

Juha Jernvall

KERROSTALON LATTIAVIILENNYKSEN LÄMMÖNTALTEENOTON MAHDOLLI- SUUDET

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Seppo Syrjälä
Marraskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Juha Jernvall: Kerrostalon lattiaviilennyksen lämmöntalteenoton mahdollisuudet
The possibilities of heat recovery from underfloor cooling in an apartment building
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Marraskuu 2023

Ilmastonmuutos etenee kiihtyvällä vauhdilla, mikä lisää ääri-ilmiöiden määrää ja kasvattaa keskilämpötiloja. Tämän seurauksena kuumat säät ja lämpöennätykset yleistyvät vaikuttaen erityisesti uudisasuntojen asumismukavuuteen. Korkeat lämpötilat aiheuttavat terveysriskejä etenkin haavoittuvissa ryhmissä. Suomen lain mukaan huoneiston lämpötilan ei tulisi ylittää 32 celsiusastetta viilennyskaudella. Lattiaviilennysjärjestelmät tarjoavat vedottoman ja helposti säädettävän vaihtoehdon huoneiston viilentämistä varten. Järjestelmien hukkalämpöä on mahdollista myös hyötykäyttää. Viilennysjärjestelmien kasvava tarve tekee niistä entistä houkuttelevampia. Tutkimuksessa selvitetään järjestelmän taloudellisia hyötyjä lämpöenergian virtauksen ja lämmöntalteenoton kautta.

Tutkimuksen alussa esitetään lämmönsiirtomenetelmiä, kuten johtumista, konvektiota ja säteilyä. Kerrostalon lämpölaskennanperusteet esitetään kaavojen muodossa ja selitetään niiden soveltamista lämpövirtalaskennassa. Toisessa teorialuvussa keskitytään lattiaviilennykseen ja sen toimintaan. Luvussa esitetään viilennysjärjestelmän vaihtoehtoisia rakenteita ja niiden ohjausta kaavoina sekä havainnollistetaan kuvallisesti sen toimintaperiaatteita. Luku antaa perustason käsityksen lattiaviilennyksen ohjauksesta.

Laskenta keskittyy kerrostaloon virtaavan lämmön määrään hyödyntäen Ilmatieteenlaitoksen nettisivuilla saatavilla olevaa historiadataa. Viilennyspäivien lukumääräksi saatiin keskimäärin 58 päivää kesä- ja syyskuun välisenä aikana. Kyseisen tarkastelujakson aikainen viilennystarve oli noin 15 kWh/asuinneliö. Saatu luku vaihtelee hiukan asuinrakennuksen riippuen. Viilennysjärjestelmän rakenteella on merkittävä vaikutus viilennyksen energiatehokkuuden kannalta. Tehokkuuteen vaikuttaa käytettävä viilennyslähde. Tehokkaimpia viilennysenergian lähteitä ovat maalämpökaivo tai kaukokylmäverkosto. Muitakin kylmä lähteitä on mahdollista käyttää, mutta niitä käytettäessä tulee hukkalämmön uudelleen käyttäminen huomioida mahdollisimman tarkasti.

Työssä esitetty laskelma toteutettiin teoreettisesti Excel-ohjelmistolla Ilmatieteenlaitoksen tarjoaman historiadatan pohjalta. Käytetty data rajaa laskennan tulokset kuvaamaan Etelä- ja Keski-Suomen viilennystarvetta. On huomattava, että laskennan tulokset ovat suuntaa antavia tehtyjen yksinkertaistusten takia. Lisäksi työssä pohdittiin erilaisia järjestelmäkokonaisuuksia ja esitettiin niiden hyötyjä ja haittoja. Yleisenä ongelmana viilennysjärjestelmissä todettiin riski kastepisteen syntymisestä, joka on estettävissä erilaisin ilmanvaihtokeinoin. Tutkimuksen tulosten pohjalta todettiin lattiaviilennysjärjestelmän tarjoavan tulevaisuudessa mahdollisuuden vähentää rakennuksen tarvitsemää nettoenergiantarvetta.

Avainsanat: Lattiaviilennys, kerrostalon viilentäminen, asunhuoneiston viilentäminen, lämmöntalteenotto

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. LÄMPÖVIRTA KERROSTALORAKENTEISSA	3
2.1 Lämpövirta	3
2.2 Lämpökapasiteetti	3
2.3 Johtuminen	5
2.4 Konvektio	5
2.5 Säteily	7
2.6 Lämpövirta ikkunapinnan läpi	9
3. LATTIAVIILENNYKSEN TOIMINTA	11
3.1 Lattiaviilennys yleisesti	11
3.2 Lattiaviilennykset toimintaperiaatteet	13
3.3 Lattiaviilennyksen rakenteelliset haasteet	14
3.4 Lattiaviilennyksen asiakastyytyväisyyden haasteet	15
4. TEOREETTINEN LASKENTA	17
4.1 Tarkasteltavan kohteen ominaisuudet ja käytetty data	17
4.2 Laskennan toteuttaminen	21
5. LASKENNAN TULOKSET JA NIIDEN TULKINTA	23
5.1 Laskennan tulokset	23
5.2 Tulosten analysointi ja vertailu	25
5.3 Eriolaisten järjestelmien hyödyt ja haitat	27
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	29
LÄHTEET	31

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos jatkaa kiihtymistään ja tutkijat tekevät jatkuvasti uusia yhä rajumpia arvioita maapallon keskilämpötilan noususta. Keskilämpötilannousun seurauksena ääri-ilmiöiden määrä tulee lisääntymään nykyisestä. Lämpötilojen vaihtelun lisääntyminen tulee muuttumaan niin vuosi kuin kuukausi tasolla, mikä tarkoittaa yhä kuumempia kesiä ja korkeampia lämpötilaennätyksiä. Kesien lämpötiloissa on jo nyt nähtävissä kuumien ja kuivien kesäpäivien merkittävää määrän kasvua. Suurimmat muutokset ilmastossa tapahtuvat napa-alueiden lähetyillä. Nousseet lämpötilat lisäävät ilmaan haihtuvan veden määrää, mikä ruokkii lämpötilan nousua entisestään. (Karita Kontula-Sokka, 2021)

Lämpenevän ilmaston vaikutus heijastuu elämän jokaiseen osa-alueeseen. Myös asumisesta tulee tulevaisuudessa yhä tukalampaa. Etenkin uudiskerrostaloissa, joita ei ole varusteltu viilennysjärjestelmällä, voivat sisäilmanlämpötilat kohota tukalan korkealle. Korkeat lämpötilat aiheuttavat etenkin vanhusten, perussairaiden ja muuten huonokuntoisten parissa kohonneita terveysriskejä. (Vicedo-Cabrera et al., 2021) Korkeat sisälämpötilat vaikuttavat myös suuresti muuhun väestöön. Sisälämpötilalle on asetettu myös reunaehtoja lakiteksteissä. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen mukaan huoneiston lämpötila ei saa ylittää viilennyskaudella 32 °C (*Sosiaali- ja terveysministeriön asetus...*, 2015). Mikäli lämpötila asuinhuoneistossa ylittää asetetun maksimiarvon, on myös asunnossa vuokralla oleva henkilö oikeutettu saamaan hyvitystä maksimilämpötilan ylittämältä ajalta. Näin ollen kiinteistösijoittajien tulot voivat tulevaisuudessa pienentyä, mikäli viilennystä ei asunnossa hoideta.

Asuntojen ympäristösyistä jatkuvasti tiukentuvat rakennusmääräykset ja jatkuvasti kohoavat kesäajan lämpötilat tulevat pahentamaan tilannetta nykyisestä. Omataloyhtio.fi (Omataloyhtio.fi, 2021) julkaistun artikkelin mukaan yhä useampi asunnonostaja tulee seuraavaa asuntoaan ostaessa varmistamaan, että asunnossa on jokin kiinteä viilennysjärjestelmä. Artikkelin mukaan kuluttajat toivovat järjestelmältä huonekohtaista säädettävyyttä sekä helppokäyttöisyyttä. Artikkelissa kerrotaan myös, että monet kokevat perinteisen ilmalämpöpumppu viilennyksen aiheuttaman vedon tunteen epämiellyttävänä. Lattiaviilennysjärjestelmä kykenisi poistamaan monia artikkelissa esiintyvistä ongelmista. Lattiaviilennysjärjestelmä ei aiheuta epämiellyttävää vedon tunnetta. Se soveltuu

myös helposti kuluttajan tarpeisiin sen helppokäyttöisyyden ja vedottomuuden takia. Viilennyksestä syntyvää hukkalämpöä voitaisiin myös käyttää hyödyksi osana muuta asunnon energijärjestelmää.

Nykyisessä taloustilanteessa ihmisiä puhuttaa usein uusien järjestelmien kustannusten suhde siitä saataviin hyötyihin. Tutkimuksessa pyritään vastaamaan lattiaviilennysjärjestelmän hyötyihin tarkastelemalla laskennallisesti kerrostaloon virtaavaa lämpö määrää. Tarkastelulla pyritään esittämään karkea kuva saatavista hyödyistä. Lisäksi tutkimuksessa tarkastellaan kirjallisuuslähteiden pohjalta erilaisten lattiaviilennysjärjestelmien ominaisuuksia ja niiden käytöstä aiheutuvia riskejä sekä tyytyväisyys haittoja. Tutkimus on rajattu tarkastelemaan Etelä- ja Keski-Suomen uudiskerrostaloja.

Tarkastelu aloitetaan esittämällä luvussa 2 kerrostalon lämmönsiirtoon liittyvä teoria. Luvussa 3 syvennetään teoriaa esittämällä lattiaviilennykseen, sen ohjaukseen ja säätöparametreihin liittyviä aineistoja. Luvussa 4 tehdään laskelma teorialuvuissa esitettyjen kaavojen pohjalta. Laskelmalla vastataan tutkimuskysymykseen: Kuinka paljon lämpöenergiaa virtaa kerrostaloon kesäkuukausien aikana? Luvussa 5 esitetään vastaukset tutkimuskysymykseen: Kuinka paljon lämpöenergiaa on mahdollista saada talteen lattiaviilennyksen avulla ja mihin saatu hukkalämpö voidaan käyttää? Kysymykseen vastataan esittämällä laskennan tulokset ja käydään läpi lattiaviilennyksen talteenottoon liittyvien teknologia vaihtoehdot sekä mahdollisuudet. Luvussa 6 esitetään johtopäätökset ja pohditaan lattiaviilennysjärjestelmän soveltumista nykyisten energijärjestelmien yhteyteen.

2. LÄMPÖVIRTA KERROSTALORAKENTEISSA

Lämpöä voi siirtyä kolmella eri tavalla. Näitä tapoja ovat johtuminen, säteileminen ja konvektio (Björkholtz, 1997). Lämmön siirtyminen kahden pisteen välillä johtuu pisteiden välisestä lämpötilaerosta. Lämpövirta pyrkii tasaamaan pisteiden lämpötilaerot virtaamalla lämpimämmästä pisteestä kylmempään pisteeseen. (Incropera, 1981, s. 3) Tämä luku käsittelee kerrostalon rakenteiden sisäistä lämmönsiirtoa ja esittää kaikki myöhemmin työssä käytettävät kaavat perusteluineen.

2.1 Lämpövirta

Lämmönsiirtoa ajanfunktiona kuvataan lämpövirralla $Q [W]$. Lämpövirran kahden pisteen välille synnyttää pisteiden välinen lämpötilaero. Lämpövirta esitetään kaavassa 2.1. (VDI e V, 2010, chap. B1)

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$

Tarkastellessa tilannetta, jossa lämpövirtaa suuren seinäpinnan läpi on laskennan helpottamiseksi järkevää tarkastella lämpövirran tiheyttä $q \left[\frac{W}{m^2} \right]$. Lämpövirran tiheys esitetään kaavassa 2.2. (VDI e V, 2010, chap. B1)

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2.2).$$

Lämpövirran tiheys kertoo, kuinka paljon lämpövirtaa siirtyy pinnan yli yhtä neliometriä kohden. Lämpövirran tiheys saadaan jakamalla lämpövirta Q pinta-alalla $A [m^2]$. Kappaleen ollessa saturaatiopisteessä lämpövirran tiheys pysyy vakiona kaikissa poikkileikkauksen pisteissä.

2.2 Lämpökapasiteetti

Lämpökapasiteetti kuvaa aineen kykyä sitoa itseensä lämpöä. Aineen lämpökapasiteettiin vaikuttaa aineen ominaisuudet, kuten tiheys $\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ ja aineen ominaislämpökapasiteetti $c \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$. Aineeseen sitoutuneen lämmön määrä $Q_m [J]$ lasketaan kertomalla aineen

massa m [kg], ominaislämpökapasiteetilla ja lämpötilan muutoksella ΔT [K]. Aineeseen sitoutuneen lämmön määrä eli lämpökapasiteetti esitetään kaavassa 2.3. (Siikanen, 2014, s. 58)

$$Q = mc\Delta T \quad (2.3)$$

Kaavan 2.3 käyttäminen suoraan rakenteisiin sitoutuneen lämmön laskentaan on hankalasti sovellettavissa. Vaikeuksia aiheuttaa seinäpinnan massan määrittäminen. Massa voidaan kuitenkin kirjoittaa tiheyden ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ ja tilavuuden V [m^3] tulona. Tämä tulo esitetään kaavassa 2.4.

$$m = \rho V \quad (2.4)$$

Korvattaessa kaavassa 2.3 esiintyvä massa kaavan 2.4 yhtäsuuruudella saadaan sitoutuneen lämmön määrä esitettyä tilavuuden sekä tiheyden avulla. Tilavuuden ja tiheyden mukaan määritetty lämpökapasiteetti esitetään kaavassa 2.5.

$$Q = \rho V c \Delta T \quad (2.5)$$

Koska laskennan kannalta on järkevämpi tutkia pinta-alaa kohden sitoutuvaa lämpömäärää, saadaan kaavaa 2.5 muokkaamalla kaavalla 2.2 esitettyä sitoutunut lämpövirran tiheys. Sitoutunut lämpövirran tiheys on esitetty kaavassa 2.6, missä d [m] on ainekerroksen paksuus,

$$q = \frac{\rho d c \Delta T}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Sitoutunut lämpövirran tiheys voidaan määrittää jokaiselle rakenteen materiaalikerrokselle erikseen. Tämä onnistuu määrittämällä materiaalin lämpötilan muutoksen. Lämpötilan muuttumista voidaan kuvata keskilämpötilan T_k [K] erotuksena. Lämpötilan nousua laskettaessa voidaan olettaa jokaisen ainekerroksen lämpötilan olevan suoraan verrannollinen lämpövastukseen (Siikanen, 2014, p. 55). lämpö voidaan homogeenisen aineen tapauksessa laskea aineen pintalämpötilojen keskiarvona. Keskilämpötilan laskemiseen tarvittavat tiedot esitetään kaavassa 2.7, missä T_1 [K] ja T_2 [K] kuvaavat ainekerroksen pintojen lämpötiloja,

$$T_k = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2.7)$$

Laskettaessa kerrostalon lämpökapasiteettia tulee myös huomioida huoneilmaan sitoutuneen lämmönenergian määrä sekä ilmanvaihdon mukanaan tuoma lämpöenergia. Huoneilmaan sitoutuneen energian määrä saadaan laskettua kaavalla 2.5. Ilmanvaihdon mukana huoneistoon kulkeutuva lämpömäärä $Q_{ilmanvaihto}$ saadaan laskettua kaavan 2.5 avulla vähentämällä tuloilmanlämpömäärästä poistuvan sisäilmanlämpömäärä. Saatu

tulos esitetään kaavassa 2.8, jossa ρ_i on ilman tiheys, V_i on ilman tilavuus ja c_i on ilman ominaislämpökapasiteetti vakioaineessa.

$$Q_{ilmanvaihto} = \rho_i V_i c_i (T_{Tulo} - T_{sisä}) \quad (2.8)$$

Ilman tiheys riippuu vallitsevista olosuhteista. Kuvattaessa ilmaa ideaalikaasuna saadaan sen tiheys laskettua kaavalla 2.9.

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \quad (2.9)$$

missä p [Pa] on vallitseva paine, M [kg/mol] on aineen moolimassa, R [$\frac{J}{mol \cdot K}$] on moolinen kaasuvakio ja T [K] on vallitseva ilmanlämpötila.

2.3 Johtuminen

Johtumisessa molekyylien liike-energia siirtyy molekyylistä toiseen aiheuttaen lämpövirran. Johtumisen taustalla on energian siirtyminen korkeamman energian partikkelista matalamman energian partikkeliin niiden törmätessä. (Incropera, 1981, s. 5) Johtumalla siirtyvää lämpöenergian virtaa \dot{Q} [W] kappaleen läpi kuvataan Fourierin lailla (VDI e V, 2010, luku B1). Fourierin laki on esitetty kaavassa 2.10.

$$q = k \frac{T_1 - T_2}{d}, \quad (2.10)$$

missä d [m] pisteiden välinen etäisyys, $(T_1 - T_2)$ [K] pisteidenvälinen lämpötila ero ja k [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$] on jokaiselle kappaleelle ominainen lämmönjohtavuus.

Monimutkaisempien useammasta materiaalista koostuvien rakenteiden läpi johtuvaa energiaa voidaan tarkastella kerros kerrallaan. Tarkastelussa tarvitaan kunkin kerros materiaalin lämmönjohtavuus sekä kerroksen paksuus. Tarkastellessa useamman kerroksen tilannetta pysyy tasapainotilassa olevan rakenteen lämpövirta samana läpi koko poikkileikkauksen. (VDI e V, 2010, luku E1)

2.4 Konvektio

Konvektiossa lämpöenergia siirtyy paikasta toiseen kaasu tai nestevirtauksen avulla (Siikanen, 2014, p. 40). Konvektiota on luonnollista ja pakotettua. Luonnollinen konvektio syntyy ilman luontaisesta lämpöliikkeestä ja pakotettu konvektio syntyy jonkin ulkoisen voiman vaikutuksesta. Pakotettu konvektiolle q_{konv} saadaan johdettua kaava, kun tiedetään lämmönsiirtokerroin $h \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ ja piinan lämpötila T_s sekä ympäröivän fluidin lämpötila T_∞ . Seinän lämpötilan ollessa korkeampi kuin ympäröivän ilman tapahtuu lämmönsiirtoa pois päin seinäpinnasta. Kun ympäröivän fluidin lämpötila on korkeampi, tapahtuu lämmönsiirtoa kohti seinää. Valitaan lämpövirta seinään päin positiiviseksi suunnaksi. Laskukaava seinäpinnalla esiintyvistä konvektiosta esitetään kaavassa 2.11. (VDI e V, 2010, luku B1)

$$q_{konv} = h(T_\infty - T_s) \quad (2.11)$$

Kaavassa (2.10) esiintyvän lämmönsiirtokertoimen h arvo saadaan laskettua erilaisten korrelaatioiden avulla. Nusseltin korrelaatio pakotetulle konvektiolle on yksi monista korrelaatioista ja se esitetään jakamalla lämmönsiirtokertoimen h ja kappaleen pituuden $L [m]$ tulo termisellä lämmönjohtokyvyllä k . Saatu Nusseltin korrelaatio esitetään kaavassa 2.12. (VDI e V, 2010, luku B1)

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2.12)$$

Tarkasteltaessa reaali maailman ilmiöitä voidaan olettaa ulkoseinäpinnalla tapahtuvaa konvektion olevan turbulenti. Näin ollen Nusseltin luku voidaan laskea myös Reynoldsin luvun Re ja Prandtin luvun Pr avulla käyttäen kokeellisesti todettuja kertoimia. Laskenta tapa on esitetty kaavassa 2.13. (VDI e V, 2010, luku G4)

$$Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (2.13)$$

Kaavassa 2.13 esiintyvällä Reynoldsin luvulla kuvataan yleisesti virtaavan fluidin ominaisuuksia. Reynoldsin luku voidaan laskea, kun tiedetään virtaavan fluidin nopeus $w \left[\frac{m}{s} \right]$, seinäpinnan pituus L sekä olosuhteista riippuva fluidin kinemaattinen viskositeetti $\nu \left[\frac{kg}{sm} \right]$. Reynoldsin luvun laskukaava esitetään kaavassa 2.14. (VDI e V, 2010, luku B1)

$$Re = \frac{wL}{\nu} \quad (2.14)$$

Kaavassa (2.13) esiintyvälle Prandtin luvulle Pr saadaan laskettua arvo, kun tiedetään virtaavan fluidin dynaaminen viskositeetti $\mu \left[\frac{kg}{ms} \right]$, ominaislämpökapasiteetti vakio paineessa $c_p \left[\frac{J}{kgK} \right]$ sekä terminen lämmönjohtavuus k . Prandtkin luvun laskukaava esitetään kaavassa 2.15. (VDI e V, 2010, luku B1)

$$\text{Pr} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (2.15)$$

Reunoldsin- ja Prandtlin luvussa esiintyvät fluidin ominaisuudet ovat riippuvaisia fluidin tilasta. Ominaisuudet saadaan kirjallisuudesta esiintyvistä taulukoista.

2.5 Säteily

Säteilyssä energia siirtyy sähkömagneettisen aaltoliikkeen välityksellä valon nopeudella. Kaikki kappaleet, joiden lämpötila on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella emittoivat säteilyä. (Siikanen, 2014, p. 40) Ideaalinen lämpösäteilijä on musta kappale, jonka kokonaissäteily voidaan laskea Stefan-Boltzmannin vakion $\sigma \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]$ ja lämpötilan neljännen potenssin tulona. Mustankappaleen emittoiman lämpösäteilyn määrä esitetään kaavassa 2.16. (VDI e V, 2010, luku. B1)

$$q_m = \sigma \cdot T^4 \quad (2.16)$$

Todellisuudessa harvaa kappaletta voidaan kuvata mustana kappaleena. Todellisia reaalia maailman pintojen lähettämää säteilyä kuvataan harmaankappaleen säteilyinä. Harmaankappaleen säteily Q_s saadaan kertomalla mustankappaleen säteily emissiviteetillä ε . Emissiviteetti on kerroin, joka saa arvoja välillä 0,0 – 1,0. Arvo kertoo, kuinka lähellä kappaleen lähettämä säteily on ideallisen mustan kappaleen säteilykuviota. Harmaankappaleen säteily esitetään kaavassa 2.17. (VDI e V, 2010, luku. B1)

$$q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.17)$$

Kahden samansuuntaisen ja samankokoisen, mutta erilämpötilassa olevan kappaleen välistä säteilyä voidaan yksinkertaisesti kuvata muokkaamalla kaavaa 2.16 lämpötilan neljännen potenssin paikalle eri pintojen lämpötilojen neljänsien potenssien erotus. Saatu tulos esitetään kaavassa 2.18. (VDI e V, 2010, luku K1)

$$q_{\rightarrow} = \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.18)$$

Säteilyä rakennuksen seinäpintaan kohdistuu kaikesta sitä ympäröivästä materiaalista. Suurimpia säteily lähteitä ovat aurinko ja ilmakehä. Auringon emittoiman säteily vastaa 5800 K lämpötilassa olevan mustan kappaleen säteilyä. Ilmakehä kuitenkin rajoittaa auringon säteilyä ja kaikki säteily ei päädy maanpinnalle. (Babatunde, 2012; Incropera, 1981) Maanpinnalle kohdistuvan säteilyn määrää kuvataan kaavassa 2.19.

$$I_{aurinko,m} = I_{aurinko} \cos\beta + I_{Dif} \quad (2.19)$$

Kaavassa esiintyvä $I_{aurinko}$ kuvaa auringon suoran säteilyn intensiteettiä $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, I_{Dif} kuvaa auringon diffuusin säteily intensiteettiä $\left[\frac{W}{m^2}\right]$, β kuvaa auringon korkeuskulmaa $[\circ]$ ja $I_{aurinko,m}$ kuvaa maahan osuvaa auringon kokonaissäteilyä $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

Auringon säteilyn osuessa maanpinnalle osa säteilystä heijastuu takaisin ilmakehään, osa absorboituu kappaleeseen ja osa läpäisee kappaleen. Heijastumiskertoimen ρ $[-]$, absorptiokertoimen α $[-]$ ja läpäisykertoimen τ $[-]$ summan tulee olla yksi. Näin ollen kertoimien välistä yhteys saadaan kuvattua kaavalla 2.20. (VDI e V, 2010, luku b1)

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.20)$$

Todellisuudessa harva kappale läpäisee valoa ja läpäisykerroin τ saa arvon 0. Heijastuneen ja absorboituneen säteilyn suhde voidaan nyt laskea kaavan (2.21) mukaan.

$$\rho = 1 - \alpha \quad (2.21)$$

Maanpinta imee itseensä paljon auringon lähettämää säteilyä. Harmaana kappaleena se myös säteilee merkittävän määrän pitkäaaltoista säteilyä takaisin ilmakehään. Koska ympäristöä voidaan kuvata harmaana kappaleena, sen lähettämän säteilyn intensiteetti $I_{ympäristö}$ voidaan esittää kaavan 2.16 avulla. Ympäristön lähettämä säteily esitetään kaavassa 2.22.

$$I_{ympäristö} = \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (2.22)$$

Maanpinnan tavoin seinäpinta toimii harmaana kappaleena ja sen lähettämää säteilyä voidaan kuvata samalla tavalla harmaankappaleen säteilyä. Seinäpinnan lähettämä säteily $I_{emit,s}$ esitetään kaavassa 2.23.

$$I_{s,emit} = \varepsilon_s\sigma T_s^4 \quad (2.23)$$

Myös taivas säteilee maahan siihen absorboitunutta säteilyä. Taivaan lähettämä säteily johtuu suuresti ilmakehässä olevien hiilidioksiidi- sekä vesimolekyylien määrästä. Vaikka taivaan lähettämän säteily ei ole täydellisesti mustankappaleen säteilyä voidaan säteilyn määrää arvioida käyttäen mustan kappaleen säteilyä. Kaavassa esiintyvä T_{sky} saa arvoja $230\text{ }^\circ K$ aina $285\text{ }^\circ K$ asti. (Incropera, 1981, chap. 12) Taivaan lähettämää säteilyä kuvattaessa mustana kappaleena voidaan se esittää kaavan 2.15 avulla. Taivaan lähettämä säteily esitetään kaavassa 2.24.

$$I_{taivas} = \sigma T_{taivas}^4 \quad (2.24)$$

Seinäpintaan kohdistuu säteilyä auringosta, ilmakehästä sekä ympäristöstä. Lisäksi seinäpinta lähettää säteilyä takaisin ympäristöön. Koska termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön mukaan energiaa ei voi luoda tyhjästä, eikä sitä voi kadota, voidaan seinäpintaan kohdistuvalle säteilylle johtaa kaava (VDI e V, 2010, luku B1). Valitaan suunta seinään päin positiiviseksi. Seinäpintaan kohdistuva kokonaissäteily esitetään kaavassa 2.25.

$$q_{\text{säteily}} = a_{\text{aurinko}} I_{\text{aurinko}} + a_{\text{taivas}} I_{\text{taivas}} + a_D I_D + I_{\text{ympäristö}} - I_{\text{s,emit}}, \quad (2.25)$$

missä a_{aurinko} on auringon lähettämän säteilyn absorptiokerroin, I_{aurinko} on auringon lähettämäkokonaissäteily, a_{taivas} ilmakehän lähettämän säteilyn absorptiokerroin, I_{taivas} on ilmakehän lähettämän säteilyn määrä, $I_{\text{ympäristö}}$ on ympäristön lähettämän säteilyn määrä, a_D on diffusoituneen säteilyn absorptiokerroin, I_D on diffusoituneen säteilyn intensiteetti ja $I_{\text{s,emit}}$ on seinän lähettämän säteilyn määrä.

2.6 Lämpövirta ikkunapinnan läpi

Ikkunoiden lämmöneristävyyttä kuvataan lämmönläpäisykerroimella $U \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ ("Ikkunoiden energiatehokkuus," 2022). Ikkunavalmistajat kertovat usein ikkunoidensa U-arvot omissa esitteissään. Ympäristöministeriö on asetuksessaan määrännyt, että uudisrakennusten ikkunoiden U-arvo ei saa ylittää $1.0 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ (Ympäristöministeriön asetus uuden..., 2017). Ikkunapinnan läpi kulkeva lämpövirran tiheys $q_{i,joht}$ saadaan kertomalla U-arvo ulko- ja sisälämpötilojen erotuksella ΔT . Ikkunan lämmönläpäisykyky esitetään kaavassa 2.26.

$$q_{i,joht} = U_{\text{ikkuna}} \Delta T \quad (2.26)$$

Olennaista ikkunoiden lämpöenergian läpäisylle on myös auringonsäteilyn kokonaisläpäisykerroin $g [-]$. Suhdeluku g on ikkunavalmistajan antama luku, joka kuvaa kuinka suuri osa ikkunaulkopintaan tulleesta auringon kokonaissäteilystä kulkeutuu ikkunapinnan läpi. ("Ikkunoiden energiatehokkuus," 2022). Ikkunapinnan läpi kulkeutuva auringon lämpösäteily $q_{i,sät}$ esitetään kaavassa 2.27, missä g on ikkunaulkopinnan läpäisykerroin ja I_{aurinko} on ikkunapintaan kohdistuva auringon kokonaissäteily.

$$q_{i,sät} = g I_{\text{aurinko}} \quad (2.27)$$

Ikkunapinnan yli kulkeva kokonaislämpövirran tiheys $q_{ikkuna} \left[\frac{W}{m^2} \right]$ esitetään kaavassa 2.28.

$$q_{ikkuna} = q_{i,sät} + q_{i,joht}, \quad (2.28)$$

missä $q_{i,sät}$ kuvaa kaavassa 2.27 esiintyvää säteilyä ikkunapinnan läpi ja $q_{i,joht}$ kuvaa kaavassa 2.26 esiintyvää johtumista ikkunapinnan läpi.

3. LATTIAVIILENNYKSEN TOIMINTA

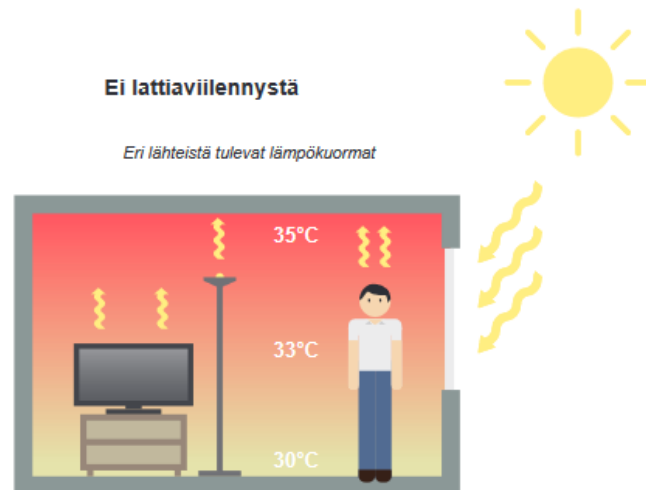
Lattiaviilennyksellä tarkoitetaan lattiaan asennettujen vesikiertoputkien avulla toimivaa asunnon viilennysjärjestelmää. Järjestelmä käyttää hyväkseen samaa vesikiertoputkistoa kuin lattialämmitys ja se soveltuu käytettäväksi kaikkien tunnettujen lämmitysmuotojen kanssa ("Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022, luku 1.1).

3.1 Lattiaviilennys yleisesti

Lattiaviilennys soveltuu hyvin asennettavaksi etenkin uusiin kohteisiin, jossa heti suunnittelu vaiheessa voidaan vaikuttaa lattiaviilennyksen vaatimiin lisäyksiin rakenteissa ja järjestelmissä. Lattiaviilennys sopii myös muihin kohteisiin, joissa on jo aikaisemmin asennettu lattialämmitysjärjestelmä. ("Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022)

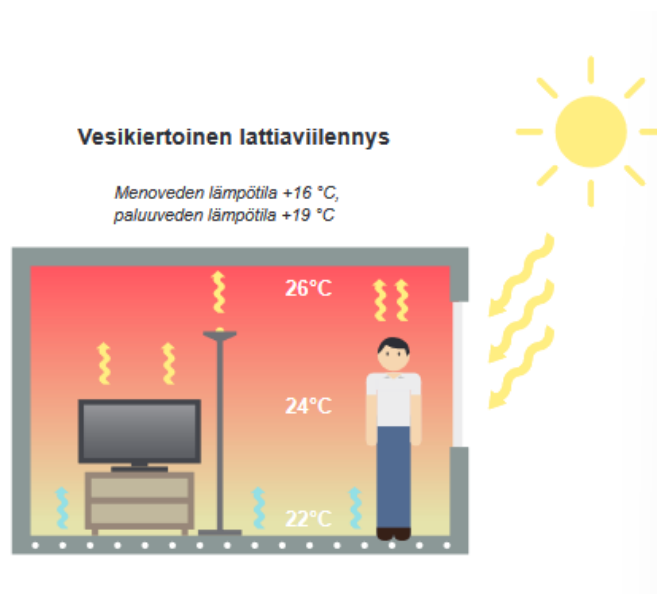
Järjestelmä hyödyntää maalämmön, kaukokylmän tai muusta vastaavasta lähteestä saatua jäähdytysenergiaa. Maalämpökohteissa lattiaviilennyksen hyödyntäessä suoraan maalämpöpiirin keruenergiaa tulee järjestelmästä erittäin energiatehokas, sillä energiaa kuluu ainoastaan keruu- ja viilennyspiirin nestevirtausten aikaan saamiseen. Lisäksi järjestelmä voi ottaa talteen viilennyspiirin lämmön ja hyödyntää sitä esimerkiksi käyttöveden lämmittämiseen, minkä jälkeen hukkalämpö voidaan johtaa takaisin maalämpökaivoon. ("Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022, luku 1.1)

Lattiaviilennyksellä on mahdollista saada laskettua merkittävästi huoneiston keskilämpötilaa ja luoda helpotusta kesäajan tukalaan olotilaan ("Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022). Kuvassa 1 esitetään huone, jossa ei ole käytössä lattiaviilennysjärjestelmää.



Kuva 1. Huoneisto ilman viilennysjärjestelmää. ("Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022)

Kuvasta 1 voidaan huomata huonelämpötilan olevan joissakin kohdissa merkittävästi yli Terveysministeriön asettaman 32 °C rajan. Kun samaan huoneistoon asennetaan lattiaviilennysjärjestelmä, tilanne muuttuu merkittävästi. Huoneen erikorkeuksien lämpötilat voivat pudota melkein 10 °C. Kuvassa 2 havainnollistetaan järjestelmän vaikutusta huoneiston eri osien lämpötiloihin.



Kuva 2. Kuvan 1 huoneisto lattiaviilennysjärjestelmän kanssa ("Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022)

Kuvan huoneen keskilämpötila on noin 24 °C, joka kuumana kesäpäivänä tuntuu mukavan viileältä. Lämpötilan vaikutukseen vaikuttaa myös huoneilmankosteus, jonka määrää voidaan pienentää esimerkiksi tuloilman viilennyksellä.

3.2 Lattiaviilennykset toimintaperiaatteet

Lattiaviilennysjärjestelmän viilennysteho perustuu putkistossa kiertävän nesteen huoneen keskilämpötilaa matalampaan lämpötilaan. Kiertäessään lattian sisällä vesi lämpee ja kuljettaa mukanaan huoneistossa olevaa lämpöenergiaa. Lattiaviilennysjärjestelmien tehokkuus perustuu niiden suureen säteilypinta-alaan. Suuren pinta-alan ansiosta viilennysteho jakautuu tasaisesti huoneen jokaiseen osaan, minkä takia suuret lämpötilaerot huoneen eri pisteiden välillä on mahdollista minimoida. Järjestelmällä saavutetaan usein miellyttävä huonelämpötila hieman yli 22 °C lattian pintalämpötiloilla. Järjestelmää ei kuitenkaan koskaan tule ajaa alle 20 °C pintalämpötiloilla, koska se voi aiheuttaa epämiellyttävää tunnetta jalkapohjissa ja kasvattaa riskiä kosteuden tiivistymiseen rakenteissa. ("Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022, luku 1.3)

Lattiaviilennyksen teho vaihtelee paljon riippuen pintaan kohdistuvasta auringonsäteilystä. Auringolle alttiilla pinnoilla lattiaviilennys teho voi kasvaa moninkertaiseksi. Tehon laskentaan vaikuttaa lisäksi kaikki huoneistossa olevat huonekalut. Suurimmat vaikutukset ovat lattiapintoja paljon peittäville esineillä, kuten sängyillä ja matoilla. Tarkempia laskelmia tehdessä on käytettävä simulaatiota, jotta saadaan huomioitua ikkunoiden läpi suoraan lattialle tullut säteily sekä huonekalujen vaikutus viilennys tehoon. Karkeassa laskennassa voidaan kuitenkin käyttää yksinkertaista kaavaa huoneen keskimääräisen lämpötilan ja lattiapinnan keskilämpötilan välillä. Kaavan mukaan viilennys teho on suoraan verrannollinen lämpötilojen erotukseen. Lähteestä ja siinä käytössä olevasta standardista riippuen kaavassa esiintyy, joko kokeellisesti todettu kerroin $n[-]$ 6,5 tai 7. Laskutapa lattiaviilennysteholle esitetään kaavassa 3.1. ("Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022; Zhao et al., 2016, p. 1092)

$$q_{\text{viilennys}} = n \cdot (T_{\text{huone}} - T_{\text{lattia}}) \quad (3.1)$$

Kaavan 3.1 mukaan jokaista asteen lämpötila eroa kohden järjestelmän viilennysteho on 7 W/m^2 . Sisälämpötilan ollessa 30 °C ja lattian pintalämpötilan ollessa 22 °C päästään jo peräti 56 W/m^2 viilennys tehoon.

3.3 Lattiaviilennyksen rakenteelliset haasteet

Lattiaviilennysjärjestelmän toimivuudella on omat haasteensa. Yksi suurimmista haasteista on kastepisteen syntyminen viileälle lattiapinnalle. Kastepisteilmion takia lattiapinnalle tiivistyy kosteutta, josta voi seurata lattiapinnan vettymistä tai muiden lattiarakenteiden pilaantumista. Kastepisteilmiö johtuu sisäilmassa olevan kosteuden tiivistymisestä kylmälle pinnalle, kun ilman suhteellinen kosteus ylittää 100 % rajan. (“Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa,” 2022, s. 27). Suhteellinen kosteus kuvaa siis tietyssä lämpötilassa olevaan ilmaan sitoutuneen kosteuden osapaineen suhdetta samoissa olosuhteissa olevan kylläisen vesihöyryn paineen suhteen. Suhteellisen kosteudelle esitetään laskutapa kaavassa 3.2. (“Interactive Equations - Knovel,” 2023)

$$\varphi = \frac{p_{H_2O}}{p_{kyl,H_2O}}, \quad (3.2)$$

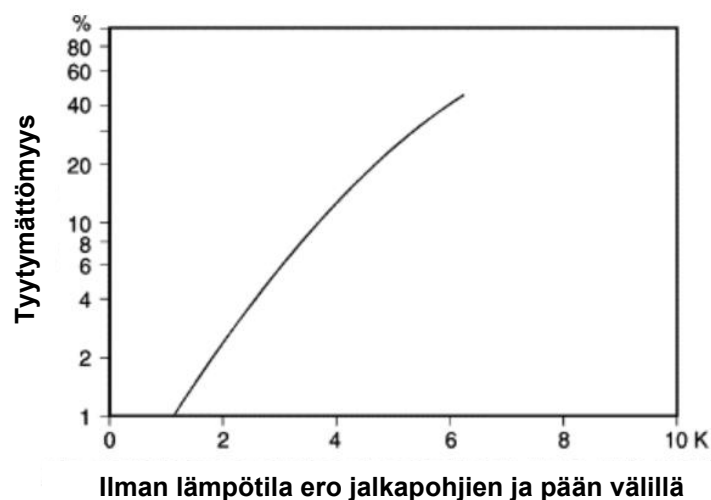
missä φ on suhteellinen kosteus, p_{H_2O} [Pa] on vesihöyryn osapaine ja p_{kyl,H_2O} [Pa] on kylläisen vesihöyryn paine kyseisessä tarkastelulämpötilassa.

Kastepisteen syntymistä voidaan ehkäistä ja varautua muutamalla eri keinolla. Yksi keinoista on asentaa anturi huoneistoon viilennysveden menoputkeen ja säätää huoneistoon menevän veden lämpötila 1 °C kastepistelämpötilaa korkeammalle. Toisena keinona suositellaan viilennysjärjestelmän asentamista vain lattiarakenteisiin, joissa putket on valettu betoniin tai muuhun massaan. Tällöin edes äkillisissä kosteuden muutoksissa tai häiriötilanteissa ei rakenteisiin pääse kondensoitumaan kosteutta, sillä putket eivät ole suoraan kosketuksissa ilman kanssa ja betoni- tai muun massan lämpökapasiteetin takia lämpötilan muutokset vievät aikaa. (“Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa,” 2022) Kolmas keino Hummastenniemen tekemän haastattelun mukaan on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, joka olisi varustettu jäähdytyspattereilla (Hummastenniemi, 2022, p. 27). Näiden pattereiden ansiosta ylimääräinen kosteus saataisiin tiivistymään kylmille pattereiden pinnoille ja kondensoitunut vesi saataisiin kerättyä talteen ilmanvaihtokoneen sisältä. Laitteisto myös tehostaisi merkittävästi huoneiston viilennystä, sillä huoneistoon tuleva sisäilma voitaisiin viilentää haluttuun sisälämpötilaan. Näin ollen ilmanvaihdon huoneistoa lämmittävä vaikutus mitätöityisi täysin. Hummastenniemen teettämässä haastattelussa asiantuntijat mainitsivat myös, että kosteuden poistoon voisi käyttää myös muita järjestelmiä. Heidän mielestään tärkeintä on saada mahdollisimman tehokkaasti kosteutta pois sisäilmasta, jotta tiivistymiseltä vältytään. (Hummastenniemi, 2022, s. 27).

3.4 Lattiaviilennyksen asiakastyytyväisyyden haasteet

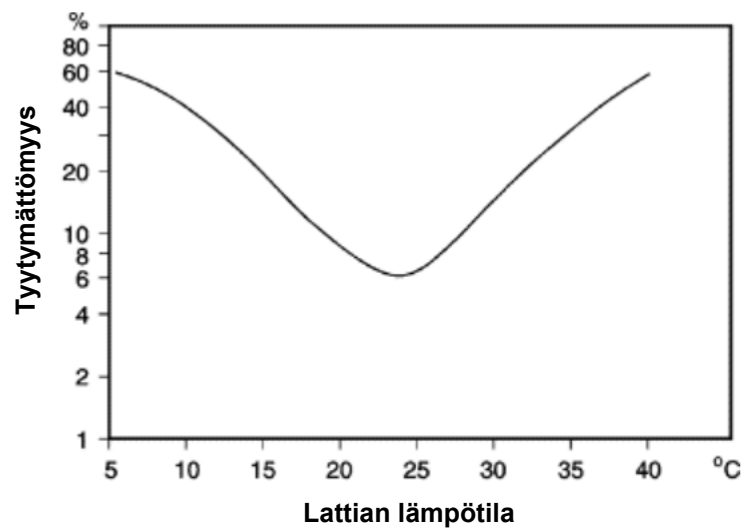
Toinen lattiaviilennyksen suurimmista haasteista on huoneistossa asuvien ihmisten tyytyväisyys ja kokemus viilennyksen mukavuudesta. Lämpötilaerot voivat aiheuttaa ihmisille epämukavuuden tunnetta, jonka seurauksena tyytyväisyys viilennysjärjestelmää kohtaan laskee merkittävästi. Liian kylmä tai kuuma lattia voi tuntua epämukavalta jaloille ja aiheuttaa jopa kipua murto-osalle ihmisistä. Myös lämpötilan liian suuri muutos lattia ja kattokorkeuden välillä, voi aiheuttaa osalle ihmisistä epämukavuuden tunnetta. Lämpötilaerojen vaikutus mukavuuteen kasvaa merkittävästi tiloissa, joissa oleskellaan paikallaan pitkiä aikoja. (Olesen and Parsons, 2002) Asuinrakennuksissa ihmiset oleskelevat paljon paikallaan, joten lämpötilojen vertikaaliseen vaihteluun tulee kiinnittää huomiota.

Olesen ja Parsons esittävät tutkimukseen pohjautuvassa tieteellisessä artikkelissaan kuvaajan lämpötilan vertikaalisen muutoksen vaikutuksesta huoneistossa oleskelevan ihmisen mukavuuteen. Kuvaajan mukaan noin asteen lämpötilaero aiheuttaa vain yhdelle prosentille ihmisistä epämukavuuden tunnetta. Kun lämpötilaero kasvaa noin kolmeen asteeseen epämukavuutta alkaa tuntumaan jo noin 6 prosenttia ihmisistä. Kolmenasteen vertikaalista vaihtelua voidaan pitää hyvänä suunnittelun lähtökohtana, sillä se aiheuttaa vain noin joka 17. ihmiselle epämukavuuden tunnetta ja sen avulla saavutetaan riittävä asiakas tyytyväisyys (Olesen and Parsons, 2002; "Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022). Artikkelin pohjalta muotoiltu kuvaaja on kokonaisuudessaan esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Lämpötila eron vaikutus mukavuuden tunteeseen (Olesen and Parsons, 2002)

Lattian pintalämpötilalla on myös suuri merkitys huoneistossa oleskelevan ihmisen tyytyväisyyteen. Suomessa lattiapinnan minimi keskilämpötila on rajoitettu 18 °C (*Sosiaali- ja terveysministeriön asetus...*, 2015). Lattiapinta ei saa missään tilanteessa alittaa kyseistä lämpötilaa. Olesen ja Parsons kirjoittamassa artikkelissa esitetään kuvaaja lattiapinnanlämpötilan vaikutuksesta epämukavuuden tunteeseen. Kuvaajan mukaan optimaalisimmat lämpötilat asettuvat noin 23 °C ja 24 °C paikkeille. Näillä lämpötiloilla vain noin 6 % ihmisistä kokee epämukavuutta. Pitämällä lattianpintalämpötila 20°C ja 27°C välillä päästään vielä alle 8 % tyytymättömyyteen. (Olesen and Parsons, 2002). Olesenin ja Parsonsin artikkelin pohjalta muotoiltu kuvaaja esitetään kuvassa 5.



Kuva 5. Lattialämpötilan vaikutus mukavuuden tunteeseen.

Kuvaajien avulla voidaan määrittää huoneiston lattialle sekä pystysuuntaiselle lämpötilaerolle sopivat lämpötilat halutun tyytyväisyysasteen mukaan. Lattian pintalämpötiloille hyvänä rajana voidaan pitää 10 % epämukavuus tasoa (*“Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa,”* 2022, s. 12). Kuvan 4 mukaan sopiva arvo lämpötilan vertikaalille muutokselle on 3 – 4°C ja kuvan 5 mukaan sopiva lattianpintalämpötila löytyy vaihdella 20 °C ja 27 °C välillä. Kuitenkin esimerkiksi kondensoitumisen takia lattian pintalämpötila on syytä pitää 22°C. Lämpötilaa on kuitenkin mahdollista laskea, mikäli huoneistossa oleva kosteus saadaan poistettua.

4. TEOREETTINEN LASKENTA

Nykyaikaisen hyvin eristetyn kerrostalon viilentäminen saa aikaan lämpövirran ulkoilmasta sisäilmaan päin. Lämpövirran määrä riippuu vallitsevista olosuhteista, kerrostalon rakenteiden ominaisuuksista sekä esimerkiksi käytössä olevasta ilmanvaihdon tavasta. Tarkkoihin laskelmiin päästäkseen on käytettävä jotakin simulointiohjelmaa, kuten Equan IDA indoor Climate and Energy simulointi ohjelmaa (Turpeinen, 2022, s. 25). Kuitenkin viilennysenergian nettotarve kesäkuukausina voidaan karkeasti arvioida historiadatan avulla käyttämällä yksinkertaistettua laskentaa Excel-ohjelmistossa.

4.1 Tarkasteltavan kohteen ominaisuudet ja käytetty data

Laskennassa käytetään Ilmatieteenlaitoksen latauspalvelun kautta haettua havainto dataa sääolosuhteista tunneittain. Vuosittaisen datan määrä rajattiin alkamaan kesäkuun alusta ja päättymään syyskuun loppuun. Rajaus tehtiin näihin kuukausiin oletuksena, että viilennystarvetta ei esiinny tai se on vähäistä tarkastelujakson ulkopuolella. Lisäksi datamäärän rajaamisella saatiin nopeutettua ohjelman tekemää laskelmaa. Laskennan tarkoituksena oli selvittää viilennyksen tarve nykyään vallitsevassa ilmastossa. Tarkasteltavaksi valittiin vuodet 2018, 2019, 2020, 2021 ja 2022. Vuosia valittiin viisi, jotta laskennan tulos saataisiin vastaamaan mahdollisimman tarkasti ilmasto ja yhden poikkeusvuoden vaikutus ei korostuisi laskentaa tehdessä.

Laskennasta saadut tulokset ovat suuntaa antavia. Laskennan nopeuttamiseksi seinärakenteiden ominaisuuksissa sekä lämmönjakaantumisessa on tehty yksinkertaistuksia. Yksinkertaistuksista huolimatta laskennassa käytettävien rakenteiden lämmönläpäisy kertoimet ovat vähintään yhtä saman suuruiset vallitsevissa rakennusmääräyksissä vaaditaan.

Laskentaa varten kohteeksi valitaan kahdeksankerroksinen tasakattoinen kerrostalo, jonka kerrospinta-ala on 410 m^2 . Valitun kohteen pidemmät sivut osoittavat Länteen ja Itään päin ja laskennassa käytetään ikkunoiden pinta-alalle Ympäristöministeriön minimi vaatimusta eli vähintään 10 % asuinpinta-alasta ("Ympäristöministeriön asetus rakennuksen käyttöturvallisuudesta," 2001, s. 9). Kohteen ulkorakenteiden pinta-alat ilmoitetaan taulukossa 1. Taulukossa olevien seinäpintojen pinta-alasta on vähennetty kyseisellä seinällä olevien ikkunoiden määrä.

Taulukko 1. Rakenteiden pinta-alat

Rakenne	Pinta-ala (m^2)
Pohjoisseinä	216
Itäseinä	546
Eteläseinä	216
Länsiseinä	546
Katto	410
Ikkunat pohjoisseinä	120
Ikkunat Itäseinä	150
Ikkunat Eteläseinä	120
Ikkunat Länsiseinä	150

Kohde on uudisrakennus, joten sen rakenteinen eristävyys on noudatettu tuoreimpia vaatimuksia energiatehokkuudelle. Laskennassa on pidetty huoli siitä, että seinämateriaalien yhdistetty U-arvo ei ylitä Suomessa säädettyä maksimi rajaa. Ympäristöministeriön 2017 julkaiseman asetuksen mukaiset minimi vaatimukset rakenteiden lämmöneristävyydelle on esitetty taulukossa 2. (*Ympäristöministeriön asetus uuden...*, 2017)

Taulukko 2. Rakenteiden U-arvoja. (*Ympäristöministeriön asetus uuden...*, 2017)

RAKENNE	U-ARVO ($W/(m^2K)$)
SEINÄ	0.17
MASSIIVIPUUSEINÄ, PAKSUUS VÄHINTÄÄN 180 MM	0.40
YLÄPOHJA JA ULKOILMAAN RAJOITTUVA ALAPOHJA	0.09
RYÖMINTÄTILAAN RAJOITTUVA ALAPOHJA	0.17
MAATA VASTEN OLEVA RAKENNUSOSA	0.16
IKKUNAT	1.0

Laskennan nopeuttamisen takia seinärakenteeksi valittiin kolmekerroksinen sandwich-elementtirakenne. Rakenne koostuu ulkopuolen betonikuoresta, eristekerroksesta ja sisäpuolen betonikerroksesta. Laskennassa eristeenä käytetään mineraalivillaa. Eri materiaalikerrosten välissä on todellisuudessa ilmarakoja, joissa tapahtuu ilmanvaihtoa. Kyseisessä laskenta mallissa ei oteta kuitenkaan huomioon ilmarakoja. Yksinkertaistus ei vaikuta seinän U-arvoon, sillä arvoon voidaan vaikuttaa vaihtamalla eristepaksuutta.

Yläpohjan rakenteena laskennassa käytetään yleistä mineraalivillalevyn sekä puhallusvillan yhdistelmää. Esimerkki rakennuksen yläpohja koostuu sisäpuolen ohuesta kipsilevykerroksesta, höyrysulkumuovista, mineraalivillalevystä, puhallusvilla kerroksesta ja ulkopuolen ohuesta vanerikerroksesta, jonka päälle on asetettu bitumipinnoite. Laskennassa sisäkerros huomioidaan yhtenä kokonaisuutena aina villaan asti ja ulkokerros omanaan villasta ulkoilmaan asti. Tämä yksinkertaistus ei vaikuta laskennan lopputulokseen, koska eristepaksuus on valittu niin, että vaadittu U-arvo täyttyy. (Korteoja, 2012, s. 52) Laskennassa käytettyjen katto- sekä seinämateriaalien paksuudet ja lämmönläpäisykertoimien arvot esitetään taulukossa 3.

Taulukko 3. Rakennusmateriaalien paksuudet ja lämmönjohtavuuskertoimet (Siikanen, 2014, taulukko. 3.2).

MATERIAALI	PAKSUUS (MM)	LÄMMÖNJOHTAVUUSKERROIN $\lambda (W/(m * ^\circ C))$
KATON SISÄKUORI	40	0.21
LASIVILLALEVYN JA PUHAL- LUSVILLAN PAKSUUS	580	0.050
KATONULKOKUORI	40	0.10
SEINÄN SISÄPINTA	150	2.5
SEINÄN ERISTE	300	0.050
SEINÄN ULKOKUORI	70	2.3

Ikkunoille on asetettu Ympäristöministeriön toimesta tarkka raja. Ikkunoiden U-arvo ei asetuksen mukaan saa ylittää $1.0 (W/(m^2K))$ rajaa. (Ympäristöministeriön asetus uu-

den..., 2017) Laskennassa on päätetty käyttää Pihla Group Oy:n ilmoittamia arvoja heidän itse valmistamilleen ikkunoille. Pihla Groupin ikkunoista valittiin energialuokkaan A kuuluva avattava ikkuna, joka on varustettu alumiinipuitteilla.

Taulukko 4. Ikkunoiden ominaisuudet (Pihla Group Oy, 2022)

MÄÄRE	ARVO	YKSILKKÖ
U-ARVO	1.0	$(W/(m^2K))$
G-ARVO	0.58	-

Asunnon ilmanvaihdon minimiarvoksi ympäristöministeriön säädöksessä on asetettu $0,5 \text{ dm}^3/\text{s}$ asuineliötä kohden (*Ympäristöministeriön asetus uuden...*, 2017). Kerrostalon asuineliöt saadaan laskettua suoraan kertomalla kerrosten asuinpinta-ala kerrosten määrällä. Asuineliöitä kyseisessä rakennuksessa on 3280 m^2 . Kertomalla ilman vaihtuvuuden asuineliöillä saadaan koko rakennuksen ilmanvaihdon tilavuusvirta. Tilavuusvirta on muutettu yksikköön $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right]$ ja se esitetään taulukossa 6. Lisäksi ilmanvaihdon laskentaan tarvitsee ilman moolimassa ja molaarisen kaasuvakion, jotka esitetään taulukossa 5.

Taulukko 5. Ilmanvaihdon laskentavakiot

ILMAN MOOLIMASSA	29	g/mol
R	8.3145	$J/(K \text{ mol})$
ILMANVAIHDON TILAVUUSVIRTA	5904	m^3/h

Säteilytasapainon laskentaan seinän ulkopinnalla tarvitaan seinän emissiviteetin ja absorbtion vakioita. Yleensä voidaan käyttää karkeaa yleistystä, että emissiviteetti on sama kuin absorbtio. Auringonsäteilyssä tämä ei kuitenkaan kaikilla aineilla toteudu. Tämän takia emissiviteetille ja absorbtiolle on otettu omat arvonsa. Laskennassa käytetyt vakiot esitetään taulukossa 6. (Incropera, 1981, luku 12)

Taulukko 6. Laskennassa käytetyt vakiot (Incropera, 1981, s. 604)

VAKIO	ARVO	YKSIKKÖ
STEFAN-BOLTZMANNIN VAKIO	$5.6704 \cdot 10^{-8}$	$W/(m^2K)$
ULKOSEINÄN EMISSIVITEETTI	0.94	-
ULKOSEINÄN LYHYTAALTOISEN SÄTEILYN ABSORBTIOKERROIN	0.63	-
ULKOSEINÄN PITKÄAALTOISEN SÄTEILYN ABSORBTIOKERROIN	0.94	-
KATON EMISSIVITEETTI	0.94	-

Riippuen lähteestä ulkoseinän absorbtiolle on ilmoitettu monia eri arvoja. Arvot riippuvat paljon jopa käytettävän maalin väristä. Tässä työssä päätettiin käyttää ulkoseinän pintamateriaalina vaaleaa rappausa, jonka absorbtiokerroimen oletettiin olevan lähellä tiilen absorbtiokerrointa.

4.2 Laskennan toteuttaminen

Laskenta toteutetaan jokaiselle ulkorakennepinnalle erikseen. Positiivisena suuntana laskennassa on käytetty suuntaa ulkoilmasta sisäänpäin. Laskennassa käytetään hyväksi Excelissä valmiina olevaa GoalSeek-ominaisuutta, jonka avulla voidaan hakea seinäpinnan yli kulkevan lämpövirran tiheyden arvo kokeellisesti. GoalSeek vaatii toimiakseen alkuarvauksen lämpövirrasta ja solun, jossa on laskettuna lämpövirta jossakin rakenteen kohdassa. GoalSeek vaihtaa arvausta niin kauan, kunnes lämpövirta jonkin pisteen yli on sama kuin arvattu lämpövirta. Jotta kaikkia datapisteitä ei tarvitse syöttää uudelleen GoalSeek-toimintoon, kirjoitetaan Excelin Visual Basiciin makro, joka käy läpi kaikki datapisteet. Kuvassa 6 on esitetty Visual Basiciin syötetty koodi. Koodin pätkä laskee lämpövirrat kesäkuun datapisteistä. Muiden kuukausien koodi on samanlainen. Ainoana erona on vain muuttujan i-arvot, jotka kertovat ohjelmalle millä rivillä minkäkin hetken datapisteet sijaitsevat.


```

Sub Laskenta()
'
' Tämä makro käy läpi jokaisen datapisteen arvot ja laskee niiden
' avulla lämpövirrantiheydet
'
'
Dim i As Integer
For i = 9 To 728
    Cells(i, 20).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Cells(i, 21)
    Cells(i, 29).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Cells(i, 30)
    Cells(i, 38).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Cells(i, 39)
    Cells(i, 47).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Cells(i, 48)
    Cells(i, 56).GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Cells(i, 57)
Next i

```

Kuva 6. Esimerkki Visual Basicissa syötetystä koodista

Seinäsisäpinnalla tapahtuva lämmönsiirto lasketaan kaavalla 2.18. Luonnollisen konvektion huoneen seinäpinnalla on oletettu olevan hyvin pientä sillä seinän sisäpinnan lämpötilaerot ovat hyvin pienet. Seinän materiaalikerrosten läpikulkeva lämpövirta on laskettu kaavalla 2.5. Seinän ulkopinnalla tapahtuvalle konvektiolle on haettu arvo kaavalla 2.11. Kyseisessä kaavassa esiintyvälle vakiolle h on laskettu keskimääräinen arvo kaavoilla 2.12, 2.13, 2.14 ja 2.15. Laskuissa käytetään seinäpintojen keskimääräistä pituutta sekä saatavilla olevaa tuulidataa. Ulkopinnalla tapahtuvan säteilyn tasapaino on laskettu kaavalla 2.25. Laskennassa on käytetty auringon kokonaissäteilyä, ilmakehän vastasäteilyä ja maanpinnan säteilyä sekä laskettu seinäpinnan säteily lämpötilan perusteella kaavalla 2.17. Eri suuntiin osoittaville seinäpinnoille tulevan säteilyn määrä on korjattu ilmatieteenlaitoksen muuntokerroin taulukolla (Ilmatieteenlaitos, 2023a). Kattopinnoille laskenta suoritetaan samalla tavalla kuin seinäpinnoille. Ainoana erona on se, että kattopintaan kohdistuvaa säteilyn määrää ei tarvitse korjata muuntokerroin taulukolla.

Ilmanvaihdon lämpöenergian siirron määrä lasketaan kaavalla 2.8. Kaavassa esiintyvä ilman tiheys saadaan laskettua kaavalla 2.9. Ominaislämpökapasiteetille ja lämpötilan suhteelle voidaan graafisesti sovittaa Excelin avulla funktio. Pohjana funktion sovittamiselle käytetään Heikkisen työn liitettä 11 (Heikkinen, 2018, Liite11).

5. LASKENNAN TULOKSET JA NIIDEN TULKINTA

Laskennan tulokset kerättiin yhteen tarkastelun helpottamiseksi. Laskennan antama data määrä on suuri ja siitä voitaisiin esittää monia eri kuvaajia ja taulukoita. Tässä luvussa keskitytään tämän työn kannalta olennaisiin vastauksiin. Vastauksia tutkitaan yleisellä tasolla ja keskitytään enemmän koko talon kokonaisuuteen kuin yksittäisen seinän tai huoneiston lämpöenergia taseeseen.

5.1 Laskennan tulokset

Laskennan tuntikohtaiset tulokset laskettiin yhteen ja taulukoitiin jaotteleamalla lämpövirrat kuukausittain. Jokaiselle vuodelle laskettiin myös tarkastelujaksokohtainen lämpövirran arvo. Lisäksi kuukausittaista vaihtelua kuvaamaan lisättiin eri tarkastelu jaksojen välinen keskiarvo. Nämä arvot esitetään, jotta saadaan peruskuva kesäajan lämmitys- ja viilennystarpeesta. Laskennan kuukausikohtaiset ja vuotuiset sekä näistä lasketut keskiarvot esitetään taulukossa 7.

Taulukko 7. Lämpövirran määrä kesä-syyskuussa

	KESÄ (KWH)	HEINÄ (KWH)	ELO (KWH)	SYYS (KWH)	YHTEENSÄ (KWH)
2018	-61	33984	4776	-29956	8742
2019	9580	9593	-1401	-40077	-22305
2020	25221	-1011	800	-30488	-5478
2021	24022	30177	-15257	-47428	-8486
2022	7726	7302	10036	-46981	-21916
KESKIARVO	13298	16009	-209	-38986	-9889

Tämän työn kannalta olennaista on saada selville vain viilennystä vaativien päivien lämpövirran määrä. Tämän takia saaduista taulukossa 7 esitetyistä kokonaistuloksista karstiin pois kaikki ne päivät, joiden nettoviilennystarve oli alle nolla. Laskettaessa vuoro-kausikohtaista lämmityksen- ja viilennyksen tarvetta saadaan viilennyspäivien lukumääräksi eri tarkastelujaksojen välillä hyvinkin tasainen keskimäärin 58 päivää. Kuukausikohtaisten viilennys päivien määrä esitetään taulukossa 8.

Taulukko 8. Kuukausikohtaisten viilennyspäivien lukumäärä

	KESÄ (KPL)	HEINÄ (KPL)	ELO (KPL)	SYYS (KPL)	YHTEENSÄ (KPL)
2018	17	27	17	5	66
2019	18	19	17	2	56
2020	25	14	15	0	54
2021	26	25	5	0	56
2022	17	18	21	0	56
KESKIARVO	21	21	15	1	58

Laskemalla viilennyspäivien aikana syntyneet lämpövirrat yhteen päästään kiinni viilennyskauden tuottamaan lämpöenergianmäärään. Lämpöenergianmäärä voi muuttua hiukan lasketusta kerrostalon lämpökapasiteetista johtuvan lämpötilojen muutosnopeuden hitauden takia. Taulukossa 9 esitetään kerrostaloon virtaavan lämpöenergian määrä viilennyspäivien aikana.

Taulukko 9. Viilennyspäivien aikainen lämpövirta

	KESÄ (KWH)	HEINÄ (KWH)	ELO (KWH)	SYYS (KWH)	YHTEENSÄ (KWH)
2018	9950	35880	12725	1024	59579
2019	15069	16081	5422	959	37531
2020	27951	8344	8198	0	44493
2021	24793	31143	1526	0	57462
2022	16171	13022	14298	0	43492
KESKIARVO	18787	20894	8434	397	48511

Tulokset voivat vaikuttaa kovinkin suurilta, jos niitä ei suhteuta kyseessä olevan mittausjakson pituuteen ja kyseisen rakennuksen pinta-alaan. Mikäli tarkastellaan tilannetta keskiarvojen kautta niin yksittäisen tunnin viilennys tarve koko rakennuksessa on keskimäärin vain 35 kWh. Tarkastelussa on myös huomioitava, että kyseinen laskenta ei ota kantaa yksittäiseen huoneistoon virtaavan lämpöenergian määrään ja todellisuudessa lämpöenergia ei jakaudu tasaisesti huoneistojen välillä ja joissakin huoneistoissa on huomattavasti suurempi viilennys tarve kuin toisissa. Tämä johtuu auringonpaisteesta.

Viilennyspäivien ja viilennysenergian tarpeen painottumisesta kesä-heinäkuulle voidaan olettaa muutaman viilennystä tarvitsevan päivän jääneen laskennan ulkopuolelle. Tämän takia laskennan tuloksissa voi esiintyä virhettä vertailtaessa sitä muiden julkaisujen viilennystarpeisiin.

5.2 Tulosten analysointi ja vertailu

Työn tarkoitus oli tutkia kerrostaloon kesäkuukausina virtaavaa lämmön määrää. Laskenta toteutettiin olettamalla, että kerrostalon ilmanvaihdosta ei haluta ottaa talteen lämpöenergiaa, vaan sitä halutaan poistaa talosta mahdollisimman paljon. Kuvattaessa kyseisellä mallilla tarkastelujakson jokaista päivää, aiheutuu melko suurta negatiivista virhettä verrattuna todellisuuteen. Tämä vaikutus huomataan taulukossa 7 esitetyistä suurista negatiivisista arvoista etenkin syyskuun osalta. Todellisuudessa asunto kytketään

automaatiojärjestelmään, joka ohjaa ilmanvaihtoa sekä lattiaviilennysjärjestelmää. Automaation avulla energiavirrat saadaan optimoituja ja koko tarkastelujakson ajalta päästään hieman korkeampiin nettoviilennystarpeisiin.

Laskennan mukaan viilennysenergian tarve asuineliötä kohden on noin 15 kWh/a . Luku on suuri, sitä verrattaessa Santamouriksen artikkelissa esittämiin lukuihin. Santamouriksen mukaan Euroopan asuinrakennusten viilennysenergia tarve on vain $2,2 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ ja kaupallisten rakennusten viilennys tarve olisi noin $10 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$. (Santamouris, 2016, s. 619) Nämä luvut perustuvat kuitenkin vuosina 2007 ja 2010 julkaistuihin teoksiin ja niissä voidaan olettaa olevan hiukan heittoja nykypäivään. Lisäksi tulos käsittelee Euroopan asuintaloja yleisesti ja tulokseen vaikuttaa merkittävästi talon eristävyys vaatimukset sekä ikkunapintojen koko.

Laskettua arviota viilennysenergian tarpeesta neliötä kohden voidaan pitää melko luotettavana, kun otetaan huomioon asunnon rakenteelliset ominaisuudet. Hyvä lämmöneristävyys sekä korkea ilmatiiviys yhdistettyä suureen määrään ikkunoita aiheuttavat korkeamman arvon. Ikkunoiden läpi kulkee suurin osa lämpöenergiasta. Etenkin säteilyn aiheuttama lämpövirta on merkittävä verrattaessa sitä muilla tavoilla kulkeutuvaan lämpöön. Ikkunoiden läpi kulkevaa lämpövirtaa voidaan kuitenkin pienentää käyttämällä ikkunoita, joiden g-arvo on pienempi tai pitämällä ikkunoiden sälekaihtimet kiinni. Valon pääsyn estäminen kuitenkin poistaa ikkunan tarkoituksen, eikä se ole asumismukavuuden kannalta suotavaa.

Suomessa kesäkuukausien nettoviilennystarve ei ole kovin suuri ja pidettäessä huoneiston lämpötila tasaisesti $24 \text{ }^\circ\text{C}$ viilennysjärjestelmän teho riittää kattamaan viilennys tarpeen. Viilennyspäivien lattianeliölle kohdistuvaa tuntikohtainen viilennystarve on noin 11 Wh/m^2 . Jos lattiapinnan lämpötila on 22°C ja huoneiston keskilämpötila 24°C saadaan kaavan 3.1 mukaan lattiaviilennyksen tehoksi 14 W/m^2 . Mikäli lattiaviilennys toimii omalla maksimi tehollaan se riittää kattamaan viilennyksen tehon tarpeen. Lisäksi kuumina päivinä, mikäli lattiaviilennysjärjestelmän yhteydessä käytetään ilmanvaihtokoneeseen asennettavaa viilennyspatteria, päästään huomattavasti korkeampiin viilennystehoihin.

Saantamouris esittää artikkelissaan (Santamouris, 2016, s. 623) Euroopassa sekä Venäjällä vuotuisten viilennysastepäivien lukumäärän olevan nykyään 100-150 päivää. Santamouriksen mukaan $1\text{--}2^\circ\text{C}$ nousu tuplaa viilennys aste päivien arvon (Santamouris, 2016, s. 623). Koska viilennys aste päivät lasketaan päivän keskilämpötilan mukaan ei se korreloi välttämättä täysin Suomen kesään, jonka keskilämpötilat ovat varsin maltilliset noin 15°C (Ilmatieteenlaitos, 2023b). Suomen uusi rakennuskanta on kuitenkin niin

energiatehokas, että kesäpäivien auringonpaisteen mukanaan tuoman lämmön poistuminen vie pitkään. Päivällä asuntoon virtaavan energian määrä voi pitää huonelämpötilat korkealla vielä pitkälle iltaan saakka.

5.3 Erilaisten järjestelmien hyödyt ja haitat

Kaikille lattiaviilennysjärjestelmille yhteistä on itse viilennyskiertoputkiston toiminta. Putkissa kierrätetään eri lämmönlähteistä saatavaa huonelämpötilaa viileämpää nestettä, joka lämmitessään poistaa lämpöä huoneilmasta. Järjestelmä poistaa kokonaan vedon tunteen aiheuttaman epämukavuuden, mutta lisää lämpötilan vertikaalisen vaihtelun tuoman epämukavuutta. (Olesen and Parsons, 2002) Lisäksi pelkkää lattiaviilennystä käytettäessä ilman kosteudenpoistomekanismia, syntyy lattiapinnalle ja muualle rakenteisiin kohonnut kosteusvaurioriski. (Hummastenniemi, 2022, s. 27)

Kosteusvaurioriskiä voi pienentää erilaisilla ilmankosteuden poistajilla. Tehokkaimpana ja yleisimpänä niistä koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Ilmanvaihtokoneen yhteyteen asennettavan viilennys patteristo lisää merkittävästi asunnon viilennysjärjestelmän tehokkuutta. Samalla viileän patterin pintaan tiivistyy tuloilman sisältämää kosteutta. (Hummastenniemi, 2022, s. 27) Ilmanvaihto on pakollista järjestää uudisrakennuksissa, joten se on vaivaton keino lisätä viilennysjärjestelmän tehokkuutta (*Ympäristöministeriön asetus uuden...*, 2017). Tuloilman viilennyksen lisääminen monimutkaistaa järjestelmää, minkä takia koko järjestelmän kattavan automaation tarve lisääntyy.

Isoimmat erot erilaisten järjestelmä kokonaisuuksien välillä syntyvät käytettävästä lämmönlähteestä. Maalämpöjärjestelmään kytketty lattiaviilennys kykenee käyttämään suoraan keruupiirin virtausta kylmänlähteenä, minkä takia energiaa kuluu vain nestevirtaus-ten aikaansaamiseen ("Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa," 2022, Luku 1.1). Lisäksi viilennyskierrosta tulevaa lämpöenergiaa voidaan käyttää esimerkiksi käyttöveden lämmittämiseen sekä pumpata takaisin maalämpökaivoon. Lämpöenergian syöttäminen kaivoon lisää kaivon käyttöikä ja täten vähentää uusinta investointien tarvetta. Järjestelmä ei vaadi juurikaan lisäinvestointeja, vaikka viilennys mahdollisuus jälkiasennettaisiin.

Käytettäessä lämmönlähteenä kaukolämpöverkkoa tarvitaan viilennystä varten erillinen kaukokylmäverkko. Verkon rakentaminen lisää merkittävästi viilennyksen investointikustannuksia. Tarvittavan infran rakennus vie aikaa ja on haastavaa jo valmistuneilla asuin-

alueilla. Uusilla alueilla etenkin suuren kylmälähteen lähistöllä kaukokylmä verkon rakentaminen voi parantaa viilennyksen hukkalämpöjen talteenoton tehokkuutta. Viilennyksen hukkalämpöä voidaan esimerkiksi käyttää energiavarastojen lämmittämiseen kesäkuukausina.

Lattiaviilennysjärjestelmä soveltuu asennettavaksi kaikkiin lattiakiertoputkiston omaaviin järjestelmiin. Kuitenkin järjestelmän mahdollisimman tehokkaan hyötykäytön aikaansaamiseksi esimerkiksi suorasähkö- tai lämpöpumppulämmitteisten rakennusten tapauksessa tulee lämpöenergian varastoinnin mahdollisuuksia pohtia. Parhaimman hyödyn viilennyksestä saa, kun rakennuksesta poistettu lämpö hyöty käytetään tai varastoidaan myöhempää käyttöä varten. Lämpöenergiaa voidaan esimerkiksi hyöty käyttää käyttöveden lämmitykseen tai säilöä lämminvesivaraajaan myöhempää käyttöä varten.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tarkasteltiin uudiskerrostalon viilennystarvetta. Pyrkimyksenä oli määrittää teoreettisella tasolla kerrostaloon virtaavan lämpöenergian määrä kesäkuukausien aikana Etelä- ja Keski-Suomen alueella. Laskennallinen tarkastelu tehtiin Excel-ohjelmistolla käyttäen luvussa 2 ja 3 esitettyjä teorioita. Excelissä käytettiin apuna Ilmatieteenlaitoksen sivuilta saatavaa historiadataa. Työssä tarkasteltiin myös viilennyksestä syntyvien hukkalämpöjen talteenottoa sekä hyötykäyttöä. Tarkastelu keskittyi talteenoton mahdollisuuksiin, joiden hyötyjä ja haittoja arvioitiin käyttäen apuna kirjallisuus lähteitä. Todellisuudessa järjestelmät voivat vaihdella kohteen mukaan ja jokaisen järjestelmän käyttöönotosta tulee tehdä erillinen tarkastelu.

Tärkein tuloksista oli viilennystä tarvitsevien päivien lukumäärä. Etelä- ja Keski-Suomessa viilennystä kaipaavia päiviä on tehdyn laskennan mukaan noin 58-päivää jokaista tarkasteluvuotta kohden. Modernit, tiiviit ja energiatehokkaatkerrostalot vaativat viilennystä, jotta sisälämpötilat pysyvät maltillisella tasolla. Suuret ikkunapinnat yhdistettynä hyvin eristettyihin seiniin ja aurinkoiseen keliin saavat lämpötilat kohoamaan ja pysymään ylhäällä hyvin pitkään. Käytettäessä lattiaviilennystä kohteessa on mahdollista saavuttaa tasainen lämpötila huoneistossa koko viilennysjakson ajan. Suuren massansa ansiosta lattiaviilennys reagoi nopeasti lämpötilan muutoksiin ja saavutettuaan halutun lämpötilan kykenee pitämään sen.

Suurimpana riskinä lattiaviilennystä käytettäessä esiintyy kastepisteen syntyminen viilelle lattiapinnalle. Keinoja kastepisteen synnyn välttämiseksi on monia, mutta tehokkain on viilennyspatterilla varustettu koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Kosteuden poiston lisäksi koneisto kykenee viilentämään sisääntuloilmaa, minkä ansiosta koko järjestelmänviilennysteho kasvaa merkittävästi. Kokonaisuutena tehokkaassa lämmitys- ja viilennysjärjestelmässä hyödynnetään montaa eri keinoa, joita ohjataan koko talon kattavalla automaatiojärjestelmällä.

Tehokkain työssä esitetty järjestelmä viilennyksen toteuttamiseksi on maalämpöjärjestelmään kytketty lattiaviilennys ominaisuus. Parhaimmassa tapauksessa kyseisen järjestelmän ei tarvitse käyttää lämpöpumppua viilennykseen, ja energiaa kuluu vain virtauksien aikaansaamiseksi putkistoissa. Lisäksi järjestelmä pystyy käyttämään hyödyksi viilennyksen hukkalämpöä käyttöveden lämmitykseen ja maalämpökaivon käyttöiän pidentämiseen.

Lattiaviilennysjärjestelmällä on suuri potentiaali ja sen avulla voitaisiin rakennuspuolella ottaa askel kohti nollaenergiataloja. Järjestelmän avulla on mahdollista tuottaa tarvittava määrä lämpöenergiaa kesäkuukausina tai säilöä lämpö myöhempää käyttöä varten. Työ rajattiin käsittelemään viilennyksestä syntyvän lämpöenergian määrää, joten se ei ota kantaa, miten tai mihin energia tulisi säilöä. Paremman kokonaiskuvan aikaan saamiseksi seuraavaksi tulisi tutkia lämpövarastojen ja lattiaviilennysjärjestelmien sovittamista yhteen, tai vaihtoehtoisesti esittää jokin toinen ratkaisu syntyneen lämpöenergian hyötykäytöstä.

LÄHTEET

- Babatunde, E.B., 2012. Solar Radiation. IntechOpen.
- Björkholtz, D., 1997. Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka, 2. p., 3. p. ed. Rakennustieto, Helsinki.
- Heikkinen, T., n.d. ENERGIANSÄÄSTÖN TODENTAMINEN TEOLLISUUSKIINTEISTÖSSÄ.
- Hummastenniemi, J., 2022. Lattiaviilennyksen suunnitteluperusteiden määritys.
- Ikkunoiden energiatehokkuus [WWW Document], 2022. . Motiva. URL https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/ikkunoiden_energialuokitus/ikkunoiden_energiatehokkuus (accessed 2.22.23).
- Ilmatieteenlaitos, 2023a. Energialaskennan testivuodet TRY2012 - Ilmatieteen laitos [WWW Document]. URL <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky> (accessed 2.7.23).
- Ilmatieteenlaitos, 2023b. Havaintojen lataus - Ilmatieteen laitos [WWW Document]. URL <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus> (accessed 2.1.23).
- Incropera, F.P., 1981. Fundamentals of heat transfer. Wiley, New York.
- Interactive Equations - Knovel [WWW Document], 2023. URL <https://app-knovel-com.lib-proxy.tuni.fi/ie/#equation/MECHA0107E> (accessed 4.1.23).
- Karita Kontula-Sokka, 2021. IPCC:n ilmastoraportti: 1,5 asteen lämpenemisen taso ylitetään todennäköisesti viimeistään 2030-luvun alkupuolella – “Jatkossakin Suomi on yksi niistä alueista, jotka lämpenevät nopeimmin” - Forecan sääuutiset ja blogi [WWW Document]. Foreca. URL <https://www.foreca.fi/meteorologilta/mk1e4169> (accessed 10.30.23).
- Korteoja, O., 2012. Suunnitteluratkaisut 2010-luvun rakennuskannassa.
- Olesen, B.W., Parsons, K.C., 2002. Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. Energy Build., Special Issue on Thermal Comfort Standards 34, 537–548. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00004-X)
- Omataloyhtio.fi, 2021. Tutkittua: Mahdollisuus asunnon viilentämiseen yhä tärkeämpää kerrostaloissa [WWW Document]. Omataloyhtiö.fi. URL https://www.omataloyhtio.fi/artikkelit/19766/tutkittua_mahdollisuus_asunnon.htm (accessed 2.4.23).
- Pihla Group Oy, 2022. Varma avattava kolmilasinen puu-alumiini-ikkuna.
- Santamouris, M., 2016. Cooling the buildings – past, present and future. Energy Build. 128, 617–638. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.034>
- Siikanen, U., 2014. Rakennusfysiikka: perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto, Helsinki.
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista, 2015. . Oikeusministeriö.
- Turpeinen, T., 2022. Ilmastonmuutoksen vaikutus jäähdytykseen ja sisäilmastoon. Uponor-lattialämmitys- ja viilennysratkaisut kerrostaloissa, 2022.
- VDI e V, 2010. VDI Heat Atlas, 2nd ed. 2010. ed, VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77877-6>
- Vicedo-Cabrera, A.M., Scovronick, N., Sera, F., Royé, D., Schneider, R., Tobias, A., Astrom, C., Guo, Y., Honda, Y., Hondula, D.M., Abrutzky, R., Tong, S., Coelho, M. de S.Z.S., Saldiva, P.H.N., Lavigne, E., Correa, P.M., Ortega, N.V., Kan, H., Osorio, S., Kyselý, J., Urban, A., Orru, H., Indermitte, E., Jaakkola, J.J.K., Ryti, N., Pascal, M., Schneider, A., Katsouyanni, K., Samoli, E., Mayvaneh, F., Entezari, A., Goodman, P., Zeka, A., Michelozzi, P., de'Donato, F., Hashizume, M., Alahmad, B., Diaz, M.H., Valencia, C.D.L.C., Overcenco, A., Houthuijs, D., Ameling, C., Rao, S., Di Ruscio, F., Carrasco-Escobar, G., Seposo, X., Silva, S.,

Madureira, J., Holobaca, I.H., Fratianni, S., Acquafredda, F., Kim, H., Lee, W., Iniguez, C., Forsberg, B., Ragettli, M.S., Guo, Y.L.L., Chen, B.Y., Li, S., Armstrong, B., Aleman, A., Zanobetti, A., Schwartz, J., Dang, T.N., Dung, D.V., Gillett, N., Haines, A., Mengel, M., Huber, V., Gasparrini, A., 2021. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nat. Clim. Change* 11, 492–500. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x>

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen käyttöturvallisuudesta, 2001.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, 2017. . Oikeusministeriö.

Zhao, K., Liu, X.-H., Jiang, Y., 2016. Application of radiant floor cooling in large space buildings – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 55, 1083–1096. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.028>