

Tutkimusraportti

HIILINEUTRAALIT ENERGiaratkaisut JA Lämpöpumpputeknologia (HYBE)

Hybridienergiajärjestelmien riskienhallinta

Tutkijat

Janne Hirvonen
Natalia Lastovets
Mohamed Elsayed

Tutkimusryhmän johtaja

Piia Sormunen

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä.....	1
1. Johdanto	2
2. Menetelmät.....	3
2.1. Kirjallisuuskatsaus	3
2.2. Haastattelut.....	3
3. Tulokset	5
3.1. Kirjallisuuskatsaus	5
3.2. Haastattelut.....	8
3.2.1. Kiinteistöjen omistajat.....	8
3.2.2. Suunnittelu ja toteutus.....	10
3.2.3. Ylläpito.....	18
4. Jatkokehitys	23
5. Johtopäätökset	24
Lähdeluettelo.....	27

TIIVISTELMÄ

Nykyaikaisten rakennusten energia- ja LVI-järjestelmät käyvät jatkuvasti monimutkaisemmiksi sekä sääntelyn tiukentuvien vaatimuksien että kustannustehokkaan käytön tavoittelun takia. Tässä tutkimuksessa haasteltiin suomalaisia kiinteistösektorin asiantuntijoita tavoitteena tunnistaa keinot, joilla varmistetaan rakennusten energiatehokkuus ja hybridienergiajärjestelmien toimivuus.

Oleellisin toimenpide on jatkuva järjestelmäkohtainen tiedonkeruu ja energiatehokkuuden ja sisäolosuhteiden etävalvonta. Kun ylläpito perustuu mitattuun tietoon, voidaan havaita kehittyvät ongelmat jo ennen järjestelmän toimintahäiriöitä ja toisaalta tehokkaasti tunnistaa ja korjata akuutit laiteviat.

Monimutkaisten hybridijärjestelmien suunnittelussa tulee huomioida tarkkaan rakennuksen todellinen energiankulutus ja sen vaihtelu erilaisissa käyttötilanteissa ja sääolosuhteissa. Vain näin voidaan mitoittaa järjestelmä elinkaarikustannuksiltaan tehokkaalla tavalla. Saatavilla olevat energialähteet tulee selvittää tarkkaan ja suunnitella etukäteen energiantuotantoa tilanteisiin, joissa jokin energianlähde menetetään tai energiankulutus muuttuu esim. rakennuksen käyttäjien vaihtuessa.

Rakennusautomaation suunnittelu tulee aloittaa jo rakennushankkeen aikaisessa vaiheessa. Kaikki järjestelmät tulee kytkeä samaan keskitettyyn automaatioon, jotta vältetään päällekkäisten ohjausmekanismien tuomista ristiriidoista. Automaattinen analytiikka auttaa tunnistamaan poikkeamia toiminnoissa ympäri vuorokauden, jonka myötä ihmisasiantuntija pystyy helposti esittämään ratkaisuehdotuksia havaittuihin ongelmiin.

1. JOHDANTO

Tämä raportti on tehty ”Hiilineutraalit energiaratkaisut ja lämpöpumpputeknologiat”-tutkimusohjelman (HybE) osana. Tutkimussprintissä haluttiin selvittää miten voidaan parhaiten varmistaa rakennusten hybridienergiajärjestelmien energiatehokas ja luotettava toiminta. Tutkimuskysymykset ja tavoitteet esitetään Taulukko 1.

Taulukko 1. Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset.

Tavoite	Tutkimuskysymys
Tunnistaa ja tutkia niitä haasteita ja esteitä, joita tutkijat kohtaavat pyrkiessään arvioimaan ja todentamaan energiatehokkuutta todellisissa käyttötilanteissa. Nämä vaikeudet voivat sisältää mittausvirheitä, datan rajoituksia, vianmääritysmenetelmiä, sääntöjen noudattamiseen liittyviä ongelmia ja muita käytännön esteitä.	Mitkä ovat rakennusten energiatehokkuuden arviointiin käytetyt indikaattorit, ja kuinka ne määritellään käytännön sovelluksissa?
Selvittää, kuinka vanhoissa ja uusissa rakennuksissa toteutetaan seuranta, kuinka olemassa olevaa dataa voidaan hyödyntää ja millaisia lisäseurantajärjestelmiä tarvitaan odotettujen suorituskykytasojen saavuttamiseksi.	Millaisia menetelmiä, teknologioita ja järjestelmiä käytetään rakennusten energiankulutuksen seurantaan, ja kuinka näiden teknologioiden tuottamaa dataa tulkitaan ja analysoidaan?
Tarkastella rakennusten energiajärjestelmien vianmääritys- ja kunnossapitoprosesseja sekä tunnistaa erilaisten menetelmien, kuten kiinteistöjen sisäisten huoltotiimien ja tekoälyyn perustuvien huoltosopimusten, edut ja rajoitukset.	Mitkä ovat parhaat käytännöt rakennusten energiajärjestelmien kunnossapidossa?
Tutkia hybridienergiajärjestelmien riskienhallintaprosessia Suomessa ja ulkomailla sekä ehdottaa uusia käytäntöjä Suomen rakennusteollisuudelle. Tavoitteena on määrittää riskien todennäköisyydet ja niihin liittyvät reagoititoimenpiteet sekä mitata riskienhallintamallin mahdollinen vaikutus tapaustutkimuksissa.	Mitkä ovat tyypilliset riskit rakennusten hybridienergiajärjestelmien suunnittelussa ja käytönotossa, ja kuinka ne tulisi ottaa huomioon rakennusprosessissa?

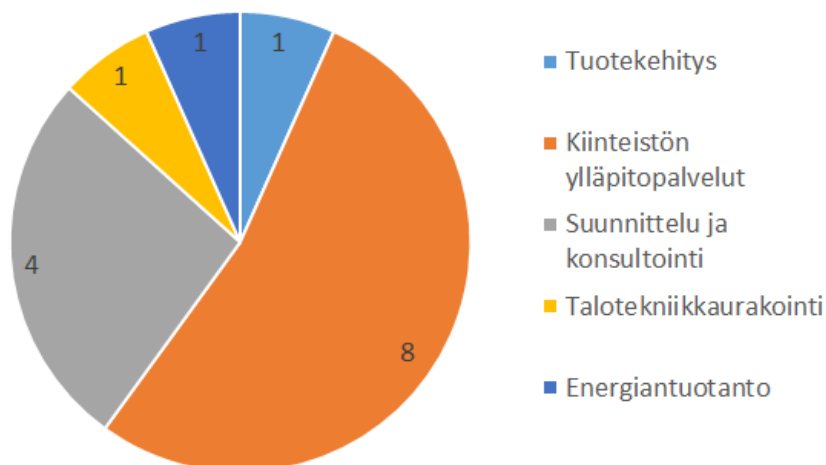
2. MENETELMÄT

2.1. Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltiin laajasti hybridienergiajärjestelmien riskienhallintaan, energiatehokkuuden optimointiin ja vianmääritykseen liittyvää kirjallisuutta. Katsaus kattaa teknologisten ratkaisujen luotettavuuden, suunnittelun ja asennuksen laadun sekä energiatehokkuuden parantamisen erityisesti Suomen kontekstissa. Tutkimuskysymyksiä lähestytään eri näkökulmista, kuten anturien reaaliaikaisesta kalibroinnista, tekoälyyn perustuvasta energian ennustamisesta ja rakennusprojektien haasteista. Lisäksi mukana ovat HybE RS1 -tutkimuksen tulokset, jotka lisäävät hyödyllistä tietoa energiatehokkuuden toteutumisesta käytännössä.

2.2. Haastattelut

Tutkimuksessa toteutettiin 12 semi-strukturoitua haastattelua, joihin osallistui 15 asiantuntijaa suomalaisista yrityksistä (Adven, AFRY, Caverion, Consti, Fidelix, Granlund, HUS, Ramboll, Senaatti ja SRV). Suurin osa haastatelluista työskenteli kiinteistöjen ylläpitopalveluissa tai talotekniikan suunnittelussa ja konsultoinnissa. Lisäksi mukana oli tuotekehityksen, talotekniikkaurakoinnin ja energiantuotannon edustajia.



Kuva 1. Haastateltujen asiantuntijoiden työnkuva.

Semistrukturoitujen haastattelujen pääkysymykset keskittyivät rakennusten hybridienergiajärjestelmiin ja muuhun energiankulutukseen vaikuttavaan talotekniikkaan. Kysymysten aihealueet olivat:

- Mittaaminen ja monitorointi
 - Energiatehokkuuden määrittäminen ja tehokkuusindikaattorit (KPI)
 - Seurattavat muuttujat
 - Vaaditut menetelmät ja laitteet
- Ylläpito ja käyttöönotto

- Toimintamallit
 - Tekoälyn käyttö
- Sääto ja ohjaus
 - Toimintaperiaatteet
 - Optimoinnin vaatimukset
- Riskienhallinta
 - Hybridienegiajärjestelmiin hyödynnetyt menetelmät
 - Tarvittavat tiedot ja toimintamallit

Jokaisesta aiheesta kysyttiin merkittävimpää haasteita ja toivottuja parannuksia toimintamalleihin. Yksi muista erillinen haastattelu painottui rakennusautomaatiojärjestelmien käyttöön ja kehitystarpeisiin. Haastattelujen pohjalta kehitettyjä toimenpidesuosituksia kehitettiin edelleen asiantuntijoiden palautteen perusteella.

3. TULOKSET

3.1. Kirjallisuuskatsaus

Teknologiset epäonnistumiset ja laitteistojen luotettavuus

Hybridiennergiajärjestelmien toimivuus riippuu suuresti järjestelmän komponenttien, kuten LVI-laitteiden, luotettavuudesta. Mosaad et al. (2018) korostavat, että teknologiset epäonnistumiset voivat johtaa merkittäviin riskeihin, kuten projektin viivästymiseen ja ylläpitokustannusten kasvuun. Tämä korostaa tarvetta säännölliselle laitteiden testaamiselle ja korkealaatuisten, sertifioitujen laitteiden käytölle riskien hallitsemiseksi (Mosaad et al., 2018).

Suomalaisten palvelurakennusten energiakatselmuksissa havaittiin, että kiinteistöissä ei usein ollut järjestelmäkohtaisia mittauksia, jolloin yksittäisten järjestelmien kulutuksia arvioitiin tyypillisten tilojen havainnoinnin, laitelistojen, rakentamismääräysten ja käytön aikataulujen perusteella. Vaikka rakennuksissa oli yksityiskohtaisiakin energiamittauksia, tuloksien tulkitseminen oli ajoittain haastavaa johtuen mittareiden epäselvistä nimeämiskäytännöistä. Osa mittauksista oli poissa käytöstä, jolloin kerätty data oli puutteellista. Antureiden ilmaisemat mittaustulokset eivät myöskään aina ole luotettavia. Esim. katselmoitujen kiinteistöjen lumensulatusjärjestelmän automatiikka ei toiminut, koska lumi-ilmaisimen ympärille muodostui pieni lumeton alue, vaikka sulatukselle olisi muuten ollut tarvetta. Toisaalta väärin säädetyt sulanapitojärjestelmät toimivat tarpeettomasti, energiaa tuhlaten. (Yritys A, 2018)

Yizhe Xun tutkimus esittelee data-analytiikkaan perustuvan vianmääritys- ja energiatehokkuuden arviointimenetelmän, joka hyödyntää historiallisia käyttödataa havaittujen poikkeamien ja energiatehokkuusongelmien tunnistamiseen ja korjaamiseen. Tämä menetelmä parantaa järjestelmien toimintavarmuutta ja energiatehokkuutta, mikä on olennaista hybridiennergiajärjestelmien pitkän aikavälin luotettavuuden varmistamiseksi (Xu et al., 2021).

Suunnittelun puutteet ja energiankulutuksen tehottomuus

Suunnittelun puutteet voivat johtaa energiankulutuksen tehottomuuteen ja epämukavuuteen rakennusympäristössä. Mosaad et al. (2018) toteavat, että suunnittelutarkastusten parantaminen ja kokoneiden suunnittelijoiden osallistuminen prosessiin ovat keskeisiä energiatehokkuuden parantamisessa (Mosaad et al., 2018). Tämä havainto vahvistetaan HybE RS1 -tutkimuksessa, jossa todettiin, että energiatehokkuuden toteutuminen on usein kiinni suunnitteluvaiheen valinnoista ja niiden integroinnista rakennushankkeen eri vaiheisiin (HybE Report RS1, 2021). Kantola ja Saari (2016) lisäävät, että nZEB-rakentamisen siirtymävaiheessa suunnittelijoiden tietämyksen puute ja integroinnin haasteet voivat johtaa merkittäviin laatuongelmiin ja energiankulutuksen tehottomuuteen (Kantola & Saari, 2016). Myös hyvin yksinkertaisilla ohjauskeinoilla voidaan tuottaa merkittäviä säästöjä käyttökustannuksiin. Esimerkiksi ei-jatkuvakäyttöisten rakennusten ilmanvaihdon energiankulutusta ja käyttökustannuksia voidaan leikata neljänneksellä sammuttamalla ilmanvaihto kokonaan käyttöajan ulkopuolella (Kuurola et al., 2023). Eräiden palvelurakennusten energiakatselmuksissa tutkittiin syitä tavoitetasoa korkeampaan mitattuun energiankulutukseen. Merkittävimmiksi syiksi todettiin suunniteltua korkeampi huonelämpötila, oletettua alhaisempi lämmöntalteenoton hyötysuhde ja arvioitua

alhaisemmat sisäiset lämpökuormat (Yritys A, 2018). Tarkan suunnittelun lisäksi on siis oleellista varmistaa, että rakennuksia todellisuudessa käytetään suunnitelmien mukaisesti.

Asennuslaadun merkitys ja operatiiviset kustannukset

Virheelliset asennuskäytännöt voivat merkittävästi lisätä LVI-järjestelmien operatiivisia kustannuksia ja järjestelmän toimintahäiriöitä. Mosaad et al. (2018) korostavat, että koulutettujen teknikkojen käyttö, tiukka valvonta ja valmistajan ohjeiden noudattaminen ovat keskeisiä tekijöitä virheiden vähentämiseksi asennusvaiheessa (Mosaad et al., 2018). Asennusvirheiden ja virheellisten asetusarvojen takia järjestelmät saattavat toimia väärin, mutta silti tuottaa hyväksyttävät sisäolosuhteet. Tästä voi silti aiheutua ylimääräisiä käyttökustannuksia. Väärän käyttötavan havaitseminen ei kuitenkaan välttämättä onnistu ilman monipuolista tietoa järjestelmän osien toiminnasta, mikä korostaa tarkan mittaroinnin tarvetta monimutkaisten järjestelmien toiminnan seuraamisessa. (Bask, 2019) Tyypillisiä ihmisperäisiä ongelmia ovat suunnitteluvirheet, väärä ajojärjestys, ohjelmointivirheet ja huono asennustapa (Torabi et al., 2021). Puutteellinen toiminnanvarmistus ja ennaltaehkäisevän ylläpidon heikko taso johtavat näistä syistä huonoihin sisäolosuhteisiin ja heikon energiatehokkuuden aiheuttamiin lisäkustannuksiin.

Energiatehokkuus ja kaukolämmitysjärjestelmät

Paiho ja Reda (2016) sekä Paiho ja Saastamoinen (2018) analysoivat kaukolämmitysjärjestelmien tulevaisuuden haasteita Suomessa, erityisesti vähenevien lämmitystarpeiden ja kasvavien energiatehokkuusvaatimusten kontekstissa. He korostavat, että rakennusten lämmitystarpeen väheneminen voi vaikuttaa negatiivisesti kaukolämmityksen taloudelliseen kannattavuuteen, koska alhaisemmat lämmitystarpeet vähentävät lämmönkulutuksen tiheyttä, mikä voi heikentää sähkön ja lämmön yhteistuotannon (CHP) tehokkuutta (Paiho & Reda, 2016; Paiho & Saastamoinen, 2018). Samalla he huomauttavat, että kaukolämmitysjärjestelmien tulevaisuus riippuu pitkälti niiden kyvystä sopeutua uusiutuvan energian ja digitaalisuuden tuomiin muutoksiin.

Kaukolämmitystä kehitetäänkin kohti matalan lämpötilan järjestelmää ja hukkalämmön hyödyntämistä. Wahlroos et al. (2018) käsittelevät datakeskusten hukkalämmön hyödyntämistä Pohjois-Euroopassa ja esittävät, että tehokas hukkalämmön talteenotto voi merkittävästi parantaa energiatehokkuutta kaupunkialueilla. He korostavat, että hukkalämmön talteenotto datakeskuksista voi olla merkittävä uusiutuvan energian lähde, mikä edellyttää kuitenkin kehittyneitä teknologioita ja yhteistyötä eri sidosryhmien välillä (Wahlroos et al., 2018). Matalan lämpötilan kaukolämpöjärjestelmillä voidaan vähentää lämpöhäviöitä ja päästöjä, erityisesti kun hyödynnetään lämpöpumppuja (Volkova et al., 2019). Lämpöpumppujärjestelmissä välittömät investointikustannukset voivat kuitenkin olla suuret, vaikka elinkaarikustannukset pidemmällä aikavälillä laskevat. Kaukolämmön käyttöä voidaan tehostaa myös

Hybridilämmitysjärjestelmien hyväksyntä ja kotitalouksien mieltymykset

Ruokamo (2016) tutki kotitalouksien mieltymyksiä hybridilämmitysjärjestelmiä kohtaan ja havaitsi, että hybridilämmitysjärjestelmät ovat yleisesti hyväksytyjä, mutta kotitalouksien asenteet vaihtelevat huomattavasti eri lämmitysjärjestelmien suhteen. Ruokamon tutkimus osoittaa, että kotitalouksien päätökset lämmitysjärjestelmän valinnasta perustuvat useisiin tekijöihin, kuten investointi- ja käyttökustannuksiin, käyttömukavuuteen ja ympäristöystävällisyyteen (Ruokamo, 2016).

Energian käyttö ja omavaraisuus

Jääskeläinen et al. (2019) tarkastelevat energiaturvallisuuden kehitystä Suomessa ja Baltian maissa Neuvostoliiton hajoamisen jälkeen, korostaen omavaraisuuden ja hiilidioksidipäästöjen vähentämisen merkitystä energiaturvallisuudelle. Heidän tutkimuksensa osoittaa, että energiajärjestelmien siirtyminen kohti uusiutuvia energialähteitä ja omavaraisuutta on välttämätöntä, mutta se tuo mukanaan haasteita energian saatavuuden ja kustannusten hallinnan kannalta (Jääskeläinen et al., 2019).

Hybridijärjestelmissä on vaarana järjestelmien ristiriitainen tai väärään aikaan osuva käyttö, jolloin menetetään ilmaisenergioiden hyödyt. Energiakatselmuksissa on havaittu esimerkiksi tavanomaisen vedenjäähdytyskoneen käyttöä, vaikka kiinteistössä olisi ollut saatavilla maapiiristä saatavaa vapaajäähdytystä. Myös päällekkäistä lämmitystä ja jäähdytystä sekä tarpeetonta ilmanvaihtoa todettiin tapahtuvan. Kaikesta tästä syntyy ylimääräistä energiankulutusta, joka olisi vältettävissä järjestelmien asetusarvojen ja aikaohjelmien muutoksilla. (Yritys A, 2018)

Uudet teknologiat talotekniikan ja hybridijärjestelmien käytön tehostamiseen

Lämpöpumppujärjestelmien suunnittelun ja käyttötavan optimoinnissa voidaan hyödyntää datapohjaisia koneoppimismalleja (Ahmed et al., 2023). Usein nämä ovat kaksi erillistä prosessia, mutta yhdistämällä molemmat samaan laskentamalliin voi saavuttaa parempia järjestelmäkokonaisuuksia. Tekoälymallien haasteena on kytkeä valtava määrä energiankulutukseen ja sisäolosuhteisiin liittyviä datapisteitä rakennuksen fyysiseen tulkintaan ja ulkoisiin tekijöihin, kuten energian hintaan ja sääennusteisiin. "The Great Energy Predictor III" -kilpailussa etsittiin parhaita menetelmiä koneoppimiseen käyttöön rakennusten energiankulutuksen ennustamisessa. Kilpailun tulokset osoittivat, että tarkimmat koneoppimismallit perustuivat yksittäisen mallin sijaan useiden eri mallien yhteiskäyttöön, joissa hyödynnettiin erityisesti gradient boosting -puumalleja. Tämä lähestymistapa on merkityksellinen hybridien energiajärjestelmien hallinnassa, sillä tarkat ennustemallit voivat auttaa optimoimaan energian käyttöä ja vähentämään käyttökustannuksia (Miller et al., 2020). Lisäksi tutkimus korostaa jälkikäsitteilyn merkitystä tarkkojen ennusteiden saavuttamisessa, mikä osoittaa, että energiatehokkuuden parantaminen hybridijärjestelmissä edellyttää koulutusdatan jalostamista, jatkuvaa mallien parantamista ja niiden tulosten huolellista arviointia.

Kulutuksen ennustamisen lisäksi on tärkeää varmistaa, että järjestelmä toimii oikein. Automaattinen virheiden havaitseminen ja diagnosointi (fault detection & diagnosis, FDD) hyödyntää rakennusautomaation tuottamaa dataa järjestelmän vikatilojen ja niiden syiden tunnistamiseen. Yhtenä haasteena on toimivaan virheentunnistukseen tarvittavan datan sisällön ymmärtäminen (Li et al., 2021). Automaattista virnehallintaa hyödynnettäessä täytyy myös mitata sen tunnistustarkkuutta. Tämä tarkoittaa erityisesti kykyä tunnistaa todellisia virhetiloja ja välttää vääriä hälytyksiä. Näiden tasapainotuksessa on vielä tekemistä, sillä tyypillisesti väärin hälytysten määrä kasvaa oikeita virheiden havaintokyvyn mukana (Lin et al., 2020).

Virtuaalitodellisuudessa (virtual reality, VR) tutkitaan täysin tietokoneella luotuja ympäristöjä. Lisätyssä todellisuudessa (augmented reality, AR) taas voidaan lisätä virtuaalisia elementtejä todellisen ympäristön päälle. Näin voidaan esim. kulkea fyysisessä rakennuksessa ja nähdä mobiilinäytöllä seinän sisällä kulkevien putkien sijainti. Sekoitetussa todellisuudessa (mixed reality, MR) virtuaaliympäristö voi reagoida myös tosi maailman toimintaan. Laajennettua todellisuutta voidaan hyödyntää esim. rakennusten ylläpidettävyyden suunnitteluun, etäylläpitoon, ylläpitohenkilöstön koulutukseen ja rakennukseen sisältyvän teknologian visualisointiin. (Casini, 2022)

Koulutuksen ja osaamisen puute

Koulutuksen ja osaamisen puute on merkittävä riski sekä hybridienergiajärjestelmien että nZEB-rakentamisen yhteydessä. Vainio et al. (2021) tuovat esiin nykyisien LVI-järjestelmien vaatiman erityisosaamisen puutteen, joka voi johtaa viivästyksiin ja huonoon laadunvarmistukseen huollossa ja asennuksessa (Vainio et al., 2021). Kantola ja Saari (2016) puolestaan korostavat, että nZEB-rakentamisen onnistuminen edellyttää laajamittaista koulutusta ja osaamisen kehittämistä kaikilla projektin tasoilla (Kantola & Saari, 2016).

Yhteenveto

Tässä kirjallisuuskatsauksessa on analysoitu kirjallisuutta, joka käsittelee hybridienergiajärjestelmien riskienhallintaa ja energiatehokkuutta. Tarkastellut tutkimukset osoittavat, että onnistunut energiatehokkuus edellyttää huolellista suunnittelua, korkealaatuisten komponenttien käyttöä, laadukasta asennusta ja jatkuvaa järjestelmien seurantaa. Tekoälypohjaiset ratkaisut, kuten anturien reaaliaikainen kalibrointi ja energian enustaminen, voivat parantaa järjestelmien toimintavarmuutta ja energiatehokkuutta. Lisäksi kotitalouksien hyväksyntä ja käyttäjien mieltymykset vaikuttavat merkittävästi uusien energiaratkaisujen käyttöönottoon, mikä korostaa tarvetta tiedottamiseen ja koulutukseen. HybE RS1 -tutkimuksen tulokset tukevat näitä havaintoja ja antavat konkreettisia esimerkkejä siitä, miten energiatehokkuuden esteitä voidaan voittaa käytännössä.

3.2. Haastattelut

Tutkimuksen tuloksena on koostettu haastatteluissa kerättyjä hyviä toimintamalleja rakennusten hybridienergiajärjestelmien suunnitteluun ja käyttöön eri sidosryhmille. Esitetyt keinot auttavat varmistamaan hybridienergiajärjestelmien pitkän aikavälin toimintavarmuutta ja energiatehokkuutta.

3.2.1. Kiinteistöjen omistajat

Kiinteistön omistajille suunnattuja huomioita esitetään Taulukko 2. Päähuomiona kiinteistöjen omistajien pitäisi laittaa lisää rahaa ylläpitoon. Kalliilta vaikuttavat investoinnit maksavat itsensä takaisin pitkän aikavälin energiansäästönä, työtehokkuutta parantavina hyvinä sisäolosuhteina ja pienempinä huoltokuluina. Samaan aikaan tulee vaatia suunnittelijoiden ja järjestelmäoperaattoreiden vastuunottoa rakennusten toimivuudesta.

Vanhoissa rakennuksissa monitorointijärjestelmät eivät usein riitä järjestelmien tarkkaan hallintaan. Uusissa rakennuksissa mittaroinnin taso on lähtökohtaisesti riittävä. Haasteena on kuitenkin, että määräykset ovat vaatineet vain mittaroinnin asentamisen, eivät mittausdatan keräämistä ja hyödyntämistä. Näin ollen on saatettu asentaa suurikin määrä mittareita, joita ei ole lainkaan kytketty automaatiojärjestelmään. Asiakkaalle saatetaan myös myydä järjestelmä datan keräämiseen ilman ymmärrystä siitä, miten dataa voisi käyttää. Toisaalta monimutkaisten järjestelmien toiminnanvarmistus on puutteellista ja monet teoriassa energiatehokkaat järjestelmät eivät toimi odotusten mukaisesti.

Tilaajien tulee varmistaa, että asennetut järjestelmät testataan ja niiden tehokkuus varmennetaan energiankulutuksen, sisäolosuhteiden ja muiden mittareiden tavoitetasoihin verraten. Tavoitetaso voidaan muodostaa esim. rakennuksen ja sen järjestelmät kattavan energiamallinnuksen avulla. Energiatehokkuutta täytyy ylläpitää jatkuvasti keräämällä dynaamista dataa järjestelmien toiminnasta ja vertaamalla tätä

historiatietoihin sekä esim. digitaalisen kaksosen tuottamaan dataan. Suunnittelijaa valitessa tuleekin kiinnittää huomiota hybridijärjestelmäosaamiseen.

Taulukko 2. Toimintaohjeita kiinteistöomistajille.

Ohje	Yksityiskohdat	Torjuttu riski
Suunnittelu		
Varmista suunnittelijan osaaminen	Suunnittelijalla tulee olla osaamista hybridiennergiajärjestelmien ja järjestelmäkokonaisuuksien suunnittelusta.	Epäoptimaaliset järjestelmät Huono energiatehokkuus Heikko järjestelmän luotettavuus
Kenttäkokemuksen suosiminen	Suosi suunnittelijoita, joilla on kokemusta käytännön rakentamisesta ja asennustyöstä.	Liian monimutkaiset järjestelmät
Anna suunnittelijalle vastuuta ja päätösvaltaa	Suunnittelijoilla tulee olla vastuu rakennuksen energiatehokkaasta toiminnasta rakentamisen päätyttyä sekä valta tehdä päätöksiä, jotka edistävät tavoitetta.	Huono energiatehokkuus Huonot sisäolosuhteet Heikko järjestelmän luotettavuus
Ylläpito		
Panosta ylläpitoon	Näennäisen korkeatkin ylläpitoon tehdyt investoinnit maksavat itsensä takaisin vuosien aikana matalampina energiakuluina, parempina sisäolosuhteina ja matalampina ylläpitokuluina.	Huono energiatehokkuus Huonot sisäolosuhteet
Määritä vastuuhenkilöt	Jokaisella järjestelmällä tulee olla joku, joka on vastuussa sen tehokkaasta toiminnasta.	Viivästynyt huolto Huono energiatehokkuus Huonot olosuhteet
Kannusta pitkän linjan ajatteluun	Kaikilla työntekijöillä, myös lyhytaikaisilla, tulee olla kannuste työskennellä pitkän aikavälin parannuksien eteen. Tähän voi pyrkiä palkkio/sanktio-mallilla.	Huono energiatehokkuus
Toteuta parannusehdotukset	Kun auditointi paljastaa järjestelmän heikkouksia ja potentiaalisia tehostamiskeinoja, täytyy kehittää suunnitelma ehdotettujen muutosten tuomiseksi käytäntöön.	Huono energiatehokkuus Huonot olosuhteet

Kannusta ongelmanratkaisuun	Määritä oikein toimivien järjestelmien arvo (ts. tuottavuushäviöiden rahallinen arvo), jotta motivoidaan nopeaan huoltoon.	Viivästynyt huolto
Sähköinen huoltokirja	Hyödynnä sähköistä huoltokirjaa, joka sisältää suoritettut työt, tehtäväluettelon eri teki- jöille ja suunnitelmat järjestelmäkohtaisille toimenpiteille.	Viivästynyt huolto Tarpeeton huolto
Automaattinen analytiikka ja ihmisasiantuntijat	Rakennusautomaation datan tulee kytkeytyä automaattiseen analyysijärjestelmään ja välittää edelleen tietoa ihmisasiantuntijalle, joka valvoo tilannetta ja esittää lisätoimenpiteitä ja suosituksia.	Viivästynyt huolto Huono energiatehokkuus Huonot olosuhteet Ongelmien tunnistamattomuus
Säännölliset ryhmätapaamiset	Järjestä säännöllisiä tapaamisia käyttö- ja huoltohenkilöstön välillä järjestelmien ja energiatehokkuuden tilan arvioimiseksi.	Viivästynyt huolto Ongelmien tunnistamattomuus
Kommunikaatioalusta	Toteuta integroitu alusta käyttö- ja huoltoprosessiin osallistuvien osastojen keskeiseen kommunikointiin.	Yhteistyön puute Tiedonkulun estyminen
Energiatehokkuuden avoin raportointi	Energiatehokkuustietojen ja tunnuslukujen avoin raportointi ja rakennustason benchmarklukemien jakaminen kaikille.	Huono energiatehokkuus

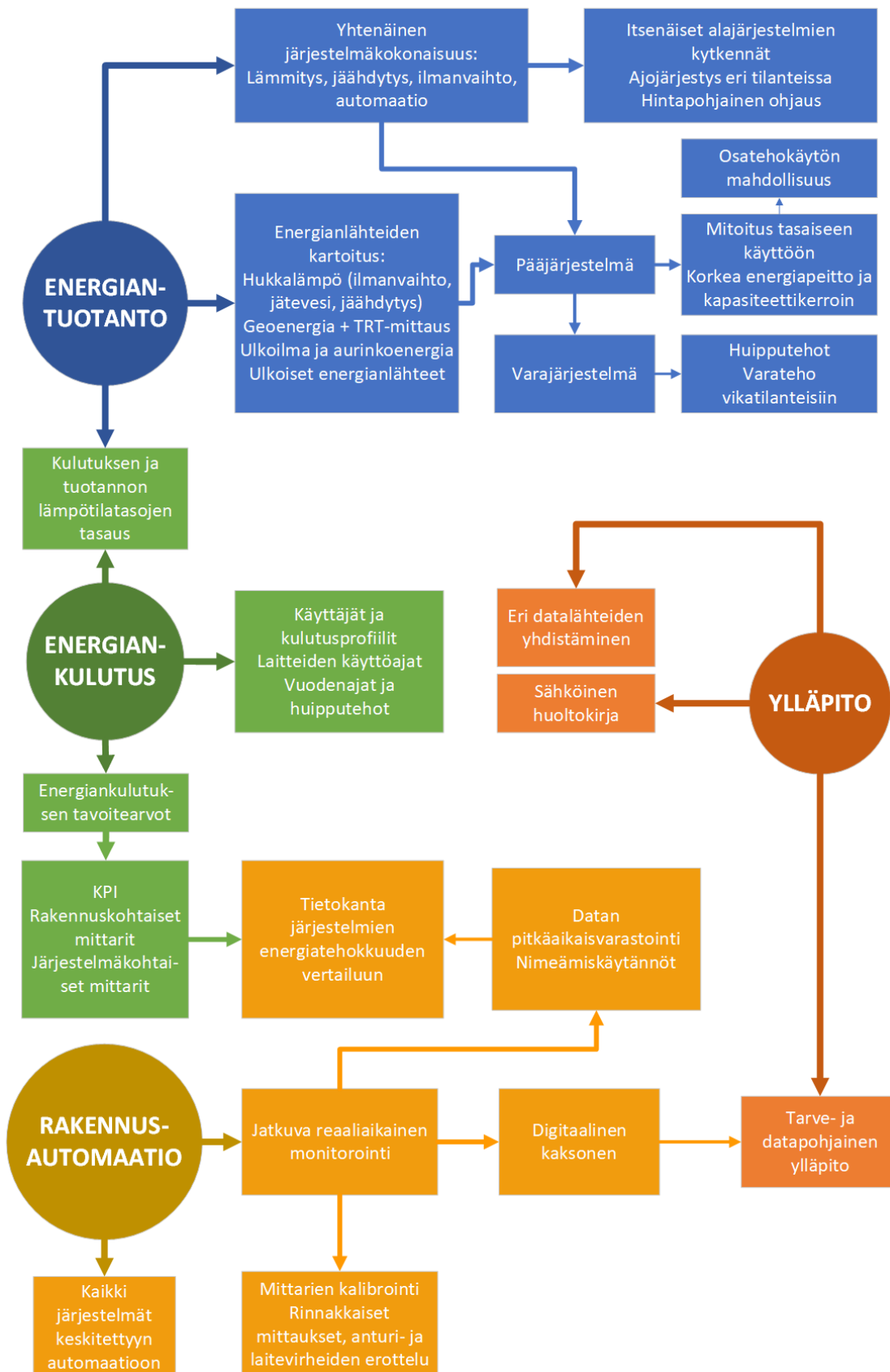
3.2.2. Suunnittelu ja toteutus

Hybridiennergiajärjestelmien suunnitteluun ja toteutukseen toimintatapojen yhteenveto esitetään Kuva 2. Hybridiennergiajärjestelmien suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota vuodenaikakohtaisten energiankulutusprofiilien tarkkaan määrittämiseen. Vastaavasti täytyy määrittää kaikki rakennuksen käytettävissä olevat lämmönlähteet, kuten poistoilman ja jäähdytyksen hukkalämpö, aurinkoenergia sekä geoenergian ja ulkoilman lämmön potentiaali. Näiden tietojen pohjalta järjestelmä voidaan suunnitella ja mitoittaa elinkaaren tasolla kustannustehokkaalla tavalla siten, että hybridiennergiajärjestelmää voidaan käyttää tasaisesti ilman jatkuvaa päälle/pois-kytkeytymistä ja potentiaalisimmat lämmönlähteet hyödyntäen. Geoenergiakentän teho ja kestävä käyttömäärä tulee varmistaa TRT-mittauksiin perustuvalla kaivokentän pitkän aikavälin mallinnuksiin pohjautuvalla mitoituksella. Suunnitelmissa tulee kuitenkin varautua myös energiantarpeiden muutoksiin, esim. käyttäjien vaihtuessa tai lämmönlähteiden poistuessa / osoittautuessa riittämättömiksi. Tämä tarkoittaa paikkavarauksia järjestelmälaajennuksille, kuten uusille lämpöpumpuille tai

geoenergiakaivoille. Varaenergiajärjestelmän tulee kuitenkin pystyä kattamaan koko energiantarve pääjärjestelmän häiriötilanteissa.

Kaikki osajärjestelmät (ilmanvaihto, lämmitys, jäähdytys) tulee suunnitella kokonaisuutena, jossa vältetään rinnakkaisten järjestelmien ristiriitainen toiminta, kuten samanaikainen lämmitys ja jäähdytys tai keskitetyn ja paikallisen järjestelmän erilaiset toimintaperiaatteet. Järjestelmien tulee kuitenkin olla kytkennöiltään mahdollisimman itsenäisiä, jotta toimintahäiriöt yhdessä alajärjestelmässä eivät estä toisen toimintaa. Hybridenergiajärjestelmän suunnittelussa tulee hyödyntää dynaamista järjestelmämallintamista. Näin voidaan löytää parhaat kytkentäratkaisut, operointistrategiat ja mitoitus sekä hylätä hyvältä vaikuttavat ratkaisut, jotka eivät käytännössä tuota lisäarvoa. Mallinnusta voidaan myös hyödyntää järjestelmäkaavion ja toimintaselostuksen pohjana. Järjestelmän tavoite-energiankulutus tulee määrittää dynaamisilla simuloinneilla ja toteutunutta kulutusta tulee verrata tähän toiminnanvarmistuksessa ja käyttövaiheessa. Järjestelmän ylläpitäjä/operaattori tulee ottaa mukaan suunnitteluun, jotta käytännön kokemukset automaatiojärjestelmän toimivuudesta saadaan huomioitua tehokkaasti. Automaatiojärjestelmän nimeämiskäytäntöjä pitäisi standardoida ja hyödyntää selventäviä tageja sekä ihmisen että tietokoneen käyttöön. Automaattisen analytiikan pitäisi voida tunnistaa mitä suuretta piste kuvaa ja missä mittari sijaitsee suhteessa muihin järjestelmiin (esim. ennen lämmöntalteenottoa tai lämmityspatterin jälkeen).

Jäähdytysjärjestelmän lämpötilatasojen tulee huomioida matalien lämpötilojen aiheuttama kondensaation ja kosteusvaurioiden riski. Samalla tulisi pyrkiä hyödyntämään maaperästä pelkästään pumppaamalla saatavaa vapaajäähdytystä. Tämä auttaa myös ehkäisemään geoenergiakentän jäähtymistä lataamalla rakennuksesta kerättyä lämpöä maaperään. Myös muiden lämmönlähteiden lataamista maaperään kannattaa harkita geoenergiakentän pitkän aikavälin kestävyysparantamiseksi sekä tilantarpeen ja porauskustannusten vähentämiseksi. Taulukko 3 esittää aiheittain luokitellut suunnittelun toimintamallit sekä riskit, joita toimilla voidaan torjua.



Kuva 2. Hybridienergiajärjestelmän suunnittelussa huomioitavia asioita.

Taulukko 3. Rakennusten hybridienergiajärjestelmien suunnitteluohjeet.

Ohje	Yksityiskohdat	Torjuttu riski
Energiankulutus		
Arvioi energiantarve	Määritä tarkkaan rakennuksen energiankulutus. Hyödynnä tuntitason dynaamista mallinnusta ja/tai järjestelmäkohtaista mitausdataa.	Ylimitoitus: Korkeat investointikulut, on/off-käytöstä johtuva kuluminen Alimitoitus: Varalämmön suuri kulutus, huonot sisäolosuhteet
	Mittaa ilmapirratt ja varmista järjestelmien aikataulut.	Ylimitoitus, alimitoitus
	Huomioi eri vuodenaajat ja realistiset huipputehot. Kaikkien järjestelmien yhtäaikainen huippukäyttö mitoitustilanteessa on hyvin epätodennäköistä.	Ylimitoitus
Energian tuotanto		
Määritä lämmönlähteet	Määritä kaikki käytettävissä olevat lämmönlähteet ja niiden hyödyntämisen kustannus. Tämä sisältää geoenergian sekä hukkalämmön ilmanvaihdesta, jätevedestä ja jäähdytyslaitteistosta. Myös ulkoiset lämmönlähteet lähellä olevista kiinteistöistä, kuten ruokakaupoista ja urheiluhalleista tulisi ottaa tarkasteluun.	Lämpöpumpun matala COP Edullisten lämmönlähteiden hyödyntämättömyys Korkeat elinkaarikustannukset
	Mahdollisten geoenergiakaivojen määrät ja paikat tulee määrittää. TRT-mittauksiin perustuvalla pitkän aikavälin mallinnuksella ja mitoituksella tulee varmistaa geoenergiakaivojen tuotantopotentiaali, erityisesti suuremmille geoenergiakentille.	Ylimitoitus: Korkeat investointikulut Alimitoitus: Lämpöpumpun matala COP ja käytökerroin, energiakentän ennenaikainen jäähtyminen, korkeat energiakulut
Suunnittele järjestelmät yhtenäisenä kokonaisuutena	Kaikki eri järjestelmät (lämmitys, jäähdytys, ilmanvaihto, lämmönjakelu, automaatio...) tulee suunnitella toimimaan yhtenäisenä, yhteensopivana kokonaisuutena. Näin vältetään ristiriitaisilta ohjaukskäskyiltä ja mahdollistetaan järjestelmien synergia esim. hukkalämmön hyödyntämisen avulla.	Järjestelmien ristiriitainen käyttö Puutteelliset rakennusautomaation kytkennät Järjestelmän huono kokonaisenergiatehokkuus
	Laitteiden, putkien ja kanavien palvelualueiden tulee olla riittävän pienet, jotta	Korkea energiankulutus Laajat toimintahäiriöt

	ohjaus voidaan tehdä paikallisten olosuhteiden mukaan ja huolto toteuttaa haittaamatta toimintaa koko rakennuksessa.	
Mitoita pääjärjestelmä	Pääjärjestelmä tulee mitoittaa vuoden-aikojen ja päivittäisten käyttöprofiilien mukaisesti siten, että se voi toimia tasaisesti, välttämättä jatkuvaa kytkeytymistä päälle ja pois. Esim. erikokoiset rinnakkaiset lämpöpumput ja invertteriohjaus ovat hyödyksi.	Epätasaisen käytön aiheuttamat vahingot ja ylläpitokulut
	Vältä yli- ja alimitoitusta: pääjärjestelmän korkea energiapeitto ja korkea kapasiteettikerroin.	Korkeat elinkaarikustannukset
	Lämpöpumppujen yhtäaikaista lämmön ja kylmän tuotantoa tulee hyödyntää tehokkaasti.	Korkeat käyttökustannukset
Mitoita varajärjestelmä	Varajärjestelmän tulee pystyä tuottamaan tehoa huippukulutuksen aikoina ja kun pääjärjestelmä on poissa käytöstä.	Puutteelliset sisäolosuhteet
Käytä itsenäisiä alajärjestelmiä	Jokaisen eri järjestelmän tulee kytkeytyä kokonaisuuteen itsenäisenä osana siten, että yhden järjestelmän ongelmat eivät estä toisen käyttöä.	Ketjuttuvat järjestelmähäiriöt, puutteelliset sisäolosuhteet
Määritä järjestelmän toimintajärjestys	Määritä säännöt ja dokumentaatio, jotka kertovat milloin minkäkin järjestelmän tulee toimia ja mitkä ovat pää- ja varajärjestelmiä.	Korkeat käyttökustannukset, geoenergiakentän vajaa- ja ylikäyttö
	Hyödynnä dynaamista energian hintatietoa, jolloin hybridijärjestelmää voi käyttää halvimman energiamuodon mukaan.	Korkeat käyttökustannukset
Varaudu ongelmiin	Kehitä toimintasuunnitelmia ongelmatilanteiden varalle: esim. lämmönlähteen menetys, muutos energiantarpeessa, energian hinnan muutos.	Korkeat käyttökustannukset, puutteelliset sisäolosuhteet
	Varaa tilaa järjestelmälaajennuksille, esim. energiantarpeiden muutoksia ajatellen.	Järjestelmien parantamisen vaikeus, puutteelliset sisäolosuhteet
	Pääsy laitteille tulee tehdä helpoksi huoltotöitä ajatellen.	Vikatilojen synty, pitkittyneet käyttöhäiriöt
	Hyödynnä sopimuksia, jotka huomioivat oman hallinnan ulkopuolella olevat tekijät, kuten energiamarkkinan muutokset.	Korkeat käyttökustannukset, äkillinen energiatoimituksen päättyminen

Säädä verkostolämpötilat	Käytä mahdollisimman matalaa lämpötilaa lämmönjakelussa lämpöpumpun hyötysuhteen parantamiseksi.	Lämpöpumpun matala COP, korkeat käyttökustannukset
	Varmista, että lämmönjakelun ja lämmön tuotannon lämpötilakäyrät vastaavat toisiinsa.	Lämpöpumpun matala COP, puutteelliset sisäolosuhteet
	Rajoita jäähdytysjärjestelmän lämpötilaa siten, että se pysyy aina kastepisteen yläpuolella, kondensaation välttämiseksi.	Kondensaation aiheuttamat kosteusvauriot
Määritä energiatehokkuuden tavoitteet	Hybridiennergiajärjestelmä tulee simuloida eri olosuhteissa, jotta voidaan asettaa energiatehokkuustavoitteet ja tavoitearvot energiatehokkuuden arviointiin.	Heikko energiatehokkuus Korkeat käyttökustannukset
	Digitaalinen kaksonen luo reaaliaikaista vertailutietoa järjestelmän toiminnasta.	Heikko energiatehokkuus Korkeat käyttökustannukset
Laadukkaat osat ja asennus	Varmista, että urakoitsija käyttää suunnittelijan suosittelemia laitteita. Jos muutoksia tehdään, uusilla osilla täytyy olla samat ominaisuudet, kuten säädettävyyys ja energiatehokkuus eri olosuhteissa. Suunnittelijan tulee hyväksyä muutokset.	Heikko energiatehokkuus Epäluotettavuus
Rakennusautomaatio		
Ota järjestelmäoperaattori mukaan suunnitteluun	Järjestelmän tulevan käyttäjän tulee olla mukana järjestelmän ja automaation suunnittelussa jo projektin alusta lähtien. Mittarointi tulee suunnitella yhteensopivaksi toiminnanvarmistuksen suunnitelman kanssa, joka samoin pitää tehdä jo suunnitteluvaiheessa.	Virheellinen automaatio-suunnittelu Korkeat elinkaarikustannukset Puutteelliset sisäolosuhteet Rakentamis- ja käyttöönottovaiheen datan puutteet
Asenna seurantalaitteisto	Luotettavia antureita tarvitaan mittaamaan sisäolosuhteita: lämpötila, ilmankosteus, hiilidioksidi	Huonot sisäolosuhteet Haasteellinen virhediagnoosi
	Antureilla tulee mitata energiavirtojen tilaa hyötysuhteiden ja energiatehokkuuden määrittämiseksi: lämpötila, virtaus ja paine ennen ja jälkeen lämmönvaihtimia ja muita laitteita.	Viivästynyt huolto Heikko energiatehokkuus
	Eri suureiden rinnakkainen mittaus samasta pisteestä mahdollistaa mittareiden virheiden ja ongelmatilanteiden tunnistamisen.	

	Anturit tulee kalibroida hyvin.	Epäluotettava mitausdata
	Dynaamista toimintadataa tulee varastoida ainakin viiden vuoden ajalta, jotta sitä voidaan käyttää vertailutietona virheiden tunnistamiseen ja energiatehokkuuden optimointiin. Myös käyttöönottoaiheen data tulee olla käytettävissä.	Vaikeudet ongelmien juurisyiden selvittämisessä Energiatehokkuuden vertailutiedon puute
	Yhtenäiset nimeämis- ja luokitteluperiaatteet mittareille ja laitteille: mihin järjestelmään laite kuuluu ja mitä mittari mittaa. Mukana tulee olla selkokielistä tekstiä ihmisille sekä koneluettavia tageja automaatio- ja analytiikkajärjestelmän käyttöön.	Datan saatavuuden haasteet Viivästynyt huolto
Tehokkuusindikaattorien (KPI) määrittäminen	Laske ja tallenna indikaattoreita, jotka kertovat ymmärrettävällä tavalla järjestelmän toiminnasta: esim. lämmöntalteenoton hyötysuhde, lämpöpumpun COP eri olosuhteissa, käyttäjäkohtainen energiankulutus.	Ongelmien tunnistamisen haasteet Korkeat käyttökustannukset
	Datan jakaminen ja vertailu muiden vastaavien kiinteistöjen järjestelmien dataan energiatehokkuuspoikkeamien tunnistamiseksi.	Vertailutiedon puute
	Yhdistä eri lähteistä tuleva tieto yhteen paikkaan. Automatisoi tiedon kerääminen ja alustava analysointi.	Rinnakkaisten järjestelmien diagnosoinnin hitaus
Ohjausjärjestelmien määrittäminen	Kaikki järjestelmät pitää kytkeä samaan rakennusautomaatioon	Ristiriitaiset ohjauskomennot
	Ohjausjärjestelmän logiikka tulee dokumentoida ja selittää järjestelmän käyttäjälle	Järjestelmien tuntemattomat tilat Heikko energiatehokkuus
	Asetusarvojen tulee olla samat paikallisissa ja keskitetyissä järjestelmissä	
	Hyödynnä sääennusteita ja rakennuksen lämpökapasiteettia lämmityksen/jäähdytyksen ajoittamiseen	
	Hyödynnä kalenteriasetuksia ja ulkolämpötilarajoja lämmityskauden aikaisen jäähdytyksen välttämiseksi	

	Varmista järjestelmien uudelleenkäynnistyminen sähkökatkojen tai verkkoyhteyksien menettämisen jälkeen	Heikko energiatehokkuus Mittausdatan menetys
Yhtenäiset automaationäkymät	Samanlaisten rakennusten ja järjestelmien automaationäkymien tulisi olla samanlaiset käytön helpottamiseksi.	Työtehokkuuden menetys Heikko energiatehokkuus Huonot sisäolosuhteet
	Antureiden ja laitteiden standardoidun nimeämisen lisäksi tulee olla selkokielinen kuvaus, jonka avulla järjestelmää voi ymmärtää ilman ulkoista opaskirjaa.	Työtehokkuuden menetys
	Asiakkaalle tulee selittää miten mitattua dataa voidaan hyödyntää ja mikä on asiakkaan rooli.	Turhat investoinnit Energiatehokkuuspotentiaalin menetys
Käyttöönotto ja toiminnanvarmistus		
Suunnittele toiminnanvarmistus	Suunnittele toiminnanvarmistuksen toteutustapa ja siinä tarvittavat mittaukset jo hankkeen alussa.	Puutteellinen toiminnanvarmistus
Vältä rakennusvaiheiden välinen datakato	Varmista, että rakentamisen ja käyttöönoton aikana kerätty data on muodossa, jossa sitä voidaan hyödyntää myös käyttövaiheessa.	Datan menetys Datan heikko laatu
Varmista toiminnallisuus myös käyttövaiheessa	Tyhjässä rakennuksessa tehty viritys ei välttämättä riitä käyttäjien saapuessa rakennukseen. Varmista järjestelmän toiminta myös käyttäjien vaikutuksen alaisena.	Huono energiatehokkuus Huonot olosuhteet
Henkilöstö		
Henkilöstön koulutus	Ylläpitohenkilöstölle täytyy opettaa hybridijärjestelmän käytön ja huollon periaatteet.	Virheelliset manuaaliset säädöt Heikko energiatehokkuus Korkeat ylläpitokustannukset
Tiedon jakaminen	Rakennushankkeen toteutuksen ja onnistumisen tiedot tulee tallentaa arkistoon, jotta sitä voidaan hyödyntää tulevaisuudessa: investointikulut, säästetty energia, energiatehokkuus yms.	Investointikulujen epävarmuus Alan mainehaitat
	Hyvät toimintatavat, suunnitteluperiaatteet ja järjestelmäkytkennät tulee jakaa alan toisten toimijoiden kanssa	Alan mainehaitat Heikko energiatehokkuus Huonot sisäolosuhteet
Ylläpito		
Vastuunjako	Jokaisella järjestelmällä tulee olla joku vastuuhenkilö.	Viivästynyt huolto Heikko energiatehokkuus

		Huonot sisäolosuhteet
Hälytyksensiirtoprotokolla	Järjestelmien hälytyksien täytyy kulkeutua ainoastaan niille ihmisille, joilta vaaditaan toimia.	Liiallinen tiedon määrä Viivästynyt huolto
Säännöllinen auditointi	Järjestelmän tehokkuusindikaattoreita tulee tarkastella säännöllisesti.	Heikko energiatehokkuus Huonot sisäolosuhteet
Siirrettävä valvontasema	Siirrettäviä, langattomia antureita voidaan käyttää kiinnostavien alueiden olosuhteiden määrittämiseen, jos kiinteitä antureita ei ole tai niitä on vaikea käyttää.	Huonot sisäolosuhteet Virhediagnoosin vaikeus

3.2.3. Ylläpito

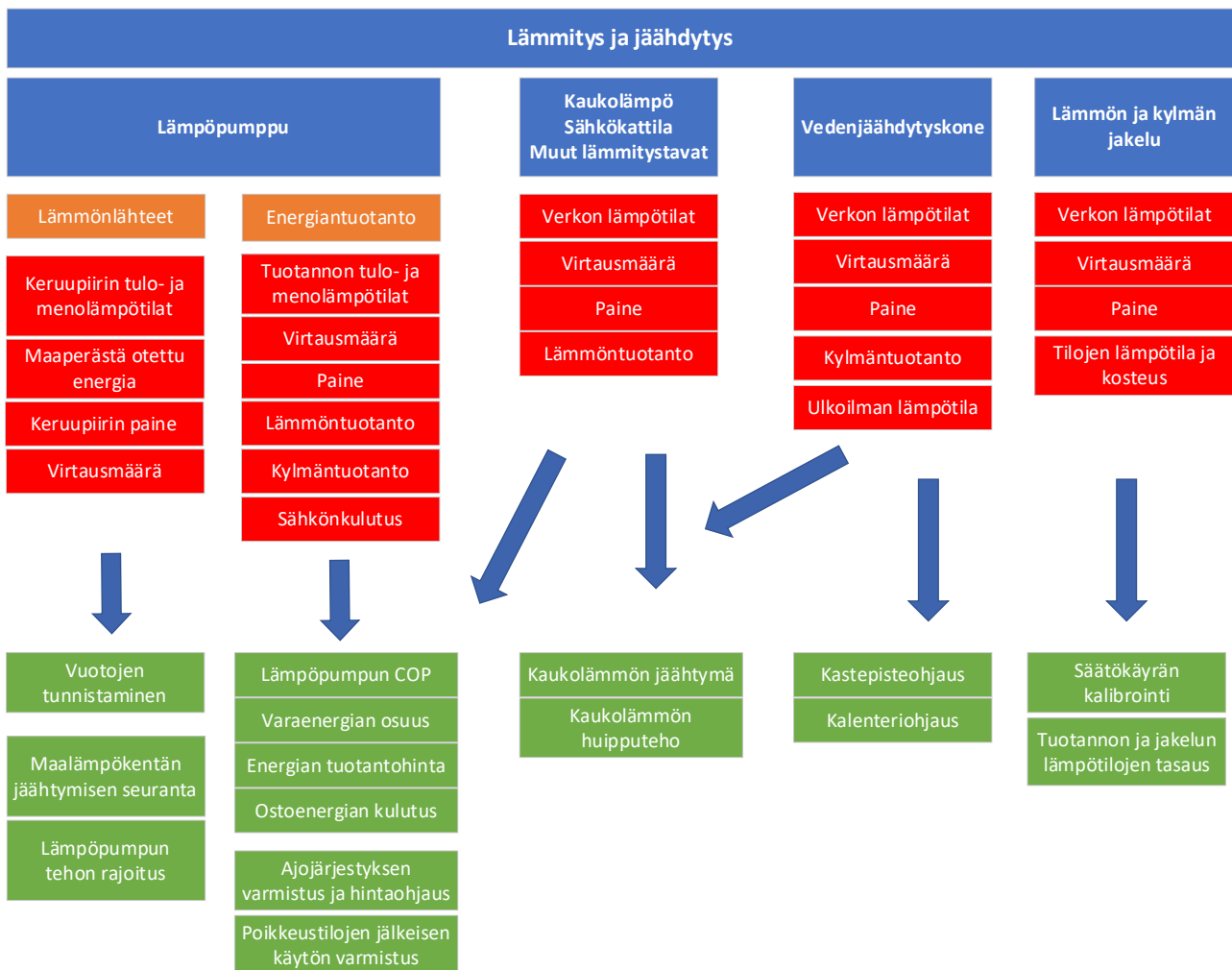
Avainasiana nykyaikaisen talotekniikan ja hybridienergiajärjestelmien käytössä on, että kaikki järjestelmät tulee kytkeä samaan keskitettyyn automaatioon ja ohjata etähallinnan kautta. Käsiohjausta tulee välttää. Jotkin järjestelmät, kuten lämpöpumput, toimivat usein yhä täysin itsenäisinä ilman yhteyttä rakennusautomaatioon. Tämä on haaste järjestelmäkokonaisuuden ja rinnakkaisjärjestelmien ohjaamiselle. Jokaisen rakennuksen järjestelmän tulee olla jonkun ihmisen vastuulla, jotta vikatilanteissa tähän liittyvät epäselvyydet eivät viivästytä ongelman korjaamista. Vastaavasti automaattisesti lähetettävien hälytysten tulisi päättyä vain asiasta vastuussa oleville ihmisille, tarpeettoman informaatiotulvan minimoimiseksi. Sähköisen, älykkään huoltokirjan avulla voidaan siirtyä kuukausi/vuositason huolloista tarpeenmukaisempaan toimintaan. Huolto-ohjelma tulee suunnitella kiinteistökohtaisesti.

VERTAILUDATA		TIEDONHALLINTA	
Kerää toimintadataa eri olosuhteissa.	Vertaa kulutusta 1) suunnittelutavoitteisiin, 2) digitaaliseen kaksoseen 3) muihin vastaaviin järjestelmiin.	Jokainen järjestelmä jonkun vastuulle.	Hälytykset vain niille, jotka niitä tarvitsevat.
Säilytä historiatietoja 5 vuoden ajan.		Säännöllinen energiatehokkuuden auditointi.	Ennakoivat ja reagoivat huoltotoimet dataan perustuen.
Datan keruun jatkaminen käyttökatkojen ja yhteysongelmien jälkeen.		Ylläpidon lyhyt- ja pitkäaikainen suunnittelu tehtyjen havaintojen ja suositusten perusteella.	

Kuva 3. Tiedon keräämisen ja käytön ohjeita.

Tärkein ylläpidon työkalu on energiajärjestelmien ja sisäolosuhteiden jatkuva seuranta. Rakennuksen energiatehokkuudelle oleellisia indikaattoreita esitetään Taulukko 4 ja huomioita tiedon hyödyntämisestä Kuva 3. Hybridienergiajärjestelmässä tulee seurata lämpöpumpun tuotantolämpötiloja ja COP-arvoja (lämmön/kylmän tuotto ja sähkön käyttö) sekä eri verkostojen kulutuksia verrattuna tavoitetasoon. Täytyy myös varmistaa, että järjestelmien ajojärjestys toteutuu toimintaselostuksen mukaisesti. Lämpöpumpun

käyttöaikoja seuraamalla voidaan välttää kompressorin vikaantumista. Lämpöpumpun tulee toimia mahdollisimman tasaisesti, minimoiden sammumisten ja käynnistymisten määrää. On parempi käyttää järjestelmää jatkuvasti osateholla kuin useita lyhyitä hetkiä suurella teholla. Kustannuksia tulee minimoida käyttämällä kullakin hetkellä halvin energiantuotantomuotoa, esim. vertaamalla lämpöpumpun sähkönkulutuksen COP-korjattua hintaa kaukolämmön kausihintaan. Tuntihintapohjainen laskutus ja automaattinen tuntihintaohjaus lisää käytön optimoinnin mahdollisuuksia. Kooste hybridienergiajärjestelmän mittauksista ja indikaattoreista esitetään Kuva 4.



Kuva 4. Hybridienergiajärjestelmän mittauksia ja menettelyjä.

Keruupiirin painemittauksilla voidaan tunnistaa vuotoa indikoiva matala paine. Lisäksi tulee valvoa keruupuolen lämpötiloja. Jos maalämpökentästä saatava lämpötila on jatkuvasti alle 1 °C, kentästä otetaan todennäköisesti liikaa tehoa ja on vaarana sen ennenaikainen jäähtyminen, josta seuraa lopulta lämpöpumppujärjestelmän vikaantuminen. Lämpöpumpun tehorajoitukset tai uusien energiakaivojen poraaminen voivat hyllyttää ongelmaa, samoin kuin esim. hukkalämmön hyödyntäminen. Lämpöpumpun tuotantolämpötilojen tulee vastata lämmönjakelun tarpeita ja onkin tärkeää varmistaa, että kulutuksen ja tuotannon lämpötilakäyrät ovat samat. Muuten saatetaan tuhlaata energiaa liian korkeisiin lämpötiloihin tai joudutaan tarpeettomasti tulistamaan tuotantoa varalämmönlähteellä. Tämä on huomionarvoista myös "energia palveluna" -

sopimuksissa, joissa toimitetaan energiaa luvattuun hintaa, mutta ei kiinnitetä huomiota siihen, onko rakennuksen sisäisten järjestelmien lämpötilatasoja optimoitu.

Myös ilmanvaihto vaikuttaa merkittävästi rakennuksen energiatehokkuuteen. Ilmanpaine-eroja tulee mitata koko rakennuksen vaipan yli ylipaineen ja sen tuomien kosteus- ja mikrobiongelmien välttämiseksi. Paineeromittaus lämmönvaihtimien ja suodattimien yli taas auttaa havaitsemaan komponenttien likaantumista ja jäätymistä. Lämmöntalteenoton lämpötilat ja lämpötilaerot tulo- ja poistoilmassa mahdollistavat lämmöntalteenoton hyötysuhteen selvittämisen. LTO:n hyötysuhteen muutokset voivat indikoida järjestelmän viikaantumista, samoin kuin tarvittavan lämpötilatason nouseminen. Nestekiertoisissa järjestelmissä tulee ylläpitää riittävää pakkasnesteen tasoa, kun taas pyörivissä LTO-kiekoissa tulee kiinnittää huomiota myös löysytyneiden hihnojen aiheuttamiin pyörimisnopeuden muutoksiin. CO₂-pitoisuutta mittaamalla voidaan tunnistaa tilojen käyttöä ja ilmamäärien riittävyyttä. Energiankulutusta voidaan leikata vähentämällä ilmamääriä CO₂-pitoisuuksien mittaustiedon perusteella tai yksinkertaisesti käyttöaikataulujen mukaisesti. Jos rakennus ei ole käytössä jatkuvasti, vaan esim. yöaikaan ei ole mitään käyttöä, ilmanvaihto voidaan sulkea kokonaan käyttöajan ulkopuolella ja käynnistää 2 h ennen käytön jatkumista.

Yksi datapohjaisen ylläpidon haaste on erottaa järjestelmän toimintahäiriöt antureiden vioista. Vioittunut anturi saattaa näyttää järkevää tulosta, vaikka järjestelmä ei toimi tai päinvastoin. On tärkeää pystyä varmistamaan automaatiojärjestelmän raportoiman tuloksen paikkansapitävyys. Esim. säätöpeltien ja venttiilien sulkeutuminen voi olla estynyt, vaikka automaation mukaan asetus on oikein. Näennäisesti suljettujen venttiilien vuoto voi aiheuttaa laitteiden vääräaikaista toimintaa, esim. vuotovirta lämmityspatteriin jäähdytyskaudella. Eri suureiden (kuten paine, virtaus ja lämpötila) mittaaminen samasta pisteestä auttaa tunnistamaan anturien ongelmia, koska todellinen virhetilanne todennäköisesti aiheuttaa poikkeamia useassa mittarissa, kun taas anturin virhe rajoittuu yhteen pisteeseen. Yleisesti, yksittäisten laitteiden suunnitelmien mukaisen toiminnan varmistaminen lisää niiden käyttöikä ja vähentää huoltotarvetta. Automaatioon täytyy säätää riittävät hälytykset erilaisten poikkeamien tunnistamiseksi.

Taulukko 4. Rakennusten energiatehokkuuden seurantaan tarvittavia indikaattoreita ja mittaustietoja.

Järjestelmä	Indikaattorit	Lisätiedot
Rakennuksen energiankulutus	Lämmön, jäähdytyksen ja sähkön kokonaistarve Ostoenergian tarve Järjestelmäkohtainen energiankulutus Energiankulutus per käyttäjä	kWh/m ² , kWh/m ³ , vertailu suunnitelmiin sekä vastaaviin kiinteistöihin ja järjestelmiin kWh/käyttäjä, tilojen hyödyntämisen tehokkuus
Energian tuotanto	Lämpöpumpun tuottama lämpö/jäähdytys Lämpöpumpun käyttämä sähkö COP Lämpöpumpun käyttöaika	kWh, energiatehokkuus eri vuodenaikoina ja eri sääoloissa, tasainen käyttö ja käynnistymisten määrän minimointi

	Lisäenergian tarve tuotettuun lämpöön/jäähdytykseen verrattuna	kWh/kWh, pääjärjestelmän energiapetto
	Hyödynnetyn energian yksikköhinta Ostoenergian tuntihinta Ostoenergian keskihinta	€/MWh, kustannustehokkuus
	Lämpöpumpun lämmönlähteen ja tuotannon lämpötila, virtaama ja paine	Vertailu suunnitteluarvoihin, ongelmien tunnistaminen
	Virtaama, paine-ero ja lämpötila muiden energiantuotantovälineiden ja lämmönvaihtimien kohdalla	Kaukolämmön jäähtymän seuranta
	Ulkolämpötilan ja aurinkoenergian hetkellinen arvo ja ennuste	Rajoitukset jäähdytyksen käytölle kylmän kauden lämpiminä hetkinä Passiivisen aurinkolämmön hyödyntäminen kulutusennusteen avulla
Lämmön ja kylmän jakelu	Virtaama, paine-ero ja lämpötilat lämmönvaihtimien ja verkostojen yli	Lämmönsiirron tehokkuus Säätökäyrän kalibrointi ulkolämpötilojen avulla Jäähdytyslämpötilojen rajoitus kastepisteen mukaan
Geoenergiakenttä	Tulo- ja menolämpötila, virtaama, paine Kentästä otettu energiamäärä verrattuna mitoitustalouteen	Energiakentän jäähtymisen seuranta, vuotojen havainnointi
Ilmanvaihto	Paine-ero rakennuksen vaipan yli	Kosteus- ja mikrobiongelmien ehkäisy
	Paine-ero lämmönvaihtimien ja suodattimien yli	Likaantumisen ja jäätymisen tunnistaminen
	Tulo- ja poistoilman lämpötila ennen ja jälkeen LTO:n LTO:n hyötysuhde	Hukkalämmön tehokas hyödyntäminen Hyödyntämättömän lämmön tunnistaminen
	Lämpötila ennen ja jälkeen lämmitys/jäähdytyspattereita	Päällekkäisen lämmityksen ja jäähdytyksen tunnistaminen
	Tilojen lämpötila, kosteus ja CO ₂ -pitoisuus	Lämmitys- ja ilmanvaihdon tarpeen tunnistaminen ja optimointi

Venttiilit ja säätöpellit	Asento auki/kiinni	Säätimen asennon varmistaminen, vuotovirtojen estäminen
---------------------------	--------------------	---

4. JATKOKEHITYS

Taloteknisten järjestelmien ylläpitoa tulisi kehittää tarpeenmukaiseen toimintaan, jossa kalenteripohjaiset huoltotoimenpiteet korvattaisiin dataan pohjautuvalla toiminnalla. Tämä tarkoittaa esim. suodattimien vaihtamista painemittausten osoittaman tarpeen mukaan, jolloin järjestelmän käyttömääristä riippuen saattaa huoltoväli kasvaa tai lyhentyä. Näin voidaan välttää turhia huoltokäyntejä tai ehkäistä sisäolosuhteiden huonontumista. Ilmaston lämpeneminen näkyy jo nyt aiempaa suurempana jäähdytystarpeena ja puutteellisena jäähdytyskapasiteettina. Passiivista jäähdytystä tarjoavien rakenteellisten ratkaisujen ja ennakoivan jäähdytyksen ohjauksen menetelmien kehittäminen voi olla tarpeen.

Seurantadatan keräämiseen tulee kiinnittää yhä enemmän huomiota. Jos mittalaitteet asennetaan, täytyy varmistaa, että mittaus myös toteutetaan ja data tallentuu käyttökelpoiseen muotoon. Kaikille mittauksille tulee myös olla jokin ennalta määrätty käyttötarkoitus. Seurantaa tulee toteuttaa järjestelmätasolla, ei vain rakennuskohtaisesti, ja tuloksia tulee vertailla erilaisiin benchmark-arvoihin: suunnittelutavoitteisiin, järjestelmän omiin historiatietoihin, digitaalisen kaksosen tuloksiin ja ulkoiseen tietokantaan kerättyihin muiden vastaavien järjestelmien tehokkuustietoihin. Tietojen hyödyntäminen vaatii analytiikan kehittämistä kahdella tasolla: 1) konetasolla, jossa automaattisesti lasketaan kerätystä datasta kaikki avainindikaattorit eri aikaväleillä ja tunnistetaan poikkeamia järjestelmän toiminnassa sekä 2) ihmistasolla, jossa automatiikan tulee luoda ihmisille helposti ymmärrettäviä koosteita laajasta tietomäärästä sekä pitkän ajan seurantaan että välittömään ongelmanratkontaan. Visuaalinen esitys on hyvä tapa koota tietoa ihmiskäyttöön.

Kiinteistön järjestelmien monimutkaistuessakin myös tietolähteiden sekä ohjaus- ja analytiikkajärjestelmien määrä kasvaa. Tietoa kerätään esim. rakennusautomaatiosta, langattomilta antureilta, erillisiltä vesimittareilta, sähkö- ja kaukolämpöverkon toimijoilta ja kiinteistötietojärjestelmän rajapinnoista. Yksittäinen palveluntarjoaja ei voi olettaa, että kaikki järjestelmät toimisivat täysin heidän oman analytiikkansa alaisena. Siksi tarvitaan valmius integroida eri toimijoilta tuleva tieto osaksi omaa ylläpitojärjestelmää. Standardoidut datan esitystavat ja rajapinnat ovat tarpeen kitkattoman integroinnin toteutumiseksi.

Rakennusautomaation dataa hyödynnetään kasvavissa määrin, mutta pääosin ihmisten ohjelmoimien IF-THEN-algoritmien avulla. Varsinaisen tekoälyn hyödyntäminen on vielä alkuvaiheessa. Mahdollisia käyttökohteita tekoälylle ovat ainakin automaattinen analytiikka ja viantunnistus, vanhojen järjestelmien mittauspisteiden tunnistaminen analytiikkajärjestelmää ohjelmoitaessa, eri tietolähteiden datan yhdistäminen, rakennuksen kulutusennusteiden tekeminen sekä järjestelmien kustannusoptimaalinen operointi ja ohjaus energian spot-hinnat ja kulutusjousto huomioiden.

Rakennusautomaation käyttäjäkokemusta voisi parantaa yhtenäistämällä järjestelmänäkymiä. Nyt samanlaisetkin järjestelmät saattavat näyttää hyvin erilaisilta rakennusautomaation visualisoinnin tekijästä riippuen, mikä aiheuttaa hämmennystä käyttöhenkilökunnalle.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tulokset esittelevät selkeästi hybridienergiajärjestelmien suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon kannalta keskeiset riskitekijät ja energiatehokkuuden varmistamisen keinot. Seuraavassa on esitetty tutkimuksen tärkeimmät havainnot ja suositukset:

✓ **Energiankulutuksen arviointi ja optimointi**

Hybridienergiajärjestelmissä energiankulutuksen arviointi ja optimointi ovat kriittisiä järjestelmien onnistuneen toiminnan kannalta. Tutkimuksessa korostettiin, että energiantarpeen realistinen arviointi eri vuodenaikoina ja käyttötilanteissa on ratkaisevaa.

Suositukset:

- **Tarkka energiantarpeen arviointi:** On tärkeää määrittää rakennuksen energiankulutus mahdollisimman tarkasti. Tämä edellyttää ilmavirtojen mittaamista ja järjestelmien käyttöaikataulujen varmistamista.
- **Huippukuormien realistinen arviointi:** Vuodenaikojen ja huipputehotarpeiden huomioiminen auttaa välttämään yli- tai alimitoitusta, mikä voi johtaa joko turhaan energiankulutukseen tai riittämättömään lämmöntuotantoon.

✓ **Energian tuotannon tehokkuus**

Lämmityksen ja jäähdytyksen tuottamiseen käytettävien energianlähteiden valinta ja optimointi ovat keskeisiä hybridienergiajärjestelmien riskienhallinnassa. Tutkimuksessa korostettiin maalämmön ja hukkalämmön hyödyntämisen tärkeyttä.

Suositukset:

- **Lämmönlähteiden määrittäminen:** Kaikkien mahdollisten lämmönlähteiden hyödyntäminen, mukaan lukien maalämpö ja hukkalämpö, parantaa järjestelmien energiatehokkuutta.
- **Järjestelmien integrointi:** Eri energiajärjestelmien (lämmitys, jäähdytys, ilmanvaihto) tulisi toimia yhtenä kokonaisuutena ristiriitojen välttämiseksi ja energiatehokkuuden maksimoimiseksi.

✓ **Suunnittelun ja mitoituksen tärkeys**

Hybridiratkaisujen pitkäikäisyys ja tehokkuus riippuvat järjestelmien oikeasta mitoituksesta ja suunnittelusta. Liian suuret tai liian pienet järjestelmät voivat johtaa sekä taloudellisiin että toiminnallisiin ongelmiin.

Suositukset:

- **Pääjärjestelmän mitoitus:** Pääjärjestelmä tulee mitoittaa siten, että se voi toimia tasaisesti ilman tarpeettomia käynnistys- ja sammutussyklejä, mikä vähentää kulumista ja energiankulutusta.
- **Varajärjestelmän mitoitus:** Varajärjestelmän tulee pystyä kattamaan huippukulutuksen aikaiset tarpeet ja tarjota tehoa silloin, kun pääjärjestelmä on poissa käytöstä.

Avoimet kysymykset: Tarvitaan lisää tutkimusta siitä, kuinka erilaiset energianlähteet, kuten maa- ja hukkalämpö, voidaan integroida hybridijärjestelmiin mahdollisimman tehokkaasti. On myös tärkeää ymmärtää, miten nämä ratkaisut voidaan sovittaa erilaisiin rakennustyyppeihin ja ilmasto-olosuhteisiin.

✓ **Rakennusautomaation merkitys**

Rakennusautomaatiojärjestelmän suunnittelu ja toteutus ovat avainasemassa hybridienergiajärjestelmän hallinnassa. Automaatiojärjestelmät mahdollistavat eri järjestelmien saumattoman toiminnan ja energiatehokkuuden jatkuvan seurannan.

Suositukset:

- **Seurantajärjestelmien asennus:** On tärkeää asentaa luotettavia antureita, jotka mittaavat keskeisiä sisäolosuhteita ja energiavirtoja, jotta järjestelmien toimintaa voidaan valvoa ja optimoida.
- **Järjestelmän kalibrointi:** Anturit tulee kalibroida säännöllisesti, ja dynaamista toimintadataa tulee varastoida vähintään viiden vuoden ajalta, jotta sitä voidaan käyttää vertailutietona virheiden tunnistamisessa ja energiatehokkuuden optimoinnissa.

Avoimet kysymykset: Anturien mittaustarkkuuden parantaminen ja niiden säännöllisen kalibroinnin merkitys energiatehokkuuden varmistamisessa vaativat lisähuomiota. Lisäksi uusien teknologioiden, kuten tekoälyn ja koneoppimisen, potentiaali rakennusautomaatiojärjestelmien toiminnan optimoinnissa ja energiatehokkuuden parantamisessa edellyttää syvällisempää tutkimusta ja kehitystyötä.

✓ **Järjestelmien käytön ja huollon optimointi**

Hybridienergiajärjestelmien toiminnan varmistaminen edellyttää jatkuvaa seurantaa ja huoltoa. Tutkimuksessa havaittiin, että huoltohenkilöstön koulutus ja järjestelmien säännöllinen tarkastus ovat olennaisia, jotta järjestelmät toimivat suunnitellusti ja energiatehokkaasti.

Suositukset:

- **Järjestelmien kytkeminen automaatiojärjestelmään:** Kaikki järjestelmät tulee kytkeä samaan rakennusautomaatioon ja ohjata etähallinnan kautta, mikä vähentää manuaalisten ohjausten tarvetta ja minimoi inhimillisten virheiden riskiä.
- **Ylläpitohenkilöstön koulutus:** Ylläpitohenkilöstön tulee olla riittävän koulutettu hybridijärjestelmien ylläpitoon ja vianetsintään, jotta mahdolliset ongelmat voidaan ratkaista nopeasti ja tehokkaasti.

Avoimet kysymykset: Tarvitaan lisää tietoa siitä, millaisia koulutustarpeita huoltohenkilöstöllä on erityisesti monimutkaisten hybridijärjestelmien parissa. Datapohjaisen ylläpitoautomaation kehittäminen vaatii lisää selvitystä.

✓ **Dynaaminen energian hinnoittelu ja ongelmiin varautuminen**

Käyttämällä kulloinkin edullisinta energiamuotoa voidaan merkittävästi vähentää järjestelmien operatiivisia kustannuksia. Lisäksi varautuminen mahdollisiin ongelmatilanteisiin, kuten lämmönlähteen menetykseen tai energiantarpeen muutoksiin, on kriittistä.

Suositukset:

- **Dynaamisen energian hinnoittelun hyödyntäminen:** Järjestelmää tulee käyttää siten, että hyödynnetään kulloinkin edullisinta energiamuotoa, mikä vähentää operatiivisia kustannuksia.
- **Ongelmiin varautuminen:** On tärkeää kehittää toimintasuunnitelmia mahdollisten ongelmatilanteiden varalle ja varata tilaa järjestelmälaajennuksille, jos energiantarpeet muuttuvat.

Avoimet kysymykset: Vaikka dynaaminen energian hinnoittelu tarjoaa merkittäviä etuja kustannusten hallinnassa, tarvitaan lisäselvityksiä siitä, kuinka tämä hinnoittelumalli voidaan integroida tehokkaasti rakennusautomaatiojärjestelmiin ja kuinka se vaikuttaa kokonaiskustannuksiin pitkällä aikavälillä.

✓ **Järjestelmien jatkuva seuranta ja toimintatarkastus**

Järjestelmien jatkuva seuranta ja säännöllinen auditointi varmistavat niiden pitkän aikavälin toimivuuden ja energiatehokkuuden. Kuukausittaiset KPI-tarkastukset auttavat havaitsemaan ja korjaamaan mahdollisia puutteita ajoissa.

Suositukset:

- **Jatkuva seuranta:** Järjestelmien toimintaa tulee seurata jatkuvasti, ja säännöllisiä auditointeja (esim. kuukausittain) tulee tehdä järjestelmän suorituskyvyn varmistamiseksi.
- **Tietojen vertailu:** Suorituskykyä tulee verrata suunnitteluvaiheen tavoitearvoihin, digitaalisen kakso-
sosen arvioon ja samanlaisten järjestelmien tuloksiin muissa rakennuksissa.

Avoimet kysymykset: On vielä avoinna, kuinka kerättyä dynaamista dataa voidaan parhaiten hyödyntää järjestelmien optimoinnissa ja virheiden tunnistamisessa. Erityisesti tekoälypohjaiset analyysimenetelmät vaativat lisätutkimuksia, jotta niiden täysi potentiaali voidaan hyödyntää hybridijärjestelmien hallinnassa. Tarvitaan lisätietoa siitä, kuinka hyvin nykyiset riskienhallintamallit kattavat mahdolliset tulevaisuuden skenaariot, kuten äärimmäiset ilmasto-olosuhteet tai energiamarkkinoiden suuret muutokset. Lisäksi olisi hyödyllistä kehittää skenaarioanalyysiä, jolla voidaan testata hybridijärjestelmien luotettavuutta erilaisissa poikkeustilanteissa.

Tutkimuksen tulokset korostavat hybridienergiajärjestelmien suunnittelun, toteutuksen ja ylläpidon tärkeyttä riskienhallinnan ja energiatehokkuuden näkökulmasta. Oikein toteutettu riskienhallinta ja säännöllinen ylläpito varmistavat järjestelmien pitkäikäisyyden ja tehokkuuden, mikä vähentää toimintahäiriöiden riskiä ja parantaa energiatehokkuutta. Järjestelmien jatkuva seuranta ja dynaaminen optimointi ovat keskeisiä elementtejä tämän tavoitteen saavuttamisessa.

LÄHDELUETTELO

Ahmed, N., Assadi, M., Ahmed, A. A., & Banihabib, R. (2023). Optimal design, operational controls, and data-driven machine learning in sustainable borehole heat exchanger coupled heat pumps: Key implementation challenges and advancement opportunities. *Energy for Sustainable Development*, 74, 231–257. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.04.004>

Bask, W. (2019). Confirming the functionality of variable air volume ventilation systems with field studies. <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/39082>

Casini, M. (2022). Extended Reality for Smart Building Operation and Maintenance: A Review. *Energies*, 15(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/en15103785>

HybE Report RS1. (2023). Exploring and overcoming challenges of project design and delivery in constructing and renovating energy efficient buildings. Carbon Neutral Energy Solutions and Heat Pump Technology (HybE), Tampere, Suomi.

Jääskeläinen, J., et al. (2019). Development of Energy Security in Finland and in the Baltic States since 1991. *Energy Policy*, 133, 110891. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110891>

Kantola, M., & Saari, A. (2016). Identifying and managing risks involved in the transition to the EU nZEB decree. *Facilities*, 34(7/8), 405–419. <https://doi.org/10.1108/F-03-2014-0032>

Kuurola, P., Raunima, T., Ketko, J., Toyinbo, O., Vinha, J., & Haverinen-Shaughnessy, U. (2023). Reduced night ventilation did not impair indoor air quality for occupants in a sample of Finnish school and daycare buildings. *Energy and Buildings*, 297, 113470. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113470>

Li, G., Hu, Y., Liu, J., Fang, X., & Kang, J. (2021). Review on Fault Detection and Diagnosis Feature Engineering in Building Heating, Ventilation, Air Conditioning and Refrigeration Systems. *Ieee Access*, 9, 2153–2187. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3040980>

Lin, G., Kramer, H., & Granderson, J. (2020). Building fault detection and diagnostics: Achieved savings, and methods to evaluate algorithm performance. *Building and Environment*, 168, 106505. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106505>

Melgaard, M., et al. (2020). Fault detection and diagnosis of large-scale HVAC systems in buildings. *Building and Environment*, 171, 106674. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106674>

Miller, C., Arjunan, P., Kathirgamanathan, A., Fu, C., Roth, J., Park, J. Y., Balbach, C., Gowri, K., Nagy, Z., Fontanini, A.D., Haberl, J. (2020). The ASHRAE great energy predictor III competition: Overview and results. *Science and Technology for the Built Environment*, 26(10), 1427–1447. <https://doi.org/10.1080/23744731.2020.1795514>

Mosaad, M., et al. (2018). Risks affecting the delivery of HVAC systems: Identifying and analysis. *Journal of Building Engineering*, 18, 331–338. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2017.12.004>

Paiho, S., & Reda, F. (2016). Towards next generation district heating in Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 915–924. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.049>

- Paiho, S., & Saastamoinen, H. (2018). How to develop district heating in Finland?. *Energy Policy*, 122, 668-676. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.025>
- Ruokamo, E. (2016). Household preferences of hybrid home heating systems: A choice experiment application. *Energy Policy*, 97, 128-138. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.042>
- Torabi, N., Gunay, H. B., & O'Brien, W. (2021). A review of common human errors in design, installation, and operation of multiple-zone VAV AHU systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2042(1), 012130. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012130>
- Wahlroos, M., et al. (2018). Future views on waste heat utilization: Case of data centers in Northern Europe. *Energy*, 157, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.104>
- Vainio, T., et al. (2021). HVAC's Role in the Decarbonisation of the Existing Building Stock - case of Finland. *E3S Web of Conferences*, 246, 13005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202124613005>
- Volkova, A., Krupenski, I., Pieper, H., Ledvanov, A., Latõšov, E., & Siirde, A. (2019). Small low-temperature district heating network development prospects. *Energy*, 178, 714-722. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.083>
- Vähäaho, I. (2021). Could ground heat and geothermal energy be the answer to climate change prevention and energy demand? *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 703(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/703/1/012037>
- Xu, Y., Yan, C., Shi, J., Lu, Z., Niu, X., Jiang, Y., & Zhu, F. (2021). An anomaly detection and dynamic energy performance evaluation method for HVAC systems based on data mining. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44, 101092. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101092>
- Yritys A. (2018). Energiakatselmusraportit (luottamukselliset).