

Milla Sairanen

KONTTITALON ENERGIATEHOKKUUS

Opinnäytetyö
Talotekniikka

Toukokuu 2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät Milla Sairanen	Tutkinto Insinööri (AMK) Talotekniikka	Aika Toukokuu 2017
Opinnäytetyön nimi Konttitalon energiatehokkuus		55 sivua 2 liitesivua
Toimeksiantaja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Talotek-hanke		
Ohjaaja Mika Kuusela		
Tiivistelmä Työssä tutkitaan tilakonteista muokatun siirtokelpoisen modulaarisen pientalon eli konttitalon laskennallista energiatehokkuutta ja sisäilmasto-olosuhteita eri taloteknisillä ratkaisulla. Energiatehokkuutta ja sisäilmasto-olosuhteiden toteutumista tutkittiin työssä dynaamisella simuloinnilla, johon käytettiin IDA Indoor Climate and Energy -ohjelmistoa (IDA ICE). Tarkasteltavat talotekniset järjestelmät määrittyivät rakennuksen suunnitelmista sekä kirjallisuudesta. Laskennassa noudatettiin rakentamismääräyskokoelman osien D3 ja D5 määräyksiä ja ohjeita. Ratkaisujen taloudellisuutta arvioitiin vertailemalla laskennallista ostoenergian kulutusta, ja vaatimustenmukaisuus selvitettiin laskemalla kokonaisenergiankulutus eli E-luku. Sisäilmasto-olosuhteista tarkasteltiin kesäajan auringon säteilykuormaa ja sen torjumista sekä tukilämmitysjärjestelmien eli tulisijan ja ilma-ilmalämpöpumpun vaikutusta oleskelutilojen ilman lämpötilaan lämmityskaudella. Suorasähköllä lämmitettäessä konttitalon energialuokka on D. Laskennallisesti saadaan luokitus nostettua C-luokkaan, kun lisätään ilmalämpöpumppu ja varaava takka sekä tehostetaan ilmanvaihdon lämmöntalteenottoa. Korvaamalla suorasähkö uusiutuvilla energialähteillä voidaan säästää B-luokkaa. Ostoenergiatarve vähenee, jos lämmitysjärjestelmään integroidaan ulkoilmalämpöpumppu. Auringon säteilykuorma on merkittävä tilojen yllämpenemisriski, kuten myös tulisija lämmityskauden alku- ja loppupuolella. Tutkituista passiivisista suojakeinoista tehokkain oli markiisit. Ilmanvaihdon tehostamisella ei ollut juuri merkitystä huippulämpötilojen alentamisessa. Ilmalämpöpumppu oli kokonaisuuden kannalta tehokkaampi kuin matalamman g-arvon ikkunat. Tulosten perusteella suositellaan mitoittamaan ja säätämään ilmalämpöpumppu sekä huonekohdaiset sähkölämmittimet niin, että asuintilat lämmitetään pääasiallisesti keskikonttiin asennetulla ilmalämpöpumpulla. Jos hankitaan tulisija, niin suositellaan termostaattisäätöistä vesikiertoista pellettitakkaa, joka liitetään lämminvesivaraajaan, johon yhdistetään aurinkokeräimet.		
Asiasanat energiatehokkuus, pientalot, parakit, LVI-järjestelmät, simulointi		

Author (authors) Milla Sairanen	Degree Bachelor of Engineering Building Services	Time May 2017
Thesis Title Energy Efficiency of a Container House		55 pages 2 pages of appendices
Commissioned by South Eastern Finland University of Applied Sciences, Talotek Project		
Supervisor Mika Kuusela		
Abstract <p>The energy efficiency and indoor climate of a modular transportable home modified from portacabins was analysed. The emphasis of the study was on different building services and specifically heating systems.</p> <p>The method of the study was dynamic computer simulation with IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE). The building service systems were chosen from the design plans and relevant literature. The calculations followed the national building code for building energy. Accordance to the requirements was analysed from the whole energy consumption. The economy was analysed from the calculated delivered energy. The indoor temperatures were analysed in the case of heatload from the sun's radiation and the use use of a fireplace and a ductless heat pump.</p> <p>The energy class of the container house is D when the heating system is electric radiators. Energy class C can be achieved if supplementary heat from air to air ductless heat pump and a heat retaining fireplace are used and the heat recovery of ventilation is made more efficient. By replacing the electric radiators with renewable energy sources such as pellet boiler the energy class can be further raised to B. The need for delivered energy may be reduced by integrating a heat pump to the heating system.</p> <p>Radiation from the sun is a considerable risk in overheating of the living spaces as is using the fireplace in the early and late heating season. Marquisolettes were the most efficient method to protect from overheating from the sun. Neither doubling the ventilation rates nor using windows with low g values was efficient. A ductless heat pump provided the best overall comfort.</p> <p>It is recommended to design the system so that a ductless heat pump provides most of the heat in the living spaces with electric radiators as back-up. For a fireplace it is recommended to choose a pellet stove with a water heat exchanger and use the extra heat for hot domestic water. Solar heat collectors can be attached to the system.</p>		
Keywords energy efficiency, single-family houses, barracks, HPAC systems, simulation		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	SIIRTOKELPOINEN PIENTALO	7
2.1	Siirtokelpoiset pientalot, Suomi	8
2.1.1	Konttirakentaminen: Merikonttikoti	9
2.1.2	Ekorakentaminen: Luukku-talo	10
2.2	Siirtokelpoiset pientalot, Yhdysvallat	11
2.2.1	Northwest Energy Efficient Manufactured Housing (NEEM)	12
2.2.2	The Zero Energy Manufactured Home (ZEMH)	12
3	RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUS	13
3.1	Talotekniset ratkaisut	14
3.2	Rakennustekniset ratkaisut	15
3.3	Sisäilmasto	16
4	ENERGIALASKENTA	17
4.1	Ostoenergia ja E-luku	17
4.2	Laskentatyökalu: IDA ICE	19
5	SUUNNITTELURATKAISU	20
5.1	Rakennus ja vyöhykkeet	21
5.2	Sijainti, ilmasto ja maaperä	21
5.3	Vaippa ja rakenteet	22
5.4	Järjestelmät	24
5.5	Lisäenergiat ja häviöt	25
6	VAIHTOEHTOISET RATKAISUT	26
6.1	Päälämmitysjärjestelmät	26
6.2	Tukilämmitysjärjestelmät	27
6.2.1	Tehokkaampi lämmöntalteenotto	27
6.2.2	Aurinkokeräin	27
6.2.3	Aurinkosähkö	27
6.2.4	Ilma-ilmalämpöpumppu	28
6.2.5	Tulisija	28
6.3	Hybridijärjestelmä	29

7	KESÄAJAN LÄMPÖTILANHALLINTA	30
7.1	Passiiviset keinot	31
7.2	Aktiiviset keinot	32
8	TULOKSET	33
8.1	Perusmalli	33
8.2	Ostoenergia ja E-luku	34
8.3	Tukilämmitysjärjestelmät	35
8.4	Hybridilämmitys	39
8.5	Kesäajan huonelämpötilojen hallinta	40
9	POHDINTA	42
9.1	Mallien rajoitteista	46
10	YHTEENVETO	49
	LÄHTEET	52

LIITTEET

Liite 1. Rakennekuvaukset

1 JOHDANTO

Työssä tutkittiin Mikkelin asuntomessuilla kesällä 2017 esiteltävän toimistokonteista muokatun pientalon, Konttitalon, laskennallista energiatehokkuutta ja sisäilmasto-olosuhteita. Energiatehokkuutta tutkittiin vertailemalla taloteknisiin järjestelmiin liittyvien ratkaisujen ja vaihtoehtoisten lämmitysjärjestelmien vaikutusta laskennalliseen ostoenergiankulutukseen. Sisäilmasto-olosuhteista tutkittiin auringon säteilyn ja rakennuksen standardikäytön aiheuttaman lämpökuorman ja tukilämmitysjärjestelmien kuten tulisijan ja ilma-ilmalämpöpumpun vaikutusta oleskelutilojen ilman lämpötilaan. Lisäksi tarkasteltiin joitain keinoja vähentää tilojen tililämpenemistä lämmityskauden ulkopuolella.

Konttitalon toteuttaa Etelä-Savon ammattiopisto, Esedu, ja asuntomessuilla sen yhteydessä on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun, Xamkin, liikkuva talotekniikkalaboratorio Modlab, missä tarkemmin esitellään Konttitalon talotekniikkaa. Sekä Modlab että Konttitalo ovat osa Talotek-hanketta.

Konttitalo on modulaarinen pientalo, jonka konttimoduulit voidaan tarpeen tullen irroittaa toisistaan ja siirtää muualle. Siirtokelpoiset asuinrakennukset kiinnostavat kuluttajia ja ne voivat olla mahdollisuus hetkellisen asuntopulan ratkaisemiseen. Toistaiseksi siirtokelpoisia pientaloja on Suomessa melko vähän ja niiden energiatehokkuutta tai asumismukavuutta ei juurikaan ole tutkittu. Yhdysvalloissa siirtokelpoisia pientaloja on jonkin verran asuntokannasta ja niiden energiatehokkuutta on tutkittu 1980-luvulta lähtien.

Rakennuksen energiankäyttöön voidaan merkittävästi vaikuttaa vähentämällä tilojen ja käyttöveden lämmitysenergian kulutusta. Konttitalon suunniteltu päälämmitysjärjestelmä on suorasähkö huonekohtaisilla lämmittimillä. Tukilämmönlähteiksi on suunniteltu ilmalämpöpumppu ja varaava tulisija sekä aurinkokeräimet. Tilaaja harkitsi myös biokattilaa ja kirjallisuudessa [1] suositetaan ilma-vesilämpöpumppujen käyttämistä, joten laskettiin näille ostoenergiankulutus. Ilma-ilmalämpöpumpun ja tulisijan käyttöä tarkasteltiin myös sisäilman lämpöolosuhteiden kannalta.

Yhteiskunnallisesti rakennusten energiatehokkuuteen ja uusiutuvan energian käyttöön

ohjataan lailla energiatodistuksesta [2]. Lain mukaan rakennuksen määräystenmukaisuus on osoitettava ja rakennukselle on laskettava vertailukelpoinen kokonaisenergiankulutus eli E-luku, joka perustuu energiamuotokertoimilla painotettuun ostoenergian tarpeeseen. Siirtokelpoisille tai määräaikaisille asuinrakennuksille ei Suomessa kuitenkaan ole vielä toistaiseksi omia energiatehokkuusvaatimuksia, vaan laskennassa käytetään esimerkiksi pientaloille tarkoitettuja vaatimuksia.

2 SIIRTOKELPOINEN PIENTALO

Siirtokelpoisilla pientaloilla voidaan tarjota väliaikaista ja edullista asumista tilanteissa, joissa paikalle rakentaminen ei ole mahdollista tai edes mielekäästä, kuten esimerkiksi ajanpuutteen, kaavoituksen tai määräaikaisen tarpeen takia [3]. Siirtokelpoisia pientaloja voidaan käyttää myös pysyvään asumiseen, mutta niiden tekniseksi käyttöikäsi arvioidaan korkeintaan 40-50 vuotta [4] ja esimerkiksi väliaikaisten tilakonttien käyttöikänsä pidetään 15 vuotta [5, s. 3]. Yhdysvalloissa niin sanottuja mobiilikoteja pidetään vähävaraisten asumismuotona ja taloyksiköt pyritään valmistamaan mahdollisimman edullisesti [1], mikä myös vaikuttaa käyttöikänsä.

Väliaikaiseen työmaa-asumiseen tarkoitettut tilakontit ("porta cabin") ovat metallirunkoisia, kuten myös kansainvälisestikin kuluttajia kiinnostavat merikonttikodit ("container home"). Tehdasvalmisteiset, pysyvään asumiseen tarkoitettut siirtokelpoiset talot tyypillisesti rakennetaan puusta metallialustalle, johon kiinnitetään renkaat maantiekuljetusta varten [1]. Myös modulaariset talot voidaan kuljettaa sijoituspaikalleen lavetilla, mutta silloin taloille yleensä tehdään pysyvä perustus, eivätkä ne enää ole siirtokelpoisia [1]. Modulaariset talot voidaan tehdä myös mukana kulkevalla perustuksella [6].

Tehdasvalmisteiset siirtokelpoiset talot pyritään rakentamaan ulkoisesti mahdollisimman samankaltaisiksi kuin paikallaan rakennetut. Toisaalta maantiekuljetus asettaa joitain rakenteellisia vaatimuksia, mitkä vaikuttavat tilaelementtien ja lopullisen talon muotoon ja aukotuksiin, sekä valmiiksi asennettaviin järjestelmiin. Esimerkiksi Yhdysvalloissa siirtokelpoisissa taloissa kuljetusalustan taaki on ryömintätalallinen perustus, kun taas paikalleenrakennetuilla tai modulaarisilla taloille yleensä valetaan laattaperustus. [1; 4.]

Siirtokelpoisten talojen kokoa rajoittaa lähinnä yksiköitten määrä. Pienimmät suunnitellut tai toteutetut minitalot ovat 11-15,5 m² [7]. Yhteen merikonttiin mahtuu 13–14 m²

asuintilaa, 12-metriseen tilakonttiin 23 m² [8]. Rakennusluvan saanut, kahdesta kontista kasattu suomalainen Merikonttikoti on noin 50 m² [3]. Opiskelijoiden rakentama suomalainen Luukku-talo on pinta-alaltaan noin 60 m² [9]. Omakotitalon kaltaiset siirtokelpoiset talot ovat yleensä 85-220 m² [4; 6].

Siirtokelpoisten pientalojen energiankulutusta tai asumismukavuutta on tutkittu melko vähän. Yhdysvalloissa on tehty joitain julkisia seurantatutkimuksia keskikokoisille siirrettäville tehdasvalmisteisille taloille [1; 4; 10; 11]. Hankkeissa on lähinnä selvitetty kustannustehokkaita keinoja parantaa asumisen energiatehokkuutta, koska edullisesti rakennetuilla taloilla on tyypillisesti korkeat elinkaaren ajan käyttökustannukset [1]. Suomessa on ollut joitain opiskelijaprojekteja ja opinnäytetöitä [9; 12] sekä yksittäisten kuluttajien omia hankkeita [3].

2.1 Siirtokelpoiset pientalot, Suomi

Suomessa siirtokelpoiset rakennukset ovat toistaiseksi enimmäkseen tilakontteja, joita käytetään väliaikaisina toimisto- ja koulurakennuksina, työmaaparakeina tai muina ei pysyvään asuinkäyttöön tarkoitettuina väistötiloina. Jonkin verran on kiinnostusta myös ns merikonttirakentamiseen, mutta tilakontin etu rahtikonttiin verrattuna on valmis lämpöeristys ja helpompi muokattavuus asuinkäyttöön. [3.]

Myös siirtokelpoisia modulaarisia valmistalopaketteja valmistetaan Suomessa jonkin verran. Erään valmistajan [6] talomoduuleihin valetaan kiinteä teräsbetoniperustus, mihin on asennettu lattialämmitys ja muu putkitus. Koska perustus on talossa kiinteänä, talo voidaan myöhemminkin nostaa lavetille ja siirtää seuraavaan sijoituspaikkaansa. Taloissa on mallista riippuen varaava takka, sähköinen tai vesikiertoinen lattialämmitys sekä ilmanvaihdon lämmöntalteenotto tai poistoilmalämpöpumppu.

Nykyisissä energiatehokkuusmääräyksissä [13] ei huomioida siirtokelpoisia uudisasuinrakennuksia erikseen, vaan ne voidaan luokitella esimerkiksi määräaikaisiksi rakennuksiksi tai pientaloiksi. Määräaikaista rakennusta koskevat puolilämpimien tilojen vaatimukset vaipan osalta, mutta ilmatiiveyden ja ilmanvaihdon vaatimukset ovat samat kuin lämpimillä tiloilla. Kokonaisenergiankulutus lasketaan suunnitteluarvoilla, mutta sille ei ole määritelty rajoja. Pientaloa koskevat lämpimien tilojen vaatimukset, energiatehokkuutta laskettaessa käytetään standardikäytön arvoja ja energiatehokkuulle on asetettu hyväksyttävät rajat.

Uusien vuonna 2018 voimaan tulevien energiatehokkuusvaatimusten luonnosversiossa [14] on siirtokelpoiseksi rakennukseksi määritelty kiinteää perustusta tarvitsematon, väliaikaiseen käyttöön tarkoitettu liikuteltava rakennus. Siirtokelpoiset uudisrakennukset luokitellaan luokkaan 9 eikä niille ole määritelty raja-arvoa laskennalliselle kokonaisenergiankulutukselle. Esimerkiksi asetuksessa rakennusten energiatehokkuudesta ei siirtokelpoisille tai alle 50 m² rakennuksille ole asetettu erityisiä vaatimuksia, koska energiatehokkuuden tehostamista on pidetty kohtuuttomana kustannuksena.

Asuinrakennuksen vähimmäishuoneistoalan on oltava 20 m², asuntojen keskikoko on 109,5 m² ja asumisväljyys on kasvamassa [15]. Pienet siirtokelpoiset talot eivät siis edusta valtavirtaa ja niiden etuna voidaan lähinnä pitää siirrettävyyttä.

Tutkittua tietoa konttirakentamisesta ja -asumisesta tai muista siirtokelpoisista pientaloista Suomessa on kiinnostuksesta huolimatta edelleen melko vähän [8]. Tunnetuimmat esimerkit toistaiseksi ovat Merikonttikoti, joka rakennettiin rahtikonteista ja esiintyi vuoden 2013 asuntomessuilla, ja Aalto-yliopiston opiskelijoiden rakentama Luukku-talo, joka esiintyi kesän 2011 asuntomessuilla Mäntyharjussa. Luukku-talosta on kerätty energiankulutustietoa, mutta vain Merikonttikoti on pysyvässä asuinkäytössä. Toimistokonteista on tutkittu eristyksen ja liitoskohtien parantamista kylmäsiltojen kannalta [12].

2.1.1 Konttirakentaminen: Merikonttikoti

Ensimmäinen rakennusluvan saanut konttikoti, Merikonttikoti [3], on rakennettu kahdesta käytöstä poistetusta rahtikontista. Talon pinta-ala on noin 50 m² ja siinä on isot katosta lattiaan ulottuvat ikkunat. Vaippaa ei ole erikseen verhoiltu vaan kontin teräspinta on jätetty näkyville.

Merikonttikotia ei ole liitetty kunnallistekniikkaan, mutta sähköliittymä on. Sauna ja pesutilat ovat erillisessä kontissa. Koti lämpenee lähes kokonaan oleskelutilan seinustalle asennetun varaavan takan avulla. Lisälämmönlähteenä on ilmalämpöpumppu. Kodin itselleen rakentaneet asukkaat olivat kolmen vuoden asumiskokemuksen jälkeen erittäin tyytyväisiä kotiinsa. Talosta ei kuitenkaan ollut saatavilla seurantatietoa esimerkiksi energiankulutuksen kannalta.

2.1.2 Ekorakentaminen: Luukku-talo

Luukku-talo [9] on Aalto-yliopiston opiskelijoiden vuoden 2010 Solar Decathlon kilpailuun suunnittelema ja rakentama siirrettävä puurakenteinen energiatehokas pientalo, jolla on mahdollisimman pieni hiilijalanjälki. Kilpailun jälkeen rakennus siirrettiin Mäntyharjuun vapaa-ajan asuntomessualueelle, missä sen kulutusta seurattiin vuoden ajan.

Luukku-talo on toteutettu tilaelementteinä sekä erillisinä eriste-elementteinä, jolloin se mahtuu pienempään tilaan ja sen kuljettaminen on edullisempaa. Rakennuselementteihin verrattuna tilaelementtien käytön etu on parempi ilmatiiviyys sekä mahdollisuus asentaa esimerkiksi talotekniikka jo tehtaalla.

Luukku-talo on ilmalämmitteinen, mitä varten ilmanvaihtokoneeseen on yhdistetty lämmöntalteenotto sekä ilmalämpöpumppu. Ilmanvaihto on tarpeenmukainen, mutta ylimitoitettu sisäilmaston energiatehokkaampaa hallintaa varten. Koska rakennus on kevytrakenteinen, on lämpöolojen tasaamiseksi asennettu vaipan sisäosaan ilmaaon taakse PCM-kipsilevyä (Phase Changing Material), joka muuttaa olomuotoaan lämpötilojen mukana.

Luukku-talossa hyödynnetään aurinkoenergiaa mahdollisimman paljon. Lämmin käyttövesi tuotetaan katolle asennetuilla aurinkokeräimillä, joiden pinta-ala on $4,78 \text{ m}^2$. Lämminvesivaraajan kooksi oli mitoitettu 290 litraa, mikä ei riitä huipputehon hyödyntämiseen, vaan keräyslaitteisto vaati varjostusta järjestelmän ylikuumentumisen estämiseksi. Talvella käyttövettä lämmitetään sähkövastuksella. Katolle on myös asennettu $61,5 \text{ m}^2$ aurinkosähköpaneeleja. Lähes kaikki sähkö syötetään takaisin verkkoon, koska järjestelmässä ei ole riittävää akustoa, ja kulutus ja tuotto ovat epäsuhdassa.

Luukku-talon energiankulutusta mitattiin sekä Madridissa, Otaniemessä että Mäntyharjussa. Mäntyharjussa sähköenergiaa kului vuoden aikana noin 6000 kWh, mistä pumput, puhaltimet ym. talotekniikan apulaitteet veivät 37 %, lämmin käyttövesi 25 %, kuluttajalaitteet 21 %, tilojen lämmitys 13 % ja jäähdytys 1%, sekä valaistus 3 %. [16.]

2.2 Siirtokelpoiset pientalot, Yhdysvallat

Yhdysvalloissa on pitkä perinne "mobiiliasumiselle", ja vuoden 1976 jälkeen tehdasvalmisteisille siirtokelpoisille taloille on ollut omat rakentamismääräyksensä. Energia- ja tehokkuusvaatimukset ovat kuitenkin heikommat kuin paikalleen rakennettaville, joten 1980-luvulta lähtien on tutkittu kustannustehokkaita keinoja vähentää käytön aikaista energiankulutusta. [1.]

Kuluttajilla on ollut kiinnostusta myös merikonteista rakentamiseen ("shipping container housing") sekä auton perässä vedettäviin pikkuruisiin koteihin ("tiny house"). Lisäksi käytössä on vielä ennen 1976 rakennettuja trailereita ("mobile home"), joista olisi jo tarkoitus päästä eroon [1]. Nämä ovat kuitenkin melko marginaalisia tehdasvalmisteisiin taloihin ("manufactured housing") verrattuna.

Tyypillinen nykyaikainen siirtokelpoinen tehdasvalmisteinen pientalo koostuu yhdestä (61 %) tai kahdesta (38 %) yksiköstä tai moduulista. Moduulit ovat puurunkoisia ja ne rakennetaan metalliselle asennuspohjalle, mihin voidaan kiinnittää renkaat maantiekuljetusta varten. Siirtokelpoisille taloille ei tehdä tontille perustuksia, vaikka jopa 67 % jää ensimmäiselle sijoituspaikalleen. [1.]

Tavanomainen varustelu taloissa on ilmajakoinen keskuslämmitys ja koneellinen ilmastointi. Usein poistokanavointi puuttuu ja poistoilma johdetaan suoraan keskeisellä paikalla olevan teknisen tilan seinässä olevasta venttiilistä ilmanvaihtokoneeseen. Suosituimmat energialähteet siirtokelpoisissa kodeissa ovat suorasähkö ja maakaasu. Erityisesti sähkö koetaan edulliseksi asentaa ja helposti saatavaksi, mutta kalliiksi käyttää. Keskimäärin sähköä kuluu noin 12 kWh vuodessa. [1.]

Siirrettävät pientalot suunnitellaan mahdollisimman edullisiksi rakentaa ja ne voivat kuluttaa elinkaarensa aikana jopa 70 % enemmän ostoenergiaa, kuin vastaavan kokoiset paikalle rakennetut. Jälkikäteen tehdyt muutokset ovat kuitenkin kalliita, joten energiatehokkuus olisi huomioitava jo rakentamisen aikana. Toisaalta pienikokoisen talon energiatehokkuuden parantamisen takaisinmaksuaika voi olla pitkä, koska energiaa kuluu vähemmän kuin suuremmassa talossa. [1.]

2.2.1 Northwest Energy Efficient Manufactured Housing (NEEM)

NEEM-ohjelmassa [17; 18; 19] (Northwest Energy Efficient Manufactured Housing Program, Yhdysvaltojen luoteisosien energiatehokkaat tehdasvalmisteiset kodit -ohjelma) on 1980-luvulta lähtien ollut tavoitteena kustannustehokkaasti parantaa siirtokelpoisten modulaaristen pientalojen energiatehokkuutta. 2010-luvulla tutkitut talot ovat olleet pinta-alaltaan 85-220 m² ja niiden energiatehokkuutta on parannettu tavallista paremmalla eristyksellä ja ikkunoilla sekä käyttämällä tilojen sekä veden lämmitykseen ilmalämpöpumppuja, jotka ottavat lämmön alapohjan ryömintätilasta.

Energiatehokkaissa NEEM-taloissa päälämmitysjärjestelmä on suora sähkö niin, että olohuoneessa on ilmalämpöpumppu ja kylpy- ja makuuhuoneissa on huonekohtaiset 0,5-2 kW sähkölämmittimet. Ilmalämpöpumppu on mitoitettu tuottamaan asuintilojen lämmitys ja jäähdytys. Jotta lämpö vyöhykkeissä tasoittuu mahdollisimman tehokkaasti, pidetään ilmalämpöpumpun puhallin jatkuvasti päällä ja asukkaita on ohjeistettu jättämään väliovet auki.[19.]

Tutkitut talot sijaitsevat Suomea lämpimämissä ilmastoissa, missä keskilämpötila talvella on 2 °C. Lämmityskaudella termostaatit on asetettu päivällä 21 °C:een ja yöllä 20 °C:een. Seurantamittauksessa lämpötilaerot oleskelu- ja makuutilojen välillä olivat 1-2 °C ovien ollessa auki ja 2-3 °C astetta kun ovet pidettiin kiinni. [19.]

Lämmityskaudella oli mahdollista tuottaa lämpöä myös vyöhykekohtaisilla sähkölämmittimillä, mutta niitä ei juurikaan käytetty. Jäähdytyskaudella ilmalämpöpumppu yksin ei ole ollut riittävä, joten sen toimintaa tehostettiin kattotuulettimilla. Asumiskokemuksista tiedusteltaessa asukkaat ovat pitäneet sisäilmasto-olosuhteita miellyttävinä sekä lämmitys- että jäähdytyskaudella, eivätkä ole kokeneet vyöhykkeiden välisiä lämpötilaeroja epämukaviksi. [19.]

2.2.2 The Zero Energy Manufactured Home (ZEMH)

The Zero Energy Manufactured Home (ZEMH) -projektissa (tehdasvalmisteiset nollaenergiatalot) 2000-luvun alussa vertailtiin laskennallisesti ja seurantamittauksin tehdasvalmisteista nollaenergiataloa ja tavanomaista NEEM-valmistaloa. Vertailtavat rakennukset olivat pinta-alaltaan 147 m². ZEMH-talon energiatehokkuutta parantavia toi-

menpiteitä olivat tehokkaampi eristys ja huoleellisempi tiivistys, aurinkopaneelit ja -keräimet sekä energiapihit sähkölaitteet. Lisäksi rakennus massoiteltiin niin, että mahdollisimman paljon auringonsäteilystä tulevaa ilmaisenergiaa saatiin hyödynnettyä lämmityskaudella. [10.]

ZEMH-talossa oli mittausjakson aikana vähemmän ilmavuotoja vaipassa ja ilmanvaihtokanavissa. Tätä selitettiin paremmin ilmaa eristävällä vaahtoeristyksellä. ZEMH-koti käytti 6 % vähemmän energiaa, mutta vertailtujen talojen käyttö oli kuitenkin sen verran erilaista, että tulokset eivät olleet suoraan vertailukelpoisia. Esimerkiksi toisessa kodissa ilmalämpöpumppu sammutettiin silloin kun ei oltu kotona, jolloin sähkövastukset tuottivat lämmön. Toisaalta sama asukas ei kuumina päivinä käyttänyt koneellista ilmastointia vaan avasi ikkunat ja käytti makuuhuoneen kattotuuletinta jäähdytykseen. Tuloksissa arveltiin, että tuhlaavaisempi asumistyyli yhdistettynä energiatehokkaisiin ratkaisuihin voi olla kustannustehokkain. Tulokset olivat kuitenkin keskeneräisiä. [10.]

3 RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUS

Rakennuksen energiatehokkuudella tarkoitetaan tässä työssä rakennuksen käyttöluokan mukaisten sisäilmasto-olosuhteiden ylläpitämiseen kuluvaan laskennallista ostoeenergiaa. Energiatehokkaaseen suunnitteluun ohjataan lailla [2] rakennuksen energiatodistuksesta. Jokaiselle uudisrakennukselle on rakennuslupaa haettaessa laadittava energiatodistus, johon merkitään rakennuksen käyttötarkoituksen mukainen arvioitu energiatehokkuus.

Pientalojen osuus rakennuskannan energiankulutuksesta, rakentaminen mukaan lukien, on 38 %, ja rakennusmateriaalien osuus tästä on 10-20 % [15]. Asumisen energiankulutuksesta 66 % menee tilojen lämmitykseen, 16 % veden lämmitykseen ja 18 % valaistukseen, ruoanlaittoon, laitteisiin ym. [20]. Tehokkain tapa vaikuttaa pientalojen energiankulutukseen on siis vähentää lämmitykseen kuluva energiaa.

Pientalon energiatehokkuuteen voi vaikuttaa sekä rakennus- että taloteknisin keinoin. Suurin vaikutus on lämmitysjärjestelmän valinnalla [21]. Jos on koneellinen ilmanvaihto, kannattaa panostaa ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon [21; 22]. Tavanomaista paremmalla vaipan eristyksellä tai paremmilla ikkunoilla on vähäisempi merkitys, kuten myös uusiutuvan aurinkoenergian käytöllä [21].

3.1 Talotekniset ratkaisut

Tyypilliselle suomalaiselle pientalolle edullisin lämmitysratkaisu energiatehokkuuden ja takaisinmaksuajan kannalta on ilma-ilmalämpöpumppu, varsinkin jos talon eristyksen paksuutta ei huomioida tai jos elinkaaren pituutta ei tunneta. Rakennuskustannuksiltaan edullisin on suorasähkö. Ostoenergian määrää tarkastellessa on aurinkoenergiajärjestelmä edullisin, jos rakennuksen oletetaan kestävän pitkään ja erityisesti, jos energian kustannukset nousevat. [22.]

Konttikodin lämmitykseen suositetaan ilmalämpöpumppua [8]. Ilmalämpöpumppu voidaan asentaa ilmanvaihtokoneen yhteyteen, jolloin se voidaan laskea osaksi päälämmitysjärjestelmää, muuten ilmalämpöpumppu luetaan tukilämmönlähteeksi. VTT:n julkaisemassa tutkimusraportissa [23] todetaan, että sopivaan paikkaan asennettu erillinenkin ilmalämpöpumppu kattaa 40-60 % pientalon tilojen lämmitysenergian tarpeesta, passiivitaloilla jopa 90 %. Myös Yhdysvalloissa siirtokelpoisten pientalojen energiatehokkuutta tutkineet [1; 11] suosittavat ilmalämpöpumpun käyttöä päälämmönlähteenä. Ilmalämpöpumpulla varustetuissa kodeissa saavutettiin merkittävä energiansäästö ja sisäilmasto-olot olivat tasaisemmat.

Käyttöveden lämmitys ilma-vesilämpöpumpulla todettiin NEEM-hankkeessa [19] kustannustehokkaimmaksi energiansäästökeinoksi. Tutkituissa taloissa ilmavesilämpöpumppu otti lämmön rakennuksen ryömintätilasta, mitä Suomessa ei suositella mahdollisen kosteusriskin takia. Muita keinoja säästää lämpimän käyttöveden lämmityksessä ovat vettä säästävät kalusteet ja varastoinnin välttäminen [1].

Suomessa ilma-vesilämpöpumppua suositellaan lähinnä, jos pientalossa kuluu paljon energiaa, maalämpö ei ole mahdollista, lämpö tiloihin jaetaan matalalämpövesijärjestelmän kautta (yleensä lattialämmitys) tai energiaa kuluu suhteessa enemmän tilojen kuin käyttöveden lämmittämiseen. Vaikka ilmavesilämpöpumppua käytettäisiin tilojen lämmitykseen, niin käyttöveden lämmitykseen suositellaan sähkövastusta. Toisaalta ilmaston lämmitessä ja talvien lauhtuessa voi ilma-vesilämpöpumpun käyttö olla perusteltua Suomenkin oloissa. [24.]

Ilmalämpöpumpulla ja tulisijalla lämmittämisen vuosihyötysuhdetta parantavat mahdollisimman avoin pohjaratkaisu sekä riittävän suuret lämpötilaerot tilojen välillä niin, että

lämpö siirtyy rakennuksessa tehokkaasti. Lämmön siirtymistä kauempana oleviin tiloihin voidaan myös tehostaa puhaltimilla ja kanavoinnilla. [25; 11.] Tulisija voi olla konttitalossa pää- tai lisälämmönlähteenä [8].

Varaavan tulisijan huipputeho on yleensä 2–4 kW, ja se luovuttaa lämpöä jopa 48 h lämmityksen jälkeen. Kevyt tulisija tuottaa korkean hetkellisen tehon, tyypillisesti 4-8 kW, mutta jäähtyy nopeasti. Tulisija vaatii suojatilan ympärilleen, minkä lisäksi raskas paikalleenmuurattu varaava tulisija tarvitsee erillisen perustuksen. Kertalämmitteisen tulisijan lämmöntuoton tehoa on vaikea säätää, jolloin huonetiloissa on ylikämpenemisen riski. Ylimääräisen lämmön poistuminen tuulettamalla tai rakenteiden kautta heikentää tulisijan vuosihyötysuhdetta. [26.]

Pellettitakka on rakenteeltaan kevyt, joten se ei tarvitse perustusta ja hormiksi riittää kevythormi. Pellettitakkan lämmitystehoa voidaan säätää termostaatilla ja vesikiertoisen pellettitakan lämmitystehosta osa voidaan ohjata lämmönsiirtimen kautta esimerkiksi käyttövesivaraajaan, jolloin pellettitakkaa voidaan käyttää paremmalla hyötysuhteella. [26.]

Energiatehokkaita pientaloja vertailevassa raportissa [15] havaittiin, että tutkituista kohteista pienin ostoenergiantarve oli talossa, jossa oli aurinkosähköpaneelit. Toisaalta aurinkoenergiaa hyödyntävät järjestelmät ovat edelleen kalliita [27]. Tehokkain tapa hyödyntää auringon lämpöenergia on huomioida se rakennuksen passiivisessa lämmityksessä ja lämmitysjärjestelmän säädössä [28]. Jos aurinkokeräimiä käytetään, niistä saatava lämpö parhaiten hyödynnettyä ilmalämmityksessä [28].

3.2 Rakennustekniset ratkaisut

Rakennusteknisesti suosittuja keinoja parantaa energiatehokkuutta ovat eristyspaksumuuden lisääminen sekä energiatehokkaat ikkunat ja ovet. Tehdasvalmisteisia siirtokelpoisia pientaloja verrattaessa parhaimpia rakennusteknisiä keinoja energiatehokkuuden saavuttamiseksi ovat tavanomaista parempi eristys, energiatehokkaat ikkunat sekä SIP-levyt.[1.] SIP-levyjen (structural insulating panel) rakenne, eristyskerros kahden rakennelevyn välissä, mahdollistaa paremman ilmanpitävyyden ja eristyksen, minkä lisäksi siirtokelpoisissa pientaloissa ne tukevoittavat talon rakennetta kuljetusta aikana [1].

Rakennuksen energiatehokkuuteen voidaan myös vaikuttaa rakennuksen suuntauksella sekä rakennuksen muodolla ja massoitteilla. Epäedullisesti sijoitettu rakennus voi kuluttaa jopa 30 % enemmän lämmitysenergiaa. Energiatehokkaan rakennuksen muoto on mahdollisimman kompakti. Mitä pienempi ja laajemmalle alalle levittyvä, monimuotoinen rakennus, sitä suurempi suhde vaipan pinta-alalla ja rakennuksen tilavuudella. Epäedullista muotoa voidaan yrittää kompensoida esimerkiksi aurinkohuoneella. [28.]

3.3 Sisäilmasto

Määräysten mukaan [13] luokkien 1 ja 9 rakennuksille eli pientalolle tai määräaikaistalolle tai siirtokelpoisille rakennukselle ei tarvitse erikseen tarkastella kesäajan lämpötiloja. Kevytrakenteisella Konttitalolla voi olla riski merkittävään ylikuumenemiseen lämpökuormien vaikutuksesta [29]. Huoneilman lämpötila voi helposti nousta epämiellyttäväksi ikkunoista tulevan auringon säteilyn lämpökuorman takia. Lisäksi lämmityskaudella voi tulisijan lämpökuorma olla liian suuri [30].

Kriittisimmät tilat sisälämpötilan suhteen ovat Konttitalossa oleskelutila ja makuutila. Peseytymistilojen ylikuumeneminen voi asukkaiden kannalta olla jopa miellyttävä. Tekniikkakontin lämpötilalla ei asukkaalle mukavuuden kannalta ole merkitystä, mutta teknisten laitteiden takia lämpötilan on hyvä olla yli 10 °C ja alle 35 °C.

Pientalossa standardikäytön mukainen jäähdytysraja on rakennusmääräyskokoelman osan D3 [13] mukaan 27 °C. Oleskeluvyöhykkeen suunnittelulämpötilana käytetään rakennusmääräyskokoelman osan D2 [31] mukaisesti 21 °C:tta, ja hyväksyttävä poikkeama lämpötilasta on ± 1 °C. Asukkaalle miellyttävän sisäilmaston kannalta operatiivisen lämpötilan tavoitearvona voidaan pitää kesällä hieman matalampaa kuin ilman lämpötila (24-25 °C) ja talvella hieman korkeampaa (21-22 °C) [32]. Asumisterveyden kannalta huoneilman lämpötilan olisi oltava vähintään 18 °C ja korkeintaan 26 °C, mutta lämmityskauden ulkopuolella, kun tilat lämpenevät auringon vaikutuksesta, saa lämpötila kohota hetkellisesti korkeammallekin 32 °C:een [33].

Jos lämmityskaudella huonelämpötila on korkea, koetaan sisäilma kuivempana ja tunkkaisempana, ja sairusrakennusoireilu lisääntyy. Toisaalta ihminen sopeutuu korkeampiinkin lämpötiloihin ja kesällä lämmin ilma voidaan kokea miellyttäväksikin, kunhan nopeus oleskeluvyöhykkeellä on riittävän suuri. Yksi keino vähentää ihmisen kokemaa

epämukavuutta ja lisätä sopeutumista korkeampiin lämpöihin on myös tarjota mahdollisuus säätää lämpöoloja. [32.]

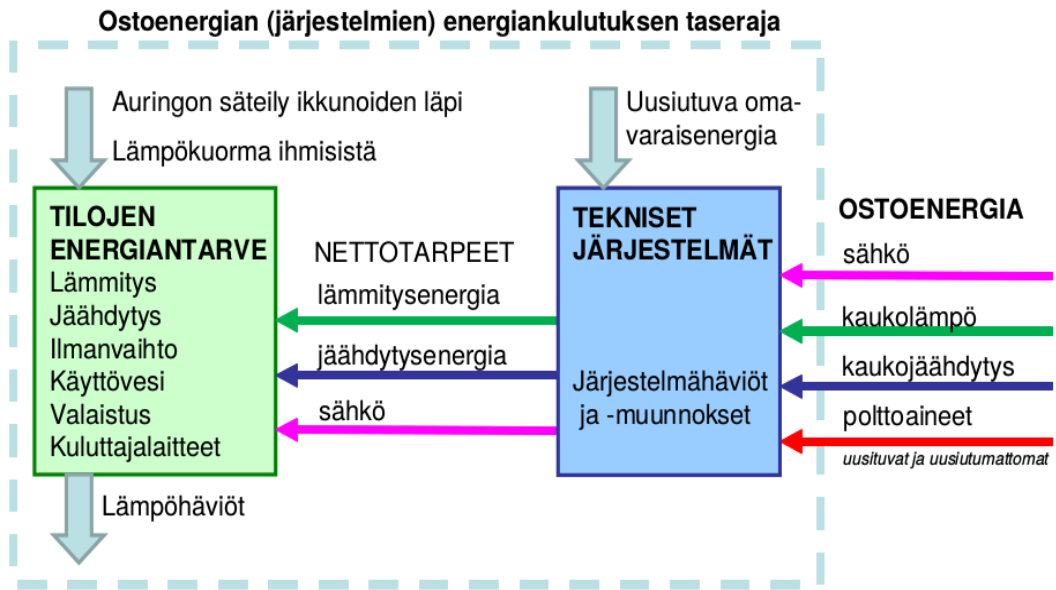
4 ENERGIALASKENTA

Energiatehokkuuteen tähtäävän suunnittelun yksi osa on energialaskenta, missä rakennukselle lasketaan standardikäytön mukainen ostoenergiankulutus sekä energiamuotokertoimilla painotettu kokonaisenergiankulutus eli E-luku. Suuremmilla kohteilla tarkastellaan myös laskennallisia sisäilmasto-olosuhteita, mutta pientaloille tämä ei ole pakollista.

Laskennassa käytettävän laskentatyökalun on oltava varmennettu ja laskennan vaiheet on määritetty rakentamismääräyskokoelmassa. Yksinkertainen laskentamenetelmä on kuukausitason laskenta esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmalla. Tarkempaan huonelämpötilojen tarkasteluun vaaditaan dynaamista laskentaa, missä huomoidaan vuorokauden aikainen lämpötilavaihtelu ja rakenteiden kyky varastoida ja luovuttaa lämpöä. [13.]

4.1 Ostoenergia ja E-luku

Ostoenergia on rakennuksen ulkopuolelta tuotua rakennuksen sisäilmasto-olosuhteiden ylläpitämiseen ja laitteiden käyttöön kuluva energiaa (kuva 1). Rakennuksen ostoenergiankulutusta voidaan vähentää käyttämällä rakennuksen yhteydessä tuotettavaa uusiutuvia omavaraisenergiaa kuten aurinkokeräimiä tai tuulivoimaa. Polttopuuta ei lasketa omavaraisenergiaksi, vaan laskennassa esimerkiksi omasta metsästä saatava polttopuu ja kaupasta ostettava pelletti ovat samanarvoisia.

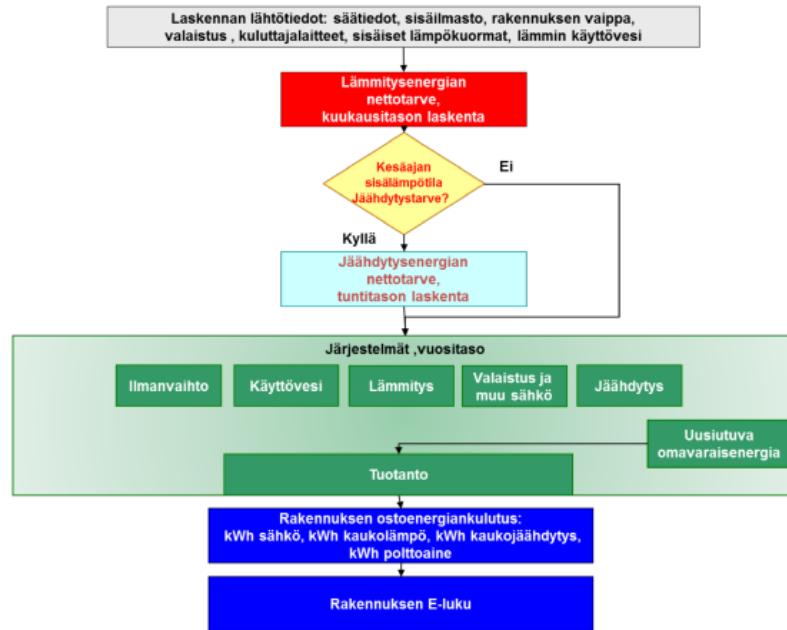


Kuva 1. Ostoenergiakulutuksen taseraja [34]

Rakennuksen laskennallinen ostoenergiakulutus voi merkittävästikin poiketa todellisesta ostoenergiakulutuksesta, koska laskennassa käytetään kullekin rakennustyyppille erikseen määriteltäviä standardikäytön mukaisia arvoja ilmanvaihdolle, vedenkulutukselle, valojen ja laitteiden käytölle sekä oleskelulle tiloissa. Standardikäytön mukaisilla arvoilla laskettaessa saman rakennustyyppin rakennukset ovat keskenään paremmin vertailukelpoisia. [13.]

Erikokoisten rakennusten energiankulutus saadaan vertailukelpoiseksi jakamalla laskettu energiankulutus rakennuksen lämmitettävällä nettopinta-alalla (kuva 2). Eri energialähteitten ympäristövaikutukset huomioidaan energiamuotokertoimessa, minkä avulla lasketaan rakennuksen kokonaisenergiakulutus eli E-luku. [13.]

Säädöksen 50/2013 [34] mukaan alle 120 m² uudispientalon kokonaisenergiakulutus eli E-luku saa olla korkeintaan 204 kWh_E/(m²a). Alle 50 m² rakennukselle ei tarvitse laskea E-lukua. Määräaikaiselle tai tilapäiselle rakennukselle on laskettava E-luku, mutta sille ei ole asetettu vaatimusta. Siirtokelpoisille rakennuksille ei ole määritetty energialukua.



Kuva 2. Rakennuksen energiankulutuksen laskennan vaiheet. [35, kuva 2.1]

4.2 Laskentatyökalu: IDA ICE

Tässä työssä energialaskennan työkaluna käytettiin dynaamiseen simulointiin sopivaa Equa Oy:n ohjelmaa IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE, versio 4.7). IDA ICE:llä voidaan tarkastella sekä rakennuksen energiankulutusta että sisäilmasto-olosuhteita ja sen versio 4.0 on validoitu yksinkertaisella mallinnuksella [36].

IDA ICE soveltuu niin yksittäisten järjestelmien kuin kokonaisen rakennuksen energialaskentaan, ja se mahdollistaa sekä yksinkertaisen perustason tarkastelun (Early Stage Building Optimization, ESBO) että hyvinkin yksityiskohtaisen usean vyöhykkeen mallinnuksen (IDA ICE Expert) [37.]. Laskennan kannalta mallit suositellaan pitämään kuitenkin mahdollisimman yksinkertaisina, koska yksityiskohdat hidastavat laskentaa eivätkä välttämättä paranna tulosten tarkkuutta [38].

Suurimmalle osalle tutkittavista tapauksista riittää ohjelman tarjoama perusmalli [38], jossa määritellään järjestelmien vuosihyötysuhteet ja häviöt, yksi tai useampi lämmitettävä vyöhyke sekä yksi tai useampi ilmanvaihtokone. Ohjelmassa on valmiina tavallisia säätietoja, lämmitysjärjestelmien osia ja rakennusmateriaaleja, mutta asiantuntijatasolla voi käyttäjä muokata tai luoda omia malleja. Ohjatussa lämmitysjärjestelmän luonnissa (ESBO Plant) voi rakennukseen vaivattomasti lisätä mm aurinkokeräimet tai

yhdistellä useita eri lämmönlähteitä välittämättä siitä ovatko mallit teknisesti tai taloudellisesti toteuttamiskelpoisia [38].

5 SUUNNITTELURATKAISU

Konttitalo Opaali (taulukko 1), jota tässä työssä kutsutaan Konttitaloksi, on siirrettävistä konttimoduuleista koottava yksikerroksinen asuinrakennus. Kontit muokattiin syksyn 2016 aikana Mikkelin ammattioppilaitoksen Esedun tiloissa vastaamaan asuinrakennuksen vaatimuksia, ja siirrettiin kevään 2017 aikana Mikkelin asuntomessualueelle, missä ne liitettiin kunnallistekniikkaan. Konttitaloon on päälämmitysjärjestelmä on sähkö ja sen tueksi on suunniteltu ilma-ilmalämpöpumppu ja tulisija oleskelutilaan.

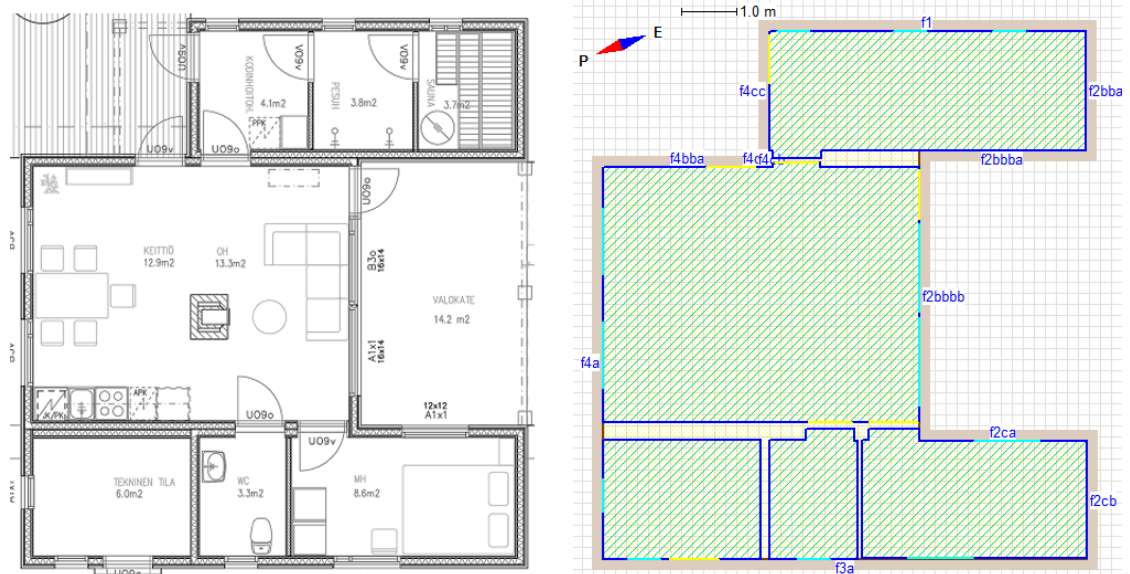
Taulukko 1. Konttitalo Opaalin perustiedot

Kohteen nimi	Messutalo Opaali
Paikka	Mikkeli, asuntomessualue
Rakennusvuosi	2016
Rakennustyyppi	Siirtokelpoinen modulaarinen pientalo
Suunniteltu käyttö	Pysyvä asuinrakennus
Kerrosala	68 m ²
Moduulit	3+1
Perustus	Pilari
Runko	Puu / metalli
Verhous	Vaneri
Katto	Pelti
Rakennuttaja	Esedu Oy
Lämmitysmuoto	Suorasähkö
Lämmönjako	Sähköpatterit
Lämminvesivaraaja	Jäspi 220 L
Ilmanvaihto	Enervent Pingvin
Rakennustilavuus	211 m ³
Vaipan pinta-ala	221 m ²
Julkisivujen pinta-ala	104 m ²
Lämmitetty nettoala	58 m ²

Rakennus mallinnettiin noudattaen Suomen rakentamismääräyskokoelman osien D3 [13] ja D5 [35] määräyksiä ja ohjeita. Laskennan lähtötietoina käytettiin rakennuksen ja järjestelmien suunnitteluarvoja, rakennusluokan mukaisia standardikäyttöarvoja sekä tarkempien tietojen puutteessa kirjallisuudesta saatuja ohjearvoja.

5.1 Rakennus ja vyöhykkeet

Rakennus jaettiin laskennallisiin vyöhykkeisiin niin, että muut tilat ovat jokainen oma vyöhykkeensä, mutta pesutilat ja kodinhoituhuone yhdistettiin samaksi vyöhykkeeksi (kuva 3). Energialaskenta ei edellytä pientalon jakamista yksityiskohtaisiin laskentavyöhykkeisiin [13, kohta 4.13], mutta vyöhykejako mahdollisti tilakohtaisen lämpöolosuhteiden tarkastelun sekä sisäovien auki pitämisen ja erilaisten sisäseinärakenteiden huomioinnin lämmönsiirtymisessä tilojen välillä.



Kuva 3. Rakennuksen pohjakuva ja IDA ICE:en mallinnettu vyöhykejako

Ostoenergiankulutusta laskettaessa kaikille vyöhykkeille asetettiin samat standardikäytön mukaiset pientalon arvot. Huonelämpötiloja laskettaessa käytettiin suunnitelman mukaisia ilmavirtoja.

5.2 Sijainti, ilmasto ja maaperä

Rakennus sijaitsee Mikkelissä, joka on maantieteellisesti vyöhykettä II. Simuloinnissa käytettiin vyöhykkeen I (Helsinki-Vantaan lentoasema) säätietoja, jotka tässä tapauksessa käyvät niin ostoenergian tarpeen kuin kesäajan huonelämpötilojen tarkasteluun [13, kohta 3.1.1].

Messualue, jolle rakennus sijoitetaan, rajoittuu kangasmetsään ja järveen. Asemakaavan mukaan rakennus sijaitsee tontilla niin, että tekniikkakontti on pohjoiseen. Oletettiin, että rakennuksen ympärillä ei ole varjostavaa puustoa tai korkeita rakennuksia

eikä merkittävästi paikallisilmastoon vaikuttavia pintamateriaaleja. Tontin maaperäksi oletettiin hiekkapohja, mikä on tyypillinen alueelle. Alueen tuuliprofiiliksi oletettiin tavalinen asuinalue.

5.3 Vaippa ja rakenteet

Rakenteet mallinnettiin vastaamaan rakennesuunnitelmassa esitettyjä. Epätasa-aineisille rakenteille laskettiin painotettu ominaislämpökapasiteetti, tiheys ja lämmönjohtavuus erikseen rakentamismääräyskokoelman osan C4 [39] mukaan. Suunnitelmissa ei ollut määritelty millainen seinärakenne on kahden vierekkäisen kontin välissä, mutta oletettiin pieni tuulettumaton ilmarako.

Ulkoseinä

Kun suunnitelman mukainen ulkoseinärakenne syötettiin IDA ICE:n ulkoseinän rakennemäärittelyyn, ei se sellaisenaan vastannut D3 vertailuarvoja (liite 1, taulukko 15), joten lisättiin 50 mm polyuretaanikerros rakennemäärittelyyn.

Sisäseinät

Rakennuksessa on kahdenlaisia tiloja jakavia seiniä: kahden vierekkäisen kontin väliin jäävä ulkoseinärakenne sekä konttien sisäiset väliseinät. Mallinnettiin konttien väliset seinärakenteet sekä makuutilan ja WC:n välinen kevyt seinärakenne. Pesutilan sisältävä kontti mallinnettiin yhtenä vyöhykkeenä, jonka väliseinärakenteita ei huomioitu.

Alapohja

Rakennus on suunnitelman mukaan paaluperusteinen, joten sen alapohjan voitiin katsoa olevan suoraan ulkoilmaa vasten. Rakennemäärittelyyn (liite 1, taulukko 16) lisättiin 150 mm kerros polyuretaania, jotta lämmönjohtavuus vastaa D3 vertailuarvoja.

Yläpohja

Yläpohjarakenne on muuten sama eri vyöhykkeillä, mutta keskikontin tuulettuva tila on korkeampi kuin sivukonttien. Kaikkien vyöhykkeiden yläpohjarakenteen poly-

uretaanikerroksen paksuutta lisättiin 60 rakennemäärittelyssä, jotta mallin rakenteen kokonaislämmönjohtavuus on vaatimusten mukainen (liite 1, taulukko 17). Yläpohjan lämmöneristävyyden kannalta ei vesikatteella ole merkitystä, mutta lisättiin myös se IDA ICE:n rakennemäärittelyyn.

Aukot

Rakennuksen vaipan aukkojen eli ikkunoiden ja ovien rakenteesta ei ollut muuta tietoa kuin aukon koko ja suunniteltu lämmönläpäisykerroin, $U=0,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Käytettiin laskelmissa IDA ICE:n oletusrakenteita oville ja ikkunoille, joita muokattiin vastamaan suunnitelmia sekä energiatehokkuusvaatimuksia. IDA ICE -oletusoven rakennetta muokattiin lisäämällä eristekerroksen paksuutta niin, että tavoite lämmönläpäisylle toteutuu. Konttitalon ulko-ovet oletettiin valoaukottomiksi.

Ikkunan lämmönläpäisy määriteltiin niin, että sekä lasituksella että umpiosalla on sama suunniteltu lämmönläpäisykerroin. Valoaukon auringon kokonaissäteilyn läpäisykerrointa g ei tunnettu, joten käytettiin yksipuitteisen, kolmilasisen ikkunan ohjearvoa, $g = 0,7$. Ei myöskään tunnettu umpiosan osuutta ikkunan pinta-alasta, joten käytettiin ohjeellista kehäkerrointa 0,75, jolloin ikkunan valoaukon osuus koko ikkuna-aukosta on 75 %. [35, kohta 5.3.] Ikkunan syvennykseksi asetettiin arkkitehtipiirustuksesta arvioitu 120 mm. Ikkunoilla ei ollut muita ulkoisia varjostuksia. Auringonsuojauksena käytettiin uloimpien ikkunalasien väliin asennettua kaihdinta, jota ohjataan auringon säteilytehon mukaan.

Vuotoilma

Tyypillinen huolellisesti tiivistetyn pientalon ilmanvuotoluku q_{50} on $1,0 \dots 3,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. [13, kohta 2.3.2] Tilaaja pyrkii rakentamaan rakennuksen mahdollisimman tiiviiksi, joten käytettiin ilmanvuotolukuna arvoa $2 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$.

Kylmäsiljat

Rakenneosien välisten viivamaisten kylmäsiltojen aiheuttama lisäkonduktanssi laskettiin käyttämällä taulukkoarvoja [35, taulukot 3.1 ja 3.2] ohjearvoja. Muokkaamattoman kontin ulkoseinän runkomateriaali on metalli, mutta kontteihin tehtiin sisälle puukoo-

laukset. Tilaajan mukaan lisäkonduktanssit voidaan laskea ikäänkuin runko olisi puuta. Aukkojen kylmäsiltojen lisäkonduktanssin laskemista varten todettiin rakennekuvien perusteella ikkuna- ja oviaukkojen karmien peittävän 100 % lämmöneristeen kokonaispaksuudesta.

5.4 Järjestelmät

Tilaajan esittämien suunnitelmien pohjalta määriteltiin ilmanvaihtokone ja ilmanvaihdon lämmöntalteenotto, päälämmitysjärjestelmä (suorasähkö) sekä järjestelmien häviöt, apulaitteiden energiankulutus ja käyttöveden kulutus.

Ilmanvaihtokone

Suunnitelman mukainen ilmanvaihtokone (taulukko 2) sisältää sähköisen jälkilämmityspatterin ja pyörivän (regeneratiivisen) lämmöntalteenoton. Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteeksi on määritely vähintään $\eta_a = 0,7$. Ilmanvaihtokoneen ominaissähkötehoksi oli määritely korkeintaan $1,2 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$, mikä jaettiin tulo- ja poistopuhaltimelle niin, että tulo puolen puhaltimelle asetettiin $0,7 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$ ja poistopuolen $0,5 \text{ kW}/(\text{m}^3/\text{s})$.

Taulukko 2. Ilmanvaihtokoneen toimintatiedot

Tuloilman lämpötila	18 °C
Jäteilman lämpötila	0 °C
Ilman lämpeneminen tuloilmakanavassa	0 °C
SFP-luku	1,2 kW/(m ³ /s)
Lämmöntalteenoton lämpötilasuhde	0,7

Lämmitysjärjestelmä

Suunniteltu päälämmitysjärjestelmä konttitalossa on suorasähkö, joten asetettiin sekä tiloille että vedelle lämmöntuotannon vuosihyötysuhteeksi $\eta_a = 1$ [35, taulukko 6.6].

Tilaajan mainitsema lisäjärjestelmiä tulisija ja ilmalämpöpumppu ei lisätty IDA ICE-perusmalliin, vaan niiden vaikutus osto- ja kokonaisenergiankulutukseen laskettiin erikseen D3 [13] mukaan. Sekä varaava takka että ilmalämpöpumppu huomioitiin täysimääräisesti. Päälämmitysjärjestelmään kytkemättömän varaavan tulisijan lämmöntuotoksi voidaan huomioida 2000 kWh vuodessa, ilmalämpöpumpun 1000 kWh. Tulisija-

jan kokonaisvuosihyötysuhteena käytettiin ohjearvoa 0,6, ilma-ilmalämpöpumpun kokonaisvuosihyötysuhteena 2,8.

5.5 Lisäenergiat ja häviöt

Määriteltiin rakennuksen järjestelmien häviöt sekä niistä tiloihin tulevat lämpökuormat, apulaitteiden energiankulutus ja käyttöveden kulutus (taulukko 3) standardikäytön ja ohjearvojen kautta.

Taulukko 3. Lisäenergia ja häviöt

Lämpimän käyttöveden kulutus	35 kW h/(m ² a)	
Jakelujärjestelmä	häviöt	kuorma tiloihin
Lämpö vyöhykkeisiin ¹	5 %	0 %
Häviö lämmöntuotosta	57 W	LKV-varaaja
Lisäenergiankulutus		
Lämmönjaon apulaitteet	0,057 W/m ²	LVI-sähkö

¹ mukaanlukien ideaaliset lämmityslaitteet

Lämmin käyttövesi

Lämpimän käyttöveden jakojohdot ja varaaja oletettiin hyvin eristetyiksi, jolloin siirron vuosihyötysuhteen ohjearvo pientalolle on 0,92 [35, taulukko 6.3] ja 200-litraisen varaajan lämpöhäviö 500 kWh vuodessa [35, taulukko 6.3b]. Lämminvesivaraaja on suunnitelmassa sijoitettu tekniikkakonttiin ja rakennuksessa ei ole lämpimän veden kiertoa, joten ei huomioitu häviöistä tulevaa kuormaa.

Lämpö vyöhykkeisiin

Konttitalon päälämmitysjärjestelmä on suorasähkö ja lämmönjakojärjestelmänä on huonekohtaiset sähkölämmittimet. Ohjearvo järjestelmän lämmönjaon ja -luovutuksen vuosihyötysuhteelle on $\eta_{tilat} = 0,95$ [35, taulukko 6.2]. Lämmitysjärjestelmän häviöt katsotaan todellisiksi häviöiksi [35, kohta 2.1.2], joten asetettiin tiloihin menevän lämpökuorman osuudeksi 0 %. Lämmityksen apulaitteiden ominaissähkönkäytön oletusarvo on $e_{tilat} = 0,5 \text{ kW h/(m}^2 \text{ a)}$ [35, taulukko 6.2], mistä saatiin asetettavaksi hetkelliseksi tehoksi $0,057 \text{ W/m}^2$.

6 VAIHTOEHTOISET RATKAISUT

Tutkittiin vaihtoehtoisten päälämmitysjärjestelmin (pellettikattila ja ilma-vesilämpöpumppu) sekä erilaisten tukilämmitysjärjestelmien (vesikiertoinen pellettitakka, aurinkokeräimet, aurinkopaneelit) vaikutusta ostoenergiantarpeeseen ja kokonaisenergiankulutukseen. Tarkasteltiin myös huoneilman lämpötiloja kun tiloja lämmitetään ilmalämpöpumpulla ja varaavalla tulisijalla.

Ostoenergiantarve laskettiin standardikäytön mukaisilla huonelämpötilan ja ilmanvaihdon asetusarvoilla [13]. Huonelämpötilan tarkastelua varten mallinnettiin järjestelmät sekä standardikäytön että suunnitelman mukaisilla ilmavirroilla.

6.1 Päälämmitysjärjestelmät

Tutkittiin ostoenergiankulutus, kun tilojen ja käyttöveden lämmitysenergia tuotetaan pellettikattilalla tai ulkoilmalämpöpumpulla, ja lämmönjako on vesikiertoinen. Molemmat järjestelmät mallinnettiin yksinkertaisella menetelmällä määrittelemällä lämmöntuoton ja -jaon laskennalliset vuosihyötysuhteet sekä apulaitteiden energiankulutus. Ilmanvaihtokone pidettiin samana kuin perustapauksessa.

Pellettikattilan varaajan häviöt on huomioitu lämmöntuottojärjestelmän vuosihyötysuhteessa, lämpöpumpun varaajan häviöksi asetettiin sama kuin perusmallissa. Molemmille järjestelmille asetettiin menoveden lämpötilaksi 45 °C ja paluuveden 35 °C . Molemmissa järjestelmissä lämpö jaetaan jakotukilta radiaattoreille, jolloin lämmönjaon vuosihyötysuhteen oletusarvo on $0,85$ [35] ja häviö $1 - 0,85 = 15\%$. Lämmönjaon apulaitteiden sähkönkulutuksen ohjearvo on vesiradiaattoreille on $2\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ [35, taulukko 6.2], mistä saatiin hetkelliseksi tehoksi $0,2\text{ kW}/\text{m}^2$.

Ilma-vesilämpöpumpun vuosihyötysuhteen ohjearvo [35, taulukko 6.12] lämpimän käyttöveden tuotolle on $1,8$ ja tilojen lämmitykselle $2,4$ (interpoloitu taulukosta).

Pellettikattilan, joka sisältää varaajan, vuosihyötysuhteen ohjearvo on $0,75$ ja apulaitteiden sähkönkulutuksen ohjearvo $\eta_a = 0,77\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ [35, taulukko 6.6]. Asetettiin sama vuosihyötysuhde sekä lämpimän käyttöveden että tilojen lämmitykselle. Pellettikattilan apulaitteiden hetkelliseksi tehoksi asetettiin $0,09\text{ W}/\text{m}^2$.

6.2 Tukilämmitysjärjestelmät

Tutkittiin kuinka paljon perusmallissa eli suorasähköjärjestelmässä säästetään ostoe-nergiaa, jos käytetään tuloilman lämmitykseen parempaa lämmöntalteenottoa, aurinkokeräimiä lämpimän käyttöveden lämmitykseen, aurinkopaneeleja käyttösähkön tuot-toon, sekä ilmalämpöpumppua tai tulisijaa tilojen lämmitykseen. Lisäksi tarkasteltiin sisäilmasto-olosuhteita varaavan tulisijan ja ilmalämpöpumpun käyttötilanteissa.

6.2.1 Tehokkaampi lämmöntalteenotto

Konttitaloon on suunnitelmassa merkitty ilmanvaihtokoneeksi Enervent Pingvin. Tutkit-tiin valmistajan ilmoittamien lähtöarvojen (taulukko 4) vaikutusta ostoenergiankulutuk-seen. Lämpötilasuhteena käytetty vuosihyötysuhde ei ole varmennettu.

Taulukko 4. Ilmanvaihtokone, jossa tehokas lämmöntalteenotto

Sisääpuhallusilman lämpötila	+18 °C
Jäteilman lämpötila	-10 °C
Ilman lämpeneminen tuloilmakanavassa	0 °C
Lämmöntalteenoton lämpötilasuhte	0,779
Ilmanvaihtokoneen jälkilämmityspatterin teho	0,4 kW
SFP-luku	1,72kW/(m ³ /s)

6.2.2 Aurinkokeräin

Käytettiin IDA ICE:n oletusaurinkokeräimiä lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Ke-räinten pinta-alaksi asetettiin 4 m² ja varaajan tilavuudeksi jätettiin oletusarvoinen 1000 litraa. Aurinkokeräinten pumppujen kuluttama sähköenergia arvioitiin D5 [35] kohdan 6.5.2 mukaan.

6.2.3 Aurinkosähkö

Tilaaajalla on suunnitelmassa aurinkosähkön käyttö. Lisättiin malliin 4 m² oletusaurinko-paneeleja ja tutkittiin paljonko kesän aikana saadaan sähköenergiaa vyöhykkeiden I-II laskentatietoja käyttäen. Käytettyä energiaa ei vähennetty LVI-laitteista jne, koska ei tunnettu hetkellisiä tehoja.

6.2.4 Ilma-ilmalämpöpumppu

Lisättiin perusmallin oleskelutilaan objekti "ilma-ilma, ei kanavoitu, lämpöpumppu". Lämpöpumppu-objektin oletusarvo on teholle 3,2 kW ja hyötysuhteelle 2,9. Ei muutettu oletusarvoja, koska ei tunnettu suunnitellun ilmalämpöpumpun tehoa tai hyötysuhdetta, ja oletusarvot ovat riittävän lähellä tyypillistä ilmalämpöpumppua ja D5 hyötysuhteen ohjearvoa 2,8 (vyöhykkeet I-II) [35, taulukko 6.12].

Tutkittiin tilanteet, jossa sisäovet ovat kiinni ja ilmalämpöpumppu lämmittää vain oleskelutilaa, sekä sisäovet ovat auki ja ilmalämpöpumpun pyynti on joko sama kuin huoneiden huoneiden lämmitysraja tai 3 °C:tta lämmitysrajaa korkeampi. Huoneiden lämmitysrajana käytettiin sekä standardikäytön mukaista 21 °C:tta että 18 °C:tta.

6.2.5 Tulisija

Tutkittiin kolmen erityyppisen oleskelutilaan sijoitettavan tulisijan käytön vaikutusta huoneämpötiloihin: jaksottaislämmitteinen massiivinen varaava tulisija, nopeasti lämpöä luovuttava jaksottaislämmitteinen kevyttakka eli kamiina, sekä termostaattisääteinen jatkuvalämmitteinen pellettitakka. Jokaisessa tapauksessa lisälämmönlähteenä oli vyöhykekohtaiset sähköpatterit.

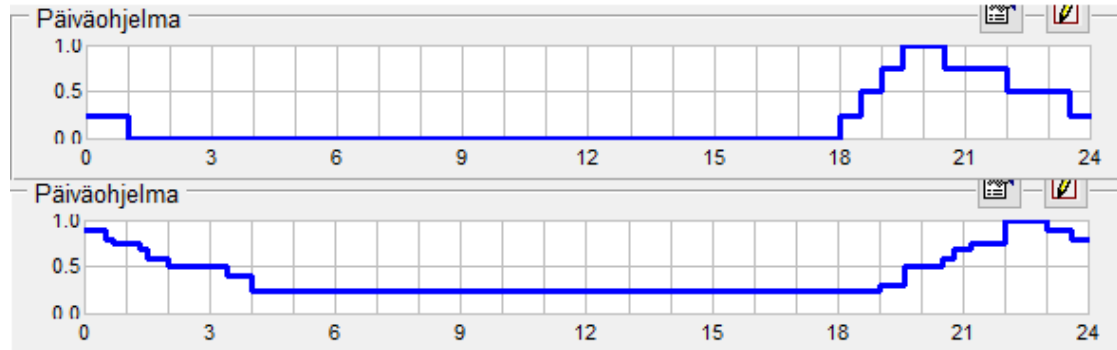
IDA ICE:ssa ei ole valmiina mallia tulisijalle, joten sovellettiin olemassa olevia objekteja. Käytettiin kahta erilaista objektityyppiä kerta- ja jatkuvalämmitteisen tulisijan mallintamiseksi: laitekuormaa sekä ideaalilämmitintä. Tulisijaobjekti sijoitettiin oleskelutilavyöhykkeelle, mutta sen tarkempaa sijaintia huoneessa ei määritelty.

Kullekin tulisijalle asetettiin tyypistä riippumatta lämmönluovutuksen kokonaisvuosihyötysuhteeksi ohjearvo 0,6 [35, kohta 6.4.2] ja pitkäaaltoisen säteilyn suhteeksi asetettiin kirjallisuudesta varaavalle takalle löytynyt arvo 0,55 [30].

Varaava takka ja kamiina

Jaksottaislämmitteiset tulisijat, varaava takka ja kamiina, mallinnettiin lämpökuormana, jonka objektityyppi on laite ja polttoaine uusiutuva. Laadittiin laitteen käytölle aikataulu niin, että sitä käytetään lämmityskaudella ja että se noudattaa tyypillisen tulisijan läm-

mönluovutustehoa ajan funktiona (kuva 4) [40, kuvat 5 ja 7 sekä taulukko 2]. Nimelisteho asetettiin niin, että laitteen vuoden aikana sisätiloihin luovuttama lämpöenergia on suurin piirtein energialaskennan sallima 2000 kWh.



Kuva 4. Kamiinan (ylempi) ja varaavan tulisijan (alempi) lämmönluovutuksen suhteellinen teho ajan funktiona

Pellettitakka

Pellettitakka mallinnettiin ideaalisena lämmityslaitteena, jonka energiamuotona on polttoaine, energiamittarina uusiutuva polttoaine ja säätönä PI. Huipputeho asetettiin niin, että se on riittävä oleskeluvyöhykkeiden lämmittämiseen.

Asetettiin lämmöntuoton hyötysuhteeksi 0,75 ja lämmönluovutuksen 0,8, jolloin kokonaishyötysuhteeksi saatiin ohjearvon mukainen 0,6. Jakelun hyötysuhde on ideaalilämmittimelle määritelty IDA ICE:ssa lisäenergia ja häviöt -sivulla, kuten myös apulaitteiden sähkönkulutus. Jakelun hyötysuhteeksi oli asetettu 0,95 ja apulaitteiden sähkönkulutukseksi 0,86 W/m².

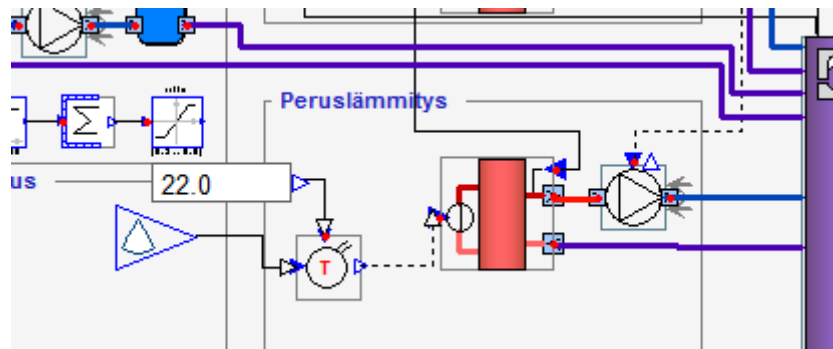
6.3 Hybridijärjestelmä

Hybridijärjestelmässä tilat lämmitetään oleskelutilaan sijoitetulla pellettitakalla ja huonekohtaisilla sähkölämmittimillä. Lämmin käyttövesi tuotetaan lämmityskaudella pääasiallisesti pellettitakkaan liitetyn vesikiertoisen lämmönsiirtimen avulla. Lämmityskauden ulkopuolella lämmin käyttövesi tuotetaan aurinkokeräimillä. Lisäksi varaajassa on sähkövastus lisälämmöntuottoa varten.

Hybridijärjestelmä mallinnettiin korvaamalla oletusarvoinen päälämmitysjärjestelmä ESBO-mallilla, jossa pääjärjestelmä on uusiutuvaa polttoainetta käyttävä CHP-laitos,

tukijärjestelmänä sähkövastus ja lisänä aurinkokeräimet. Varaajana käytettiin ESBO-mallin oletusvaraajaa, jonka tilavuus on 1000 litraa. Varaajan häviöt huomioitiin pellettijärjestelmän vuosihyötysuhteessa, $\eta_a=0,75$, mikä on asetettu oletusarvoissa käyttöveden lämmityksen hyötysuhteeksi.

Oleskeluvyöhykkeeseen asetetusta pellettitakkaobjektista ei saada suoraan signaalia päälämmitysjärjestelmään, joten mallinnettiin termostaattiohjattu vesikiertoinen pellettitakka niin, että liitettiin CHP-laitokseen ylimääräinen termostaatti-objekti (kuva 5). Aina kun oleskeluvyöhykkeen ilman lämpötila on sama tai pienempi kuin tavoitelämpötila, käyttövesi lämmitetään uusiutuvalla polttoaineella.



Kuva 5. Vesikiertoisen pellettitakan termostaattiohjauksen mallinnus. Punainen suorakaide on vesikiertoista pellettitakkaa esittävä CHP-laitos.

Tutkittiin pellettitakan lämmitysteho kun oleskelutilan väliovet ovat kiinni ja auki, sekä järjestelmän ostoenergiankulutus, kun poistetaan aurinkokeräimet.

7 KESÄAJAN LÄMPÖTILANHALLINTA

Kesäajan huonelämpötiloja sekä niiden hallintaa tutkittiin muutamien valituin passiivisin ja aktiivisin keinoin. Tarkastelussa verrattiin standardikäytön mukaisia ja suunniteltuja ilmavirtoja (taulukko 5). Ei tunnettu ilmanvaihdon tarkempaa käyttöaikataulua, joten oletettiin ilmavirtojen pysyvän samana koko ajan.

Oletettiin, että rakennuksen ympärillä ei ole merkittäviä ulkoisia varjostuksia, kuten korkeita rakennuksia tai tiheää puustoa, ja että rakennuksen räystäät eivät juurikaan varjosta ikkunoita. Oletettiin myös, että rakennusta ympäröivä maanpinta ei vaikuta kesäajan lämpökuormaan. Rakennuksen rakenteisiin tai vaipan aukotukseen ei puututtu eikä myöskään sijoitteluun tontilla.

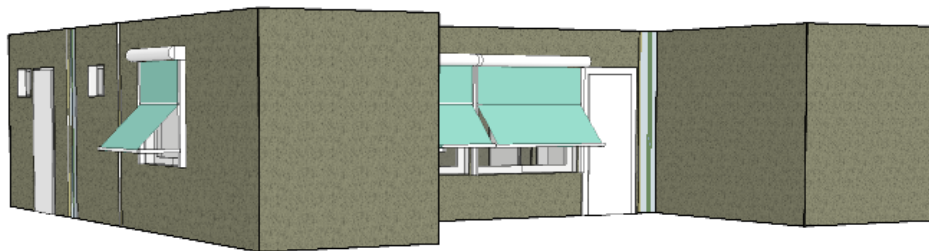
Taulukko 5. LVI-suunnitelman mukaiset ilmapirrat vyöhykkeillä.

Vyöhyke	Tuloilma (l/s)	Poistoilma (l/s)
Oleskelutila	20	10
WC	0	10
Pesutila	22	35
Tekninen tila	5	5
Makuutila	12	0

Passiivisista auringonsuojakeinoista tutkittiin markiisien käyttöä, suunnitelmissa mainittu valokate sekä ikkunoiden vaihtaminen matalamman läpäisykertoimen ikkunoihin. Aktiivisista viilennyskeinoista tarkasteltiin suurempia ilmapirtoja, ilmalämpöpumpun viilennystoimintoa, sekä ilma-vesilämpöpumppuun kytkettyjä jäähdytysradiaattoreita ja konvektoreita. Lisäksi tutkittiin ikkunatuuletuksen vaikutusta.

7.1 Passiiviset keinot

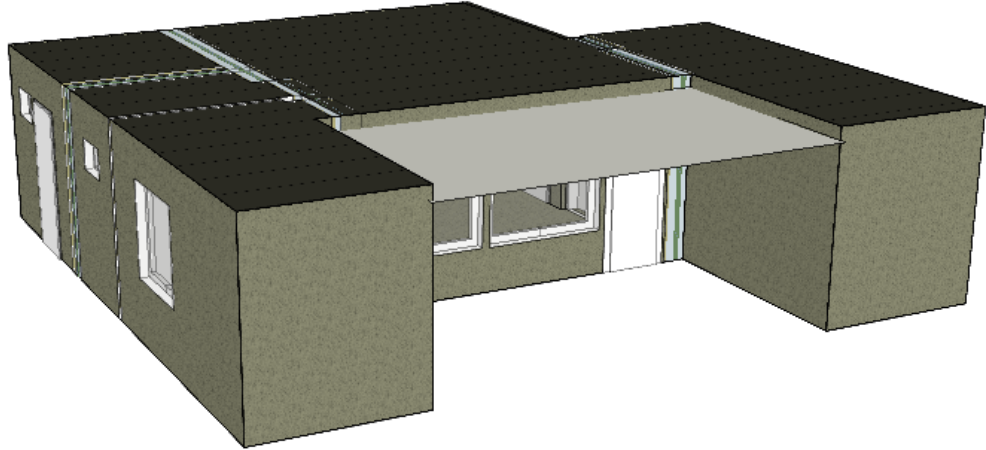
Markiisit tutkittiin asettamalla oleskelu- ja makuutilojen isoihin ikkunoihin ulkoiseksi varjostukseksi yleinen markisolette (kuva 6), ja sille ohjaus oletusarvoisesti valaistuksen mukaan.



Kuva 6. Markiisit.

Valokatteen (kuva 7) materiaalia tai läpinäkyvyyttä ei ole ilmaistu suunnitelmissa. Asetettiin materiaaliksi valokatteille tyypillinen polykarboniitti ja läpinäkyvyudeksi 0,7.

Tutkittiin myös ikkunatuuletuksen käyttöä, vaikka ulkovaipassa olevien avattavien rakenteiden käyttöä ei saakaan huomioida ilmanvaihdon tehostuksena [41]. Ikkunatuuletuksessa tuuletusikkunat olivat auki, mutta väliovet kiinni. Arkkitehtikuvassa tuuletusik-



Kuva 7. Valokate

kunoiksi merkityt aukot asetettiin avautumaan PI-lämpötilasäädön mukaan niin, että suurimmillaan aukon suhteellinen leveys on 20 % ja korkeus 100 %.

7.2 Aktiiviset keinot

Ilmanvaihdosta tutkittiin kesäajan ilmanvaihdon tehostamisen vaikutus ilman lämpötiloihin. Oletettiin, että käyttöajan äänitasojen ohjearvot eivät ylitä käytetyillä ilmavirroilla. Verrattiin sekä standardikäytön mukaisia ilmavirtoja, suunniteltuja ilmavirtoja, yötuule- tusta että 100 % tehostettuja suunnitelmailmavirtoja.

Ilma-vesilämpöpumppuun on mahdollista saada jäähdytystoiminto ja vesikiertoises- sa järjestelmässä on mahdollista jäähdyttää tiloja samoilla jakelulaitteilla kuin läm- mityksessä. Tutkittiin vaihtoehdot, joissa makuu- ja oleskelutilassa on konvektori tai radiaattori. Jäähdyttävä konvektori mallinnettiin oletusobjektina, jossa on molemmat lämmitys- ja jäähdytystoiminto. Jäähdytysradiaattori mallinnettiin ideaalisena jäähdy- tyslaitteena. Jäähdytyksen tuoton hyötysuhteeksi asetettiin ohjearvo COP=3, ja jake- lun ja luovutuksen häviöksi 10 %. Jäähdytysveden lämpötilaksi asetettiin 15 °C.

Tutkittiin myös ilmalämpöpumpun jäähdytysteho. Lisättiin oleskelutila-vyöhykkeelle ka- navoimaton jäähdyttävä ulkoilmalämpöpumppu. Asetettiin jäähdytyksen hyötysuhteek- si ohjearvon mukainen COP=3. Jäähdytyksen lämpötilarajaksi asetettiin 25 °C, mikä on pari astetta matalampi kuin pientalon standardikäytön mukainen asetusarvo, mutta

vastannee paremmin todellista käyttötilannetta. Mallinnettiin tilanne, missä kaikki väliovet ovat auki.

8 TULOKSET

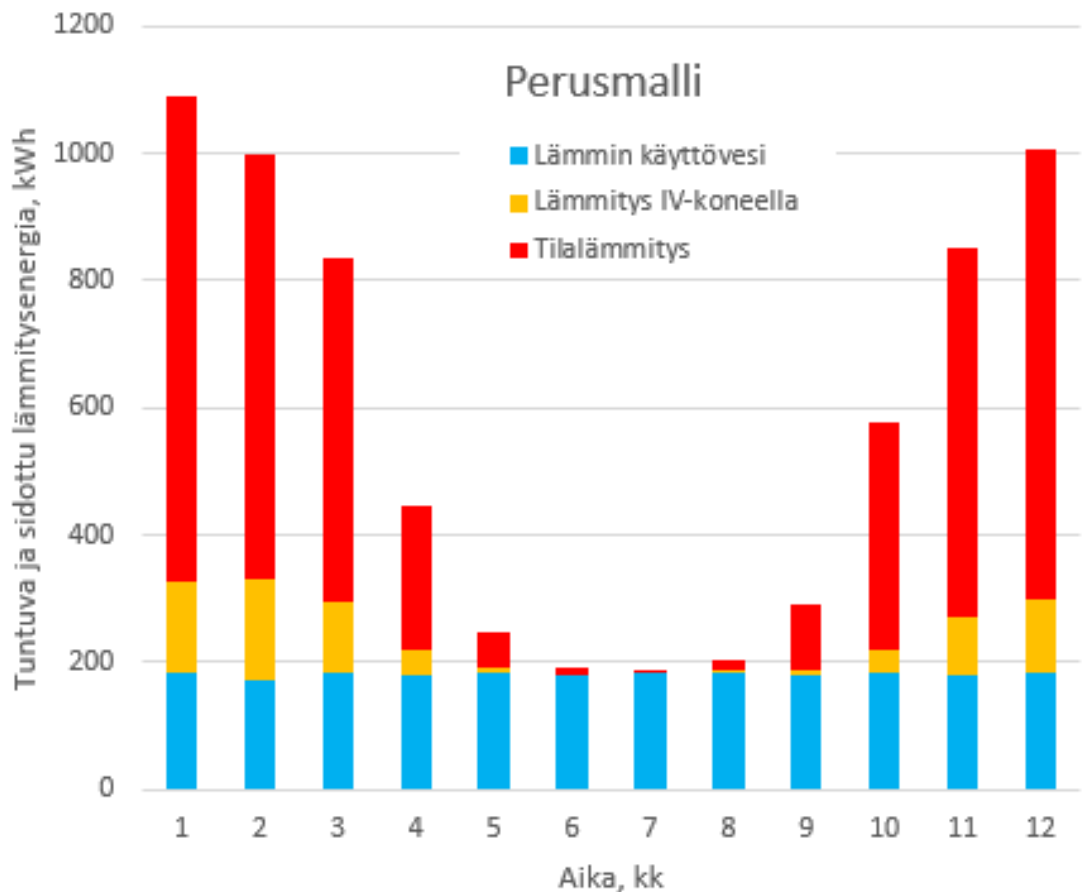
Tutkimuksen tuloksina saatiin konttitalon suunnitellun ja vaihtoehtoisten teknisten järjestelmien energiatehokkuus ostoenergian ja kokonaisenergian kulutuksena kuvattuna, sekä sisäilmasto-olosuhteet sisäilman lämpötilana kuvattuna kun tarkasteltiin kesäajan auringon säteilykuormaa ja tulisijan sekä ilmalämpöpumpun käyttöä lämmityskaudella.

Konttitalon energialuokka on B-D riippuen uusiutuvan energian, lämmöntalteenoton ja lämpöpumppujen käyttöasteesta. Laskennallinen ostoenergiankulutus tutkituilla järjestelmillä on 6-11 MWh. Ilma-ilmalämpöpumpulla sekä tulisijalla on mahdollista tuottaa suuri osa tilojen lämmitysenergiasta, kunhan väliovet pidetään auki ja tilojen välillä on riittävä lämpötilaero. Oleskelu- ja makuutiloissa on merkittävä ylitäminen riski auringon säteilystä, kuten myös tulisijan käytöstä lämmityskauden alku- ja loppupuolella. Tutkituista passiivisista suojakeinoista tehokkain oli markiisien käyttö. Ilmanvaihdon tehostamisella ei ollut juuri merkitystä huippulämpötilojen alentamisessa.

8.1 Perusmalli

Perusmallissa lämmitysenergian kulutuksesta tilojen lämmityksen (mukaan lukien tuloilma) osuus oli noin 58 % (4029 kWh), lämpimän käyttöveden 32 % (2185 kWh), ja ilmanvaihtokoneen tuloilman lämmityspatterin 10 % (708 kWh). Kun ilmanvaihdon ilmamäärä on suunnitelman mukainen, kasvaa tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergian tarve 75 %:iin. Kesäkuukausina, lämmityskauden ulkopuolella, lämmitysenergiaa kului pääasiallisesti lämpimän käyttöveden tuottamiseen (kuva 8).

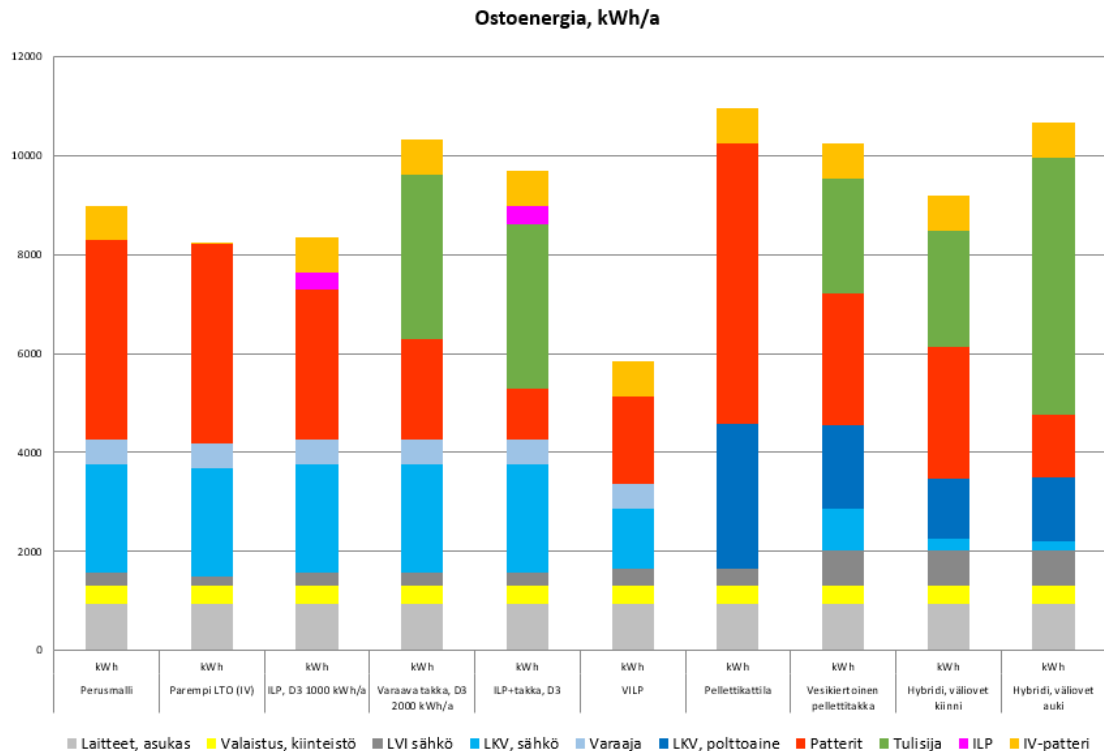
Perusmallin ostoenergiankulutus oli $155,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ ja energiamuotokertoimilla painotettu kokonaisenergiankulutus $265 \text{ kWh}_E/(\text{m}^2\text{a})$ (kuva 10). Kun perusmallin suorasähkölämmitystä tuetaan ilmalämpöpumpulla ja varaavalla tulisijalla, vähenee kokonaisenergiankulutus $49 \text{ kWh}_E/(\text{m}^2\text{a})$, mutta jää silti D-luokkaan.



Kuva 8. Perusmallin tuntuva ja sidottu kuukausittainen lämmitysenergiantarve

8.2 Ostoenergia ja E-luku

Mallinnettujen järjestelmien ostoenergiankulutus vaihteli välillä 6-11 MWh (kuva 9). Eniten ostoenergiaa kului järjestelmissä, joissa käytettiin uusiutuvaa polttoainetta (pellettitakka ja -kattila sekä varaava takka). Vähiten ostoenergiaa kului, kun lämpöä tuotettiin lämpöpumpuilla.



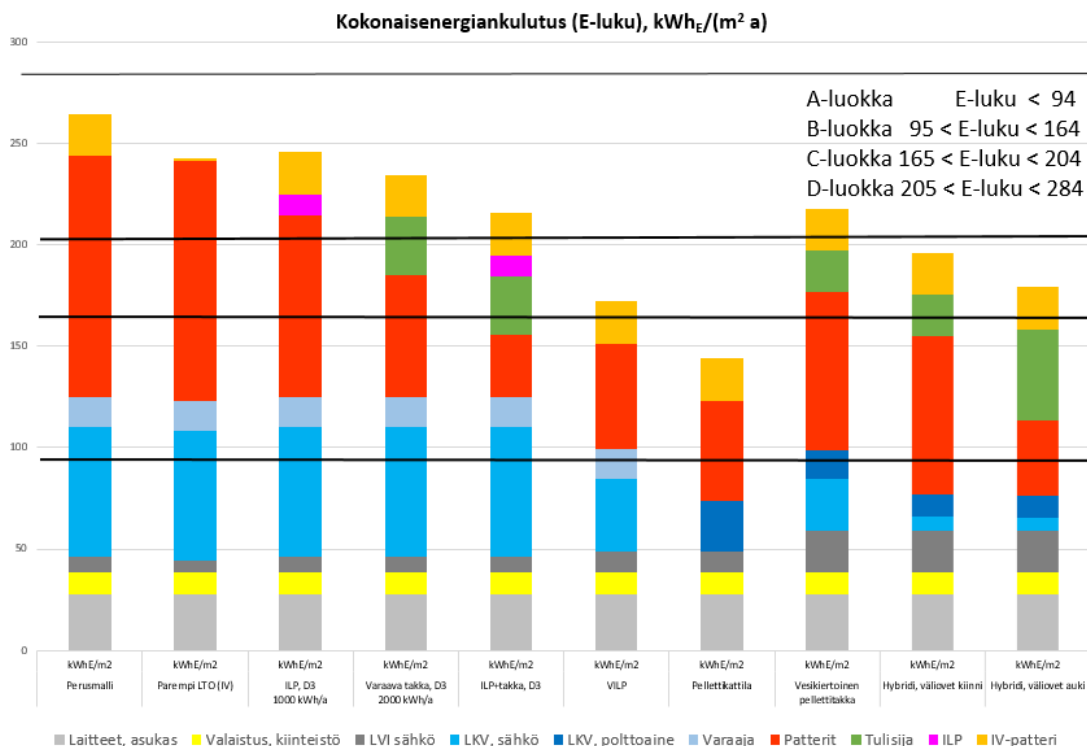
Kuva 9. Pää- ja tukilämmitysjärjestelmien ostoenergiankulutus. Vasemmalta oikealle: perusmalli, parempi lämmöntalteenotto, ilmalämpöpumppu (D3), varaava tulisija (D3), ilmalämpöpumppu ja tulisija (D3), ilma-vesilämpöpumppu, pellettikattila, vesikiertoinen pellettitakka, hybridijärjestelmä välivoet kiinni, hybridijärjestelmä välivoet auki.

Erilaiset tukilämmitysjärjestelmät kuten ilma-ilmalämpöpumppu, aurinkokeräimet ja ilmanvaihdon tehokas lämmöntalteenotto vähensivät ostoenergian tarvetta tilojen lämmityksestä 16 %, lämpimän käyttöveden tuotosta 42 % ja tuloilman lämmityksestä 96 %. Toisaalta vesikiertoisten järjestelmien kuten pellettikattila tai aurinkokeräimet vaativat pumput lisäsivät hieman LVI-laitteiden sähkönkulutusta.

Kokonaisenergiankulutukseltaan yksikään tutkituista järjestelmistä ei yltänyt A-luokkaan (kuva 10), mutta lämmöntuotto pellettikattilalla ylittää B-luokkaan. Ilma-vesilämpöpumppu sekä vesikiertoisen pellettitakan ja aurinkokeräinten yhdistelmä ylittävät C-luokkaan. Mallinnetuista järjestelmistä vesikiertoinen pellettitakka ilman aurinkokeräimiä sekä suora sähkölämmitys eri muunnelmineen jäävät D-luokkaan.

8.3 Tukilämmitysjärjestelmät

Konttitalon mallinnuksessa tutkittuja tukilämmitysjärjestelmiä olivat ilmalämpöpumppu, tulisija, aurinkokeräimet ja paneelit sekä ilmanvaihdon tehokas lämmöntalteenotto.

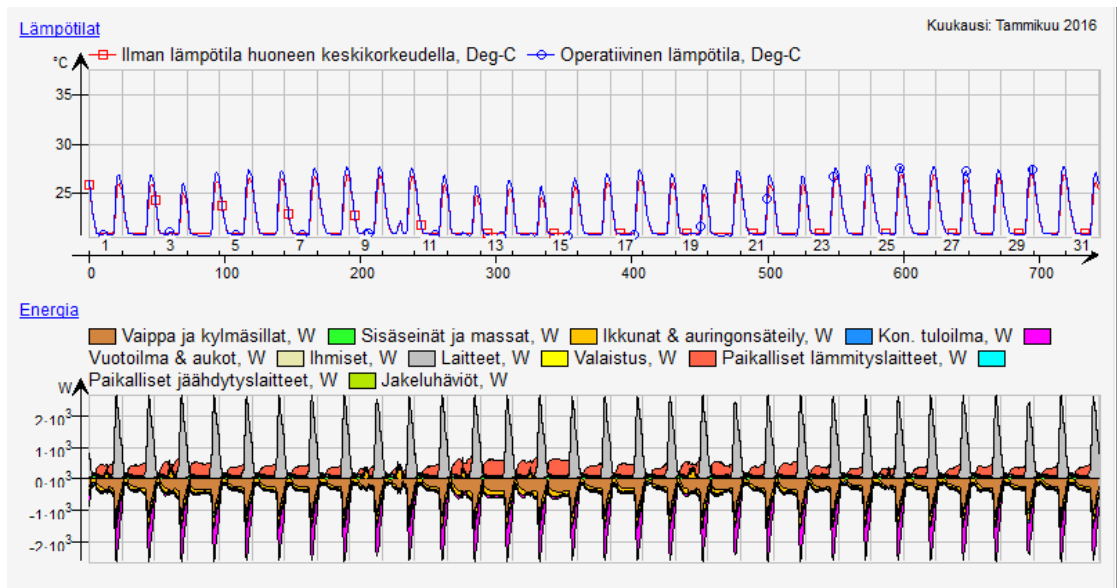


Kuva 10. Vertailtavien järjestelmien kokonaisenergiakulutukset (E-luku) ja energiatehokkuusluokkien rajat alle 120 m² erillispientalolle. Vasemmalta oikealle: perusmalli, parempi lämmöntalteenotto, ilmalämpöpumppu (D3), varaava tulisija (D3), ilmalämpöpumppu ja tulisija (D3), ilma-vesilämpöpumppu, pellettikattila, vesikiertoinen pellettitakka, hybridijärjestelmä väliovet kiinni, hybridijärjestelmä väliovet auki.

Varaavaa tulisijaa käytettäessä huippulämpötilat oleskelutilassa ovat talvikaudella 22-23 °C ja lämmityskauden alussa ja lopussa aurinkoisina päivinä lähemmäs 26 °C. Kevyen tulisijan huippulämpötilat olivat kylminäkin päivinä 26 °C ja kun luovutettu teho ei varastoidu mihinkään, putosi lämpötila nopeasti päälämmitysjärjestelmän ylläpitämään peruslämpöön (kuva 11).

Aurinkopaneelit

Aurinkopaneeleista saatiin vuoden aikana 441 kWh energiaa, eli noin 110 kWh yhtä paneeli-neliometriä kohti, mikä vastaa 7,6 kWh/(m²a) ostoenergiaa. Eniten aurinkosähköä saatiin heinäkuussa, 72 kWh. Huhtikuulta elokuulle aurinkosähköä saatiin vähintään 55 kWh kuukaudessa. Marras-tammikuussa energiantuotanto oli pienimillään, noin 4-6 kWh kuukaudessa.



Kuva 11. Oleskelutilan lämpötila ja energiataseet tammikuussa, kun tulisijana on nopeasti lämpöä luovuttava kevyt tulisija

Ilma-ilmalämpöpumppu

Oleskelutilaan asetetulla ilma-ilmalämpöpumulla saatiin vyöhykkeiden minimilämpötilat pysymään hyväksyttävän rajoissa, vaikka vyöhykekohtainen lämmitys ei ollut käytössä (taulukko 6).

Taulukko 6. Ilman minimilämpötila eri vyöhykkeillä lämmityskaudella, kun väliovet ovat auki ja ilmalämpöpumpun pyyntilämpötila T_{ilp} on 3 °C korkeampi kuin muiden huonelämmittimien tavoitelämpötila

Vyöhyke	Lämpötilat, [°C]	
	$T_{ilp} = 24\text{ °C}$	$T_{ilp} = 21\text{ °C}$
Oleskelutila	23,9	20,9
Makuutila	22,1	19,3
Pesutila	21,5	18,8
WC	23,3	20,3

Ilmalämpöpumpun tuottaman lämmitysenergian osuus oli suurempi jos väliovet pidettiin auki ja ilmalämpöpumpun tavoitelämpötila oli enemmän kuin vyöhykekohtaisilla lämmityslaitteilla (taulukot 7 ja 8). Väliovien auki pitäminen tasasi lämpöoloja muutenkin (taulukko 8).

Taulukoissa 7 ja 8 t_l on tuntien osuus kun operatiivinen lämpötila lämpimimmässä vyöhykkeessä on yli 27 °C, t_k on tuntien osuus kun operatiivinen lämpötila keskimääräises-

sä vyöhykkeessä on yli 27 °C, ja t_l on niiden tuntien osuus kun vyöhykkeiden ilman lämpötila on alle lämmitysrajan tai yli jäähdytysrajan. Sulkeissa ilmalämpöpumpun pyyntilämpötila ja vyöhykekohtaisten sähköpattereiden asetusarvo kullekin tapaukselle.

Taulukko 7. Ilmalämpöpumppu (D3-ilmavirrat): jäähdytysrajan ylittävien tuntien osuudet sekä ostoenergiankulutus (kWh/(m²a)) koko rakennukselle, ilmalämpöpumpulle ja vyöhyöhykekohtaisille sähkölämmittimille

	t_l	t_k	t_f	Ostoenergia	ILP	patterit
ILP, ovet kiinni (21/21)	15	11	11	140,9	8,9	46,1
ILP, ovet auki (24/21)	12	11	10	122,3	29,8	10,5
ILP, ovet auki (21/18)	11	10	12	118,4	20,6	11,0

Taulukko 8. Ilmalämpöpumppu (suunniteluilmavirrat): jäähdytysrajan ylittävien tuntien osuudet sekä ostoenergiankulutus (kWh/(m²a)) koko rakennukselle, ilmalämpöpumpulle ja vyöhyöhykekohtaisille sähkölämmittimille

	t_l	t_k	t_f	Ostoenergia	ILP	Patterit
ILP, ovet kiinni (21/21)	6	4	8	181,9	10,7	59,7
ILP, ovet auki (21/21)	3	3	8	179,9	10,7	58,7
ILP, ovet auki (24/21)	4	3	7	152,8	38,8	12,3
ILP, ovet auki (21/18)	3	3	7	152,0	31,7	12,3

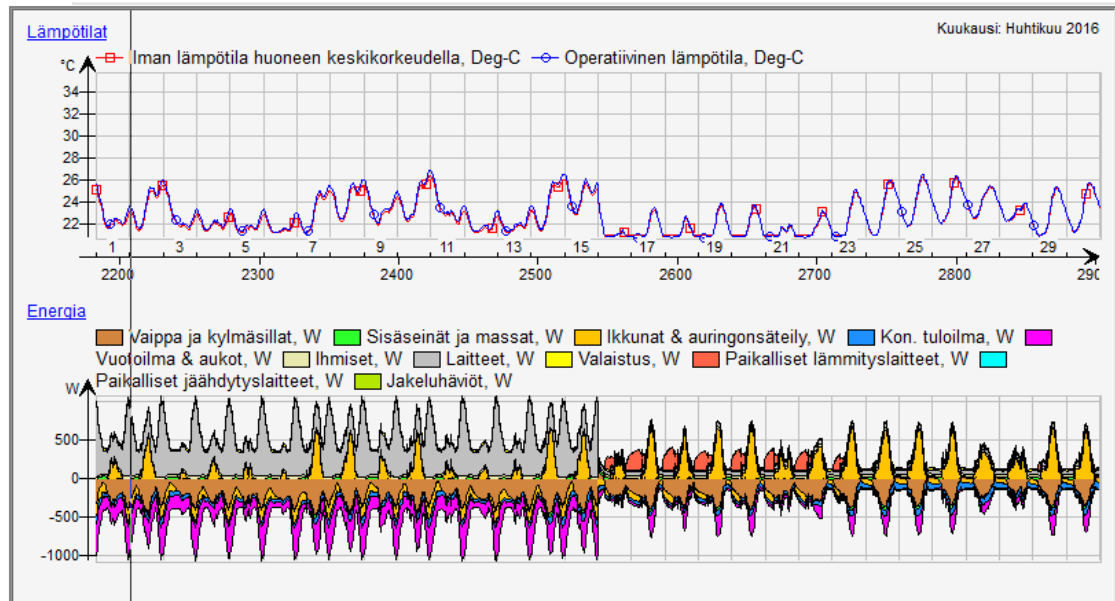
Tulisija

Kun mallinnettiin varaavaa tulisija niin, että saadaan noin 2000 kWh lämpöenergiaa tiloihin standardikäytön mukaisessa tilanteessa, lämpötilat oleskelutilassa olivat lämmityskaudella 22...24 °C (kuva 12), makuutilassa asteen vähemmän.

Tulisijan käyttöaikataulusta riippuen lämpötilat illalla voivat kohota hyvinkin epämiellyttäväksi (taulukko 9).

Taulukko 9. Tulisijat, huippulämpötila 1.2. klo 21. Kamiina 1 on kamiinan lämmitys kerran päivässä, kamiina 2 kahdesti

	Makuutila	Oleskelutila
Kamiina, 1	22,5 °C	26,0 °C
Kamiina, 2	21,0 °C	23,0 °C
Varaava	27,0 °C	28,0 °C



Kuva 12. Energiatase oleskelutilassa huhtikuussa, kun varaava tulisija käytössä

8.4 Hybridilämmitys

Hybridilämmitysjärjestelmään liitetyt aurinkokeräimet säästivät lämpimän käyttöveden tuottoon käytettyä ostoenergiaa yli 70 %. Valtaosa säästetystä ostoenergiasta oli sähköä, koska sähkövastuksia tarvitaan lämmityskauden ulkopuolella, jolloin pellettitakka ei ole käytössä.

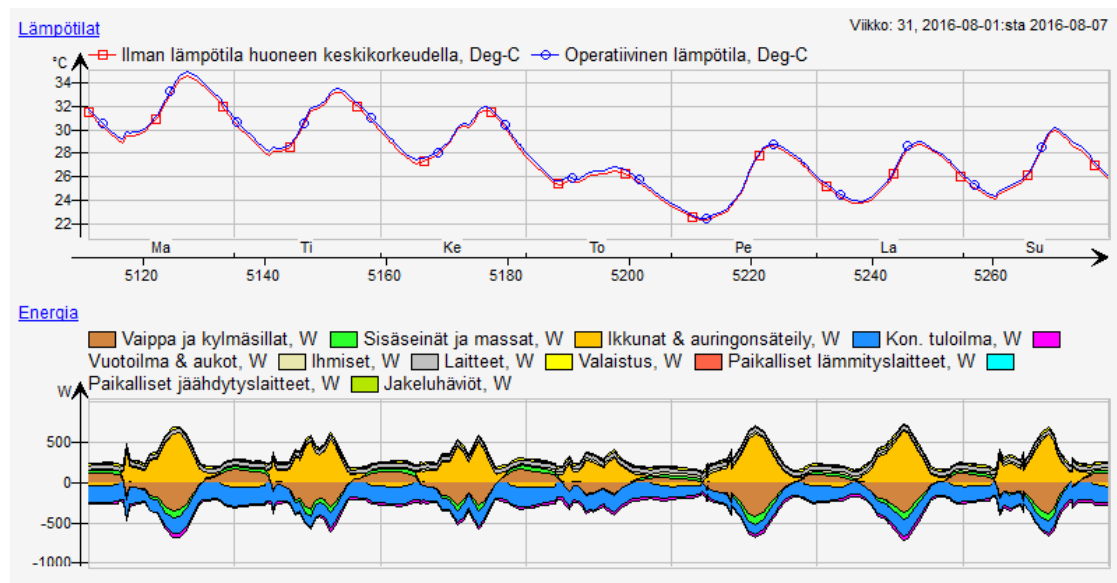
Havainnollisuuden vuoksi taulukossa 10 on tilojen sähkölämmitystarpeesta vähennetty teknisen tilan sähköpatterin energiankulutus häviöineen, 633 kW h/a. Kaikissa tapauksissa LVI-sähkö on 706 kW h/a ja IV-patteri 708 kW h/a. Ovet auki -tapauksessa on poistettu huonelämmittimet muista huonetiloista, jolloin huonelämpötilat jäävät hieman alle tavoitearvon.

Taulukko 10. Hybridilämmitysjärjestelmän ostoenergiantarve, kun lämmitetään asuintiloja. Perustapaus on vesikiertoinen pellettitakka, aurinkokeräimet ja väliovet kiinni.

	Lämmin käyttövesi, kW h/a		Tilojen lämmitys, kW h/a	
	sähkö	pelletti	sähkö	pelletti
Perustapaus	240	1231	2030	2341
└ Ei aurinkoa	857	2325	2018	2325
└ Ovet auki ¹	193	1293	0	5480

8.5 Kesäajan huonelämpötilojen hallinta

Perusmallissa standardikäytön mukaisilla ilmavirroilla makuu- ja oleskelutilan operatiivinen lämpötila oli korkeimmillaan 37,8 °C heinä-elokuun vaihteessa. Suunnitelman mukaisilla ilmavirroilla operatiivinen lämpötila oli makuutilassa korkeimmillaan 34,3 °C ja oleskelutilassa 35,1 °C. Merkittävin tekijä sisäilman lämpötilan kohoamisessa oli auringon säteilystä ikkunoiden kautta tuleva lämpökuorma (kuva 13). Laitteista tai ihmisistä tulevalla lämpökuormalla ei ollut juurikaan merkitystä.



Kuva 13. Elokuun ensimmäisen viikon lämpötilat ja energiatase perusmallissa kun ilmavirrat ovat suunnitelman mukaiset

Taulukoissa 11-14 T_M on makuutilan korkein lämpötila, T_O oleskelutilan. (Sulkeissa operatiivinen lämpötila.) t_l on tuntien osuus kun operatiivinen lämpötila lämpimimmässä vyöhykkeessä on yli 27 °C, t_k on tuntien osuus kun operatiivinen lämpötila keskimääräisessä vyöhykkeessä on yli 27 °C, ja t_l on niiden tuntien osuus kun operatiivinen lämpötila on alle lämmitysrajan tai yli jäähdytysrajan.

Passiivisista aurinkokuorman torjuntakeinoista markiisin käyttö oli tehokkain alentamaan huippulämpötiloja (taulukot 11 ja 12). Paremmen g-arvon ikkunat vähensivät ikkunoista tulevaa lämpökuormaa myös lämmityskaudella, mikä näkyy kohonneena osastoenergiantarpeena. Mallinnetulla valokatteella ei ollut juurikaan merkitystä auringosta tulevan kuorman vähentäjänä.

Ikkunatuuletus oli passiivisia keinoja tehokkaampi kun ilmavirrat olivat standardikäy-

Taulukko 11. Kesäajan korkeimmat lämpötilat makuu- ja oleskelutilassa sekä ostoenergiankulutus, kun lämpökuormaa estetään passiivisin keinoin ja vyöhykekohtaiset ilmavirrat ovat standardikäytön mukaiset.

	T_M (°C)	T_O (°C)	t_l (%)	t_k (%)	t_t (%)	Ostoenergia (kWh/(m ² a))
Ikkunatuuletus	32,0	32,0	9	7	8	156
Markiisisolette	32,6	32,7	6	5	9	156
Ikkunat, g=0,49	34,8	34,7	8	6	9	159
Valokate	37,0	36,0	12	9	11	156
Perusmalli	37,5	37,6	15	11	12	156

Taulukko 12. Kesäajan korkeimmat lämpötilat makuu- ja oleskelutilassa, kun lämpökuormaa estetään passiivisin keinoin ja vyöhykekohtaiset ilmavirrat ovat suunnitteluarvojen mukaiset.

	T_M (°C)	T_O (°C)	t_l (%)	t_k (%)	t_t (%)
Markiisisolette	30,6 (30,7)	31,2 (31,3)	2	1	7
Ikkunatuuletus	31,6 (32,0)	31,8 (32,2)	4	3	7
Ikkunat, g =0,49	32,1 (32,4)	32,7 (32,8)	3	2	7
Valokate	33,5 (33,8)	33,6 (33,8)	5	3	8
Perusmalli	33,9 (34,3)	34,9 (35,1)	6	4	8

tön mukaisia, mutta suunnitelman mukaisia ilmavirtoja käytettäessä ikkunatuuletuksen merkitys väheni (taulukot 11 ja 12).

Taulukko 13. Kesäajan korkeimmat lämpötilat makuu- ja oleskelutilassa sekä aktiivisen jäähdytyksen ostoenergiankulutus kun vyöhykkeiden ilmavirrat ovat standardikäytön mukaiset. Sulkeissa laitteen tavoitelämpötila.

	T_M (°C)	T_O (°C)	t_l (%)	t_k (%)	t_t (%)	Ostoenergia (kWh/(m ² a))
Yötuuletus (IV)	36,7	36,6	10	8	9	2,1
VILP (radiaattorit) (27 °C)	27,0	27,0	9	7	8	1,3
VILP (konvektorit) (27 °C)	27,0	27,1	9	7	9	1,4
Ilmalämpöpumppu (25 °C)	26,6	25,1	0	0	0	2,6
Perusmalli	37,5	37,6	15	11	12	-

Aktiivisista keinoista ilmalämpöpumpun viilennystoiminto kulutti eniten energiaa, mutta myös viilensi tehokkaimmin. Koneellisen ilmanvaihdon ilmavirtojen tehostaminen ei merkittävästi alentanut huippulämpötiloja, mutta tyytymättömien tuntien osuus oli jokseenkin sama kuin muilla keinoilla ilma-ilmalämpöpumppua lukuunottamatta.

Taulukko 14. Kesäajan korkeimmat lämpötilat makuu- ja oleskelutilassa kun tiloja jäähdytetään aktiivisin keinoin ja vyöhykkeiden ilmavirrat ovat suunnitelman mukaiset

	T_M (°C)	T_O (°C)	t_l (%)	t_k (%)	t_t (%)
Ilmalämpöpumppu	26,6 (26,9)	25,1 (25,5)	0	0	0
VILP (konvektorit)	27,0 (27,8)	27,0 (27,1)	4	3	8
VILP (radiaattorit)	27,0 (27,8)	27,0 (28,0)	4	3	7
Yötuuletus (IV)	33,5 (33,8)	34,2 (34,4)	4	3	7
Ilmavirrat 200 %	33,5	33,6	4	3	7
Perusmalli	33,9 (34,3)	34,9 (35,1)	6	4	8

9 POHDINTA

Tutkittiin konttitalon energiatehokkuutta vertailemalla suunniteltujen ja vaihtoehtoisten taloteknisten järjestelmien osto- ja kokonaisenergiankulutusta sekä sisäilman lämpötilaa eri tilanteissa. Tutkittava rakennus ja järjestelmät mallinnettiin rakentamismääräyskokoelman ohjeiden mukaan. Tarkasteltiin sisäilmasto-olosuhteiden toteutumista kesäaikana ja lämmityskaudella tulisijaa käytettäessä sekä tilojen ylläampemmiseltä suojautumista. Tutkittiin myös tukilämmitysjärjestelminä käytettävien tulisijan ja ilmalämpöpumpun käyttöä tilojen päälämmönlähteenä ja mallinnettiin hybridijärjestelmä, missä vesikiertoiseen pellettitakkaan on yhdistetty aurinkokeräimet.

Alle 120 m² pientalon kokonaisenergiakulutus saa olla korkeintaan 204 kWh_E/(m²a) eli C-luokka tai parempi. Pelkällä suoräsähkölämmityksellä, ilman tukilämmitysjärjestelmiä, Konttitalon energialuokka on D. Jos hyödynnetään täysimääräisesti energialaskennan sääntöjen sallimat ilmalämpöpumpun ja varaavan tulisijan lämmitysenergia sekä vähennetään tuloilman jälkilämmityksen käyttämää ostoenergiaa käyttämällä mahdollisimman tehokasta lämmöntalteenottoa, niin energialuokka saadaan korotettua C:hen.

Ilmanvaihto

Mallinnuksessa ilmanvaihdon sisäänpuhalluslämpötilana käytettiin ohjearvoa 18 °C, koska ei tunnettu suunnitteluarvoa. Matalampi lämpötila, 15 °C tai jopa 10 °C, olisi jonkin verran vähentänyt tuloilman lämmityksen tarvetta ja toisaalta kompensoinut lämmityskaudella auringonsäteilyn ja tulisijan aiheuttamia lämpökuormia. Matalia sisäänpuhalluslämpötiloja käytettäessä on kuitenkin varmistettava, että sisäänpuhallusilma

sekoittuu tehokkaasti huoneilman eikä huomattavasti viileämpi tuloilma vajoa oleskeluvyöhykkeelle aiheuttaen vedontunnetta. [42]

Mallinnuksessa käytetyt standardikäytön ilmavirrat ovat alle puolet Konttitalon suunnitelmailmavirroista. Suunniteltujen ilmavirtojen käyttö lisäisi perusmallissa rakennuksen ostoenergiankulutusta tuloilman lämmityksen osalta 138 % ja tilojen lämmityksen (sisältäen sisäänpuhallusilman lämmityksen) 29 %, yhteensä 45 %. Ero ilmavirroissa johtuu Konttitalon tavanomaista pientaloa huomattavasti pienemmästä lämmitettävästä nettopinta-alasta ja suunniteltujen ilmavirtojen mitoittamisesta tilojen käytön, ei neliöiden mukaan.

Varaava takka ja ilmalämpöpumppu

Varaava tulisija on hyvä lisälämmönlähde pahimmilla pakkasilla, mutta mallinnettaessa jäi mietityttämään kuinka paljon lämmitysenergiaa siitä saadaan pienessä kevytrakenteisessa, mutta hyvin eristetyssä ja tiivistetyssä rakennuksessa. Mallissa tulisija oli käytössä päivittäin koko lämmityskauden ajan (syyskuun puolivälistä huhtikuun puoliväliin), jotta D3 sallima lämmitysenergia saatiin hyödynnettyä täysimääräisesti ilman merkittävää tilojen yllämpenemisriskiä. Ilmaston lämmitessä tulisijan käytöstä saatu lämpöenergia luultavasti vain vähenee.

Jos ajatellaan tukilämmityksen käyttöä todellisen ostoenergiankulutuksen vähentämisen kannalta, niin luultavasti ilmalämpöpumpusta saadaan suurempi etu, koska termostaattiohjattuna se vastaa auringosta, laitteista ja ihmisistä tuleviin lämpökuormiin eikä vaadi asukkailta aktiivista laitteiden käyttöä. Energialaskennan sääntöihin onkin tulossa muutos [14], jonka mukaan ilmalämpöpumpusta voidaan tukilämmitysjärjestelmänäkin huomioida jopa 3000 kWh, mikä Konttitalon kaltaisen pienen asuinrakennuksen kohdalla olisi merkittävä osa vuotuisesta tilojen lämmitysenergiantarpeesta (4000 kWh).

Tulisijaa ja ilmalämpöpumppua käytettäessä on asukkaiden joka tapauksessa muistettava jättää väliovet auki, jotta lämpö leviää myös makuu- ja pesutiloihin. Laskennan tulosten perusteella ei voi sanoa kuinka tasaisesti lämpö leviää. Voi olla riski, että kylmät ikkunapinnat aiheuttavat vedontunnetta, joten sähköpatterit olisi kuitenkin hyvä olla lisälämmönlähteenä.

Vesikiertoinen pellettitakka ja aurinkokeräimet

Jos hybridijärjestelmään yhdistetään parempi ilmanvaihdon lämmöntalteenotto tai käytetään matalampaa korvausilman sisäänpuhalluslämpötilaa, voidaan mahdollisesti säästää kokonaisenergiankulutuksen B-luokka (kuva 10). Tämä kuitenkin riippuu lopullisen järjestelmän mitoituksesta, kuten esimerkiksi varaajan häviöistä ja vesikiertoisen pellettitakan vuosihyötysuhteesta.

Muut järjestelmät

Vesikiertoisesta lämmönjaosta tarkasteltiin vain radiaattorit ja puhallinkonvektorit, koska lattialämmitys vaatii massaa, mihin varastoida lämpöä. Lisäksi, vaikka tilojen lämmitys toteutettaisiin vesikiertoisella järjestelmällä, olisi kokonaisuuden kannalta mielekkäämpää lämmittää tuloilma sähkövastuksilla ja energiansäästöissä panostaa tehokkaampaan lämmöntalteenottoon.

Aurinkosähkökennojen käyttöä ei tutkittu tarkemmin, koska kennot ovat edelleen melko kannattamattomat Suomen oloissa [27]. Esimerkiksi konttitalon mallissa LVI-sähkön kokonaiskulutus oli keskimäärin 20 kWh kuukaudessa, jolloin pelkästään LVI-sähkön käyttötarpeen kattamiseen keskitalvella tarvittaisiin noin 20 m² aurinkopaneeleja. Toisaalta 20 m² tuottaisi heinäkuussa jopa 360 kWh, mikä on kaksi kertaa lämpimän käytöveden laskennalliseen tuottoon tarvittava energia.

Jos kuitenkin kennot asennetaan ja otetaan käyttöön, niin ylimääräisen energian varastoiminen esimerkiksi lämminvesivaraajaan on kannattavampaa kuin sähkön myynti verkkoon tai varastointi akkuun. [27]

Sisäilmasto-olosuhteet

Konttitalolle ei ollut tarkempaa sisäilmastosuunnittelua, joten mallissakin tarkasteltiin melko karkealla tasolla oleskeluvyöhykkeiden (makuu- ja oleskelutila) huonelämpötiloja. Todellisuudessa esimerkiksi makuuhuoneessa voidaan nukkumisen kannalta kokea miellyttäväksi standardikäyttöä merkittävästi matalampi lämpötila ja vastaavasti pesutilassa korkeampi.

Lämpötilaolosuhteiden tarkastelua varten olisi muutenkin voinut asettaa todenmukaisempia käyttöaikatauluja laitteille, valaistukselle ja ihmisille. Esimerkiksi laskettaessa henkilömäärä pientalossa on yksi ihminen 43 asuinneliömetriä kohti tasaisesti vuorokauden ympäri [13], jolloin pesutilassa oleskelisi enemmän ihmisiä kuin makuutilassa. Toisaalta kun tarkasteltiin vyöhykkeiden lämpötaseita (kuva 13), on auringosta ikkunlasien kautta tai tulisijasta tuleva lämpökuorma niin suuri, ettei ihmisillä ja laitteilla ole juuri merkitystä.

Malleissa auringon kuormalta suojaavat kaihtimet sekä markiisiolette ohjautuivat valaistuksen mukaan. Samoin ikkunatuuletuksen ikkunoiden aukiolo ohjautui lämpötilan mukaan. Edullisesti rakennettavaan omakotitaloon harvemmin asennetaan automaattisesti sulkeutuvia ja avautuvia suojauksia tai aukkoja, jolloin suojien käyttö riippuu asukkaiden omasta aktiivisuudesta. Ulkoisissa suojissa on kuitenkin se etu ikkunoiden lasituksen parantamiseen verrattuna, että jos asukkaat vain muistavat avata suojaukset talvella, niin ne eivät estä ilmaisenergian hyödyntämistä.

Standardikäytöllä laskettaessa ilmalämpöpumpun kuluttama ostoenergia oli samaa luokkaa kuin mitä menetetään ilmaisenergioissa, jos ikkunoissa on matalampi g-arvo. Ilmalämpöpumpun jäähdytysteho on kuitenkin huomattavasti parempi kuin ikkunoiden merkitys kesäajan huippulämpötilojen vähentämisessä.

Kun vertailtiin aktiivisia jäähdytyskeinoja, eivät ilma-ilmalämpöpumppu (ILP) ja ilma-vesilämpöpumppuun (VILP) kytketyt konvektorit ja radiaattorit olleet täysin vertailukelpoisia, koska ILP oli asetettu jäähdyttämään 25 °C:een ja VILP 27 °C:een. Toisaalta, jos ilma-ilmalämpöpumpun jäähdytysraja olisi ollut korkeampi, niin luultavasti makuuhuoneenkin huippulämpötilat olisivat olleet vielä korkeammat. Kaikissa koneellisen jäähdytyksen tapauksissa jäähdytettiin myös pesutilaa. Todellisuudessa olisi energiankäytön kannalta järkevintä olla jäähdyttämättä pesutilaa ja ohjata teho makuutilan jäähdyttämiseen esimerkiksi pitämällä pesutilan ovi kiinni.

Yötuuletuksella tai ilmanvaihdon tehostuksella ei luultavasti ollut juurikaan merkitystä tilojen huippulämmön vähentämisessä, koska päivällä ikkunoista tuleva lämpökuorma on niin paljon enemmän kuin mitä jäähdyttämättömään tuloilmaan saa sidottua. Luultavasti hiljaa pyörivällä kattotuulettimalla olisi suurempi viilentävä vaikutus.

Kaikki vyöhykkeet laskettiin samoilla standardikäytön arvoilla. Teknisessä tilassa riittäi-

si kuitenkin matalampikin lämpötila, 10 °C. Teknisen tilan sähköpatterin ostoenergian tarve oli perusmallissa 578 kWh/(m²a) kun lämmitysraja on 21 °C eikä tilassa huomioitu esimerkiksi lämminvesivaraajan häviöistä tulevaa lämpökuormaa. Käytännössä lämminvesivaraajan häviöistä ja muista laitteista tuleva lämpökuorma luultavasti pitäisi teknisen tilan hyväksyttävän lämpötilan yläpuolella.

Sisäilmasto-olosuhteista tarkasteltiin työssä vain lämpötilaa. Muita viihtyvyyteen vaikuttavia tekijöitä on melu, mitä ei IDA ICE:n kaltaisella ohjelmalla voi tarkastella. Kevyt-rakenteissa, mutta metallirunkoisessa konttitalossa voi olla riski eri äänten siirtymiselle rakenteissa ja rakenteiden läpi. Esimerkiksi jos päädytään lämmittämään ilmalämpöpumpulla niin koetaanko oleskelutilassa sijaitsevan puhaltimien ääni häiritseväksi.

9.1 Mallien rajoitteista

Laskennassa käytetyn ohjelmiston (IDA ICE) aiemmalle versiolle (4.0) validoitu laskentamenetelmän epätarkkuus operatiiviselle lämpötilalle oli tapauksesta riippuen 0,1-0,5 K sekä koko vuoden lämmitysenergialle 0,1-7,7 % ja jäähdytysenergialle 1,8-11,6 %. [36] Voidaan olettaa, että työssä käytetyn version menetelmän tarkkuus on sama tai parempi.

Tulosten epävarmuuteen mallinnuksessa vaikuttavat käytettävien lähtötietojen ja mallien tarkkuus [43]. Esimerkiksi tässä työssä ei tunnettu ikkunoiden ja ovien tarkkaa rakennetta ja suurin osa käytetyistä parametreista on kirjallisuudesta saatuja ohjeita. Mallit puolestaan ovat pitkälle yksinkertaistettuja, esimerkiksi ilma-vesipumpun ja pellettikattilan käyttö on mallinnettu pelkkänä järjestelmän vuosihyötysuhteena.

Tuloksista voidaankin lähinnä tarkastella suuruusluokkia ja keskinäisiä eroja ja toteutuneisiin kulutuksiin ja lämpötiloihin vertaaminen vaatisi tarkempaa mallinnusta.

Lämmitettävän nettopinta-alan laskenta

IDA ICE:n vyöhykkeistä laskema lämmitetty nettopinta-ala on 57,8 m² kun suunnitelmista laskettuna nettopinta-ala on noin 61 m². Erotukseen voi vaikuttaa mallin luonnissa tapahtuneet pienet mittavirheet, koska malli tehtiin PDF-tulosteen pohjalta, ei DWG-kuvan. Erotuksen merkitys näkyy kun lasketaan neliöistä riippumattomien ostoe-

nergiantarpeen, kuten lämminvesivaraajan häviöiden, varaavan tulisijan tai ilmalämpöpumpun, vaikutusta kokonaisenergiankulutukseen.

Kylmäsiljat

Mallinnuksessa oletettiin, että lopullisen rakennuksen viivamisten kylmäsiltojen laskeamiseen vaikuttava runkomateriaali on puuta, vaikka muokkaamattomien konttien kantava runkorakenne on terästä. Rakennusta mallinnettaessa ei myöskään huomioitu mahdollisista kantavista konttiväliseinistä tulevia kylmäsiltoja, koska niitä ei huomioida rakentamismääräyskokoelmankaan säännöissä. Viivamaisten kylmäsiltojen merkitystä kokonaislämmönjohtumisessa lisää konttien asettelu suhteessa toisiinsa sekä runsas aukotus (kuva 3).

Mallia tehdessä alapohjan ja ulkoseinän välisen kylmäsiljan aiheuttama lisäkonduktanssi ($0,06 \text{ W}/(\text{m K})$) merkittiin väärään kohtaan kylmäsiltojen määrittelylomakkeessa, jolloin kylmäsiltojen kokonaisjohtumislämpöhäviö jää oletusarvoa pienemmäksi. Virhe kuitenkin toistuu kaikissa mallin muunnelmassa, joten tulokset ovat keskenään vertailukelpoiset. Kaikkien kylmäsiltojen osuus koko rakennuksen lämmönläpäisevyydestä on melko suuri rakennuksen muodosta ja aukotuksesta johtuen.

Auringosta tuleva lämpökuorma

Ikkunoita mallinnettaessa ei tiedetty kuin tilaajan tavoite ikkunoiden U-arvolle. Yleensä jos ikkunoiden lämmönläpäisy on matala, niin myös ikkunoiden läpi päästämä auringon säteilyn osuus on matala. Perusmallissa käytettiin kuitenkin oletusarvoa g-arvolle, mikä oli matalaan U-arvoon verrattuna korkea. Mallinnetut ikkunat eivät siis välttämättä vastaa todellisia ikkunoita, ja on mahdollista, että talvella auringon säteilystä saatu ilmaisenergia on pienempi kuin mallissa.

Ovien rakenteita ei tunnettu, mutta kesäajan lämpötilan hallinnan tutkimiseksi myös ovirakenteista pitäisi mallintaa lasitus [41]. Todennäköisesti esimerkiksi oleskelutilasta katetulle terassille johtavassa ovelle on lasitus. Mallinnettiin kuitenkin ovi umpinaisena, mikä vähensi tilaan tulevaa auringon lämpökuormaa.

Kesäajan lämpötiloja tutkittaessa ei mallissa myöskään huomioitu ulkoalueiden pintoja

kuten lähiympäristöä lämmittävää asfalttia tai viilentäviä viheralueita [41]. Näillä luultavasti ei kuitenkaan ole Konttitalon osalta merkitystä.

Tulisijat ja vesikiertoinen pellettitakka

Tulisijojen, varsinkin vesikiertoisen pellettitakan, mallinnuksessa tehtiin paljon yksinkertaistuksia. Esimerkiksi kokonaisvuosihyötysuhteena käytettiin kaikille samaa ohjearvoa 0,6 ja tulisijan pitkäaaltosen lämpösäteilyn arvoksi asetettiin kaikille tulisijoille sama kirjallisuudesta löytnyt varaavan takan keskiarvo.

Pellettitakka mallinnettiin ideaalisena lämmityslaitteena, jonka lämmönjaon häviöt olivat samat kuin pääjärjestelmällä. Tätä ei huomioitu kun asetettiin pellettitakan muita hyötysuhteita, mikä hieman lisää häviöihin kuluva ostoenergiaa. Toisaalta todellinen järjestelmä voi poiketa paljonkin mallinnetusta, kun ei tunneta laitteiston käyttökatkoja tai hyötysuhdetta heikentävien uudelleensytytysten määrää [25].

Pellettitakan apulaitteiden sähkönkulutukselle oli asetettu $0,86 \text{ W/m}^2$, mikä oli eri valmistajien antamista arvoista arvioitu, mutta kymmenkertainen verrattuna rakentamismääräyskokoelman ohjearvosta laskettuun. Sähkötehon kulutuksessa ei myöskään huomioitu kesäaikaa, jolloin pellettitakka ei ole ollenkaan käytössä.

Varaajan mallintamisesta

Hybridijärjestelmän varaajan häviöt mallinnettiin yksinkertaistaen huomioimalla ne vain vesikiertoisen pellettitakan hyötysuhteessa. Mallissa ei huomioitu, että kesällä lämmin käyttövesi tuotetaan pääasiallisesti aurinkokeräimillä tai että osa lämpimästä käyttövedestä tuotetaan sähkövastuksella. Mallissa ei myöskään huomioitu varaajan häviöistä tulevaa lämpökuormaa tiloihin.

Hybridijärjestelmää mallinnettaessa käytettiin ESBO:ssa oletusarvoisesti tarjottua varaajan mallia, jonka tilavuus on 1000 litraa. Aurinkokeräimiä käyttöviin järjestelmiin suositellaan mahdollisimman suurta varaajaa, mutta varaajan koon kasvaessa myös häviöt kasvavat, mikä on otettava huomioon todellista järjestelmää suunniteltaessa. Jos käytettäisiin esimerkiksi mallinnettua 1000 litran varaajaa, olisi ohjearvo häviöille 1100

kWh paremmalla eristyksellä ja 2200 kWh huonommalla eristyksellä, mikä on huomattavan paljon suhteessa rakennuksen laskennalliseen lämpöenergian kulutukseen.

Sisäilmasto-olosuhteiden tarkastelusta

Kesäajan viilennyskeinojen tarkastelu on lähinnä suuntaa antava, koska malli oli mm lasitusten osalta puuttellinen eikä käytössä huomioitu realistisempia käyttöaikatauluja tai vyöhykekohtaisia tavoitelämpötiloja. Tilakohtaisessa käytössä päivisin laitteista ja ihmisistä tuleva kuorma on todennäköisesti pienempi kuin aamulla ja illalla, ja makuutiloissa suurin kuorma on yöllä. Tavoitelämpötilojen osalta makuutilassa voisi olla hieman viileämpi kuin oleskelutilassa ja pesutilassa puolestaan lämpimämpi.

Muut epätarkkuudet

Pellettitakan ohella ilmalämpöpumpun toimintaa pidetään melko haasteellisena mallintaa [23], ja tässäkin työssä tehtiin paljon yksinkertaistuksia, varsinkin kun ei tiedetty mikä ilmalämpöpumppu konttitaloon mahdollisesti asennetaan. Ilmalämpöpumpulle ei asetettu käyttöaikatauluja, joten se lämmitti myös kesäisin ja vastaavasti jäähdytti talvisin. Malleissa ei myöskään huomioitu sisäänpuhallusilman lämpötilaa, vaan esimerkiksi tilanteessa, missä vyöhykkeiden asetusarvo oli 18 °C oli käytännössä ilmalämmitys.

Lämpimän käyttöveden jakelujohdon häviö on virheellisesti merkitty mallissa, mutta suuruusluokka on kuitenkin oikea, ja virhe toistuu kaikissa versioissa.

10 YHTEENVETO

Työssä tutkittiin tilakonteista rakennettavan siirtokelpoisen pientalon eli konttitalon energiatehokkuutta vertailemalla suunnitellun ja vaihtoehtoisten lämmitysjärjestelmien osto- ja kokonaisenergiankulutusta. Energiatehokkuuden ohella tarkasteltiin sisäilmasto-olosuhteiden toteutumista kesäaikana sekä tukilämmitysjärjestelmiä käytettäessä. Työ toteutettiin IDA ICE -energia- ja olosuhdesimulaatio-ohjelmalla. Tutkimusaineistona oli tilaajalta saadut suunnitelmat, joita täydennettiin kirjallisuudesta saaduilla ohjeistoilla.

Perusmallin energialuokka on D. Jos suorasähkölämmitystä tuetaan täysimääräisesti ilmalämpöpumpulla ja varaavalla takalla sekä tuloilman lämmitystarvetta vähenn-

tään tehostamalla lämmöntalteenottoa, ylletään C-luokkaan. Korvaamalla suorasähkö uusiutuvilla, voidaan saavuttaa jopa B-luokka.

Siirtokelpoisille pientaloille suositellaan ulkoilmalämpöpumppujen käyttöä tilojen ja lämpimän käyttöveden lämmittämiseen. Myös Konttitalon ostoenergiantarvetta saadaan huomattavasti vähennettyä, jos lämmitysjärjestelmään integroidaan ulkoilmalämpöpumppu. Kokonaisenergiantarvetta taas voidaan vähentää tuottamalla lämmitysenergia vesikiertoisen pellettitakan ja aurinkokeräinten yhdistelmällä.

Auringon säteilykuorma on merkittävä tilojen yllämpenemisriski, kuten myös tulisija lämmityskauden alku- ja loppupuolella. Tutkituista passiivisista suojakeinoista tehokain oli markiisit. Ilmanvaihdon tehostamisella ei ollut juuri merkitystä huippulämpötilojen alentamisessa. Ilmalämpöpumppu oli kokonaisuuden kannalta tehokkaampi kuin matalamman g-arvon ikkunat.

Siirtokelpoisista taloista Suomessa on hyvin vähän tutkimustietoa. Konttitalosta aiotaan kerätä käytön aikaista mittaustietoa. Olisikin mielenkiintoista verrata mitattua energiankulutusta laskennalliseen sekä sisäilmasto-olosuhteiden toteutumista simuloituihin. Erityisesti kiinnostaisi tietää kuinka paljon tulisijasta tai ilmalämpöpumpusta saadaan käytännössä hyödynnettyä lämmitysenergiaa ja miten huonelämpötilat ja viihtyvyys toteutuvat.

Työn rajauksen vuoksi Konttitalon energiatehokkuutta tarkasteltiin vain laskennallisen ostoenergiankulutuksen kannalta. Jos siirtokelpoiset pientalot ja erityisesti konttirakentaminen yleisyvät, niin yksi tutkimuksen aihe olisi siirtokelpoisten talojen elinkaarikustannukset ja hiilijalanjälki verrattuna tavanomaiseen pientaloasumiseen.

Ostoenergianlaskennassa keskityttiin taloteknisiin järjestelmiin eikä juurikaan puututtu rakennusteknisiin. Energiatehokkuuden kannalta on kuitenkin merkitystä myös rakennuksen muodolla ja sijoittelulla. Olisi voinut olla mielenkiintoista tutkia kuinka paljon rakennuksen lämpötaseeseen vaikuttaa konttien keskinäinen sijoittelu tai konttien sijoittelu ilmansuuntien suhteen.

Tässä tutkimuksessa todettiin, että suorasähkölämmitys tuettuna tehokkaalla lämmöntalteenotolla ja ilma-ilmalämpöpumpulla on ostoenergiankulutukseltaan heti ilma-vesilämpöpumpun

jälkeen edullisin. Kokonaisenergiankulutukseltaan biopolttoainetta käyttävä järjestelmä, etenkin aurinkokeräimillä tuettuna, on paras.

Tulosten perusteella suositellaan mitoittamaan ja säätämään ilmalämpöpumppu sekä vyöhykekohtaiset sähkölämmittimet niin, että asuintilat lämmitetään pääasiallisesti keskikonttiin asennetulla ilmalämpöpumpulla. Jos hankitaan tulisija, niin yksi vaihtoehto on termostaattisäätöinen vesikiertoinen pellettitakka, jolla saa lämmitettyä myös käyttöveden. Lämmityskauden ulkopuolella voidaan lämmin käyttövesi tuottaa aurinkokeräimillä, mutta varaajan mitoitus ja eristys on toteutettava huolella. Auringon säteilyn aiheuttamalta lämpökuormalta kannattaa suojautua markiiseilla tai vastaavilla.

LÄHTEET

- [1] Talbot, J. Mobilizing Energy Efficiency in the Manufactured Housing Sector. American Council for an Energy-Efficient Economy. Report Number A124. 2012. Saatavissa: <http://www.workingre.com/wp-content/uploads/2013/08/Energy-Efficiency-Manufactured-Housing.pdf> [viitattu 9.3.2016].
- [2] Laki rakennuksen energiatodistuksesta 50/2013. Päivitetty 18.1.2013. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130050> [viitattu 1.1.2017].
- [3] Loikkanen, A. Pariskunnan koti on rakennettu kahdesta merikontista. *Kotiliesi*. Www-sivu. 2016. Päivitetty 29.3.2016. Saatavissa: <https://kotiliesi.fi/puheenaiheet/pariskunnan-koti-rakennettu-kahdesta-merikontista/> [viitattu 26.2.2017].
- [4] Hewes, T. & Peeks, B. Northwest energy efficient manufactured housing program specification development. National Renewable Energy Laboratory (U.S.) Building Technologies Program. United States. Department of Energy. Office of Energy Efficiency ja Renewable Energy. 2013. Saatavissa: <http://purl.fdlp.gov/GPO/gpo47550> [viitattu 9.3.2016].
- [5] Tekninen liite muistioon Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta 28.3.2011. Saatavissa: www.ymparisto.fi [viitattu 28.1.2017].
- [6] Teijo-talot Oy. Valmistalot - muuttovalmiit talopaketit Teijo-taloilta. Www-sivut. Päivitetty 28.2.2017. Saatavissa: <http://www.teijotalot.fi/> [viitattu 15.3.2017].
- [7] Ranta, E. Miten ahtaasti meidän pitää oikein asua? *Taloussanomien*. Www-sivu. 2015. Päivitetty 13.7.2015. Saatavissa: <http://www.iltasanomat.fi/taloussanomien/art-2000001881033.html> [viitattu 26.2.2017].
- [8] Marja-aho, E. Koti kontissa. *Keskisuomalainen*. Www-sivu. 2016. Päivitetty 15.10.2016. Saatavissa: <http://www.ksms.fi/teemat/koti/Koti-kontissa/855542> [viitattu 26.2.2017].
- [9] Cronhjort, Y., Heikkinen, P., Helenius, R., Lylykangas, K. & Peittola, M. Luukku-talo. Puinen nollaenergiatalo 2020. Aalto-yliopisto. 2012. Loppuraportti. Päivitetty 20.10.2012. Saatavissa: <http://www.woodpolis.fi/binary/file/-/id/3/fid/550/> [viitattu 9.3.2016].
- [10] Lubliner, M., Hadley, A. & Gordon, A. Manufactured Home Performance Case Study: A Preliminary Comparison of Zero Energy and Energy Star. 2012. Tekninen raportti. Päivitetty 20.10.2012. Saatavissa: www.ba-pirc.org/pubs/Pdf/ZEMHfinal.Pdf [viitattu 9.3.2016].
- [11] Chandra, S., Wildder, S., Bartlett, R., McIlvaine, J., Chasar, D., Beal, D., Sutherland, K., Abbott, K., Eklund, K., Salzberg, E., Kosar, D., Fonorow, K., Peeks, B., Hewes, T. & Lubliner, M. Affordable Energy-Efficient New Housing Solutions. Pacific Northwest National Laboratory. PNNL-21275. 2012. Saatavissa: http://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/pnnl-21275.pdf [viitattu 9.3.2016].
- [12] Jalonen, N. Energiankulutuksen minimointi työmaaympäristössä. Pdf-dokumentti. insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma, 2014. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/71768>.
- [13] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D3. Rakennusten energiatehokkuus. Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: www.ymparisto.fi [viitattu 25.11.2016].

- [14] Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Luonnos 7.10.2016. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: [http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Lausuntopyynnot_ ja_ lausuntoyhteenvedot/2016/Lausuntopyynto_luonnoksista_ymparistomin\(40554\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Lausuntopyynnot_ ja_ lausuntoyhteenvedot/2016/Lausuntopyynto_luonnoksista_ymparistomin(40554)) [viitattu 17.2.2017].
- [15] Hänninen, P. Ekologisesti kestävä pientaloasuminen. 13 pientalon vertailu. Ympäristöministeriön raportteja. Helsinki:Ympäristöministeriö. 2014. Päivitetty 10.9.2014. Saatavissa: <http://www.ym.fi/julkaisut> [viitattu 9.3.2016].
- [16] Cronhjort, Y. Energy Efficient Solutions in Housing: CASE Luukku house. Wireless Applications for Machines, Systems. 12-13.10.2010. University of Oulu Oulu Southern Institute, CENTRIA Research ja Development. 2010. Esitelmä. Saatavissa: <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.1006.6329>. [Viitattu 9.1.2016].
- [17] Hewes, T. & Peeks, B. Northwest Energy Efficient Manufactured Housing Program: High Performance Manufactured Home Prototyping and Construction Development. United States. Department of Energy. Office of Energy Efficiency ja Renewable Energy. 2013. Saatavissa: <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60195.pdf> [viitattu 9.3.2016].
- [18] Hewes, T. & Peeks, B. Northwest Energy Efficient Manufactured Housing Program High-Performance Test Homes. United States. Department of Energy. Office of Energy Efficiency ja Renewable Energy. 2015. Saatavissa: <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63894.pdf>.
- [19] Dymond, C. S., Hewes, T., Peeks, B., Johnson, M. E. & Logsdon, M. High Performance Manufactured Homes: Field and factory results from 8 demo homes built in 6 factories. ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. Madison WI:Omnipress. 2016. Saatavissa: <http://aceee.org/files/proceedings/2016/data/index.htm> [viitattu 9.3.2016].
- [20] Suomen virallinen tilasto (SVT): Asumisen energiankulutus. Päivitetty 8.12.2016. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/asen/2015/asen_2015_2016-11-18_kuv_002_fi.html [viitattu 19.1.2017].
- [21] Kurnitski, J. Energiamääräykset 2012. Opas uudisrakennusten energiamääräysten soveltamiseen. Helsinki:Suomen rakennusmedia oy. 2012.
- [22] Saari, A., Kalamees, T., Jokisalo, J., Michelsson, R., Alanne, K. & Kurnitski, J. Financial viability of energy-efficiency measures in a new detached house design in Finland. *Applied Energy* 92, 76–83. 2012. Saatavissa: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.10.029>.
- [23] Laitinen, A. Ilma-ilmalämpöpumppujen energiankulutusvaikutukset pientaloissa. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. VTT Technology 262. Espoo:2016. Päivitetty 2/2013. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-38-8437-6> [viitattu 9.3.2016].
- [24] Tutkittua säästöä ilma-vesilämpöpumpulla. Helsinki:Motiva Oy. 2012. Päivitetty 18.12.2012. Saatavissa: http://motiva.fi/files/5919/Tutkittua_saastoa_ilma-vesilampopumpulla.Pdf [viitattu 19.11.2016].
- [25] Persson, T., Nordlander, S. & Rönnelid, M. Electrical savings by use of wood pellet stoves and solar heating systems in electrically heated single-family houses. *Energy and Buildings* 37, 920–929. 2005. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.013>.

- [26] Alakangas, E., Erkkilä, A. & Oravainen, H. Tehokas ja ympäristöä säästävä tulisijalämmitys: Polttopuun tuotanto ja käyttö. VTT-R-10553-08. Jyväskylä:Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT). 2008. Saatavissa: www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2008/VTT-R-10553-08.Pdf.
- [27] Hirvonen, J., Kayo, G., Hasan, A. & Sirén, K. Zero energy level and economic potential of small-scale building-integrated PV with different heating systems in Nordic conditions. *Applied Energy* 167, 255–269. 2016. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.037>.
- [28] Lappalainen, M. Energia ja ekologiakäsikirja. Suunnittelu ja rakentaminen. Helsinki:Rakennustieto. 2010.
- [29] Adekunle, T. O. & Nikolopoulou, M. Thermal comfort, summertime temperatures and overheating in prefabricated timber housing. *Building and Environment* 103, 21–35. 2016. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.001>.
- [30] Hyytiäinen, H. Pientalon tulisijat. Helsinki:Rakennustieto. 2000.
- [31] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Määräykset ja ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: www.ym.fi [viitattu 25.11.2016].
- [32] Sandberg, E., (toim.). Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Perustietoa ilmastointitekniikasta rakentamisen ja rakennusten käytön asiantuntijoille. Helsinki: Talotekniikka-julkaisut oy. 2014.
- [33] Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Helsinki: STM, huhtikuu 2015. Saatavissa: <http://www.julkari.fi/handle/10024/111050>.
- [34] 5/2013 Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta annetun ympäristöministeriön asetuksen muuttamisesta (27.2.2013). Ympäristöministeriö. Saatavissa: www.ym.fi [viitattu 17.9.2016].
- [35] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystarpeen laskenta. Ohjeet 2012. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Päivitetty 17.5.2013. Saatavissa: www.ym.fi [viitattu 25.11.2016].
- [36] Validation of IDA Indoor Climate and Energy 4.0 with respect to CEN Standards EN 15255-2007 and EN 15265-2007. Equa Oy. 2010. Saatavissa: <http://equa.se/en/ida-ice/validation-certifications>.
- [37] EQUA Simulation AB. IDA Indoor Climate and Energy. Www-sivusto. 2017. Saatavissa: <http://www.equa.se/en/ida-ice> [viitattu 28.1.2017].
- [38] User Manual IDA Indoor Climate and Energy. Version 4.7. Tietokoneohjelman mukana tuleva käyttöohje. Ruotsi: Tukholma: Equa Simulation AB, 2016.
- [39] Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C4. Lämmöneristys. Ohjeet 2003. Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. Saatavissa: www.ym.fi [viitattu 25.11.2016].
- [40] Tuomaala, P., Laitinen, A. & Virtanen, M. Tulisijojen lämmönluovutus ja hyötysuhteet erilaisissa käyttötapauksissa. VTT Technology 191. Espoo:VTT. 2014. Saatavissa: <http://www.vtt.fi> [viitattu 12.3.2016].

- [41] Liljeström, K. & Hurme, M. D3 laskentaopas. Kesäajan huonelämpötilan vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen RakMK D3 2012 mukaan. Pdf-dokumentti. Ympäristöministeriö. Helsinki:2012. Päivitetty 14.9.2012. Saatavissa: www.ymparisto.fi/.
- [42] Saari, M., Antson, A., Kukkonen, P. & Nyman, M. Energiatohokkaan pientalon ilmanvaihto-opas. Raportti VTT-S-04674-14. Helsinki:VTT Expert Services. 2014. Päivitetty 10.10.2014. Saatavissa: http://talotekniikka.teknologiateollisuus.fi/sites/lvi-talotekniikka/files/file_attachments/Pientalon%20ilmanvaihto-opas.Pdf [viitattu 30.1.2017].
- [43] Wit, S. de & Augenbroe, G. Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. *Energy and Buildings* 34, 951–958. 2002. A View of Energy and Building Performance Simulation at the start of the third millennium. Saatavissa: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00070-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00070-1).

Taulukoissa 15-17 esitetyt materiaalien ominaisuudet

λ lämmönjohtavuus [W/(m² K)]

ρ tiheys [kg/m³]

c_p ominaislämpökapasiteetti [J/kK]

Taulukko 15. Ulkoseinärakenne

Materiaalikerros	ARK-kuva	Vastaava Ida ICE -määrittely
seinälevy	kipsilevy 9 mm	C4 2012 kipsilevy 0,009 m $\lambda = 0,21$, $\rho = 700$, $c_p = 1000$
eriste	polyuretaani 30 mm	polyuretaanilevy 0,030 m $\lambda = 0,033$, $\rho = 35$, $c_p = 1400$
runko + eriste	runko, polyuretaanilevy 110 PIR	0,11 m $\lambda = 0,0377$, $\rho = 57$, $c_p = 1410$
tuuletusväli	25 mm	Tuuletettu ilmatila $\lambda = 2,0$, $\rho = 1,2$, $c_p = 1006$
höyrynsulku	pelti 0,5 mm	pelti 0,5 mm
tuuletusväli	25 mm	Tuuletettu ilmatila $\lambda = 2,0$, $\rho = 1,2$, $c_p = 1006$
verhous	Kuningaspaneeli 42x312	C4 2012 puu 0,042 m $\lambda = 0,13$, $\rho = 500$, $c_p = 1600$
U-arvo	0,17 W/(K m ²)	0,2253 W/(K m ²)

Taulukko 16. Alapohjarakenne

materiaalikerros	ARK-kuva	Vastaava Ida ICE -määrittely
lattiapäällyste	Mipolan Accord PVC-matto, 2 mm	$\lambda = 0,25$, $\rho = 1425$, $c_p = 1000$
lattia	21 mm	C4 2012 vaneri
eriste	polyuretaani 100 mm	C4 2012 solumuovilevy, polyuretaani, 100 mm $\lambda = 0,033$, $\rho = 35$, $c_p = 1400$
ilmarako	2 mm	C4 2012 Ilmaväli $\lambda = 0,4$, $\rho = 1,0$, $c_p = 1006$
eriste	polyuretaani 100 mm	C4 2012 solumuovilevy, polyuretaani, 100 mm
ryömintätätila	400 mm	tuuletettu ilmatila $\lambda = 2,0$, $\rho = 1,2$, $c_p = 1006$
U-arvo	0,09 W/(m ² K)	0,15 W/(m ² K)

Taulukko 17. Yläpohjarakenne

Materiaalikerros	ARK-kuva	Vastaava Ida ICE -määrittely
Vesikate	pystysaumattu peltikate Classic	Konesaumattu peltikate 0,6 mm
Rimat	22x50	puu+ilma, 22 mm $\lambda = 0,13, \rho = 500, c_p = 1600$
Ruoteet	25x100 k300	ruoteet 25 mm $\lambda = 0,13, \rho = 500, c_p = 1600$
Aluskate		C4 2012 bitumikermi 10 mm
Kattoristikot	k900	C4 2012 puu, 25 mm
Tuuletettu ilmatila		$\lambda = 2,0, \rho = 1,2, c_p = 1006$
Puhallusvilla	200 mm	C4 2012, kuitueristeet, puhallettu yläpohjaan
Höyrynsulku	pelti 0,6 mm	pelti 0,6 mm
Polyuretaani	140 mm	C4 2012 solumuovilevy, polyuretaani 200 mm
Kipsilevy	9 mm	9 mm
U-arvo	0,09 W/(m ² K)	0,109 W/(m ² K)