Kustannusoptimaaliset energiakorjaus- ja uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut kunnallisissa palvelurakennuksissa

Juha Jokisalo[1], Paula Sankelo[2], Kai Sirén[1] ja Juha Vinha[3]
[1] Aalto-yliopisto, LVI-tekniikka
[2] EQUA Simulation Finland Oy
[3] Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

Tiivistelmä

Tässä tutkimuksessa määritettiin Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-talon kustannusoptimaaliset energiakorjausvaihtoehdot sekä uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut monitavoiteoptimointia hyödyntäen. Tutkimuksessa etsittiin ratkaisuja, joiden elinkaarikustannukset 20 vuoden aikana sekä tavoite-energiankulutus ovat mahdollisimman pieniä. Tulokset osoittavat, että tutkituissa tapauksissa ilma-vesilämpöpumppu on kustannustehokkaampi lämmitysjärjestelmä kuin kaukolämpö. Ulkoseinien lisälämmöneristäminen ei ole tutkituista vaihtoehdoista kustannustehokkain tapa parantaa kohteen energiatehokkuutta. Sen sijaan esimerkiksi yläpohjan lisälämmöneristäminen, uusien energiatehokkaampien ikkunoiden asentaminen, koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän korvaaminen lämmöntalteenotolla varustetulla koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä sekä aurinkosähkö- ja aurinkolämpöjärjestelmien asentaminen ovat suositeltavia investointeja kaikissa kustannusoptimaalisissa ratkaisuissa. Riippumatta siitä, onko kohde varustettu ilma-vesilämpöpumpulla tai kaukolämmöllä, kohteen tavoite-energiankulutusta kannattaa lähteä pienentämään investoimalla ensin aurinkoenergiajärjestelmiin.

1. Johdanto

Tämä tutkimus on osa Suomessa vuosien 2015–2017 aikana käynnissä olevaa COMBI-hanketta, joka keskittyy kunnallisten palvelurakennusten energiatehokkuuden parantamiseen liittyvien vaikutusten ja ongelmien selvittämiseen ja ratkaisemiseen. Tämän osatutkimuksen tavoitteena on määrittää korjaustarpeessa olevan palvelurakennuksen kustannusoptimaaliset energiakorjausvaihtoehdot sekä uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut kiinteistön omistajan eli kaupungin tai kunnan näkökulmasta.

2. Esimerkkirakennus

Tutkimuksen kohteeksi valittiin Tampereella sijaitseva Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-talo (Kuva 1.), joka on rakennettu vuonna 1955 ja joka peruskorjattiin vuosien 2011–2013 aikana. Tutkimuksessa oletettiin, että Jukola-talo on edelleen peruskorjausta edeltävässä kunnossa, jolloin rakennus edustaa vanhaa korjaamatonta palveluasumiskäytössä olevaa rakennusta. Tämän vuoksi tutkimuksen tulokset ovat hyödynnettävissä laajemmin suomalaisessa palvelurakennuskannassa.

Kuva 1. Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-talo. Kuva: Paula Sankelo.

3. Menetelmät

3.1 Dynaaminen simulointi ja optimointi

Tutkimus toteutettiin rakennusten ja järjestelmien dynaamista simulointiohjelmaa IDA ICE sekä monitavoiteoptimointiohjelmaa MOBO [1] hyödyntäen. Käytettyjen menetelmien avulla etsittiin kustannusoptimaalisia ratkaisuja kaikkien tutkittavien korjaus- tai energiantuottovaihtoehtojen kombinaatioiden joukosta. Tutkimuksessa etsittiin ratkaisuja, joilla rakennuksen tavoite-energiankulutus ja elinkaarikustannukset ovat mahdollisimman pienet.

3.2 Tavoite-energiankulutus

Rakennuksen tavoite-energiankulutus (kWh/m^2,a) määriteltiin siten, että se on rakennuksen vuotuinen lämmityksen, jäähdytyksen, ilmanvaihdon, valaistuksen ja huonelaitteiden sekä LVI-apulaitteiden ostoenergiankulutuksen summa, eli kokonaisostoenergiankulutus simuloituna mahdollisimman todenmukaisella rakennuksen käytöllä. Simuloinneissa käytetyt henkilö-, laite- ja valaistuskuormat sekä simulointien lähtötietona käytetty kohteen mitattu LKV- kulutus on esitetty tarkemmin Jonathan Nymanin diplomityössä [2]. Ilmanvaihdon ilmamäärinä käytettiin peruskorjauksen yhteydessä määritettyjä kohteen suunnitteluarvoja.

3.3 Elinkaarikustannukset

Tutkittavien ratkaisujen elinkaarikustannusten nykyarvo LCC (€/m^2) 20 vuoden ajalta laskettiin seuraavan kaavan alulla

$$LCC = \sum I_{0,tot} + \sum M_{tot} + \sum R_{tot} - \sum Res_{tot} - \sum E_{sold,tot} + \sum E_{delivered,tot} \quad (1)$$

missä $\sum I_{0,tot}$ = lämmitysjärjestelmän, energiakorjausten ja sekä uusiutuvan energian tuottoratkaisujen investointikustannukset (€/m^2)

$\sum M_{tot}$ = ylläpitokustannukset (€/m^2)

$\sum R_{tot}$ = korjauskustannukset (€/m^2)

$\sum Res_{tot}$ = jäännösarvo 20 vuoden jälkeen (€/m^2)

$\sum E_{sold,tot}$ = ylimääräisen aurinkosähkön myyntitulot (€/m^2)

$\sum E_{delivered,tot}$ = energiakustannukset (€/m^2).

Tutkittavien ratkaisujen investointikustannukset määräytyivät yrityksistä saatujen hintojen sekä esimerkiksi tutkimusten [2-4] sekä alan tuoreiden raporttien perusteella. Luvussa 5 esitettävät optimointitulokset laskettiin käyttäen reaalisena laskentakorkona 3 %, ja energian sekä siirron vuotuisena hintakehityksenä 2 %. Sähköenergian ja siirron sekä kaukolämmön kustannukset laskettiin Tampereen Sähkölaitoksen vuoden 2015 hintojen perusteella.

4. Tutkitut korjaus- ja uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut

Jukola-talon kustannusoptimaaliset ratkaisut määritettiin erikseen kahdelle vaihtoehtoiselle lämmitysratkaisulle, joita ovat ilma-vesilämpöpumppu (I-VLP) varustettuna sähköisellä apulämmityksellä sekä kaukolämpö (KL). Ilma-vesilämpöpumppu valittiin tähän optimointitutkimukseen, koska diplomityötutkimuksessa [2] osoitettiin, että ilma-vesilämpöpumppu on kustannusoptimaalinen lämmitysratkaisu Jukola-talossa. Optimointitarkastelussa määritettiin myös ilma-vesilämpöpumpun kustannusoptimaalinen tehomitoitus. Kaukolämpöjärjestelmä otettiin mukaan tutkimukseen, koska Jukola-talo ja suurin osa palvelurakennuksista käytännössä lämmitetään kaukolämmöllä.

Optimoitaviksi energiakorjausratkaisuiksi valittiin ulkoseinien ja yläpohjan lisälämmöneristäminen, uusien energiatehokkaiden ikkunoiden asentaminen, koneellisen poistoilmanvaihtojärjestelmän korvaaminen lämmöntalteenotolla varustetulla koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä sekä läsnäolo-, päivänvalo- ja vakiovalo-ohjauksen asentaminen käytävien ja yhteisten oleskelutilojen valaistukseen (Taulukko 1).

Optimointitarkastelussa rakennuksen tiilimuurattujen ulkoseinien korjausvaihtoehtoja olivat peruskunnostus, jossa seinän U-arvo pysyy ennallaan (0,7 W/m^{2}K) tai peruskunnostuksen lisäksi tehtävä 50–200 mm lisälämmöneristäminen. Yläpohjan osalta vaihtoehtoja olivat yläpohjan ennalleen jättäminen (1,22 W/m^{2}K) tai sen 50–500 mm lisälämmöneristäminen. Vastaavasti ikkunoiden osalta tarkastelussa oli mukana alkuperäisten ikkunoiden peruskunnostus, jossa U-arvo pysyy ennallaan (2,9 W/m²K) tai uusien ikkunoiden asentaminen ikkunan U-arvon vaihdellessa välillä 0,5–1,0 W/m²K.

Optimoitaviksi uusiutuvan energian tuotannon ratkaisuiksi valittiin paikan päälle asennettavat aurinkosähkö- sekä aurinkolämpöjärjestelmät. Aurinkosähköpaneelien pinta-alan sallittiin vaihdella välillä 1,6–1000 m² ja aurinkolämpökeräinten välillä 0–120 m². Optimointitarkastelussa sallittiin huomattavan suurten aurinkopaneeli- ja keräinalojen käyttäminen, vaikka Jukola-talon katolla olisi karkeasti arvioiden tilaa asentaa vain noin 200 m^2 paneeleja tai aurinkokeräimiä. Mikäli suurten aurinkopaneeli- tai keräinalojen asentaminen osoittautuu kannattavaksi, niitä voitaisiin asentaa myös muualle kiinteistön alueelle, esim. pihaan.

Taulukko 1. Optimoitavat energiakorjaus ja uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut.

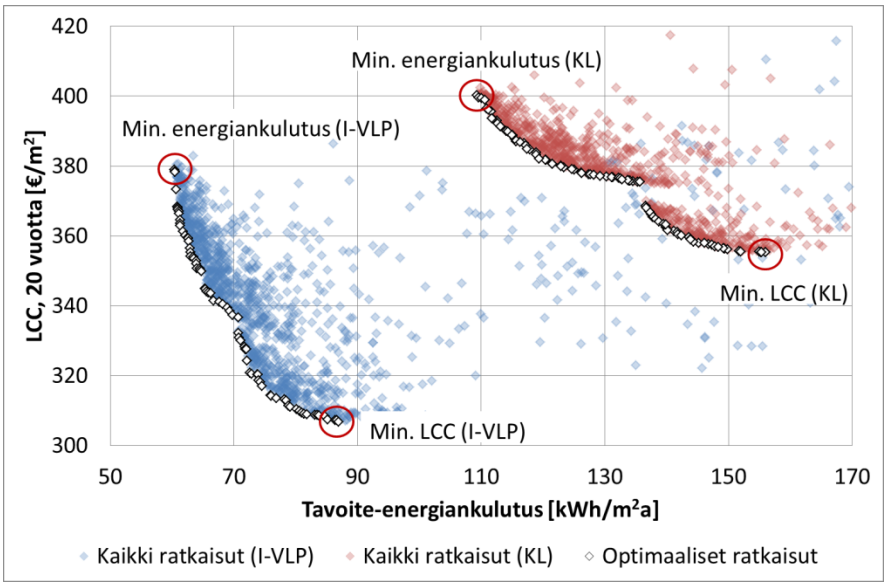
Päätösmuuttujat	**Pienimmän kustannuksen toimenpide**	**Suurimman kustannuksen toimenpide**	**Muuttujan tyyppi ja tutkitut vaihtoehdot**
Ulkoseinien korjaus	Peruskorjaus, eristystä ei paranneta, (U-arvo 0,7 W/m²K)	+200 mm lisäeristys, (U-arvo 0,17 W/m²K)	Diskreetti (lisäeristyspaksuus: 0, +50, +100, +150 tai +200 mm)

Yläpohjan korjaus	Ei korjausta, (U-arvo 1,22 W/m²K)	+500 mm lisäeristys (U-arvo 0,08 W/m²,K)	Diskreetti (lisäeristyspaksuus: 0, +50, +100, +200, +300, +400 tai +500 mm)
Ikkunoiden korjaus tai vaihto	Peruskorjaus, ikkunoita ei vaihdeta, (U-arvo 2,9 W/m²K)	Uudet ikkunat, (U=0,5 W/m²K)	Diskreetti (U-arvo: 2,9, 1,0, 0,9, 0,8, 0,7, 0,6 tai 0,5 W/m²K
I-VLP:n mitoitusteho (kW) (lämpöpumpputapauksessa)	1	202	Jatkuva, (pienin muutos 1kW)
Ilmanvaihdon LTO:n tuloilman lämpötilahyötysuhde (-)	0 (ei lämmöntalteenottoa)	0,72	Diskreetti (lämpötilasuhde: 0 tai 0,72)
Valaistuksen ohjaus	Ei ohjausta	Läsnäolo-, päivänvalo- ja vakiovalo-ohjaus käytävillä ja yhteisissä oleskelutiloissa	Diskreetti (Ohjaus: ei/kyllä)
Aurinkosähköpaneelien (PV) ala (m²)	1,6	1000	Jatkuva, (pienin muutos 1,6 m²)
Aurinkolämpökeräinten (ST) ala (m²)	0 / 6 [A]	120	Jatkuva, (pienin muutos 6 m²)

[A] Minimi-investointi on 0 m² I-VLP-tapauksessa ja 6 m² KL-tapauksessa.

5. Tulokset

Kuvassa 2 esitetään sekä ilma-vesilämpöpumpulla että kaukolämmöllä lämmitettävän Jukola-talon kaikkien optimoitujen ratkaisujen elinkaarikustannukset sekä tavoite-energiankulutukset. Kuvassa erikseen merkityt optimaaliset ratkaisut kuvaavat kullakin tavoite-energiankulutustasolla saavutettavaa kustannusoptimaalista ratkaisua.



Kuva 2. Jukola-talon optimoitujen ratkaisujen elinkaarikustannukset ja tavoite-energiankulutukset, kun lämmitys on toteutettu ilma-vesilämpöpumpulla (I-VLP) tai kaukolämmöllä (KL).

Kuva 2 osoittaa, että tutkitussa tapauksessa kohteen pienimmät elinkaarikustannukset tai tavoite-energiankulutus saavutetaan ilma-vesilämpöpumpulla. Taulukoissa 2 ja 3 esitetään kustannusoptimaaliset esimerkkiratkaisut molemmilla lämmitysvaihtoehdoilla eri tavoite-energiankulutuksen tasoilla, eli taulukoissa on esillä ratkaisut, joilla kuvassa 2 esitettyihin optimaalisiin ratkaisuihin päästään taloudellisimmin.

Taulukko 2. Jukola-talon kustannusoptimaaliset ratkaisut, kun lämmitysjärjestelmänä on ilma-vesilämpöpumppu.

Tavoite-energian-kulutus (kWh/m²a)	**LCC (€/m²)**	**Ulkoseinät, U-arvo (W/m²K)**	**Yläpohja, U-arvo (W/m²K)**	**Ikkunat U-arvo (W/m²K)**	**I-VLP Mitoitus-teho (kW)**	**IV:n lto**	**Valais-tuksen ohjaus**	**PV-ala (m²)**	**ST-ala [m²]**
Pienimmät elinkaarikustannukset (globaali minimi)									
87	307	0,70	0,13	0,8	101	0,72	Kyllä	320	6
Pienimmät elinkaarikustannukset tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 80 kWh/m²a									
80	310	0,70	0,10	0,5	124	0,72	Kyllä	492	8
Pienimmät elinkaarikustannukset tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 70 kWh/m²a									
70	337	0,39	0,08	0,5	99	0,72	Kyllä	844	6
Pienin tavoite-energiankulutus (globaali minimi)									
60	379	0,17	0,08	0,5	175	0,72	Kyllä	993	118

Taulukko 2 osoittaa, että kaikista simuloiduista ratkaisuvaihtoehdoista pienimmät elinkaarikustannukset (307 €/m^2) saavutetaan tapauksessa, jossa ulkoseiniin tehdään vain peruskorjaus, yläpohjaan asennetaan 300 mm lisälämmöneristettä (0,13 W/m^{2}K), rakennukseen vaihdetaan ikkunat, joiden U-arvo on 0,8 W/m^{2}K, ilma-vesilämpöpumpun tehomitoitus on 101 kW (47 % max. tehontarpeesta), rakennukseen asennetaan lämmöntalteenotolla varustettu ilmanvaihtojärjestelmä, valaistuksen ohjaus, 320 m^2 aurinkosähköpaneeleita sekä 6 m^2 aurinkolämpökeräimiä.

Taulukon 2 tulokset osoittavat, että ilma-vesilämpöpumppua käytettäessä ulkoseinän lämmöneristystä kannattaa parantaa, mikäli tavoite-energiankulutuksen tasoksi pyritään saavuttamaan noin 70 kWh/m^{2}a tai vähemmän. Sen sijaan yläpohjan lämmöneristystasoa kannattaa parantaa, ikkunat vaihtaa, asentaa lämmöntalteenotolla varustettu ilmanvaihtojärjestelmä sekä valaistuksen ohjaus kaikilla tutkituilla tavoite-energiankulutuksen tasoilla. Tulokset osoittavat, että aurinkosähköpaneeleja kannattaa asentaa kohteeseen huomattavan paljon (320 m^2) jo pienimmän elinkaarikustannuksen tapauksessa ja mikäli tavoite-energiankulutuksen tasoa halutaan laskea, niitä kannattaisi asentaa vielä reilusti enemmän. Myös aurinkolämpökeräinten asentaminen kannattaa.

Taulukko 3. Jukola-talon kustannusoptimaaliset ratkaisut. kun lämmitysjärjestelmänä on kaukolämpö.

Tavoite-energian-kulutus (kWh/m²a)	**LCC (€/m²)**	**Ulkoseinät. U-arvo (W/m²K)**	**Yläpohja. U-arvo (W/m²K)**	**Ikkunat U-arvo (W/m²K)**	**IV:n lto**	**Valais-tuksen ohjaus (ol.tilat)**	**Valais-tuksen ohjaus (käytävät)**	**PV-ala (m²)**	**ST-ala [m²]**
Pienimmät elinkaarikustannukset									
156	355	0,7	0.13,	0,8	0,72	Kyllä	Kyllä	275	22
Pienimmät elinkaarikustannukset tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 150 kWh/m²a									
150	356	0,7	0,08	0,8	0,72	Kyllä	Kyllä	274	64
Pienimmät elinkaarikustannukset tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 140 kWh/m²a									
140	362	0,7	0,08	0,8	0,72	Ei	Kyllä	602	117
Pienimmät elinkaarikustannukset tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 130 kWh/m²a									
130	377	0,39	0,1	0,8	0,72	Kyllä	Kyllä	368	89

Pienimmät elinkaarikustannukset tavoite-energiankulutuksen ollessa ≤ 120 kWh/m²a									
120	382	0,27	0,13	0,8	0,72	Kyllä	Kyllä	497	117
Pienin tavoite-energiankulutus									
109	400	0,17	0,08	0,5	0,72	Kyllä	Kyllä	865	120

Taulukon 3 tulokset osoittavat, että kaukolämpöä käytettäessä ulkoseinän lämmöneristystä kannattaa parantaa, mikäli tavoite-energiankulutuksen tasoksi pyritään saavuttamaan noin 130 kWh/m^{2}a tai vähemmän. Samoin kuin lämpöpumpun tapauksessa, myös kaukolämmitetyssä kohteessa yläpohjan lämmöneristystasoa kannattaa parantaa aina, ikkunat kannattaa vaihtaa ja asentaa lämmöntalteenotolla varustettu ilmanvaihtojärjestelmä. Sen sijaan oleskelutiloihin ei aina kannata asentaa valaistuksen ohjausta. Aurinkosähköpaneeleja kannattaa asentaa myös kaukolämmitetyssä tapauksessa paljon riippumatta tavoite-energiankulutuksen tasosta, mutta kuitenkin vähemmän kuin lämpöpumpputapauksessa. Kaukolämmitetyssä tapauksessa aurinkolämpökeräimiä kannattaa asentaa enemmän kuin lämpöpumpun tapauksessa, mutta mikäli tavoitellaan mahdollisimman pieniä tavoite-energiankulutuksen tasoja, tarvitaan aurinkokeräimiä lähes valittu maksimimäärä lämmitystavasta riippumatta.

6. Yhteenveto

Tässä tutkimuksessa määritettiin Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-talon kustannusoptimaaliset energiakorjausvaihtoehdot sekä uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut kiinteistön omistajan näkökulmasta.

Tutkituissa tapauksissa ilma-vesilämpöpumppu on kustannustehokkaampi lämmitysjärjestelmä kuin kaukolämpö. Ulkoseinien lisälämmöneristäminen ei ole tutkituista vaihtoehdoista kustannustehokkain tapa parantaa kohteen energiatehokkuutta. Sen sijaan yläpohjan lisälämmöneristäminen, uusien energiatehokkaampien ikkunoiden asentaminen, lämmöntalteenotolla varustetun koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän, valaistuksen ohjauksen sekä aurinkojärjestelmien asentaminen olivat suositeltavia investointeja kaikissa kustannusoptimaalisissa ratkaisuissa riippumatta tavoite-energiankulutuksen tasosta. Mikäli tutkitun kohteen lämmitys toteutetaan ilma-vesilämpöpumpulla, rakennuksen tavoite-energiankulusta kannattaa lähteä pienentämään lisäämällä ensin aurinkosähkön tuotantoa, asentamalla energiatehokkaammat ikkunat ja lisäämällä sitten yläpojan lämmöneristystasoa. Vastaavasti kaukolämmitetyssä kohteessa kannattaa ensin lisätä aurinkolämmöntuotantoa, sitten aurinkosähkön tuotantoa ja vasta niiden jälkeen kasvattaa yläpohjan lämmöneristystasoa.

Lähdeluettelo

[1] http://ibpsa-nordic.org/tools.html
[2] Nyman. J. 2016. Cost optimal heating and cooling systems in nearly zero energy service buildings. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201604201855
[3] Sankelo. P. 2016. Optimal production and use of solar electricity in municipal nearly zero energy service buildings. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. Saatavilla: http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201612085855
[4] Niemelä, T., Kosonen. R. and Jokisalo, J. 2017. Cost-effectiveness of energy performance renovation measures in Finnish brick apartment buildings. Energy and Buildings 137, pp. 60-75.