Koulujen ja päiväkotien laskettu ja toteutunut energiankulutus

Annu Ruusala ja Juha Vinha
Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikka

Tiivistelmä

Tutkimuksessa selvitettiin, kuinka hyvin koulujen ja päiväkotien standardikäytöllä laskettu vuotuinen energiankulutus vastaa toteutunutta energiankulutusta. Laskelmat tehtiin noudattaen Suomen rakentamismääräyskokoelman osia D3 (2012) ja D5 (2012). Laskelmat tehtiin IDA Indoor Climate and Energy -ohjelmalla ja kuukausitason menetelmällä. Vertailuja tehtiin 20 rakennuksella, jotka ovat valmistuneet vuosina 2005–2014. Rakennusten todellista käyttöä verrattiin standardikäyttöön mahdollisten eroavaisuuksien selvittämiseksi.

Tuloksista käy ilmi, että laskennallinen ja mitattu energiankulutus ovat hyvin erilaisia. Varsinkin lämmitysenergian kulutuksessa esiintyy suuria eroja. Erojen suuruudet vaihtelevat kohteittain, ja osa on helppo selittää rakennuksen todellisella käytöllä. Simuloitujen ja kuukausitason laskentamenetelmän tuloksien erot ovat tyypillisesti vain muutamia prosentteja. Kuitenkin toteutunut energiatehokkuus paranee laskennallisen energiatehokkuuden parantuessa.

1. Johdanto

Rakennuksen energiatehokkuus todistetaan lupavaiheessa energiatodistuksella ja tasauslaskelmalla. Laskennallinen ostoenergiankulutus, joka ilmaisee tontille tuotavan energian määrän, perustuu Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D3 esitettyyn standardikäyttöön sekä rakennuksen ominaisuuksiin.

Ostoenergiankulutus lasketaan teoreettisella käytöllä, mikä saattaa johtaa siihen, että todellinen energiankulutus poikkeaa lasketusta energiankulutuksesta. Mikäli todellinen energiankulutus on huomattavasti suurempi kuin laskennallinen energiankulutus, investoinnit voivat olla kannattamattomia ja energiansäästötavoitteet jäävät toteutumatta.

Päiväkodit ja opetusrakennukset ovat merkittävä osa kuntien rakennuskannasta. Päiväkodit, koulut ja lukiot muodostivat 28,2 %. kerrosalasta kuntien rakennuskannassa vuonna 2005 [1]. Tämä tutkimus on tehty osana COMBI-hanketta, joka keskittyy palvelurakennusten energiatehokkuuteen ja sen parantamiseen. Tiedon kerääminen toteutettiin yhteistyössä Helsingin kaupungin, Tampereen ja Oulun tilapalveluiden kanssa.

2. Case-kohteet ja toteutunut energiankulutus

Tutkimuksessa mukana olevat case-kohteet on rakennettu vuosien 2005 ja 2014 välillä. Taulukossa 1 on esitetty joitain tietoja kohteista. Kohteet sijaitsevat Helsingissä, Oulussa ja Tampereella.

Taulukko 1. Case-kohteiden ominaisuuksia.

Case	Rakennusvuosi	Käyttötarkoitus	Nettoala m^2	Keskimääräinen U-arvo $W/(m^2K)$	Terminen massa $Wh/(m^2K)$
1	2005	Päiväkoti	1307.7	0.250	70
2	2005	Päiväkoti	313.2	0.265	70
3	2006	Päiväkoti	1250.9	0.250	110
4	2006	Päiväkoti	1694.3	0.312	70
5	2006 & 2010	Päiväkoti	2266.1	0.231	110
6	2007	Koulu ja liikuntahalli	6258.5	0.286	200
7	2009	Päiväkoti	1051.5	0.275	200
8	2009	Päiväkoti	1329.3	0.287	70
9	2009	Päiväkoti	377.6	0.192	40
10	2009	School	7354.9	0.250	200
11	2011	Päiväkoti	1512.9	0.214	200
12	2011	Päiväkoti	1443.7	0.126	110
13	2011	Päiväkoti	1153.5	0.217	110
14	2011	Koulu ja päiväkoti	1149.0	0.205	200
15	2012	Koulu ja päiväkoti	2956.2	0.193	200
16	2012	Päiväkoti	819.9	0.260	40
17	2012	Koulu, päiväkoti ja liikuntahalli	5165.9	0.214	200
18	2012	Päiväkoti	2028.4	0.172	110
19	2013	Koulu ja päiväkoti	4804.2	0.206	200
20	2014	Päiväkoti	1362.2	0.179	200

Rakennuksen mittareiden etäluetut sähkö- ja lämpöenergian kulutukset kerättiin vuodelta 2016 ja vuosittainen lämmitysenergian kulutus suhteutettiin S17 lämmitystarveluvuilla vertailukelpoisiksi arvoiksi. Case-kohteelle 3 käytettiin vuoden 2011 kulutuksia, sillä tontille on rakennettu vuonna 2012 lisärakennus.

3. Laskennallinen energiankulutus

Määräysten mukaan energiankulutus voidaan laskea käyttämällä kuukausitason laskentamenetelmää tai dynaamisia simulointeja. Laskennan lähtötietoina käytetään RakMK D3 määrittämää standardikäyttöä, testivuoden 2012 Helsinki-Vantaa ilmastoa ja rakennuksen ominaisuuksia. Laskenta tehdään käyttäen pinta-alan yksikkönä nettoalaa. Nettoala voidaan laskea vähentämällä ulkoseinien rakennusosa-ala bruttoalasta.

Case kohteiden 6 ja 17 yhteydessä on olemassa liikuntatilat, jotka täytyy määräysten mukaan laskea erikseen, koska niiden pinta-ala ylittää 10 % koko rakennuksen nettoalasta. Tarpeenmukaista ilmanvaihtoa ei huomioitu laskelmissa.

Aurinkosähköjärjestelmien sähköntuotto case-kohteissa 12 ja 15 laskettiin kuukausitason menetelmällä ja vähennettiin kuukausitasolla lasketusta kulutuksista ja simulaatioiden avulla lasketuista kulutuksista.

Ilmanvaihtojärjestelmien vuosihyötysuhde laskettiin standardikäytön mukaisilla käyntiajoilla, kohteen suunnitelluilla ilmamäärillä ja poistoilman hyötysuhteella Laskentapalvelut.fi laskurilla.

3.1 Standardikäyttö

Standardikäyttö antaa lähtötietoja energialaskentaan osoitettaessa määräystenmukaisuutta. Taulukossa 2 ja 3 on esitetty laskennan lähtötietoja.

Taulukko 2. Käyttöaika, käyttöaste ja lämpökuormat.

Käyttötarkoitusluokka	**Käyttöaika**	**Käyttöaste -**	**Valaistus W/m²**	**Kuluttaja-laitteet W/m²**	**Ihmiset W/m²**
Opetusrakennus tai päiväkoti	8-16, ma-pe	0,6	18	8	14
Liikuntahalli	8-22, ma-su	0,5	12	0	5

Taulukko 3. Ulkoilmavirta, lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittava energia sekä lämmitys- ja jäähdytysrajat.

Käyttötarkoitusluokka	**Ulkoilmavirta $dm^3/(s \cdot m^2)$**	**Lämmin käyttövesi $kWh/(m^2a)$**	**Lämmitysraja °C**	**Jäähdytysraja °C**
Opetusrakennus tai päiväkoti	3	11	21	25
Liikuntahalli	2	20	18	25

Ilmanvaihtokoneet käynnistetään tuntia ennen käyttöajan alkua ja ne käyvät tunnin käyttöajan päätyttyä. Varsinaisen ilmanvaihdon käyntiajan ulkopuolella rakennuksissa on 0,15 $dm^3/(m^2s)$ ulkoilmavirta. Standardikäytöllä tulo- ja poistoilmamäärät oletetaan yhtä suuriksi. [2]

Lämpökuorma Q (Wh/m^2) valaistukselle, laitteille ja henkilöille lasketaan kaavalla 1.

$$Q = kP \frac{\tau_d}{24h} \frac{\tau_w}{7d} \Delta t \tag{1}$$

missä k = käyttöaste (-)
P = lämpökuorma (W/m^2)
τ_d = käyttötuntien määrä päivässä (h)
τ_w = käyttöpäivien määrä viikossa (d)
Δt = tuntimäärä tarkasteltavalla ajanjaksolla (h)

Valaistuksen ja laitteiden sähköenergian kulutus oletetaan samaksi niiden lämpökuormien kanssa. [2]

3.2 Kuukausitason laskentamenetelmä

Laskenta tehtiin taulukkolaskentaohjelmalla. Kuukausitason laskentamenetelmässä määritettiin joka kuukausi osuus, joka saadaan hyödynnettyä lämpökuormista. Lämpökuormista hyödyksi saatu lämpöenergia vähentää lämmitystarvetta. Hyödynnettävä osuus $\eta_{lämpö}$ (-) lasketaan kaavalla 2.

$$\eta_{lämpö} = \frac{1-\gamma^a}{1-\gamma^{(a+1)}}, \qquad \gamma \neq 1 \tag{2}$$

jossa

$$\gamma = \frac{Q_{lämpökuorma}}{Q_{tila}} \tag{3}$$

missä $Q_{lämpökuorma}$ = rakennuksen lämpökuorma (kWh)
Q_{tila} = rakennuksen tilojen lämmitysenergian tarve (kWh)

Numeerinen parametri *a* (-) lasketaan kaavalla 4.

$$a = 1 + \frac{\tau}{15}\,. \tag{4}$$

Rakennuksen aikavakio τ (h) lasketaan kaavalla 5.

$$\tau = \frac{C_{rak}}{H_{tila}}, \tag{5}$$

missä C_{rak} = rakennuksen sisäpuolinen tehollinen lämpökapasiteetti (Wh/K)
H_{tila} = rakennuksen tilojen ominaislämpöhäviö (kWh)

C_{rak} arvoina käytettiin RakMK D5 taulukon 5.6 arvoja pientaloille, jolloin arvot olivat 40, 70, 110 tai 200 Wh/(m^{2}K) riippuen rakenteista. Näin tehtiin, koska opetusrakennuksille ja päiväkodeille ei ole omia rakennustyyppikohtaisia arvoja. [3] Tarkempiakin menetelmiä olisi käytettävissä, mutta ne ovat työläitä laskea käsin näin isoille ja usealle rakennukselle.

3.3 Dynaaminen simulaatio

IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) on dynaaminen simulaatio-ohjelma, joka soveltuu määräystenmukaisuuden osoittamiseen. Käytetyt lähtötiedot olivat samoja kuin kuukausitason laskentamenetelmässä. Muutamia muutoksia tai huomioita on esitetty tässä alaluvussa.

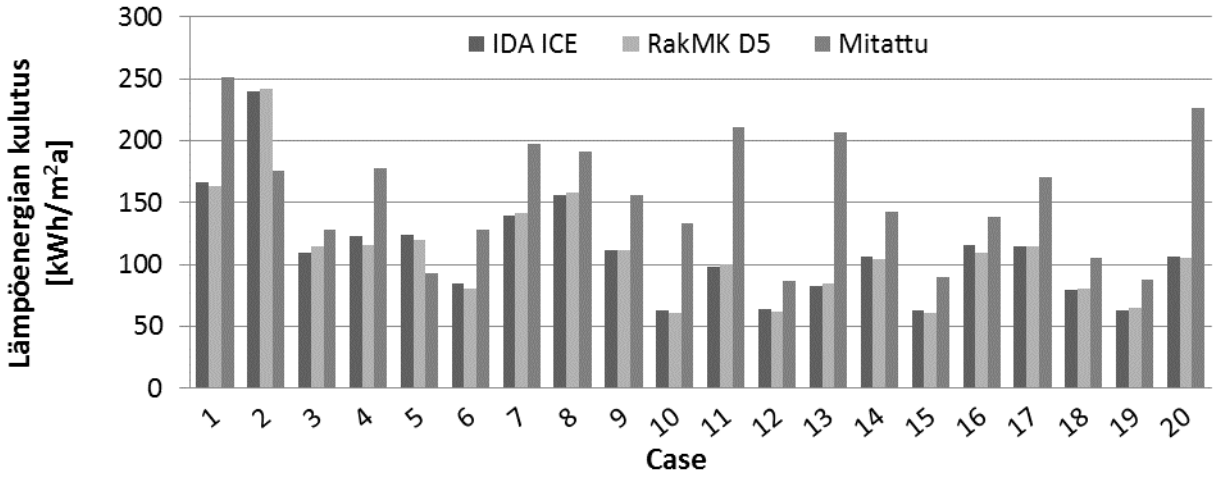
Case-kohteet mallinnettiin ohjelmassa piirustusten mukaan ja simuloitiin enintään tunnin aika-askelin. Kiinteät seinät erottivat vyöhykkeet toisistaan. Vyöhykkeisiin ei asetettu muuta termistä massaa kuin kiinteät rakenteet. Ovet olivat aina suljettuja ja niiden ilmavuotoala oli 0,01 m^2. Ihmistiheys asetettiin 1/6 m^2 [4] ja ihmisten aktiivisuustasoksi asetettiin 1,2 MET, jolla saatiin luotua standardikäytön määrittämä teho 125 W [5].

Puut mallinnettiin pihasuunnitelmien mukaan 3, 5 tai 8 metriä korkeina sylintereinä. Puiden läpäisykertoimeksi valittiin 0,175, joka Simpsonin [6] mukaan kuvaa puiden kesäajan valonläpäisyä. Kesäajan läpäisyä käytettiin koska suurin osa säteilystä vaikuttaa kesällä.

Ikkunat mallinnettiin tarkkojen mittojen mukaan kehäkertoimineen. Verhojen tai sälekaihtimien verhokertoimina käytettiin RakMK D5 Taulukon 5.2 arvoja.

4. Toteutuneen ja laskennallisen kulutuksen erot

Kuvassa 1 voidaan nähdä erot laskentamenetelmien ja toteutuneen lämpöenergian kulutuksen välillä case-kohteissa.

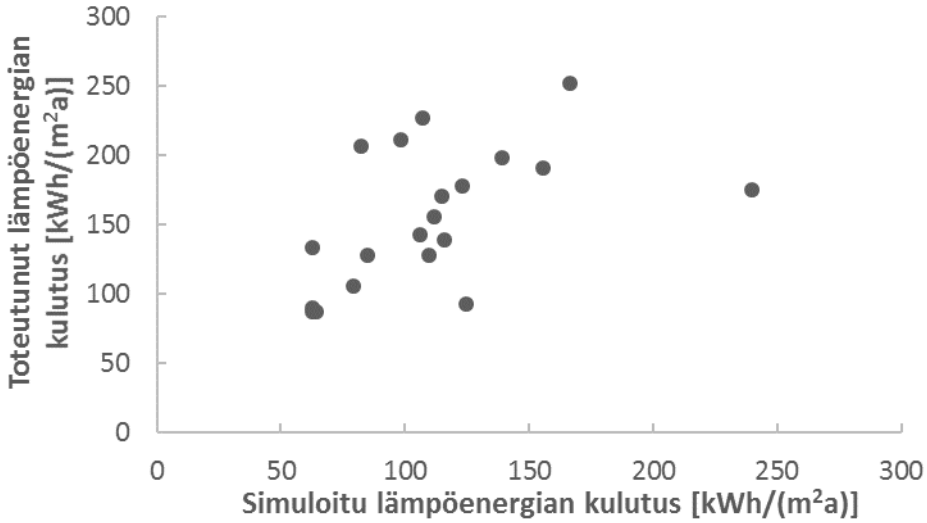


Kuva 1. Rakennusten laskettu ja mitattu lämpöenergian kulutus normitettuna testivuoden Helsinki-Vantaa 2012 säädataan.

Kuvasta 1 nähdään että toteutunut lämpöenergiankulutus on usein huomattavasti suurempi kuin laskenta antaa olettaa. Osa eroista pystytään selittämään rakennuksen todellisella käytöllä, esimerkiksi case numero 13 on ympärivuotisessa käytössä ja päivittäinen aukioloaika on 11,25 tuntia. Ilmanvaihdolla on suuri merkitys rakennuksen energiankulutukselle ja pidempi aukioloaika vaatii myös, että ilmanvaihtokoneet käyvät pidempään.

Kuukausitason laskentamenetelmä antoi keskimäärin 0,9 % pienempiä tuloksia, joten voidaan sanoa, että laskentamenetelmän valinnalla ei ole suurta merkitystä. Toteutunut lämpöenergian kulutus oli keskimäärin 47,9 % tai 44.3 kWh/(m^{2}a) suurempi kuin simuloitu. Toteutunut lämpöenergiankulutus oli 49,4 % tai 45.4 kWh/(m^{2}a) suurempi kuin laskettuna kuukausitason menetelmällä.

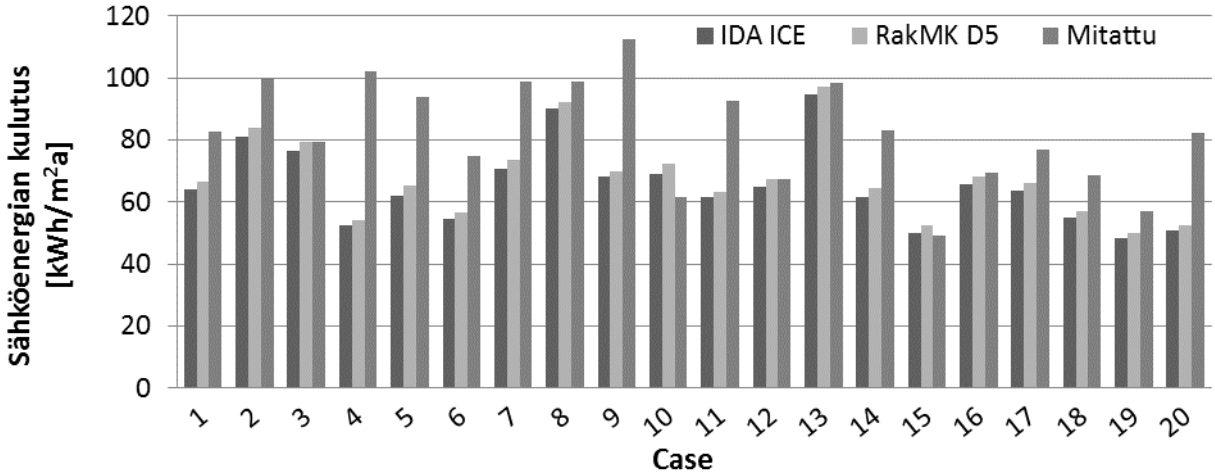
Kuvassa 2 nähdään simuloidun ja mitatun lämpöenergiankulutuksen suhde.



Kuva 2. Rakennusten simuloitu ja mitattu sähköenergian kulutus.

Kuvasta 2 voidaan havaita, että vaikka laskettu ja toteutunut kulutus eroavat toisistaan, laskennallisesti energiatehokkaammat rakennukset ovat myös energiatehokkaampia toteutuman kannalta.

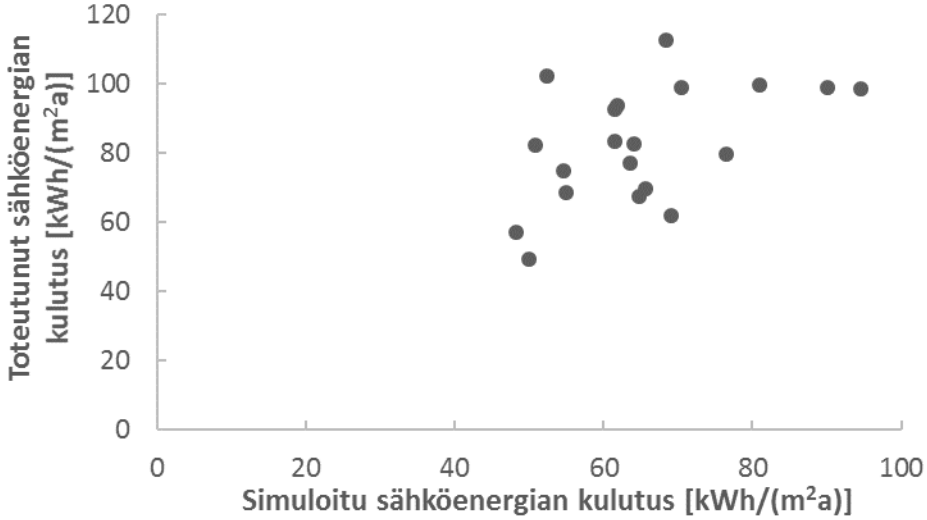
Kuvassa 3 nähdään erot laskentamenetelmien ja toteutuneen sähköenergian kulutuksen välillä.



Kuva 3. Case-kohteiden laskettu ja mitattu sähköenergian kulutus.

Laskennan tuloksista havaittiin, että IDA ICE laskee noin 12,1 % pienemmän sähköenergiankulutuksen ilmanvaihtokoneille, vaikka lukujen tulisi olla samat. Menetelmien välillä sähköenergian kulutuksessa oli 3,8 % ero. Toteutunut sähköenergian kulutus oli keskimäärin 28,4 % tai 17.3 kWh/(m^{2}a) suurempi kuin simuloitu ja 23,5 % 14.7 kWh/(m^{2}a) suurempi kuin kuukausitason menetelmällä laskettu kulutus.

Kuvassa 4 voidaan nähdä simuloidun ja toteutuneen sähköenergian kulutuksen suhde.



Kuva 4. Case-kohteiden simuloitu ja mitattu sähköenergian kulutus.

Kuvasta 4 nähdään että tyypillisesti myös sähköenergian suhteen toteutunut energiatehokkuus paranee laskennallisen energiatehokkuuden parantuessa.

5. Koulujen ja päiväkotien käytön tutkiminen

Koulujen ja päiväkotien henkilökuntaa haastateltiin käyttöajoista ja ihmismääristä. Ylläpitojärjestelmistä löytyi tiedot valaisimista ja niiden tehoista. Tuloilmamäärät ovat suunniteltuja ilmamääriä, jotka tarkastettiin tietojärjestelmistä mahdollisuuksien mukaan.

Taulukkoon 3 on koottu tietoa päiväkotien ja koulujen todellisesta käytöstä. Ulkovalaistus on eritelty sisävalaistuksesta, koska ulkovalaistus ei tuota sisälle lämpöä, mutta kuluttaa sähköä.

Taulukko 3. Koulujen ja päiväkotien standardikäyttö ja todellinen käyttö.

	Valaistus W/m²	**Sisävalaistus W/m²**	**Ulkovalaistus W/m²**	**Ihmistiheys hlö/m²**	**Ihmiset W/m²**	**Tuloilmamäärä dm³/(m²s)**
Standardikäyttö	18	-	-	0,167	14	3,00
Keskiarvo	12,90	11,26	1,64	0,110	9,38	3,29
Minimi	8,36	7,68	0,25	0,077	6,51	2,49
Maksimi	16,89	16,16	3,49	0,151	12,82	4,30

Päiväkodit ovat päivittäin pidempään auki ja kouluilla on monta viikkoa lomaa vuodessa. Keskimäärin päiväkodeille kertyy enemmän käyttötunteja ja kouluille vähemmän kuin standardikäytöllä. Käyttöajat ovat kohteissa melko vaihtelevia, mutta yleensä ne poikkeavat standardikäytöstä. Ihmiset tuottavat ilmaislämpöä, jolloin ihmistiheyden tulisi olla riittävän matala, jotta laskenta ei aliarvioisi lämmitystarvetta. Pidempi käyttöaika tarkoittaa tyypillisesti lisää ilmanvaihtoa, mikä vaikuttaa sähkö- ja lämpöenergian kulutukseen.

Tietoa kerättiin ilmanvaihtojärjestelmien käyntiajoista, mutta koska aikataulut ovat vaihtelevia, on tuloksista haastava koota minkäänlaista keskiarvoa.

Lämpöenergian kulutukseen vaikuttaa myös lämpimän käyttöveden kulutus. Ainoastaan case-kohteessa 12 oli olemassa mittari, joka mittasi rakennuksen lämpimän käyttöveden kulutusta. Kohteessa mitattu kulutus oli lähellä standardikäyttöä, mutta yksittäisen kohteen perusteella ei voida tehdä päätelmiä.

6. Yhteenveto

Rakennusten laskennalliset energiankulutukset ovat etenkin lämpöenergian osalta huomattavasti pienempiä kuin toteutuneet kulutukset. Tästä aiheutuu:

- käyttökustannukset ovat suuremmat kuin laskenta antaa olettaa
- Rakennuksen kustannusoptimaalinen ratkaisu voi olla erilainen, mikä tulee huomioida suunnittelussa.
- Odotetut energiasäästöt kansallisella tasolla voivat jäädä toteutumatta.

Kuitenkin

- laskennallisesti energiatehokkaammat rakennukset ovat tyypillisesti myös todellisuudessa energiatehokkaampia.

Yksi syy mitattujen ja laskettujen kulutusten eroihin on rakennusten todellisen käytön poikkeavuus standardikäytöstä. Standardikäyttöön voitaisiin tehdä joitain lähtöarvojen muutoksia, jos kootaan riittävä otos rakennuksia. Päiväkotien ja koulujen energialaskenta on kuitenkin haastavaa vakioarvoilla, koska rakennusten käyttö vaihtelee hyvin paljon kohteittain.

Lisää tietoa, liittyen koulu- ja päiväkotirakennusten todelliseen käyttöön, tarvittaisiin lämpimän käyttöveden kulutuksesta, sähkölaitteiden tehontiheydestä sekä ihmisten läsnäoloprofiileista.

Lähdeluettelo

[1] Vainio, T., Jaakkonen, L., Nuuttila, H., Nippala, E., Kuntien rakennuskanta 2005. Kuntaliitto, 2006. 49 s.

[2] D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten energiatehokkuus Määräykset ja ohjeet 2012, Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta, Ympäristöministeriö, 2011, 35 s.

[3] D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, Ohjeet 2012. Ympäristöministeriön ohjeet rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskennasta, Ympäristöministeriö, 2013, 74 s

[4] 5/13 Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta annetun ympäristöministeriön asetuksen muuttamisesta, 2013, 5 s.

[5] EQUA Simulation AB, User Manual IDA Indoor Climate and Energy. Version 4.5., 2013, p. 179.

[6] J. R. Simpson and E. G. McPherson, Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento, vol. 32, Atmospheric Environment, 1997, pp. 69-74.