperään. Navettaa voidaan jäähdyttää kuumina kesäpäivinä, vaikkei lämpöenergiantarvetta olisikaan. Maaperään varastoidun lämmön vaikutuksesta maan lämpötila on korkeampi, joten lämmöntuotannon tehokkuus paranee, kun lämpöenergiaa joudutaan ottamaan maalämpöpiirin kautta. Myös lietalannasta haihtuvien haju- ja ilmastopäästöjä aiheuttavien kaasujen määrä vähenee, kun lanta pysyy jatkuvasti sopivan viileänä. (40.)

Toinen syy, miksi lietalannan LTO:lla hyödyntämätöntä lämpöenergiaa syntyy yli 25 000 kWh/v, on, että lämpöä ei tarvita navetassa niin paljoa, kuin sitä voidaan tuottaa. Kaikki ylimääräinen lämpö ei myöskään mahdu varastoon, joten lämpöenergian hyötykäyttöön menevä määrä jää hieman yli puoleen tuotetusta ener-

giamäärästä. On kuitenkin huomioitava, että ylimääräistä LTO:lla tuotettua lämpöenergiaa on mahdollista hyödyntää navetan tilojen ja LKV:n lämmityksen lisäksi esimerkiksi lehmien juomaveden lämmitykseen. Ylituotetulla lämpöenergialla voisi lämmittää kaivokylmän 5 °C:n veden 17 °C:ksi juomavedeksi eläimille. Kaavaa 1 soveltamalla saadaan laskettua ylituotetulla lämpöenergialla lämmitetyn juomaveden määrä. Sijoittamalla kaavaan arvot saadaan lämmitetyn juomaveden vuotuiseksi määräksi

$$V_{\text{lämmin juomavesi}} = \frac{25219 \frac{\text{kWh}}{\text{vuosi}} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times (17 - 5) ^\circ\text{C}} = 1801 \frac{\text{m}^3}{\text{vuosi}}$$

Jos juomaveden tavoitelämpötila on 13,6 °C, joka on sama kuin mihin kaivovesi laskennallisesti lämpenee maidon esijäähdytyksessä, saadaan ylituotetulla lämmöllä lämmintä juomavettä jopa 2 519 m³/v. Ylituotettua lämpöenergiaa voidaan hyödyntää vaihtoehtoisesti navetan lisäksi myös muiden maatalan rakennusten lämmitykseen. Maatilalla on todennäköisesti myös muita navetan ulkopuolisia kohteita, joihin ylimääräistä lämpöenergiaa voisi hyödyntää, esimerkiksi viljan kuivaus.

Taulukosta 8 huomataan myös, että lisäenergiaa lopun lämmöntarpeen kattamiseen on ostettava sähköverkosta vielä yli 10 000 kWh/v. Tämän lisäksi lämmöntalteenotto lietalannasta lisää navetan sähköenergiantarvetta 18 047 kWh:n verran. Kuitenkaan silloin, kun navetan lämpöenergiantarve on saatu katettua ja varraaja ladattua, eikä muuta lämmönkulutusta ole, ei lämpöä oteta talteen. Silloin lietalannan LTO-lämpöpumppu on sammuksissa, eikä tällöin sähköenergiaa kulu sen toimintaan. Se tarkoittaa, ettei lämpöä tuoteta ylimääräisen 25 219 kWh:n verran. Kaavalla 22 voidaan laskea sähköenergian määrä, joka säästetään, kun lämpöä ei todellisuudessa ylituoteta.

$$E_{\text{ylituotto}} = \frac{Q_{\text{ylituotto}}}{COP_{H,\text{lämpöpumppu}}} \quad \text{KAAVA 22}$$

$E_{\text{ylituotto}}$ = lämmön ylituotannon sähköenergiankulutus (kWh/vuosi)

$Q_{ylituotto}$ = LTO:lla ylituotettu lämpöenergia (kWh/vuosi)

$COP_{H,lämpöpumppu}$ = lämpöpumpun lämpökerroin (-)

Sijoittamalla kaavaan arvot säästetyksi sähköenergiaksi saadaan

$$E_{ylituotto} = \frac{25219 \frac{kWh}{vuosi}}{3} = 8406 \frac{kWh}{vuosi}$$

Sähköenergiaa lietalannan LTO:n toimintaan kuluu tällöin 18 047 kWh:n sijaan 9 640 kWh/v, joka on lähes yhtä paljon kuin navetan vuotuinen lisälämpöenergian ostotarve. Navetan todellinen energiatase on taulukossa 9.

TAULUKKO 9. Navetan energiatase lietalannan LTO:lla

Navetan energiatase lietalannan LTO:lla		
Energiantarve	Määrä	Yksikkö
Sähköntarve	64773	kWh/vuosi
Lämmöntarve	38542	kWh/vuosi
Hyödyksi tuotettu energia	Määrä	Yksikkö
Katettu sähköenergia	0	kWh/vuosi
Katettu lämpöenergia	28012	kWh/vuosi
Ylituotettu energia	Määrä	Yksikkö
Ylituotettu lämpöenergia	25219	kWh/vuosi
Ostettava lisäenergia	Määrä	Yksikkö
sähkö	64773	kWh/vuosi
Lämpö	10530	kWh/vuosi
Yhteensä	75303	kWh/vuosi
Nettohyöty	18372	kWh/vuosi

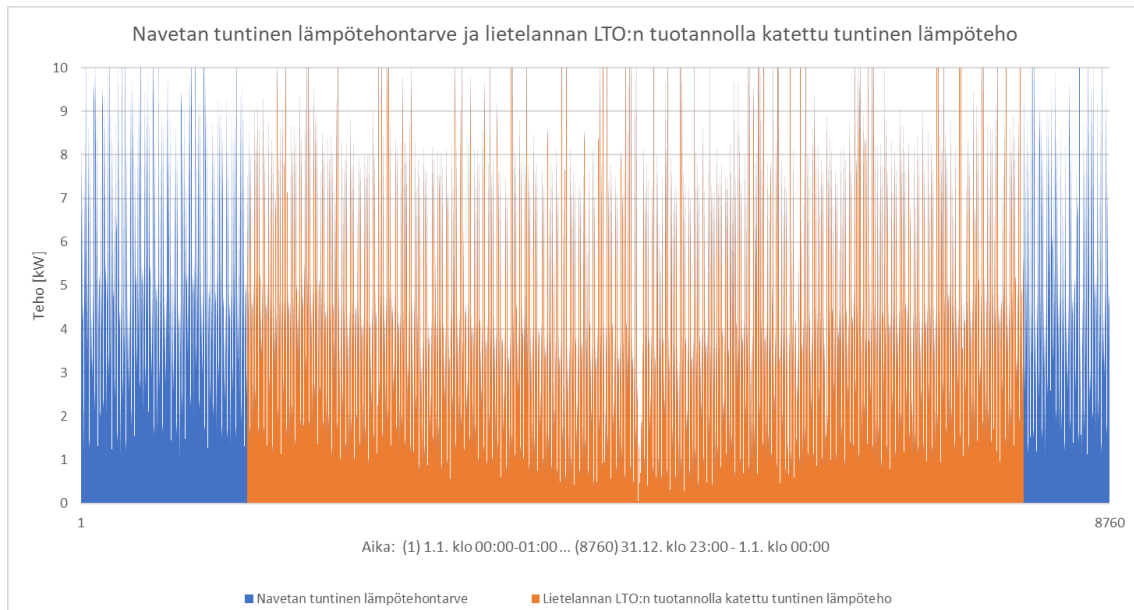
Taulukosta nähdään, että todellisuudessa navetan sähköenergiantarve lietalannan LTO:lla on 64 773 kWh/v. Kun verrataan lietalannan LTO-investointia tilanteeseen, jossa investointia ei tehdä, saadaan lietalannan LTO-investoinnin nettohyödyksi 18 372 kWh/v. Se tarkoittaa kokonaishyötyä, kun LTO:lla hyödyksi tuotetusta lämpöenergiasta vähennetään lämpöpumpun aiheuttama navetan sähköenergiantarpeen kasvu.

Oletetaan kuitenkin, ettei lietelannan lämpöenergiapotentialista saada irti koko energiasisältöä. Siitä syystä lietelannan LTO:a on tutkittu myös tapauksissa, joissa lannan energiasisällöstä saadaan talteen vain 60 % ja 45 %. Kun LTO:n avulla voidaan ottaa lannasta lämpöä talteen vain 60 % energiasisällöstä, saadaan taulukon 10 mukaiset arvot.

TAULUKKO 10. Lietelannan LTO-laskennan yhteenveto, kun lannasta saadaan 60 % energiasisällöstä talteen

Lietelannan LTO			
Energiantarve	Määrä	Yksikkö	
Vuoden lämpöenergiantarve yhteensä	38542	kWh/vuosi	
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö	
LTO:n lämpöenergiantuotanto vuodessa	31939	kWh/vuosi	
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n energiaa varastoon	6006	kWh/vuosi	18,8 %
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
LTO:lla katettu kokonaisenergia	27992	kWh/vuosi	72,6 %
LTO:lla suorasti katettu lämpöenergia	21986	kWh/vuosi	57,0 %
LTO:lla epäsuorasti katettu lämpöenergia	6006	kWh/vuosi	15,6 %
Hukkaenergia	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n hyödyntämätön lämpöenergia	3946	kWh/vuosi	12,4 %
Sähkön kauppa	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen	10549	kWh/vuosi	27,4 %
Lietelannan LTO:n sähköenergiantarve (sis. lannan pumppaus)	10949	kWh/vuosi	
Omakäyttöasteet			
Lietelannan LTO:n omakäyttöaste	87,6 %		
LTO-lämpöpumpun arvoja	Määrä	Yksikkö	
Lannan energiasisällöstä hyötydyksi	60 %		
Laskennallinen tuntinen lämpötehontuotto	4,8	kW	
Kompressorin laskennallinen tuntinen sähkötehontarve	1,6	kW	
LTO:n todellinen sähkökulutus (ei lämmön ylituottoa. Sisältää lannan pumppauksen)	9634	kWh/vuosi	

Taulukosta nähdään, että vaikka vuotuinen lämpöenergiantuotanto vähenee aiempaan täyteen hyötysuhteeseen verrattuna yli 21 000 kWh/v, saadaan heikommallakin hyötysuhteella katettua navetan lämpöenergiantarpeesta käytännössä yhtä suuri osuus. Nyt vain ylituotetun lämpöenergian määrä on vähentynyt huomattavasti. Lämmöntuotannon vähennyttä energian omakäyttöaste on noussut lähelle 88 %:a. Kuvassa 27 on esitetty navetan tuntinen lämpötehontarve ja lietelannan LTO:n lämmöntuotannolla katettu tuntinen lämpöteho, kun lannan lämmöstä saadaan 60 % talteen.



KUVA 27. Navetan tuntinen lämpötehtarve ja lietelannan LTO:lla katettu tuntinen lämpöteho, kun lannan lämmöstä saadaan 60 % talteen

Kuvasta huomataan, ettei LTO:n 40 % huonompi hyötysuhde juurikaan vaikuta katetun energian määrään. Taulukossa 11 on esitetty navetan energiatase lietelannan LTO:n 60 %:n hyötysuhteella.

TAULUKKO 11. Navetan energiatase lietelannan LTO:lla 60 %:n hyötysuhteella

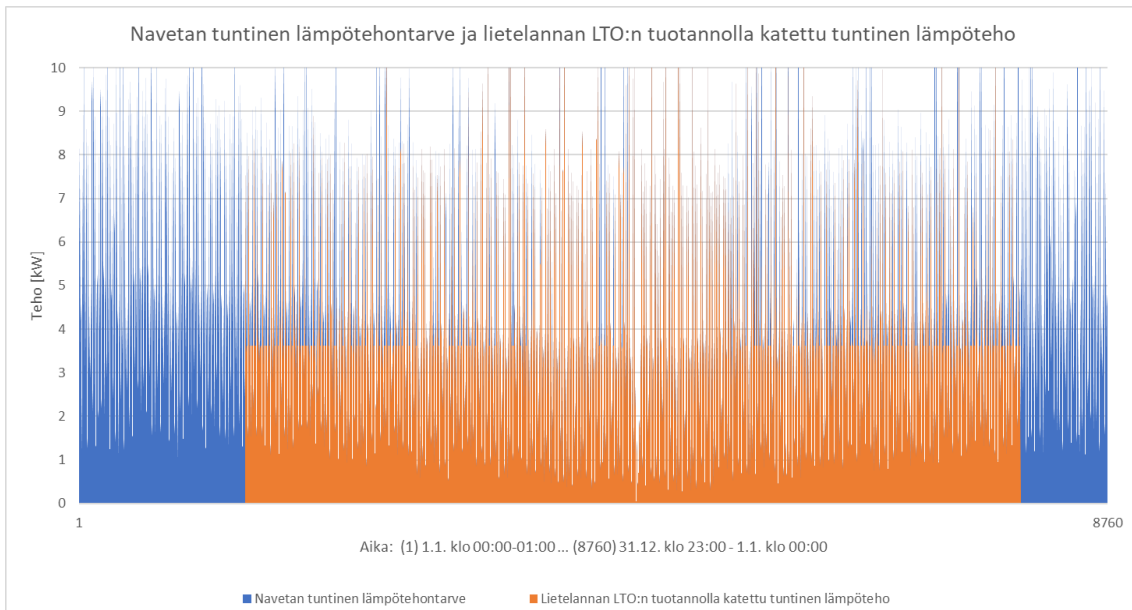
Navetan energiatase lietelannan LTO:lla		
Energiantarve	Määrä	Yksikkö
Sähkötarve	64767	kWh/vuosi
Lämmöntarve	38542	kWh/vuosi
Hyödyksi tuotettu energia	Määrä	Yksikkö
Katettu sähköenergia	0	kWh/vuosi
Katettu lämpöenergia	27992	kWh/vuosi
Ylituotettu energia	Määrä	Yksikkö
Ylituotettu lämpöenergia	3946	kWh/vuosi
Ostettava lisäenergia	Määrä	Yksikkö
sähkö	64767	kWh/vuosi
Lämpö	10549	kWh/vuosi
Yhteensä	75316	kWh/vuosi
Nettohyöty	18359	kWh/vuosi

Taulukosta nähdään, ettei LTO:n hyötysuhteen 40 %:n laskulla ole juurikaan vaikutusta navetan energiataseeseen. Lietelannan LTO:n nettohyöty ei käytännössä juuri muutu. Kun lietelannan LTO:n hyötysuhdetta vielä lasketaan 45 %:iin, saadaan lietelannan LTO:lle taulukon 12 mukaiset arvot.

TAULUKKO 12. Lietelannan LTO-laskennan yhteenveto, kun lannasta saadaan 45 % energiasäällöstä talteen

Lietelannan LTO			
Energiantarve	Määrä	Yksikkö	
Vuoden lämpöenergiantarve yhteensä	38542	kWh/vuosi	
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö	
LTO:n lämpöenergiantuotanto vuodessa	23954	kWh/vuosi	
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n energiaa varastoon	5128	kWh/vuosi	21,4 %
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
LTO:lla katettu kokonaisenergia	23913	kWh/vuosi	62,0 %
LTO:lla suorasti katettu lämpöenergia	18785	kWh/vuosi	48,7 %
LTO:lla epäsuorasti katettu lämpöenergia	5128	kWh/vuosi	13,3 %
Hukkaenergia	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n hyödyntämätön lämpöenergia	41	kWh/vuosi	0,2 %
Sähkön kauppa	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen	14629	kWh/vuosi	38,0 %
Lietelannan LTO:n sähköenergiantarve (sis. lannan pumppaus)	8288	kWh/vuosi	
Omakäyttöasteet			
Lietelannan LTO:n omakäyttöaste	99,8 %		
LTO-lämpöpumpun arvoja	Määrä	Yksikkö	
Lannan energiasäällöstä hyötydyksi	45 %		
Laskennallinen tuntinen lämpöteho	3,6	kW	
Kompressorin laskennallinen tuntinen sähköteho	1,2	kW	
LTO:n todellinen sähkökulutus (ei lämmön ylituottoa. Sisältää lannan pumppauksen)	8274	kWh/vuosi	

Taulukosta nähdään, että kun lannan energiasta saadaan talteen 45 %, voidaan sillä kattaa energiantarpeesta vielä lähes 24 000 kWh/v. Energian ylituotantoa ei enää juurikaan synny. Lähes kaikki tuotettu energia saadaan hyödynnettyä oman lämmöntarpeen kattamiseen. Kuvassa 28 on esitetty navetan tuntinen lämpöteho ja lietelannan LTO:n lämmöntuotannolla katettu tuntinen lämpöteho, kun lannan lämmöstä saadaan 45 % talteen.



KUVA 28. Navetan tuntinen lämpötehotarve ja lietalannan LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho, kun lannan lämmöstä saadaan 45 % talteen

Kuvasta nähdään, kuinka hyvin LTO:n käyttöaikana navetan energiantarve saadaan katettua omalla lämmöntuotannolla. Taulukossa 13 on esitetty navetan energiatase lietalannan LTO:n 45 %:n hyötysuhteella. Taulukosta huomataan, että kun lannan energiasisällöstä saadaan talteen vain 45 %, lietalannan LTO:n nettohyöty alkaa lähennellä maidon LTO:lla saavutettavaa nettohyötyä.

TAULUKKO 13. Navetan energiatase lietalannan LTO:n 45 %:n hyötysuhteella

Navetan energiatase lietalannan LTO:lla		
Energiantarve	Määrä	Yksikkö
Sähköntarve	63407	kWh/vuosi
Lämmöntarve	38542	kWh/vuosi
Hyödyksi tuotettu energia	Määrä	Yksikkö
Katettu sähköenergia	0	kWh/vuosi
Katettu lämpöenergia	23913	kWh/vuosi
Ylituotettu energia	Määrä	Yksikkö
Ylituotettu lämpöenergia	41	kWh/vuosi
Ostettava lisäenergia	Määrä	Yksikkö
sähkö	63407	kWh/vuosi
Lämpö	14629	kWh/vuosi
Yhteensä	78036	kWh/vuosi
Nettohyöty	15639	kWh/vuosi

3.4 Maidon ja lietelannan yhdistetty LTO

Tutkitaan seuraavaksi tapausta, jossa navettaan tehdään sekä maidon että lietelannan LTO-investointi. Maidosta ja lietteestä otetaan energiaa talteen yhtä aikaa erillisillä omilla LTO-lämpöpumpuilla. Maidon ja lietelannan yhdistetyn LTO:n sekä navetan tuntisten tehojen pohjalta on tehty taulukkoa 4 vastaava Excel-laskentataulukko. Taulukossa on laskettu maidon ja lietelannan LTO:lla tuotetut tuntiset tehot yhteen ja tällä tavalla tarkasteltu LTO:a yhtenä kokonaisuutena. Maidon ja lietelannan yhteistä LTO:a tutkitaan kolmella eri vaihtoehdolla. Ensimmäisessä vaihtoehdossa tarkastellaan tapausta, jossa sekä maidosta että lietelannasta saadaan talteen kaikki mahdollinen lämpöenergia. Toisessa tapauksessa maidon LTO-lämmönsiirtimeen hyötysuhde on 60 % ja lietelannan lämmöstä saadaan otettua talteen 60 %. Viimeisessä tapauksessa tutkitaan tilannetta, jossa maidon LTO-lämmönsiirtimeen hyötysuhde on 45 % ja lietelannan lämmöstä saadaan talteen 45 %.

Kaikissa tapauksissa lämpöenergiaa varastoidaan lauhdesäiliössä ja lämminvesivaraajassa, joiden tilavuus on yhteensä 1500 l. Lämpöenergiaa voidaan varastoida siis enimmillään 87,5 kWh kerrallaan. Tässä ajatellaan, että lauhdesäiliöstä kierrätetään vettä toisistaan erillisillä linjoilla maidon ja lannan lämpöpumppujen lauhduttimien kautta. Loppu lämpöenergiantarve katetaan sähköverkosta ostettavalla sähköenergialla.

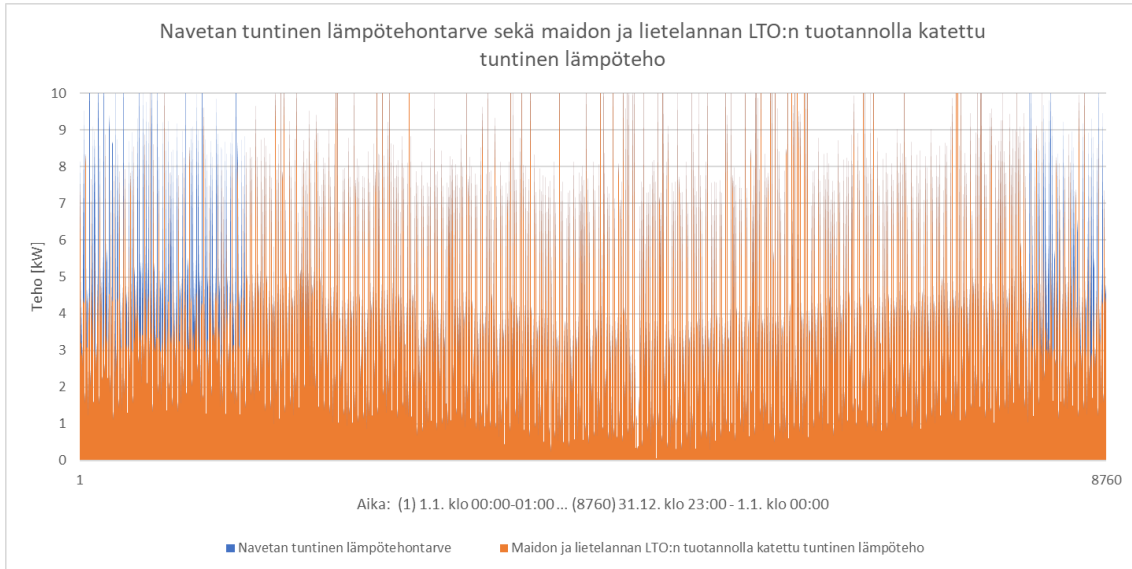
Vaikka maidon ja lietelannan LTO:n lämpötehot ovatkin laskennan yksinkertaistamiseksi yhdistetty, maidon LTO on ensisijainen lämmönlähde. Maitoa on joka tapauksessa jäähdytettävä riippumatta, otetaanko maidosta lämpöä talteen vai ei. Se myös kuluttaa tapauksesta riippumatta aina yhtä paljon sähköenergiaa. Maidon LTO:lla tuotettu lämpö voidaan aikaisempien laskujen perusteella myös käytännössä aina hyödyntää kokonaan navetan lämmöntarpeen kattamiseen. Lietelämmöllä katetaan mahdollisuuksien mukaan loppu lämpöenergiantarpeesta. Lypsykarjanavetassa lietelannan LTO:lle ei ole pakollista tarvetta navetan muiden toimintojen kannalta, joten lämpöpumpun ei tarvitse olla koko ajan päällä. Excel-laskentataulukon tulosten perusteella on laadittu yhteenvetotaulukot eri tapauksista. Ensimmäisen vaihtoehdon yhteenveto on taulukossa 14.

TAULUKKO 14. Maidon ja lietalannan yhdistetyn LTO:n yhteenvetotaulukko, kun maidon LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 100 % ja lannan lämmöstä saadaan 100 % talteen

Maidon + Lietalannan LTO			
Energiantarve	Määrä	Yksikkö	
Vuoden lämpöenergiantarve yhteensä	38542	kWh/vuosi	
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n lämpöenergiantuotanto yhteensä	85452	kWh/vuosi	100,0 %
Maidon LTO:n lämpöenergiantuotanto	32221	kWh/vuosi	37,7 %
Lietalannan LTO:n lämpöenergiantuotanto	53231	kWh/vuosi	62,3 %
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n energiaa varastoon	1645	kWh/vuosi	1,9 %
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
LTO:lla katettu kokonaisenergia	36092	kWh/vuosi	93,6 %
Maidon LTO:lla katettu lämpöenergia	32184	kWh/vuosi	83,5 %
Lietalannan LTO:lla katettu lämpöenergia	3908	kWh/vuosi	10,1 %
LTO:lla suoraan katettu lämpöenergia	34450	kWh/vuosi	89,4 %
LTO:lla epäsuoraan katettu lämpöenergia	1642	kWh/vuosi	4,3 %
Hukkaenergia	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n ylituotettu lämpöenergia	49357	kWh/vuosi	57,8 %
Sähkön kauppa	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen	2450	kWh/vuosi	6,4 %
Lietalannan LTO:n sähköenergiantarve (sis. lannan pumppaus)	18047	kWh/vuosi	
Omakäyttöasteet			
Maidon ja lietalannan yhdistetyn LTO:n omakäyttöaste	42,2 %		
Maidon LTO:n omakäyttöaste	99,9 %		
Lietalannan LTO:n omakäyttöaste	7,3 %		
LTO-lämpöpumpun arvoja	Määrä	Yksikkö	
Lannan energiasisällöstä hyödynsi	100 %		
Maidon LTO-lauhduttimen hyötysuhde	100 %		
Laskennallinen yhdistetty tuntinen huipputehontuotto	14,2	kW	
Kompressoreiden yhdistetty laskennallinen maksimisähköteho	4,8	kW	
Lietalannan LTO:n todellinen sähkönkulutus (Ei lämmön ylituottoa. Sisältää lannan pumppauksen)	1594	kWh/vuosi	

Taulukosta nähdään, että maidon ja lietalannan LTO:n lämmöntuotannolla saadaan tuotettua lämpöenergiaa yli kaksinkertainen määrä verrattuna navetan vuotuisen lämpöenergiantarpeeseen. Tuotetulla lämpöenergialla ei kuitenkaan saada katettua lämpöenergiantarpeesta kuin reilu 36 000 kWh/v eli 93,6 %. Lisäksi lämpöenergiaa on vielä ostettava hieman lisää sähköverkosta. Maidon LTO:lla pystytään kattamaan reilu 32 000 kWh/v, jolloin sen omakäyttöaste on 99,9 %. Lietalannan LTO:n suuremmasta lämpöenergiantuotannosta huolimatta sillä voidaan kattaa vain muutama tuhat kilowattituntia omakäyttöasteen jää-

dessä vain 7,3 %:iin. Energiaa jää hyödyntämättä yhteensä lähes 60 % täydestä tuotantopotentiaalista. Kuvassa 29 on navetan tuntinen lämpötehtarve sekä maidon ja lietalannan LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho.



KUVA 29. Navetan tuntinen lämpötehtarve sekä maidon ja lietalannan LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho, kun maidon LTO-lämmönsiirtimeen hyötysuhde on 100 % ja lannan lämmöstä saadaan 100 % talteen

Kuvasta nähdään, kuinka kattavasti omalla LTO:n lämmöntuotannolla voidaan parhaimmassa tapauksessa vastata lämpöenergiatarpeeseen. Taulukossa 15 on esitetty navetan energiatase parhaimmassa tapauksessa maidon ja lietalannan yhdistetyllä LTO:lla.

TAULUKKO 15. Navetan energiatase maidon ja lietelannan yhdistetyllä LTO:lla parhaimmassa tapauksessa

Navetan energiatase maidon ja lietelannan LTO:lla		
Energiantarve	Määrä	Yksikkö
Sähköntarve	56727	kWh/vuosi
Lämmöntarve	38542	kWh/vuosi
Hyödyksi tuotettu energia	Määrä	Yksikkö
Katettu sähköenergia	0	kWh/vuosi
Katettu lämpöenergia	36092	kWh/vuosi
Ylituotettu energia	Määrä	Yksikkö
Ylituotettu lämpöenergia	49357	kWh/vuosi
Ostettava lisäenergia	Määrä	Yksikkö
sähkö	56727	kWh/vuosi
Lämpö	2450	kWh/vuosi
Yhteensä	59177	kWh/vuosi
Nettohyöty	34498	kWh/vuosi

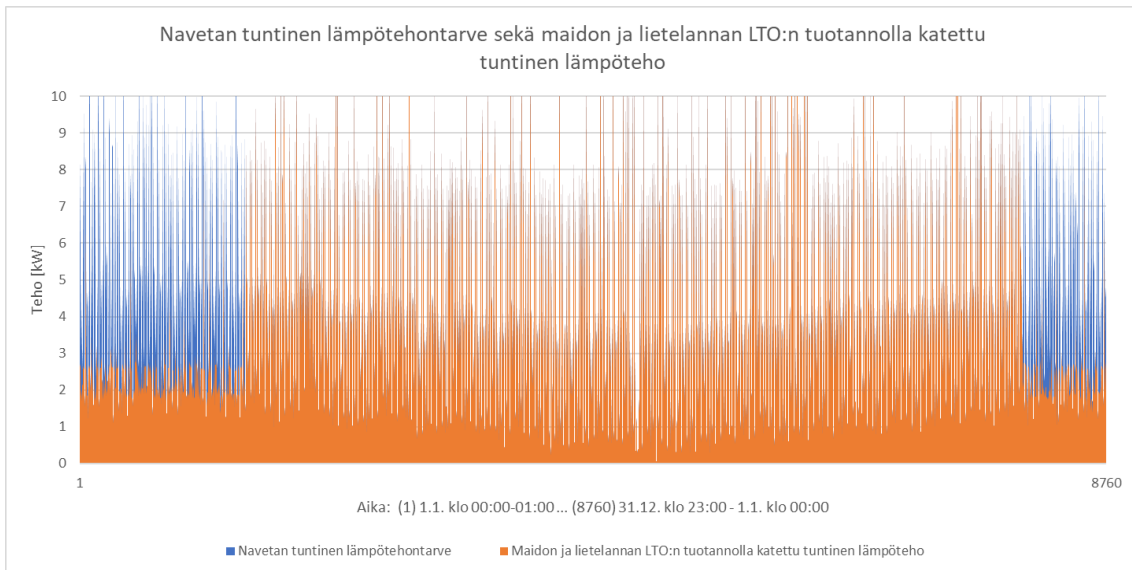
Taulukoista 14 ja 15 nähdään, ettei lietelannan LTO lisää navetan vuotuista sähköenergiantarvetta kuin vajaalla 1 600 kWh:lla vuodessa. Se myös tarkoittaa, että lietelannan LTO-lämpöpumppu on suurimman osan mahdollisesta käyttöajasta pysäytettynä, koska energiantarvetta ei ole, eikä ylimääräistä lämpöenergiaa tuoteta. Tässä vaihtoehdossa lietelannan LTO ei vaikuta kovinkaan kannattavalta investoinnilta maidon LTO:n rinnalle.

Toisessa vaihtoehdossa tarkastellaan tapausta, jossa maidon LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 60 % samoin kuin lietelannasta talteen saatavan lämmön osuus. Tätä vaihtoehtoa kuvaa taulukko 16.

TAULUKKO 16. Maidon ja lietelannan yhdistetyn LTO:n yhteenvetotaulukko, kun maidon LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 60 % ja lannan lämmöstä saadaan 60 % talteen

Maidon + Lietelannan LTO			
Energiantarve	Määrä	Yksikkö	
Vuoden lämpöenergiatarve yhteensä	38542	kWh/vuosi	
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n lämpöenergiantuotanto yhteensä	51271	kWh/vuosi	100,0 %
Maidon LTO:n lämpöenergiantuotanto	19333	kWh/vuosi	37,7 %
Lietelannan LTO:n lämpöenergiantuotanto	31939	kWh/vuosi	62,3 %
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n energiaa varastoon	2909	kWh/vuosi	5,7 %
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
LTO:lla katettu kokonaisenergia	32866	kWh/vuosi	85,3 %
Maidon LTO:lla katettu lämpöenergia	19333	kWh/vuosi	50,2 %
Lietelannan LTO:lla katettu lämpöenergia	13534	kWh/vuosi	35,1 %
LTO:lla suoraan katettu lämpöenergia	29957	kWh/vuosi	77,7 %
LTO:lla epäsuoraan katettu lämpöenergia	2909	kWh/vuosi	7,5 %
Hukkaenergia	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n ylituotettu lämpöenergia	18405	kWh/vuosi	35,9 %
Sähkön kauppa	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen	5675	kWh/vuosi	14,7 %
Lietelannan LTO:n sähköenergiatarve (sis. lannan pumppaus)	10949	kWh/vuosi	
Omakäyttöasteet			
Maidon ja lietelannan yhdistetyn LTO:n omakäyttöaste	64,1 %		
Maidon LTO:n omakäyttöaste	100,0 %		
Lietelannan LTO:n omakäyttöaste	42,4 %		
LTO-lämpöpumpun arvoja	Määrä	Yksikkö	
Lannan energiasisällöstä hyödyksi	60 %		
Maidon LTO-lauhduttimen hyötysuhde	60 %		
Laskennallinen yhdistetty tuntinen huipputehontuotto	8,5	kW	
Kompressoreiden yhdistetty laskennallinen maksimisähkötehtävyys	3,7	kW	
Lietelannan LTO:n todellinen sähkökulutus (Ei lämmön ylituottoa. Sisältää lannan pumppauksen)	4814	kWh/vuosi	

Taulukosta huomataan, että tällä vaihtoehdolla lietelannan LTO:n tuotannolla alkaa olemaan merkitystä energiankulutuksen kattamisessa. Kuvassa 30 on navetan tuntinen lämpötehtävyys ja maidon ja lietelannan LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho ja taulukossa 17 on navetan todellinen energiatase.



KUVA 30. Navetan tuntinen lämpöteho ja maidon ja lietalannan LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho, kun maidon LTO-lämmönsiirtimeen hyötysuhde on 60 % ja lannan lämmöstä saadaan 60 % talteen

TAULUKKO 17. Navetan energiatase maidon ja lietalannan yhdistetyllä LTO:lla, maidon LTO-lämmönsiirtimeen 60 % hyötysuhteella ja vastaavalla lietalannasta talteen saatavan lämmön osuudella

Navetan energiatase maidon ja lietalannan LTO:lla		
Energiantarve	Määrä	Yksikkö
Sähköntarve	59947	kWh/vuosi
Lämmöntarve	38542	kWh/vuosi
Hyödyksi tuotettu energia	Määrä	Yksikkö
Katettu sähköenergia	0	kWh/vuosi
Katettu lämpöenergia	32866	kWh/vuosi
Ylituotettu energia	Määrä	Yksikkö
Ylituotettu lämpöenergia	18405	kWh/vuosi
Ostettava lisäenergia	Määrä	Yksikkö
sähkö	59947	kWh/vuosi
Lämpö	5675	kWh/vuosi
Yhteensä	65622	kWh/vuosi
Nettohyöty	28052	kWh/vuosi

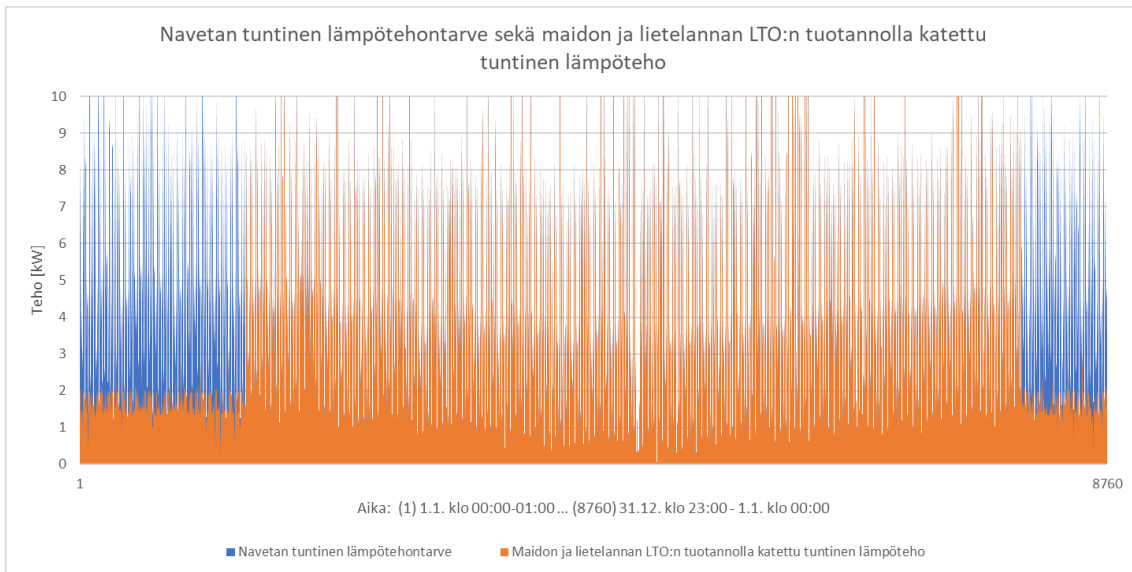
Taulukosta nähdään tämän vaihtoehdon nettohyödyn olevan kokonaisuudessaan reilu 28 000 kWh/v. Koska maidon LTO katsotaan ensisijaiseksi lämmöntuotantotavaksi eikä se lisää navetan energiantarvetta, voidaan maidon LTO:n nettohyötynä pitää sillä katettua lämpöenergian määrää. Maidon LTO:lla saadaan katettua kokonaishyödystä 19 333 kWh/v, joten lietalannan osuudeksi jää tällöin 8 719 kWh/v. Voidaankin miettiä, onko tässäkin tapauksessa järkevää investoida suhteellisen hintavana pidettyyn lietalannan LTO-järjestelmään, jos siitä saatava hyöty jää alle 9 000 kWh:iin/v.

Kolmannessa vaihtoehdossa tarkastellaan tapausta, jossa maidon LTO-lämmönsiirtimeen hyötysuhde on 45 % samoin kuin lietalannasta talteen saatavan lämmön osuus. Tätä vaihtoehtoa kuvaa taulukko 18.

TAULUKKO 18. Maidon ja lietalannan yhdistetyn LTO:n yhteenvetotaulukko, kun maidon LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 45 % ja lannan lämmöstä saadaan 45 % talteen

Maidon + Lietalannan LTO			
Energiantarve	Määrä	Yksikkö	
Vuoden lämpöenergiantarve yhteensä	38542	kWh/vuosi	
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n lämpöenergiantuotanto yhteensä	38454	kWh/vuosi	100,0 %
Maidon LTO:n lämpöenergiantuotanto	14500	kWh/vuosi	37,7 %
Lietelannan LTO:n lämpöenergiantuotanto	23954	kWh/vuosi	62,3 %
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n energiaa varastoon	5297	kWh/vuosi	13,8 %
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
LTO:lla katettu kokonaisenergia	31645	kWh/vuosi	82,1 %
Maidon LTO:lla katettu lämpöenergia	14500	kWh/vuosi	37,6 %
Lietelannan LTO:lla katettu lämpöenergia	17146	kWh/vuosi	44,5 %
LTO:lla suoraan katettu lämpöenergia	26349	kWh/vuosi	68,4 %
LTO:lla epäsuoraan katettu lämpöenergia	5297	kWh/vuosi	13,7 %
Hukkaenergia	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta
LTO:n ylituotettu lämpöenergia	6808	kWh/vuosi	17,7 %
Sähkön kauppa	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen	6896	kWh/vuosi	17,9 %
Lietelannan LTO:n sähköenergiantarve (sis. lannan pumppaus)	8288	kWh/vuosi	
Omakäyttöasteet			
Maidon ja lietalannan yhdistetyn LTO:n omakäyttöaste	82,3 %		
Maidon LTO:n omakäyttöaste	100,0 %		
Lietelannan LTO:n omakäyttöaste	71,6 %		
LTO-lämpöpumpun arvoja	Määrä	Yksikkö	
Lannan energiasisällöstä hyödyksi	45 %		
Maidon LTO-lauhduttimen hyötysuhde	45 %		
Laskennallinen yhdistetty tuntinen huipputehontuotto	6,4	kW	
Kompressoreiden yhdistetty laskennallinen maksimisähköteho	3,3	kW	
Lietelannan LTO:n todellinen sähkökulutus (Ei lämmön ylituottoa. Sisältää lannan pumppauksen)	6018	kWh/vuosi	

Taulukosta huomataan, että lämpöä voidaan tuottaa vielä navetan lämpöenergiantarpeen verran. Tuotannosta hyötykäyttöön saadaan yli 82 %. Kuvassa 31 on navetan tuntinen lämpöteho ja maidon ja lietalannan LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho. Taulukosta 19 nähdään navetan todellinen energiatase tällä vaihtoehdolla.



KUVA 31. Navetan tuntinen lämpötehotarve sekä maidon ja lietalannan LTO:n tuotannolla katettu tuntinen lämpöteho, kun maidon LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 45 % ja lannan lämmöstä saadaan 45 % talteen

TAULUKKO 19. Navetan energiatase maidon ja lietalannan yhdistetyllä LTO:lla, maidon LTO-lämmönsiirtimen 45 %:n hyötysuhteella ja vastaavalla lietalannasta talteen saatavan lämmön osuudella

Navetan energiatase maidon ja lietalannan LTO:lla		
Energiantarve	Määrä	Yksikkö
Sähköntarve	61151	kWh/vuosi
Lämmöntarve	38542	kWh/vuosi
Hyödyksi tuotettu energia	Määrä	Yksikkö
Katettu sähköenergia	0	kWh/vuosi
Katettu lämpöenergia	31645	kWh/vuosi
Ylituotettu energia	Määrä	Yksikkö
Ylituotettu lämpöenergia	6808	kWh/vuosi
Ostettava lisäenergia	Määrä	Yksikkö
sähkö	61151	kWh/vuosi
Lämpö	6896	kWh/vuosi
Yhteensä	68047	kWh/vuosi
Nettohyöty	25627	kWh/vuosi

Taulukosta nähdään, että maidon LTO:n lämmöntuottokyvyn vähentyessä sähköenergian tarve kasvaa, koska lannasta joudutaan ottamaan enemmän energiaa talteen. Nyt LTO-investoinnin nettohyödyistä maidon LTO:n osuus on 14 500 kWh/v ja lietelannan 11 127 kWh/v.

3.5 LTO-ratkaisujen kannattavuus

Edellä esitettyjen laskujen perusteella ei voida suoraan laittaa LTO-vaihtoehtoja paremmuusjärjestykseen. Maidon LTO vaikuttaa karkean arvioinnin perusteella kannattavalta ratkaisulta. Maidon LTO ei lisää navetan sähkönkulutusta, sillä maito joudutaan joka tapauksessa jäähdyttämään. Se kuluttaa siis saman määrän energiaa, oli lämmöntalteenottoa tai ei. Varovaiset laskelmat maidon LTO:sta heikommallakin lauhdutusteholla näyttävät lupaavilta ja tehokkaamalla lämmönsiirtimellä kannattavuus vain paranee.

Lietelannan LTO:n haasteina on, ettei lämpöä voida tuottaa ympäri vuoden pelkällä lantakourun keruupiirillä jäätymisvaaran vuoksi. Lisäksi lietelannan LTO-järjestelmän kannattavuutta ei voida arvioida ilman tarkempia kustannusselvityksiä. Yleisesti tarkasteltuna maalämmöllä on suurehkot investointikustannukset, mutta sen avulla tuotettu energia on halpaa. Laitteiston hintaan vaikuttaa paljon se, onko tarkoitus vain jäähdyttää lantaa ja ottaa vain siitä lämpöä talteen. Toinen vaihtoehto on lannan lisäksi ottaa lisälämpöä muualtakin, kuten maapiiristä tai porakaivosta. Lisäksi täytyy miettiä, halutaanko samalla laitteistolla jäähdyttää myös maitoa ennen sen tankkiin menoa, mikä on myös mahdollista. Järjestelmä on lähtökohtaisesti suunniteltava jokaista kohdetta varten erikseen. Lannan LTO:n investointikustannukset ovat arvioilta 10 000–50 000 €.

(37, s. 43; 41, s. 45.)

Lantakourujen lämmönkeruupiirissä on se etu maalämpöpiiriin tai porakaivoon verrattuna, että järjestelmän kustannukset ovat yleisesti edullisemmat ja keruupiirin voi upottaa lantakourujen betonivaluun helposti navetan laajennustoimenpiteiden yhteydessä. Lisäksi lietelannan keruupiiristä on energiatehokkaampaa kerätä lämpöä, sillä lantakourujen lämpötila on maalämpöä korkeampi sekä lämpimän lietteen että navetan lämpimien pesuvesien vuoksi. Näin lantakourun

keruupiirin hyötysuhde on korkeampi, jolloin yhtä paljon energiaa saadaan talteen vähemmällä energiankulutuksella, mikä vähentää myös kustannuksia ja parantaa kannattavuutta. Lämpöpumpun lämpökerroin voi todellisuudessa olla lantapiiriä käytettäessä huomattavasti laskennan arvoa korkeampi. (40; 37 s. 14.)

Toisaalta, vaikka lietelannan LTO:lla onkin hyvä potentiaali lämmöntuotannossa, ei lämpöä ole järkevää tuottaa, jos sille ei ole tarvetta. Lietelannan LTO:n lämmöntuotanto painottuu kevät-, kesä- ja syysaikaan, jolloin lämpöä saadaan tuotettua vähintäänkin riittävästi. Talvella taas, kun lämmölle on eniten tarvetta, ei lämpöä voida tuottaa ilman maalämmönkeruupiiriä tai yhdistämistä maidon LTO:n kanssa. Jos ylituotetulle lämmölle löytyy tarvetta, voi lietelannan LTO-järjestelmä olla kannattava investointi.

Kun tarkastellaan navetan energiatasetta lietelannan LTO:lla, huomataan, että vaikka lämpöä saataisiin sillä katettua reilu 23 900 kWh/v, samalla lisäänty sähköenergian tarve lähes 8 300 kWh/v, joten nettohyödyksi muodostuu noin 15 600 kWh/v. Maidon LTO:n nettohyöty on sama kuin sillä katettu vuotuinen energia eli 14 500 kWh/v, koska sähköenergian tarve ei lisäännä. Näin maidon LTO:n nettohyöty häviää lietelannan LTO:n nettohyödyille vain reilulla 1000 kWh:lla vuodessa, mutta maidon LTO on todennäköisesti selvästi halvempi ja yksinkertaisempi investointi kuin lietelannan LTO. Lisäksi tulee varmistaa, tarvitseeko lietelannan LTO-järjestelmä lietelannan koneellista kierrätystä lietekouruissa vai ei. Navettahankkeessa ei ole tarkoitusta sellaista järjestelmää laittaa, vaan tarkoitus on tehdä vain syvät lietekuilut ilman pumppaustarvetta (2).

Maidon ja lietelannan LTO yhdistämällä nettoenergiaa saadaan tuotettua hyödyksi yhteensä reilu 25 600 kWh/v, kun navetan todellinen sähköenergian tarve kasvaa lietelannan lämpöpumpun vuoksi yli 6 000 kWh/v. Kun nettohyödyistä vähennetään maidon LTO:n vaikutus, jää lietelämmön LTO:n nettohyödyksi noin 11 100 kWh/v, mikä voi olla varsin vähän verrattuna investoinnin kustannuksiin. Tässä työssä on kuitenkin ajateltu, että maidon ja lietelannan LTO-järjestelmät toimisivat omilla erillisillä lämpöpumpuillaan, mutta käytännössä on myös mahdollista, että samalla laitteistolla, jolla kerätään lämpöä lietelannasta,

voitaisiin jäähdyttää myös maitoa eli ottaa maidosta lämpöä talteen (41, s. 45).
Tällainen vaihtoehto vaikuttaa hyvin mielenkiintoiselta ja sitä kannattaisi tutkia
tarkemmin.

4 AURINKOSÄHKÖ

Tässä osassa selvitetään aurinkosähkön mahdollisuuksia navetan energiaomavaraisuuden kehittämisessä. Aurinkosähkön hyödyntämistä tutkitaan ensin navetan sähköenergiantarpeen kattamisessa. Aurinkosähköä voidaan hyödyntää myös lämpöenergiana, joten tutkitaan aurinkopaneelien sähköntuotannon hyödyntämismahdollisuuksia myös navetan lämpöenergiantarpeen kattamisessa. Näiden lisäksi tarkastellaan, kuinka aurinkosähköntuotanto sekä lämmöntalteenotto maidosta ja lietelannasta voidaan yhdistää hybridiratkaisuiksi. Aurinkosähkötarkaisuja pohditaan myös taloudellisen kannattavuuden näkökulmasta.

4.1 Aurinkopaneelit sähköntuotannossa

Aurinkosähkön tutkiminen aloitetaan selvittämällä auringon säteilymäärä. Auringonsäteilyn pinta-alalle kohdistuvat tuntiset tehot saadaan selvitettyä Euroopan komission PVGIS-työkalulla (42). Työkaluun syötetään navetan sijaintikoordinaatit, minkä jälkeen työkalusta voidaan ladata säteilyn tuntiset tiedot Excel-tiedostomuodossa. Työkalusta on ladattu auringon säteilytiedot vuosilta 2012–2016. Auringon säteilytiedoista tärkein on auringon pinta-alalle kohdistuva tuntinen säteilyteho. Lisäksi työkalu antaa aurinkopaneelien optimaalisimman kallistuskulman. Auringon säteilyn tuntisista tehoista viiden vuoden ajalta on laskettu jokaiselle tunnille keskiarvo, jota on käytetty aurinkopaneelien sähköntuotannon laskennassa. PVGIS-työkalun antamien viiden vuoden optimaalisimpien kallistuskulmien keskiarvo on 50,4 astetta (42). Kuvassa 32 on esitetty auringon keskimääräiset säteilymäärät ja niiden osuudet eri kuukausilta.



KUVA 32. Auringon keskimääräinen säteily määrä kuukaudessa vuosilta 2012–2016

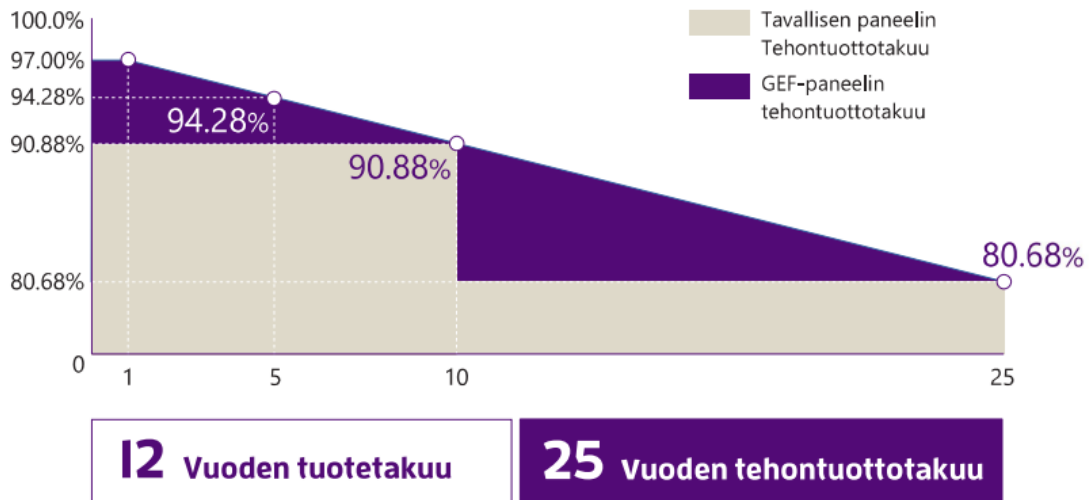
Kuvasta nähdään, että auringon säteily määrästä suurin osa ajoittuu maaliskuun alun ja lokakuun lopun välille. Kyseisellä ajanjaksolla saadaan yli 95 % koko vuoden säteily määrästä, koska valoisia tunteja on paljon. Eniten aurinkoenergiaa on saatavissa toukokuusta heinäkuuhun.

Tutkitaan aurinkosähköntuotannon osalta ensin vain valoisien tuntien sähköenergian tarvetta, koska pimeään aikaan aurinkosähköä ei voida tuottaa. Tässä valoisalla tunnilla tarkoitetaan tuntia, jolloin auringon säteily määrä on yli 0 W/m². Näin määriteltynä vuodessa on valoisia tunteja 4427 kappaletta. Se on noin puolet vuoden tunneista. Vuoden jokaisen valoisin tunnin sähkötehon tarve saadaan aiemmin määritetystä navetan sähköntarpeen tuntisesta tehotaulukosta. Myös navetan sähkötehon tarpeen tuntinen pohjakuorma on laskettu. Pohjakuorma on laskettu määrittämällä vuoden jokaisen vuorokauden pienin sähkötehon tarve, joiden keskiarvo on 4 kW.

Aurinkosähkön mitoittamisessa tutkitaan kahta erilaista paneelityyppiä. Ensimmäinen paneelityyppi perustuu yksikiteiseen ja toinen monikiteiseen piitekniikkaan. Yksikiteinen paneelityyppi on näistä noin 30 % tehokkaampi monikiteiseen verrattuna, mutta vastaavasti neliö hinnaltaan kalliimpi. Yhden yksikiteisen paneelin piikkiteho on 365 piikkiwattia (W_p) ja monikiteisen 280 W_p (43). Piikkiwatilla tarkoitetaan aurinkopaneelin huippu- eli nimellistehoa, jonka paneeli tuottaa standardiolosuhteissa. Standardiolosuhteet tarkoittavat 1000 W:n säteilytehoa neliömetrille, kun kennon lämpötila on 25 °C. (44.) Aurinkopaneeleiden pinta-alat vaihtelevat puolestatoista kahteen neliömetriin (45). Tässä työssä tutkittujen paneelien koko on noin 1,85 m² kappaleelta (46).

Molemmille paneelityypeille on määritetty hyötysuhteet, jotka saadaan jakamalla paneelin piikkiteho paneelin pinta-alan ja standardiolosuhteiden säteilytehon tulolla (44). Näin monikiteiselle aurinkopaneelille saadaan noin 15,1 %:n ja yksikiteiselle noin 19,7 %:n hyötysuhde. Aurinkopaneeleiden tehontuottokyky kuitenkin heikkenee iän myötä. Yleensä aurinkosähköjärjestelmien valmistajat ilmoittavat tämän tehonheikkenemisen aurinkopaneelin teknisissä tiedoissa. Kuvassa 33 on esitetty laskelmien yksikiteisen paneelin tehontuoton heikkeneminen ajan kuluessa.

LINEAARINEN TEHONTUOTTOTAKUU



KUVA 33. Yksikiteisen aurinkopaneelin tehontuoton heikkeneminen ajan kuluessa (46)

Kuvasta nähdään, että aurinkopaneelin keskimääräinen tehontuotto sen käyttöaikana on noin 88,8 %. Tehontuoton heikentyminen otetaan huomioon kertomalla paneelin hyötysuhde keskimääräisellä tehontuotolla. Näin yksikiteisen paneelin tehonalenemakorjattu hyötysuhde on noin 17,5 % ja monikiteisen noin 13,4 %.

Aurinkopaneeleilla voidaan tuottaa piikkitehoa suurempikin teho, jos auringon luonnollinen säteily määrä ylittää 1000 W/m². Suomessa tarkastellun viiden vuoden keskimääräinen tuntinen säteily määrä jää parhaimmassakin tapauksessa alle 900 W/m² vuosina 2012–2016 (42). Aurinkopaneelin tuottama teho on laskettu kaavalla 23.

$$P_{AP,h} = G_{aurinko,h} \times A_{AP} \times \eta_{AP}$$

KAAVA 23

$P_{AP,h}$ = aurinkopaneelin tuntinen teho (kW)

$G_{aurinko,h}$ = auringon tuntinen säteily määrä (kW/m²)

A_{AP} = aurinkopaneelin pinta-ala (m²)

$\eta_{AP, korjattu}$ = aurinkopaneelin hyötysuhde (-)

Kun vuoden ensimmäisen valoisan tunnin auringon säteily määrä on noin $1,9 \text{ W/m}^2$ ja aurinkopaneelien yhteispinta-ala 60 m^2 , kaavaan sijoittamalla saadaan yksikiteisen aurinkopaneelin tuottamaksi tehoksi

$$P_{AP,1.h} = 0,001864 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \times 60 \text{ m}^2 \times 0,175 = 0,019603 \text{ kW} \approx 0,02 \text{ kW}$$

Vähentämällä navetan sähkötehon tuntisesta tarpeesta aurinkopaneelien tunnin tehontuotto, saadaan jäljelle jäävä navetan sähkötehotarve. Jos paneeleilla tuotettu teho on suurempi tai yhtä suuri kuin navetan sähkötehotarve, saadaan paneeleilla tuotettua koko sähkötehotarve. Näin saadaan selvitettyä, kuinka paljon sähköenergiaa on ostettava sähköverkosta aurinkosähköntuotannon jälkeen. Esimerkiksi vuoden ensimmäisen valoisan tunnin aikana navetan sähkötehotarve on noin $6,26 \text{ kW}$. Aurinkopaneeleilla saadaan katettua tarpeesta vain noin 20 W . Navetan sähkötehotarpeeksi jää tarpeen ja tuotannon erotus, joka on noin $6,24 \text{ kW}$.

Hyvin valoisisa tunteina, jolloin auringon säteily määrä on suuri, voidaan riittävällä määrällä aurinkopaneeleita tuottaa enemmän energiaa, kuin sille on tarvetta. Tällöin ylimääräinen sähköenergia on mahdollista myydä sähköverkkoon ja saada siitä verkon omistajan kanssa sovittu hinta. Ylimääräisen energian tuottaminen sähköverkkoon myytäväksi ei ole Suomessa kuitenkaan erityisen kannattavaa. Kannattavinta on pyrkiä hyödyntämään paneeleilla tuotettu energia itse, jolloin säästetään sähköenergian ostohinta veroineen ja siirtomaksuineen. (47.)

Navetan sähköntarpeen ylittävää, paneeleilla tuotettua sähköenergiaa, voidaankin ohjata myös johonkin toiseen hyödylliseen käyttöön. Aurinkosähköä voidaan hyödyntää esimerkiksi käyttöveden lämmittämiseen, jolloin säästetään veden lämmittämiseen muutoin kuluva energia. Sähköä voidaan myös varastoida akkuihin, jolloin sähköenergiaa voidaan hyödyntää joustavasti myös silloin, kuin paneelien tuotto ei riitä kattamaan energiantarvetta. Sähkön varastointiin liittyy kuitenkin rajoitteita ja sen toteuttaminen voi olla hyvin kallista hyötyyn nähden. Siksi se voi heikentää aurinkosähköinvestoinnin kannattavuutta oleellisesti. (48.)

Ylituotettua sähköä on nykyään mahdollista varastoida myös virtuaaliakkuun. Virtuaaliakku tarkoittaa sähkön varastoimismahdollisuutta ilman investointitarvetta fyysiseen akkuun. Siinä ylituotettu sähköverkkoon luovutettu sähköenergiamäärä hyvitetään sähkön tuottajalle myöhemmin, kun ostosähkölle on tarvetta. Virtuaaliakku on kuin virtuaalinen tili, jolle talletetaan ylimääräistä sähköenergiaa saldona. Kun ostosähkölle tulee tarvetta, hyödynnetään ensin virtuaaliakkuun varastoidun energian osuus. Vasta virtuaaliakun saldon tyhjennyttyä aletaan maksamaan hintaa ostosähköstä. Virtuaaliakun käytöstä maksetaan vuosimaksua, jonka suuruus riippuu valitun virtuaaliakun koosta eli ylituotetun sähköenergiamäärästä. Esimerkiksi Helenillä suurimman virtuaaliakkupaketin käyttöraja on 3000 kWh/v ja sen vuotuinen hinta on 265 €. Helenin virtuaaliakun sisältämän energian arvo on 13 snt/kWh. Virtuaaliakkua käytetään siihen tarkoitettulla sovelluksella ja sen käyttö vaatii oman sähköntuotannon lisäksi sopimuksen sähköyhtiön kanssa. (49.)

Aurinkopaneelien mitoittamiseen vaikuttaa halutaanko paneeleilla saavuttaa maksimaalinen sähköntuotantokapasiteetti tai kattaa vain sähkökulutuksen pohjakuorma, vai pyritäänkö mahdollisimman taloudelliseen lopputulokseen sähköntuotannon suuruuden ja investoinnin kustannuksien suhteen. Taloudellinen mitoittaminen on usein paras mitoitusperuste. Aurinkopaneelilla ei saada koskaan katettua ympärivuotista sähköenergiantarvetta ilman sähkön varastointia, koska sähköä ei saada pimeään aikaan tuotettua. Navetta kuitenkin tarvitsee sähköä myös valoisten tuntien ulkopuolella, kuten yöllä ja talven pimeänä aikana. Laskennassa on käynyt ilmi, että aurinkosähköllä voidaan parhaimmassakin tapauksessa kattaa kyseessä olevan navetan sähköenergiantarpeesta vain noin 55 %. Tässä tavoitteena on mitoittaa aurinkosähköjärjestelmä mahdollisimman taloudelliseksi. (50.)

Navetan valoisten tuntien sähköenergiantarve vuodessa on yhteensä 30 419 kWh. Koko vuoden sähköenergiantarve kaikki tunnit huomioituna 55 133 kWh. Navetan tuntisten sähkötehtäviensä ja aurinkopaneelien tuntisten sähkötehtäviensä avulla on tehty taulukon 20 mukainen Excel-laskentataulukko.

TAULUKKO 20. Aurinkopaneelien sähköntuotannon laskentataulukko valoisilta tunneilta

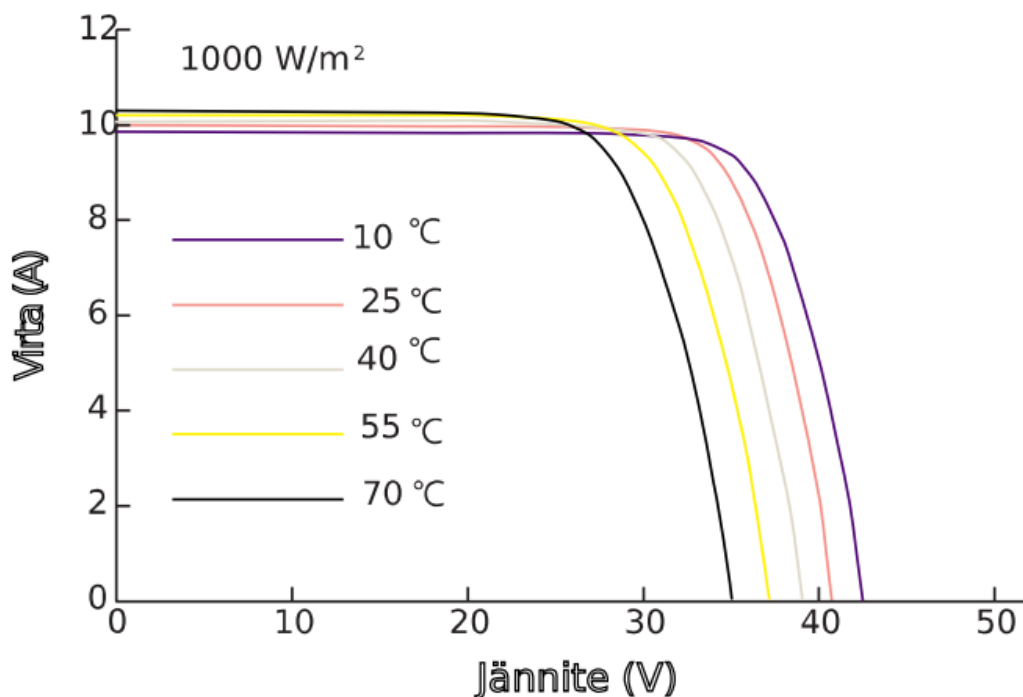
Vuoden valoisat tunnit aikajärjestyksessä	Auringon säteily määrä, viiden vuoden keskiarvo	Navetan sähkötehon-tarve, valoisat tunnit	AP:lla tuotettu tuntinen teho	Tuntinen sähkötehon-tarve AP:n jälkeen	AP:lla katettu tuntinen sähköteho	AP:lla ylituotettu verkkoon myytävä tuntinen sähköteho	Sähkönkulutuksen pohjakuorma
järjestys-numero	W/m2	kW	kW	kW	kW	kW	kW
1	1,864	6,261	0,020	6,241	0,020	0,000	4,000
2	52,910	6,258	0,556	5,702	0,556	0,000	4,000
3	58,816	6,852	0,619	6,234	0,619	0,000	4,000
4	6,452	6,123	0,068	6,055	0,068	0,000	4,000
5	1,914	6,092	0,020	6,072	0,020	0,000	4,000
6	24,150	6,460	0,254	6,206	0,254	0,000	4,000
7	34,306	4,742	0,361	4,382	0,361	0,000	4,000
8	6,374	4,722	0,067	4,655	0,067	0,000	4,000
9	1,970	5,957	0,021	5,936	0,021	0,000	4,000
10	11,938	3,097	0,126	2,972	0,126	0,000	4,000
11	17,518	3,545	0,184	3,360	0,184	0,000	4,000
...
1840	575,850	4,632	6,056	0,000	4,632	1,424	4,000
1841	683,420	4,713	7,187	0,000	4,713	2,475	4,000
1842	679,866	5,113	7,150	0,000	5,113	2,037	4,000
1843	750,644	5,249	7,894	0,000	5,249	2,645	4,000
1844	702,274	5,251	7,386	0,000	5,251	2,135	4,000
1845	596,150	4,636	6,270	0,000	4,636	1,634	4,000
1846	477,138	4,561	5,018	0,000	4,561	0,457	4,000
1847	333,874	4,752	3,511	1,240	3,511	0,000	4,000
1848	223,906	4,442	2,355	2,088	2,355	0,000	4,000
1849	131,698	4,610	1,385	3,225	1,385	0,000	4,000
1850	86,398	5,228	0,909	4,320	0,909	0,000	4,000
1851	85,686	4,380	0,901	3,479	0,901	0,000	4,000
...

Taulukkoon on laskettu navetan tuntinen sähkötehon-tarve, joka jää jäljelle saman tunnin aurinkopaneeleilla tuotetun tuntisen tehon jälkeen. Taulukkoon on laskettu myös aurinkopaneeleilla katettu tuntinen sähköteho ja sähkön ylituotanto. Aurinkopaneelien kokonaissähköntuotanto saadaan laskemalla vuoden valoisten tuntien aikana aurinkopaneeleilla tuotetut tuntiset tehot yhteen.

Esimerkiksi yksikiteisillä paneeleilla 60 m²:n pinta-alalla voidaan tuottaa vuodessa energiaa noin 11 500 kWh. Kun lasketaan yhteen aurinkopaneeleilla kate-

tut tuntiset sähkötehot, tulos vastaa aurinkopaneeleilla katettua vuotuista kokonaissähköenergiaa. Yksikiteisillä 60 m²:n paneeleilla vuodessa katettu energia on reilu 10 300 kWh. Se on noin 34 % valoisan ajan sähköenergian tarpeesta ja 18,7 % koko vuoden sähköenergian tarpeesta. Sähköverkkoon myytäväksi menee 1 180 kWh/v, joka on reilu 10 % tuotetusta energiasta. Itse tuotetun sähköenergian omakäyttöaste on noin 90 %. Verkosta ostettavan sähköenergian määräksi jää valoisten tuntien osalta noin 20 000 kWh/v. Aurinkopaneelien piikkitehoksi tulee 60 paneelineliöllä 11,68 kW_p. Se saadaan kertomalla paneelien kokonaismäärä yhden paneelin piikkiteholla. Huipputehon tuotoksi saadaan 9,35 kW kun auringon säteilyn korkein tuntinen arvo on noin 889 W/m².

Paneelin asennuspaikalla ja suuntaamisella on merkitystä paneelin tehokkaaseen toimintaan. Suomessa aurinkopaneelit suunnataan mahdollisuuksien mukaan etelään. Erilaiset varjostukset lumikuormasta tai puiden lehdistä heikentävät paneelien sähköntuotantoa, jolloin voidaan joutua kuluttamaan enemmän ostosähköä. Myös paneelin kennojen lämpötilat vaikuttavat siihen, kuinka suuri teho paneelista saadaan irti. Varsinkin kesäheleillä paneelin kennojen lämpötilan noustessa niiden hyötysuhde laskee. Paneelin tehontuoton kannalta onkin tärkeää, että ilma paneelien ympärillä pääsee liikkumaan tehokkaasti jäähdyttäen niitä mahdollisimman hyvin. Tämän vuoksi paneelien ja asennuspinnan väliin jätetään sopivan kokoinen rako. (51.) Kuvassa 34 on esitetty yksikiteisen ja 365 W_p:n aurinkopaneelin virta-jännitekuvaaja eri toimintalämpötiloissa.



KUVA 34. Aurinkopaneelin virta-jännitekuvaaja eri toimintalämpötiloissa (46)

Jos aurinkopaneelit halutaan mitoittaa pohjakuorman mukaan, tulee suurin osa tuotetusta tehosta olla maksimissaan pohjakuorman suuruinen. Silloin sähkön-
 tuotannon omakäyttöaste on mahdollisimman suuri. Aurinkosähköjärjestelmä
 voidaan kuitenkin mitoittaa jonkin verran pohjakuormaa suuremmaksi, jolloin au-
 rinkosähkön hyödyntämisaikaa saadaan pidennettyä ja sähköä tuotettua tehok-
 kaammin aikaisemmin keväällä ja myöhemmin syksyllä. Yksikiteisten 60 m²:n pa-
 neelien tehontuotto on korkeintaan 4 kW:n pohjakuorman verran 3 242 tuntia
 vuodessa. Se on vuoden valoisista tunneista 73,2 %.

Aurinkosähköinvestoinnin kannattavuutta on arvioitu samoilla menetelmillä kuin
 LTO:n yhteydessä. Laskelmissa on huomioitu sähkön kustannukset vain vuoden
 valoisilta tunneilta, jolloin sähkön tuotto aurinkopaneeleilla on mahdollista. Aurin-
 kopaneelien hinnat on saatu Lumo Energia Oyj:n verkkosivuilta, aurinkopanee-
 leiden mitoitusyökalusta. Työkalu antaa aurinkopaneeleille niiden asennuksen ja
 tuotannon seuranta järjestelmän sisältävän hinta-arvion sekä yksi- että monikitei-
 sille aurinkopaneeleille ja eri kokonaispaneelipinta-aloille. Monikiteisille panee-

leille hinta-arviot ovat saatavilla 66 paneelineliöön ja yksikiteisillä 71 paneelineliöön asti. Saatujen hinta-arvioiden pohjalta on arvioitu myös paneelien hinnat kyseisten pinta-alojen ylittävälle aurinkopaneelipinta-aloille. Tämän työn aurinkopaneeleille luvataan vähintään 25 vuoden käyttöikä, joten investoinnin vuotuinen kustannus on laskettu jakamalla paneelien hankintahinta ja arvioidut käyttöikäiset huoltokustannukset niiden käyttöajalla. Aurinkopaneelien hintatiedoista huomataan niiden neliöhinnan laskevan, kun aurinkopaneelien lukumäärä kasvaa. Näin tuotetun sähköenergian yksikköhinta laskee, mitä enemmän paneeleita hankitaan. (52.)

Aurinkosähköinvestointiin lisäkuluja tuo todennäköisesti ainakin kerran järjestelmän elinkaaren aikana uusittava invertteri, mikä on huomioitu laskuissa. Invertteri on laite, jolla aurinkopaneeleilla tuotettu tasasähkö muutetaan vaihtosähköksi. Lisäksi muun muassa oikeudet kotitalousvähennykseen ja energiatukeen, energian ja rahan arvon muutokset sekä investoinnista johtuva kiinteistön arvonnousu vaikuttavat investoinnin kannattavuuteen. (53; 54.)

Yksikiteisen 60 m²:n aurinkopaneeli-investoinnin hinnaksi tulee kokonaisuudessaan 14 580 €. Se on myös saatu kannattavimmaksi aurinkopaneelikokoluokaksi, kun tuotettua sähköenergiaa hyödynnetään pelkästään navetan sähkölaitteiden tarpeeseen. Hintaan on laskettu mukaan myös invertterin uusinta sekä huoltokustannukset, jotka on arvioitu olevan vuodessa 6,7 €/kW_p (55). Tämän lisäksi sähköä joudutaan ostamaan sähköverkosta 2 813 €:lla vuosittain. Ylituotetun sähkön myynnistä verkkoon on arvioitu saatavan 3 snt/kWh. Sähkön ylituotannon myynnistä saadaan tuloja noin 35 €/v. Näin sähkön kokonaiskustannukseksi aurinkopaneeleilla tuotettuna tulee 3 361 €/v. Jos taas navetan valoisten tuntien sähköenergiatarve katetaan vain ostosähköllä, sen kustannus on 4 259 €/v. Taulukossa 21 on taloudellisesti kannattavimman aurinkopaneelijärjestelmän tiedot.

TAULUKKO 21. Yksikiteisen aurinkopaneelijärjestelmän taloudellisesti kannattavin koko

AP-investoinnin taloudellisin vaihtoehto, yksikiteinen pii, 365 Wp		
Selite	Määrä	Yksikkö
Paneelipinta-ala	60	m ²
Paneelin hyötysuhde	19,7 %	
Paneelin tehonalenemakorjattu hyötysuhde	17,5 %	
Paneelien määrä	32	Kpl
Vuoden valoisten tuntien sähköenergiatarve	30419	kWh/vuosi
Vuoden kokonaissähköenergiatarve	55133	kWh/vuosi
AP:n kokonaissähköntuotanto vuodessa	11507	kWh/vuosi
AP:lla katettu valoisten tuntien sähköenergia vuodessa	10327	kWh/vuosi
AP:lla katettu kokonaissähköenergia vuodessa	10327	kWh/vuosi
AP:n verkkoon myytävä sähköenergia vuodessa	1180	kWh/vuosi
AP:n jälkeen verkosta ostettava sähköenergia	20091	kWh/vuosi
AP:n valoisten tuntien omakäyttöaste	89,7 %	
AP:lla tuotettu maksimiteho	9,35	kW
AP:n nimellisteho	11,68	kWp
AP:lla tuotettu keskiteho	2,60	kW
AP:lla tuotettu tehon mediaani	2,09	kW
Sähkönkulutuksen pohjakuorma	4	kW
Valoisat tunnit vuodessa	4427	h/vuosi
AP:n teho maks. pohjakuorma valoisina tunteina	3242	h/vuosi
AP:n teho maks. pohjakuorma valoisina tunteina	73,2	%
AP: teho vähintään pohjakuorma valoisina tunteina	1185	h/vuosi
AP: teho vähintään pohjakuorma valoisina tunteina	26,8	%
AP-investoinnin kustannus	14 580 €	
Sähkön markkinahinta	0,14	€/kWh
AP:n sähköstä saatava hinta verkkoon myytynä	0,03	€/kWh
Sähkön kustannus ilman AP:ta	4259	€/vuosi
Sähkön kustannus AP:n kanssa	3361	€/vuosi
AP:n taloudellinen säästö vuodessa	898	€/vuosi
AP:n käyttöikä	25	vuotta
25 vuoden säästö sähkölaskussa	22 451 €	
Takaisinmaksuaika	16,2	vuotta
Sijoitetun pääoman tuotto	6,2 %	vuodessa

Taulukosta nähdään kannattavimman aurinkopaneelipaketin laskennalliset arvot. Vuotuisesti säästökseen saadaan noin 900 €. Investoinnin elinkaaren aikana säästöä kertyy yhteensä lähes 22 500 €. Investoinnin takaisinmaksuajaksi saadaan

reilu 16 vuotta ja sijoitetun pääoman tuotoksi 6,2 %. Liitteessä 1 on yksikiteisten aurinkopaneelien laskennallisia arvoja eri kokonaispinta-aloilla.

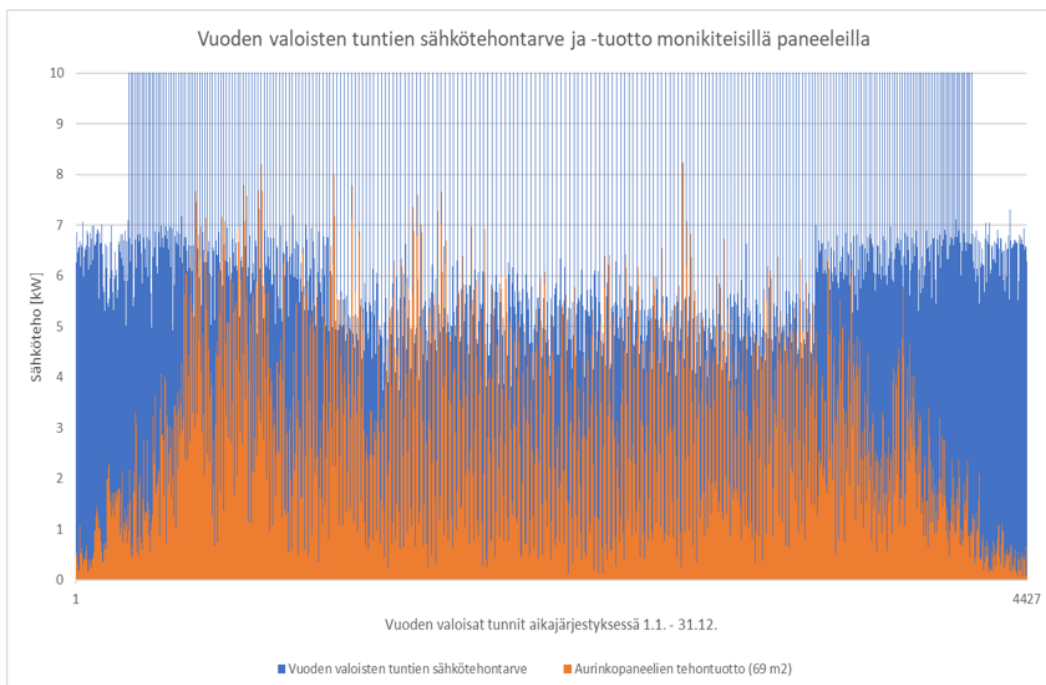
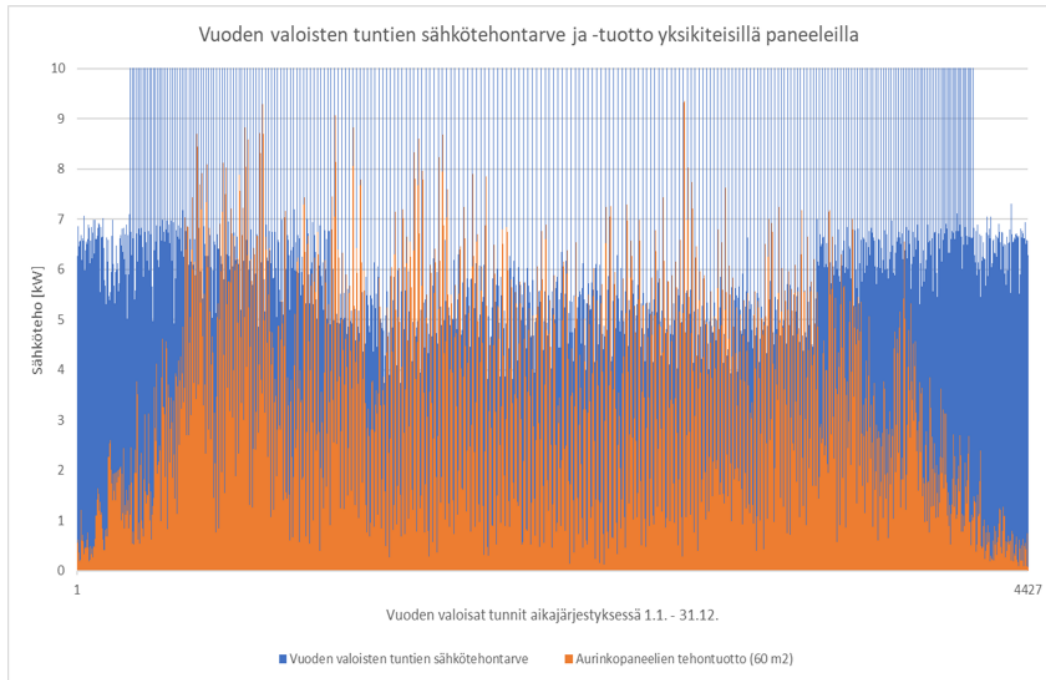
Liitteestä nähdään muun muassa eri aurinkopaneelipinta-alojen vaikutus investoinnin kokonaiskustannukseen, paneelien neliöhinnat, investoinnin takaisinmaksajat, vuotuiset pääoman tuotto prosentit ja vuotuiset säästöt suoraan ostosähköenergiaan verrattuna. Liitteessä on nähtävillä myös investoinnin vaikutus sähkön yksikköhintaan kilowattitunnilta, tuotetut ja katetut sähköenergian määrät sekä sähköntuotannon omakäyttöasteet. Lisäksi liitteestä nähdään sähköverkosta ostettavan ja verkkoon myytävän ylituotetun sähköenergian määrät, aurinkopaneelijärjestelmän nimellistehot ja todelliset tuntiset huipputehot. Liitteessä 2 on vastaavat arvot monikiteisille aurinkopaneeleille. Monikiteisillä paneeleilla kannattavin aurinkopaneelijärjestelmä on 66 m²:n kokoinen. Kannattavimman monikiteisen aurinkopaneelijärjestelmän laskennalliset arvot ovat myös taulukossa 22.

TAULUKKO 22. Monikiteisen aurinkopaneelijärjestelmän taloudellisesti kannattavin koko

AP-investoinnin taloudellisin vaihtoehto, monikiteinen pii		
Selite	Määrä	Yksikkö
Paneelipinta-ala	69	m ²
Paneelin hyötysuhde uutena	15,1 %	
Paneelin tehonalenemakorjattu hyötysuhde	13,4 %	
Paneelien määrä	37	Kpl
Vuoden valoisten tuntien sähköenergiantarve	30419	kWh/a
Vuoden kokonaissähköenergiantarve	55133	kWh/a
AP:n kokonaissähköntuotanto vuodessa	10152	kWh/a
AP:lla katettu valoisten tuntien sähköenergia vuodessa	9440	kWh/a
AP:lla katettu kokonaissähköenergia vuodessa	9440	kWh/a
AP:n verkkoon myytävä sähköenergia vuodessa	712	kWh/a
AP:n jälkeen verkosta ostettava sähköenergia	20979	kWh/a
AP:n valoisten tuntien omakäyttöaste	93,0 %	
AP:lla tuotettu maksimiteho	8,25	kW
AP:n nimellisteho	10,36	kWp
AP:lla tuotettu keskiteho	2,29	kW
AP:lla tuotettu tehon mediaani	1,84	kW
Sähkönkulutuksen pohjakuorma	4	kW
Valoisat tunnit vuodessa	4427	h/vuosi
AP:n teho maks. pohjakuorma valoisina tunteina	3460	h/vuosi
AP:n teho maks. pohjakuorma valoisina tunteina	78,2	%
AP: teho vähintään pohjakuorma valoisina tunteina	967	h/vuosi
AP: teho vähintään pohjakuorma valoisina tunteina	21,8	%
AP-investoinnin kustannus	13869	€
Sähkön markkinahinta	0,14	€/kWh
AP:n sähköstä saatava hinta verkkoon myytynä	0,03	€/kWh
Sähkön kustannus ilman AP:ta	4259	€/vuosi
Sähkön kustannus AP:n kanssa	3470	€/vuosi
AP:n taloudellinen säästö vuodessa	788	€/vuosi
AP:n käyttöikä	25	vuotta
25 vuoden säästö sähkölaskussa	19703	
Takaisinmaksuaika	17,6	vuotta
Sijoitetun pääoman tuotto	5,7 %	

Taulukosta nähdään, että monikiteisen taloudellisimman vaihtoehdon takaisinmaksuaika on lähes puolitoista vuotta pidempi taloudellisimpaan yksikiteiseen vaihtoehtoon verrattuna. Jotta monikiteisillä paneeleilla saada katettua saman verran sähköenergiantarvetta kuin yksikiteisen taloudellisimmalla vaihtoehdolla, täytyy paneelipinta-alan olla noin 79 m². Tällöin investoinnin hinta olisi kuitenkin

noin 1 000 € korkeampi yksikiteiseen verrattuna. Kun aurinkopaneelin käyttöikä on vähintään 25 vuotta, ovat sekä yksi- että monikiteiset aurinkopaneelijärjestelmät laskennallisesti kannattavia investointeja. Kuvassa 35 on esitetty vuoden valoisten tuntien sähkötehtarve sekä yksi- ja monikiteisen aurinkopaneelijärjestelmän taloudellisimman kokoluokan tuntinen sähkötehontuotto.



KUVA 35. Vuoden valoisten tuntien sähkötehtarve ja paneelien tehontuotto

4.2 Aurinkopaneelit sähkön- ja lämmöntuotannossa

Aurinkosähköä voidaan hyödyntää sähkölaitteiden lisäksi lämpimän käyttöveden lämmittämiseen. Mikäli navetassa on vesikiertoinen lämmönjakojärjestelmä, myös tilojen lämmitys voidaan toteuttaa aurinkosähköllä lämmitetyllä vedellä. Vaikka aurinkosähköjärjestelmä halutaan mitoittaa vain navetan sähkötarpeen kattamiseen, ylituotettu sähköenergia voidaan kuitenkin ohjata lämminvesivaraajan kautta veteen. Tällöin sähköntuotannon omakäyttöaste saadaan pidettyä mahdollisimman korkeana, eikä sähköä ole tarve siirtää sähköverkkoon. Näin aurinkopaneeli-investoinnin kannattavuus paranee. (56.)

Tässä osiossa tutkitaan aurinkopaneelien sähköntuotantoa sähköntarpeen lisäksi lämmöntarpeen kattamiseen. Aurinkopaneelilla katetaan kuitenkin ensisijaisesti sähkölaitteiden sähkötehtäviä. Mikäli sähkön ylituottoa syntyy, ylimääräinen sähköenergia ohjataan 1 000 l:n lämminvesivaraajaan lämpöenergiaksi. Jos energian ylituottoa syntyy enemmän kuin sitä voidaan varastoida lämpimänä vetenä varaajassa, se myydään sähköverkkoon. Varaajan maksimivarastointikapasiteetti on nyt 58,3 kWh toisin kuin LTO-ratkaisuissa, koska lauhdesäiliötä ei aurinkopaneelijärjestelmässä tarvita. Aurinkopaneelista tutkitaan vain yksikehittäistä 365 kW_p:n paneelijärjestelmää, koska se on laskujen perusteella taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto kuin monikiteinen järjestelmä. Aurinkopaneeli-investoinnin hintaa lämpöenergiantuotannossa nostaa aurinkosähkön kulutuksenohjausjärjestelmä, jonka arvo on huomioitu investoinnin kokonaishinnassa. Kulutuksenohjaus- ja tuotannonseurantajärjestelmän sisältävät aurinkopaneelihinnat on saatu Lumo Energian verkkosivujen aurinkopaneelien mitoitusyökalusta (52).

Aurinkopaneelien mitoitus sähkö- ja lämpöenergiantuotantoon on tehty laatimalla Excel-laskentataulukko vastaavalla tavalla kuin paneelien mitoitus pelkästään sähkölaitteiden tarpeisiin. Tehontarpeessa on huomioitu kaikki vuoden tunnit. Sen lisäksi laskentataulukko on laskettu sähköntarpeen kattamisen jälkeen energiavaraajaan varastoidun energian lisäys ja tuntiset määrät, samoin kuin on

tehty LTO-laskuissa. Laskentataulukon avulla on laadittu taulukko, jossa on yksiköiteisten aurinkopaneelien tuotannollisia ja taloudellisia tunnuslukuja eri paneelipinta-aloille 299 m²:iin asti. Taulukko on liitteessä 3.

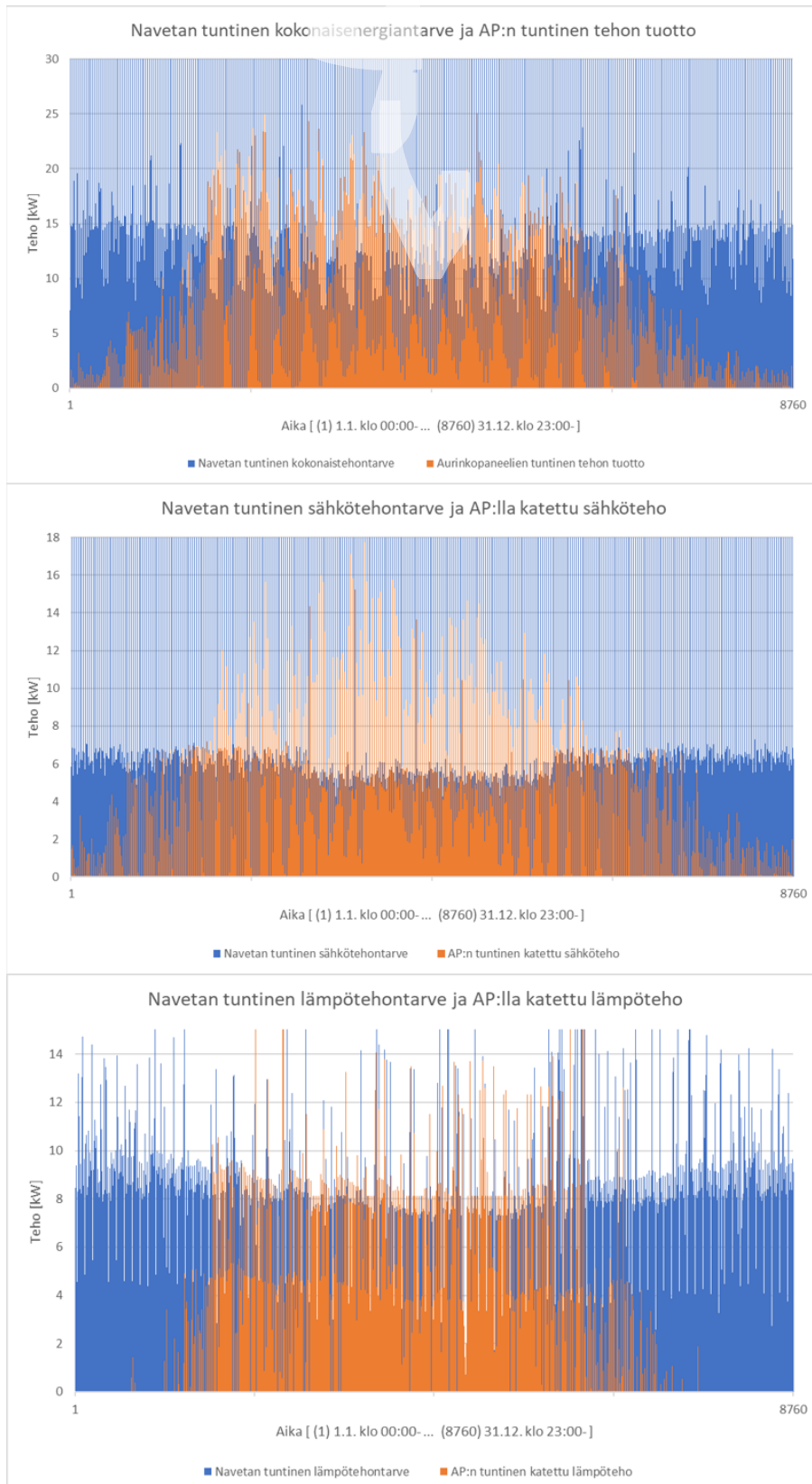
Taulukossa on vertailtu eri kokoisten aurinkopaneeli-investointien kannattavuutta kolmella vaihtoehdolla. Ensimmäisessä vaihtoehdossa sähkön ylituottoa ei myydä sähköverkkoon, vaan se on hukkaenergiaa. Toisessa realistisemmassa vaihtoehdossa sähkön ylituotto myydään sähköverkkoon. Kolmannessa vaihtoehdossa sähkön ylituoton määrä vähennetään ostoenergian tarpeesta.

Ensimmäisessä tapauksessa sähkön ylituotosta ei saada tuloja, joten ylituotto pyritään minimoimaan mahdollisimman tehokkaasti. Toisessa tapauksessa sähkön ylituotto myydään sähköverkkoon, ja myydystä energiasta saadaan hieman tuloja. Sähkön myynnistä saadaan 3 snt/kWh. Kolmannessa vaihtoehdossa tutkitaan tapausta, jossa sähkö voidaan ikään kuin varastoida sähköverkkoon virtuaaliakun tavoin, mutta ilman rajoituksia ja lisäkustannuksia. Ostosähkön ja ylituotetun sähköverkkoon siirretyn sähköenergian määrät netotetaan eli maksetaan vain niiden erotuksen verran ostettavasta lisäsähköenergiasta. Kannattavin vaihtoehto valitaan kuitenkin toisen tapauksen perusteella, koska se on tapauksista tällä hetkellä realistisin vaihtoehto. Se kuvaa parhaiten sekä sähkön myyntiä verkkoon että sen maksullista varastoimista virtuaaliakkuun. Kannattavin aurinkopaneelijärjestelmän koko sähkö- ja lämpöenergiatarpeeseen on 161 m². Kannattavimman aurinkopaneeli-investoinnin tunnusluvut ovat taulukossa 23.

TAULUKKO 23. Kannattavin aurinkopaneelijärjestelmä sähkön- ja lämmöntuotantoon

Aurinkopaneelit sähkön ja lämmön tuotannossa					
AP-investoinnin taloudellisin vaihtoehto, yksikeinen pii, 365 W _p					
Energiantarve	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta	Huomiot	
Vuoden lämpöenergiatarve	38542	kWh/vuosi	41,1 %	kokonaistarpeesta	
Vuoden sähköenergiatarve (sähkölaitteet)	55133	kWh/vuosi	58,9 %	kokonaistarpeesta	
Vuoden kokonaisenergiatarve	93675	kWh/vuosi	100,0 %	kokonaistarpeesta	
Energiantuotanto	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta		
AP:n sähköenergiatuotanto vuodessa	30878	kWh/vuosi	100,0 %		
Varastokapasiteetti	Määrä	Yksikkö			
Energiavaran tilavuus	1000	litra			
Varastokapasiteetin maksimienergisäily	58,3	kWh			
	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta		
AP:n energiaa varastoon	13584	kWh/vuosi	44,0 %		
Katettu energia	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta		
AP:lla katettu kokonaisenergia	30185	kWh/vuosi	32,2 %	kokonaistarpeesta	
	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta		
AP:lla katettu sähkölaitteiden sähköenergiatarve	16602	kWh/vuosi	30,1 %	sähkön tarpeesta	
	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta		
AP:lla katettu lämpöenergiatarve	13584	kWh/vuosi	35,2 %	lämmön tarpeesta	
Sähkön kauppa	Myynti	Määrä	Yksikkö	Osuus tuotannosta	
	Verkkoon myytävä sähköenergia vuodessa	350	kWh/vuosi	1,1 %	
	Osto	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta	
	Verkosta ostettava sähkölaitteiden sähköenergia	38531	kWh/vuosi	69,9 %	sähkön tarpeesta
		Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta	
	Verkosta ostettava sähköenergia lämmitykseen	24958	kWh/vuosi	64,8 %	lämmön tarpeesta
		Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta	
	Verkosta ostettava sähköenergia yhteensä	63489	kWh/vuosi	67,8 %	kokonaistarpeesta
	Netto-osto	Määrä		Osuus tarpeesta	
	Verkosta ostettava nettosähköenergia	63140	kWh/vuosi	67,4 %	kokonaistarpeesta
Omakäyttöasteet					
	Sähköenergian omakäyttöaste (sähkölaitteet)	53,8 %			
	Sähköenergian omakäyttöaste (lämpö)	44,0 %			
	Sähköenergian kokonaisomakäyttöaste	97,8 %			
Todellinen teho	Määrä	Yksikkö			
AP:n maksimi teho	25,09	kW			
Aurinkopaneelien arvot	Määrä	Yksikkö			
Paneelipinta-ala	161	m ²			
AP:n hyötysuhde	19,7 %				
tehonalenemakorjattu hyötysuhde	17,5 %				
Paneelien yhteispiikkiteho	31,76	kWp			
Aurinkopaneelien määrä, noin	87	kpl			
AP:n käyttöikä	25	vuotta			
Kustannukset ja säästöt					
	Sähkökauppa	Määrä	Yksikkö		
	AP:n Sähköstä saatava hinta verkkoon myytynä	0,03	€/kWh		
	Sähkön markkinahinta	0,14	€/kWh		
Sähkön kustannus ilman investointeja		13114	€/vuosi		
AP-investoinnin kustannus (ALV 0%)		32977	€		
Sähkön kustannus AP:n kanssa (Ei ylituoton myyntiä)		10208	€/vuosi		
Sähkön kustannus AP:n kanssa (Ylituoton myynti verkkoon)		10197	€/vuosi		
Sähkön kustannus AP:n kanssa (Nettokauppa)		10159	€/vuosi		
AP-investoinnin säästö vuodessa (Ei ylituoton myyntiä)		2907	€/vuosi		
AP-investoinnin säästö vuodessa (Ylituoton myynti verkkoon)		2917	€/vuosi		
AP-investoinnin säästö vuodessa (Nettokauppa)		2956	€/vuosi		
AP-investoinnin 25v. säästö sähkölaskussa (Ei ylituoton myyntiä)		72671	€		
AP-investoinnin 25v. säästö sähkölaskussa (Ylituoton myynti verkkoon)		72933	€		
AP-investoinnin 25v. säästö sähkölaskussa (Nettokauppa)		73895	€		
AP-investoinnin takaisinmaksuaika (Ei ylituoton myyntiä)		11,3	vuotta		
AP-investoinnin takaisinmaksuaika (Ylituoton myynti verkkoon)		11,3	vuotta		
AP-investoinnin takaisinmaksuaika (Nettokauppa)		11,2	vuotta		
AP-investointiin sijoitetun pääoman tuotto (Ei ylituoton myyntiä)		8,8 %	vuodessa		
AP-investointiin sijoitetun pääoman tuotto (Ylituoton myynti verkkoon)		8,8 %	vuodessa		
AP-investointiin sijoitetun pääoman tuotto (Nettokauppa)		9,0 %	vuodessa		

Taulukosta nähdään, että aurinkopaneeleilla saadaan katettua vuodessa yli 30 000 kWh kokonaisenergiatarpeesta. Sähköntuotannon omakäyttöaste on korkea, lähes 98 %. Investoinnin kokonaishinta on lähes 33 000 € paneelien käyttöaikana. Säästöä kertyy vuodessa reilu 2900 € ja investoinnin takaisinmaksuaika lyhenee noin viisi vuotta, kun sähköä hyödynnetään sähkölaitteiden lisäksi myös lämmitysenergiana. Aurinkopaneeli-investointi sähkön- ja lämmöntuotantoon vaikuttaa selvästi kannattavalta. Kuvassa 36 on esitetty navetan tuntiset tehotarpeet ja aurinkopaneeleilla tuotetut ja katetut sähkö- ja lämpötehot.



KUVA 36. Navetan tuntiset teho- ja lämpöteho- ja aurinkopaneelilla tuotetut ja katetut tehot

4.3 Aurinkopaneelit yhdessä lämmöntalteenoton kanssa

Aurinkosähköntuotantoa on tutkittu myös yhdessä maidon ja lietelannan LTO:n kanssa. Aurinkopaneeleilla on tarkoitus kattaa ensisijaisesti sähköenergiantarve ja lämmöntalteenotolla lämpöenergiantarve. Sähköenergiantarpeen ollessa vähäisempää kuin aurinkosähköntuotanto aurinkosähköä hyödynnetään myös käyttöveden lämmityksessä. Mikäli lämmöntalteenoton jälkeen navettaan jää lämpöenergiantarvetta, se pyritään kattamaan aurinkopaneelien sähköntuotannolla. Ylimääräinen aurinkosähköenergia varastoidaan lämpöenergiana varastointikapasiteetin ollessa 1500 l. Energiaa voidaan varastoida kerrallaan korkeintaan 87,5 kWh. Mikäli sähköenergian ylituotantoa syntyy varastoinnista huolimatta, sen vaikutusta kannattavuuteen tutkitaan samoilla vaihtoehdoilla, kuin on tehty aurinkopaneelien sähkön- ja lämmöntuotannossa ilman LTO:a. LTO:n osalta lämmön ylituottoa ei todellisuudessa synny, vaikka sen määrä onkin laskennallisesti selvitetty.

Aurinkosähkön yhdistämistä LTO:n kanssa on tutkittu kahdella eri vaihtoehdolla. Ensimmäisessä vaihtoehdossa tutkitaan maidon LTO:n ja aurinkosähkön yhdistämistä ja toisessa lietelannan lämmöntalteenottoa yhdessä aurinkosähköntuotannon kanssa. Toisessa vaihtoehdossa täytyy ottaa huomioon lietelannan LTO-lämpöpumpun navetan sähköenergiankulutusta lisäävä vaikutus.

Navetan vuotuiset sähkön- ja lämmöntarpeet ovat samat, joita on käytetty eri LTO-järjestelmien laskennassa. LTO-vaihtoehtojen lämmöntuotanto ja muut tunnusluvut on määritetty vastaavalla Excel-laskentataulukolla kuin LTO-osion laskuissa. Sen lisäksi taulukkoon on yhdistetty aurinkosähkön ylituotannon vaikutus lämpötehontuottoon, varaajan kapasiteettiin ja jäljelle jäävään lämpöenergiantarpeeseen. Laskentataulukon pohjalta on laadittu taulukko, jossa on yksikiteisten aurinkopaneelien ja LTO:n tuotannollisia ja taloudellisia tunnuslukuja eri paneelipinta-aloille 299 m²:iin asti. Aurinkopaneeli-investoinnin kannattavuutta on arvioitu energiantarpeesta, joka jää jäljelle, kun kokonaistarpeesta vähennetään LTO:lla katetun energian osuus. Investoinnin kannattavuutta verrataan tilanteeseen, jossa kaikki energia katetaan ostosähköllä.

4.3.1 Aurinkopaneelit ja maidon lämmöntalteenotto

Maidon LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde on 45 %. Taulukko, jossa vertaillaan yksikiteisen aurinkopaneelijärjestelmän paneelipinta-alojen vaikutusta investoinnin kannattavuuteen yhdessä maidon LTO:n kanssa, on liitteessä 4. Paneelien yhteispinta-ala tämän yhdistelmän taloudellisimmassa aurinkopaneelijärjestelmässä on 135 m². Taloudellisimman aurinkopaneelijärjestelmän tunnusluvut ovat liitteessä 5.

Liitteestä nähdään, että maidon LTO-investoinnin taloudelliset luvut pysyvät suurin piirtein samoina kuin ne ovat ilman yhdistämistä aurinkopaneelijärjestelmän kanssa. Aurinkopaneelijärjestelmän taloudellisin koko sen sijaan hieman laskee. Paneelien määrä vähenee 26 m² verrattuna vaihtoehtoon, jossa maidon lämmöntalteenottoa ei ole mukana. Myös aurinkopaneeli-investoinnin takaisinmaksuaika pidentyy noin puolella vuodella. Investointi aurinkopaneelisiin ja maidon LTO:oon maksaa verottomana yhteensä noin 35 900 €. Aurinkopaneeli- ja maidon LTO-investointi yhdessä on laskelmien mukaan kannattava sijoitus.

4.3.2 Aurinkopaneelit ja lietelannan lämmöntalteenotto

Lietelannan energiasisällöstä oletetaan saatavan talteen 45 %. Taulukko, jossa vertaillaan yksikiteisen aurinkopaneelijärjestelmän paneelipinta-alojen vaikutusta investoinnin kannattavuuteen yhdessä lietelannan LTO:n kanssa, on liitteessä 6. Aurinkopaneelien pinta-ala tämän yhdistelmän taloudellisimmassa aurinkopaneelijärjestelmässä on 105 m². Taloudellisimman investoinnin tunnusluvut on koottu liitteeseen 7.

Liitteestä nähdään, että aurinkopaneeli-investoinnin paneelien kokonaispinta-ala vähenee lietelannan LTO:n kanssa 56 m², verrattuna vaihtoehtoon, jossa lietelannan lämmöntalteenottoa ei ole mukana. Myös aurinkopaneeli-investoinnin takaisinmaksuaika pidentyy noin 2,3 vuodella. Investointi aurinkopaneelisiin maksaa tässä vaihtoehdossa verottomana noin 23 400 €. Aurinkopaneeli-investointi on tässäkin tapauksessa kannattava. Lietelannan LTO-investoinnin kannattavuutta ei voida tarkemmin arvioida johtuen tarkempien hintatietojen puutteesta.

5 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli selvittää mahdollisuuksia navetan energiaomavaraisuuden kehittämiseen. Navetan modernisoinnin ja laajentamisen myötä sen varustelutaso nousee ja energiantarve kasvaa. Työssä laskettiin uuden navetan vuotuiset lämpö- ja sähköenergiankulutukset. Omavaraisuusratkaisuista tutkittiin maidon esijäähdytystä ja lämmön talteenottoa maidosta ja lietelannasta. Niiden lisäksi tutkittiin aurinkosähkön hyödyntämistä navetan sähkön- ja lämmöntarpeen kattamiseen sekä aurinkosähkön yhdistämistä lämmöntalteenottoratkaisujen kanssa.

Modernisoidun pihattonavetan kokonaisenergiantarve on lähes 94 MWh/v. Lämpöenergiantarpeen osuus on noin 39 ja sähköenergian 55 MWh/v. Lämpimän käyttöveden tuotanto on suurin yksittäinen energiankuluttaja 33 %:n osuudella kokonaisenergiankulutuksesta. Toiseksi suurimman osan vie lypsy 24 %:n osuudella, ja sen jälkeen tulevat maidon jäähdytys ja eläinten ruokinta 12 %:n osuudella.

Maidosta täytyy poistaa jäähdytyksessä lämpöenergiaa noin 23 MWh/v. Maidon jäähdytyksen energiankulutusta voidaan vähentää maidon esijäähdytysjärjestelmällä. Maidon esijäähdytys voidaan toteuttaa lisäämällä maitopumpun ja tilatankin väliin LTO-lämmönsiirrin. Esijäähdytyksessä lämmitettyä vettä voidaan hyödyntää esimerkiksi eläinten juomavetenä tai lämpimän käyttöveden esilämmityksessä. Maidon esijäähdytyksellä voidaan vähentää navetan energiankulutusta yli 43 %:lla eli 4,7 MWh/v. Sen lisäksi maidon esijäähdytyksellä säästetään juomaveden lämmitysenergiaa noin 13 MWh:n verran vuodessa, mikäli juomavesi halutaan lämmittää. Tämän tutkimuksen perusteella investointi maidon esijäähdytysjärjestelmään ei ole taloudellisesti kannattavaa, jos esijäähdytyksessä lämmenteelle vedelle ei lasketa arvoa. Mikäli taas esijäähdytyksessä talteen saatu lämpöenergia otetaan huomioon kannattavuusarvioinnissa, investointi muuttuu kannattavaksi. Silloin investointi maksaa itsensä takaisin reilun neljän vuoden kuluessa. Eräissä toisissa tutkimuksissa maidon esijäähdytysjärjestelmä on kuitenkin saatu kannattamaan myös ilman lämpimän veden käyttöarvoa.

Maidon lämpöenergiaa voidaan hyödyntää myös maidon koneellisen jäähdytyksen yhteydessä tapahtuvalla lämmöntalteenotolla. Lämmöntalteenotto maidosta on yksinkertainen ja edullinen tapa parantaa energiaomavaraisuutta. Maidon lämmöstä voidaan tuottaa lämpöenergiaa hyötykäyttöön reilusta 14 MWh:sta 32 MWh:iin vuodessa riippuen lämmöntalteenottojärjestelmän ominaisuuksista. Maidon LTO:n lämmöntuotanto on tasaista ja tuotannosta saadaan lähes poikkeuksetta kaikki energia hyötykäyttöön. Maidon LTO-ratkaisu on osoittautunut laskujen perusteella kannattavaksi, vaikka LTO-lämmönsiirrin toimisi heikommalakin hyötysuhteella. Maidon LTO-investoinnin takaisinmaksuajat liikkuvat noin kahden ja reilun viiden vuoden välillä.

Myös lehmien lietalanta sisältää paljon lämpöenergiaa. Lannan sisältämää lämpöä voidaan ottaa talteen lämpöpumpputekniikkaa hyödyntämällä. Lietelannasta voidaan saada laskelmien perusteella jopa 53 MWh/v lämpöenergiaa alle 50 lypsylehmän navetassa. Tutkitun navetan tapauksessa lietalannasta voidaan tuottaa lämpöenergiaa hyötykäyttöön 23–28 MWh/v.

Lietelannan LTO kuitenkin lisää jonkin verran navetan sähköenergian tarvetta. Jos hyötykäyttöön tuotetusta lämpöenergiasta vähennetään navetan sähköntarpeen lisääntyminen, lietalannan LTO:n hyödyt ovat 15,6–18,4 MWh/v. Lietelannan LTO, joka toiminnallisesti vastaa maalämpöjärjestelmää, on investointina yleensä kallis. Investoinnin toimenpiteet ja kustannukset ovat hyvin pitkälle tapauskohtaisia. Siitä syystä lietalannan LTO-investoinnin kannattavuusarvion tekemiseen tarvitaan tarkempia ja yksityiskohtaisempia laskelmia ja hintatietoja, jotta siitä saataisiin riittävän luotettava.

Lietelannan LTO:n haasteena on, ettei lannasta voida ottaa lämpöä talteen ympäri vuoden. Jos lietalannan LTO-järjestelmällä halutaan tuottaa lämpöenergiaa jatkuvasti, se vaatii rinnalleen toisen lämmönkeruupiirin, joka lisää investoinnin kustannuksia. Jos kuitenkin lämmölle on tarvetta myös navetan ulkopuolisissa toiminnoissa, kuten muiden rakennusten lämmityksessä tai vaikka viljan kuivatuksessa, voisi lietalannan LTO:n suuri lämmöntuotantopotentiaali yhdessä maalämmön kanssa olla varteenotettava vaihtoehto. Lämpimillä keleillä lietalannan

LTO:lla voidaan myös jäähdyttää navettaa, mikäli järjestelmässä on toinenkin lämmönkeruupiiri.

Lämpöenergiaa voidaan ottaa yhtä aikaa talteen sekä maidosta että lannasta. Jos kuitenkin ajatellaan maidon lämmöntalteenoton olevan näistä ensisijainen lämmöntuotantotapa, lietalannan LTO:n hyöty jää vähäiseksi. Tässä on kuitenkin ajateltu, että maidon ja lietalannan LTO-järjestelmät toimivat toisistaan erillisinä yksiköinä. Tarkemman tutkimuksen arvoinen olisi kuitenkin järjestelmä, jossa yhteisellä lämmönkeruupiirillä kerättäisiin lämpöä lietalannan ohella myös maidon jäähdytyksessä vapautuvasta lämmöstä.

Aurinkopaneeleilla voidaan tuottaa sähköenergiaa navetan tarpeisiin. Auringon vuotuisesta säteilymäärästä yli 95 % ajoittuu maaliskuun alun ja lokakuun lopun välille. Aurinkopaneeleista yksikiteiseen piitekologiaan perustuva paneelityyppi on navettaan parempi vaihtoehto kuin monikiteinen. Navetan sähkölaitteiden energiantarpeeseen taloudellisesti kannattavin paneelipinta-ala on yksikiteisillä paneeleilla 60 m². Sillä saadaan katettua noin 10,3 MWh vuotuisesta sähköenergiatarpeesta. Järjestelmän kustannukset ovat yhteensä alle 15 000 €, ja sen takaisinmaksuaika on reilu 16 vuotta.

Aurinkosähkön ylituotantoa voidaan ja kannattaa hyödyntää myös lämpöenergiantarpeeseen ohjaamalla sitä lämminvesivaraajaan veden lämmitykseen. Näin aurinkopaneelijärjestelmä voidaan mitoittaa suuremmaksi kuin pelkän sähkötarpeen kattamisessa, mikä laskee energian yksikkökustannusta. Kun aurinkoenergiaa hyödynnetään sekä sähkön että lämmöntuotantoon, voidaan kannattavimmillaan kattaa kokonaisenergiantarpeesta yli 30 MWh/v. Tällöin paneelipinta-ala on yhteensä 161 m² ja investoinnista aiheutuvat kustannukset yhteensä noin 33 000 €. Hyödyntämällä sähköenergiaa myös lämpönä takaisinmaksuaika saadaan laskettua reiluun 11 vuoteen. Aurinkosähkön mitoituksessaärkevintä on pyrkiä hyödyntämään aurinkopaneeleilla tuotettu sähkö mahdollisimman tehokkaasti navetan omaan energiantarpeeseen. Toinen mielenkiintoinen vaihtoehto ylituotetun sähkön käytölle navetan lämpöenergiana on varastoida se virtuaaliakkuun.

Navetan energiaomavaraisuuden parantamista on tutkittu myös hybridijärjestelmällä, jossa aurinkosähköntuotanto yhdistetään lämmöntalteenottotekniikan kanssa. Siinä ensisijaisesti lämmöntalteenotolla pyritään kattamaan navetan lämmöntarve ja aurinkopaneeleilla sähköntarve, mutta ylituotettu sähköenergia hyödynnetään myös lämpöenergiana. Aurinkopaneelien yhdistäminen maidon LTO:n kanssa on kannattava hybridiratkaisu. Kun paneeleita on yhteensä 135 m² ja maidon LTO-lämmönsiirtimen hyötysuhde 45 %, voidaan hybridijärjestelmällä kattaa navetan kokonaisenergiantarpeesta lähes 40 MWh/v. Energiantuotannon omakäyttöaste on tällöin vielä yli 98 %. Hybridijärjestelmän investoinnin ja käytön yhteiskustannukset ovat lähellä 36 000 €. Aurinkopaneelien lisäksi myös maidon esijäähdytysjärjestelmä vaikuttaa hyvältä vaihtoehdolta, mikäli eläinten juomavesi halutaan lämmittää.

LÄHTEET

1. Posio, Mikko 2010. Kotieläintilojen energiankulutus. Pro gradu -tutkielma. Helsinki: Helsingin yliopisto, Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/17573/Gradu%2020.8.2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Hakupäivä 5.12.2021.
2. Kangas, Taneli 2021. Re: Kysymyksiä opinnäytetyön tekemiseen. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Juhamatti Meetteri. 12.4.2021
3. Energiatehokkuus – Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2018. Suomen rakentamismääräyskokoelma. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf/277c79e7-2a12-5052-ba33-cb2e2c8709ab/Ohje---Rakennuksen-energiankulutuksen-ja-lammitystehontarpeen-laskenta-20-12-2017-4332AA81_75E1_4CA0_B208_B0ACB60A267F-133692.pdf?t=1603260201597. Hakupäivä 5.12.2021.
4. Mäkelä, Veli-Matti – Ylikunnari, Jukka 2019. Rakennusten kulutustiedot. T619505 Hybridijärjestelmät 5 op. Opintojen materiaalit syksyllä 2019. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.
5. Lämmitystapojen vertailulaskuri. Motiva. Saatavissa: <https://lammitysvertailu.eneuvonta.fi/>. Hakupäivä 5.12.2021.
6. 405/2017. Maa- ja metsätalousministeriön asetus tuettavaa rakentamista koskevista lypsykarjarakennusten rakennusteknisistä ja toiminnallisista

14. Turunen, Mika. 2013. Maidontuotanto. Energia-akatemia. Saatavissa: https://etela-suomi.proagria.fi/sites/default/files/attachment/mea_lehdisto_hameenlinna_maidontuotanto.pdf. Hakupäivä 5.12.2021.
15. Keski-Rauska, Juha 2018. Erkkilän opetusmaatilan energiasuunnitelma. Saatavissa: <http://ravinnejaenergia.fi/fi/erkkilan-opetusmaatilan-energia-suunnitelma/>. Hakupäivä 5.12.2021.
16. EGauge31547 Center. 2021. eGauge Systems LLC. Saatavissa: <http://egauge31547.egaug.es/57A4C/>. Hakupäivä 5.12.2021.
17. Nyman, Kaj 2020. Tutkittua tietoa maidon jäähdytyksen energiankulutuksesta. Valio Oy. Saatavissa: <https://www.maitojame.fi/artikkelit/tutkittua-tietoa-maidon-jaahdytyksen-energiankulutuksesta/>. Hakupäivä 5.12.2021.
18. Lehmän elämää. Valio Oy. Saatavissa: <https://www.valio.fi/vastuullisuus/elainten-hyvinvointi/lehman-elamaa-2/>. Hakupäivä 5.12.2021.
19. Tilavuuksien ja massojen laatumuunnoksista. Mervi2016. Saatavissa: <https://mervi2016.wordpress.com/tilavuus-ja-massamuunnoksista/>. Hakupäivä 5.12.2021.
20. Kuonanoja, Hanna 2003. Lehmä syö muutakin kuin ruohoa ja apiloita. Kaleva Media. Saatavissa: <https://www.kaleva.fi/lehma-syo-muutakin-kuin-ruohoa-ja-apiloita/2028453>. Hakupäivä 5.12.2021.
21. DeLaval seosrehulaitteet suurten rehumassojen helppoon käsittelyyn. DeLaval. Saatavissa: <https://store.delaval.com/globalassets/inriverresources/pdfs/s/seosrehulaitteet-vsm-ja-vm-naytto-fi.pdf>. Hakupäivä 5.12.2021.

22. Robottikaavin RS450S. 2021. DeLaval. Saatavissa: <https://www.delaval.com/fi/laiteratkaisut/lannanpoisto/puhdistusjarjestelmat/delaval-lanta-robotti-rs450s/>. Hakupäivä 5.12.2021.
23. Navetan puhtauden uusi aikakausi. DeLaval robottikaavin RS450S. 2015. DeLaval. Saatavissa: <https://store.delaval.com/globalassets/inriverresources/pdfs/l/15-delaval-robottikaavin-rs450s-kastelujarjestelmalla-high-res.pdf>. Hakupäivä 5.12.2021.
24. Kivinen, Tapani – Heikkinen, Jorma – Heimonen, Ismo 2013. Luonnollinen ilmanvaihto. Opas painovoimaisen ilmanvaihdon toteutukseen nautakarjarakennuksissa. Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus. http://www.mtt.fi/julkaisut/Maito-ja-Me-Ilmanvaihtoliite_2013.pdf. Hakupäivä 5.12.2021.
25. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. 2019. Finvac. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Opas-ilmanvaihdon-mitoitukseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2019b-D9B578DC_66D4_44BC_B1AE_DCAB875D5907-144726.pdf/9f1ca28e-57de-3fa4-5388-a00f4d973afb/Opas-ilmanvaihdon-mitoitukseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2019b-D9B578DC_66D4_44BC_B1AE_DCAB875D5907-144726.pdf?t=1603260098252. Hakupäivä 5.12.2021.
26. Kataja, Jyrki 2018. Energiatehokas ja omavarainen maatila. Saatavissa: http://ravinneenergia.fi/site/wp-content/uploads/2018/10/eTU_Omavarainen_Maatila_-Energia_12102018.pdf. Hakupäivä 5.12.2021.
27. DeLaval esijähdytysjärjestelmä. DeLaval. Saatavissa: <https://store.delaval.com/globalassets/inriverresources/pdfs/e/esij-hdytysj-rjestelm-fi.pdf>. Hakupäivä 5.12.2021.

28. Pietilä, Mirva 2011. Esijäähdytyksen käyttömahdollisuudet maidon jäähdytyksessä suomalaisella maitotilalla. Opinnäytetyö. Seinäjoki: Seinäjoen ammattikorkeakoulu, Maa- ja metsätalouden yksikkö, Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma, Maatalouden tuotantotalous. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/27463/Pietila_Mirva.pdf?sequence=1. Hakupäivä 9.12.2021.
29. Turunen, Mika. Maidon varastointi ja energiasäästöt. Energia-akatemia. Saatavissa: <https://www.energia.agrotekno.fi/wp-content/uploads/2021/04/Maidon-varastointi-ja-energiasaastot.pdf>. Hakupäivä 5.12.2021.
30. Jälkihoito. EHY ry. Saatavissa: http://www.ehy.fi/pdf/SEPK%20koulutusmateriaali_J%C3%A4lkihoito.pdf. Hakupäivä 5.12.2021.
31. Teeriaho, Jouko. Lämpöoppi. Lapin AMK. Saatavissa: <http://web.lapinamk.fi/jouko.teeriaho/termodyna.pdf>. Hakupäivä 5.12.2021.
32. DeLaval 2021. FW: Lämmöntalteenotto. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja: Juhamatti Meetteri. 22.10.2021.
33. Latvala, Terhi – Suokannas, Antti 2005. Automaattisen lypsyjärjestelmän käyttöönotto: kannattavuus ja hankintaan vaikuttavat tekijät. Helsinki: Pelton taloudellinen tutkimuslaitos PTT. Tiedosto ladattavissa: <https://www.ptt.fi/julkaisut-ja-hankkeet/kaikki-julkaisut/automaattisen-lypsyjarjestelman-kayttoonotto-kannattavuus-ja-hankintaan-vaikuttavat-tekijat.html>. Hakupäivä 5.12.2021.
34. Kaukolämpösiirrinten eli lämmönvaihdinten huolto ja uusinta. Saatavissa: <https://www.varkaudenaluelampo.fi/fi/huoltopalvelut/lammonvaihdinpaletin-huolto-ja-uusinta/>. Hakupäivä 5.12.2021.

35. Manninen, Esa 2018. Esijäähdytä maito, säästä energiaa. Valio Oy. Saatavissa: <https://www.valio.fi/mjm/artikkelit/esijaahdyta-maito-saasta-energiaa/>. Hakupäivä 6.12.2021.
36. Lämpö talteen sikalassa lämpöpumpulla. Pellon Group Oy. Saatavissa: <https://www.pellon.fi/sikatalous/lampopumppu/>. Hakupäivä 6.12.2021.
37. Viljakainen, Anna-Liisa 2013. Maa- ja lietalteenotto lypsykarjatilalla. Opinnäytetyö. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu, Luonnonvara- ja ympäristöala, Maaseutuelinkeinojen koulutusohjelma. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/60054/Viljakainen_Anna-Liisa.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Hakupäivä 6.12.2021.
38. Lantojen tilavuuspainot, keskiarvot. Eurofins Viljavuuspalvelu Oy. Saatavissa: <https://cdnmedia.eurofins.com/european-east/media/2233424/lantojen-tilavuuspainot.pdf>. Hakupäivä 10.12.2021.
39. Virtanen, Johanna 2017. Perusteita karjanlannasta ja sen käytöstä. lisa-salmi: Ylä-Savon ammattiopisto. Saatavissa: http://ravinnejaenergia.fi/site/wp-content/uploads/2017/06/Separointi_yleistietoa-karjanlannasta.pdf. Hakupäivä 10.12.2021.
40. Lämmön talteenotto. Esimerkki maalämmön ja lannan lämmön hyödyntämisestä lypsykarjatilalla. LantaLogistiikka. Saatavissa: <https://lantalogistiikka.savonia.fi/maatilojen-ideat/lammon-talteenotto>. Hakupäivä 10.12.2021.
41. Nieminen, Anne – Nelimarkka, Tuulia 2016. Lämpö talteen sikalan liete-kuiluista. Käytännön Maamies 6/2016. Saatavissa: <http://media.voog.com/0000/0031/7775/files/l%C3%A4mp%C3%B6%20talteen%20lietteest%C3%A4-3.pdf>. Hakupäivä 6.12.2021.

42. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS). 2021. European Commission. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>. Hakupäivä 6.12.2021.
43. Aurinkopaneelit & tuotteet. GreenEnergy Finland. Saatavissa: <https://www.gef.fi/aurinkopaneelit-tuotteet/>. Hakupäivä 6.12.2021.
44. Aurinkosähköjärjestelmän teho. 2021. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestel-man_valinta/aurinkosahkojarjestelman_teho. Hakupäivä 6.12.2021.
45. Aurinkopaneelien asentaminen. 2021. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/han-kinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen. Hakupäivä 6.12.2021.
46. Aurinkopaneeli GEF-365-HM120 Black. Saatavissa: <https://geffi.sharepoint.com/:b:/g/EdkX3oBbneFJh7PJm5bowcsBobYGX-P32jPDMJEA41XT2w?e=pdborW>. Hakupäivä 6.12.2021.
47. Ylijäämäsihtin myynti. 2021. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestel-man_kaytto/ylijaamasahkon_myynti. Hakupäivä 10.12.2021.
48. Sähkön varastointi. 2021. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestel-man_kaytto/sahkon_varastointi. Hakupäivä 10.12.2021.
49. Virtuaalialkulla varastoit aurinkoa myös pilvisen päivän varalle. 2020. Helen Oy. Saatavissa: <https://www.helen.fi/aurinkopaneelit/sahko-varas>

- [tointi/virtuaaliakku?gclid=Cj0KCQiAhf2MBhDNARIsAKXU5GRwGIS-vGE6dH-ZRk48lChgbSZmhPmDeiPNekeOW79_LUI0t2vbFbHE-aAsl3EALw_wcB&gclidsrc=aw.ds](https://www.motiva.fi/virtuaaliakku?gclid=Cj0KCQiAhf2MBhDNARIsAKXU5GRwGIS-vGE6dH-ZRk48lChgbSZmhPmDeiPNekeOW79_LUI0t2vbFbHE-aAsl3EALw_wcB&gclidsrc=aw.ds). Hakupäivä 6.12.2021.
50. Sähköverkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän mitoitus. 2021. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkosahkojarjestelman_mitoitus. Hakupäivä 10.12.2021.
51. Aurinkopaneelien asentaminen. 2021. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen. Hakupäivä 10.12.2021.
52. Selvitä kohteeseesi sopiva järjestelmä. Lumo Energia Oyj. Saatavissa: <https://www.lumoenergia.fi/aurinkopaneelit/>. Hakupäivä 6.12.2021.
53. Huolto ja kunnossapito. 2021. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/huolto_ja_kunnossapito. Hakupäivä 10.12.2021.
54. Aurinkosähkötuotannon taloudellinen tukeminen. 2021. Motiva Oy. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkotuotannon_taloudellinen_tukeminen. Hakupäivä 10.12.2021.
55. Solar Power Finds Ripe New Market in Crop Protection: Q&A. 2020. BloombergNEF. Saatavissa: <https://about.bnef.com/blog/solar-power-finds-ripe-new-market-in-crop-protection/>. Hakupäivä 6.12.2021.

56. Tuotannon optimaalinen hyödyntäminen. 2021. Motiva Oy. Saatavissa:
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/tuotannon_optimaalinen_hyodyntaminen.

Hakupäivä 10.12.2021.

LIITTEET

Liite 1 Yksikiteisen aurinkopaneelijärjestelmän laskennallisia arvoja eri paneelipinta-aloilla

Liite 2 Monikiteisen aurinkopaneelijärjestelmän laskennallisia arvoja eri paneelipinta-aloilla

Liite 3 Yksikiteiset aurinkopaneelit sähkön- ja lämmön tuotannossa

Liite 4 Yksikiteiset aurinkopaneelit ja maidon LTO sähkön- ja lämmön tuotannossa

Liite 5 Kannattavin aurinkopaneelijärjestelmä aurinkopaneelien ja maidon LTO:n yhdistelmässä

Liite 6 Yksikiteiset aurinkopaneelit ja lietalannan LTO sähkön ja lämmön tuotannossa

Liite 7 Kannattavin aurinkopaneelijärjestelmä aurinkopaneelien ja lietalannan LTO:n yhdistelmässä

YKSIKITEISEN AURINKOPANEELIJÄRJESTELMÄN LASKENNALLISIA ARVOJA ERI PANEELIPINTA-ALOILLA

LIITE 1

Aurinkopaneelit, sähkön tuotanto																					
Kenno		yksikiteinen pii																			
"Avaimet käteen"		Kyllä																			
Tuotannonseuranta		Kyllä																			
Tuotannonohjaus		Ei																			
Nimellisteho		365 W _p																			
AP:n hyötysuhde		19,7 %																			
AP:n keskim. tehon tuotto/25 v.		88,8 %																			
AP:n tehonalenemakorjattu hyötysuhde		17,5 %																			
AP:n pinta-ala		1,85 m ²																			
AP:n kokonaispinta-ala	AP-investoinnin kokonaishinta, ALV 0%	AP:n neliöhinta	Sähkön kustannus ilman investointia valoisina tunteina	Hyödyksi saatu sähköenergia	Hyödyksi saatu sähköenergia, osuus AP:n tuotannosta	Investoinnin takaisinmaksuaika	Sijoitetun pääoman tuotto	Investoinnin vuotuinen kustannus	Energian vuotuinen kustannus AP:lla	Energian yksikkökustannus AP:lla	Investoinnin tuottama rahallinen säästö	AP:lla katettu sähköenergia, määrä	AP:lla katettu sähköenergia, osuus valoisien tunteiden sähkön tarpeesta	AP:lla katettu kokonaissähköenergia, osuus koko vuoden sähkön tarpeesta	Sähköverkoston ostettava valoisien tunteiden sähköenergia, määrä	Sähköverkoston ostettava sähköenergia, osuus valoisien tunteiden sähkön tarpeesta	Verkkoon myytävä sähköenergia, määrä	Verkkoon myytävä sähköenergia, osuus tuotannosta	AP:n valoisien tunteiden omakäyttöaste	AP:lla saavutettu huipputeho G _{aurinko} =889 W/m ²	AP:n nimellinen piikkiteho
m ²	€/Inv.	€/m ²	€/vuosi	kWh/vuosi	%	vuotta	%/vuosi	€/vuosi	€/vuosi	snt/kWh	€/vuosi	kWh/vuosi	%	%	kWh/vuosi	%	kWh/vuosi	%	%	kW	kW _p
15	6183	328	4259	2864	99,6 %	40,1	2,5 %	247	4105	13,5	154	2864	9,4 %	5,2 %	27554	90,6 %	13	0,4 %	99,6 %	2,34	2,92
19	6664	278	4259	3617	99,3 %	27,7	3,6 %	267	4018	13,2	241	3617	11,9 %	6,6 %	26802	88,1 %	27	0,7 %	99,3 %	2,96	3,65
23	7226	248	4259	4365	98,9 %	22,3	4,5 %	289	3935	12,9	323	4365	14,3 %	7,9 %	26054	85,7 %	47	1,1 %	98,9 %	3,58	4,38
26	7870	238	4259	4921	98,7 %	20,9	4,8 %	315	3883	12,8	376	4921	16,2 %	8,9 %	25498	83,8 %	66	1,3 %	98,7 %	4,05	5,11
30	8562	225	4259	5654	98,3 %	18,9	5,3 %	342	3807	12,5	452	5654	18,6 %	10,3 %	24764	81,4 %	99	1,7 %	98,3 %	4,68	5,84
34	9351	217	4259	6380	97,8 %	17,9	5,6 %	374	3735	12,3	523	6380	21,0 %	11,6 %	24039	79,0 %	141	2,2 %	97,8 %	5,30	6,57
37	10328	221	4259	6915	97,4 %	18,4	5,4 %	413	3698	12,2	560	6915	22,7 %	12,5 %	23504	77,3 %	181	2,6 %	97,4 %	5,77	7,30
41	10864	209	4259	7606	96,7 %	17,0	5,9 %	435	3621	11,9	638	7606	25,0 %	13,8 %	22813	75,0 %	257	3,3 %	96,7 %	6,39	8,03
45	11954	205	4259	8262	95,7 %	17,3	5,8 %	478	3569	11,7	690	8262	27,2 %	15,0 %	22156	72,8 %	368	4,3 %	95,7 %	7,01	8,76
49	12532	197	4259	8879	94,5 %	16,5	6,0 %	501	3501	11,5	757	8879	29,2 %	16,1 %	21539	70,8 %	518	5,5 %	94,5 %	7,64	9,49
52	13435	197	4259	9311	93,4 %	17,1	5,9 %	537	3473	11,4	786	9311	30,6 %	16,9 %	21107	69,4 %	662	6,6 %	93,4 %	8,10	10,22
56	13988	190	4259	9842	91,6 %	16,5	6,0 %	560	3413	11,2	845	9842	32,4 %	17,9 %	20577	67,6 %	898	8,4 %	91,6 %	8,73	10,95
60	14580	185	4259	10327	89,7 %	16,2	6,2 %	583	3361	11,0	898	10327	34,0 %	18,7 %	20091	66,0 %	1180	10,3 %	89,7 %	9,35	11,68
63	15685	182	4259	10664	88,3 %	17,3	5,8 %	627	3351	11,0	908	10664	35,1 %	19,3 %	19755	64,9 %	1419	11,7 %	88,3 %	9,82	12,41
67	16511	182	4259	11077	86,2 %	17,5	5,7 %	660	3315	10,9	944	11077	36,4 %	20,1 %	19341	63,6 %	1772	13,8 %	86,2 %	10,44	13,14
71	17290	178	4259	11461	84,2 %	17,7	5,7 %	692	3281	10,8	978	11461	37,7 %	20,8 %	18958	62,3 %	2156	15,8 %	84,2 %	11,06	13,87
74	17990	178	4259	11734	82,7 %	18,0	5,5 %	720	3262	10,7	997	11734	38,6 %	21,3 %	18685	61,4 %	2459	17,3 %	82,7 %	11,53	14,60
78	18628	176	4259	12078	80,7 %	18,0	5,5 %	745	3226	10,6	1032	12078	39,7 %	21,5 %	18341	60,3 %	2881	19,3 %	80,7 %	12,16	15,33
82	19206	173	4259	12403	78,9 %	18,0	5,6 %	768	3191	10,5	1068	12403	40,8 %	22,5 %	18016	59,2 %	3324	21,1 %	78,9 %	12,78	16,06
86	19845	171	4259	12711	77,1 %	18,1	5,5 %	794	3159	10,4	1099	12711	41,8 %	23,1 %	17708	58,2 %	3783	22,9 %	77,1 %	13,40	16,79
89	20602	171	4259	12933	75,8 %	18,6	5,4 %	824	3148	10,3	1111	12933	42,5 %	23,5 %	17485	57,5 %	4136	24,2 %	75,8 %	13,87	17,52
93	21180	169	4259	13216	74,1 %	18,6	5,4 %	847	3117	10,2	1142	13216	43,4 %	24,0 %	17203	56,6 %	4620	25,9 %	74,1 %	14,49	18,25
97	21818	168	4259	13482	72,5 %	18,7	5,4 %	873	3090	10,2	1168	13482	44,3 %	24,5 %	16936	55,7 %	5121	27,5 %	72,5 %	15,12	18,98
100	22518	168	4259	13673	71,3 %	19,1	5,2 %	901	3080	10,1	1179	13673	44,9 %	24,8 %	16746	55,1 %	5506	28,7 %	71,3 %	15,58	19,71
104	23157	166	4259	13917	69,8 %	19,2	5,2 %	926	3056	10,0	1203	13917	45,8 %	25,2 %	16502	54,2 %	6029	30,2 %	69,8 %	16,21	20,44
108	23734	165	4259	14151	68,3 %	19,3	5,2 %	949	3030	10,0	1229	14151	46,5 %	25,7 %	16268	53,5 %	6562	31,7 %	68,3 %	16,83	21,17
111	24434	165	4259	14319	67,3 %	19,8	5,1 %	977	3022	9,9	1236	14319	47,1 %	26,0 %	16100	52,9 %	6970	32,7 %	67,3 %	17,30	21,90
115	25073	164	4259	14534	65,9 %	19,9	5,0 %	1003	3001	9,9	1257	14534	47,8 %	26,4 %	15885	52,2 %	7522	34,1 %	65,9 %	17,92	22,63
119	25650	163	4259	14742	64,6 %	20,0	5,0 %	1026	2978	9,8	1280	14742	48,5 %	26,7 %	15677	51,5 %	8081	35,4 %	64,6 %	18,55	23,36
123	26289	162	4259	14943	63,3 %	20,2	4,9 %	1052	2959	9,7	1300	14943	49,1 %	27,1 %	15475	50,9 %	8647	36,7 %	63,3 %	19,17	24,09
126	26989	162	4259	15091	62,4 %	20,7	4,8 %	1080	2953	9,7	1305	15091	49,6 %	27,4 %	15327	50,4 %	9074	37,6 %	62,4 %	19,64	24,82
130	27627	161	4259	15284	61,3 %	20,9	4,8 %	1105	2934	9,6	1324	15284	50,2 %	27,7 %	15135	49,8 %	9648	38,7 %	61,3 %	20,26	25,55
134	28266	160	4259	15470	60,2 %	21,1	4,7 %	1131	2917	9,6	1342	15470	50,9 %	28,1 %	14949	49,1 %	10230	39,8 %	60,2 %	20,88	26,28
137	28904	160	4259	15606	59,4 %	21,4	4,7 %	1156	2910	9,6	1349	15606	51,3 %	28,3 %	14813	48,7 %	10669	40,6 %	59,4 %	21,35	27,01
141	29543	159	4259	15784	58,4 %	21,6	4,6 %	1182	2893	9,5	1366	15784	51,9 %	28,6 %	14635	48,1 %	11258	41,6 %	58,4 %	21,97	27,74
145	30182	159	4259	15957	57,4 %	21,8	4,6 %	1207	2876	9,5	1382	15957	52,5 %	28,9 %	14461	47,5 %	11852	42,6 %	57,4 %	22,60	28,47

MONIKITEISEN AURINKOPANEELIJÄRJESTELMÄN LASKENNALLISIA ARVOJA ERI PANEELIPINTA-ALOILLA

Kenno		monikiteinen pii																			
"Avaimet käteen"		Kyllä																			
Tuotannonseuranta		Kyllä																			
Tuotannonohjaus		Ei																			
Nimellisteho		280		W _p																	
Ap:n tehonalenemakorjattu hyötysuhde		13,4 %																			
Ap:n pinta-ala		1,85		m ²																	
AP:n kokonaispinta-ala	AP-investoinnin kokonaishintaa, ALV 0%	AP:n nelihintaa	Sähkön hinta ilman investointia valoisina tunteina	Hyödyksi saatu sähkönenergia	Hyödyksi saatu sähkönenergia, osuus AP:n tuotannosta	Investoinnin takaisinmaksuaika	Sijoitetun pääoman tuotto	Investoinnin vuotuinen kustannus	Energian vuotuinen kustannus AP:lla	Energian yksikkökustannus AP:lla	Investoinnin tuottama rahallinen säästö	AP:lla katettu sähkönenergia, määrä	AP:lla katettu kokonais-sähkönenergia, osuus valoisten tuntien sähkön tarpeesta	AP:lla katettu kokonais-sähkönenergia, osuus sähkön tarpeesta	Sähköverkosta ostettava valoisten tuntien sähkönenergia, määrä	Sähköverkosta ostettava sähkönenergia, osuus valoisten tuntien sähkön tarpeesta	Verkkoon myytävä sähkönenergia, määrä	Verkkoon myytävä sähkönenergia, osuus tuotannosta	AP:n valoisten tuntien omakäyttöaste	AP:lla saavutettu huipputeho	AP:n nimellinen piikiteho
m ²	€/Inv.	€/m ²	€/vuosi	kWh/vuosi	%	vuotta	%/vuosi	€/vuosi	€/vuosi	snt/kWh	€/vuosi	kWh/vuosi	%	%	kWh/vuosi	%	kWh/vuosi	%	%	kW	kW _p
14	5146,33	285,08	4258,61	2057	99,9%	62,6	1,6%	205,85	4176,40	13,7	82,21	2057	6,8%	3,7%	28362	93,2%	3	0,1%	99,9%	1,67	2,24
17	5442,42	249,43	4258,61	2494	99,7%	41,3	2,4%	217,70	4126,93	13,6	131,68	2494	8,2%	4,5%	27925	91,8%	7	0,3%	99,7%	2,03	2,52
20	5766,06	223,51	4258,61	2929	99,5%	32,1	3,1%	230,64	4078,80	13,4	179,81	2929	9,6%	5,3%	27490	90,4%	14	0,5%	99,5%	2,39	3,08
23	6165,38	209,68	4258,61	3362	99,4%	27,4	3,6%	246,62	4033,86	13,3	224,75	3362	11,1%	6,1%	27056	88,9%	22	0,6%	99,4%	2,75	3,36
27	6785,92	196,39	4258,61	3938	99,1%	24,2	4,1%	271,44	3977,71	13,1	280,90	3938	12,9%	7,1%	26481	87,1%	35	0,9%	99,1%	3,23	4,20
30	7389,27	195,30	4258,61	4367	98,9%	23,3	4,3%	295,57	3941,38	13,0	317,23	4367	14,4%	7,9%	26052	85,6%	47	1,1%	98,9%	3,59	4,48
33	7864,52	189,10	4258,61	4794	98,7%	21,9	4,6%	314,58	3900,19	12,8	358,42	4794	15,8%	8,7%	25625	84,2%	61	1,3%	98,7%	3,95	5,04
36	8282,20	182,28	4258,61	5218	98,5%	20,6	4,8%	331,29	3857,01	12,7	401,60	5218	17,2%	9,5%	25201	82,8%	78	1,5%	98,5%	4,30	5,32
40	8936,48	175,87	4258,61	5779	98,2%	19,6	5,1%	357,46	3803,81	12,5	454,80	5779	19,0%	10,5%	24639	81,0%	106	1,8%	98,2%	4,78	6,16
43	9639,02	178,84	4258,61	6197	98,0%	19,8	5,0%	385,56	3772,68	12,4	485,93	6197	20,4%	11,2%	24221	79,6%	129	2,0%	98,0%	5,14	6,44
46	10102,98	175,23	4258,61	6611	97,7%	19,2	5,2%	404,12	3732,48	12,3	526,13	6611	21,7%	12,0%	23808	78,3%	157	2,3%	97,7%	5,50	7,00
49	10782,72	176,33	4258,61	7019	97,4%	19,4	5,2%	431,31	3701,60	12,2	557,01	7019	23,1%	12,7%	23400	76,9%	190	2,6%	97,4%	5,86	7,28
53	11314,91	169,83	4258,61	7548	96,8%	18,5	5,4%	452,60	3646,99	12,0	611,62	7548	24,8%	13,7%	22871	75,2%	250	3,2%	96,8%	6,34	8,12
56	11619,87	165,34	4258,61	7932	96,3%	17,7	5,6%	464,79	3603,73	11,8	654,88	7932	26,1%	14,4%	22487	73,9%	307	3,7%	96,3%	6,69	8,40
59	12147,54	164,28	4258,61	8304	95,7%	17,7	5,7%	485,90	3570,68	11,7	687,93	8304	27,3%	15,1%	22115	72,7%	377	4,3%	95,7%	7,05	8,96
62	12921,37	162,04	4258,61	8663	95,0%	18,2	5,5%	516,85	3548,87	11,7	709,74	8663	28,5%	15,7%	21756	71,5%	459	5,0%	95,0%	7,41	9,52
66	13418,88	158,34	4258,61	9118	93,9%	17,7	5,6%	536,76	3501,10	11,5	757,51	9118	30,0%	16,5%	21301	70,0%	592	6,1%	93,9%	7,89	10,08
69	13869,49	157,31	4258,61	9440	93,0%	17,6	5,7%	554,78	3470,47	11,4	788,14	9440	31,0%	17,1%	20979	69,0%	712	7,0%	93,0%	8,25	10,36
72	14588,00	156,36	4258,61	9744	92,0%	18,1	5,5%	583,52	3452,47	11,3	806,14	9744	32,0%	17,7%	20674	68,0%	849	8,0%	92,0%	8,61	10,92
75	15085,51	155,49	4258,61	10033	90,9%	18,1	5,5%	603,42	3427,41	11,3	831,20	10033	33,0%	18,2%	20386	67,0%	1002	9,1%	90,9%	8,97	11,48
79	15583,02	152,73	4258,61	10397	89,5%	17,9	5,6%	623,32	3389,58	11,1	869,03	10397	34,2%	18,9%	20022	65,8%	1226	10,5%	89,5%	9,44	12,04
82	16033,63	152,06	4258,61	10653	88,3%	18,0	5,6%	641,35	3366,18	11,1	892,43	10653	35,0%	19,3%	19765	65,0%	1411	11,7%	88,3%	9,80	12,32
85	16531,14	151,44	4258,61	10896	87,1%	18,1	5,5%	661,25	3346,13	11,0	912,48	10896	35,8%	19,8%	19523	64,2%	1610	12,9%	87,1%	10,16	12,88
88	17643,65	150,87	4258,61	11127	85,9%	19,5	5,1%	705,75	3351,93	11,0	906,68	11127	36,6%	20,2%	19291	63,4%	1820	14,1%	85,9%	10,52	13,44
92	18141,16	148,70	4258,61	11421	84,4%	19,4	5,2%	725,65	3321,88	10,9	936,73	11421	37,5%	20,7%	18998	62,5%	2115	15,6%	84,4%	11,00	14,00
95	18591,77	148,25	4258,61	11633	83,2%	19,5	5,1%	743,67	3303,38	10,9	955,23	11633	38,2%	21,1%	18786	61,8%	2344	16,8%	83,2%	11,36	14,28
98	19089,28	147,83	4258,61	11837	82,1%	19,7	5,1%	763,57	3287,56	10,8	971,05	11837	38,9%	21,5%	18582	61,1%	2581	17,9%	82,1%	11,72	14,84
101	19586,79	147,44	4258,61	12034	81,0%	19,9	5,0%	783,47	3272,51	10,8	986,10	12034	39,6%	21,8%	18384	60,4%	2825	19,0%	81,0%	12,07	15,40
105	20276,30	145,67	4258,61	12287	79,5%	20,2	5,0%	811,05	3254,66	10,7	1003,95	12287	40,4%	22,3%	18132	59,6%	3161	20,5%	79,5%	12,55	15,96
108	20726,91	145,36	4258,61	12469	78,5%	20,3	4,9%	829,08	3239,37	10,6	1019,24	12469	41,0%	22,6%	17949	59,0%	3420	21,5%	78,5%	12,91	16,24
111	21224,42	145,07	4258,61	12646	77,4%	20,6	4,9%	848,98	3226,57	10,6	1032,04	12646	41,6%	22,9%	17772	58,4%	3685	22,6%	77,4%	13,27	16,80
114	21721,93	144,79	4258,61	12820	76,4%	20,8	4,8%	868,88	3214,17	10,6	1044,44	12820	42,1%	23,3%	17599	57,9%	3953	23,6%	76,4%	13,63	17,36
118	22219,44	143,30	4258,61	13043	75,1%	20,8	4,8%	888,78	3191,87	10,5	1066,74	13043	42,9%	23,7%	17376	57,1%	4318	24,9%	75,1%	14,11	17,92
121	22670,05	143,09	4258,61	13204	74,2%	21,0	4,8%	906,80	3178,93	10,5	1079,68	13204	43,4%	23,9%	17215	56,6%	4598	25,8%	74,2%	14,47	18,20
124	23167,56	142,88	4258,61	13359	73,2%	21,3	4,7%	926,70	3168,53	10,4	1090,08	13359	43,9%	24,2%	17060	56,1%	4885	26,8%	73,2%	14,82	18,76
127	23723,07	142,68	4258,61	13510	72,3%	21,6	4,6%	948,92	3160,93	10,4	1097,68	13510	44,4%	24,5%	16909	55,6%	5175	27,7%	72,3%	15,18	19,32
131	24220,58	141,41	4258,61	13703	71,1%	21,7	4,6%	968,82	3141,86	10,3	1116,75	13703	45,0%	24,9%	16715	55,0%	5570	28,9%	71,1%	15,66	19,88
134	24671,19	141,26	4258,61	13845	70,2%	21,9	4,6%	986,85	3131,12	10,3	1127,49	13845	45,5%	25,1%	16574	54,5%	5870	29,8%	70,2%	16,02	20,16
137	25168,70	141,11	4258,61	13982	69,4%	22,2	4,5%	1006,75	3122,64	10,3	1135,97	13982	46,0%	25,4%	16436	54,0%	6174	30,6%	69,4%	16,38	20,72
140	25666,21	140,97	4258,61	14116	68,5%	22,4	4,5%	1026,65	3114,55	10,2	1144,06	14116	46,4%	25,6%	16302	53,6%	6481	31,5%	68,5%	16,74	21,28
144	26163,72	139,86	4258,61	14289	67,4%	22,5	4,4%	1046,55	3097,76	10,2	1160,86	14289	47,0%	25,9%	16129	53,0%	6897	32,6%	67,4%	17,22	21,84
147	26614,33	139,75	4258,61	14415	66,7%	22,7	4,4%	1064,57	3088,73	10,2	1169,88	14415	47,4%	26,1%	16004	52,6%	7213	33,3%	66,7%	17,57	22,12
150	27111,84	139,65	4258,61	14537	65,9%	23,0	4,3%	1084,47	3081,92	10,1	1176,69	14537	47,8%	26,4%	15881	52,2%	7531	34,1%	65,9%	17,93	22,68

Aurinkopaneelit + Maidon LTO, sähkö- ja lämmöntuotanto

AP-investoinnin taloudellisin vaihtoehto, yksikköhenkilö, 365 WP

	Energiantarve	Määrä	Yksikkö	Osuus tarpeesta	Huomioit.
Vuoden lämpöenergiatarve		39542	kWh/vuosi	41,1 %	kokonaistarpeesta
Vuoden sähköenergiatarve		55133	kWh/vuosi	59,9 %	kokonaistarpeesta
Vuoden kokonaisenergiatarve		93675	kWh/vuosi	100,0 %	kokonaistarpeesta
	Energiantuotanto				
Maidon LTO:n lämpöenergiantuotanto vuodessa		14500	kWh/vuosi	35,9 %	kokonaistuotannosta
AP:n sähköenergiantuotanto vuodessa		25691	kWh/vuosi	64,1 %	kokonaistuotannosta
Energiantuotanto yhteensä vuodessa		40191	kWh/vuosi	100,0 %	kokonaistuotannosta
	Varastokapasiteetti				
Energiavaraston tilavuus		1500	litra		
Varastokapasiteetin maksimiennergiäsäilytö		87,5	kWh		
	Osuus tuotannosta				
Määrä	Yksikkö	825	kWh/vuosi	5,7 %	LTO:n tuotannosta
AP:n energia varastoon		9151	kWh/vuosi	35,3 %	AP:n tuotannosta
Energia varastoon yhteensä		9976	kWh/vuosi	24,7 %	kokonaistuotannosta
	Katettu energia				
LTO:n suora + varastokapasiteetilla katettu lämpöenergia		23637	kWh/vuosi	61,3 %	Lämmön tarpeesta
LTO:lla katettu kokonaisenergia		14486	kWh/vuosi	37,5 %	Lämmön tarpeesta
LTO:lla suoraan katettu lämpöenergia		13661	kWh/vuosi	35,4 %	Lämmön tarpeesta
LTO:lla epäsuoraan katettu lämpöenergia		825	kWh/vuosi	2,1 %	Lämmön tarpeesta
AP:lla katettu kokonaisenergia		25179	kWh/vuosi	26,9 %	Kokonaistarpeesta
AP:lla suoraan katettu sähköenergia ja LTO:n lämpöille jäänyt suora lämmön tarve		16028	kWh/vuosi	17,1 %	Kokonaistarpeesta
AP:lla suoraan katettu sähkölaitteiden sähköenergia		15516	kWh/vuosi	28,1 %	Sähkön tarpeesta
AP:lla katettu lämpöenergia yhteensä		9664	kWh/vuosi	25,1 %	Lämmön tarpeesta
AP:lla suoraan katettu lämmön tarve		513	kWh/vuosi	1,3 %	Lämmön tarpeesta
AP:lla epäsuoraan katettu lämmön tarve		9151	kWh/vuosi	23,7 %	Lämmön tarpeesta
Varastokapasiteetilla katettu lämpöenergia		9976	kWh/vuosi	25,9 %	Lämmön tarpeesta
Omailla tuotannolla katettu lämpöenergia yhteensä		24150	kWh/vuosi	62,7 %	Lämmön tarpeesta
Omailla energian tuotannolla katettu kokonaisenergia vuodessa		39666	kWh/vuosi	42,3 %	Kokonaistarpeesta
	Sähkön kaappi				
	Myynti				
Verkkoon myytävä sähköenergia vuodessa		1060	kWh/vuosi	4,1 %	AP:n tuotannosta
	Osto				
Verkosta ostettava sähköenergia lopun lämmöntarpeen kattamiseen		14392	kWh/vuosi	37,3 %	Lämmön tarpeesta
Verkosta ostettava sähköenergia lopun s. laitteiden sähkötarpeen kattamiseen		39617	kWh/vuosi	71,9 %	Sähkön tarpeesta
Verkosta ostettava kokonaisenergia		54009	kWh/vuosi	57,7 %	Kokonaistarpeesta
	Netto-osto				
Verkosta ostettava nettosähköenergia		52949	kWh/vuosi	56,5 %	Kokonaistarpeesta
	Hyödynnetty jäänyt lämpöenergia				
Hyödynnetty jäänyt lämpöenergia		13	kWh/vuosi	0,1 %	Kokonaistuotannosta
Hyödynnetty jäänyt lämpöenergia		13	Yksikkö	Osuus tarpeesta	
	Omaikäyttöasteet				
Maidon LTO:n omaikäyttöaste		99,9 %			Ostettavan lämmöntarpeesta
Sähkön tuotannon omaikäyttöaste		97,3 %			
Sähköenergian omaikäyttöaste (sähkölaitteet)		59,9 %			
Sähköenergian omaikäyttöaste (lämpöenergia)		37,3 %			
Energian tuotannon kokonaisomakäyttöaste		98,2 %			
	Maidon LTO				
LTO:lla tuotannon keskiarvo		Määrä	Yksikkö		
LTO:lla tuotannon laskennallinen maksimituotto		1,7	kW		
LTO:n COP:n		2,8	kW		
LTO:n kylmäkonen kompressorin laskennallinen maksimituotto		3			
LTO:n COP:n		2,1	kW		
LTO:n kylmäkonen kompressorin laskennallinen maksimituotto		12	vuotta		
Maidon LTO:n käyttöikä		Määrä	Yksikkö		
	Aurinkoenergia				
Paneelipiinta-ala		135			
AP:n tehonaiemakorjattavuusuhde		17,5 %			
AP:n pikkiarvo		2,665	kWp		
AP:n sähkön tuotannon maksimituotto		2104	kW		
Aurinkopaneelien määrä		73	kpl		
AP:n käyttöikä		25	vuotta		
AP-investoinnin kustannus		28507	€		
	Kustannukset ja säästöt				
	Säilytyskauppa				
AP:n sähköstä saatava hinta verkkoon myyntinä		Määrä	Yksikkö		
Sähkön markkinahinta		0,03	€/kWh		
Sähkön kustannus ilman investointia		0,14	€/kWh		
Sähkön kustannus ilman investointia		13114	€/vuosi		
Maidon LTO-investointi		Määrä	Yksikkö		
LTO-läuhduttimen hyötysuhde		45 %			
Maidon LTO-investoinnin kustannus		7400	€		
LTO:lla hyödynnetyn lämpöenergian kustannus suoralla sähköllä		2028	€/vuosi		
LTO:lla käytettävän lämpöenergian kustannus LTO-investoinnilla		1411	€/vuosi		
LTO-investoinnin säästö vuodessa		16937	€/12v.		
LTO-investoinnin 12v. säästö sähköstokassa		5,2	vuotta		
LTO-investoinnin takaisinmaksuaika		19,1 %	vuodessa		
LTO-investoinnin sijoitetun pääoman tuotto		Määrä	Yksikkö		
AP-investoinnin kustannus		28507	€		
	AP-investointi				
Sähkön kustannus ilman AP-investointia		11086	€/vuosi		
Sähkön kustannus AP-investoinnilla (ei sähkön ylituoton myyntiä)		8702	€/vuosi		
Sähkön kustannus AP-investoinnilla (ei sähkön ylituoton myyntiä)		8670	€/vuosi		
Sähkön kustannus AP-investoinnilla (sähkön ylituoton myynti verkkoon)		8553	€/vuosi		
Sähkön kustannus AP-investoinnilla (sähkön nettokauppa)		2385	€/vuosi		
AP-investoinnin säästö vuodessa (ei sähkön ylituoton myyntiä)		2417	€/vuosi		
AP-investoinnin säästö vuodessa (sähkön ylituoton myynti verkkoon)		2533	€/vuosi		
AP-investoinnin 25v. säästö sähköstokassa (ei sähkön ylituoton myyntiä)		59621	€/25v.		
AP-investoinnin 25v. säästö sähköstokassa (sähkön ylituoton myyntiä)		60416	€/25v.		
AP-investoinnin 25v. säästö sähköstokassa (sähkön nettokauppa)		63331	€/25v.		
AP-investoinnin takaisinmaksuaika (ei sähkön ylituoton myyntiä)		12,0	vuotta		
AP-investoinnin takaisinmaksuaika (sähkön ylituoton myynti verkkoon)		11,8	vuotta		
AP-investoinnin takaisinmaksuaika (sähkön nettokauppa)		11,3	vuotta		
AP-investoinnin sijoitetun pääoman tuotto (ei sähkön ylituoton myyntiä)		8,4 %	vuodessa		
AP-investoinnin sijoitetun pääoman tuotto (sähkön ylituoton myyntiä)		8,5 %	vuodessa		
AP-investoinnin sijoitetun pääoman tuotto (sähkön nettokauppa)		8,9 %	vuodessa		
Maidon LTO- ja AP-investoinnin kustannus yhteensä		35907	€		

