



Ben Huang

Energiatehokkaat pientalot

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Projektinhallinta

Insinöörityö

1.1.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Ben Huang
Otsikko: Energiatehokkaat pientalot
Sivumäärä: 32 sivua + lähteet
Aika: 9.9.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine: Projektinhallinta
Ohjaajat: Lehtori Paula Naukkarinen

Opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää toimeksiantaja yritykselle Ratio Kodit Oy:lle energialuvun muodostumisesta rakennukselle ja mitä kaikkea hiilijalanjälkilaskenta pitää sisällään. Yrityksen mielestä rakennuksen elinkaaren aikaisen hiilijalanjalanjäljen laskenta ja mahdollisimman alhainen hiilijalanjalanjäljen muodostuminen tulee tulevaisuudessa olemaan merkittävä osa rakentamisen lupaprosessia.

Toimeksiantajayritys on liikevaihdoltaan pieni (alle 30 miljoonaa) ja se rakentaa perustajaurakoitsijana pientalokohteita. Yrityksen tavoite on rakentaa mahdollisimman rationaalisia ratkaisuja. Ratio Kodit haluaa löytää käytön, tuotannon ja energiatehokkuuden kannalta kestäviä ratkaisuja.

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmäksi valittiin kvalitatiivinen menetelmä, jossa keskitytään tutkimaan laadullisesti. Opinnäytetyön tutkimusaineistona käytettiin yrityksen toteutunutta kohdetta As Oy Espoon Kivensyrjä 3, Tuomarila, johon on rakennettu kaksikerroksinen rivitalo. Opinnäytetyössä perehdytään myös kirjallisuuteen, joiden avulla esitetään uusiutuvia energialähteitä, joita voidaan käyttää rakennuksen energialuvun parantamiseen ja mahdollisesti hiilijalanjalanjäljen vähentämiseen. Kirjallisuudesta etsittiin aiheeseen liittyviä ohjeita, tutkimuksia, tulevia muutoksia ja linjauksia. Käytetyistä kirjallisuuskokoelmista aiheet tiivistettiin tutkimuksen kannalta merkittäviin osiin ja niin, että lukija pystyy ymmärtämään kappaleiden aiheet.

Tutkimuksen tuloksista nähdään, että Ratio Kodin toteuttama As Oy Espoon Kivensyrjä 3 -kohde saavuttaa energialaskelmassa A-luokan. Yllättävää tuloksissa on se, että perusratkaisulla ei vain saavutettu parasta energialuokkaa vaan saavutettiin huomattavasti parempi energialuku kuin mitä A-luokka olisi vaatinut.

Avainsanat: Aurinkovoima, Maalämpö, Energialuku, Energialuokka

Abstract

Author: Ben Huang
Title: Energy efficient houses
Number of Pages: 32 pages + sources
Date: 9 Sep 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Construction technology
Professional Major: Project management
Supervisors: Paula Naukkarinen, Lecturer

The purpose of the thesis was to find out to the client Ratio Kodit Oy about the formation of the energy figure for the building and what the carbon footprint calculation entails. In the company's opinion, calculating the carbon footprint during the life cycle of a building and creating the lowest possible carbon footprint will be a significant part of the construction permit process in the future.

The client company has a small turnover (less than 30 million) and builds single-family house projects as a founding contractor. The company's goal is to build solutions that are as rational as possible. Ratio Kodit wants to find sustainable solutions in terms of use, production and energy efficiency.

A qualitative method was chosen as the research method for the thesis, focusing on studying qualitatively. The research material used in the thesis was the company's realised site As Oy Espoon Kivensyrjä 3, Tuomarila, where a two-storey terraced house has been built. The thesis also examines literature that can be used to present renewable energy sources that can be used to improve the energy figure of a building and possibly reduce its carbon footprint. The literature was searched for guidelines, studies, future changes and policies related to the topic. Of the literature collections used, the topics were condensed into parts that are significant for the research and so that the reader can understand the topics of the chapters.

The results of the study show that As Oy Espoon Kivensyrjä 3, implemented by Ratio Kodi, achieves class A in the energy calculation. What is surprising about the results is that the basic solution not only achieved the best energy class, but also achieved a significantly better energy figure than class A would have required.

Keywords: Solar power, Geothermal energy, Energy number, Energy class

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Uusiutuvaa teknologiaa rakentamiseen	1
1.1	Aurinkoenergia	1
1.1.1	Aurinkoteknologian tyypit	2
1.1.2	Aurinkoenergian hyödyt ja haitat rakentamisessa	3
1.2	Maalämpö	5
1.2.1	Maalämpöteknologia	5
1.2.2	Maalämmön hyödyt ja haitat pientalorakentamisessa	6
1.2.3	Maalämpöpumpun haasteita pientalorakentamisessa	8
2	Hiilijalanjälki rakentamisessa	9
2.1	Määrittely	9
2.2	Hiilijalanjäljen laskenta Suomessa	11
2.2.1	Suomen tavoitteet hiilijalanjäljelle	12
2.2.2	Suomen vähähiilinen strategia	12
2.3	Hiilen lähteet rakentamisessa	14
2.4	Jätteidenkäsittely ja sen vaikutus hiilijalanjälkeen	17
3	Tutkimus	18
3.1	Kohteen esittely	18
3.2	Aurinkoenergian hyödyntäminen kohteessa	20
3.3	Maalämmön hyödyntäminen kohteessa	23
3.4	Muut vaikuttavat tekijät kohteen energialuvun muodostumiseen	24
3.5	Ilmanvuotoluku	24
3.6	Ilmavaihtojärjestelmä	26
4	Yhteenveto ja tulokset	27
5	Jatkotutkimuspohdintaa	30
5.1	Kattoon asennettava tuulivoimala	30
6	Lähteet	33

Lyhenteet ja käsitteet

AC: Alternating current eli vaihtovirta, joka on sähkövirtaa ajanfunktiona. Suomessa vaihtovirta kotitalouksissa on sinimuotoista, jonka tehollisarvo on nimellisesti 230 V ja taajuus 50 Hz.

CO₂-ekvivalentti:

Hiilidioksidiekvivalentti on kasvihuonepäästöjen lämmittävä vaikutus maapallon ilmakehään yhteenlaskettuna ja muutettuna hiilidioksidiksi.

DC: Direct current eli tasavirta. Tasavirran sähkövirta ei muutu. Tasavirtaa käyttävät laitteet ovat esimerkiksi akut, hehkulamput ja autojen sähköjärjestelmä kuten energian siirto.

Elinkaari: Elämän tai jonkin olemassaolo alusta loppuun. Esimerkiksi tuotteen elinkaari alkaa sen valmistuksesta ja päättyy joko kierrätykseen tai kaatopaikkaan.

E-luku: E-luvulla tarkoitetaan laskennallista energiatehokkuutta, joka ilmaistaan yksikössä kWhE/(m²a).

Ilmanvuotoluku:

E-luvun laskennassa ilmanvuotoluku ilmaisee kuinka paljon ilmaa kuutiona vuotaa neliön läpi tunnissa eli m³/ (h m²). Luku vaihtelee nollan ja neljän välillä, jossa ilmanvuotoluku nolla tarkoittaa rakennuksen olevan täysin tiivis, jossa ei ole ollenkaan ilmanvuotoa.

Kalsinointi: Kalkin kalsinoinnilla tarkoitetaan lämpökäsittelyä, jossa murskattua kalkkia poltetaan, jolloin kalkista poistuu kosteutta (H₂O), epäpuhtaudet sekä hiilidioksidia.

LCA: Life Cycle Assessment eli elinkaariarviointi suomeksi. LCA-menetelmää käytetään hiilijalanjäljen määrittämisessä. Menetelmässä arvioidaan ja analysoidaan tuotteen tai palvelun ympäristövaikutuksia.

NPV Net Present Value eli nettonykyarvo. Tarkoittaa alkuinvestoinnin vertaamista sen tuottamaan arvoon.

PV: Photovoltaic eli valosähköinen ilmiö. Auringonsäteilystä fotonit absorboituu atomiin ja samalla irrottaen tästä elektronin. Ilmiössä fotonin energia siirtyy irronneelle elektronille.

PV system: Tarkoitetaan aurinkokeräintä, jonka toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön.

Prosessilämpö:

Tarkoitetaan lämpöä, joka vapautuu tai imeytyy fysikaalisen tai kemiallisen reaktion seurauksena.

SFS-EN 15978:

Euroopan standardi hiilijalanjäljen laskemiseen rakennuksille.

SFP-luku: Kertoo, kuinka paljon tehoa tarvitaan ilman kuljettamiseen rakennuksessa. Luku muodostuu järjestelmän painehäviö jaettuna hyötysuhteella.

Johdanto

Energiatehokkaat kodit rakennetaan tavoitteena vähentää energiankulutusta ja asunnonomistajan kustannuksia. Tämä voidaan saavuttaa yhdistämällä erilaisia rakennusteknisiä tekniikoita vähentäen rakennuksen energiakulutusta, parantamalla ikkunoiden eristystä, laitteiden tehokkuutta, sekä käyttämällä uusiutuvia energialähteitä, kuten aurinko- tai geotermistä energiaa.

Energiatehokkaat kodit säästävät asumisen kustannuksia erityisesti sähkön ja lämmityksen kuluissa. Niillä on myös positiivinen vaikutus ympäristöön vähentämällä hiilidioksidipäästöjä.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan aurinko- ja geotermisen energian vaikutusta pientalojen energiakulutukseen sekä mahdollista hiilijalanjäljen vähennystä. Hiilijalanjälkeen huomioidaan energijärjestelmien valmistus, suunniteltu käyttöaika sekä niiden poisto. Tämän työn tarkoitus on kartoittaa ja tunnistaa keinoja, joilla voidaan saavuttaa mahdollisimman alhaiset energialuvut rakennuksen käytön aikana. Opinnäytetyössä tarkastellaan Ratio Kodit Oy:n toteuttamaa uudiskohdetta. [1.]

1 Uusiutuvaa teknologiaa rakentamiseen

1.1 Aurinkoenergia

Aurinkoenergia on auringon säteilyenergiaa, joka muunnetaan sähköksi tai lämmöksi. Auringon säteilyenergia luetaan uusiutuviin energialähteisiin, joka ei aiheuta päästöjä tai saasteita. [2;3;4.]

Aurinkoenergia toimii käyttämällä aurinkopaneeleita, jotka tunnetaan myös nimellä aurinkokeräin. Aurinkopaneelit käyttävät valosähköilmiötä (PV) auringon energian muuntamiseksi sähköksi. Prosessi alkaa, kun auringonvalo iskee aurinkopaneeliin, jotka koostuvat aurinkokennoista ja sisältävät puolijohdemateriaaleja, kuten piitä. Auringonsäteilyn osuessa solukennoihin, se aiheuttaa elekt-

ronien virtauksen puolijohdemateriaalin sisällä, mikä luo tasavirran. Tämä tasavirta (DC) lähetetään sitten taajuusmuuttajaan, joka muuntaa tasavirran vaihtovirraksi eli (AC) sähköksi, joka on kodeissa ja rakennuksissa käytettävä sähkötyyppi. [4;5;6.]

Vaihtovirtasähkö lähetetään sitten huoltopaneeliin, joka tunnetaan myös nimellä katkaisijalaatikko, jossa se jaetaan koko rakennukseen valojen, laitteiden ja muiden sähkölaitteiden virran saamiseksi. Jos aurinkopaneelit tuottavat enemmän sähköä kuin rakennus käyttää, ylimääräinen sähkö voidaan lähettää takaisin sähköverkkoon nettomittaukseksi kutsutun prosessin kautta. Kun rakennus tarvitsee enemmän sähköä kuin aurinkopaneelit tuottavat, se voi ottaa sähköä sähköverkosta. [4;5;6.]

Aurinkolämpöjärjestelmiä voidaan käyttää myös auringon energian muuntamiseen lämmöksi, jota voidaan käyttää veden tai tilan lämmitykseen, tai sähkön tuottamiseen prosessin kautta, jota kutsutaan keskitetyksi aurinkovoimaksi. [7;8;9.]

1.1.1 Aurinkoteknologian tyypit

Aurinkoteknologia jaetaan kahteen päätyyppiin. On olemassa muita aurinkoenergian alatyyppejä, mutta kaikki voidaan jakaa teknologian näkökulmasta joko aurinkolämpö- tai aurinkosähköjärjestelmiin. [10, s.13–15;11.]

Aurinkolämpöjärjestelmä hyödyntää auringon säteilyä lämmön ja sähkön tuottamiseen. Tyypillinen esimerkki lämpöjärjestelmää hyödyntävästä aurinkovoiman teknologista on aurinkokeräin, joka muuntaa auringon säteilyn lämmöksi keräämällä sitä. Aurinkolämpöjärjestelmät voivat olla joko passiivisia tai aktiivisia järjestelmiä. Molemmat järjestelmät voivat tuottaa auringonsäteilyn lämmön avulla lämmintä käyttövettä, lämmittää rakennusta tai tuottaa prosessilämpöä. [10, s.13–15;11.]

Aurinkosähköjärjestelmässä on useita sarjaksi kytkettyjä aurinkokennoa, jotka tuottavat jännitteen, invertteri ja vaihtomuuntaja. Aurinkosähköjärjestelmät eli aurinkopaneelit ovat myös toisiinsa kytkettyjä eli kytketty sarjaan, jolloin niiden välillä kulkee sama virta. Aurinkosähköjärjestelmän sijoittamisessa tulee olla tarkempi, jotta sillä voidaan saavuttaa samanlaisia tai parempia hyötyjä kuin aurinkolämpöjärjestelmällä. [10;11.]

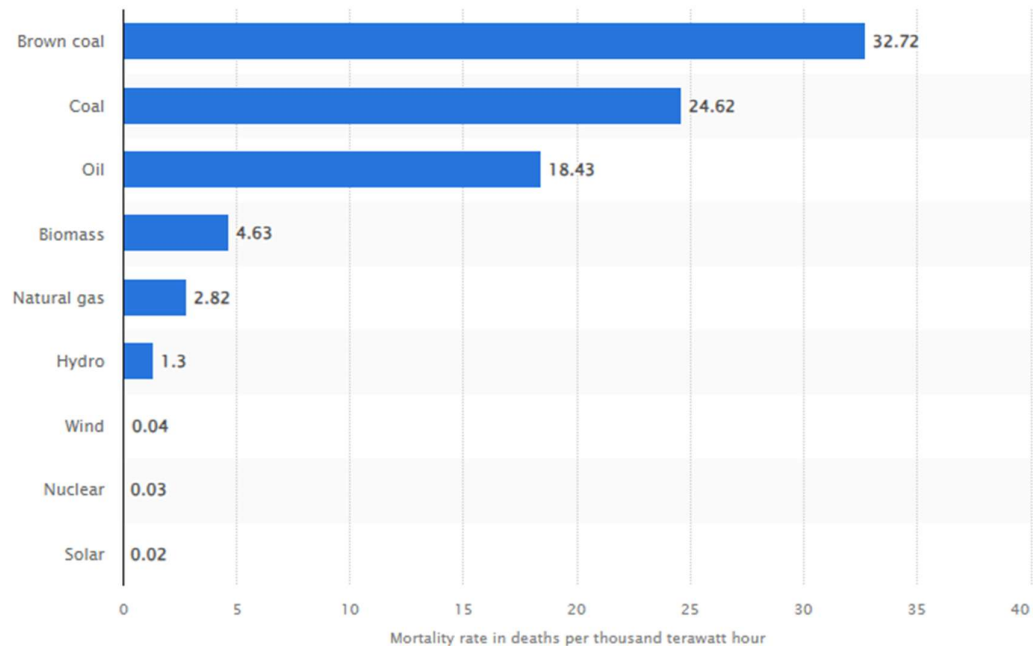
1.1.2 Aurinkoenergian hyödyt ja haitat rakentamisessa

Aurinkovoiman teknologia on kehittynyt ja yleistynyt viime vuosikymmeninä. Tämä tarjoaa vaihtoehdon fossiilisille energialähteille, joiden saatavuus on ollut viime vuosikymmeninä hankalampaa. Tämä on johtanut vähentyneeseen saatavuuteen, joka on nostanut fossiilisten energialähteiden hintoja ympäri maailmaa. Seuraavaksi esitetään lyhyesti aurinkovoiman etuja ja haittoja pien-
talorakentamisessa. [2;13;14.]

Etuja:

1. Aurinkovoima kuuluu uusiutuviin energialähteisiin. Rakennuksen energian saanti ei ole riippuvainen raaka-aineen saatavuudesta. [2.]
2. Aurinkovoiman tuottaminen ei tuota itsessään kasvihuonepäästöjä, joka tekee siitä hyvin ympäristöystävällisen. [2;13;14.]
3. Sähkön tuottaminen aurinkovoiman avulla ja sen käytön kustannukset ovat alhaiset verrattuna fossiilisilla polttoaineilla tuotettuun sähkөөn. [2;13;14.]
4. Aurinkovoimaa tuottavien laitteiden ylläpito on yksikertaista ja helppoa ylläpitää verrattuna voimalaitoksiin, jotka hyödyntävät uusiutumattomia energialähteitä. [2;13;14.]

5. Aurinkoenergian tuottaminen on turvallista. Aurinkoenergiaan liittyvät työtapaturmat, jotka johtavat kuolemaan suhteessa tuotettuun sähköön on energialähteistä pienin. Kuvan 5 diagrammissa on esitetty vuoden 2022 kuolemat per tuotettua kWh:ta energialähteisiin. Pystyakselissa energialähde ja vaaka-akselissa kuolemaa/KWh. [2;13;14;15.]



Kuva 1. Tilasto kuolemia per tuotettu kWh. [15.]

Haittoja:

1. Aurinkovoimajärjestelmän osa koko pientalorakentamisen kustannuksesta on suuri verrattuna kaukolämpöverkostoon liittämiseen. Aurinkovoiman järjestelmä vaatii suurempaa investointia. Tämä on yleensä este pientalorakentamisessa, mikäli se halutaan sisällyttää rakennuskustannuksiin. Aurinkojärjestelmään kuuluu aurinkokeräin sekä mahdollisesti invertteri ja akkujärjestelmät. [2;13;14.]

2. Aurinkovoiman tuotanto on riippuvainen säästä. Tämä tekee aurinkovoiman tuotannosta epävakaan. Tuotannon ollessa epävakaa aurinkovoiman tuotantoa ylimitoitetaan sen tarpeeseen nähden, kompensoidakseen tuotannon epävarmuutta, joka lisää aurinkovoimajärjestelmän alku-sijoituksen kustannuksia. [2;13;14.]
3. Aurinkojärjestelmän esteettisyys voi aiheuttaa pientalorakentamisessa esteitä. Tämä riippuu rakennetun alueen kaavoituksesta ja sen määräämistä ohjeista rakennuksen ulkonäkö- ja julkisivuvaatimuksista. Naapureilla on oikeus valittaa rakennettavaan rakennukseen vaikuttavista ulkonäköasioista. [2;13;14.]

1.2 Maalämpö

Maalämpö kuuluu uusiutuviin energiamuotoihin, joka hyödyntää maaperään varastoitunutta auringon energiaa. Maalämmön energiantuotanto on hyvin tasaista, sillä maaperän lämpö pysyy hyvin tasaisena auringon säteilyn ja maan sisäisen lämmön ansiosta. Maalämpöjärjestelmä ottaa maaperän lämmön talteen ja voi siirtää sen rakennuksen käyttöön. Maalämpöjärjestelmä voi myös toimia toisin päin, jolloin järjestelmä luovuttaa maahan rakennuksen lämpöä ja näin jäähdyttää rakennusta. [16.]

1.2.1 Maalämpötekniologia

Maalämpöjärjestelmä koostuu pääasiassa maalämpöpumpusta, maapiiristä, ja lämmitysjärjestelmästä, joka sijoitetaan rakennuksen sisään ja joka jakaa maaperän lämpöä. Maalämpöjärjestelmät jaetaan joko pinta- tai porakaivojärjestelmiin. [16;17.]

Pintajärjestelmä tai pintamaajärjestelmä asennetaan muutaman metrin syvyyteen maanpinnasta rakennuksen ympärille, josta järjestelmä kerää lähiympäristöstä lämpöä. Maahan asennetaan putkistoja, joissa kulkee jäähdytysnestettä. Putkistojen metrimäärä riippuu rakennuksen koosta, käytettävästä tilasta (tontin koko), sekä energiatarpeesta. Putkisto kerää lämmön talteenottojärjestelmään eli erilaisiin astioihin ja paisunta-astioihin, josta jaetaan lämpö kiinteistöön. [17;18, s. 4–8.]

Porakaivojärjestelmäputkisto porataan syvälle kallioperään. Pientalokohteissa noin 100–300 metrin syvyyteen kallioon. Porattuun kaivoon asennetaan maalämpöputki, jonka sisällä on lämmöntalteenottojärjestelmä. Putkistossa oleva lämmönkeruuneste lämpenee muutamilla asteilla maaperässä. Tämä lämpö siirretään lämpöjärjestelmään, jossa se varastoidaan ja jaetaan kiinteistön käyttöön. Maalämpöjärjestelmän toiminta noudattaa samoja periaatteita kuin ilmavesilämpöpumppu. [18.]

1.2.2 Maalämmön hyödyt ja haitat pientalorakentamisessa

Maalämpöpumpun hyötyjä pientalorakentamisessa:

1. Maalämpöjärjestelmä on hyvin turvallinen ja ympäristöystävällinen. Maalämpöteknologia on myrkytön ja päästötön energiamuoto käytön sekä asennuksen aikana. Tämä voi vähentää merkittävästi rakennuksen käytön aikaista hiilijanjälkeä sen koko käyttöelinkaaren ajan. [16;17;18.]
2. Energiatehokas vaihtoehto lämmöntuotannolle verrattuna suoraan sähkölämmitykseen, tai muuhun lämmöntuotannon lähteeseen, joka tuotetaan fossiililla polttoaineilla. [17;18.]
3. Säästöt energiankulutuksessa. Maalämpöjärjestelmä vähentää asumisen aikaista energiankulutusta. [17;18.]

4. Maalämpöjärjestelmällä on pitkä käyttöikä, kun se on oikein asennettu ja huollettu. Se vaatii vähän huoltoa ja sen energiantuotanto on tasaista koko sen käyttöiän ajan. [17:18.]
5. Seuraavassa taulukossa esitetään tutkimuksen tulos, jossa vertaillaan kolmen eri lämmöntuotannon järjestelmän hintaa €/KWh:lle. Ensimmäisessä skenaariossa sähkölämmitys, toisessa kaukolämpö ja kolmannessa maalämpö. Tuloksessa mitä pienempi negatiivinen NPV luku (Net Present Value) sitä parempi nettonykyarvo eli paras tuotto investointiin nähden. Seuraavassa taulukossa kuvassa 9 on tutkimustulokset, joista nähdään, että maalämpöratkaisulla on pienin NPV. [19.]

PROFITABILITY COMPARISON									
Figures	X	EUR	V	X	EUR	V	X	EUR	V
	Option A: Direct Electric Heating			Option B: District Heating			Option C: Geothermal Heating		
Nominal value of all investments		0			3,500			23,000	
Required rate of return		3.00%			3.00%			3.00%	
Calculation term (years)		25.0			25.0			25.0	
Calculation term		1/2019 - 12/2043			1/2019 - 12/2043			1/2019 - 12/2043	
Calculation point		1/2019			1/2019			1/2019	
Interval length (months)		12			12			12	
PV of operative cash flow		-41,792			-37,915			-13,931	
PV of residual value		0			0			0	
Present value of business cash flows		-41,792			-37,915			-13,931	
Present value of reinvestments		0			0			-4,429	
Total Present Value (PV)		-41,792			-37,915			-18,360	
Proposed investments in assets		0			-3,500			-15,000	
Investment subventions		0			0			0	
Investment proposal		0			-3,500			-15,000	
Net Present Value (NPV)		-41,792			-41,415			-33,360	
NPV as a monthly annuity		-197			-196			-157	
Internal Rate of Return (IRR)		-			-			-	
Profitability index (PI)		-			-10.83			-1.22	
Payback time, years		-			-			-	

Kuva 2. Tutkimuksen tulos, jossa tarkastellaan laskennallisesti energiatehokkainta ja edullisinta ratkaisua rakennukselle, jonka energiantarve vuodessa on 20 000 KWh 25 vuodelle. [19.]

1.2.3 Maalämpöpumpun haasteita pientalorakentamisessa:

1. Suunnittelu on vaativampaa. Järjestelmän ja kaivojen sijainti voi vaatia naapureiden suostumusta ja vaatii yleensä selvityksen niiden loppusijoituksen sopivuudesta. [18;20.]
2. Vaatii tutkimusta maaperästä. Kaivo on porattava mahdollisesti useita satoja metrejä kallioperään. Mikäli maaperä on hyvin rikkinäinen tai epävakaa, kasvaa kaivon sortumisriski, jolloin kaivot joudutaan uudelleen poramaan, mikä kasvattaa kustannuksia ja materiaalihukkaa. Kallio voi olla hyvin syvällä pehmeän maan alle kuten saven. Tämä lisää maahan menevää materiaalia. Suomessa on hyvin vakaa kallio, mikä vähentää kaivojen sortumisriskiä. Suomen eteläalueella taas on paksu savikerros. Tämä johtuu siitä, että se on ollut vanhaa merenpohjaa. [18;21;22.]
3. Maalämpöpumpujärjestelmä vaatii paljon tilaa. Tämä lisää sommittelun tarvetta, jotta järjestelmä saadaan mahtumaan sille tarkoitettuun tilaan ja niin, että se on huolettavissa. Suurempi tilantarve voi vähentää asuinlii-
toita, josta osa joudutaan sijoittamaan esimerkiksi tekniseen tilaan.
[18;20.]
4. Vaikka maalämpöpumpun energiantuotanto on hyvin tasaista, sen toiminta on riippuvainen sähköstä. Esimerkiksi pitkät sähkökatkot voivat aiheuttaa maalämpöjärjestelmän toimintaan katkoja. Maalämpöjärjestelmän tarvitsema sähkö voidaan saada kaukosähköllä tai aurinkosähköjärjestelmällä, joka korvaa osittain tai kokonaan kaukosähkön tarpeen.
[18;20.]

2 Hiilijalanjälki rakentamisessa

2.1 Määrittely

Hiilijalanjälki on mittari, jolla kuvataan ihmisten lämmittävää vaikutusta ympäristölle kasvihuonekaasupäästöillä. Tämä tarkoittaa ihmisen hiilidioksidipäästöjen määrää, jotka syntyvät erilaisten tuotteiden, palvelun tai jonkin muun toiminnan kautta. Hiilijalanjälki mitataan esimerkiksi tuotteen valmistuksesta, joka alkaa jo raaka-aineiden keruusta sen hävittämiseen, sekä tuotteeseen liittyvistä kuljetuksista, päästöistä ja jätteistä. [25.]

Hiilijalanjäljen määrittelyssä käytetään usein elinkaariarviointia (LCA). LCA ottaa huomioon tuotteen tai palvelun kaikki vaiheet. Vaiheina on valmistus, kuljetukset, käyttö, päästöt, jätteet, energiankulutus ja kierrätys tai hävitys. [26.]

Hiilijalanjäljen määrittely on työkalu, jolla voidaan arvioida ihmisten toiminnan vaikutusta ympäristöön. Hiilijalanjäljen määrittelyssä voidaan tunnistaa päästölähteitä ja löytää vähähiiliratkaisuja, jotka edistävät kestävä kehityksen edistymistä. Hyvä LCA on yleensä lähtökohtana ympäristöystävällisempien ratkaisujen löytämisessä. [26.]

Hiilijalanjäljen mittaamisessa on monivaiheinen prosessi, jossa on datan keräämistä ja sen arviointia, laskentaa ja sen arviointia. Hiilijalanjäljen mittaamisessa voidaan noudattaa seuraavaa menetelmää:

1. Mittauksen rajaus. Rajataan mitä halutaan mitata esimerkiksi tietyn tuotteen tai palvelun hiilijalanjälkeä. Mittauksen kohteena voi olla myös organisaatio kuten opetusministeriö. [26.]
2. Tiedon hankinta. Tiedon kerääminen esimerkiksi erilaisista lähteistä, kirjanpitojärjestelmistä, toimittajilta, laskelmista ja muista tutkimuksista. Tiedonkeruu on yleensä mittauksen työläin vaihe, sillä datan keruu ja sen luotettavuuden arviointi luo mittauksen pohjat. [26.]

3. Päästöjen laskenta. Laskenta toteutetaan noudattamalla standardoituja menetelmiä kuten päästökerrointa ja elinkaarianalyysitietoja. Esimerkiksi standardi SFS-EN 15978. Laskennassa huomioidaan mittauksen kohteen eri vaiheet esimerkiksi raaka-aineen keruu ja tuotanto, kuljetukset, käsittelyt sekä muut toiminnan osa-alueet, joiden katsotaan vaikuttavan lopulliseen kasvihuonepäästömittaustulokseen. [26;27.]
4. Lopullinen tuloksen muodostaminen. Kasvihuonepäästön mittauksen perusteella muodostetaan hiilijalanjälki, joka ilmaistaan yleensä CO₂-ekvivaalentteina. CO₂-ekvivalentti muodostetaan muuttamalla mittauksessa saadut kasvihuonepäästöt hiilidioksidipäästöiksi. Tämä muutos tehdään, sillä eri kasvihuonekaasuilla on erilaiset vaikutukset maapallon ilmastoon. Esimerkiksi yhden gramman metaanin lämmittävä vaikutus ilmakehään vastaa ekvivalenttilaskennassa 25-kertaista hiilidioksidin vaikutusta. [28;29.]

Seuraavassa kuvassa 13 on esimerkkejä eri kasvihuonekaasujen kertoimista, jossa hiilidioksidi toimii perusyksikkönä.

Greenhouse Gas	Formula	100-year GWP
Carbon dioxide	CO ₂	1
Methane	CH ₄	25
Nitrous oxide	N ₂ O	298
Sulphur hexafluoride	SF ₆	22,800
Hydrofluorocarbon-23	CHF ₃	14,800
Hydrofluorocarbon-32	CH ₂ F ₂	675
Perfluoromethane	CF ₄	7,390
Perfluoroethane	C ₂ F ₆	12,200
Perfluoropropane	C ₃ F ₈	8,830
Perfluorobutane	C ₄ F ₁₀	8,860
Perfluorocyclobutane	c-C ₄ F ₈	10,300
Perfluoropentane	C ₅ F ₁₂	13,300
Perfluorohexane	C ₆ F ₁₄	9,300

Kuva 3. Esimerkki kasvihuonekaasujen CO₂-ekvivalentti kertoimista. [29.]

5. Tuloksen arviointi ja raportointi. Lopullinen tulos analysoidaan. Näin selvitetään mahdolliset laskennan virheet, jotka voivat vaikuttaa tuloksen luotettavuuteen. Tässä vaiheessa esitetään johtopäätös tuloksista ja ehdotuksia tutkimuksen parantamiseksi sekä vaihtoehtoja tuleville mittauksille. [26.]

Hiilijalanjäljen mittauksessa haastavuutta lisää standardien vaihtelu tai puute datan keräämisessä, tulkinnassa ja laskentamenetelmissä. Euroopassa hiilijalanjäljen laskenta ja elinkaariarvioinnin muodostaminen pohjautuvat SFS-EN 15978 -standardiin ja ohjeisiin esimerkiksi ympäristöministeriön vähähiilisuuden arviointimenetelmä. [30;31.]

2.2 Hiilijalanjäljen laskenta Suomessa

Hiilijalanjäljen laskenta ja elinkaarenarviointimenetelmät Suomessa perustuvat Euroopan komission tuottamaan standardiin SFS-EN 15978, jonka pohjalta on luotu useita laskentamenetelmiä. Laskentojen yhtenäisyyden ja uskottavuuden vahvistamiseksi on tärkeää, että noudatetaan SFS-EN 15978 standardiin pohjautuvia rakennustuotteiden CO₂-päästökertoimia. [30.]

Voimassa oleva ilmastolaki velvoittaa Suomea vähentämään kasvihuonekaasuja. Kolmasosa Suomen kasvihuonepäästöistä arvioidaan aiheutuvan rakentamisesta ja sen ylläpidosta [31]. Ilmastolaki velvoittaa Suomea olemaan hiilineutraali, eli päästöjen olevan yhtä suuret kuin poistuma vuoteen 2035. Suomessa ei ole vielä lainsäädäntöä, joka velvoittaa rakennusten koko elinkaaren aikaista hiilijalanjäljen laskemista, mutta on tulossa voimaan mahdollisesti jo 2025. Toteutuneet laskennat on toteutettu vapaaehtoisesti. [31;33.]

2.2.1 Suomen tavoitteet hiilijalanjäljelle

Suomi pyrkii olemaan vuoteen 2035 mennessä hiilineutraali ja tämän jälkeen siirtyä mahdollisimman pian hiilinegatiiviseksi, eli Suomi sitoisi enemmän hiiltä ilmakehästä kuin se tuottaisi. Suomen strategia saavuttaa tämä on sitoutua uudistamaan Euroopan muiden jäsenvaltioiden kanssa ilmastopolitiikkaa, pyrkimällä rajoittamaan maapallon keskilämpötilaa nousemasta liian suuriksi määriä. Tavoitteen onnistumiseksi on rakennusalaalla tapahduttava hyvin suuria muutoksia ja merkittävää panostusta rakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi. [31.]

Elinkaarilaskennalla ja elinkaariarvioinnilla on lähtökohta rakennusalan pyrkimykseen vähentää hiilijalanjälkeään. Laskenta kattaisi rakennusten koko rakentamisen, rakennuksen elinkaaren ja purun tai uudelleenkäytön aiheuttamat hiilidioksidipäästöt. Laskenta voidaan toteuttaa myös osissa tai kohdennetusti, kun halutaan perehtyä tarkastelemaan tiettyä vaihetta. Elinkaarilaskentaa rakentamiselle pidetään keskeisenä osana, jolla voitaisiin edistää Suomen kunniahimoisia tavoitteita kasvihuonepäästöjen vähentämiseen. [30.]

2.2.2 Suomen vähähiilinen strategia

Suomen strategian päätavoitteena on luoda ohjeita ja suuntaviivoja rakennuksen elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen määrittämiseen ja sen sääntelylle. Tämä pohjautuu pääosin SFS-EN 15978-standardiin, jossa määritellään muun muassa rakennuksen hiilijalanjäljen laskentamenetelmiä. Ympäristöministeriö on kehittänyt vähähiilisen tiekartan, jonka perusteella voidaan arvioida rakentamisen vähähiilisyttä. Ympäristöministeriön tiekartan käyttö ei ole säädettyä. [30.]

Tiekartan mukaisesti hiilijalanjäljen arviointi, laskenta ja tyyppikohtaiset päätösrajat rakennustyypeille sekä rakennuksille on suunniteltu osaksi Suomen lainsäädäntöä. Tiekartta tai sen osia on tarkoitus liittää Suomen lainsäädäntöön vaiheittain 2020-luvulla. [30.]

Tällä hetkellä rakennusten hiilijalanjäljen arviointi on vapaaehtoisessa pilottivaiheessa, jonka jälkeen siirrytään velvoittavaan vaiheeseen. Lopullisen siirtymisen on tarkoitus tapahtua, kun julkisista ja mahdollisesti vapaaehtoisten kaupallisten asuin-, liike- ja työpaikkarakennuksista on kerätty tarpeeksi tietoa, jotta voidaan muodostaa luotettavat raja-arvot hiilijalanjäljen muodostamiseen. [30.]

Tiekartan mukaan suurin osa rakennuksen hiilijalanjäljestä syntyy energiakulutuksesta käytön aikana. Merkittävän osan energiakulutuksesta muodostuu fossiilisen polttoaineen käytöstä rakennuksen energiatarpeisiin ja rakennuksen valmistuksessa, joka kasvattaa rakennuksen elinkaaren aikana syntyvää hiilijalanjälkeä. Rakennuksista pyritään ja tullaan vaatimaan parempaa energiatehokkuutta tiekartan vähähiilisyyden tavoitteen saavuttamiseksi. Saavuttaakseen parempia energiatehokkuuslukuja tulee talotekniikan lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä ja vähähiilistä rakentamista tukevia toimenpiteitä. Seuraavassa kuvassa 14 on ympäristöministeriön elinkaariarvioinnin kulku pääpiirteittäin.

[31.]



Kuva 4. Ympäristöministeriön tiekartan elinkaariarvioinnin kulku. [30.]

2.3 Hiilen lähteet rakentamisessa

Rakentamisessa hiilijalanjälki tarkoittaa kasvihuonepäästöjen kokonaismäärää, joka syntyy käytetyistä materiaaleista, käytöstä, purkamisesta, sekä käytetyistä rakentamis- ja energiaratkaisuista. Rakentamisen arvioidaan tuottavan Euroopassa merkittävän osan kasvihuonepäästöistä. Seuraavassa kuvassa havainnollistettuna mistä rakennuksen hiilijalanjälki muodostuu elinkaarensa aikana. [30;35.]



Kuva 5. Rakennuslehden havainnollistus rakennuksen elinkaaren aikana hiilijalanjäljen muodostumisesta. [34.]

Rakentamisessa käytetyt rakennusmateriaalit vaikuttavat merkittävästi hiilijalanjälkeen. Esimerkiksi puulla ja betonilla on SFS-EN 15978 standardin mukaan huomattava ero. Betonin käyttö rakentamisessa lisää huomattavasti hiilijalanjäljen kokoa, sillä betonin tuotannossa huomattavia hiilidioksidipäästöjä. Hiilidioksidipäästöt betonin tuotannossa syntyvät pääasiassa sementin valmistuksessa kalkin kalsinoinnissa. Puumateriaali sitoo hiilidioksidia itseensä ja vähentää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta ja on siksi vähähiilisempi ratkaisu kuin betoni. [30;36.]

Rakentaminen synnyttää merkittävän määrän maailman (noin kolmannes) päästöistä. Suomessa rakentaminen synnyttää päästöjä enimmäkseen rakennuksen materiaalien valmistuksessa, rakentamisessa, käytössä ja rakennuksen purussa. [36.]

Rakennuksen lämmitys- ja sähköjärjestelmä vaikuttaa merkittävästi rakennuksen käytön aikana syntyvien päästöjen määrään. Energiatuotannon valinta vähähiilisiin ratkaisuihin ja niiden kehittäminen tukee Suomessa ympäristöministeriön päästövähennystavoitetta vuodelle 2035. [36.]

Rakennusmateriaalin valinnassa voidaan huomioida valmistuksen hiilikustannuksia rakentamisen suunnittelussa. Näin voidaan ennakoida rakennuksen lopullista hiilijalanjälkeä, esimerkiksi suosimalla puutaloja, jolloin puumateriaaliin on sitoutunut suurin osa hiilestä. Uusiutuvan ja helposti kierrätettävän rakennusmateriaalin valinta vähentää rakentamisesta aiheutuvia hiilipäästöjä ja mahdollisesti rakennuksen elinkaaren lopussa syntyvää päästöä. Rakennuksen purussa voidaan hyödyntää, kierrättää ja uudelleen käyttää käytetty rakennusmateriaali. [36.]

Rakentamisessa voidaan huomioida myös rakennuksessa käytettyjen materiaalien kuljetus työmaalle. Mitä pienemmät ovat työmaankuljetuksen aiheuttamat päästöt, sitä pienempi on lopullinen rakennuksen hiilijalanjälki. [35:36.]

Seuraavissa kuvissa esitetään Senaatin toteuttamaa laskentaa hiilijalanjäljelle kolmelle eri uudiskohteelle ja laskennan tuloksia. Arvioinnit keskittyivät pääasiassa löytämään tietoa siitä, miten uudisrakennusten hiilijalanjälki vaihtelee ja mitkä tekijät vaikuttavat sen muodostumiseen. [35.]

Seuraavassa kuvassa 6 on Senaatin kolmen kohteen perustiedot, joihin suoritettiin hiilijalanjälkilaskennat ja kuvassa 7 on hiilijalanjälkilaskennan tulokset, jotka on esitetty ympyrädiagrammina. [35.]

	Koulu	Oikeustalo	Esikuntarakennus
bruttopinta-ala, m ²	6399	2448	2620
lämmitetty nettoala, m ²	6025	2278	2433
kerrosluku	1-2	3	2 + kellari
pääasiallinen runkomateriaali	puu (CLT)	betoni	betoni
lämmitys	kaukolämpö	kaukolämpö	kaukolämpö
energialuokka	A	B	A

Kuva 6. Senaatin kolme esimerkkikohtetta, joihin suoritettiin hiilijalanjäljen laskenta. [35.]



Kuva 7. Esimerkkikohteiden hiilijalanjäljen laskentojen tulokset [35.]

Valitut kohteet antavat hyvän mahdollisuuden tarkastella eri rakennustyyppien ja ominaisuuksien vaikutusta hiilijalanjälkeen. Tiedon keräämisen tarkoitus on tunnistaa merkittävimmät tekijät hiilijalanjälkeen. Senaatin laskennan tuloksista huomataan, että suurimmat päästöt tulevat rakentamisesta ja käytöstä. Merkittävin päästöjä aiheuttava tekijä oli tässä laskennassa rakennuksien lämmitysenergia. Tehokkain toimenpide laskea rakennusten hiilijalanjälkeä käytön aikana on laskea rakennuksen lämmitystarvetta eli parantaa energialukua. [35.]

2.4 Jätteidenkäsittely ja sen vaikutus hiilijalanjälkeen

Rakennusjätteen käsittely synnyttää merkittävästi päästöjä, joilla on suuri merkitys rakennuksen purun hiilijalanjälkeen. Rakennusjätteen päästöihin ja energiakulutukseen vaikuttaa merkittävästi jätteen tyyppi ja käsittelyn prosessit. Seuraavassa esitetään esimerkkejä jätteenkäsittelyn vaiheista ja niiden synnyttämistä päästöistä. [37.]

1. Jätteen lopullinen sijoituspaikka. Jätteen sijoittaminen kaatopaikalle voi synnyttää kasvihuonekaasuja kuten metaania, jolla on moninkertainen maapalloa lämmittävä vaikutus verrattuna hiilidioksidiin. [37.]
2. Kierrätys. Jätteen kierrättäminen voi merkittävästi vähentää jätteen tai palvelun elinkaaren lopussa syntyvää hiilijalanjälkeä. Kierrättäminen vaatii logistiikkaa, energiaa ja muita toimintoja, joissa syntyy päästöjä. Kierrätyksessä tulee ottaa huomioon sen kokonaisuus, jotta kierrätyksessä syntyisi vähemmän päästöjä kuin tuotteen sijoittamisessa kaatopaikalle. [37.]
3. Jätevoimaloiden energiatuotanto. Tietyt jätteet soveltuvat ja voidaan käyttää energian tuottamiseen. Yleinen tapa on polttoprosessin kautta tuottaa lämpöenergiaa ja sähköenergiaa jätteistä. Osa jätteen energiasta saadaan otettua talteen, mutta osa palautuu päästönä ilmakehään. Tätä voidaan minimoida ilmanpudistusjärjestelmillä. [37.]
4. Kompostointi. Kompostoinnissa syntyvä päästö on yleensä huomattavasti pienempi kuin katopaikalla tapahtuva hajoaminen. Kompostointi on tapa käsitellä biologisesti orgaanista jätettä, jossa se hajoaa luonnollisesti mikro-organismien avulla maatumistuotteeksi. Maatumistuote sisältää ravinteita, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi lannoitteeksi. [37.]

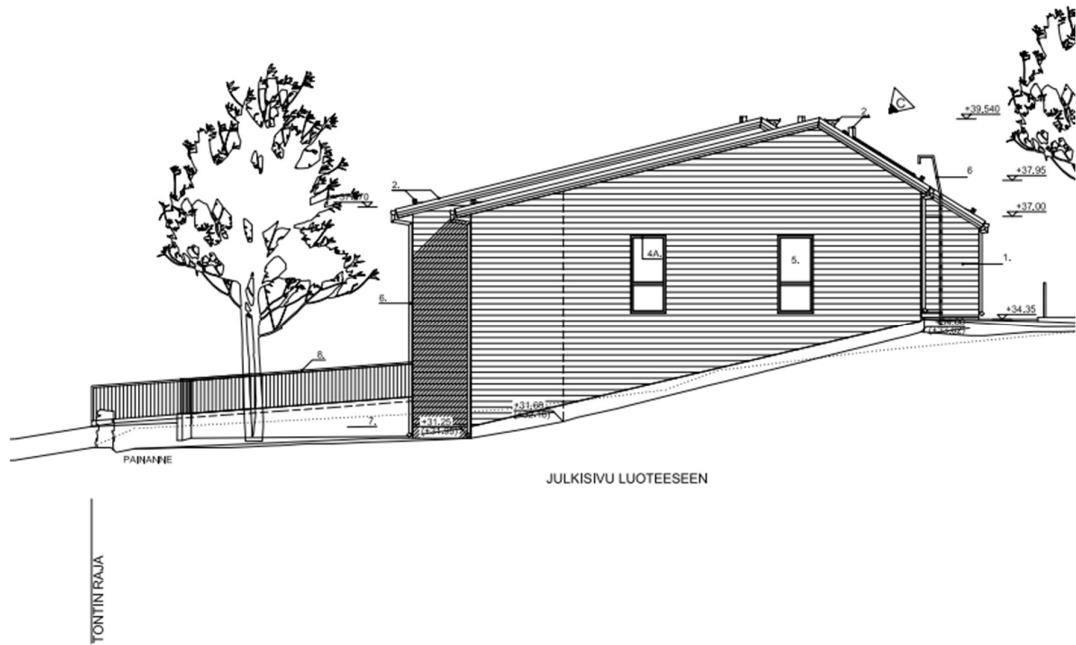
3 Tutkimus

3.1 Kohteen esittely

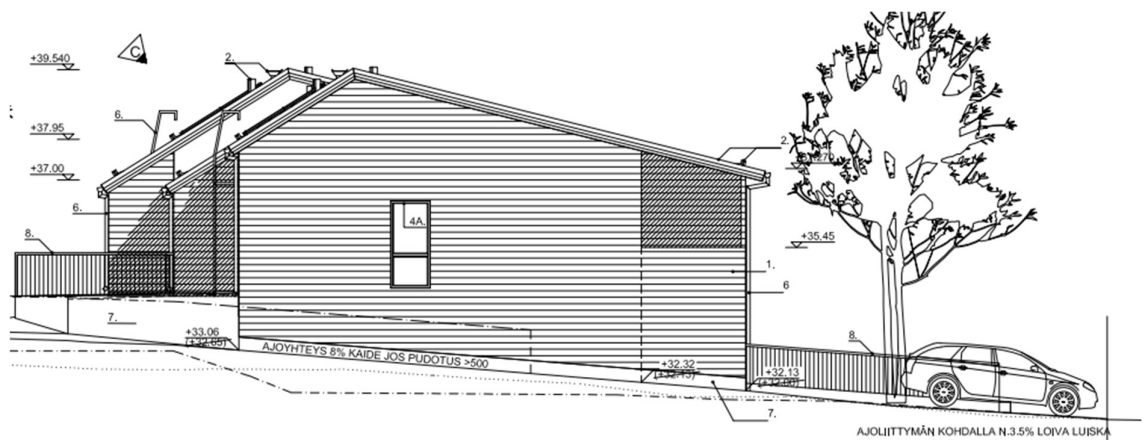
Opinnäytetyön tarkasteltavana kohteena toimii As Oy Espoon Kivensyrjä 3, Tuomarila. Kohde on kaksikerroksinen, 9 asunnon rivitalo, jossa ensimmäisen kerroksen runkona toimii betonielementit ja toisena kerroksena puuelementit. Välipohja on toteutettu ontelolaatoilla. Ensimmäisen kerroksen betonielementti-ratkaisun syy on, että kohde sijaitsee osittain maanpinnan alapuolella. Kattorakenne on kalteva molempiin suuntiin ja katteena pelti. Seuraavissa kuvissa esitetään muutamia kohteen julkisivukuvia. [1.]



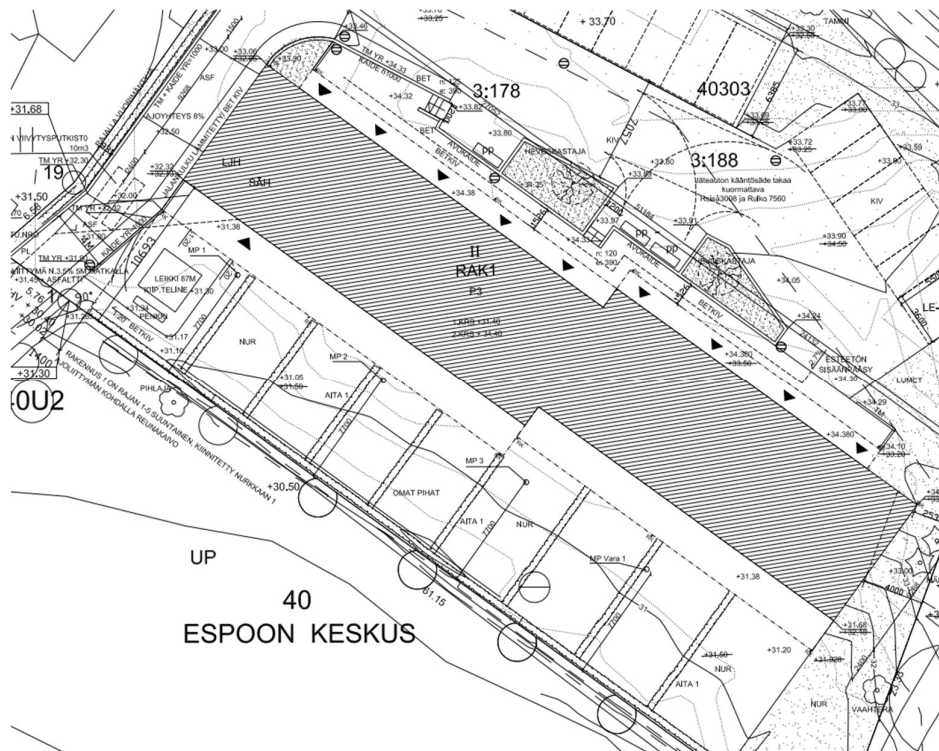
Kuva 8. Julkisivukuva lounaaseen. [1.]



Kuva 9. Julkisivukuva lounaaseen. [1.]



Kuva 10. Julkisivukuva kaakkoon. [1.]



Kuva 11. Rajattu asemakuvasta. Tässä näkyy koko rakennus ylhäältä. Pohjoinen kuvan mukaan ylhäällä. [1.]

3.2 Aurinkoenergian hyödyntäminen kohteessa

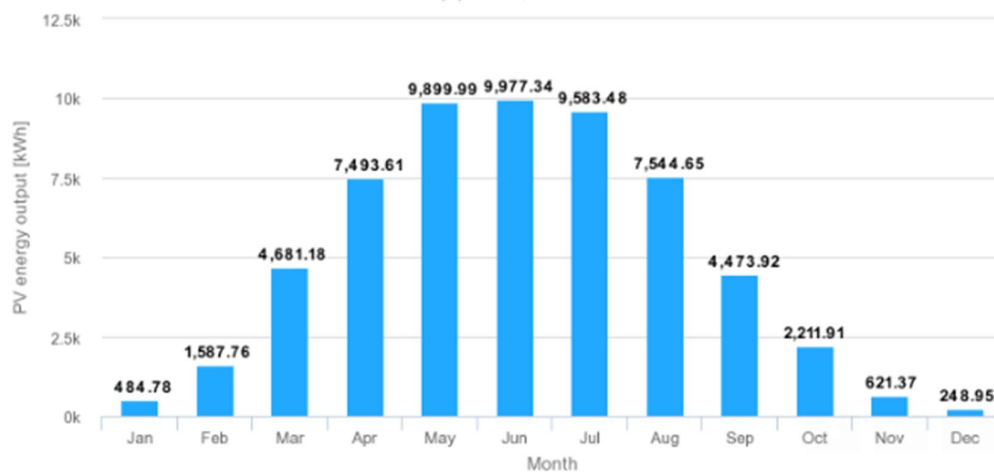
Ratio Kodit Oy toteutti As Oy Espoon Kivensyrjä 3, Tuomarila kohteeseen aurinkopaneelijärjestelmän. Järjestelmän lisäämisen tarkoituksena on kannustaa uusiutuvien energialähteiden käyttöön, sekä vähentää asumisen aikana syntyvää hiilijalanjälkeä ja parantaa kohteen energialukua. [1.]

Aurinkopaneelit asennettiin rakennuksen lounaispuoleisen katonharjan puolelle kulmaan 1:4. Rakennuksen suuntaus ja katon kaltevuus mahdollistivat optimaalisen asennuksen eikä paneelien erillistä suuntausta tarvittu. Paneeleina käytettiin kristallisilikonikennoja, joita asennettiin 340 m^2 Seuraavassa kuvassa 6 kohteeseen asennetuista aurinkopaneeleista. [1.]



Kuva 12. Asennetut aurinkopaneelit Kivensyrjä 3 rakennuksen katolla. [1.]

Kohteeseen mitattiin 68,06 kWp aurinkovoimala, jonka laskennalliseksi vuosituotoksi saatiin 58,8 MWh. Seuraavassa diagrammissa kuvassa 7 esitetään kuukausittaista tuottoarvioita sekä laskennan lähtöarvoja ja tuloksia kuvassa 8. [1.]



Kuva 13. Kuukausittainen tuottoarvio. [1.]



PVGIS-5 estimates of solar electricity generation:

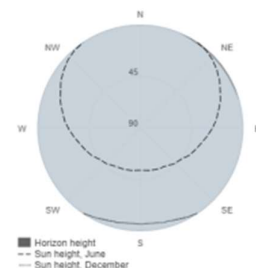
Provided inputs:

Latitude/Longitude: 60.205,24.656
 Horizon: Calculated
 Database used: PVGIS-ERA5
 PV technology: Crystalline silicon
 PV installed: 68.06 kWp
 System loss: 12 %

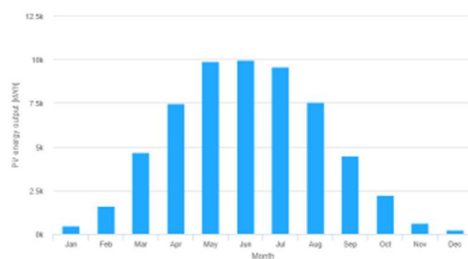
Simulation outputs

Slope angle: 10 °
 Azimuth angle: 45 °
 Yearly PV energy production: 58808.94 kWh
 Yearly in-plane irradiation: 1093.97 kWh/m²
 Year-to-year variability: 1836.25 kWh
 Changes in output due to:
 Angle of incidence: -4.25 %
 Spectral effects: NaN %
 Temperature and low irradiance: -6.26 %
 Total loss: -21.01 %

Outline of horizon at chosen location:



Monthly energy output from fix-angle PV system:



Monthly in-plane irradiation for fixed-angle:



Monthly PV energy and solar irradiation

Month	E_m	H(i)_m	SD_m
January	484.8	10.8	86.4
February	1587.8	29.4	269.3
March	4681.2	82.1	677.1
April	7493.6	133.4	588.5
May	9900.0	181.7	832.2
June	9977.3	186.6	515.0
July	9583.5	181.9	559.2
August	7544.6	142.2	695.3
September	4473.9	83.7	454.8
October	2211.9	42.3	382.1
November	621.4	13.6	101.0
December	248.9	6.5	67.3

E_m: Average monthly electricity production from the defined system [kWh].

H(i)_m: Average monthly sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system [kWh/m²].

SD_m: Standard deviation of the monthly electricity production due to year-to-year variation [kWh].

Kuva 14. Vuosituottolaskennan lähtötiedot, arvot ja tulokset. [1.]

3.3 Maalämmön hyödyntäminen kohteessa

As Oy Espoon Kivensyrjä 3, Tuomarilan kohteen lämmitysmuodoksi valittiin maalämpöjärjestelmä kaukolämmön sijaan. Kohde oli mahdollista perustaa kallion päälle, joka on maalämpö kannalta optimaalista. Maaperätutkimuksista ei löydetty esteitä maalämpökaivojen asentamiselle eikä alueella ollut pohjavesialueita. [1.]

Rakennuksen läheisyyteen porattiin kolme maalämpökaivoa kallioon noin parinsadan metrin syvyyteen. Maalämpöpumppuna toimii Thermia Calabria. Lämmitysjärjestelmänä vesikiertoinen lattialämmitys. Edellä kuvattuja tietoja tarvitaan tuloksien vertailussa. [1.]

Seuraavassa kuvassa 10 on esitetty Tom Allen Seneran energialaskelman tuloksesta As Oy Espoon Kivensyrjä 3, Tuomarila kohteelle. [1.]

Laskennan yksityiskohdat - Tulokset

Mega S 2020 HGW



Lämmitys ja lämmin käyttövesi	
Rakennuksen energiantarve	94 235 kWh
josta huoneenlämmöksi	73 735 kWh
josta lämpimälle käyttövedelle	20 500 kWh
Tuotettu kokonaisenergia, sis käyttövesi	94 236 kWh
Tuotettu energia lämpöpumppu	94 022 kWh
Lämpöpumpun käyttämä energia	20 932 kWh
josta sis kiertopumppujen osuus	818 kWh
josta sisäärakennettu puhallin	0 kWh
Lisälämmön käyttämä energia	214 kWh
Integroitu ($\eta=100\%$)	214 kWh
Kokonaisenergia (ostettu)	21 146 kWh
Energian säästö	73 090 kWh
SPF, ilman lisälämpöä	4,5
SPF	4,5
Tehontarve MUT:lla	33,3 kW
Lämpöpumpun teho MUT:lla	31,2 kW
Pyydetty lisälämpö MUT:lla	0,0 kW
Energian peittoaste	100 %
Tehonpeitto, vain lämpöpumppu	94 %
Käyttötunnit	5 582 h
Lämmönlähde (kollektori): Pystysuora	
Maks.laskettu keruul. lämpötila	7,3 °C
Min keruuliuksen lämpötila	-2,5 °C
Aktiivinen energiakaivon syvyys	240 m
Energiakaivojen lukumäärä	3
Asetettu teho MUT:lla	33 W/m
Asetettu energia	102 kWh/m

Kuva 15. Maalämmön tarpeen mitoituksen tulokset. [1.]

3.4 Muut vaikuttavat tekijät kohteen energialuvun muodostumiseen

3.5 Ilmanvuotoluku

Ilmanvuotoluku voidaan selvittää tiiviysmittauksella. Tiiviysmittauksessa selvitetään rakennuksen ilmanpitävyyttä. Tiiviysmittaus on olennainen osa energialuvun laskemisessa, sillä mitä pienempi luku sen vähemmän on lämpöhäviötä. Tiiviysmittauksella voidaan tunnistaa mahdolliset vuotokohdat ja näin parantaa rakenteen ilmantiiviyttä. [1.]

Kohteen energialuvun selvittämisessä kohde laskettiin ensin ilmanvuotoluvulla 4, mikä on suurin mahdollinen vuotoluku pientalorakennukselle, kun lasketaan energialukua ja huonoin energialuvun kannalta. Ilmanvuotoluvulla 4 laskeminen ei vaadi erillistä tutkimusta. Mikäli halutaan laskea paremmalla ilmanvuotoluvulla, tulee rakennukseen toteuttaa ilmatiivieysmittaus, jolloin laskenta toteutetaan toteutuneella ilmanvuotoluvulla. [1.]

As Oy Espoon Kivensyrjä 3, Tuomarila kohteeseen toteutettiin ilmatiiviyksmittaus, kun uudiskohteen rakennusvaihe mahdollisesti luotettavalle mittaukselle (runko, katto ja ovet asennettu). Seuraavassa kuvassa 11 on tiiviysraportin tulokset. Ilmantiiviyksluvuksi saatiin 0,5. [1.]



SIVU 1/11
TIIVIYSMITTAUSRAPORTTI
 Raportointipäivämäärä 25.1.2023

RIVITALO
KIVENSYRJÄ 3
ESPOO, 02760



Tiiviyssmittausluokitus



Q_{50}
 RakMr
 2012

0,5

Mittaaja:

Samu Aaltonen
 Pyrykatu 7
 15340 Lahti

040 5717 888
 info@tiiviyssmittaus.org
 www.tiiviyssmittaus.org



Kuva 16. Tiiviyssmittausraportin tulokset. [1.]

3.6 Ilmavaihtojärjestelmä.

Ilmanvaihtojärjestelmällä voi olla merkittävä vaikutus pientalon energialukuun. Ilmanvaihtojärjestelmällä voidaan ottaa poistoilmasta lämpö talteen ja siirtää takaisin sisäottoilmaan, jolloin lämmitystarve pienenee. Lämmöntalteenottojärjestelmällä on mahdollisuus myös viilentää asuntoa. [23, S. 30–40.]

Ilmanvaihto on hyvä mitoittaa ja säätää niin, että järjestelmä vähentää mahdollisimman paljon lämpöhävikkiä asunnosta sen ilmanlaatua huonontamatta. Ilmanvaihdon lisäksi on asunnossa ylläpidettävä oikeanlainen kosteus, jotta mahdollisimman alhainen energiankulutus toteutuu. [23, S. 30–40.]

Energialuvun laskennassa tarvitaan tieto ilmanvaihtojärjestelmän SFP-luvusta, eli Specific Fan Power. Ratio Kodin kohteessa käytetyn ilmanvaihtojärjestelmien SFP-luku määriteltiin laitteiden tuotekorteissa 1,57 ja pääilmavaihtokoneelle 1,7. SFP-luku voidaan myös määrittää seuraavalla kaavalla kuvassa 12. [24, S. 1–6.]

Laskentakaava:

$$\text{SFP} = \frac{P_{\text{tulosähkö}} + P_{\text{poistosähkö}}}{q_{V\text{max}}}$$

SFP = tulo-poistokoneen ominaissähköteho (kW/m³,s)

P_{tulosähkö} = tulopuhaltimen verkosta ottama sähköteho (kW)

P_{poistosähkö} = poistopuhaltimen verkosta ottama sähköteho (kW)

q_{Vmax} = koneen ilmavirroista suurempi, tulo tai poisto (m³/s)

Kuva 17. SFP (Specific Fan Power) laskentakaava. [24.]

4 Yhteenveto ja tulokset

Tässä luvussa tarkastellaan Ratio Kodit Oy:n uudiskohteen As Oy Espoon Kivensyrjä 3, Tuomarila rivitalon toteutunutta energialuokkaa verrattuna samankaltaisiin pientaloihin, jotka on toteutettu suosittumalla lämmitys- ja energiatuotannon menetelmillä. Ensiksi esitellään Suomen pientalojen lämmitysmuotoja ja sitten tarkastellaan sähkölämmitteisen pientalon energiatehokkuutta. Lopuksi vertaillaan sähkölämmitteisen pientalon energialukua Ratio Kodit Oy:n kohteeseen.

Etelä-Suomen yleisin pientalojen lämmitysmuoto on sähkölämmitys ja toiseksi kaukolämmitys. Kaukolämmitystä suositaan, kun pientalo sijaitsee alueella, minne on mahdollista taloudellisesti kohtuullisesti toteuttaa kaukolämmitykseen vaadittava infrastruktuuri. Sähkölämmitys ei vaadi suuria alkuinvestointeja, mutta käyttökustannukset ovat huomattavasti kalliimpia verrattuna kaukolämpöön. [38;39.]

Tarkastellaan Motivan suorittamaa energialuokkalaskentaa 2001 rakennetulle pientalolle Etelä-Suomessa. Seuraavassa taulukossa 18 on esimerkkikohteen lähtötiedot ja toteutunut energialuokka. [40.]

Pinta-ala	150 m ²
Lämmitysmuoto	Suorasähkö
Lämmönjako	Lattialämmitys
Ilmanvaihto	Koneellinen tulo-poisto
Lämmöntalteenoton hyötysuhde	49 %
Energian kulutus (sähkö)	30 000 kWh / vuosi
Apulämmitys	Varaava takka
Energialuokka	D
E-luku	199 kWh/m ²
Laskennallinen energiankulutus	31 570 kWh / vuosi

Kuva 18. Taulukossa Motivan esimerkkirakennuksen perustiedot ja laskennan tuloksia. [40.]

Esimerkkikohteelle toteutettiin myös laskenta, missä olisi asennettu kohteelle ilmalämpöpumput, IV- koneet uusittu nykyaikaisempiin ja asennettu katolle aurinkopaneeli. Tässä suunnitellussa skenaariossa Motivan laskennan mukaan esimerkkikohteen energialuokkaa saatiin parannettua D:stä B:hen ja E-lukua 199 luvusta lukuun 177. [40.]

Ratio Kodit Oy:n toteuttama pientalokohde saavutti energialuokan A ja E-luvun 79, kun kohdetta tarkasteltiin ilmanvuotoluvulla 4 ja ilman asennettuja aurinkopaneeleja. Toteutuneen kohteen ilmanvuotoluku oli 0,5 ja aurinkopaneeleja asennettiin noin 340 m² ja laskennalliseksi tuotoksi tuli 58,08 MWh. Toteutunut energialuokka on A ja E-luvuksi tuli 34. Seuraavissa kuvissa 19 ja 20 on yhteenveto ja tulokset kohteesta. [1.]

YHTEENVETO RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUDESTA

Laskennallinen ostoenergiankulutus ja energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)

Lämmitetty nettoala	861,8 m ²			
Lämmitysjärjestelmän kuvaus	Maalämpöpumppu Vesikiertoinen lattialämmitys			
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä lämmöntalteenotolla			
Käytettävä energiamuoto	Vakioidulla käytöllä laskettu ostoenergia		Energiamuodon kerroin	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus
	kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	-	kWh _e /(m ² vuosi)
kaukolämpö sähkö uusiutuva polttoaine fossiilinen polttoaine kaukojäähdytys	56931	66	0,5 1,2 0,5 1 0,28	79
Energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)				80

Rakennuksen energiatehokkuusluokka

Käytetty E-luvun luokitteluasteikko

1. Pienet asuinrakennukset

Luokkien rajat asteikolla

A: ... 80	B: 81 ... 110	C: 111 ... 150
D: 151 ... 210	E: 211 ... 340	F: 341 ... 410
G: 411		

Tämän rakennuksen energiatehokkuusluokka

A

Kuva 19. Yhteenveto ilmanvuotoluvulla 4 ja ilman aurinkopaneeleita. [1.]

YHTEENVETO RAKENNUKSEN ENERGIATEHOKKUUDESTA

Laskennallinen ostoenergiankulutus ja energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)

Lämmitetty nettoala	861,8 m ²			
Lämmitysjärjestelmän kuvaus	Maalämpöpumppu Vesikiertoinen lattialämmitys			
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä lämmöntalteenotolla			
Käytettävä energiamuoto	Vakioidulla käytöllä laskettu ostoenergia		Energiamuodon kerroin	Energiamuodon kertoimella painotettu energiankulutus
	kWh/vuosi	kWh/(m ² vuosi)	-	kWh _e /(m ² vuosi)
kaukolämpö sähkö uusiutuva polttoaine fossiilinen polttoaine kaukojäähdytys	24070	28	0,5 1,2 0,5 1 0,28	34
Energiatehokkuuden vertailuluku (E-luku)				34

Rakennuksen energiatehokkuusluokka

Käytetty E-luvun luokitteluasteikko

1. Pienet asuinrakennukset

Luokkien rajat asteikolla

A: ... 80	B: 81 ... 110	C: 111 ... 150
D: 151 ... 210	E: 211 ... 340	F: 341 ... 410
G: 411 ...		

Tämän rakennuksen energiatehokkuusluokka

A

Kuva 20. Yhteenveto ilmanvuotoluvulla 0,5 ja aurinkopaneeleilla. [1.]

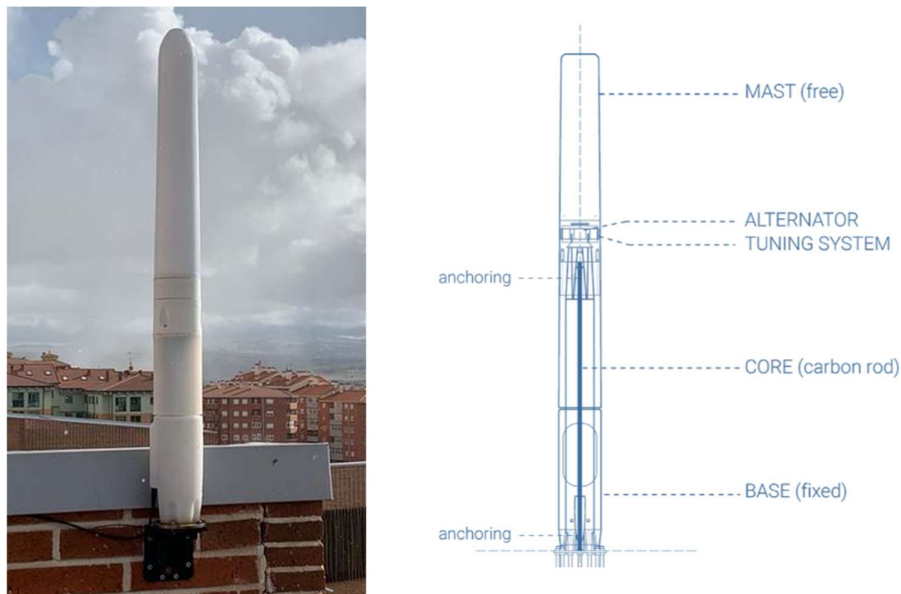
Yhteenvedoista nähdään, että tälle pientalokohteelle A energialuokan rajana on energialuku 80. Kuitenkin toteutuneen kohteen energialuku onnistuttiin parantamaan yli kaksinkertaisesti (34) pelkästään A-rajaa nähden (80). [1.]

Maalämpö ja nykyaikaisemmat ulkoseinäeristykset mahdollistavat jo ennestään erittäin hyvät energia-arvot. Kuitenkin huomataan, että jo hyviä tuloksia voidaan vielä merkittävästi parantaa pelkästään tiiviillä rakenteilla ja aurinkopaneelien käytöllä. [1.]

5 Jatkotutkimuspohdintaa

5.1 Kattoon asennettava tuulivoimala.

Kattoon asennettavia tuulivoimaloita on kehitetty ja esimerkiksi kehitteillä oleva Skybrator on Vortexin yhtiön kehittämä tuuliturbiini, joka sopii esimerkiksi katolle asennettavaksi. Seuraavassa kuvassa 21 on kuva kattoon asennettavasta tuuliturbiinittomasta tuulivoimalasta.



Kuva 21. Vortexin 1 metrin tuulivoimalamalli asennettuna ja käytössä Espanjassa. [41.]

Turbiinon malli ei aiheuta lintukuolemia sekä sisältää vähemmän liikkuvia osia, joka vähentää huollon tarvetta ja toimintahäiriöitä. Tuulivoimalat voivat vaihdella 10-metrisistä metrin voimalaan. Tuulivoimalan rakenne on yksinkertainen. Tuulivoimalalla (Skybrator) on kiinteä perusta, joka mahdollistaa monipuolisen ja kiinteään kiinnityksen seinään tai maahan. Tuulivoimalan masto heiluu vapaasti kohtisuoraan eli värisee sisäisen hiilikuitutangon avulla. Ilmavirrasta saatu liike-energia muutetaan sähköksi, joka voidaan käyttää samalla tavalla kuin aurinkokeräimen avulla tuotettu sähkö. [41.]

Skybrator tuulivoimalan toiminta perustuu sen värähtelyyn ilman taajuuteen. Tuulen kulkeutuessa voimalan läpi syntyy paine-eroja ja ilmapyörteitä rakenteen ympärillä, joka aiheuttaa voimalan värähtelyn näiden mukana. Luonnossa tämä on varsin luonnollinen ilmiö ja se voidaan nähdä puissa, kun ne heiluvat tuulen mukana. [41:42.]

Tuulivirran muutos käytettäväksi sähkövirraksi tapahtuu samantapaisesti kuin vaihtovirtageneraattorissa. Voimalan värinä aiheuttaa vuorovaikutusta kelojen ja magneettikenttien välillä, joka tuottaa sähköä elektromagneettisen induktion avulla, jolloin ei ole tarvetta pyörivälle liikkeelle. [41.]

Skybrator soveltuu asennettavaksi, minne vain, missä on tuulivirtaa esimerkiksi teiden sivuun ja muihin missä riittää tuulivirtaa. Yksi kaksimetrinen voimala voi tuottaa jopa 20 neliön aurinkopaneelin verran sähköä Vortex-yhtiön oman tutkimuksen mukaan Espanjassa, jossa keskimääräinen tuuliolosuhde on 7 m/s. [42;43.]

Aurinkopaneelien suurin haitta energiantuotannolle on sen riippuvuus aurin-gosta. Yhdistettynä mahdollisesti viereen tai läheisyyteen asennettavat tuulivoimalat voisivat mahdollisesti kompensoida energian tuotannon epävarmuutta. Tuulivoimaloiden kannalta Suomi kuuluu hyvin tuuliseen vyöhykkeeseen, jonka keskimääräinen tuuli on 9 m/s. [43, S.11]. [42.]

Katolle asennettavan tuulivoimalan energiantuotantoa olisi mielenkiintoista tutkia Suomen olosuhteissa sekä vertailla tuulivoimalan takaisinmaksuaikaa suhteessa aurinkopaneeliin. Kuinka paljon värisevällä tuulivoimalalla olisi vaikutusta energialukuihin sekä asumisenaikaiseen hiilijalanjälkeen ja kuinka paljon tällä voitaisiin korvata fossiilisia energialähteitä.

Lähteet

- 1 Ratio Kodit Oy. Yrityksen sisäinen aineisto.
- 2 Aurinkovoima. Verkkoaineisto. Vattenfall <<https://www.vattenfall.fi/sahkosopimukset/tuotantomuodot/aurinkovoima/>>. Luettu 6.7.2023.
- 3 How Does Solar Work. Verkkoaineisto. Solar Energy Technologies office. <<https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work>>. Luettu 6.7.2023.
- 4 Auringosta sähköä. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringosta_sahkoa>. Päivitetty 2.8.2022. Luettu 6.7.2023.
- 5 Solar Photovoltaic Technology Basics. Verkkoaineisto. Solar Energy Technologies office. <<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basicsFvideo>>. Luettu 7.7.2023.
- 6 Solar PV. 2011. Verkkoaineisto. U.S Department of Energy. <<https://www.youtube.com/watch?v=0elHlcPVtKE>>. Päivitetty 8.2.2011. Katsottu 7.7.2023.
- 7 Concentrating Solar Power. Verkkoaineisto. U.S Department of Energy. <<https://www.youtube.com/watch?v=rO5rUqeCFY4&t=2s>>. Päivitetty 8.7.2010. Katsottu 7.7.2023.
- 8 How Concentrated Solar Power Works. Verkkoaineisto. SolarPaces. <<https://www.solarpaces.org/worldwide-csp/how-concentrated-solar-power-works/>>. Luettu 7.7.2023.

- 9 Concentrating Solar Power. Verkkoaineisto. U.S Department of Energy. <<https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power-basics>> Luettu 7.7.2023.
- 10 Vikman P. 2018. Verkkoaineisto. Aurinkovoimaloiden toiminta. Vaasan ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/147418/Pekka_Vikman.pdf;jsessionid=574CC027DD769217CA05DEF1709D2C24?sequence=1>. Luettu 7.7.2023.
- 11 The Two Types of Solar Energy. 2018. Verkkoaineisto. Planete Energies. <<https://www.planete-energies.com/en/media/article/two-types-solar-energy>>. Päivitetty 2.2.2022. Luettu 7.7.2023.
- 12 Duroha J. & Gretchen A. 2021. Solar Installations & Their Occupational Risks. Verkkoaineisto. University of Rhode Island. <<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1071181321651275>>. Luettu 7.7.2023.
- 13 Crail C. & Tynan C. Pros and Cons of Solar Energy. Verkkoaineisto. Forbes Homes. <<https://libguides.kamk.fi/c.php?g=657740&p=5157950>>. Päivitetty 6.9.2023. Luettu 14.7.2023.
- 14 Vourvoulis A. Pros and Cons of Solar Energy. Verkkoaineisto. Green Match. <<https://www.greenmatch.co.uk/blog/2014/08/5-advantages-and-5-disadvantages-of-solar-energy>>. Päivitetty 27.6.2023. Luettu 14.7.2023.

- 15 Tiseo I. 2022. Mortality rate from accidents and air pollution per unit of electricity worldwide, by energy source. Verkkoaineisto. Statista. <<https://www.statista.com/statistics/494425/death-rate-worldwide-by-energy-source/>>. Päivitetty 12.6.2023. Luettu 14.7.2023.
- 16 Maalämpöpumppu. 2018. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologia/maalampopumppu>. Päivitetty 21.12.2018. Luettu 9.8.2023.
- 17 Maalämmön toimintaperiaate. Thermia Online. Verkkoaineisto. <<https://www.thermia.fi/maalampo/maalampo1/miten-maalampo-toimii>>. Luettu 9.8.2023.
- 18 Lämpöä omasta maasta. 2012. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/files/7965/Lampo_omasta_maasta_MaalampopJulkaistumput.pdf>. Luettu 9.8.2023.
- 19 Comparison of Direct Electric, District and Geothermal Heating systems. 2018. Verkkoaineisto. <<https://www.datapartner.fi/en/blog/case-solved:-comparison-of-direct-electric-district-and-geothermal-heating-systems>>. Luettu 9.8.2023.
- 20 Aunio I. Maalämpöjärjestelmien laajennus haja-asutusalueella. 2022. Verkkoaineisto. Tampereen ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/754279/Aunio_liro.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Luettu 9.8.2023.
- 21 Benj. Frosterus. 1992. Suomen Maaperä. Verkkoaineisto. Geologinen Komissioni. <https://tupa.gtk.fi/julkaisu/geoteknillinen/gt_s_034.pdf>. Luettu 9.8.2023.

- 22 Turunen M. 2018. Suomen Kallioperä. Verkkoaineisto. <<https://www.geologia.fi/2018/04/25/suomen-kalliopera/>>. Luettu 9.8.2023.
- 23 Helander J. Selvitys asuinkerrostalon E-lukuun vaikuttavista tekijöistä. 2013. Verkkoaineisto. Mikkelin Ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/57456/Opinaytetyo_Joni_Helander.pdf?sequence=1>. Luettu 12.9.2023.
- 24 Manner J. SFP-luku LVI-suunnittelussa. 2013. Verkkoaineisto. Metropolia Ammattikorkeakoulu. <<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/66466/SFP-luku%20LVI-suunnittelussa.pdf?sequence=1>>. Luettu 12.9.2023.
- 25 Mulvaney K. What is a carbon footprint and how to measure yours. 2022. Verkkoaineisto. National Geographic. <<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/what-is-a-carbon-footprint-how-to-measure-yours>>. Luettu 12.9.2023
- 26 Hiilijalanjälki ja LCA. Verkkoaineisto. Greenstep. <<https://greenstep.fi/vastuullisuuspalvelut/hiilijalanjalki-ja-lca>>. Luettu 12.9.2023.
- 27 Kestävän rakentamisen arviointi. Verkkoaineisto. Rakennus Teollisuus. <<https://rt.fi/tietoa-alasta/ymparisto-ja-ilmasto/kestava-rakentaminen/kestavan-rakentamisen-arviointi/>>. Luettu 12.9.2023.
- 28 Liikenteen päästöt. Verkkoaineisto. Lipasto Liikenteen Päästöt. <<http://lipasto.vtt.fi/liisa/co2ekvs.htm>>. Luettu 14.9.2023.

- 29 CO2 Equivalent. Verkkoaineisto. Climate Change Connectios. <<https://climatechangeconnection.org/emissions/co2-equivalents/>>. Luettu 14.9.2023.
- 30 Kuittinen M. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. 2019. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 14.9.2023
- 31 Manninen L. Rakennushankkeen hiilijalanjäljen laskenta. 2022. Verkkoaineisto. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/754401/Opinnaytetyo_Manninen_Lassi.pdf?sequence=2&isAllowed=y>. Luettu 21.9.2023.
- 32 Metsärinne S. 2022. Rakentamisen hiilijalanjälki ja miten sitä voisi hallita. Verkkoaineisto. Realizer. <<https://realizer.com/blogi/rakentamisen-hiilijalanjalki-osaksi-tavoitteita/>>. Luettu 21.9.2023.
- 33 Laki. Ilmastolaki. 2022. 423/2022.
- 34 Rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjälki. Verkkoaineisto. Rakennuslehti. <<https://www.rakennuslehti.fi/mainos/rakennuksen-koko-elinkaaren-hiilijalanjalki/>>. Luettu 21.9.2023.
- 35 Rekola M. Miten suuri on rakennuksen hiilijalanjälki? 2020. Verkkoaineisto. Senaatti. 2020. <https://www.senaatti.fi/senaatti_article/miten-suuri-on-rakennuksen-hiilijalanjalki/>. Luettu 23.9.2023.

- 36 Rakennusten hiilijalanjäljen laskenta. 2020. Verkkoaineisto. Puuinfo. [Internet]. <<https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/rakennusten-hiilijalanjaljen-laskenta/>>. Luettu 27.9.2023.
- 37 Virnavirta A. 2014. Pientalon rakennusmateriaalien kierrätys ja hiilijalanjälki. Verkkoaineisto. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/76527/Virnavirta_Aku.pdf?sequence=1>. Luettu 2.10.2023.
- 38 Rakennusten lämmitys kuluttaa runsaasti energiaa. 2018. Verkkoaineisto. Ilmasto-opas. <<https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/rakennusten-lammitys-kuluttaa-runsaasti-energiaa>> Päivitetty 7.10.2023. Luettu 6.12.2023.
- 39 Lämmityskulutuksen lasku peitti etätyön vaikutuksen asumisen energiankulutuksessa vuonna 2020. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <https://stat.fi/til/asen/2020/asen_2020_2021-12-16_tie_001_fi.html>. Päivitetty 5.4.2022. Viitattu 6.12.2023.
- 40 Esimerkkikohde: 2001 rakennettu talo suorasähkölämmityksellä. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/remontoi_ja_huolla/pientalon_energiaremontit/esimerkkikohde_2001_rakennettu_talo_suorasahkolammityksella>. Päivitetty 2.12.2022. Luettu 6.12.2023.
- 41 Jesús D. & Villarreal Y. 2018. VIV resonant wind generators. Verkkoaineisto. Vortex Bladeless S.L. <https://vortexbladeless.com/wp-content/uploads/2018/10/VortexGreenPaper_en.pdf>. Luettu 6.12.2023.
- 42 Ambrosse J. 2021. Good vibrations: bladeless turbines could bring wind power to your home. Verkkoaineisto. The Guardian. Luettu 6.12.2023.

- 43 Suomen Tuuli Atlas. 2010. Verkkoaineisto. Ilmatieteenlaitos.
<https://expo.fmi.fi/aqes/public/Tuuliatlas_yhteenvetora-portti.pdf>. Luettu 6.12.2023.