COMBI

COMPREHENSIVE DEVELOPMENT OF
NEARLY ZERO-ENERGY
MUNICIPAL SERVICE BUILDINGS

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Aalto-yliopisto

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

BUSINESS FINLAND

Euroopan unioni

Vipuvoimaa EU:lta 2014–2020

KUSTANNUSOPTIMAALISET SUUNNITTELURATKAISUT PALVELURAKENNUKSISSA

Laatijat: Paula Sankelo, Aalto-yliopisto
Juha Jokisalo, Aalto-yliopisto

Sisällys

Kustannusoptimaaliset suunnitteluratkaisut palvelurakennuksissa

- **Tavoite**
- **Tutkimusmenetelmät**
  - Energiasimulointi ja optimointi
  - Elinkaarikustannusten laskenta
  - Kustannuslaskennan lähtötietoja
- **Tutkitut kohteet ja optimoitavat ratkaisut**
  - Luhtaan päiväkoti
  - Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-talo
- **Tulokset**
- **Yhteenveto**

Tavoite

Tämän tutkimusosion tavoitteena oli määrittää kustannusoptimaalisia suunnittelu-, energiakorjaus- ja uusiutuvan energiantuotannon ratkaisuja palvelurakennuksille kiinteistön omistajan näkökulmasta

Esimerkkikohteina käytettiin Tampareen kaupungin palvelurakennuksia:

- Luhtaan päiväkotia, joka edustaa uudiskohdetta
- Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-taloa, joka edustaa saneerauskohdetta

Tutkimuksessa eri ratkaisujen kannattavuutta tarkasteltiin erikseen vaihtoehtoisten lämmitysratkaisujen (kaukolämpö tai lämpöpumppu) tapauksissa

Tutkimusmenetelmät

Tutkimus toteutettiin dynaamista energiasimulointia sekä optimointia hyödyntäen käyttäen mahdollisimman todenmukaisia laskennan lähtötietoja

- Rakennusten energiasimulointi toteutettiin IDA-ICE simulointityökalulla
- Optimointi toteutettiin MOBO (Multi Objective Building Optimization) ohjelmalla käyttäen geneettistä optimointialgoritmia (NSGA-II)
- Monitavoiteoptimoinnilla minimoitiin:
  - Tavoite-energiankulutusta, joka on kiinteistön laskennallinen ostoenergiankulutus (sähkö + lämpö) simuloituna mahdollisimman todenmukaisella rakennuksen käytöllä
  - Elinkaarikustannuksia (LCC)

Tutkittavien ratkaisujen elinkaarikustannusten (LCC) nykyarvo laskettiin COMBI-hankkeessa valittujen laskentaperiaatteiden mukaisesti:

- Laskenta reaaliarvoilla (inflaatio ei mukana)
- Tarkastelujakso 20v. (rakennusten käyttöikä 40v.)
- Kustannukset ilman ALV:ia
- Yleiskulut mukana kustannuksissa
- Reaalinen laskentakorko 3%
- Energian ja siirron reaalinen hintakehitys 2%/vuosi:

Elinkaarikustannusten laskenta (LCC)

$$LCC = \sum I_{0,tot} + \sum M_{tot} + \sum R_{tot} - \sum Res_{tot} - \sum E_{sold,tot} - \sum E_{used,tot}$$

Missä

$\sum I_{0,tot}$	Energiatehokkuutta parantavien investointien kustannukset (myös päälämmitysjärjestelmän kustannukset mukana)
$\sum M_{tot}$	Investointien ylläpitokustannukset
$\sum R_{tot}$	Järjestelmien / komponenttien uusimisen kustannukset
$\sum Res_{tot}$	Investointien jäännösarvo
$\sum E_{sold,tot}$	Aurinkosähkön myyntitulot
$\sum E_{delivered,tot}$	Ostoenergiasta aiheutuvat kustannukset (sähkö + lämpö)

Kustannuslaskennan lähtötietoja (LCC)

	Perustapaukset
Reaalinen laskentakorko r[1]	3%
Energian vuotuinen hintakehitys[1]	2%
Tarkastelujakso[1]	20 vuotta
ALV	0%
Sähkön ostohinta (sähköenergia + siirto)	Luhtaa: 0,092 € / kWh Jukola: 0,081 € / kWh
Sähkön myyntihinta	0,028 € / kWh
Kaukolämmön hinta	0,052 €/kWh

[1] COMBI-projektille sovitut laskentaparametrit

Kohteen esittely: Luhtaan päiväkoti

- Valmistunut 2012
- Käyttäjien (lasten) lukumäärä noin 140
- Lämmitetty nettoala 1438m²
- U-arvot, W/m²K
  - Ulkoseinät: 0.09
  - Yläpohja: 0.06
  - Alapohja: 0.07
  - Ikkunat: 0.66
- Käytössä kaukolämpö, mutta optimointitutkimuksessa mukana myös sähköisellä apulämmityksellä varustettu maalämpöpumppu

Luhtaan päiväkoti (Kuva: Paula Sankelo)

Luhtaa: Optimoitavat ratkaisut

- Ratkaisut optimoidaan erikseen sekä kaukolämmön että maalämpöpumpun tapauksille:

Päätösmuuttujat, Luhtaan päiväkoti (uudisrakennus)		
Jatkuvat muuttujat	*Vaihteluväli*	*Askel*
Aurinkopaneeliala	1,6…600 m^2	1,6 m^2
Aurinkolämpökeräinten ala	0/6…24 m^2	6 m^2
Lämpöpumpun mitoitus (vain MLP-tapauksessa)	1…72 kW	1 kW
Diskreetit muuttujat	*Arvot*	
Ulkoseinien lämmöneristystaso	0,17, 0,14 tai 0,08 W/m^2K	
Yläpohjan lämmöneristystaso	0,09 tai 0,07 W/m^2K	
Alapohjan lämmöneristystaso	0,16 tai 0,10 W/m^2K	
Ikkunoiden tyyppi	U-arvot välillä 0,5…1,0 W/m^2K	
Ilmanvaihdon LTO:n tehokkuus	lämpötilahyötysuhde 60% tai 80%	
Ilmanvaihdon LTO sosiaalitilojen erillispoistoissa	Kyllä (lämpötilahyötysuhde 60%) / ei	
Ilmanvaihdon CO_2-ohjaus	Kyllä / ei	
Valaistuksen ohjaus	Kyllä (läsnäolo-, päivänvalo- ja vakiovalo-ohjaus) / ei	

Kohteen esittely: Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-talo

- Valmistunut 1955, peruskorjattu 2011 - 2013
- Kohteessa vanhusten tuettua palveluasumista
- Asukkaita 71
- Huoneistoala: 4709m²
- Optimointitutkimuksen lähtökohtana peruskorjausta edeltävä tilanne:
  - U-arvot, W/m²K
    - Ulkoseinät: 0,7
    - Yläpohja: 1,2
    - Alapohja: 0,36
    - Ikkunat: 2,9
  - Käytössä kon. poistoilmanvaihtojärjestelmä
  - Ilmanvaihdon ilmavirrat (5 m³/s) kuitenkin nykyisellä peruskorjauksen jälkeisellä tasolla kaikissa ratkaisuissa
- Käytössä kaukolämpö, mutta optimointitutkimuksessa mukana myös sähköisellä apulämmityksellä varustettu ilma-vesilämpöpumppu

Jukola-talo (Kuva: Paula Sankelo)

Jukola: Optimoitavat ratkaisut

- Ratkaisut optimoidaan erikseen sekä kaukolämmön että ilma-vesilämpöpumpun tapauksille:

Päätösmuuttujat: Jukola-talo (saneerauskohde)	Pienimmän kustannuksen toimenpide	Suurimman kustannuksen toimenpide	Muuttujan tyyppi ja tutkitut vaihtoehdot
Ulkoseinien korjaus	Peruskorjaus, eristystä ei paranneta, (U-arvo 0.7 W/m^{2}K)	+200 mm lisäeristys, (U-arvo 0.17 W/m^{2}K)	Diskreetti (lisäeristyspaksuus: 0, +50, +100, +150 tai +200 mm)
Yläpohjan korjaus	Ei korjausta, (U-arvo 1.22 W/m^{2}K)	+500 mm lisäeristys (U-arvo 0.08 W/m^2,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/m^{2}K)	Uudet ikkunat, (U=0.5 W/m^{2}K)	Diskreetti (U-arvo: 2.9, 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 tai 0.5 W/m^{2}K
I-VLP:n mitoitusteho (kW) (vain I-VLP tapauksessa)	1	202	Jatkuva, (pienin muutos 1kW)
Ilmanvaihtojärjestelmä	Vanhan kon. poisto IV-järjestelmän säilyttäminen (ei LTO:ta)	Kon. Tulo ja poisto IV-järjestelmän asentaminen (LTO:n LT-hyötysuhde 72%)	Diskreetti
Valaistuksen ohjaus	Ei ohjausta	Läsnäolo-, päivänvalo- ja vakiovalo-ohjaus käytävillä ja yhteisissä oleskelutiloissa	Diskreetti (Ohjaus: ei/kyllä)
Aurinkosähköpaneelien (PV) ala (m^2)	1.6	1000	Jatkuva, (pienin muutos 1.6 m^2)
Aurinkolämpökeräinten (ST) ala (m^2)	0 / 6 [A]	120	Jatkuva, (pienin muutos 6 m^2)

Tutkitut optimointitapaukset

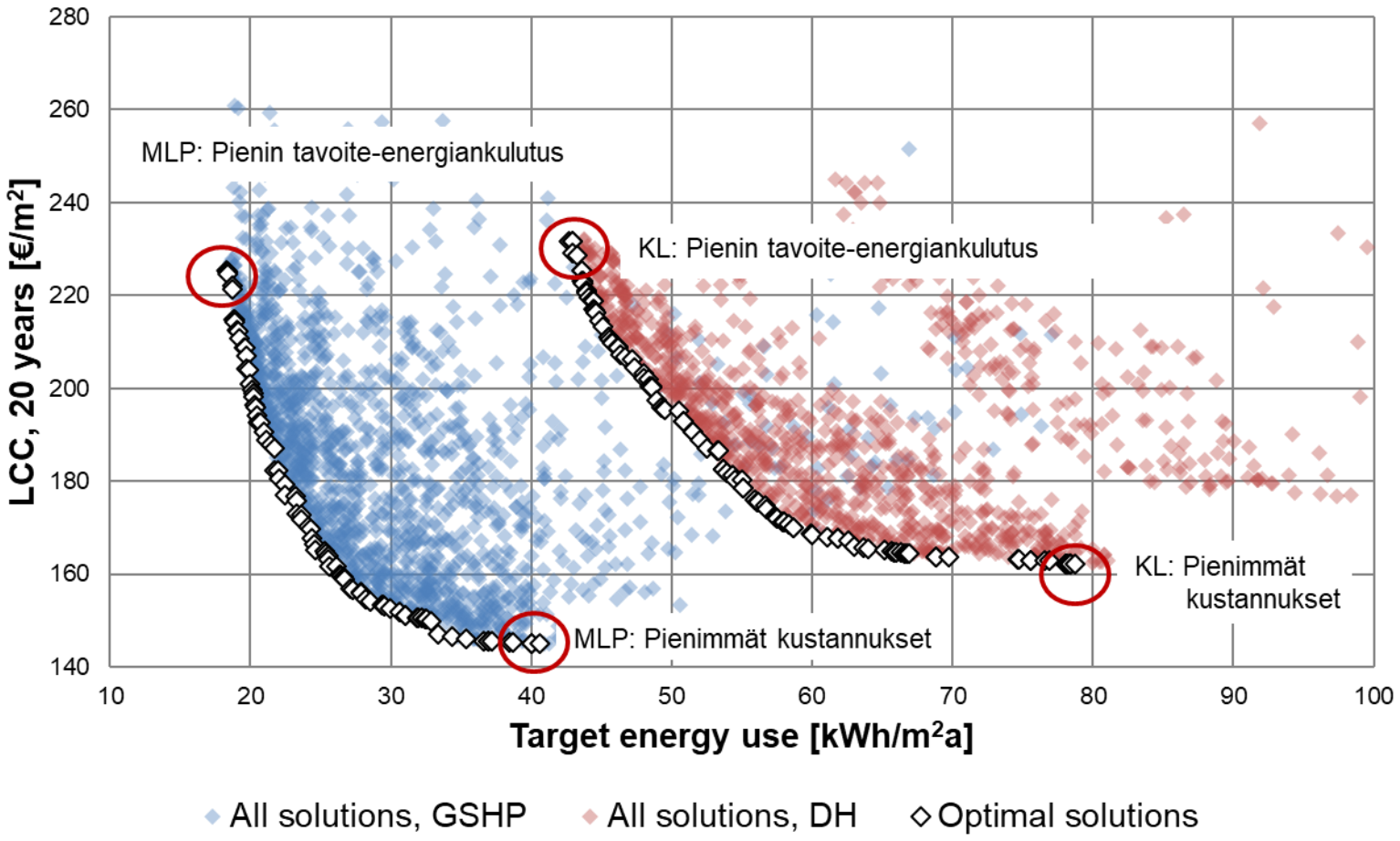
- Tutkitut kohteet ja lämmitysratkaisut:

Rakennukset	Luhtaan päiväkoti: uudisrakennus	Jukola-talo: saneerauskohde
Lämmitysratkaisu	Kaukolämpö (KL) / maalämpöpumppu (MLP)	Kaukolämpö (KL) / ilma-vesilämpöpumppu (IVLP)

- Optimoinnissa minimoitavat tavoitefunktiot:
  - Kohteen tavoite-energiankulutus
  - Tutkittavien ratkaisujen elinkaarikustannukset

Tulokset: Luhtaan päiväkoti

- Käytössä kaukolämpö (KL) tai maalämpöpumppu (MLP)



- Laskennassa reaalikorko 3% ja energian vuotuinen hintakehitys 2%

Tulokset: Luhtaan päiväkodin esimerkkiratkaisuja

- **Käytössä kaukolämpö (KL):**

Tavoite-energian-kulutus [kWh/m²a]	Elinkaari-kustannus [€/m²]	PV-ala [m²]	Aurinkoläm-pökeräinten ala [m²]	MLP:n mitoitus [kW]	Ulkoseinän U-arvo [W/m²K]	Yläpohjan U-arvo [W/m²K]	Alapohjan U-arvo [W/m²K]	Ikkunoiden U-arvo [W/m²K]	LTO:n hyötysuhde, pääkoneet [%]
Pienin elinkaarikustannus, Luhtaa (KL)									
79	162	23	6	N/A	0,17	0,09	0,16	0,8	60
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 70 kWh/m²a, Luhtaa (KL)									
70	164	24	6	N/A	0,17	0,09	0,16	0,8	80
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 60 kWh/m²a, Luhtaa (KL)									
60	169	112	24	N/A	0,17	0,09	0,16	0,8	80
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 50 kWh/m²a, Luhtaa (KL)									
49	195	311	24	N/A	0,08	0,09	0,16	0,6	80
Pienin tavoite-energiankulutus, Luhtaa (KL)									
43	232	586	24	N/A	0,08	0,07	0,10	0,5	80

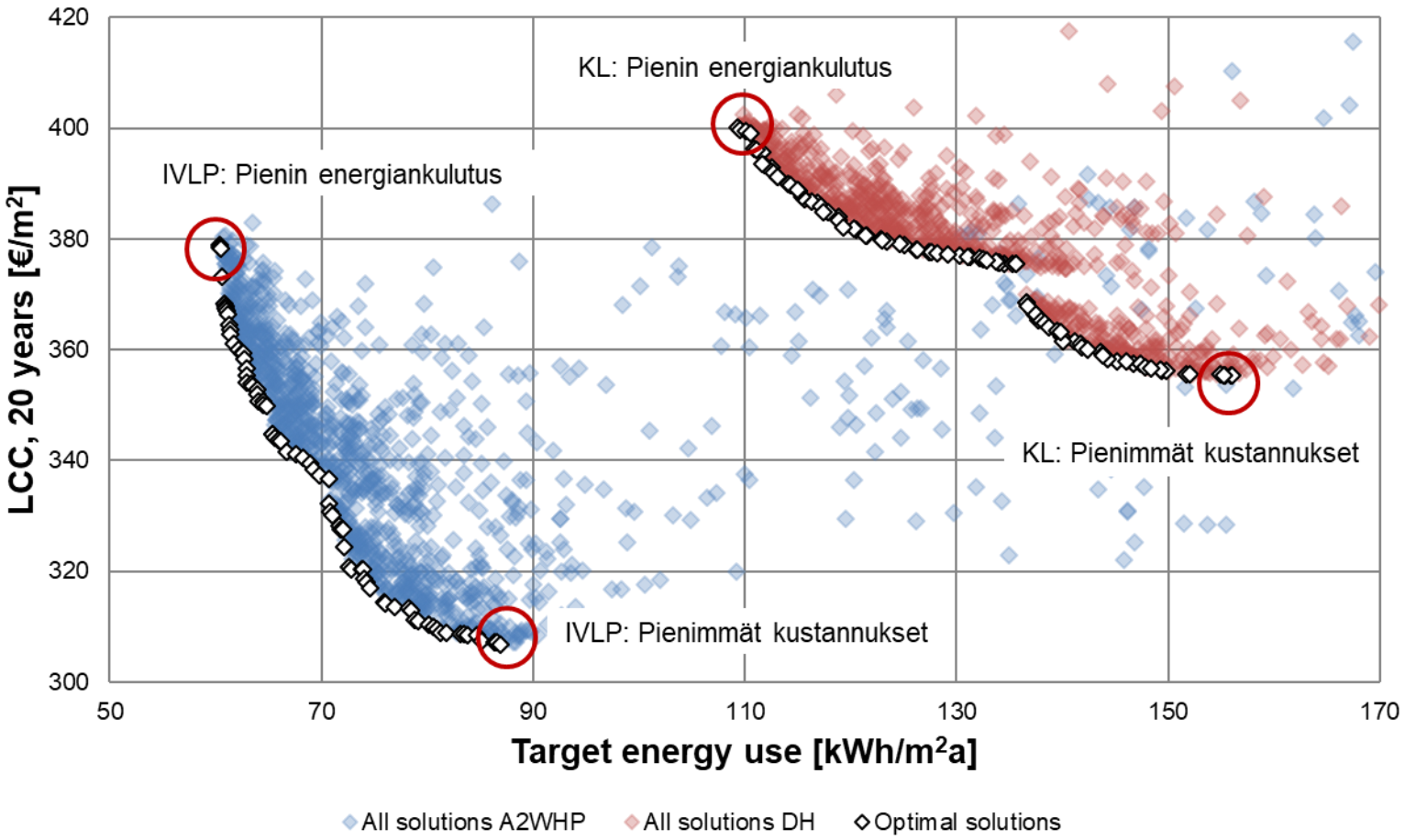
Tulokset: Luhtaan päiväkodin esimerkkiratkaisuja

- **Käytössä maalämpöpumppu (MLP):**

Tavoite-energian-kulutus [kWh/m²a]	Elinkaari-kustannus [€/m²]	PV-ala [m²]	Aurinkoläm-pökeräinten ala [m²]	MLP:n mitoitus [kW]	Ulkoseinän U-arvo [W/m²K]	Yläpohjan U-arvo [W/m²K]	Alapohjan U-arvo [W/m²K]	Ikkunoiden U-arvo [W/m²K]	LTO:n hyötysuhde, pääkoneet [%]
Pienin elinkaarikustannus, Luhtaa (MLP)									
41	145	18	6	18	0,17	0,09	0,16	0,9	60
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 30 kWh/m²a, Luhtaa (MLP)									
30	153	168	6	15	0,17	0,09	0,16	0,9	80
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 20 kWh/m², Luhtaa (MLP)									
20	201	584	18	22	0,14	0,09	0,10	0,6	80
Pienin tavoite-energiankulutus, Luhtaa (MLP)									
18	225	594	24	21	0,08	0,07	0,10	0,6	80

Tulokset: Koukkuniemen vanhainkodin Jukola-talo

- Käytössä kaukolämpö (KL) tai ilma-vesilämpöpumppu (IVLP)



- Laskennassa reaalikorko 3% ja energian vuotuinen hintakehitys 2%

Tulokset: Jukola-talon esimerkkiratkaisuja

- **Käytössä kaukolämpö (KL):**

Tavoite-energian-kulutus [kWh/m²a]	Elinkaari-kustannus [€/m²]	PV-ala [m²]	Aurinkoläm-pökeräinten ala [m²]	IVLP:n mitoitus [kW]	Ulkoseinän U-arvo [W/m²K]	Yläpohjan U-arvo [W/m²K]	Ikkunoiden U-arvo [W/m²K]	Valaistuksen ohjaus, ryhmätilat	Valaistuksen ohjaus, käytävätilat
Pienin elinkaarikustannus, Jukola (KL)									
156	355	275	22	N/A	0,70	0,13	0,8	Kyllä	Kyllä
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 150 kWh/m²a, Jukola (KL)									
150	356	273	64	N/A	0,70	0,08	0,8	Kyllä	Kyllä
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 140 kWh/m²a, Jukola (KL)									
140	362	602	117	N/A	0,70	0,08	0,8	Ei	Kyllä
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 130 kWh/m²a, Jukola (KL)									
130	377	368	89	N/A	0,39	0,10	0,8	Kyllä	Kyllä
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 120 kWh/m²a, Jukola (KL)									
120	382	497	117	N/A	0,27	0,13	0,8	Kyllä	Kyllä
Pienin tavoite-energiankulutus, Jukola (KL)									
109	400	865	120	N/A	0,17	0,08	0,5	Kyllä	Kyllä

Tulokset: Jukola-talon esimerkkiratkaisuja

- **Käytössä ilma-vesilämpöpumppu (IVLP):**

Tavoite-energian-kulutus [kWh/m²a]	Elinkaari-kustannus [€/m²]	PV-ala [m²]	Aurinkoläm-pökeräinten ala [m²]	IVLP:n mitoitus [kW]	Ulkoseinän U-arvo [W/m²K]	Yläpohjan U-arvo [W/m²K]	Ikkunoiden U-arvo [W/m²K]	Valaistuksen ohjaus, ryhmätilat	Valaistuksen ohjaus, käytävätilat
Pienin elinkaarikustannus, Jukola (IVLP)									
87	307	320	6	101	0,70	0,13	0,8	Kyllä	Kyllä
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 80 kWh/m²a, Jukola (IVLP)									
80	310	492	8	124	0,70	0,10	0,5	Kyllä	Kyllä
Pienin elinkaarikustannus kun tavoite-energiankulutus ≤ 70 kWh/m²a, Jukola (IVLP)									
70	337	844	6	99	0,39	0,08	0,5	Kyllä	Kyllä
Pienin tavoite-energiankulutus, Jukola (IVLP)									
60	379	993	118	175	0,17	0,08	0,5	Kyllä	Kyllä

Yhteenveto: Luhtaan päiväkoti

- Uudiskohdetta edustavan päiväkodin tapauksessa maalämpöpumppu oli kiinteistön omistajan näkökulmasta kustannustehokkaampi lämmitysjärjestelmä kuin kaukolämpö.
- Suositeltavia investointeja kaikissa kustannusoptimaalisissa ratkaisuissa riippumatta tavoiteltavasta energiankulutustasosta olivat:
  - Aurinkosähkö- ja aurinkolämpöjärjestelmien asentaminen
  - Ilmanvaihdon tarpeenmukainen CO_2-ohjaus ja erillispoistojen lämmöntalteenotto
  - Valaistuksen läsnäolo-, päivänvalo-, ja vakiovalo-ohjauksen asentaminen
  - Energiatehokkaiden ikkunoiden asentaminen
- Jos tutkitun kohteen energiankulutusta pyrittäisiin pienentämään edelleen elinkaarikustannuksiltaan edullisinta tasoa paremmaksi, kustannustehokkainta olisi:
  - maalämpöpumpulla lämmitetyssä kohteessa investoida ensin energiatehokkaaseen ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon ja lisätä omaa aurinkosähkön tuotantoa. Vasta näiden investointien jälkeen kannattaisi lisätä aurinkolämmön tuotantoa ja parantaa vaipan lämmöneristystasoa rakentamismääräysten vertailutasoa paremmaksi.
  - kaukolämmitetyssä kohteessa investoida ensin energiatehokkaaseen ilmanvaihdon lämmöntalteenottoon ja sen jälkeen lisätä omaa aurinkosähkön- sekä lämmöntuotantoa. Vasta näiden investointien jälkeen kannattaisi parantaa vaipan lämmöneristystasoa rakentamismääräysten vertailutasoa paremmaksi.

Yhteenveto: Jukola-talo

- Saneerauskohdetta edustavan vanhainkodin tapauksessa ilma-vesilämpöpumppu oli kiinteistön omistajan näkökulmasta kustannustehokkaampi lämmitysjärjestelmä kuin kaukolämpö.
- Ulkoseinien lisälämmöneristäminen alkuperäistä tasoa paremmaksi ei ollut tutkituista vaihtoehdoista kustannustehokkain tapa parantaa kohteen energiatehokkuutta.
- Suositeltavia investointeja kaikissa kustannusoptimaalisissa ratkaisuissa riippumatta tavoiteltavasta energiankulutustasosta olivat:
  - Aurinkosähkö- ja aurinkolämpöjärjestelmien asentaminen
  - Yläpohjan lisälämmöneristäminen
  - Vanhojen ikkunoiden korvaaminen uusilla energiatehokkailla ikkunoilla
  - Lämmöntalteenotolla varustetun koneellisen tulo- ja poisto IV-järjestelmän asentaminen koneellisen poisto IV-järjestelmän tilalle
  - Valaistuksen läsnäolo-, päivänvalo-, ja vakiovalo-ohjauksen asentaminen
- Jos tutkitun kohteen energiankulutusta pyrittäisiin pienentämään edelleen elinkaarikustannuksiltaan edullisinta tasoa paremmaksi, kustannustehokkainta olisi:
  - Ilma-vesilämpöpumpulla lämmitetyssä kohteessa lisätä ensin aurinkosähkön tuotantoa, asentaa aikaisempaa energiatehokkaammat ikkunat ja lisätä yläpohjan lämmöneristystasoa
  - kaukolämmitetyssä kohteessa lisätä ensin aurinkolämmöntuotantoa sekä parantaa yläpohjan lämmöneristystasoa ja vasta sitten lisätä aurinkosähkön tuotantoa

Lähteet

Jokisalo, J., Sankelo, P., Sirén, K. & Vinha, J., 2017. **Kustannusoptimaaliset energiakorjaus- ja uusiutuvan energian tuotannon ratkaisut kunnallisissa palvelurakennuksissa**. Rakennusfysiikka 2017 seminaari.

Sankelo, P., Jokisalo, J., Nyman, J., Vinha, J. & Sirén, K., 2018. **Cost-optimal energy performance measures in a new daycare building in cold climate**. International Journal of Sustainable Energy. https://doi.org/10.1080/14786451.2018.1448398. Käsikirjoitusversio saatavilla tutkimushankkeen kotisivuilta.

Kiitos!

Lisätietoja esityksen sisällöstä

Juha Jokisalo Aalto-yliopisto juha.jokisalo@aalto.fi

COMBI-tuloskortti: Kustannusoptimaaliset suunnitteluratkaisut palvelurakennuksissa

Lisätietoja COMBI-hankkeesta

Juha Vinha Tampereen yliopisto juha.vinha@tuni.fi 040 849 0296

https://research.tuni.fi/rakennusfysiikka/tutkimusprojektit/combi

Tämän teoksen suhteen noudatetaan lisenssiä Creative Commons Nimeä-JaaSamoin 4.0 Kansainvälinen.
Lisenssiin voit tutustua osoitteessa https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.fi