



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Jale Naskali

**Rakennusten energiatehokkuuden tulevaisuus terveellisen
sisäympäristön ja sisäilman laadun parantamisen näkökulmasta**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Tuotantotalouden kandidaatintutkielma
Kauppatieteiden kandidaatti

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Jale Naskali		
Tutkielman nimi:	Rakennusten energiatehokkuuden tulevaisuus terveellisen sisäympäristön ja sisäilman laadun parantamisen näkökulmasta: Rakennusten energiatehokkuuden tulevaisuus terveellisen sisäympäristön ja sisäilman laadun parantamisen näkökulmasta		
Tutkinto:	Kauppätieteiden kandidaatti		
Oppiaine:	Tuotantotalous		
Työn ohjaaja:	Tauno Kekäle		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	52

TIIVISTELMÄ:

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena oli tarkastella energiatehokkuuden, terveellisen sisäympäristön ja sisäilman laadun välistä suhdetta tulevaisuuden rakennuksissa. Tutkielmassa oli tarkoitus selvittää erityisesti tapoja, joilla energiatehokkuutta ja sisäympäristön laatua voidaan parantaa siten, että ne vaikuttavat yhdessä positiivisesti ihmisten terveyteen. Tutkimuksessa käydään läpi kaikki kolme edellä mainittua "ilmiötä"; energiatehokkuus, terveellinen sisäympäristö ja sisäilman laatu. Tutkimus selvittää, mitä ilmiöiden vaikutuksista ihmisiin ja yhteiskuntaan tällä hetkellä tiedetään, miten niitä mitataan ja millaisilla teknologioilla tai rakennusmenetelmillä niistä kutakin voitaisiin parantaa tulevaisuudessa, esimerkiksi älykkäiden automaatiojärjestelmien, sensoriteknologioiden ja uusien energiatehokkuusstandardien avulla.

Tutkimuksen keskeisiä kysymyksiä ovat muun muassa, millaisia teknologioita ja ratkaisuja voidaan hyödyntää energiatehokkuuden parantamisessa, sekä miten reaaliaikainen data ja sensorit voivat tunnistaa energiatehokkuuteen ja sisäilman laatuun liittyviä ongelmia riittävän aikaisessa vaiheessa. Tutkimuksessa tarkastellaan myös, miten data-analytiikan, tekoälyn, automaation ja sensoriteknologioiden sekä reaaliaikaisen datan avulla voidaan vaikuttaa rakennusten hallintaan ja ylläpitoon tulevaisuudessa. Lisäksi analysoidaan, miten lainsäädäntö ja rakennusmääräykset ohjaavat energiatehokkuuden ja sisäilman laadun kehitystä.

Tutkielman tulokset tarjoavat kokonaisvaltaisen näkemyksen siitä, miten energiatehokkaat rakennusratkaisut voivat vaikuttaa kiinteistöjen ylläpitokustannuksiin, käyttöikään ja ihmisten hyvinvointiin. Uusia mahdollisuuksia ja teknologioita hyödyntämällä on onnistuttu saavuttamaan hyvin merkittäviä tuloksia, niin ihmisten terveyden ja hyvinvoinnin kuin myös taloudellisten hyötyjen näkökulmasta. Suuri haaste piilee siinä, että vielä ei ole onnistuttu yhdistämään järkevällä tavalla kaikkia saatavilla olevia hyödyllisiä teknologioita keskenään, jonka vuoksi toimialalla nykyisin käytössä olevat ratkaisut, ovat hyvin pirstaloituneita ja monimuotoisia. Yksi selkeä kokonaisratkaisu on kuitenkin mahdollista muodostaa ja kaupallistaa loppujen lopuksi hyvinkin lyhyellä aikajänteellä, jolloin valtavat hyödyt ovat saavutettavissa globaalisti, niin kansanterveydellisesti -kuin myös taloudellisesti.

AVAINSANAT: Energiatehokkuus, Sisäympäristö, Rakennusautomaatio, Data-analytiikka, Sensoriteknologia

Sisällys

1	Johdanto	5
1.1	Tutkimuksen tausta	5
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset	7
1.3	Aiheen rajaus ja tutkimusmenetelmä	8
1.3.1	Aiheen rajaus	8
1.3.2	Tutkimusmenetelmä	9
2	Aiheen käsittely	12
2.1	Teoreettinen tausta	12
2.1.1	Energiatehokkuus	12
2.1.2	Terveellinen sisäympäristö	15
2.1.3	Sisäilman laatu	17
2.2	Nykyiset käytännöt rakennusten tehokkuuden parantamiseksi	22
2.3	Käytännön esimerkkejä tulevaisuuden ratkaisumalleista	27
2.3.1	Älykkäät automaatiojärjestelmät ja sensortechnologiat	29
2.3.2	Data-analytiikan rooli energiatehokkuuden ohjaamisessa	35
3	Yhteenveto	43
	Lähteet	48

Kuvat

Kuva 1: Sisäympäristöön liittyvien oireiden tulkintaan ja määrään vaikuttavia tekijöitä, Pekkanen (2024, s. 65)	16
Kuva 2: Energiatehokkaan rakentamisen portaat, Alanne ja muut (2024, s.158)	23
Kuva 3: Käytön ja ylläpidon vaikutus energiaterokkuuteen, Alanne ja muut (2024)	25
Kuva 4: Kuormitusta aiheuttavia ja voimavaroja edistäviä sisäympäristötekijöitä, Pekkanen (2024, s. 310)	26
Kuva 5: Mahdollisia datapisteitä rakennuksissa, (Metropolia, 2024)	36
Kuva 6: Rakennusten käyttöasteen ennustamisen prosessi koneoppimisen avulla (Renewable and Sustainable Energy Reviews, s. 5)	37
Kuva 7: Digitaalisten kaksosten hyödyntäminen, (Metropolia, 2024)	39
Kuva 8: Erilaisia Machine Learning-tekniikoita	40
Kuva 9: Sisäilman laadun ja optimaalisen lämpötilan hallinnan prosessi (Renewable and Sustainable Energy Reviews, s. 11)	41

Taulukot

Taulukko 1: Kodin sisäilmaan liitettyjä oireita, (THL, 2023)	20
Taulukko 2: Työpaikan sisäilmaan liitettyjä oireita, (THL, 2023)	20

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Nyky-yhteiskunnassa rakennusten energiatehokkuuden, terveellisen sisäympäristön ja sisäilman laadun parantaminen ovat nousseet yhä tärkeämpään asemaan. Tämä tutkielma tarkastelee kunkin ilmiön vaikutuksia yksilöihin ja yhteiskuntaan sekä näiden parantamiseksi käytettäviä teknologioita. Nämä ilmiöt ovat merkittäviä yhteiskunnallisia kysymyksiä, kaupungistumiseen, rakennuskannan ikääntymiseen ja ilmastonmuutoksen hillitsemiseen liittyvien haasteiden kasvaessa. Samaan aikaan sisäilman laatu ja terveellinen elinympäristö ovat kriittisiä tekijöitä ihmisten hyvinvoinnin ja tuottavuuden kannalta. Nämä tekijät eivät kuitenkaan edistä pelkästään hyvinvointia ja terveyttä, vaan niillä on myös merkittävä rooli taloudellisten kustannusten vähentämisessä sekä ympäristön suojelemisessa. Tuotantotalouden näkökulmasta näiden ilmiöihin liittyvien asioiden kehittäminen tarjoaa konkreettisia mahdollisuuksia tehostaa resurssien käyttöä, pienentää kustannuksia sekä parantaa asumis- ja työympäristöjen laatua. Energiatehokkuuden ja sisäympäristöjen laadun parantamisen välillä voi kuitenkin esiintyä ristiriitoja, mikä tekee näiden tavoitteiden yhteensovittamisesta monimutkaista.

Suomessa noin kaksi kolmasosaa kansallisvarallisuudesta on sidottu rakennuksiin. Pelkästään kosteus- ja homevaurioiden korjaamisesta arvioidaan aiheutuvan miljardiluokan kustannukset, kertoo Pekkanen, (2024, s. 308). Sisäilma on nykyään myös suuren poliittisen mielenkiinnon kohde. Lukuiset tutkimukset ovat pystyneet osoittamaan, että sisäilman laatu vaikuttaa suoraan ihmisten terveyteen ja hyvinvointiin. Sisäilmaongelmat voivat aiheuttaa vakavia terveyshaittoja, kuten hengityselinsairauksia ja allergioita. Ilmastonmuutoksen ja kestävä kehityksen huomioiminen rakentamisessa ja kiinteistöjen ylläpidossa on suuri tulevaisuuden haaste. Energiansäästöön ja ympäristövaikutuksiin liittyviä haasteita ratkaistaessa pitäisi pystyä samalla huolehtimaan, ettei sisäympäristöjen laatu heikkene. Talojen lämmitykseen käytetään noin 40 % kaikesta Suomessa käytetystä energiasta, minkä vuoksi rakennusten lämmöneristyksen ja ilmanvaihdon

energiatehokkuuden parantaminen ovat keskeisiä keinoja tavoitteiden saavuttamiseksi. Valitettavasti nämä keinot voivat kuitenkin heikentää sisäilman laatua, Pekkanen kertoo (2024, s. 308).

Allen (2022, s.14) kumoaa myytin siitä, ettei meillä voisi olla samanaikaisesti sekä energiatehokkaita rakennuksia, että hyvää sisäilman laatua. Hänen mukaansa meillä voi olla, ja meillä nimenomaisesti pitää olla nämä molemmat. Keskusteltaessa vihreistä, älykkäistä ja turvallisista rakennuksista, on niiden keskipisteenä ajateltava terveitä rakennuksia, jotka ovat elintärkeitä pyrkimyksissä kohti tulevaisuuttamme muokkaavaa kestävämpää kaupungistumista.

Tärkein muutos nykytilanteeseen on siirtää huomio sisäilman epäpuhtauksista ja energiatehokkuuden erillisistä katsantokannoista laajemmin sisäympäristön laatuun sekä riskeistä hyvinvoinnin, viihtyvyyden ja työ- sekä toimintakyvyn edistämiseen. Kokonaisvaltaisempi tarkastelu auttaa myös sisäympäristöön liittyvien oireiden ja muiden haittojen syiden tulkinnassa, toteaa Pekkanen (2024, s. 312).

Olen valinnut aiheen, koska se yhdistää kaksi keskeistä tekijää, ympäristönäkökulman ja ihmisten hyvinvoinnin tulevaisuuden rakennuksissa. Kiinnostukseni kohdistuu erityisesti siihen, miten uudet teknologiat, kuten data-analytiikka, automaatio ja sensortechnologia, voivat auttaa löytämään ratkaisuja, jotka optimoivat sekä energiatehokkuutta että sisäympäristöjen laatua. Uudet teknologiat voivat tarjota mahdollisuuden esimerkiksi olosuhteiden reaaliaikaiseen seurantaan, jolloin mahdolliset ongelmat voidaan havaita jo ennen kuin ne kehittyvät vakaviksi. Uusien teknologioiden avulla on mahdollista vastata tiukentuviin rakennus- ja ympäristövaatimuksiin. Juuri tämä tekee aiheesta erittäin ajankohtaisen. Lainsäädännön ja erilaisten asetusten tuomiin vaatimuksiin ei pystytä vastaamaan, mikäli riittävää teknologista tasoa ei pystytä valjastamaan riittävän ajoissa ja riittävän tehokkaasti laajaan hyötykäyttöön. Meillä on edelleen monia mahdollisuuksia parantaa sisäympäristöjen laatua, jotta oppimistulokset parantuisivat kouluissa, työntekosujuisi ongelmitta ja asunnoissa viihdyttäisiin, kertoo Pekkanen (2024, s. 312).

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tämän tutkielman tavoitteena on tutkia, miten rakennuksissa voidaan yhdistää samanaikaisesti erilaisia toimenpiteitä energiatehokkuuden ja sisäympäristön laadun parantamiseksi, jotta terveydellisen ja taloudellisen kehityksen toteutuminen voidaan taata ja turvata tulevaisuudessa mahdollisimman tehokkaasti.

Tutkimus keskittyy seuraaviin kysymyksiin: miten uudet älykkäät teknologiat ja tekniikat sekä suunnitteilla olevat lainsäädännön muutokset voivat yhdessä ohjata ja vaikuttaa tulevaisuuden ratkaisuiden kehittämiseen, varmistaen samalla ihmisten terveellisen ja viihtyisän elinympäristön? Lisäksi tavoitteena on selvittää, miten reaaliaikainen data ja erilaiset teknologiat voivat auttaa tunnistamaan ja ratkaisemaan ongelmia riittävän aikaisessa vaiheessa, ennen kuin ongelmat ehtivät eskaloitumaan jopa hallitsemattoman kokoihin mittasuhteisiin.

Energiatehokkuus ja laadukas sisäympäristö ovat molemmat kriittisiä tekijöitä sekä ympäristön, että ihmisten hyvinvoinnin kannalta ja niiden merkitys tulee korostumaan entisestään jo lähitulevaisuudessa. Tutkielmassa tarkastellaan sekä olemassa olevia, että esiin nousevia teknologioita ja ratkaisuja, jotka mahdollistavat energiatehokkuus tavoitteiden saavuttamisen terveellistä elinympäristöä vaarantamatta.

Tutkielmassa keskitytään erityisesti seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Mitä energiatehokkuuden, terveellisen sisäympäristön ja sisäilman laadun vaikutuksista ihmisiin ja yhteiskuntaan tiedetään?
2. Miten ja millaisia teknologioita sekä ratkaisuja hyödyntämällä edellä esitettyjen ilmiöiden vaikutuksia mitataan ja pyritään parantamaan tällä hetkellä?
3. Millaisilla teknologioilla tai rakennusmenetelmillä energiatehokkuutta, terveellistä elinympäristöä sekä sisäilman laatua olisi mahdollista kehittää ja parantaa tulevaisuudessa?

1.3 Aiheen rajaus ja tutkimusmenetelmä

1.3.1 Aiheen rajaus

Tämä kandidaatintutkielma keskittyy erityisesti energiatehokkuuden ja terveellisen sisäympäristön sekä sisäilman laadun yhteisvaikutusten tarkasteluun erilaisissa rakennuksissa. Tutkimuksen ulkopuolelle rajataan seuraavat aiheet:

Vaikka energiatehokkuudella on merkittävä vaikutus rakennusten ylläpitokustannuksiin, yksityiskohtaiset taloudelliset laskelmat ja investointianalyysit rajataan pois. Painopiste on ilmiöiden selittämisessä ja teknologioiden sekä ratkaisujen tarkastelussa, ei niiden kustannustehokkuuden yksityiskohtaisessa arvioinnissa. Tutkielmassa ei käsitellä globaaleja ympäristövaikutuksia syvällisesti, eikä siinä syvennyttä laajasti ilmastopolitiikan tai kansainvälisten ilmastopöytäkirjojen käsittelyyn, vaikkakin energiatehokkuuden parantaminen vaikuttaa ilmastonmuutokseen.

Tutkimuksessa ei käsitellä laajasti asukkaiden käyttäytymiseen ja hyvinvointiin liittyviä psykologisia tai sosiaalisia näkökulmia, vaikka ne ilman muuta osaltaan vaikuttavat elinympäristön terveellisyyteen ja viihtyvyyteen. Vaikka tutkielmassa käsitellään sisäilman laadun merkitystä terveydelle, niin tutkimuksessa ei paneuduta syvällisesti olemassa oleviin lääketieteellisiin tai terveydenalaan liittyviin tutkimuksiin. Tarkoitus on tuoda esiin terveellisen elinympäristön yleiset vaikutukset hyvinvointiin, mutta ilman perusteellista analyysiä esimerkiksi sairauksien tai terveydentilojen fysiologisista mekanismeista.

Tutkielmassa ei keskitytä rakennusmateriaalien ominaisuuksiin tai valintoihin, vaikka ne ovatkin relevantteja tekijöitä rakennusalalla. On kuitenkin syytä pitää mielessä, että materiaalivalinnoilla, materiaalien valmistustavoilla sekä valmistamisen tehokkuuteen vaikuttavilla prosesseilla olevan suuri vaikutus ympäristön näkökulmasta.

Vaikka tutkielmassa keskitytään tulevaisuuden teknologioihin, niin siinä ei pyritä ennustamaan laajasti kaikkia mahdollisia tulevaisuuden kehityssuuntia, kuten kaupunkisuunnittelun megatrendejä tai sosiaalisia muutoksia. On kuitenkin selvää, että nämä ilmiöt voivat ja tulevat hyvin todennäköisesti vaikuttamaan osaltaan rakennuksiin sekä niiden kehittämiseen tulevaisuudessa.

Tutkielman aihetta olisi mahdollista tarkastella myös hyvin teoreettisesta näkökulmasta. Kestävän kehityksen teoria voisi tarjota tutkielmalle eettisen viitekehyksen, systeemiteorian avulla voitaisiin tarkastella rakennusten teknologioiden yhteisvaikutuksia ja innovaatioiden diffuusiot teoria auttaisi selittämään uusien teknologioiden käyttöönottoon liittyvää dynamiikkaa. Tässä tutkielmassa on tarkoitus pitäytyä käytännön tasolla, erilaisten ilmiöiden selittämiseen keskittyen.

1.3.2 Tutkimusmenetelmä

Tässä tutkielmassa kirjallisuutta on etsitty perinteisistä tutkimuksista, kuten kirjaston ja kurssien aineistoista sekä viidestä tieteellisestä ja luotettavasta tietokannasta (Emerald, Google Scholar, Abi Inform Complete, SAGE Journals Online ja ScienceDirect). Tiedonhankinta tietokannoista painottui tuoreimpiin vuosien 2020–2024 välillä julkaistuihin vertaisarvioituihin tutkimuksiin. Tietokannoista löytyi relevantteja tutkimuksia noin 30 kappaletta, joista luettiin ensin tiivistelmät, joiden perusteella tutkimukseen otettiin lopulta 6 tutkimusta.

Tutkimukset keskittyvät tarkemmin erilaisiin energiatehokkuuden ja sisäilmanlaadun parantamisen osa-alueisiin ympäristövaikutusten, taloudellisten, sosiaalisten ja muiden vaikutusten vähentämiseksi. Muutamissa artikkeleissa ehdotettiin useiden kriteerien päätöksentekomenetelmiä energiatehokkuuden puutteiden ratkaisemiseksi kestävyys edistämiseksi rakennuksissa. Osa tutkimuksista käsitteli laajemmin uusien teknologioiden tarjoamia mahdollisuuksia.

Kirjallisuuskatsauksen valitseminen tämän tutkielman tutkimusmenetelmäksi perustuu useisiin perusteltuihin tekijöihin. Kirjallisuuskatsaus tarjoaa selkeän ja tehokkaan tavan vastata asettamiini tutkimuskysymyksiin, kuten teknologisten ratkaisujen hyödyntämiseen energiatehokkuuden ja sisäympäristöjen laadun parantamisessa.

Tutkielman aiheet, energiatehokkuus ja sisäilman laatu, kehittyvät jatkuvasti uusien teknologisten ratkaisujen ja lainsäädännön myötä. Kirjallisuuskatsaus mahdollistaa ajankohtaisten tutkimusten ja artikkeleiden laaja-alaisen hyödyntämisen ja analysoinnin, jolloin kehityksen nykytilan ja suunnan ymmärtäminen sekä tulevien trendien ennakoiminen on mahdollista. Uusien tutkimusten ja standardien nopea lisääntyminen tekee kirjallisuuskatsauksesta tehokkaan tavan seurata alan kehitystä ja löytää vastauksia ajankohtaisiin tutkimuskysymyksiin.

Kirjallisuuskatsaus antaa mahdollisuuden tutkia laajasti erilaisia julkaistuja tutkimuksia, joiden avulla voidaan luoda pohja teoreettiselle ymmärrykselle siitä, miten energiatehokkuuden ja sisäilman laadun parantaminen liittyvät toisiinsa. Menetelmä antaa myös tilaa tarkastella, miten eri teknologiat, kuten automaatiojärjestelmät ja sensortechnologiat, ovat vaikuttaneet rakennusten energiatehokkuuteen ja millaisia vaikutuksia niillä on ollut sisäilman laatuun. Tutkimuskysymykset liittyvät teknologisten ratkaisujen arviointiin ja niiden potentiaaliin tulevaisuudessa. Näihin kysymyksiin voidaan parhaiten vastata tarkastelemalla jo tehtyjä tutkimuksia ja asiantuntijoiden esittämiä ratkaisuja, jolloin empiirisen aineiston kerääminen ei ole välttämätöntä. Kirjallisuuskatsauksen avulla voin arvioida ja vertailla olemassa olevaa tietoa, ja tehdä sen perusteella johtopäätöksiä tulevaisuuden suuntauksista.

Energiatehokkuuden ja sisäilman laadun parantamisessa yhdistyvät tekniset, ympäristölliset sekä terveydelliset näkökulmat. Kirjallisuuskatsaus tarjoaa mahdollisuuden hyödyntää tehokkaasti eri tieteenalojen tutkimustietoa, kuten rakennustekniikkaa, ympäristötieteitä ja terveydenhuoltoa koskevia julkaisuja. Tämä mahdollistaa hyvin kattavan kuvan muodostamisen aiheesta.

Näiden perustelujen pohjalta kirjallisuuskatsaus on sopivin ja tarkoituksenmukaisin menetelmä vastata tutkimuskysymyksiin ja saavuttaa tutkielman tavoitteet. Se mahdollistaa olemassa olevan tiedon kriittisen tarkastelun ja yhdistelyn, jolla saadaan kattava ymmärrys energiatehokkuuden ja sisäilman laadun parantamisen välisestä yhteydestä tulevaisuuden rakennuksissa.

2 Aiheen käsittely

2.1 Teoreettinen tausta

2.1.1 Energiatehokkuus

Energiatehokkuus tarkoittaa energian käytön optimointia siten, että saavutetaan maksimaalinen hyöty mahdollisimman vähällä energiankulutuksella. Energiatehokkuudella viitataan myös toimenpiteisiin, joilla vähennetään rakennuksen energiankulutusta samalla säilyttäen tai parantaen sisäympäristön laatua. Toimenpiteillä pyritään vähentämään energiakustannuksia, riippuvuutta fossiilisista polttoaineista sekä minimoimaan haitalliset ympäristövaikutukset, joka on myös yhteiskunnallisesti tärkeää.

Rakennusten lämmitykseen kului noin 22 % Suomen energian kokonaiskulutuksesta, ja se aiheutti noin neljäsosan Suomen kasvihuonekaasupäästöistä vuosina 2021–2022, Alanne ja muut (2024, s. 75) kertovat. Energiankäyttö on suurin ympäristökuormittaja ja asumiskustannusten aiheuttaja rakennuksen elinkaaren aikana. Rakennusten energiankulutus aiheutuu käytönaikaisesta lämmityksestä, mahdollisesta jäähdytyksestä sekä rakennuksessa olevien sähkölaitteiden ja valaistuksen energiankäytöstä, Alanne ja muut (2024, s. 26) toteavat. Asuinrakennuksissa noin 75 % kuluu tilojen lämmitykseen, käyttöveden lämmitykseen 17 %, sähkölaitteisiin, ruoan valmistukseen ja valaistukseen 17 % ja loput mm. saunan lämmitykseen 5 % energiasta. Energiankulutuksen pienentämisen tavoitteet tulee asettaa sähkön-, lämmön- ja vedenkäytölle sekä mahdolliselle muulla tavoin toteutetulla jäähdytykselle.

Alanne ja muut (2024, s.27) analysoivat, että olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuudella on suuri merkitys ilmastonmuutoksen hillitsemisessä. Nopeiden päästövähennysten aikaansaamiseksi tärkeintä on leikata nykyisen rakennuskannan energiankulutusta eri keinoin sekä kehittää energiamuotoja vähähiilisemmiksi. Uudisrakentamisen vaikutukset energiatehokkuuteen tulevat näkyviin vasta pidemmällä aikavälillä.

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivien toimeenpano ja kansalliset energiatehokkuusvaatimukset ovat parantaneet uusien ja korjattujen rakennusten energiatehokkuutta sekä vähentäneet kasvihuonekaasupäästöjä viimeisen vuosikymmenen aikana, Alanne ja muut (2024, s.27) jatkavat. Rakennusten energiatehokkuutta kuvataan energiatehokkuusluokilla A – G, joista A on paras ja G heikoin. Euroopan parlamentin ja komission hyväksymä uusi energiatehokkuusdirektiivi (Energy Performance of Buildings, EPBD) edellyttää sen jäsenmaiden vähentävän primäärienergian kulutusta vähintään 55 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2035 mennessä. Vähennykset tulee saada aikaan korjaamalla energiatehokkuudeltaan heikoimpia rakennuksia. Uudisrakennusten tulisi olla jatkossa päästöttömiä vuodesta 2030 alkaen (Zero Emission Buildings, nZEB), Alanne ja muut (2024, s.27) kirjoittavat. Direktiivi edellyttää myös reaaliaikaista energian käytön seurantaä älymittareiden avulla, josta hyvä esimerkki on etäluettavat vesimittarit. EPBD suosii tiiviitä rakennusvaihtoja sekä ilmanvaihtojärjestelmiä, jotka ylläpitävät raikkaan ilman saannin ilman merkittäviä energiahäviöitä, (Ympäristöministeriö, 2024).

Muutoksia on odotettavissa myös automaatio- ja latauspistelakiin, rakennusten energiatodistuksia koskeviin lakeihin sekä todennäköisesti myös rakentamislakiin. Muutoksia tulee myös uudis- ja korjausrakentamista sekä energiatehokkuutta koskeviin rakentamismääräyksiin, (Ympäristöministeriö, 2024). Kansallisissa säädöksissä otetaan huomioon uusien ja olemassa olevien rakennusten erilaisuus sekä niissä käytössä olevien teknisten ratkaisuiden erot ja niiden hyväksyttävyyys. Säädösohjauksella ohjataan rakennusten energiatehokkuuden parantamiseen kustannustehokkaasti siten, ettei omistajille synny kohtuuttomia velvoitteita.

Yhdysvalloissa ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) on asettanut standardeja, kuten ASHRAE 90.1 energiatehokasta suunnittelua ja ASHRAE 62.1 ilmanvaihtoa ja sisäilman laatua kehittääkseen. ASHRAE on keskittynyt yhä enemmän datan ja älyjärjestelmien rooliin energiatehokkuuden ja ilmanlaadun tavoitteiden saavuttamisessa, joista esimerkkinä toimii älykkäät ilmanvaihtojärjestelmät, joiden toiminta perustuu reaaliaikaisiin IoT-sensoreihin.

Rakennusten energiatehokkuutta mitataan ja seurataan tällä hetkellä, esimerkiksi edellä mainittujen E-lukujen sekä hiilijalanjälki laskennan avulla. Lisäksi energiatehokkuutta ja ympäristövaikutuksia voidaan verrata toimialan keskiarvoihin tai muihin vastaaviin rakennuksiin, esimerkiksi maailman johtavimpien rakennusten ympäristöluokitus-järjestelmien LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) sekä BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) avulla. Energiatehokkaat rakennukset ovat ilmiselvää ilmastotekoa, sillä rakennuksissa kuluu arvion mukaan 40 prosenttia kaikesta energiasta ja aiheuttaa 36 prosenttia EU-alueen kaikista kasvihuonekaasupäästöistä, (Ympäristöministeriö, 2024).

Rakennussektorin energiaintensiteetin on parannettava 30 prosenttia per neliometri vuoteen 2030 mennessä, jotta Pariisin ilmastotavoitteiden asettamat raja-arvot voidaan saavuttaa. Tehokkaassa rakentamisessa ja rakennusten peruskorjauksissa piilee suurempi säästöpotentiaali, kuin mitä kaikkien G20- maiden yhteenlaskettu energiankäyttö oli vuonna 2015. Rakennusten ja rakentamisen osuus koko maailman energiaan liittyvistä CO₂-päästöistä on 39 prosenttia, kun mukaan luetaan alkupään sähköntuotanto, (Yhdistyneet Kansakunnat, 2017).

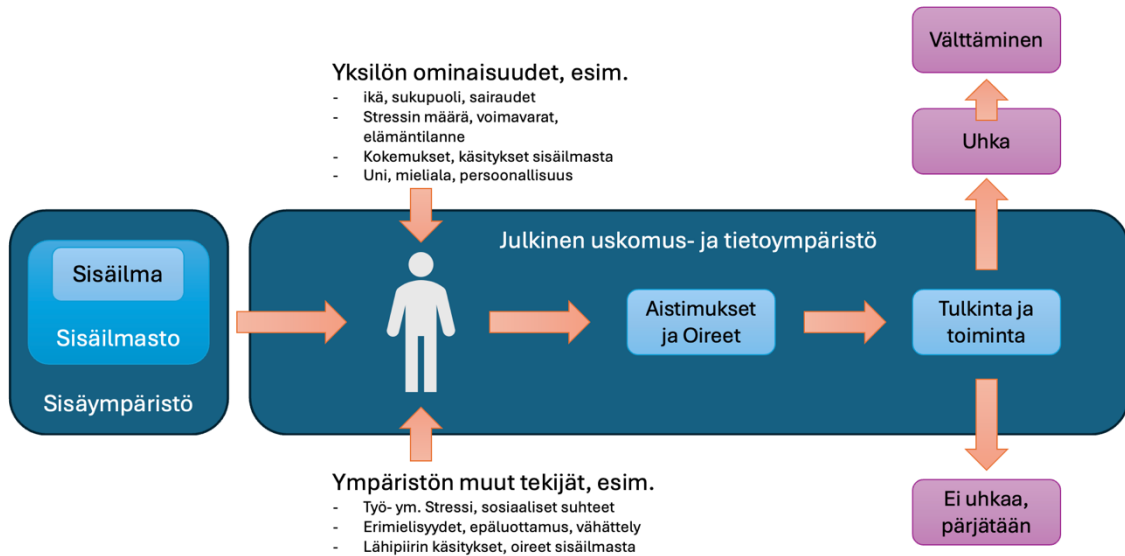
Globaalilla skaalalla tarkasteltuna fossiiliset energianlähteet ovat yhä hallitsevin energian tuotantomuoto. Nykyään noin 40 % globaalista energiankulutuksesta kohdistuu rakennuksiin ja niiden tarvitsemaan energiaan, mikä tekee energiatehokkuudesta todella keskeisen osan ilmastotavoitteiden saavuttamisen näkökulmasta. Siksi kiinteistöjen energiaa säästävillä toimenpiteillä on suora vaikutus myös ihmisten terveyteen, koska energiatehokkuuden parantuessa vähenevät samalla myös ilmansaasteet ja kasvihuonekaasut, Allen (2022, s.13) kirjoittaa.

2.1.2 Terveellinen sisäympäristö

Sisäympäristö muodostuu monista erilaisista tekijöistä kuten kaasuista, hiukkasista, valaistuksesta, säteilystä, fysikaalisista olosuhteista, väreistä, ergonomiasta ja toiminnallisuudesta. Hyvälle ympäristölle ominaista on se, että ihminen pystyy toimimaan kyseisessä ympäristössä optimaalisella tavalla siten, ettei ympäristö rajoita tai häiritse toimintaa millään tavalla, kertoo Pekkanen (2024, s. 63).

Terveellinen sisäympäristö sisältää useita elementtejä, jotka tukevat fyysistä, psyykkistä ja sosiaalista hyvinvointia, kuten luonnonvalon määrä, alhainen melutaso, hyvä ilmanlaatu ja ergonomia. Hyvin suunniteltu elinympäristö voi edistää terveyttä ja tuottavuutta, vähentää sairauspoissaoloja ja lisätä hyvinvointia. Ihmisten yksilöllinen terveyden tila ja subjektiivinen hyvinvointi liittyvät läheisesti toisiinsa; molemmat ovat taloudellisen vaurauden, sosiaalisen liikkuvuuden ja yhteenkuuluvuuden ajureita. Terveystilassa tapahtuvien muutosten ja poikkeaminen varhainen havaitseminen tai ennaltaehkäisy tukee yksilöiden osallistumista taloudelliseen sekä kulttuuriseen ja sosiaaliseen elämään (WHO, 2023).

Kuvan 1 mallissa selitetään sisäympäristön vaikutuksia oireisiin ja sairauksiin, jossa koko sisäympäristö esitetään objektiivisena ja ihmisen kokemuksesta riippumattomana. Sisäilmalla tarkoitetaan mallissa ilmaa ja siinä olevia kaasuja sekä hiukkasia. Sisäilmasto taas muodostuu sisäilmasta ja sisäympäristön fysikaalisista tekijöistä eli lämpötilasta, kosteudesta, sähkö- ja magneettikentistä sekä äänistä. Sisätilassa oleskeleva ihminen tulkitsee sisäympäristöä ja sen eri tekijöitä tietyssä uskomus- ja tietoympäristössä. Näiden tekijöiden lisäksi kokemukseen vaikuttavat tyypillisesti tiiviissä vuovaikutuksessa toistensa vaikutusta muokaten, yhtä aikaa monet muutkin biologiset, psykologiset ja sosiaaliset tekijät, Pekkanen selittää (2024, s. 65).



Kuva 1: Sisäympäristöön liittyvien oireiden tulkintaan ja määrään vaikuttavia tekijöitä, Pekkanen (2024, s. 65)

Ympäristöministeriön arvon (2010) mukaan Suomessa altistuu päivittäin kosteus- ja homevaurioille 600 000–800 000 ihmistä. 24 prosenttia kaikista arvioituista maailmanlaajuisista kuolemista liittyy ympäristöön, (U.S. Environmental Protection Agency, 2024). Tuansia eurooppalaisia kuolee enneaikaisesti joka vuosi saastuneiden elinympäristöjen vuoksi, erityisesti kaupunkialueilla, (European Environment Agency, 2022).

Terveemmän yhteiskunnan ja hyvinvointitalouden tavoittelu on onneksi vahvistunut eri instituutioiden keskuudessa WHO:n alaisilla alueilla Euroopassa. Väittäjä perustuu tähän mennessä saavutettuihin edistysaskeliin, joita ovat esimerkiksi Pan Euroopan terveyden ja kestävän kehityksen komitea, The Ottawa Charter For Health Promotion Geneva sekä terveyden sisällyttäminen yhtenä tekijänä talouden ja liiketoiminnan viitekehyksiin, (WHO, 2019). Suuntaus edistää erityisesti WHO:n Euroopan aluekomitean päätöslauselmaa EUR/RC69/R5: ”Edistyksen vauhdittaminen kohti kaikkien saavutettavissa olevaa terveellistä ja vaurasta elämää, terveyden yhdenvertaisuuden korostamista ja sitä, että ketään ei jätetä ulkopuolelle WHO:n Euroopan alueella”.

Lähestymistavan perusajatus on, että terveys tukee ja vahvistaa hyvinvointitaloutta edistämällä yksilöiden ja yhteisöjen terveyttä, varhaista puuttumista ongelmiin, taloudellista kasvua sekä huomioimalla sosiaaliset ja ympäristöön liittyvät tekijät. Terveet väestöt, terveydenhuoltopalvelut ja terveyden yhdenvertaisuus tuottavat vauraampia ja sietokykyisempiä yhteiskuntia ja taloutta, joissa voidaan myös maksimoida taloudelliset ja sosiaaliset hyödyt (THL, 2024).

Terveellisen sisäympäristön arvioinnissa käytetään tällä hetkellä erilaisia mittareita, kuten hyvinvointi-indeksejä ja käyttäjätyytyväisyyskyselyitä. Lisäksi voidaan mitata yksityiskohtaisia tekijöitä, kuten melutasoa, valaistusta ja lämpötilaa, jotka vaikuttavat suoraan ympäristön viihtyisyyteen ja terveellisuuteen.

2.1.3 Sisäilman laatu

Sisäilman laadulla on kriittisen merkittävä vaikutus ihmisten terveyteen, kognitiivisiin kykyihin, hyvinvointiin, tuottavuuteen ja oppimiseen. Huono sisäilma voi aiheuttaa hyvin monenlaisia terveysongelmia, joista yleisimmät ovat erilaisia allergioita ja hengitystiesairauksia, kertoo Allen (2022, s.12). Ilma, jota hengitämme, muodostuu pääosin hapesta, typestä ja hiilidioksidista, mutta valitettavasti ilmassa on paljon muitakin aineita, jotka kulkeutuvat ihmisten elimistöihin hengityksen kautta. Huono sisäilman laatu johtuu usein kosteudesta, kemikaaleista tai mikro-organismeista. Sisään hengitettäessä elimistömme käyttäytyy, kuin suodatin, jolloin ulos hengitettäessä hengitämme ulos kaasuja, joita elimistömme ei tarvitse. Elimistömme ei pysty kuitenkaan suodattamaan kaikkia haitallisia aineita, joten osa niistä päätyy lopulta elimistöihimme.

Sisäilman laadun määrittelemiseksi tarvitaan aina kokija eli ihminen. Terveysturvallisuuslain (763/1994) 26 pykälässä todetaan, että olosuhteiden tulee olla sellaiset, ettei niistä aiheudu asunnossa tai sisätilassa oleskelevalle terveyshaittaa. Työturvallisuuslain (738/2022) 33 pykälän mukaan työpaikalla tulee olla riittävästi kelpoista hengitysilmaa. U. S. Environmental Protection Agency (2022) määrittelee sisäilman laadun

seuraavasti: ”sisäilman laatu viittaa rakennuksen tai rakenteiden sisällä tai ympäristössä-olevaan ilman laatuun etenkin suhteessa rakennuksen käyttäjien terveyteen ja viihtyvyyteen”.

Huono sisäilman laatu voi aiheuttaa vakavia terveysriskejä. Lyhyellä aikavälillä se voi johtaa yskään, aivasteluun, väsymykseen ja päänsärkyyn. Pitkällä aikavälillä huono sisäilman laatu on yhteydessä useisiin haitallisiin terveysvaikutuksiin, kuten allergia- ja astmaoireisiin, keuhkosyöpään, krooniseen obstruktiiviseen keuhkosairauteen, ilmaitse leviäviin hengitystieinfektioihin ja sydän- ja verisuonitauteihin. Esimerkiksi ihmisillä, jotka viettävät paljon aikaa huonosti ilmastoiduissa tiloissa, on 50 % suurempi riski sairastua allergioihin, (European Ventilation Industry Association, 2024).

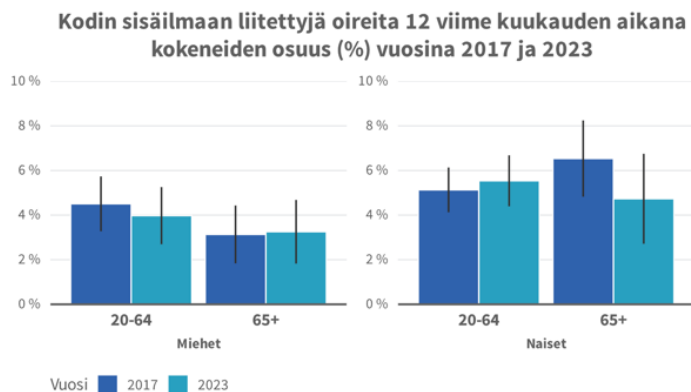
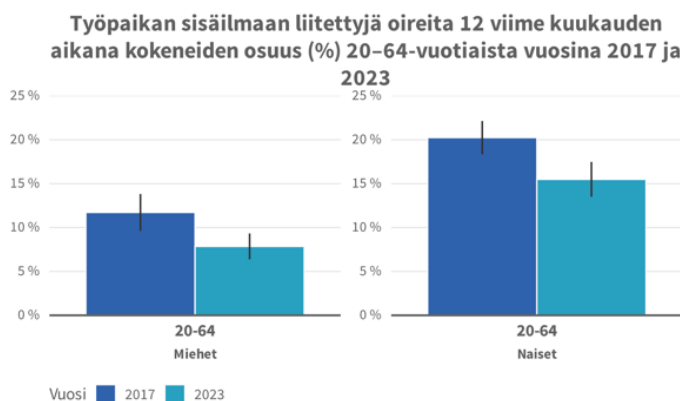
Sisäilmaston suunnittelussa päätavoitteena voi olla terveellisyys, turvallisuus, viihtyvyys, energiatehokkuus ja työtiloissa myös tuottavuus. Sisäilmassa voi olla lukuisia terveyteen vaikuttavia kiinteitä tai kaasumaisia epäpuhtauksia. Sisäilman lämpötila, huoneen pintojen lämpötilat, ilman liike eli veto sekä sisäilman kosteus vaikuttavat kaikki viihtyisyyteen, Alanne ja muut (2024, s. 111) listaavat.

Sisäilmassa olevat saasteet ja epäpuhtaudet muodostuvat erilaisista kaasuista, partikkeleista sekä haitallisista mikrobeista. Näiden tunnetuimpia muotoja ovat esimerkiksi hiilidioksidi, asbesti, radon, home ja monet bakteerit. Kukin edellä mainituista vaikuttaa ihmisten hyvinvointiin eri tavoin, kertoo Lampi (2018, s. 20). Sisäilmassa voi esiintyä satoja kaasumaisia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (Volatile Organic Compound, VOC). Silmät voivat vuotaa erilaisten kemikaalien vuoksi, jotkut voivat kokea päänsärkyä homeen vuoksi ja valitettavasti pahimmillaan vaikutukset voivat johtaa jopa kuolemaan, kuten esimerkiksi asbestin tapauksessa. Altistuminen pienhiukkasille lisää ennenaikaista kuolleisuutta, sydän- ja verisuonisairauksia, keuhkosyöpää ja mahdollisesti myös astmaa, Lampi (2018, s. 20) jatkaa.

Saasteet kulkeutuvat rakennusten sisäilmaan ulkoa, muodostuvat rakennusten sisällä ajan kuluessa tai kulkeutuvat jonkin ulkoisen lähteen avulla, kuten siivoustarvikkeiden, maalien tai hyönteismyrkkujen myötä. Tupakointi, takan käyttö sekä erilaiset ruoanlaittotavat synnyttävät hiilidioksidia. Vanhat rakennusmateriaalit voivat sisältää lukuisia haitallisia aineita. Savupiipusta ja vesihanasta voi kulkeutua VOC-kaasuja. Pöly, lika ja erilaiset tekstiilit voivat sisältää partikkeleita. Tärkeimmät suomalaisten sairastumisen riskiä lisäävät sisäilman epäpuhtaudet ovat ulkoilman saasteet, radon, passiivinen tupakointi ja rakennusten kosteusvauriot, Lampi (2018, s. 22) listaa.

Sisäilmaan liittyvät ongelmat ovat Suomessa yleisiä ja niistä aiheutuu merkittäviä taloudellisia vaikutuksia. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan mukaan pelkästään kosteusvaurioihin liittyvien terveysvaikutusten kustannukset ovat vuosittain 23–953 miljoonaa euroa, ja myös rakennusten korjaamiseen ja uudisrakentamiseen liittyy erittäin suuria kustannuksia, kertoo Lampi (2018, s. 14). Ympäristöministeriön arvion (2010) mukaan Suomessa altistuu päivittäin kosteus- ja homevaurioille 600 000–800 000 ihmistä. Lähes puoli miljoonaa työkäistä on kokenut oireita työpaikkansa sisäilmasta vuonna 2019. Noin 250 000 ihmistä on joskus elämänsä aikana käynyt lääkärissä pääasiassa sisäilmasta johtuvien oireiden tai sairastelun takia, (Hengitysliitto, 2019).

Joka viides työkäinen nainen ja joka kymmenes työkäinen mies on kokenut saaneensa oireita työpaikkansa sisäilmasta viimeisen 12 kuukauden aikana (Taulukko 2). Suomen tasolla tämä vastaa noin 400 000 alle 65-vuotiasta henkilöä. Kolmasosa työkäisistä naisista ja vajaa viidennes (18 prosenttia) miehistä oli joskus elämässään saanut oireita työpaikalla. Noin joka kymmenes nainen ja joka kahdeskymmenes mies oli joskus elämänsä aikana käynyt lääkärissä pääasiassa sisäilmasta johtuvien oireiden tai sairastelun takia. Tämä vastaa Suomen tasolla neljännesmiljoonaa henkilöä.

Taulukko 1: Kodin sisäilmaan liitettyjä oireita, (THL, 2023)**Taulukko 2: Työpaikan sisäilmaan liitettyjä oireita, (THL, 2023)**

Naiset oireilevat enemmän ja käyvät enemmän lääkärissä sisäilmaan liittyen. Sisäilmaan liitetty oireilu on selvästi yleisempää työpaikoilla kuin kotona. Oireita raportoitiin kolme kertaa useammin työpaikoilla kuin kotona. Lähes puoli miljoonaa työkäistä on kokenut oireita työpaikalla viimeisen vuoden aikana, (THL, 2018) Olisikin aiheellista kysyä, miksi oireilu on selvästi yleisempää työpaikoilla?

Euroopan Unionin alueella menetetään vuosittain kaksi miljoonaa tervettä elinvuotta huonon sisäilman laadun vuoksi. Tuottavuuden heikentymisen lisäksi tämä aiheuttaa valtavien rasituksen terveydenhuoltojärjestelmillemme, (European Ventilation Industry Association, 2024). Yhdysvaltain ympäristöviraston tutkimukset (2014) ovat osoittaneet, että lapsilla, jotka opiskelevat luokkahuoneissa, joissa on korkeampi ulkoilmanvaihtuvuus, on taipumus saada parempia tuloksia matematiikan ja lukemisen standardoiduissa testeissä, kuin lapsilla huonosti ilmastoituissa luokkahuoneissa.

Harvardin yliopiston tekemän tutkimuksen (2015) mukaan ihmisten kognitiiviset kyvyt voivat olla jopa kaksi kertaa korkeammat henkilöillä, jotka altistuvat puhtaalle sisäilmalle verrattuna tavanomaisessa sisäilmassa oleskeleviin henkilöihin. Samassa tutkimuksessa pystyttiin lisäksi osoittamaan, puhtaalle sisäilmalle altistuvien henkilöiden kriisinhallintakykyjen olevan lähes puolitoista kertaa korkeammat, ja strategisten sekä tiedonkäyttöön liittyvien kykyjen olevan liki kolme kertaa korkeammat, kuin tavanomaiselle sisäilmalle altistuvien henkilöiden. Kolmas merkittävä havainto samasta tutkimuksesta pystyi osoittamaan, että alhaisille CO₂ tasoille altistuneiden henkilöiden kognitiiviset kyvyt olivat myös kaksi kertaa korkeammat, kuin tavanomaisessa sisäilmassa olleen verrokkiryhmän, (Harvard, 2015).

Ihmiset viettävät keskimäärin noin 90 % ajastaan sisätiloissa, hengittäen sisäilmaa, (U.S. Environmental Protection Agency, 2023). Toisin kuin ulkomaailma, sisämaailma laajenee jatkuvasti. Seuraavien neljänkymmenen vuoden aikana sisätilojen neliömetrien kokonaisuus tulee Yhdistyneiden Kansakuntien (2017) arvion mukaan kaksinkertaistumaan maailmanlaajuisesti. Sisäilman laatu vaikuttaa ja tulee vaikuttamaan meihin kaikkiin, erityisesti kaikista haavoittuvimmassa asemassa oleviin; vanhuksiin, lapsiin ja sairaisiin, jotka viettävät valtaosan ajastaan sisätiloissa.

Terveellinen sisäilma edellyttää riittävää ilmanvaihtoa, oikeanlaista lämpötilaa ja kosteustasapainoa sekä haitallisten hiukkasten ja kemikaalien hallintaa. Sisäilman laatua mitataan muun muassa hiilidioksidipitoisuuden, lämpötilan, kosteuden ja PM_{2.5}-hiukkasten perusteella. Täsmälliset mittausvälineet ja sensorit ovat avainasemassa. Tällä hetkellä sisäilman parantamiseksi käytetään lähinnä perinteisiä menetelmiä, kuten ilmanvaihtoa, ilmanpuhdistimia ja kosteudenhallintajärjestelmiä. IoT-antureiden tuottaman reaaliaikaisen tiedon hyödyntäminen ja oikeanlainen analysoiminen erilaisten tekoäly- ja koneoppimismallien avulla on lähitulevaisuudessa avainasemassa ilmanlaadun tehokkaassa optimoimisessa.

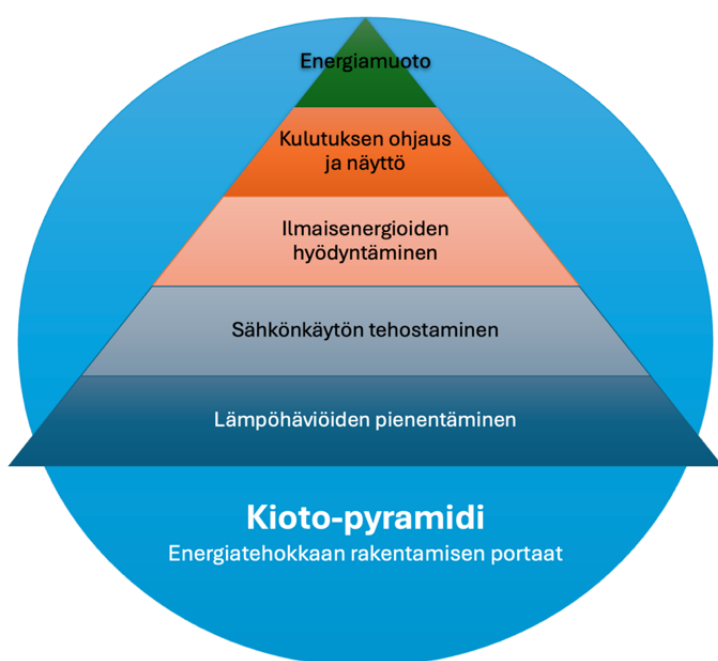
2.2 Nykyiset käytännöt rakennusten tehokkuuden parantamiseksi

Rakennuksissa yhdistellään nykyään perinteisiä LVIS-järjestelmiä (lämmitys-, vesi-, ilmanvaihto- ja sähköjärjestelmät) paikan päällä olevien sähköntuotantojärjestelmien kuten, aurinko- ja tuulisähkö sekä sähköajoneuvojen latausjärjestelmien kanssa. Valtaosa edellä mainituista järjestelmistä ovat välttämättömiä esimerkiksi optimaalisen sisäympäristön, lämpömukavuuden ja ilmanvaihdon ylläpitämiseksi, Zhang ja muut (2022, s.1) kirjoittavat. Suurin haaste on löytää oikea tasapaino terveellisen ja miellyttävän sisäympäristön sekä energian tarpeen ja kustannusten minimoisen välillä.

Rakennusten suunnitteluvaiheessa on perinteisesti ollut käytössä erilaisia simulointityökaluja, joiden avulla on yritetty mallintaa rakennuksen energiankulutusta ja varmistaa, että rakennus sekä sen käyttämät järjestelmät vastaavat vaadittuja standardeja. Valitettavasti vaihteluvälit todellisen ja suunnitellun energiankuormituksen välillä ovat olleet kuitenkin suuria, koska talonrakentamiseen sekä talo- ja tietojärjestelmien toimintaan ja hallintaan sisältyy suuri määrä variaatioita, jotka kaikki vaikuttavat lopputulokseen, Zhang ja muut (2022, s.1) kertovat.

Yli sadan vuoden ajan on yritetty selvittää erilaisia ratkaisuja ja toimenpiteitä tekemällä, miten rakennusten sisälle saataisiin tuotua riittävä määrä puhdasta ilmaa, energiatehokkuudesta tinkimättä. 1970-luvulla rakennuksista alettiin tekemään mahdollisimman tiiviitä ja niiden ilmanvaihtoa heikennettiin, jotta energiaa saataisiin säästettyä mahdollisimman tehokkaasti. Tämän seurauksena syntyi ilmiö, jota kutsutaan Merriam Websterin määrittelemäksi Sairas Rakennus-oireyhtymäksi (Sick Building Syndrome), (Merriam Webster, 1983). Oireyhtymällä tarkoitetaan terveys- ja viihtyvyytsvaikutuksia, joita suuri joukko ihmisiä koki ollessaan tutkimusten aikaisissa rakennuksissa. Tällaisia oireita, jotka tyypillisesti vaikuttavat ihmisiin ja joiden uskotaan johtuvan nykyaikaisten ilmatiiviiden rakennusten sisätiloissa olevista saasteista kuten formaldehydihöyryistä tai mikro-organismeista, ovat päänsärky, väsymys ja silmien ärsytys, Pekkanen (2024 s. 21) listaa.

Energiatehokkaan rakentamisen perustana on rakennuksen ja sen järjestelmien lämpöhäviöiden pienentäminen, jossa rakennuksen energiantarve saatetaan mahdollisimman pieneksi. Tähän päästään hyvällä ulkovaipan lämmöneristyksellä ja tiiveydellä, ikkunoiden auringonsuojauksella ja tehokkaalla lämmöntalteenotolla ilmanvaihdosta, Alanne ja muut (2024 s. 206) listaavat. Näiden jälkeen tulee energian käytön tehostaminen ilmaisenergioiden hyödyntämisen, energiatehokkaiden laitteiden, tarpeenmukaisen käytön ja kulutuksen näytön avulla. Viimeisenä pyramidin huipulla tulee alhaista energiankulutusta vastaavan energiantuotantomuodon valinta (kuva 2).



Kuva 2: Energiatehokkaan rakentamisen portaat, Alanne ja muut (2024, s.158)

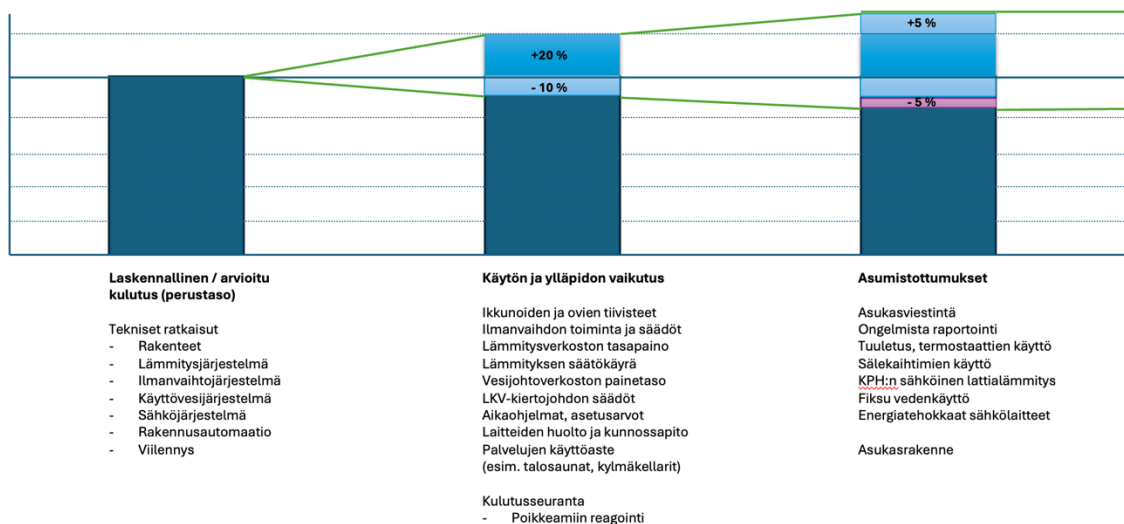
Keskeistä energiatehokkuuden parantamisessa on rakenne- ja talotekniikan yhteensovittaminen. Alanne ja muut (2024 s. 206) listaavat, että energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä arkkitehtisuunnittelussa ovat rakennuksen sijainti, tilat, massoittelu ja materiaalit sekä taloteknisten järjestelmien vaatimien tilojen ja reititysten järkevä suunnittelu. Rakennesuunnittelun kannalta keskeisiä ovat rakenteiden lämpö- ja kosteustekninen toiminta sekä ilmatiiviys. Talotekniikan näkökulmasta katsoen tärkeitä asioita ovat lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien valinta ja suunnittelu, lämpimän käyttöveden valmistus sekä valaistuksen suunnittelu.

Yksi tehokas tapa vaikuttaa on viestintä, valistus ja tiedon jakaminen. Kulutuksesta tiedottamisella pyritään siihen, että käyttäjä muuttaisi asettamiaan tavoitteita energiatehokkuutta parantavalla tavalla kuten esimerkiksi pudottamalla huonelämpötilaa. Valistuksella ja oikean tiedon jakamisella on vaikutus kuluttajan käyttötottumuksiin. Peukalo sääntönä on yleisesti käytetty arviota, että huonelämpötilan pudottaminen asteella säästää vuosittaisessa energiankulutuksessa noin 5 % ja huoneistokohtaisten vedenkulutuksen mittareiden asentaminen vähentää vedenkulutusta noin 30 %. Käyttövesiverkoston liian korkean paineen alentaminen voi säästää 5–25 % kokonaisvedenkulutuksessa, Alanne ja muut (2024 s. 209) toteavat. Mittareiden lisääminen ei sinänsä tuo säästöä. Vasta se, että käyttäjä muuttaa saamansa tiedon perusteella omaa kulutustaan.

Tärkeää on pystyä havaitsemaan paljon energiaa kuluttavat kohteet ja tiedottamaan niistä oikealla tavalla. Osa huomioista voi liittyä tavanomaiseen toimintaan, mutta osassa tilanteista saattaa olla taustalla jokin poikkeama, häiriö tai vika, joka johtaa normaalia korkeampaa energian käyttöön, kertoo Alanne ja muut (2024 s. 209). Energiatehokkuus saavutetaan korkeatasoisella käytönaikaisella ylläpidolla, laitteiden sekä komponenttien oikea-aikaisilla huolloilla ja vaihdoilla suunnitelmien ja tuoreiden havaintojen mukaan oikein toimimalla.

Tänä päivänä voidaan hyödyntää taloautomaatio järjestelmien tuottamaa seurantatietoa poikkeamien havaitsemiseen, välttämättömien korjausten suorittamiseen ja tulevien parannusten suunnittelemiseen. Alanne ja muut (2024 s. 210) kirjoittavat, että automaatio voi tuottaa paljon seurantatietoa myös muista suureista kuin energiankulutuksesta. Seurannan avulla voidaan saada tietoa esimerkiksi siitä, ovatko sisälämpötilat liian korkeita tai matalia ja onko lämmin vesi riittävän lämmintä sekä toimiiko ilmanvaihto oikein. Rakennusten automaation yksi keskeisimmistä tavoitteista on ohjata rakennuksen järjestelmiä mahdollisimman tehokkaasti. Osa järjestelmistä on automatisoitavissa suhteellisen yksinkertaisesti, mutta osa työkaluista on vielä toistaiseksi niin monimutkaisia, että ne jäävät helposti käyttämättä kokonaan tai aiheuttavat pettymyksiä toimimattomuudellaan, Alanne ja muut (2024 s. 212) kertovat. Pienen energiakulutuksen voi saavuttaa nyt

käyttäjän ohjaamana. Kehityssuuntana onkin ollut, että mahdollisimman suuri osa toiminnoista toteutetaan jatkossa jopa kokonaan automaatiojärjestelmän ohjaamana, Alanne ja muut (2024 s. 212) jatkavat.



Kuva 3: Käytön ja ylläpidon vaikutus energiatehokkuuteen, Alanne ja muut (2024)

Hyvin ylläpidetyssä taloyhtiössä energia- ja vesikustannukset voivat olla noin 10 % oletettua perustasoa alhaisemmat. Rakennuksen huono käyttö ja ylläpito voivat vaikuttaa myös sisäolosuhteisiin, esimerkiksi liian korkeiden sisälämpötilojen vuoksi, Alanne ja muut (2024 s. 168) kuvaavat.

Oikea sisätilojen lämpötila on tärkein lämmitys- ja ilmastointilaitteiden suunnittelun tavoite. Lämpötila on oikea silloin, kun ei osata sanoa, pitäisikö sen olla korkeampi vai matalampi. Oikealla lämpötilalla luodaan perusteet sisätilojen terveellisyydelle ja viihtyisyydelle, Alanne ja muut (2024 s. 168) kertovat. Liian korkea lämpötila kuluttaa paljon energiaa, aiheuttaa ylimääräisiä kustannuksia sekä vaikuttaa negatiivisesti ihmisten terveyteen ja viihtyvyyteen. Liian kylmällä lämpötilalla on tunnetusti myös negatiivisia vaikutuksia terveyteen ja hyvinvointiin, mutta tämän lisäksi liian kylmä ilma voi osaltaan vaikuttaa myös rakennuksen rakenteisiin syntyviin kosteusvaurioihin. Tietyt lämpötilat voivat vaikuttaa jopa ihmisten immuunijärjestelmään negatiivisesti.

Ilmanvaihto on lähtökohtaisesti epäpuhtauksien poistaja. Sitä tulee olla riittävästi, jotta riittävän suuri määrä sisäilman epäpuhtauksia saadaan poistettua. Ilmanvaihdolla on suuri merkitys sopivan kosteuden ja lämpötilan ylläpitämisessä. Ilmanvaihdon riittävyyden arvioon vaikuttaa se, millaisen terveyshaitan (sairaus, oire, toimintakyky) näkökulmasta riittävyttä tarkastellaan, Pekkanen (2024 s. 246) toteaa. Lisäksi voidaan tarkastella saatavuutta eli sitä, millainen ilmanvaihdon taso on teknisesti ja taloudellisesti kyseiseen tilaan järkevä ja kuinka se saadaan optimoitua tehokkaimmin. Rakennusten ilmanvaihtoa parannettaessa, lisätään sekä koneellista että luonnollista ilmanvaihtoa ja noudatetaan vähimmillään rakennusmääräysten mukaisia ulkoilman vaihtoarvoja. Ilmanvaihtonopeutta mitataan ja testataan, jonka perusteella tehdään tasapainotusta sekä muita tarvittavia säätöjä järjestelmiin raja-arvojen saavuttamiseksi.

Ilmastointi ja ilmanvaihto muodostavat monissa rakennuksissa yli puolet energiatarpeesta. Rakennukset aiheuttavat kokonaisuudessaan noin 40 % EU-alueen koko energiankulutuksesta. Energiansäästö on tärkeää, mutta se ei saa kuitenkaan aiheuttaa vaaraa sisäympäristön terveellisyydelle, Alanne ja muut (2024 s. 109) kertovat. Suomessa on jo pitkään kehitetty tekniikkaa, jolla voidaan saada aikaan hyvää ja viihtyisää sisäilmastoa energiatehokkaasti. Tekniikan keinoja tähän ovat etenkin lämmön talteenotto sekä tarpeenmukainen (tarveohjattu) ilmanvaihto, Alanne ja muut (2024 s. 109) jatkavat.

Patogeeninen lähestymistapa = vähennetään kuormitustekijöitä			
Salutogeeninen lähestymistapa = lisätään voimavaroja			
Terveysvaaraa aiheuttavien kemiallisten, biologisten tai fysikaalisten sisäympäristötekijöiden hallinta esim. radon, taudinaiheuttajamikrobit, kova melu, ääriämpötilat Turvallisuusriskien - ja uhkien pienentäminen esim. tapaturmariskit, tietoturvariskit, väkivallan ja ilkeiden uhka	Viihtyvyyshaittaa aiheuttavien tekijöiden hallinta esim. sisäilman aistittu laatu, lämpötila, ääniympäristö, valaistus Ergonomisia työasentoja tukevat kalusteet esim. säädettävät työtuolit- ja pöydät	Palautumista ja viihtyisyyttä lisäävät tilaratkaisut esim. luonnon elementit, luontonäkymät, päivänvalo Toiminnallisten tarpeiden huomiointi tilojen suunnittelussa esim. työn sujuvuus, yhteistyö ja vuorovaikutus, yksityisyys ja tilantarve	Työn imua ja mielekkyyttä tukevat ratkaisut esim. luonnon elementit Terveellistä käyttäytymistä edistävät ratkaisut esim. aktiivisuutta lisäävät kalusteet, visuaaliset kannustimet portaiden käyttöön ja terveellisempään ravintoon

Kuva 4: Kuormitusta aiheuttavia ja voimavaroja edistäviä sisäympäristötekijöitä, Pekkanen (2024, s. 310)

Aurinkopaneelit ja tehokkaat lämmöneristysratkaisut, kuten uudet matalaenergiakaksoislasit, ovat myös tärkeitä energiatehokkuutta lisääviä ratkaisuja. Näillä teknologioilla voidaan parantaa rakennusten energiatehokkuutta pitkällä aikavälillä. Nykyään aurinkosähkö on entistä houkuttelevampi vaihtoehto myös taloyhtiöille, sillä uuden lainsäädännön mukaisesti aurinkovoimalan tuotto voidaan jakaa myös taloyhtiön osakkaiden käyttöön ns. hyvityslaskennan avulla. Yli menevä aurinkosähkö jaetaan ensin huoneiston sähkönkulutukseen ja vasta tämän jälkeen jäljelle jäänyt yli menevä aurinkosähkö myydään sähköverkkoon, Alanne ja muut (2024 s. 94) toteavat. Tällä parannetaan aurinkovoimaloihin investoimisen kannattavuutta, sillä merkittävä osa suurenkin aurinkovoimalan tuottamasta sähköstä voidaan käyttää suoraan rakennuksessa itsessään.

Olisi tärkeää siirtyä toiminnassa yhä enemmän rakennusten ongelmatilanteiden ennaltaehkäisyyn ja nopeaan reagointiin, jos ongelmia ilmenee. Myös avoin viestintä ja luottamuksen rakentaminen eri sidosryhmien välille on tärkeää, Pekkanen (2024, s. 307) kirjoittaa. Tutkimukset osoittavat, että optimaalisen ilmanlaadun ylläpitäminen energiatehokkaissa rakennuksissa ilman reaaliaikaista dataa johtaa epätasapainoon sisäilman laadun ja energiatehokkuuden välillä, kun taas sensoripohjainen seuranta saavuttaa molemmat.

2.3 Käytännön esimerkkejä tulevaisuuden ratkaisumalleista

Tässä osiossa käsitellään uusien esiin nousevien teknologioiden, kuten sensoreiden, automaatiojärjestelmien, datanhallinnan- ja louhinnan, koneoppimisen sekä tekoälyn hyödyntämistä rakennusten hallinnassa ja energiankulutuksen sekä sisäympäristön laadun optimoinnissa. Viimeisen vuosikymmenen aikana on luotu uusia tehokkaita työkaluja, joiden avulla voidaan esimerkiksi diagnosoida aiemmin havaitsemattomia relaatioita ja korrelaatiopisteitä sekä louhia ja tiivistää tehokkaasti suuria tietomassoja- ja aineistoja innovatiivisia tiedonlouhinnan ja koneoppimisen menetelmiä käyttäen, Zhang ja muut (2022, s.2) kertovat. Tutkielmassa käydään läpi isojen datavirtojen keräämiseen ja tulkitaan perustuvia keinoja, joilla asumiseen liittyvää käyttäytymistä ja diversiteettiä sekä rakennusten energiankäyttöä voidaan ymmärtää ja kehittää tehokkaammin.

Maailmassa on tehty jonkin verran tutkimuksia, joissa on pyritty kuroma umpeen rakennusten käyttöasteen ennustamisen ja todellisten rakennusten hallintajärjestelmien hallinnan välistä kuilua, jolla on luonnollisesti merkittävä vaikutus esimerkiksi optimaalisen lämpötilan ja energiankäytön kannalta. Esimerkiksi tuoreessa tekoälypohjaista menetelmää hyödyntävässä tutkimuksessa onnistuttiin saavuttamaan jopa 30 % säästö energiankulutuksessa, käyttämällä kahdeksaa erilaista reaaliaikaista dataa tuottavaa sensoria yhdessä käyttöasteen ennustamisen rinnalla, kirjoittavat Zhang ja muut (2022, s.2). Toisen tuoreen tutkimuksen mukaan, rakennusten käyttöasteeseen perustuvalla järjestelmällä voidaan säästää energiaa ilmanlaadusta ja miellyttävästä lämpötilasta tinkimättä jopa 30 %. Sama tutkimus osoitti myös, että ilmanvaihdon ohjaukseen perustuvassa ulkoilman tuuletustehossa voidaan säästää noin 56 % energiaa, hyödyntämällä CO₂ antureiden tuottamaa dataa käyttöaste- ja läsnäolooperusteisen datan rinnalla, Zhang ja muut (2022, s.2) listaavat.

Samalla osoitettiin myös, että samassa tilanteessa olevat ihmiset reagoivat eri tavalla erilaisten kehonkoostumusten sekä sukupuoli- ja ikäerojen takia. Siksi olisi tärkeää pystyä luomaan malleja, jotka keskittyvät henkilökohtaisesti koetun käyttömukavuuden toteutuman perusteella luomaan ennusteita ja toimenpiteitä energiankulutuksen minimoimiseksi. Älykkäiden sensoreiden- ja laitteiden viimeaikainen kehitys on helpottanut tiedon keräämistä, validoimista ja mallien rakentamista. Lisäksi koneoppimis teknologian kehitys on yksinkertaistanut laajojen tietomassojen analysoimista ja näkemysten keräämistä, joka on mahdollista tiivistää itseoppivaan järjestelmään integroitavaksi yhteiseksi moduuliksi, Zhang ja muut (2022, s.2) toteavat.

Aiemmat onnistuneet tutkimukset osoittavat, että tutkimus- ja kehitystyötä kannattaa jatkaa energiankäytön tehostamisen, käyttömukavuuden parantamisen ja uusien teknologisten menetelmien välisten yhteyksien hyödyntämisestä, jotta toivottavasti lopulta onnistutaan luomaan huippumoderni lähestymis- ja toteutustapa näiden aiheiden välisen vuorovaikutuksen tehostamiseksi.

2.3.1 Älykkäät automaatiojärjestelmät ja sensoriteknologiat

Nykyaikaisissa rakennuksissa automaatiojärjestelmillä, kuten Building Management Systems (BMS), on keskeinen asema energiatehokkuuden parantamisessa. Järjestelmien avulla voidaan automatisoida reaaliaikaisia lämmityksen, ilmanvaihdon ja valaistuksen säätötoimenpiteitä, jotka vastaavat tilojen todellista käyttöastetta. Järjestelmä voi esimerkiksi kaikessa yksinkertaisuudessaan himmentää valoja tai säätää lämpötilaa, reaaliaikaisten tilatietojen ja sääolosuhteiden perusteella. IoT-teknologiat parantavat rakennusautomaatiojärjestelmiä mahdollistaen rakennusten saumattoman ohjauksen erilaisilla hallintatoiminnoilla. Lisäksi sisäympäristöä voidaan mukauttaa asukkaiden käyttäytymisen ja mieltymysten perusteella, kun älykkäiden IoT-antureiden keräämää dataa hyödynnetään oikealla tavalla.

Alanne ja muut (2024, s.212) kertovat, että hyvät käyttöliittymät ja käyttöä tukevat raportit eri käyttäjäryhmille ovat keskeisellä sijalla automaation ohjaaman taloteknisen järjestelmän käyttämisessä ja toimivuuden seuraamisessa. Niiden tulisi olla sellaisia, että järjestelmää automaation avulla käyttävä henkilö voi helposti ymmärtää, mitä se tekee hänen puolestaan. Tämä on keskeinen edellytys automaation oikeassa ja tehokkaassa käyttämisessä.

Automaatiojärjestelmän tulee taata tarpeenmukaiset ohjaukset, jotta esimerkiksi valaistus ei ole turhaan päällä, lämpötilat saadaan pidettyä mahdollisimman vähän energiaa kuluttavina, eikä tapahdu yhtäaikaista lämmittämistä ja jäähdyttämistä. Osana matala-energiarakentamisen ratkaisuja ja rakennuskannan energiatehokkuuden parantamista on tärkeää, että energiaa käyttävien laitteiden ja järjestelmien automaatio, ohjaus ja valvonta toteutetaan tavalla, joka johtaa terveelliseen ja miellyttävään sisäilmastoon optimaalisella energiankäytöllä, Alanne ja muut (2024, s.206) kirjoittavat. Perinteisesti rakennuksen kulutusseuranta on tarkoittanut energian ja vedenkulutuksen jatkuvaa seuranta, jossa kerätään kulutustiedot (mittaustiedot) sovituin aikaväleihin, lasketaan kulutukset ja tunnusluvut, arvioidaan tuloksia ja järjestelmien toimintaa, raportoidaan havaitut tulokset ja arvioidaan asetettujen tavoitteiden toteutumista, kertoo Alanne ja muut

(2024, s.160) listaavat. Ongelmana on ollut usein tähän mennessä se, että kulutusseuranta on nähty teknisenä prosessina, jonka ylläpitämiseen ei ole riittänyt organisaation omat resurssit eikä asiantuntemus. Tulevaisuudessa edellä kuvattu prosessi tullaan hyvin todennäköisesti näkemään osana laajaa tiedolla johtamisen kokonaisuutta, jossa mitaustietoja seurataan reaaliaikaisesti ja ohjaus sekä poikkeamiin reagointi tapahtuu pääsääntöisesti automaation avulla.

Teknologioiden nopea kehitys on avannut uusia mahdollisuuksia rakennusteollisuuteen. Tekoäly-, IoT- ja Big Data -teknologioiden integroimisella osaksi rakennusinfrastruktuurien kehittämishankkeita, on suuri potentiaali edistää uusia innovaatioita, kasvattaa ympäristötietoisempaa sekä sosiaalisesti vastuullisempaa lähestymistapaa, kertoo Nitin (2023, s.22). Tekoäly käsittelee IoT-laitteiden keräämää Big Dataa, josta syntyy arvokkaita näkemyksiä ja oivalluksia. Tekoälyalgoritmit voivat esimerkiksi analysoida tietoja rakennuksiin upotetuista antureista (IoT) energiankäyttömallien optimoimiseksi (Big Data). Tutkijat ottavat yhä enemmän käyttöön datafuusiotekniikoita, jotka yhdistävät tietoa eri lähteistä, kuten ympäristöantureista ja rakennusten hallintajärjestelmistä. Tämä lähestymistapa lisää ennakoivien mallien kattavuutta, ja edistää viime kädessä sekä nykyisten, että tulevien sukupolvien hyvinvointia pitkällä aikavälillä, Jiang ja muut (2024 s.1598).

Internet of Things (IoT) tarkoittaa toisiinsa yhdistettyjen älykkäiden laitteiden ja sensoreiden verkkoa, jotka kommunikoivat, vaihtavat, mittaavat ja keräävät arvokasta tietoa internetin välityksellä. IoT on avainasemassa älykkäiden rakennusten luomisessa, koska rakennusjärjestelmiin integroiduilla IoT-antureilla voidaan kerätä jatkuvasti reaaliaikaista tietoa energiankulutuksesta, asumismalleista ja ympäristöolosuhteista. Tämä on ratkaisevan tärkeää tarkan ennustavan mallintamisen kannalta, Nitin (2023, s.77) toteaa. IoT:n avulla voidaan hallita ja seurata lähes kaikkea rakennusten tekniikkaa, kuten valaistusta, lämmitystä, ilmanvaihtoa ja ilmastointia sekä turvallisuutta. IoT-sensorit pystyvät keräämään tietoa lukuisista erilaisista muuttujista, joista yleisimpiä ovat lämpötila, CO₂, kosteus, valaistus, käyttöaste ja energiankäyttö (sähkö ja vesi).

Kerättyä tietoa hyödynnetään esimerkiksi, rakennuksen suorituskyvyn optimointiin, energiatehokkuuden ja asukkaiden mukavuuden kehittämiseen, listaa Nitin (2023 s. 81). Automatisoituihin LVIS-järjestelmiin integroituina, IoT-laitteet voivat säätää esimerkiksi, dynaamisesti lämpötilaa ja ilmavirtaa, jolla on suora tehostava vaikutus energiankulutukseen ja sisäilman laatuun. Älykkäät termostaatit voivat säätää lämpötiloja käyttöasteen mukaan ja älykkäät valaistusjärjestelmät voivat himmentää tai sammuttaa valot tyhjästä tiloista, mikä säästää merkittävästi energiaa. IoT valvotut jätteastiat varoittavat jätehuoltoa, kun ne ovat täynnä, joka tehostaa jätteenkeruun reittisuunnittelua ja vähentää toimintakustannuksia. Ilmanlaatusensoreilla voidaan seurata esimerkiksi hiilidioksidipitoisuuksia (CO₂), pienhiukkasia (PM_{2.5}) ja haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC). Kun raja-arvot ylittyvät, järjestelmä säätää ilmanvaihtoa automaattisesti, mikä varmistaa optimaalisen ilmanlaadun ja minimoi energiankulutuksen.

Yhtenä hyvänä esimerkkinä nostettakoon esille, sisälämpötilaan liittyvä lämmönjaon epätasapaino. Lämmönjakoverkoston epätasapaino aiheuttaa lämpötilaeroja eri tilojen välillä, jolloin koko rakennuksen lämpötilaa on nostettava niin ylös, että kylmimmässä tilassa saavutetaan haluttu lämpötilataso. Tämä aiheuttaa ylimääräistä energiankulutusta tarpeettoman lämpötilannousun takia, Alanne ja muut (2024 s. 207) toteavat. Uudet mittaukseen perustuvat ratkaisut mahdollistavat lämmönjaon optimoinnin käytön aikana tehtävien reaaliaikaisten mittausten perusteella.

Nitin (2023, s.79) kertoo, että reaaliaikaista tietoa käytetään rakenteiden kunnon arvioimiseen ja mahdollisten vaurioiden tai poikkeamien havaitsemiseen. Kehittyneet analytiikkatyökalut käsittelevät kerättyä tietoa reaaliaikaisesti ja tarjoavat hyödyllisiä johtopäätöksiä tietopohjaisen päätöksenteon tueksi. IoT:n avulla tuotettu ennakoiva analytiikka auttaa luomaan trendejä ja ennakoimaan mahdollisia ongelmia. Algoritmit käyttävät analysoimisessa hyödyksi myös historiatietoja. Rakenteellisten ongelmien varhainen havaitseminen mahdollistaa oikea-aikaiset huolto- ja korjaustoimenpiteet, jolla voidaan vaikuttaa rakennusten pitkäikäisyyteen, välttää parhaimmillaan katastrofaaliset vauriot sekä varmistaa asukkaiden turvallisuus.

Rakennusten teknologinen tulevaisuus näyttää lupaavalta edelleen kehittyvien IoT teknologioiden ansiosta. Uusia lähestymistapoja ovat IoT:n integrointi tekoälypohjaisiin energianhallintaratkaisuihin, jotka optimoivat erilaisia kulutusmalleja ennustavan mallinnuksen avulla. Tekoälyalgoritmeja hyödyntämällä tietoa voidaan tarkastella ja analysoida samanaikaisesti monista eri lähteistä, kuten säämalleista, käyttöasteista ja energiakulutustottumuksista, Nitin (2023, s.79) listaa. Rakennusteollisuudella on mahdollisuus ottaa vielä valtava harppaus eteenpäin yhdistämällä edellä mainittuun kokonaisuuteen koneoppimisalgoritmeja, jotka tehostavat jatkuvasti energiankulutusta oppimalla aiemmin kerätystä historiatiedoista. Rakennukset ja niitä ympäröivä infrastruktuuri eivät ole tulevaisuudessa ainoastaan toimivia ja esteettisesti miellyttäviä, vaan myös älykkäitä, mukautuvia ja ympäristötietoisia. Teknologioiden kehittyessä rakennusteollisuus voi odottaa entistä innovatiivisempia ja adaptiivisempiä IoT ratkaisuita, jotka muokkaavat rakentamisen ja kaupunkien tulevaisuutta, Nitin (2023, s. 80) jatkaa.

Nitin (2023, s.89) kirjoittaa, että suurin haaste tekoäly-, IoT- ja Big Data -teknologioiden yhdistämisessä on datan monimuotoisuus ja laatu. Dataa kerätään isommissa rakennuksissa valtavia määriä erilaisten IoT-laitteiden avulla. Näiden heterogeenisten tietolähteiden harmonisointi saumattoman integroinnin ja yhteensopivuuden varmistamiseksi on merkittävä tekninen haaste. Se vaatii eri tietomuotojen, standardien ja protokollien yhdenmukaistamista, joka on kyllä täysin mahdollista, mutta vaatii asiantuntevaa osaamista. Toinen merkittävä haaste ja huolenaihe liittyy yksityisyydensuojaan sekä tieto- ja kyberturvaan. Tekoälyalgoritmit ja Big Data -analytiikka vaativat usein pääsyn suuriin tietokokonaisuuksiin, mikä herättää huolta tietosuojasta ja tiedon luvattomasta käytöstä, Nitin (2023, s.89) jatkaa. Luotettavan ja eheän datalähtöisen päätöksenteon mahdollistaminen on haastavaa, mutta onneksi myös mahdollista jatkuvasti kehittyvän tietoturvaosaamisen ansiosta.

Uudet sensortechnologiat tekevät näkymättömästä näkyvää, tarjoamalla mahdollisuuden seurata reaaliaikaisesti minuutti minuutilta kiinteistöjen ja niissä vallitsevan sisäilman muutoksia. Aikaisemmin kiinteistöjen sisäilmaan liittyvää seurantaa ja arviointeja

on tehty keskimäärin vuosittain, ja samassa yhteydessä järjestelmiin on tehty mahdollisia säätöjä, Allen (2022, s. 34) kertoo. Nykyään kaikki tämä voidaan tehdä välittömästi, kun sisäilmaa mittaavat sensorit liitetään osaksi taloautomaatiojärjestelmiä ja sitä kautta niiden tuottamalla tiedolla ohjataan automaattisesti kiinteistöjen ilmanlaatuun vaikuttavia järjestelmiä ja koneita.

Harvard Business Reviewin julkaisemassa artikkelissa (2023) korostetaan keskeisten sisäilmanlaatu parametrien, kuten PM_{2,5}:n ja CO₂:n seurannan muutospotentialiaalia, hyödyntämällä anturitekniikan ottamia edistysaskeleita. Artikkelissa kerrotaan, että uusien tekniikoiden avulla voidaan "nähdä" mitä sisätiloissa tapahtuu, mikä auttaa tunnistamaan ja hallitsemaan sisäilman laatuongelmien lähteitä. Seuraamalla aktiivisesti sisäilman laatua sidosryhmät voivat tehdä tietoon perustuvia päätöksiä, jotka eivät koske vain välittömiä terveysriskejä, vaan myös edistävät pitkän aikavälin hyvinvointia ja tuottavuutta sisätiloissa.

Euroopan Unionin komissio on kehittänyt rakennuksia varten älyvalmiusindikaattorin (Smart Readiness Indicator, SRI), jolla ilmaistaan rakennuksen järjestelmien valmius hyödyntää energijärjestelmästä saamaansa tietoa. Arvion kohteena ovat talotekniset järjestelmät ja tarkoituksena on arvioida valmiuden tasoa energiatehokkuuden, rakennuksen käyttäjän ja kysyntäjouoston näkökulmasta, Euroopan Unioni (2020) linjaa. Korkean älyvalmiusindikaattorin arvioidaan jatkossa lisäävän rakennuksen arvoa markkinoilla. Indikaattorin korkea arvo kertoo siitä, että rakennuksen energiankäyttö on joustavaa ja sitä voidaan muuttaa tarjonnan mukaan, rakennus kykenee varastoimaan energiaa eri tavoin, rakennuksen ylläpidossa on mahdollista hyödyntää järjestelmien keräämiä tietoja, ja olosuhteet rakennuksen käyttäjille pysyvät hyvinä, Alanne ja muut (2024, s. 205) listaavat.

Yhdistyneiden Kansakuntien julkaisema raportti (2017) tuo esiin monia esimerkkejä toimivista rakennuksista, kuten nollaenergian Edge-rakennus Amsterdamissa. Rakennus maksimoi luonnonvalon saannin ja aurinkosähkön tuotannon ja käyttää älykkäitä teknologioita, kuten älykkäitä ilmanvaihtojärjestelmiä, jotka reagoivat anturitietoihin tai

käyttäjän komentoihin. Muita esimerkkejä raportista ovat parhaiden käytäntöjen jakaminen ja hallinta, kuten jätteiden jakopalvelu, joka kierrättää rakennus- ja purkujätteitä Ranskassa.

Automaation toteuttaminen hyvin toimivissa taloteknisissä järjestelmissä ei vaadi välttämättä muutoksia itse LVI-tekniikan puolelle. Tällä perusteella voidaan yleisellä tasolla todeta, että kevyimmillään automaatiototeutus tarkoittaa vain automaatiolaitteiden lisäämistä jo olemassa olevaan järjestelmään. Täytyy toki ymmärtää, että investoinnin laajuus vaihtelee tapauskohtaisesti yksittäisen laitteen asentamisesta aina kokonaisen järjestelmän toteuttamiseen, Alanne ja muut (2024 s. 194) kertovat.

Rakennusten automaation avulla osa energiankulutuksesta voidaan ohjata sellaisiin hetkiin, jolloin energian hinta on edullista. Sähköenergian kasvava tarve, saatavuuden vaihtelu sekä siirtohinnoittelu ovat johtaneet viime vuosina sähkön hinnan suuriin vaihteluihin. Toimintoja voidaan kytkeä pois päältä silloin, kun hinta on korkea ja vastaavasti kytkeä päälle hinnan ollessa edullinen, kertovat Alanne ja muut (2024, s. 194). Esimerkiksi lattialämmityksen, sähköauton latauksen ja vesivaraajien ohjauksessa voidaan hyödyntää tietoa energian hinnasta ja ohjata kulutusta edullisiin ajankohtiin.

Teknologioiden kehittyessä on todennäköistä, että rakennuksiin integroitujen aurinko- ja tuulienergian sekä energianvarastoinnin määrä lisääntyy, Alanne ja muut (2024, s. 191) kirjoittavat. Yksittäisten rakennusten ja niihin integroitujen energiantuotannon välille olisi mahdollista muodostaa yhdistävä mikroverkko, joka toimisi kiinteistön omistajien omana energiayhteisönä. Mikroverkkojen omavaraisuudella ja riippumattomuudella voitaisiin entisestään lisätä kysyntäjoustoja esimerkiksi sähköajoneuvojen akkuja hyödyntämällä, Alanne (2024, s. 192) jatkavat. Hajautetun energiantuotannon tavoitteena on lisätä paikallisten energialähteiden osuutta, joka parantaa huoltovarmuutta sekä kohtuun ja vakaahintaisen energian saatavuutta, kun valtakunnallisen energiaverkon kuormitusta saadaan laskettua.

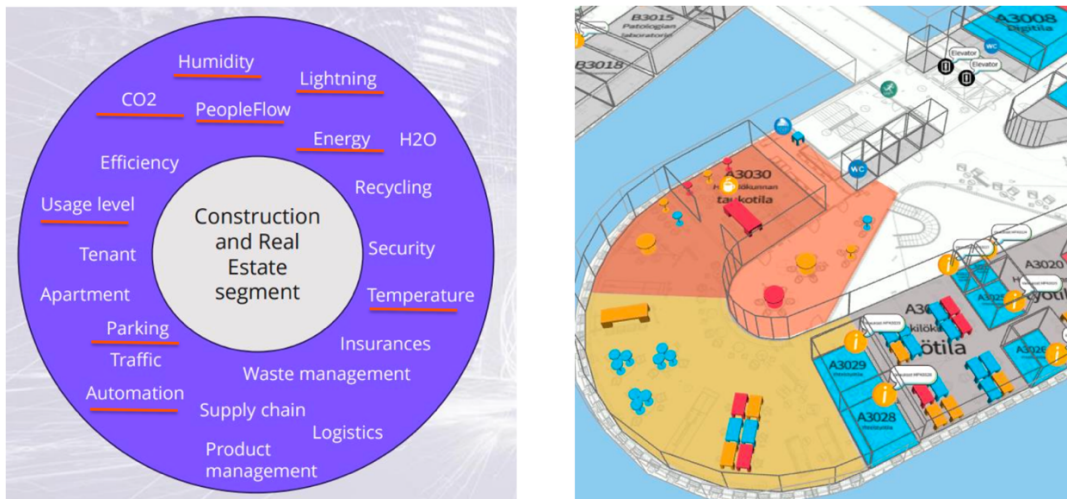
Maailmalta ei löydy montaa kokonaisvaltaista ratkaisua tarjoavaa yritystä, mutta suomalaisista yrityksistä Elisa on kehittänyt oman Smart Building-palvelunsa, joka on keskittynyt rakennusten IoT- ja laitedatan keräämiseen ja ennakoivaan analytiikkaan (Elisa Oyj:n verkkosivut, 2022). Elisa Smart Building yhdistää samaan kokonaisnäkymään monipuoliset raportit kiinteistöjen olosuhteista ja laitteista. Elisan kehittämä AI-pohjainen ennustava analytiikka avustaa kiinteistöjen johtamista ja ongelmien tunnistamista ennakolta. Ongelmat ja laiterikot ehkäistään ennalta, kun koneiden heikentynyt teho tunnistetaan esimerkiksi kulutuspiikeistä tai toimintahäiriöistä. Virheelliset säädöt tunnistetaan epätavallisesta käyttäytymisestä. Virhetilanteiden tunnistaminen etukäteen mahdollistaa huoltopyyntöjen automaattisen prosessoinnin. Elisa Smart Building mahdollistaa kiinteistöön liittyvien tietojen ylläpidon, joille ei ole paikkaa muissa olemassa olevissa järjestelmissä. Elisan tavoittelema jatkoaskel on, että järjestelmä tekee itse valtaosan kiinteistöjen säädöistä ja ennakoi muutoksia.

Suuren yhdysvaltalaisen kiinteistöyrityksen Boston Properties Ltd:n tietohallintojohtaja Jim Whalen totesi eräässä haastattelussaan (2021), että rakennuksille tuleva vuosikymmen on datamatka terveyden, mukavuuden ja energiankulutuksen ennakoivassa tasapainottamisessa. Se on yhtälö, jota kiinteistöjen asukkaat ja käyttäjät odottavat ratkaistavan, ja jota vahvistetaan nyt enemmän kuin koskaan.

2.3.2 Data-analytiikan rooli energiatehokkuuden ohjaamisessa

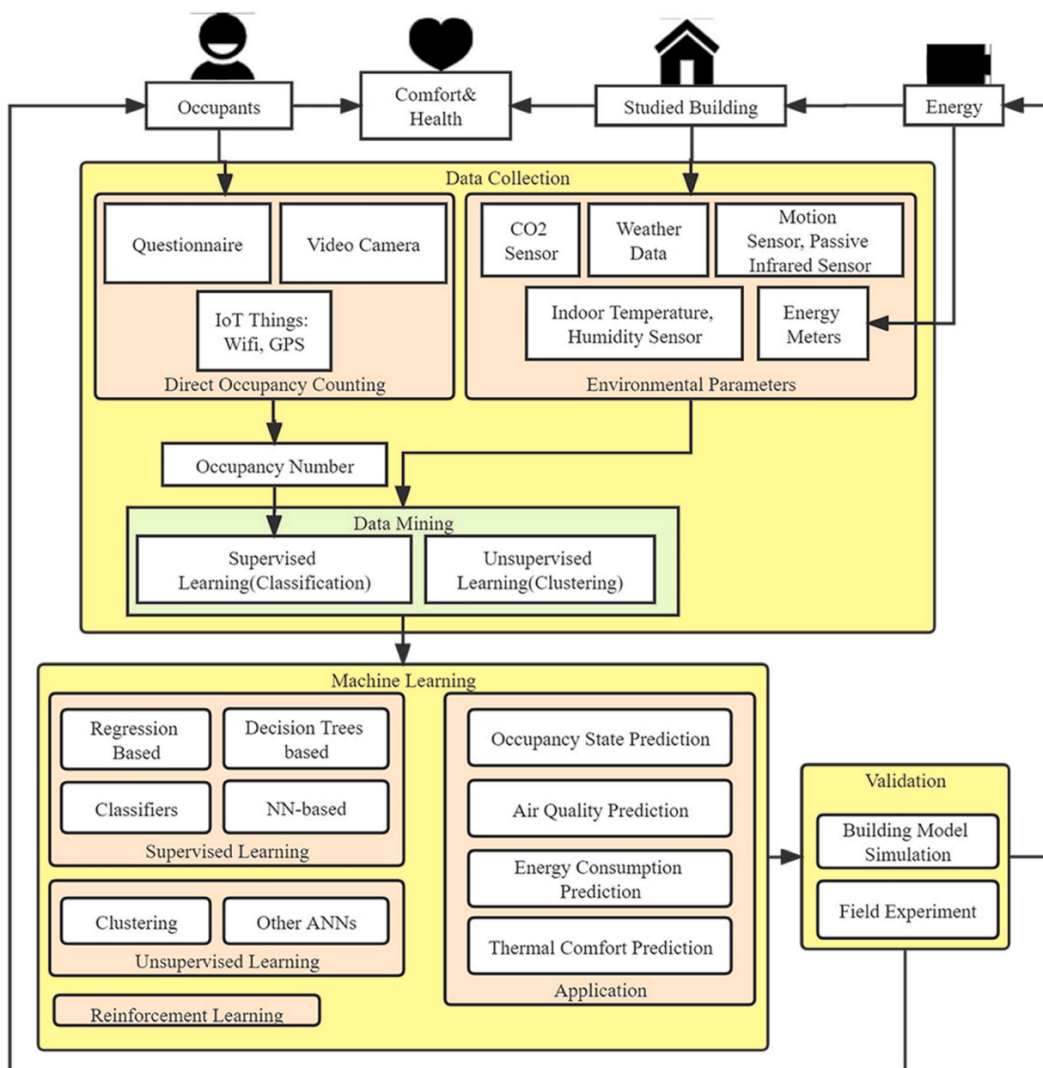
Tilojen vaihtelevat käyttöasteet eri ajan hetkinä, kertovat tarpeesta luoda hyviä ja tarveperusteisia olosuhteita sisäympäristöihin. Hyvät käyttöolosuhteet muodostuvat sisälämpötilasta, ilman raikkaudesta, ilmankosteudesta ja ilmanpuhtaudesta. Ulkolämpötila on myös ilmeinen huomioitava ja vaikuttava tekijä, samoin ovat tuuli ja auringonvalo. Näitä kaikkia ja paljon muuta voidaan mitata, joko suoraan tai hyödyntämällä epäsuoria datavirtoja, (Kuva 5). Esimerkiksi käyttöaste voidaan päätellä kohtuullisella tarkkuudella jo valaistusjärjestelmän datasta. Rakennuksen sisäympäristön olosuhteiden ei tarvitse, eikä pidäkään olla aina samalla tasolla, varsinkaan silloin, kun käyttöä ei ole. Yhdistelemällä

useampia datavirtoja saadaan aikaiseksi analytiikkaa, jota voidaan hyödyntää täysin uudella tavalla päätöstenteossa ja kiinteistönohjaamisessa.



Kuva 5: Mahdollisia datapisteitä rakennuksissa, (Metropolia, 2024)

Täydellisen rakennusten käyttöasteen ennustemallin määrittäminen on haastavaa, koska tunnistetuissa tutkimuksissa esitetyt ennustemalleja hyödyntävät järjestelmät ja niiden käyttämät aikajänteet ovat kovin erilaisia. Tehdyissä tutkimuksissa käyttöasteen ennustemalli koostuu tyypillisesti seuraavista vaiheista: tiedonkeruu, käyttöasteen ennustaminen ja validointi (Kuva 6). Jokainen edellä mainittu vaihe sisältää erilaisia vaihtoehtoja syötteiden, datarakenteen ja algoritmien osalta, jotka vaativat tarkkaa tarkastelua kohdeongelman ja rakennusjärjestelmän perusteella, Zhang ja muut (2022, s.8) kertovat. Ennustemallilla on suora vaikutus rakennuksen suorituskykyyn ja asumisterveyteen- sekä mukavuuteen. Tämä on yksi konkreettinen syy siihen, miksi tässä tutkielmassa käsitellään tiedonkeruu- ja sensortechnologioiden sekä koneoppimistekniikoiden yhteistä hyödyntämistä käyttöasteen ennustusmallien kehittämiseksi.



Kuva 6: Rakennusten käyttöasteen ennustamisen prosessi koneoppimisen avulla (Renewable and Sustainable Energy Reviews, s. 5)

Data-analytiikkatyökalut voivat tunnistaa poikkeamia energiankulutuksessa ja sisäilman laadussa analysoimalla reaaliaikaista ja historiallista dataa. Algoritmit ja koneoppiminen voivat ennustaa, milloin järjestelmiä on huollettava tai milloin ulkoiset tekijät (esim. lämpötila tai kosteus) saattavat lisätä energian kysyntää, mahdollistaen näin ennakoivan energianhallinnan.

Tehokkaita energian monimuuttuja-aikasarjoja ja käyttöasteen ennustamisen menetelmiä käytetään rakennusten hallintajärjestelmien tehostamiseen, jotka sammuttavat LVIS-järjestelmät automaattisesti tyhjiä tiloissa, sekä säätävät ilmanvaihtonopeutta

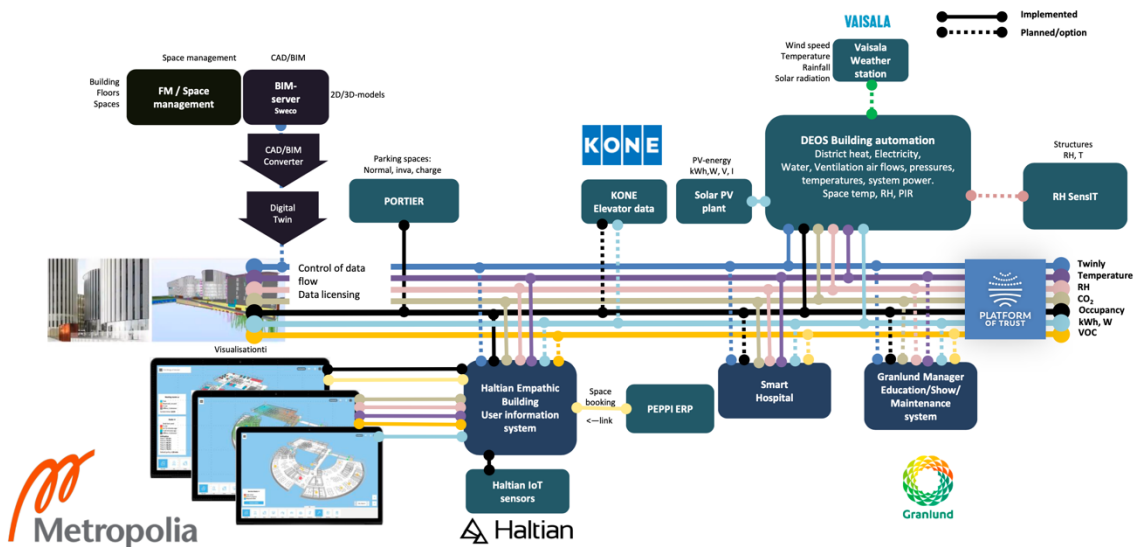
kunkin rakennuksen vyöhykkeen asukkaiden lukumäärän perusteella. Vielä suurempien energiansäästöjen saavuttamiseksi on ehdotettu uutta syvällistä oppimistapaa käyttämällä IoT-laitteiden keräämiä tietoja tarkan lämpömukavuuden saavuttamiseksi älykkäiden rakennusten ohjaukseen. Tämän mallin kehittämiseen käytetään syvää neuroverkkoa (DNN) etsimään optimaalista suhdetta ohjattavan rakennuksen toiminnan ja lämpömukavuuden välillä, Broday (2022, s. 594) kirjoittaa.

Sähkön ja lämmön osuus kiinteistön ylläpitokuluista on merkittävä 30–40 %, Alanne ja muut (2024, s. 32) kertovat. Kiinteistöjen olosuhteet pyritään pitämään tiettyjen viitearvojen sisällä ja parhaimmillaan myös huomioiden sen todellinen käyttö. Juuri tällä alueella voidaan dataa hyödyntämällä saada säästöjä, kun ohjausta tehdään tarkemmin. Yksinkertaisesti: sopeutetaan energiaa kuluttavia toimintoja tarkemmin kiinteistön todelliseen käyttöön. Käytännössä energian kysynnästä johtuviin hintapiikkeihin voidaan vaurautua esimerkiksi lämmittämällä hieman enemmän etukäteen sekä vähentämällä energiankulutusta yleisen kysynnän ollessa suurta. Tätä kutsutaan kysyntäjoustoksi.

Älykkään energiaoptimoinnin neljä merkittävintä hyötyä:

- Ennakoiva ohjaus — parempi ennustettavuus säässä tapahtuviin muutoksiin = reagoinnista proaktiivisuuteen, jossa järjestelmä oppii optimoimaan ilmanvaihtoa ja lämmitystä säätölojen mukaan
- Kokonaisvaltainen ohjaus — mahdollistaa kyvyn ottaa huomioon laajan skaalan vaikuttavia tekijöitä mm. lämpöpumput, sähköautot, vedenkulutuksen, käyttöasteet ja käyttäjäpalautteet = syntyy kokonaisvaltaisesti ymmärrys
- Sisäinen kysyntäjousto — tunnistetaan mahdollisuudet siirtää kulutusta edullisempiin ajankohtiin, jolloin hyödynnetään liikkumavaraa hintapiikkejä välttäen
- Ulkoinen kysyntäjousto — mahdollistetaan osallistumisen valtakunnalliseen kysyntäjoustopaikkaan, jossa joustosta maksetaan korvausta. Tasapainotetaan sähköverkkoa kysyntäjoustopaikan avulla, josta syntyy yhteiskunnallista vastuunkantoa.

Rakennusalalla on alettu käyttämään kokeilevissa määrin digitaalisia kaksosia muun muassa yhdistämään rakennusautomaatio malleja- ja hallintajärjestelmiä reaaliaikaisesti anturitietoihin, joka tarjoaa monipuolisen näkemyksen arkkitehdeille, suunnittelijoille, rakentajille sekä rakennuksen ylläpitäjille rakennuksen käyttäytymisestä ja suorituskyvystä, (Kuva 7). Digitaaliset kaksokset ovat fyysisten esineiden, järjestelmien tai prosessien virtuaalisia kopioita. Tämä on yksi konkreettinen ja tehokas tapa, jolla reaaliaikaisesti tuotettua tietoa analysoimalla, voidaan arkkitehtien ja insinöörien toimesta optimoida energiankulutusta, ennakoida ongelmia ja huoltotarpeita, Nitin (2023, s.81) kirjoittaa. Ennustavien mallien tarkkuuden odotetaan parantuvan, kun olemassa olevia ennakoivia malleja ja IoT-antureiden tuottamaa dataa integroidaan digitaalisista kaksosista muodostettujen järjestelmien kanssa. Digitaaliset kaksokset tarjoavat reaaliaikaista, laadukasta ja korkearesoluutioista tietoa, joka on välttämätöntä tarkkojen ja yksityiskohtaisten ennusteiden muodostamisen kannalta, Jiang ja muut (2024, s. 1598) toteavat.



Kuva 7: Digitaalisten kaksosten hyödyntäminen, (Metropolia, 2024)

Kehittyneiden koneoppimismenetelmien (Machine Learning), kuten syväoppimisen (Deep Learning) ja vahvistusoppimisen (Reinforcement Learning) käyttöönotto on kasvussa, Jiang ja muut (2024, s. 1598) kertovat. Syväoppimisen kaltaiset algoritmit ja niiden luontaiset monitulosominaisuudet ovat taitavia käsittelemään monimutkaisia

rakennusympäristöjä, mikä auttaa kehittämään uusia metodeja usean eri kohteen samanaikaiseen optimointiin, (Kuva 8).

Koneoppimisalgoritmeja voidaan käyttää esimerkiksi, LVI-järjestelmien energiankulutuksen ennustamiseen ja tehottomuuksien havaitsemiseen. Koneoppiminen on tekoälyn alakenttä, joka määrittää koneen kyvyksi jäljitellä älykästä ihmisen käyttäytymistä, jota käytetään monimutkaisten ongelmien ratkaisemiseen, Broday (2022, s.593) kertoo. Koneoppimisalgoritmit ja ennakoiva analytiikka voivat hyödyntää kerättyä dataa ja ennustaa tulevia ongelmia. Esimerkiksi, jos data näyttää, että tietyn alueen ilmanlaatu heikenee tietyissä olosuhteissa, koneoppiminen voi ennakoida nämä ongelmat ja automaatiojärjestelmä voi mukautua tilanteeseen etukäteen.

Algorithms	Purpose
GA-BP ANN	Improve energy efficiency and thermal comfort in building design Occupants' behaviors and thermal sensations were applied in ANN models to predict thermal comfort
ENL, R, SVM	Predict individuals' thermal preference by using occupant heating and cooling behavior
ANN, LR, SVR	Improve energy efficiency
RL	Energy optimization associated with thermal comfort and indoor air control
RL, RNN	Predict people's behavior
ENL, SVM	Prediction personal overall thermal comfort by using skin temperatures and occupants' heating behavior
ANN	Control HVAC system

Kuva 8: Erilaisia Machine Learning-tekniikoita

Lämpömukavuuden optimoimiseksi luodulla ennustemallilla on suora yhteys siihen, miten tyytyväisiä asukkaat ovat kokemaansa sisäympäristöön. Uusilla koneoppis- ja tiedonkeruumenetelmillä on mahdollista mitigoida erilaisia suorituskykyeroja merkittävästi. Parannellut menetelmät olisi mahdollista liittää osaksi reaaliaikaisen datan keräämiseen perustuvaa sisäympäristön hallintajärjestelmää. Kuvan 9 esimerkissä sisäympäristöstä kerättävää dataa käytetään lämpömukavuuden reaaliaikaisen ennustamisen perustana, jota taas hyödynnetään LVIS-järjestelmien operatiivisten toimintojen säätämiseen, Zhang ja muut (2022, s.11) selittävät.



Kuva 9: Sisäilman laadun ja optimaalisen lämpötilan hallinnan prosessi (Renewable and Sustainable Energy Reviews, s. 11)

Kasvatavat vaatimukset tekoälymallien läpinäkyvyydestä tekevät selitettävästä tekoälystä (Explainable Artificial Intelligence, XAI) merkittävän näkökulman tulevaisuuden kehitystoimenpiteitä suunniteltaessa, Jiang ja muut (2024, s.1598) analysoivat. XAI:n avulla voidaan ymmärtää, miten tekoäly päätyi tiettyyn suositukseen tai johtopäätökseen, ja selittää nämä päätökset selkeästi ja ymmärrettävästi. Toistaiseksi XAI-tekniikkaa on käytetty laajasti LVI-komponenttien vikojen ennustamisessa. Ennakoivien mallien oikeanlainen tulkinta on välttämätöntä tulevaisuuden päätöksenteon ohjaamisessa sekä reaaliaikaisesti mukautuvien ohjausjärjestelmien integroimisessa. Selitettävät tekoälymallit tulevat edistämään kiinteistönhallinnan lisäksi myös kyberturvallisuutta.

On tärkeää oppia yhdistämään erilaisia tiedonkeruumenetelmiä, teknologioita ja sensoreita, jotta erilaisten rakennusten sisäisiä dynaamisia variaatiota osataan tulkita, ja tehdä niiden pohjalta oikeita johtopäätöksiä optimaalisten säätöjen tekemiseksi. Ennustemallien kehittämisessä panostetaan yhä enemmän ihmiskeskeisiin lähestymistapoihin ja korostetaan siirtymistä kohti asukaskeskeisiä LVIS-järjestelmiä. Ihmiskeskeisten arviointimenetelmien hyödyntäminen on ratkaisevan tärkeää, jotta mallit vastaavat asukkaiden oikeita tarpeita, Jiang ja muut (2024, s. 1598) pohtivat. Esimerkiksi yhdistettäessä videokuvaan ja olosuhdetietoon perustuvia sensoreita keskenään, olisi molempien menetelmien edut saavutettavissa, Zhang ja muut kertovat (2022, s.13). Nykyiset teknologiat

pitävät sisällään potentiaalisen mahdollisuuden "kaikki yhdessä" (all-in-one) ratkaisun luomiseksi. Ratkaisu voisi tunnistaa tilojen käyttöasteen sekä arvioida asukkaiden toimintaa ja hyödyntää tätä dataa paitsi energian käytön vähentämiseen, myös sisäilman laadun (IAQ) ja lämpömukavuuden parantamiseen. Tähän mennessä tehdyt tutkimukset eivät ole vielä käsitelleet näitä näkökulmia samassa kokonaisuudessa.

3 Yhteenveto

Tutkielma on osoittanut, etteivät energiatehokkuus ja terveellinen sisäympäristö ole toisiaan poissulkevia tavoitteita, vaan ne voidaan saavuttaa yhdessä oikeiden teknologisten ratkaisujen avulla. Uusilla energiatehokkuusratkaisuilla voidaan todella vähentää rakennusten ylläpitokustannuksia samalla, kun parannetaan asumismukavuutta ja ihmisten hyvinvointia. Reaaliaikainen data ja älykkäät automaatiojärjestelmät tarjoavat mahdollisuuksia entistä parempaan rakennusten hallintaan ja optimointiin, mikä luo terveellisempiä ja energiatehokkaampia elinympäristöjä. Tulevaisuuden rakennusten energiatehokkuuden ja sisäilman laadun parantaminen edellyttää tiivistä yhteistyötä teknologia-toimittajien, kiinteistönomistajien, poliitikkojen ja sijoittajien välillä. Tekoäly, data-analytiikka, sensortechnologiat ja automaatio tulevat olemaan hyvin keskeisessä roolissa erilaisten tehokkuus tavoitteiden saavuttamiseksi.

Ilmaston lämpenemistä hidastavien proaktiivisten toimenpiteiden myötä tulevaisuuden tutkimuksen odotetaan painottavan yhä enemmän energiatehokkuuden ja kestävyuden edistämistä, Jiang ja muut (2024, s.1599) miettivät. Tämä saattaa edellyttää erittäin tarkkojen ennakoivien mallien kehittämistä, jotka paitsi vähentävät energiankulutusta ja kasvihuonekaasupäästöjä, myös asettavat etusijalle ihmisten terveyden ja hyvinvoinnin. Ihmiskeskeisten lähestymistapojen korostuessa, tulevaisuuden ennustavat mallit voisivat keskittyä enemmän yksilöllisiin mieltymyksiin ja ennusteisiin, sisätilojen ja rakennetun ympäristön mukautuvien ohjausjärjestelmien kehittämisessä. Ennustemallien tulkittavuus saattaa nousta jonkinasteiseksi haasteeksi, mallien kysynnän ja monimutkaisuuden kasvaessa. Näin ollen esimerkiksi, XAI-tekniologioiden tarpeen odotetaan kasvavan, Jiang ja muut (2024, s. 1599) kertovat. Lisäksi esiin on noussut tulkittavan tekoälykehityksen (Interpretable AI) kehittäminen. Selitettävä tekoäly kuvaa, miksi tekoälymalli teki ennusteen. Tulkittava tekoäly kuvaa, kuinka se teki ennusteen. Tästä saattaa tulla tulevaisuuden ennustavien mallien tutkimuksen keskipiste, erityisesti ratkaisuissa, joissa ihmisten luottamus ja ymmärrys ovat ratkaisevan tärkeitä.

Yhdistyneiden Kansakuntien (2019) julkaiseman väestöraportin mukaan vuonna 2050 on ennustettu olevan 2 miljardia ihmistä enemmän, kuin vuonna 2024 ja suurin osa heistä tulee asumaan kaupungeissa. Väestön kasvu jatkaa kiihtymistään ja vuosisadan loppuun mennessä väkiluvun ennustetaan olevan jo noin 11 miljardia ihmistä. Väestönkasvun myötä lisääntyy vastaavasti veden, energian ja luonnonvarojen kysyntä, joka kuormittaa luontoa lisäämällä energiankulutusta. Rakennusten elinikä on yleensä hyvin pitkä, joten tänä päivänä tehdyt päätökset tulevat vaikuttamaan lukuisten ihmisten terveyteen vielä vuosikymmenten ajan.

Tutkimus osoitti, että tarvitaan kunnianhimoista ja läpinäkyvää sitoutumista. Tarvitaan ponnisteluja strategiseen poliittiseen päätöksenteon ja markkinakannustimien esittämiseen, jotka osoittavat rakennusten ja rakentamisen keskeisen roolin kestävän kehityksen tavoitteiden saavuttamisessa. Yhteiskunnilla ja ihmisillä on mahdollisuus ottaa merkittäviä harppauksia kohti terveellisempiä ja turvallisempia sisäympäristöjä omaksumalla monitahoinen strategia, joka muodostuu energiatehokkaista valinnoista, sisäilman laadun seurannasta, teknologisista innovaatioista sekä julkisen vallan määrittelemästä lainsäädännöllisestä sääntelystä. Pyrkimykset edistää energiatehokkaita terveellisiä elinympäristöjä hyödyntämällä olemassa olevaa tietoa ja teknologiaa, eivät ole ainoastaan kansantaloutta- ja terveyttä edistävä tehtävä, vaan pikemminkin yhteiskunnallinen välttämättömyys.

Terveys tukee ja vahvistaa hyvinvointitaloutta edistämällä yksilöiden ja yhteisöjen terveyttä, varhaista puuttumista ongelmiin, taloudellista kasvua sekä huomioimalla sosiaaliset ja ympäristöön liittyvät tekijät. Terveet väestöt, terveydenhuoltopalvelut ja terveyden yhdenvertaisuus tuottavat vauraampia ja sietokykyisempiä yhteiskuntia ja taloutta, joissa voidaan maksimoida taloudelliset ja sosiaaliset hyödyt, (WHO, 2024).

Hyvinvointitalous tuottaa terveyshyötyjä myös siksi, että se mahdollistaa parempia olosuhteita voida hyvin. Hyvinvointitalous on poliittikaläftäinen ja hallinnollinen lähestymistapa, jonka tavoitteena on asettaa ihmiset ja heidän hyvinvointinsa politiikan

ja päätöksenteon keskiöön. Hyvinvointitalous maksimoi kaikkien investointien hyödyt mahdollistamalla yhdenvertaisen hyvinvoinnin, jotta ihmiset, yhteisöt, talous ja maapallo voisivat hyvin. Keinoina hyödynnetään innovatiivisia finanssipoliittisia välineitä, hankintoja, työllisyyttä, sääntelyä ja vaikutustenarviointia, (THL, 2024).

Rakennusten ja rakentamisen muuttaminen vaatii suurta muutosta rahoituksen ja investointien näkökulmasta. Tähän sisältyy sijoittajien liiketoimintaedellytysten kehittäminen sekä tieto- ja rahoitustyökalujen tarjoaminen, jotka poistavat riskit ja epävarmuustekijät päätöksentekijöiltä. Valtiollinen tuki on todennäköisesti välttämätöntä tavalla tai toisella. Uusien teknologioiden laaja-alainen globaalin skaalan käyttöönotto sekä investoiminen tehokkaiisiin, vähähiilisiin ratkaisuihin ovat avainasemassa kestävien rakennusten, rakentamisen, ympäristön ja hyvinvoinnin kannalta. Raha on iso ajuri, jolla muutoksia voidaan oikeasti konkreettisella tasolla toteuttaa. Säästöt kiinteistöjen energiankulutuksen tehostamisen myötä ovat mittavia, mutta suurimmat säästöt saavutetaan lopulta hyvinvoinnin ja aiempaa terveemmän väestön myötä. Tästä eivät hyödy ainoastaan kiinteistöjen omistajat ja asukkaat, vaan koko yhteiskunta.

Ympäristö-, sosiaali- ja hallintokysymykset (ESG) ovat perinteisesti olleet sijoittajien toissijaisia huolenaiheita. Viime vuosina institutionaaliset sijoittajat ja eläkerahastot ovat kuitenkin kasvaneet liian suuriksi voidakseen vain hajauttaa institutionaaliin järjestelmiin liittyviä riskejä, mikä pakottaa heidät pohtimaan sijoitussalkkujensa vaikutuksia ympäristö-, sosiaali- ja hallintokysymyksien näkökulmista. Globaalilla skaalalla tarkasteltuna jo vuonna 2018, 1 715 sijoitusyhtiötä, joiden hallinnoimat varat ovat 81,7 biljoonaa dollaria, ilmoittivat sitoutuneensa sisällyttämään ESG:n sijoituspäätöksiinsä- ja strategioihinsa, (Harvard Business Review 2019).

Tätä tutkielmaa kirjoitettaessa on vuosi 2024 ja hyvin moni valtio kärsii muun muassa COVID 19- kriisin, geopoliittisten konfliktien sekä inflaation aiheuttamista taloudellisista ongelmista. Esimerkiksi Suomessa julkinen sektori pyörii tällä hetkellä alijäämäisesti lisää velkaa ottamalla. Suomessa on ajautettu kriittiseen tilaan, jossa tarvitaan

välttämättömästi uusia innovaatioita ja toimenpiteitä, joilla luodaan kasvua, tuottavuutta ja tehostetaan järkevällä tavalla julkiseen sektoriin käytettäviä resursseja. Kansanterveys on yksi merkittävimmistä menoeristä, joten nyt jos koskaan olisi oikea aika luoda uusia tehokkaita ratkaisuja ja palveluita energiatehokkuuden ja terveellisen sisäympäristön parantamisen edistämiseksi.

Julkinen valta asettaa raamit lainsäädännöllä ja sääntelyllä. Tämä luo tarpeen tuottaa uusia palveluita, niin yksityisin kuin julkisin varoin vastaamaan uusiin lainsäädännön muutosten tuomiin vaatimuksiin. Syntyy tarve kehittää ja luoda uusia innovaatioita. Syntyy uusia yrityksiä ja työpaikkoja. Raha alkaa kiertämään. Julkisia varoja säästyy merkittäviä määriä, kun energiatehokkuutta ja kansanterveyttä saadaan edistettyä. Esimerkiksi Yhdysvalloissa lähes viidennes 17,8 % maan bruttokansantuotteesta koostuu pelkästään terveydenhuollon aiheuttamista kustannuksista, Allen (2022, s. 27) kertoo.

Energiatehokkuuden ja sisäilman laadun välinen suhde on nykyisin vahvasti sidoksissa kehittyviin standardeihin ja lainsäädäntöön. Rakennuksista tulee älykkäämpiä, tehokkaampia ja terveellisempiä kiitos reaaliaikaista dataa hyödyntävien teknologioiden käyttöönoton. Tulevaisuudessa nämä säädökset tulevat edelleen muokkaamaan rakennusten suunnittelua, seurantaa ja ylläpitoa varmistaen, että energiatehokkuus ei vaaranna asukkaiden hyvinvointia.

Reaaliaikainen data ja sensoriteknologia ovat mullistaneet energiatehokkuuden ja sisäilman laadun hallinnan rakennuksissa. Älykkäiden järjestelmien avulla voimme seurata ja hallita olosuhteita jatkuvasti varmistaen, että energiankulutus pysyy optimoituna samalla kun ylläpidetään terveellistä sisäilmaa. Kestävän kehityksen kasvaessa näiden teknologioiden rooli tulee vain kasvamaan, luoden entistä älykkäämpiä ja tehokkaampia rakennuksia tulevaisuudessa.

Jatkotutkimuksena lähtisin selvittämään yksityiskohtaisemmin, että mitä tutkielmassa esitettyjen nykYTEKNOLOGIOIHIN perustuvan kokonaisratkaisun toteuttaminen todella

vaatisi. Tutkisin tärkeimpiä ominaisuuksia, niiden vaikutuksia sekä konkreettiseen toteutukseen vaadittavia resursseja. Tavoitteena olisi luoda kokonaisratkaisu, jonka pohjalta jokin yritys pystyisi kaupallistamaan palvelun. Palvelu tarjoaisi täysin automatisoidun ratkaisun, jolla rakennukset ohjaisivat itse itseään reaaliaikaisen rakennuksen ulko- ja sisäolosuhteisiin perustuvan datan sekä erilaisten tekoälyalgoritmien avulla.

Lähteet

Allen J. G. & Macomber J. D. *Healthy Buildings. How indoor spaces can make you sick – or keep you well.* (2022). Harvard University Press.

Alanne K., Holopainen R., Hyvärinen J., Kaappola E., Ketomäki H., Kurnitski J., Könkö S., Pyly P., Railio J., Seppänen O., Vuolle M., Vuorinen P., Yrjölä J. *Rakennusten energiatekniikka.* (2024). Talotekniikka-Julkaisut Oy. ISBN 978-952-698-554-1.

Asadi E., Gameiro Da Silva M. & Ogundiran J. (2024). A Systematic Review on the Use of AI for Energy Efficiency and Indoor Environmental Quality in Buildings. <https://doi.org/10.3390/su16093627>

Ashrae Standard 90.1-2022 (I-P Edition) -- Energy Standard for Sites and Buildings Except Low-Rise Residential Buildings (ANSI Approved; IES Co-sponsored). (2022). Noudettu 2.11.2024 osoitteesta. https://store.accuristech.com/ashrae/standards/ashrae-90-1-2022-i-p?product_id=2522082

Broday E.E. & Gameiro da Silva M.C. (2023). The role of internet of things (IoT) in the assessment and communication of indoor environmental quality (IEQ) in buildings: a review, *Smart and Sustainable Built Environment*, Vol. 12 No. 3. 584-606. <https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.1108/SASBE-10-2021-0185>

Elisa Oyj. *Smart Building.* (2022). Noudettu 8.12.2024 osoitteesta. <https://yrityksille.elisa.fi/ideat/smart-building-alykasta-ja-ennakoivaa-kiinteistönhallintaa-s-ryhmassa/>

European Union. *Smart readiness indicator.* (2022). Noudettu 1.12.2024 osoitteesta. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/smart-readiness-indicator_en

Jiang K., Shi T., Yu H., Mahyuddin N. & Lu S. (2024). A systematic review of multi-output prediction model for indoor environment and heating, ventilation, and air conditioning energy consumption in buildings, <https://doi.org/10.1177/1420326X241258678>

Harvard School of Public Health. *Green office environments linked with higher cognitive function scores*. Noudettu 5.10.2024 osoitteesta, <https://www.hsph.harvard.edu/news/press-releases/green-office-environments-linked-with-higher-cognitive-function-scores/>

Harvard School of Public Health. (2023, 25. huhtikuuta). *How building design can improve people's well-being?* Noudettu 5.10.2024 osoitteesta, <https://www.hsph.harvard.edu/news/features/how-building-design-can-improve-peoples-well-being/>

Harvard Business Review. (2023). *It's time for companies to monitor workplace air quality*. Noudettu 8.10.2024 osoitteesta, <https://hbr.org/2023/11/its-time-for-companies-to-monitor-workplace-air-quality>

Harvard Business Review. (2019). *The Investor Revolution*. Noudettu 15.10.2024 osoitteesta, https://hbr.org/2019/05/the-investor-revolution?trk=public_post_comment-text

Hengityслиitto. (2019). *Sisäilmasta oireilu*. Noudettu 2.11.2024 osoitteesta. <https://www.hengityслиitto.fi/hengitys-sairaudet/sisailmasta-oireilu/>

Lampi J. & Pekkanen J. *Terve ihminen terveissä tiloissa*. (2018). Suomen Yliopistopaino Oy. ISBN 978-952-343-157-7.

Merriam Webster. (1983). Noudettu 10.12.2024 osoitteesta www.merriam-webster.com

Nexus Lab Interview of Boston Properties CIO Jim Whalen. (2021). Noudettu 15.10.2024 osoitteesta. <https://www.nexuslabs.online/content/053-jim-whalen-reflects-on-the-past-and-future-of-boston-properties-digital-buildings-program>

Nitin R. (2023). Integrating Leading-Edge Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), and Big Data Technologies for Smart and Sustainable Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry: Challenges and Future Directions, 73-95. <https://doi.org/10.51483/IJDSBDA.3.2.2023.73-95>

Pekkanen J. & Seuri M. *Sisäilma, sisäympäristö ja terveys*. (2024). Tietosanoma. ISBN 978-951-884-971-4.

Ympäristöministeriö. (2024). *Energiatehokkuusdirektiivin uudistus*. Noudettu 1.12.2024 osoitteesta. <https://ym.fi/rakennusten-energiatehokkuusdirektiivin-uudistus>

Terveet tilat 2028. (2024). Noudettu 7.10.2024 osoitteesta. <https://tilatjaterveys.fi/toimintamalli>

Terveyden ja Hyvinvoinnin Laitos. *Sisäilmaoireet raportti*. (2023, 20.marraskuuta). Noudettu 16.10.2024 osoitteesta, https://www.thl.fi/tervesuomi_verkkoraportit/ilmioraportit_2023/sisailmaoireet.html

Terveyden ja Hyvinvoinnin Laitos. (2018, 1.marraskuuta). *Kansallinen sisäilma ja terveys ohjelma 2018–2028*. Noudettu 19.10.2024 osoitteesta, <https://thl.fi/tutkimus-ja-kehittaminen/tutkimukset-ja-hankkeet/kansallinen-sisailma-ja-terveys-ohjelma-2018-2028>

The United Nations. (2017, 11. joulukuuta). Environment Programme. *As buildings and construction sector grows, time running out of cutting energy use and meet Paris climate goals*. Noudettu 8.10.2024 osoitteesta. <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/buildings-and-construction-sector-grows-time-running-out-cut-energy>

The United Nations. (2019). *World Population Prospects*. Noudettu 27.10.2024 osoitteesta. https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf

WHO World Health Organization. (2023). *Harnessing the benefits of well-being policies and investments for health*. Noudettu 28.10.2024 osoitteesta. <https://www.who.int/europe/publications/m/item/harnessing-the-benefits-of-well-being-policies-and-investments-for-health>

WHO World Health Organization. (2019). *Increasing equity in health and leaving no one behind*. Noudettu 17.10.2024 osoitteesta. <https://www.who.int/europe/publications/i/item/EUR-RC69-R5>

Zhang W., Yupeng W. & Calautit, J. K. (2022). A review on occupancy prediction through machine learning for enhancing energy efficiency, air quality and thermal comfort in the built environment, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112704>