

Opinnäytetyö (YAMK)

Rakentaminen

2021

Henri Heinonen

ILMANVAIHDON ENERGIATEHOKKUUS SAIRAALOISSA

– Case: Yliopistollinen sairaala

Henri Heinonen

ILMANVAIHDON ENERGIATEHOKKUUS SAIRAALOISSA

- Case: Yliopistollinen sairaala

Suomessa on julkisia ja yksityisiä sairaaloita yhteensä yli sata. Ne ovat isoja rakennuksia ja niiden energiankulutus on siten merkittävää. Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin sairaaloiden energiansäästöpotentiaalia ilmanvaihdon näkökulmasta. Sairaalat ovat haastavia rakennuksia ilmanvaihdollisesti, koska niissä vaaditaan erityisen tarkkoja sisäilmaston olosuhteita potilasturvallisuuden takaamiseksi. Osittain tästä syystä johtuen sairaaloiden ilmanvaihdon energiatehokkuuteen ei ole kiinnitetty huomiota samalla tavalla kuin monissa muissa rakennustyypeissä.

Opinnäytetyössä käydään läpi tyypilliset ilmanvaihdon ratkaisut sairaaloissa. Tutkimusosiossa laadittiin sairaaloiden talotekniikkaan liittyvä tutkimuskysely, joka osoitettiin eri sairaanhoitopiirien kiinteistöpäälliköille ja ilmanvaihdon asiantuntijoille. Tutkimuskohteena olleen yliopistollisen sairaalan potilashuoneiden ilmanvaihdon tasoa tutkittiin olosuhdemittauksilla kahden kuukauden ajan. Opinnäytetyö tehtiin osana dECONhealth -tutkimushanketta, jossa tarkastellaan tarpeenmukaisen ilmanvaihdon potentiaalia sairaalaympäristössä. Hankkeen toteuttajana toimii Turun AMK yhteistyössä saksalaisen RWTH Aachenin yliopiston kanssa.

Tutkimuskyselyn perusteella selvisi, että sairaanhoitopiireissä seurataan yleisesti energiankulutusta lämmityksen ja sähkön osalta tiiviisti, mutta tarkempaa seurantaa eri osa-alueista (esim. valaistus tai tuloilman lämmitys) ei juurikaan tehdä. Suurin energiansäästöpotentiaali nähtiin lämmitys-, jäähdytys- ja ilmanvaihtojärjestelmissä. Rakennusautomaation kehittyessä lämmityksen ja ilmanvaihdon säätömahdollisuudet monipuolistuvat osana tulevaisuuden sairaalaa.

Tutkimuskohteena ollut sairaalarakennus on peruskorjattu vuonna 2015, jolloin sairaalan energiatehokkuutta parannettiin huomattavasti. Tässä opinnäytetyössä sisäilman olosuhteita tutkittiin kenttämittauksilla kuudessa potilashuoneessa. Tulosten perusteella potilashuoneiden käyttöaste oli 79 %. Huoneet olivat tyhjillään 21 % ajasta, jolloin ilmanvaihto toimi kuitenkin samoilla ilmavirroilla kuin käytössä ollessaan. Tämä tutkimustulos osoittaa sen, että kohteen potilashuoneissa on potentiaalia ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantamiselle.

ASIASANAT:

Energiatehokkuus, ilmanvaihto, potilashuone, sairaala, sisäilma, tarpeenmukainen ilmanvaihto

MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Master's Degree Programme in Construction

July 2021 | 61 pages, 23 pages in appendices

Henri Heinonen

ENERGY EFFICIENT VENTILATION IN HOSPITALS

- Case: University hospital

There are totally over one hundred public and private hospitals in Finland. They are large buildings there fore their energy consumption is significant. The present Master's thesis focuses on potential energy savings in the ventilation system of a hospital. Hospitals are challenging buildings from the viewpoint of ventilation due to special requirements on indoor climate conditions to secure patient safety. This is one reason, why ventilation systems are not designed as energy efficient as in many other building types.

This study describes the typical ventilation solutions in a hospital. In this study, also a survey on building maintenance technology in hospitals was carried out among property managers and ventilation experts working for different hospital districts. In the University hospital, the level of air conditions in patient rooms was investigated with two month monitoring. The study was conducted as part of a research project called dECONhealth (demand-controlled ventilation in hospital settings) carried out by Turku University of Applied Sciences in collaboration with RWTH Aachen University, Germany.

The results of the survey show that typically different hospital districts follow the consumption of heating and electricity relatively intensively, but more accurate observation (e.g. lighting or air heating) is not performed. The highest energy savings potential was seen in heating, cooling and ventilation systems. The development of building automation will have an effect on diverse heating and ventilation control systems in a future hospital.

The case study building was renovated in 2015, when also energy efficiency was improved significantly. In this study, indoor air conditions were monitored in six patient rooms. Based on the results, the occupancy rate was 79 per cent in the patient rooms. The rooms were empty 21 per cent of the time, but the ventilation systems were still running on the same flow rates as when occupied. This research result shows that there is potential to increase the energy efficiency of the ventilation system in patient rooms.

KEYWORDS:

Energy efficiency, Ventilation, Patient room, Hospital, Indoor air, Demand controlled ventilation

SISÄLTÖ

SANASTO	6
1 JOHDANTO	7
2 OPINNÄYTETYÖN TAVOITE	10
3 SAIRAALAN SISÄILMASTO JA ILMAVIRTOJEN MITOITUS	11
3.1 Sisäilmasto-olosuhteet sairaaloissa	12
3.2 Potilashuoneiden ilmanvaihto	13
3.3 Vastaanottohuoneiden ilmanvaihto	15
3.4 Toimenpidehuoneiden ilmanvaihto	15
3.5 Käytävien ja odotustilojen ilmanvaihto	15
3.6 Varastojen ilmanvaihto	16
4 SAIRAALOIDEN ILMANVAIHTOJÄRJESTELMIEN ENERGIATEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	17
4.1 Ilmajärjestelmät	17
4.2 Ilmansuodatus	19
4.3 Ilmanvaihtopuhaltimet	20
4.4 Lämmöntalteenottojärjestelmät	28
5 ENERGIATEHOKKAAN ILMANVAIHDON HAASTEET SAIRAALOISSA	33
5.1 Tiukat hygieniavaatimukset	33
5.1.1 Sekoittavan ilmanjakojärjestelmän energiatehokkuus	33
5.2 Erialaisten tilatyyppeiden suuri määrä ja niiden epäsäännölliset käyttöajat	35
6 KYSELY SAIRAALOIDEN TALOTEKNIIKASTA, ILMANVAIHDOSTA JA ENERGIATEHOKKUUDESTA	37
6.1 Tutkimuskyselyn laatiminen	37
6.2 Osallistujat	37
6.3 Kysymykset ja tulokset	37
6.3.1 Energiankulutus	38
6.3.2 LVI-tekniikka	38
6.3.3 Ilmanvaihto ja energiatehokkuus	39
6.3.4 Jäähdytys	40

6.3.5 Tulevaisuus	41
6.4 Johtopäätökset	42
7 CASE: YLIOPISTOLLINEN SAIRAALA	44
7.1 Kohde	44
7.2 Merkittävimmät tilatyypit	45
7.2.1 Merkittävimpien tilatyypin ilmamäärät	46
7.3 Potilashuoneiden ilmanvaihdon energiatehokkuuteen vaikuttavat asiat	48
7.4 Potilashuoneiden olosuhdemittaukset	49
7.4.1 Tulokset	51
7.5 Potilashuoneiden ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen	52
8 POHDINTA	54
9 YHTEENVETO	56
LÄHTEET	58

LIITTEET

Liite 1. Tutkimuskyselyn kysymykset.

Liite 2. Kuuden potilashuoneen olosuhdemittaustulokset, kevät 2021.

SANASTO

ACH	Air Changes per Hour (h^{-1}), ilmanvaihtokerroin
ASHRAE	The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, LVI-yhdistys USA:ssa
CAV-järjestelmä	Constant Air Volume System, vakioilmavirtajärjestelmä
EC-puhallinmoottori	Electronically Commutated, elektronisesti kommutoitu -puhallinmoottori
E-luku	Rakennuksen laskennallinen energiatehokkuuden vertailuluku, yksikkö $kWh/(m^2a)$
HEPA-suodatin	High Efficiency Particulate Air Filter, korkean suodatustason suodatin
IE-luokitus	International Efficiency, standardimoottoreiden hyötysuhde-luokitus
IMS	Ilmamääräsäädin
IV	Ilmanvaihto
LTO	Lämmöntalteenotto
Oleskeluvyöhyke	Osa huonetilasta; alapinta rajoittuu lattiaan, yläpinta 1,8 m korkeuteen lattiasta ja sivupinnat 0,6 m etäisyydelle ulko- tai sisäseinästä
Operatiivinen lämpötila	Kuvaa sisäilman lämpötilasta poikkeavien pintalämpötilojen vaikutusta ihmisen lämmöntunteeseen. Käytetään usein huonelämpötilana, kun huoneessa on paljon laajoja pintoja.
REHVA	Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, eurooppalaisten LVI-järjestöjen liitto
%RH	Relative Humidity, suhteellinen kosteus – ilmassa olevan vesihöyryn määrä prosentteina suhteessa siihen, mitä enimmillään voi olla
SFP-luku	Specific Fan Power, ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho, yksikkö $kW/(m^3/s)$
TVOC	Total Volatile Organic Compounds, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus
VAV-järjestelmä	Variable Air Volume System, muuttuvailmavirtajärjestelmä

1 JOHDANTO

Sairaaloiden ilmanvaihdon energiatehokkuus

Rakennusten energiatehokkuutta on parannettu 2000-luvulla merkittävästi. Ilmanvaihdon osalta tämä on tarkoittanut sitä, että ilmanvaihtopuhaltimet modernisoidaan energiatehokkaammiksi, poistoilmasta otetaan lämpö talteen lämmöntalteenottojärjestelmällä ja ilmanvaihto on toteutettu tarpeenmukaisesti niin, että raitista ilmaa tulee kohdetilaan eri ajankohdan tarve huomioiden sopiva määrä.

Sairaalat ovat vaativia rakennuksia ilmanvaihdollisesti, koska niissä tehdään tarkkoja toimenpiteitä (esimerkiksi leikkaussalit) ja toisinaan erilaisten bakteerien ja virusten leviäminen ilmaitse on minimoitava, jolloin tiettyjen tilojen painetasapainon on oltava kunnossa ja ilmamäärien suuria. Osittain näistä syistä johtuen sairaaloiden ilmanvaihdon energiatehokkuuteen ei ole kiinnitetty huomioita samalla tavalla kuin monissa muissa rakennustyypeissä 2000-luvulla. Osittain syynä on ollut myös se, että erityisiä vaatimuksia sairaaloiden energiatehokkuudelle ei ole aikaisemmin ollut. Nykyisin uuden sairaalarakennuksen E-luvun vaatimustasona on 320 kWh/m² a (YMa 1010/2017).

Amerikkalaisen LVI-yhdistyksen ASHRAE:n standardin mukaan esimerkiksi sairaaloiden potilashuoneissa ilmanvaihtokertoimen tulee olla vähintään 4 1/h eli ilman tulee vaihtua 4 kertaa tunnissa ko. huoneissa (ANSI/ASHRAE/ASHE 2017). Vertailun vuoksi asuinrakennuksille soveltuva Suomessa käytetty ilmanvaihtokerroin on 0,5 1/h (Sisäilmayhdistys 2020). Tästä voidaan päätellä, että ilmanvaihtojärjestelmien energiankulutuksella on erityisen suuri vaikutus sairaaloiden kokonaisenergiankulutukseen. Sillanpään opinnäytetyön esimerkkikohteessa ilmanvaihdon osuus koko sairaalan lämmitysenergian kulutuksesta oli 54 % ja ilmanvaihtokoneiden osuus koko sähköenergian kulutuksesta 15 % (Sillanpää 2012).

Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton osalta sairaaloissa hyödynnetään pääsääntöisesti nestekiertoista lämmöntalteenottojärjestelmää, jolla vältetään likaisen poistoilman sekoittuminen tuloilmaan. Täten mahdolliset ilmapälitteiset taudit eivät pääse leviämään ilmanvaihtojärjestelmän kautta. Nestekiertoisen lämmöntalteenottojärjestelmän hyötysuhde on keskimäärin 40–60 % eli poistoilmasta saadaan lämpöä talteen 40–60 %. Tämä on olemassa olevista ilmanvaihdon lämmöntalteenottoratkaisuista heikoin

hyötysuhteeltaan. Toki kehitystyö on tuonut markkinoille uusia nestekiertoisia LTO-järjestelmiä, joissa hyötysuhteen luvataan olevan jopa 80 % (Fläkt 2018b).

Edellä mainitut asiat tuovat vahvasti esiin sen, että tarkka hygienia ja potilasturvallisuus ovat tärkeimmät asiat suunniteltaessa ilmanvaihtojärjestelmiä sairaaloihin. Suuret huonekohtaiset ilmamäärät, ilmansuodatus ja nestekiertoinen lämmöntalteenotto takaavat hyvän sisäilman laadun. Mikäli ilmanvaihtojärjestelmien puhaltimet ovat moderneja ja energiatehokkaita, tällöin sairaaloiden ilmanvaihdon energiatehokkuutta voidaan parantaa nykytekniikalla lähinnä tarpeenmukaistamalla ilmanvaihtoa kuhunkin tilaan soveltuvalla tavalla. Tässä rakennusautomaatiolla on erittäin tärkeä rooli.

Rakennusten energiansäästöpotentiaali

Energiankäyttöä voidaan tehostaa kaikilla eri yhteiskunnan aloilla. EU:n tavoitteena on, että energiatehokkuus EU:n alueella paranee 27 % vuodesta 2007 vuoteen 2030 mennessä (2018/2002/EU). Yksi keino on rakennusten energiatehokkuuden parantaminen. Keinovalikoimasta löytyvät myös muun muassa energiantuotannon ja -jakelun tehostaminen ja liikenteen energiankulutuksen vähentäminen kuluttajien roolia unohtamatta. (Ilmasto-opas 2018)

Suomi tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2035 mennessä. Ympäristöministeriö on julkaissut tämän tavoitteen toteutumisen seuraamiseksi rakennusalalle ”Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä” -oppaan, jossa on määritelty rakennuksen elinkaaren eri vaiheet ja menetelmät niiden hiilijalanjäljen/-kädenjäljen mittaamiseksi. Vaiheet ovat tuotevaihe, rakentaminen, käyttövaihe ja elinkaaren loppu. Nämä neljä vaihetta sisältävät yhteensä 16 osakokonaisuutta, joista eniten energiaa kuluu käyttövaiheessa. (Ympäristöministeriö 2019)

Rakentamisen ja rakennusten energiankäytön osuus vastaa noin 40 % Suomen kokonaisenergiankulutuksesta. Tämän vuoksi myös energiansäästöpotentiaali on verrattain suuri. Kasvihuonekaasupäästöistä rakennukset aiheuttavat noin 30 %. Rakennusten käytönaikainen energiankulutus koostuu lämmityksestä ja mahdollisesta jäähdytyksestä sekä rakennuksen sähkölaitteiden ja valaistuksen energiankäytöstä. Erityisesti olemassa olevan rakennuskannan energiankäytön vähentämisellä on keskeinen rooli. Energiatehokkuustoimenpiteillä rakennuksen energiankulutusta voidaan vähentää merkittävästi ja samalla saadaan taloudellisia säästöjä. Uudisrakentamisessa korostuu

uusien energiatehokkaiden innovaatioiden käyttö, millä voi olla merkittävä rooli myöhemmin myös korjausrakentamisessa. (Motiva 2020)

Rakennuksen energiansäästöpotentiaalia voidaan arvioida suhteellisesti vertailemalla kokonaisenergian ominaiskulutuksia (kWh/m^2) keskiarvoihin. Suomen kuntasektorilla energiansäästöpotentiaalin on laskettu olevan energiakatselmusten perusteella lämmön osalta 13,1 %, sähkön osalta 4,1 % ja veden osalta 5,2 %. Sairaaloiden energian ominaiskulutukset ovat verrattain korkeita, kun vertaa moneen muuhun rakennustyyppiin. Esimerkiksi Norjassa on tilastoitu tarkkaan eri rakennustyyppien energiankulutusta niin yksityiseltä kuin julkiselta puolelta. Tilastossa norjalaisten sairaaloiden ominaiskulutus on 279 kWh/m^2 ja se on kolmanneksi suurin liikerakennusten, ominaiskulutus 429 kWh/m^2 , ja teollisuuslaitosten, ominaiskulutus 368 kWh/m^2 , jälkeen. (Pelkkikangas 2012) Vertailun vuoksi esimerkiksi Suomessa vuoden 2005 jälkeen rakennettujen asuin-kerrostalojen ominaiskulutus on 140 kWh/asm^2 . (Mourujärvi 2017)

2 OPINNÄYTETYÖN TAVOITE

Tässä opinnäytetyössä pyritään löytämään vastauksia siihen, mitkä tekijät vaikuttavat ilmanvaihdon energiatehokkuuteen sairaaloissa. Suomessa sijaitsevien sairaaloiden energiatehokkuuden tasoa LVI-teknisessä mielessä selvitetään laatimalla tutkimuskysely eri sairaanhoitopiirien kiinteistöistä vastaaville asiantuntijoille.

Case-kohteeksi valikoitui suuri yliopistollinen sairaala. Tässä opinnäytetyössä selvitetään ko. sairaalarakennuksen merkittävimmät tilatyypit energiansäästöpotentiaalin näkökulmasta ja tutkitaan potilashuoneiden lämpötilaohjattavien IMS-peltien toimintaa ja niillä saavutettavaa energiansäästöpotentiaalia.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset:

1. Mitkä tekijät vaikuttavat ilmanvaihdon energiatehokkuuteen sairaaloissa?
2. Miten case-kohteen potilashuoneiden ilmanvaihdon energiatehokkuutta voitaisiin parantaa nykyisiä järjestelmiä hyödyntäen/tehostamalla?

3 SAIRAALAN SISÄILMASTO JA ILMAVIRTOJEN MITOITUS

Sairaaloissa on kymmeniä erilaisia tiloja, joissa vaaditaan erityisen hyvää sisäilman laatua. Sisäilman laatua voidaan mitata esimerkiksi lämpötilaa ja hiilidioksidipitoisuutta mitaamalla. Suurilla ilmamäärillä saadaan varmistettua turvallinen sisäympäristö sairaalan henkilökunnalle ja potilaille. Ilmanvaihdon avulla rakenteista ja ihmisistä lähtevät epäpuhtaudet saadaan poistettua tehokkaasti. Ilmanvaihdon tarvetta lisäävät myös esimerkiksi sairaaloissa käytetyt erilaiset anestesiakaasut ja desinfiointiaineet. (Ryynänen 2007) Suurien ilmamäärien ja tarkkojen olosuhdevaatimuksien myötä tarvitaan isot ilmanvaihtokoneet ja siksi ilmanvaihtojärjestelmien osuus kokonaisenergiankulutuksesta onkin merkittävä.

Sairaalan ilmanvaihtojärjestelmien mitoitukselle ei ole olemassa suomalaista standardia. Ulkomaisia standardeja ovat esimerkiksi Saksan DIN 1946-4, Iso-Britannian HTM 03-01 ja USA:n ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017. Suomessa sairaaloiden ilmanvaihdon suunnittelun lähtökohtana käytetään suunnittelijoiden ja asiantuntijoiden vankkaa kokemuspohjaa sekä yleisiä ohjeistuksia ilmapvirtamitoituksiin sairaaloille. Lisäksi ulkomaisia standardeja käytetään suunnittelun tukena. (Ignatius 2019)

Suomessa viimeisimpänä ohjeistuksena sairaaloiden ilmanvaihdon mitoitukselle käytetään vuonna 2017 valmistunutta FINVAC:in teosta: ”Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa”. Oppaasta löytyy sairaaloiden eri tilojen ilmanvaihdon ilmapvirtojen suositeltuja ohjearvoja. Ohjearvot perustuvat suunniteltuun maksimihenkilömäärään tai pinta-alaan. (FINVAC 2019)

FINVAC ry on laatinut kyseisen oppaan Ympäristöministeriön käynnistämän hankkeen lopputuloksena. Opas korvasi Suomen rakentamismääräyskokoelman D2 (2012) liitteen 1 mukaiset määräykset ilmanvaihdon mitoitukselle. FINVAC:in oppaan laatimista varten hankkeeseen muodostettiin projektiryhmä. Rakentamismääräyskokoelmaa D2 käytiin läpi kokemusperusteisesti ja sitä kautta etsittiin puutteita ja muutostarpeita oppaan laatimista varten. Oppaassa on huomioitu uusimmat tulokset EU:n hankkeista koskien ilmanvaihtojärjestelmiä. (FINVAC 2019)

3.1 Sisäilmasto-olosuhteet sairaaloissa

Rakentamisen yksi päätavoitteista on hyvä sisäilmasto. Tässä opinnäytetyössä käsitellään sisäilman laatuun vaikuttavien lämpötilan, hiilidioksidin, suhteellisen kosteuden ja TVOC:n pitoisuuksien suositeltuja arvoja. Sairaalaympäristölle ei ole olemassa erikseen sovellettavaa ohjeistusta sisäilman laadulle.

Rakennustietosäätiön valmistamassa ohjekortissa ”Sisäilmastoluokitus 2018” on annettu sisäilmaston tavoite- ja suunniteluarvoja rakennus- ja taloteknisen suunnittelun ja urakoinnin avuksi. Luokitusta on päivitetty edellisestä 2008 vuoden versiosta käyttäjäkokemusten ja uusimman tutkimustiedon perusteella. (Rakennustieto 2018)

Sisäilmastoluokitus on jaettu kolmeen eri laatuluokkaan, jotka ovat S1, S2 ja S3. Uudisrakennuskohteessa tavoiteltu sisäilmastoluokitus määritetään keskeisten tilatyypin osalta hankesuunnitteluvaiheessa. Laatuluokan S1 mukaan tavoitteena on yksilöllinen sisäilmasto, jossa sisäilman laatu on erittäin hyvä. Laatuluokassa S2 pyritään hyvään sisäilmastoon ja laatuluokassa S3 tyydyttävään sisäilmastoon, joka täyttää vähimmäisvaatimukset. (Rakennustieto 2018)

S1-luokan mukaisesti operatiivisen lämpötilan tavoitearvo oleskeluvyöhykkeellä on 20,5...22,5 °C ulkolämpötilan ollessa alle 0 °C. Ulkolämpötilan ollessa yli 20 °C, operatiivisen lämpötilan tavoitearvo on 22...25 °C. Ulkolämpötilan ollessa 0...20 °C, operatiivisen lämpötilan vaihteluvälin poikkeama alaspäin lasketaan kaavalla $20,5\text{ °C} + 0,075 \times \text{ulkolämpötila}$ ja ylöspäin kaavalla $22,5\text{ °C} + 0,166 \times \text{ulkolämpötila}$. Hiilidioksidipitoisuuden osalta luokituksessa on annettu hiilidioksidipitoisuuslisä, joka S1-luokassa on < 350 ppm. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on oletusarvoltaan noin 400 ppm, jolloin sisäilman hiilidioksidipitoisuuden tavoitearvo on < 750 ppm. (Rakennustieto 2018)

S2-luokan mukaisesti operatiivisen lämpötilan tavoitearvo oleskeluvyöhykkeellä on 20,5...23 °C ulkolämpötilan ollessa alle 0 °C. Ulkolämpötilan ollessa yli 20 °C, operatiivisen lämpötilan tavoitearvo 21...26 °C. Ulkolämpötilan ollessa 0...20 °C, operatiivisen lämpötilan vaihteluvälin poikkeama alaspäin lasketaan kaavalla $20,5\text{ °C} + 0,025 \times \text{ulkolämpötila}$ ja ylöspäin kaavalla $23\text{ °C} + 0,2 \times \text{ulkolämpötila}$. Hiilidioksidipitoisuuslisä S2-luokassa on < 550 ppm eli ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden ollessa 400 ppm, sisäilman hiilidioksidipitoisuuden tavoitearvo on < 950 ppm. (Rakennustieto 2018)

S3-luokan mukaisesti operatiivisen lämpötilan tavoitearvo on 20...25 °C, kun ulkolämpötila on alle 10 °C. Ulkolämpötilan ollessa yli 10 °C, operatiivinen lämpötila saa olla maksimissaan 27 °C. Hiilidioksidipitoisuuslisä S3-luokassa on < 800 ppm eli ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden ollessa 400 ppm, sisäilman hiilidioksidipitoisuuden tavoitearvo on < 1200 ppm. (Rakennustieto 2018)

Suhteellisen kosteuden (%RH) tavoitearvoksi on annettu S1-luokassa talviajalle 25...45 %. Luokissa S2 ja S3 ei ole erillisiä suhteellisen kosteuden tavoitearvoja. Sisäilman kostutukselle on perusteet, jos suhteellinen kosteus laskee alle 20 %. (Sisäilmayhdistys 2008) Suhteellisen kosteuden optimaalinen vaihteluväli riippuu siitä, että katsotaanko asiaa rakennusteknisistä vai terveydellisistä näkökulmista. Hengitettävän ilman epäpuhtaudet saattavat aiheuttaa suuremman terveyshaitan sisäilman ollessa kuiva. Optimaalinen sisäilman suhteellinen kosteus on yleisesti noin 40...60 %. (Ryynänen 2007)

TVOC-pitoisuus kertoo haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuden. VOC-yhdisteitä on tavallisesti sisäilmassa aina jonkin verran. Päästölähteinä ovat muun muassa rakennus- ja sisustusmateriaalit, tekstiilit, pesuaineet, kosmetiikkatuotteet ja käyttäjien aineenvaihdunta. Rakennusmateriaalien päästöt ovat korkeimmillaan uusissa materiaaleissa. Sisäilman VOC-yhdisteiden vaikutuksesta terveyteen ei vielä tunneta tarkkaan, mutta jotkin yksittäiset yhdisteet voivat suurina pitoisuuksina aiheuttaa terveyshaittaa. (Tamminen 2020)

Sisäilman TVOC-pitoisuudelle on annettu toimenpideraja 400 µg/m³, jonka ylittyessä mahdollinen terveyshaitta on selvitettävä ja tarvittaessa poistettava. Yksittäiselle VOC-yhdisteen pitoisuudelle on annettu toimenpiderajaksi 50 µg/m³. (Valvira 2016)

3.2 Potilashuoneiden ilmanvaihto

Potilashuoneita on olemassa yhdelle tai useammalle potilaalle, mikä luonnollisesti vaikuttaa huoneen ilmanvaihdon mitoittamiseen. Suuntauksena Suomessa on suunnitella yhden hengen potilashuoneita, joissa on parempi tietoturva ja lisäksi ne vähentävät tautien tartuntariskiä sairaaloissa. Kuvassa 1 on esitetty nykyaikainen yhden hengen potilashuone.



Kuva 1. Yhden hengen potilashuone Helsingin Uudessa lastensairaalassa (Päivän Lehti 2018).

FINVAC:in mitoitusohjeen mukaisesti potilashuoneiden ilmamäärän mitoitus tehdään joko henkilöperusteisesti tai neliöperusteisesti. Ohjeen mukaisesti näistä tulisi valita se, kumpi antaa suuremman ilmamäärän. Oppaan henkilöperusteinen potilashuoneen minimi tulo- ja poistoilmavirta on $10 \text{ dm}^3/\text{s}$, hoitopaikkaa kohden. Täten esimerkiksi kahden hengen potilashuoneelle minimi tuloilmavirta on $20 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja minimi poistoilmavirta $20 \text{ dm}^3/\text{s}$. Neliökohtaisessa ilmavirtamitoituksessa käytetään ohjearvoa $2,5 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. WC:n sisältävissä potilashuoneissa ilmavirran mitoittavana tekijänä käytetään $10 \text{ dm}^3/\text{s}$, hoitopaikkaa kohden, mutta tulo- ja poistoilmavirran tulee näissä tapauksissa olla kuitenkin vähintään $30 \text{ dm}^3/\text{s}$. (FINVAC 2019)

Sisäilmastoluokituksessa 2018 on myös annettu potilashuoneille ilmavirran mitoituksen ohjearvot S1-, S2- ja S3-luokille. S1-luokan henkilöperusteinen ilmavirran mitoitusarvo on $15 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja neliöperusteinen $3,5 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. S2-luokassa henkilöperusteinen ilmavirta on $12 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja neliöperusteinen $3,0 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. S3-luokan henkilöperusteinen ilmavirta on FINVAC:in oppaan lailla $10 \text{ dm}^3/\text{s}$ ja neliöperusteisesti $2,5 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. (Rakennustieto 2018)

3.3 Vastaanottohuoneiden ilmanvaihto

Sairaaloiden vastaanottohuoneissa otetaan potilaita nimensä mukaisesti vastaan esimerkiksi asiakkaalle tehtävää diagnoosia varten. Huoneessa on useimmiten paikalla jatkuvasti yksi lääkäri, jonka lisäksi yksi potilas ja mahdollinen saattaja.

FINVAC:in oppaassa on määritelty vastaanottohuoneelle minimi tulo- ja poistoilmavirraksi $20 \text{ dm}^3/\text{s}$. Vaihtoehtoinen neliökohtainen ilmavirtamitoitus on $2 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. Mikäli huone mitoitetaan kolmelle henkilölle, tulee tulo- ja poistoilmavirtojen olla minimissään $30 \text{ dm}^3/\text{s}$ huonetta kohden. (FINVAC 2019)

3.4 Toimenpidehuoneiden ilmanvaihto

Sairaaloiden toimenpidehuoneissa hoidetaan ja tutkitaan potilaita. Huoneissa on useimmiten kahdesta kolmeen hoitohenkilöä potilaan lisäksi.

FINVAC:in oppaassa on määritelty toimenpidehuoneen minimi tulo- ja poistoilmavirraksi $25 \text{ dm}^3/\text{s}$ huonetta kohden. Vaihtoehtoisesti neliökohtaisena mitoituksena on $2 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. Neljälle hengelle mitoitettaessa tulo- ja poistoilmavirtojen minimi on $40 \text{ dm}^3/\text{s}$ huonetta kohden. (FINVAC 2019)

3.5 Käytävien ja odotustilojen ilmanvaihto

Sairaaloiden käytävät toimivat monessa tapauksessa samalla myös potilaiden odotustiloina. Käytävät ja odotustilat muodostavat merkittävän osan sairaaloiden kokonaispinta-alasta. Case-kohteessa ne kattavat noin neljänneksen koko sairaalan pinta-alasta ollen ko. sairaalan suurin tilatyyppe. Kuvassa 2 on esimerkki odotustilasta Meilahden Tornisairaalassa.



Kuva 2. Odotustila Meilahden Tornisairaalassa (Isku 2020).

FINVAC:in oppaassa sairaaloiden käytäville ja odotustiloille on olemassa erikseen ilmarvirran mitoituksen ohjeavot. Käytävissä neliökohtaiseksi minimi tulo- ja poistoilmaviraksi on määritetty $1 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. Odotustiloille vastaava mitoitus on kolminkertainen eli $3 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$ johtuen suuremmasta paikallaan olevasta ihmismäärästä. Odotustiloille on annettu lisäksi vaihtoehtoisesti käytettävä paikkakohtainen mitoitusarvo $6 \text{ dm}^3/\text{s}$. (FINVAC 2019)

3.6 Varastojen ilmanvaihto

Varastojen ilmanvaihdon mitoitus riippuu sairaaloissa paljolti siitä, mitä tavaroita varastossa säilötään. Minimipoistoilmavirta sairaalan varastolle on $0,5 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$ (FINVAC 2019). Suomessa esimerkiksi steriilivarastoille, joissa säilytetään steriileissä pakkauksissa olevia välineitä, ilmanvaihdon mitoituksen on kokemusten mukaan suositeltavaa olla $8 \text{ dm}^3/\text{s}, \text{ m}^2$. Tässä huonetyypissä suurehko ilmanvaihto on merkittävässä roolissa, vaikka siellä ei oleskele ihmisiä pitkiä aikoja. Kyseisessä tapauksessa suurella ilmamäärällä halutaan hallita tilan kosteuspitoisuutta. (Ignatius 2019)

4 SAIRAALOIDEN ILMANVAIHTOJÄRJESTELMIEN ENERGIATEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

4.1 Ilmajärjestelmät

Ilmajärjestelmässä ilmanvaihto ja jäähdytys sekä joskus myös lämmitys hoidetaan samalla ilmavirralla. Ilmavirran mitoitusperusteena käytetään usein jäähdytystehon tarvetta. Ilmanvaihdollinen maksimi-ilmavirtatarve on usein selkeästi pienempi tätä mitoitusilmavirtaa. Ilmavirran suuruutta ja lämpötilaa voidaan säätää kone-, vyöhyke- ja huonekohtaisesti. Tyypillisimmät ilmajärjestelmät ovat vakioilmavirtajärjestelmä eli CAV-järjestelmä sekä muuttuvailmavirtajärjestelmät eli VAV-järjestelmät. (Sandberg 2016a)

Tarpeenmukaisessa ilmanvaihdossa perusideana on toteuttaa ilmanvaihto niin, että tilaan tulee juuri sen verran tuloilmaa kuin tilassa kulloinkin tarvitaan. Puhallinmoottorien nopea kehitys on mahdollistanut pyörimisnopeuden portaattoman säädön, joka on mahdollistanut tarpeenmukaisen ilmanvaihdon. Tarpeenmukainen ilmanvaihto toteutetaan VAV-järjestelmällä. (Sandberg 2016a) Verrattaessa CAV-järjestelmään, jossa ilmavirta on koko ajan vakio, energiasäästöpotentiaali on suuri. Tarpeenmukainen ilmanvaihto soveltuu tiloihin, joissa ihmisten läsnäolo ja tilakuormitus vaihtelee vuorokauden aikana merkittävästi. (Swegon 2016)

CAV-järjestelmä

Vakioilmajärjestelmällä eli CAV-järjestelmällä tilojen ilmanvaihto toteutetaan nimensä mukaisesti vakioilmavirralla eikä ilmamäärää siten säädetä säätöpelleillä tarpeen mukaan, kuten VAV-järjestelmissä. CAV-järjestelmällä voidaan toteuttaa hyvä sisäilmasto ja se soveltuu eritoten vierekkäisille huoneille, joiden käyttö on samankaltaista. Myös suuret tilat ovat tyypillinen käyttökohde. (Sandberg 2016a) Hyvänä esimerkkinä mainittakoon 24/7 käytettävä suuri varastotila, jossa olosuhteet saadaan CAV-järjestelmällä pysymään tasaisena.

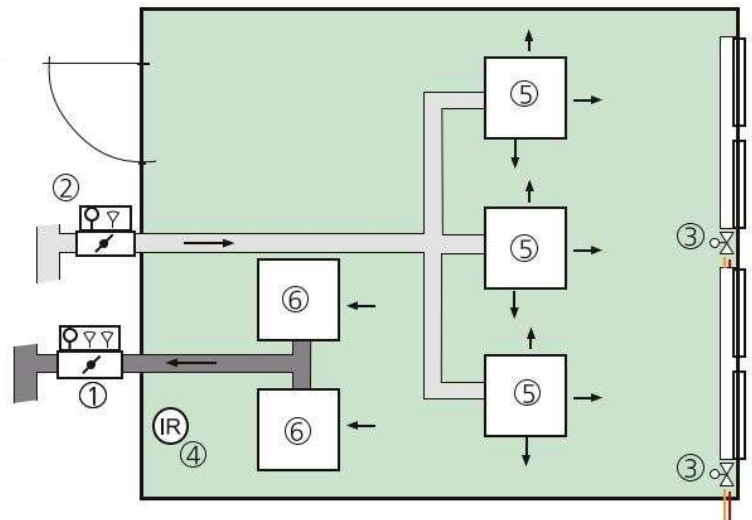
CAV-järjestelmä on toimintavarma ja se on edullinen toteuttaa. Ilmavirtojen mitoitus tapahtuu yleensä kesäajan jäähdytystarpeen mukaisesti. Kun ilmastoinnin palvelualueena on useampi huone, ilmavirran lämpötilan säätö jäähdytystilanteessa tapahtuu huoneiden

keskimääräisen lämpötilan perusteella. Joustavuutta järjestelmään saadaan, kun valitaan tulo- ja poistoilmakoneet laajoilla toiminta-alueilla. (Sandberg 2016a)

Huonekohtainen VAV-järjestelmä

Tyypillisin VAV-järjestelmä on huonekohtainen, missä jokaiselle huoneelle säädetään oma ilmavirta tarpeen mukaan. Ilmavirtaa säädetään esimerkiksi sisäilman lämpötilan tai ilmanlaadun mukaan. Järjestelmässä huomioidaan eri tilat, kuten esimerkiksi vierekkäiset potilashuoneet erilaisilla kuormituksilla. VAV-järjestelmä soveltuu erityisesti tiloihin, joissa on suuret lämpökuormat ja/tai suuret ilmavirrat. (Sandberg 2016a) Sairaaloiden osalta ilmavirrat ovat verrattain suuret verrattuna moneen muuhun rakennustyyppiin. Lisäksi kuormitus vaihtelee, kun esimerkiksi yhden hengen potilashuone voi olla toisinaan tyhjänä ja toisinaan siellä voi olla potilaan lisäksi kaksi tai kolme hoitajaa. Näitä taustoja vasten sairaaloiden potilashuoneilla on potentiaalia hyödyntää VAV-järjestelmää saavuttaen sen avulla energiansäästöä. Kuvassa 3. on esitetty huonekohtaisen VAV-järjestelmän periaate.

1. Huonesäätöpelti poistoilmalle
2. Huonesäätöpelti tuloilmalle
3. Patteriventtiilit
4. Läsnaöoloanturi
5. Tuloilmalaite
6. Poistoilmalaite



Kuva 3. Huonekohtaisessa VAV-järjestelmässä ilmavirtaa säädetään huonekohtaisen kuormituksen mukaan säätöpelleillä (Swegon 2016).

VAV-järjestelmää voidaan ohjata sisäilman lämpötilan, hiilidioksidipitoisuuden, läsnäolon tai rakennusautomaation aikaohjelmien mukaan. Järjestelmän säädön toiminta-alue kannattaa pitää riittävän laajana, jotta ilmavirtaa voidaan oikeasti säätää tarpeenmukaisesti eri tilanteissa. Minimi- ja maksimi-ilmavirtojen ero on huomioitava tarkasti

päätelaitteiden valinnassa, jotta tuloilman heittokuviot soveltuvat molemmissa ääri-asennoissa. Säädön avulla kanaviston staattinen paine pyritään pitämään mahdollisimman pienenä ja siten säästämään energiaa. Säätolaitteita ohjataan painesäätimellä ja puhaltimia taajuusmuuttajilla. (Sandberg 2016a)

Vyöhykekohtainen VAV-järjestelmä

Vyöhykekohtaisessa VAV-järjestelmässä ilmavirtaa säädetään useampaan huoneeseen yhden säätöpellin avulla. Vyöhykkeessä voi olla esimerkiksi huoneryhmä, joka sijaitsee samalla julkisivulla ja täten aurinkokuorma on samanlainen. Huoneiden välillä ei saa siis olla suuria kuormituseroja. Itse ilmavirran säätö tapahtuu samalla tavalla kuin huonekohtaisessa VAV-järjestelmässä, mutta säätimet ovat vain suurempia. Säädössä huomioidaan useamman huoneen keskimääräinen sisäilman lämpötila tai olosuhde, jota voidaan mitata yhteisestä poistoilmakanavasta. (Sandberg 2016a)

4.2 Ilmansuodatus

Ilmansuodatuksella on tärkeä rooli, kun mietitään sisäilman laatua ja hygieniää. Tehokkaimmilla suodattimilla raitis- ja poistoilma saadaan erittäin puhtaaksi. Ilmansuodatuksen huonona puolena energiankulutus nousee, koska ilmansuodattimet aiheuttavat painehäviötä. Onkin arvioitu, että suodattimien aiheuttamista kuluista jopa 80 % koostuu energiakustannuksista ja loput 20 % niiden hankintakuluista, asennuksesta ja jätteenkäsittelystä. Energiatehokkuusvaatimusten noustessa ilmansuodattimia kehitetään jatkossa niin, että painehäviö olisi mahdollisimman matala tehokkuudesta tinkimättä ja lisäksi suodattimien vaihtovälikäytäntöjä optimoidaan. (Sandberg 2016b)

Sairaaloiden ilmanvaihtojärjestelmien ilmansuodatustekniikan tulee olla korkealaatuista hyvän ja turvallisen sisäilman takaamiseksi. Erityisen tarkat sisäilman laatuvaatimukset ovat esimerkiksi leikkaussaleissa ja puhdastiloissa. Sairaaloissa usein hyödynnettävien HEPA-suodattimien avulla ilman epäpuhtaudet saadaan suodatettua miltei 100 %:sti. HEPA-suodattimet aiheuttavat kuitenkin korkeat painehäviöt, joka vähentää energiatehokkuutta, kun järjestelmään tulee asentaa ilmanvaihtokoneet suuremmilla ilmamäärillä. (Ignatius 2019)

Likaantuneiden suodattimien vaihtaminen laskee energiankulutusta. Vaihtovälin optimointi ei ole kuitenkaan yksinkertaista. Yleisesti suodatintoimittajat esittävät suositeltavaksi vaihtoväliksi kuuden kuukauden välein. Mikäli sähkön hinta nousee selkeästi, tiheämpi vaihtoväli voi tulla kyseeseen. Toisaalta, jos huolto- ja vaihtokustannukset nousevat, vaihtoväliä voi olla parempi pidentää. Lisäksi suodattimet likaantuvat eri nopeudella eri vuodenaikoina, kun huomioidaan esimerkiksi kevään ja kesän siitepölykausi. Siksi optimaalisen vaihtovälin määrittäminen voi olla vaikeaa. (Pietiläinen 2015)

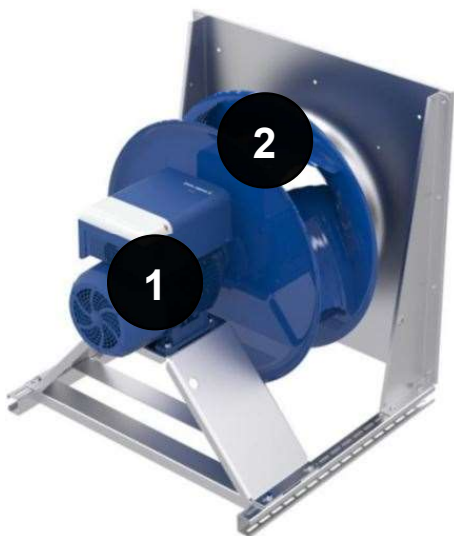
Ilmanvaihtojärjestelmien suodattimien mitoitus on tärkeää niin terveellisen sisäilman takaamiseksi kuin energiankulutuksen optimoimiseksi. Kun tiedetään ilmannoisuus ja vaadittava suodatinerotusaste, voidaan suodattimelle laskea oikea pinta-ala. Pietiläinen on tutkinut suodattimien likaantumisen vaikutusta painehäviöön opinnäytetyössään, jonka esimerkkikohteessa $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ tuloilmakoneessa tuloilman puhdassuodattimen aiheuttama painehäviö oli alkutilanteessa 70 pascalia ja se nousi 30 pascalia 2,5 kuukauden aikana. REHVAn suosituksen mukaan suodatin on hyvä vaihtaa, kun alkutilanteen painehäviö on kaksinkertaistunut (REHVA 2018). Tässä tapauksessa se olisi siis noin puolen vuoden kohdalla olettaen, että suodatin likaantuu samalla vauhdilla myös ko. hetkestä eteenpäin. Poistoilman suodattimen aiheuttama painehäviön nousu samassa ajassa oli vain 5 pascalia johtuen pienemmästä ilmamäärästä, mutta myös siitä, että poistoilma on puhtaampaa. Poistoilmaa suodatetaan muun muassa siksi, ettei lämmöntalteenottoaite tukkeutuisi. (Pietiläinen 2015)

4.3 Ilmanvaihtopuhaltimet

Koneellisen ilmanvaihdon tärkein osa on puhallin, jonka avulla paineistettu ilma saadaan liikkumaan kanavistossa ja huoneissa. Puhaltimien tärkeimmät osat ovat siipipyörä ja sitä pyörittävä moottori. Siipipyörän alkaessa pyörimään, ilmavirran virtausnopeus ja paine kasvavat kanavistossa. Kokonaispaine koostuu staattisesta ja dynaamisesta paineesta. Oikea ilmavirta saadaan säätämällä puhaltimen pyörimisnopeutta. Pyörimisnopeutta säädetään taajuusmuuttajalla, jonka avulla puhaltimelle saadaan portaaton säätö. Tässä kappaleessa on esitelty yleisimmät puhallintyyppit ja moottorit sekä avattu termit, jotka kertovat niiden energiatehokkuudesta. (Sandberg 2016a)

Kammiopuhallin

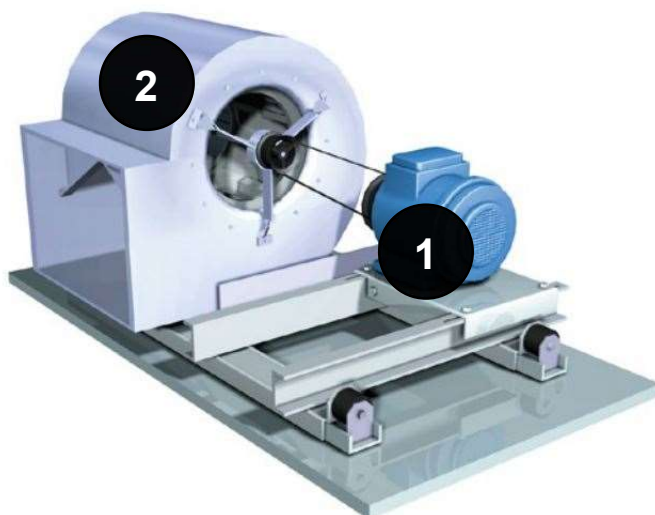
Kammiopuhallin on suoravetoinen puhallin ja se on nykyisin yleisin puhallintyyppi sekä uudiskohteissa että saneerattavissa kohteissa. Siinä puhallinpyörä on suoraan moottorin akselilla, joka takaa puhaltimelle useita hyötyjä. Hyötysuhde on hyvä, koska voimansiirto on häviötön. Hihnavetoiseen puhaltimeen verrattuna, kammiopuhallin ei vaadi niin paljon huoltoa ja puhdistusta eikä se aiheuta juurikaan tärinää. Kammiopuhallinta ohjataan portaattomalla säädöllä (Sandberg 2016a) Kuvassa 4. on esitetty kammiopuhaltimen moottorin ja siipipyörän sijainnit.



Kuva 4. Kammiopuhaltimen moottorin (1.) ja siipipyörän (2.) sijainti (Fläkt 2021).

Kaavullinen radiaalipuhallin

Kaavullinen radiaalipuhallin eli keskipakoispuhallin on ollut yleinen puhallintyyppi ennen kammiopuhaltimien tuloa markkinoille. Radiaalipuhaltimen spiraalikaavulla ilmavirran nopeuden energia saadaan muutettua staattiseksi paineeksi ja siksi näillä puhaltimilla saavutetaan hyvä hyötysuhde. Hihnakäyttöisessä radiaalipuhaltimessa voimansiirrossa aiheutuu tehohäviöitä, mikä heikentää hyötysuhdetta, mutta tämä korostuu lähinnä pienillä puhallintehoilla. (Sandberg 2016a) Kuvassa 5. on esitetty kaavullisen radiaalipuhaltimen moottorin ja siipipyörän sijainnit.

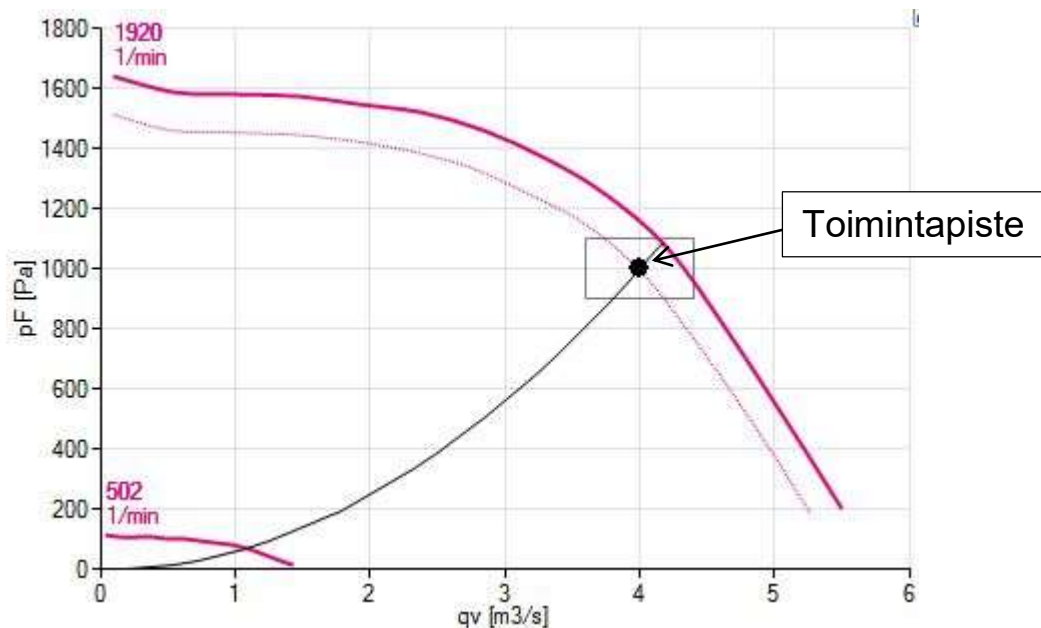


Kuva 5. Radiaalipuhaltimen moottorin (1.) ja siipipyörän (2.) sijainti (Fläkt 2018a).

Puhaltimen toimintapiste

Puhaltimen toimintapiste esitetään koordinaatistossa, jossa x-akselilla on tilavuusvirta [m^3/s] ja y-akselilla paine [Pa]. Koordinaatistoon piirretään puhaltimen ja kanaviston ominaiskäyrät, joiden leikkauspisteessä on puhaltimen toimintapiste. Puhaltimen ominaiskäyrä on laskeva. Kanaviston ominaiskäyrä on puolestaan ylöspäin nouseva käyrä. Ilmanvaihtopuhallin muodostaa kanavistoon paineen, joka kuluu kanaviston painehäviöihin. Painehäviö riippuu ilman virtausnopeudesta. (Harju 2014)

Kanaviston ominaiskäyrä muodostuu kanaviston painehäviöistä (Harju 2014). Kuviossa 1. on esitetty puhaltimen toimintapiste koordinaatistossa. Kuvion 1. käyrät on saatu Ziehl-Abeggin FANselect -puhallinvalintaohjelmistosta. Ohjelmistoon syötettiin sairaala-kiinteistölle tyypillisen kokoluokan puhallin ilmamäärällä $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ja kokonaispainentuotolla 1000 Pa.

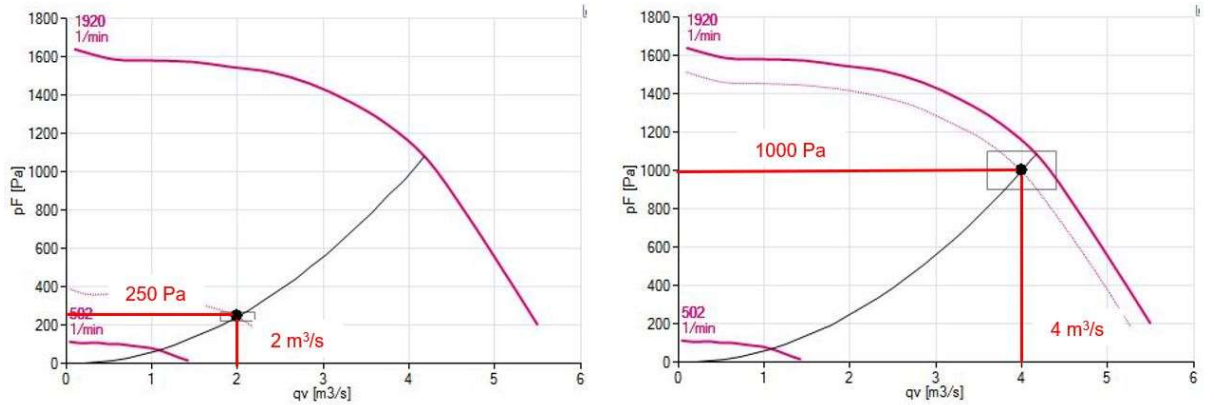


Kuvio 1. Puhaltimen toimintapiste on puhaltimen ja kanaviston ominaiskäyrien leikkauspisteessä (Ziehl-Abegg 2021).

Puhaltimen kierrosnopeutta [1/min] muuttamalla puhaltimen ominaisuudet noudattavat puhallinlakeja. Seuraavat puhallinlait pätevät:

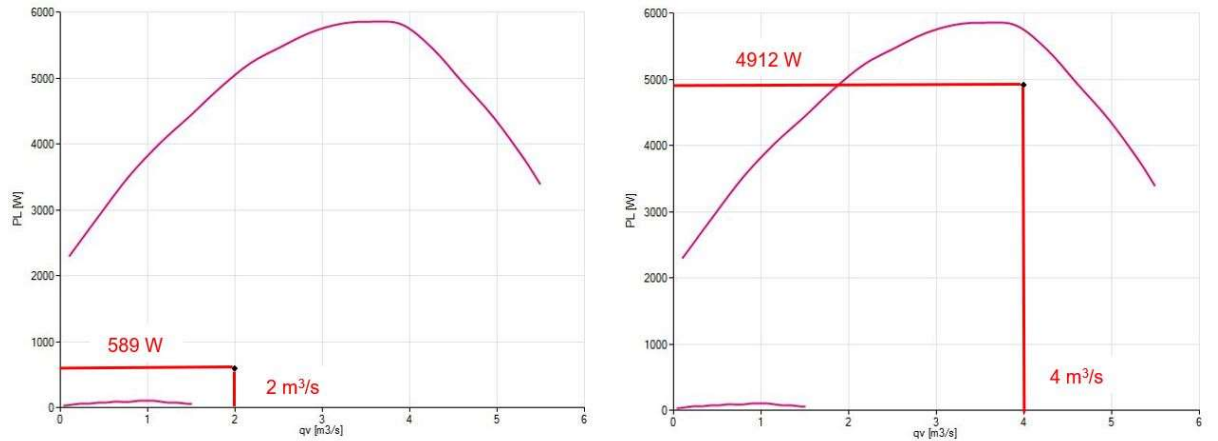
- Kierrosnopeutta kaksinkertaistamalla,
 - tilavuusvirta q_v kaksinkertaistuu [m^3/s]
 - painetuotto Δp nelinkertaistuu [Pa]
 - tehontarve P kahdeksankertaistuu [W]. (Huhtaniemi 2009)

Painetuoton nelinkertaistuminen tilavuusvirran kaksinkertaistuessa on havainnollistettu Ziehl-Abeggin FANselect -puhallinvalintaohjelmistosta saaduista tilavuusvirta-painekoordinaatistoista kuviossa 2. Esimerkkipuhaltimena käytetään puhallinta ilmamäärällä $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$ ja kokonaispaineentuotolla 1000 Pa, kuten kuviossa 1.



Kuvio 2. Painetuotto nelinkertaistuu tilavuusvirran kaksinkertaistuessa (Ziehl-Abegg 2021).

Tehontarpeen kahdeksankertaistuminen tilavuusvirran kaksinkertaistuessa on havainnollistettu 4,0 m³/s esimerkkipuhaltimen tilavuusvirta-teho-koordinaatistoissa kuviossa 3.



Kuvio 3. Tehontarve kahdeksankertaistuu tilavuusvirran kaksinkertaistuessa (Ziehl-Abegg 2021).

Puhaltimen teho voidaan laskea kaavalla:

$$P = \frac{q_v \times p_F}{\eta}$$

P = puhaltimen teho [W]

q_v = puhaltimen ilmavirta [m³/s]

p_F = puhaltimen kokonaispaine [Pa]

η = siipipyörän kokonaishyötysuhde.

Edellä mainitun ilmamäärältään 4,0 m³/s esimerkkipuhaltimen siipipyörän kokonaishyötysuhde voidaan laskea johtamalla edellisestä puhaltimen tehon kaavasta:

$$\eta = \frac{q_v \times p_F}{P}$$

$$= (4,0 \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ Pa}) / 4912 \text{ W} = 0,81 = 81 \text{ \%}.$$

Puhaltimen SFP-luku

Puhaltimen energiatehokkuudesta kertoo sen ominaissähköteho eli SFP-luku, jolla ilmoitetaan puhaltimen sähköverkosta ottama teho ilmakehää kohti, yksikkö kW/(m³/s). SFP-luku voidaan ilmoittaa koko rakennuksen ilmanvaihtokoneiden keskiarvona tai ilmanvaihtokone- / puhallinkohtaisesti. Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisesti SFP-luku saa olla enintään 1,8 kW/(m³/s). Vaatimukset puhaltimen energiatehokkuudesta ovat kiristyneet niin, että SFP-luvun maksimiarvo rakentamismääräyskokoelmasa 2003 oli vielä 2,5 kW/(m³/s) ja rakentamismääräyskokoelmassa 2012 se oli 2,0 kW/(m³/s). (Kämäräinen 2018)

Ilmanvaihtokoneen (tulokone + poistokone) SFP-luku saadaan jakamalla koneiden verkosta ottama sähköteho tulo- tai poistokoneen ilmavirralla. Mikäli ilmavirrat poikkeavat toisistaan, valitaan suurempi ilmavirta. SFP-luvun laskentaan käytettävä kaava:

$$SFP = \frac{P_{tulopuhaltimet} + P_{poistopuhaltimet}}{q_{vmax}}$$

SFP = ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho [kW/(m³/s)]

P_{tulopuhaltimet} = tulopuhaltimen verkosta ottama sähköteho [kW]

P_{poistopuhaltimet} = poistopuhaltimen verkosta ottama sähköteho [kW]

q_{vmax} = koneen ilmavirroista suurempi, tulo- tai poistoilmavirta [m³/s].

Muuttuvilmavirtajärjestelmissä SFP-luvun laskennassa käytetään mitoittavaa ilmavirtaa eli ilmavirtojen säätöjä esimerkiksi aikaohjelmien mukaan ei huomioida. (LVI-talotekniikkateollisuus 2009)

Puhallinmoottorit

Puhallinmoottorit ovat pääsääntöisesti joko AC-moottoreita (oikosulkumoottori), EC-moottoreita (elektronisesti kommutoitu moottori) tai PM-moottoreita (kestomagneetti-moottori). Puhallinmoottorien energiatehokkuudesta kertoo pitkälti sen hyötysuhde. Hyötysuhteen perusteella tiedetään, miten tehokkaasti moottori muuntaa sähköenergian mekaaniseksi työksi. Kansainvälisen standardin mukaisesti moottoreille on määritetty IE-hyötysuhdeluokat IE1...IE4, joista IE4 on parhaan hyötysuhteen omaava moottori. Nykyisin tietyn kokoluokan moottoreille vaaditaan jo vähintään IE2 hyötysuhdeluokan moottoria eli heikoimman hyötysuhteen omaavia IE1 puhallinmoottoreita ei saa asentaa. (Lång 2017)

Moottorityypeistä paras hyötysuhde on EC-moottoreilla, mutta niiden maksimi moottoriteho voi aiheuttaa rajoitteita. Seuraavaksi suurin hyötysuhde on PM-moottoreilla ja kolmantena AC-moottoreilla, joilla niilläkään hyötysuhde ei ole huono. AC-moottorien hyötysuhde paranee selkeästi moottoritehon kasvaessa. (Sandberg 2016a)

AC-moottori kytketään 3 x 400 Voltin verkkoon suoraan tai taajuusmuuttajan kautta. Moottorin peruspyörimisnopeuksia ovat 750 rpm, 1000 rpm, 1500 rpm ja 3000 rpm. Pyörimisnopeussäädöllä saadaan kuitenkin muitakin nopeuksia aikaiseksi. EC-moottoria ei voi kytkeä suoraan verkkoon vaan se vaatii säätöyksikön. Sen pyörimisnopeutta säädetään kestomagneetin avulla eli moottorin magneettikentän vaihtelut määräävät pyörimisnopeuden. Siksi EC-moottoreille saadaankin erittäin laaja pyörimisnopeusalue. PM-moottorin rakenne muistuttaa AC-moottoria. PM-moottoria ei voi kytkeä suoraan verkkoon vaan pyörimisnopeussäätimenä käytetään taajuusmuuttajaa. (Sandberg 2016a)

Puhaltimen energiatehokas vaihto

Puhaltimen vaihdolle syynä voi olla puhaltimen rikkoutuminen, vanhan puhaltimen suuri energiankulutus tai äänitaso. Myös huoltotarve on voinut kasvaa vanhan puhaltimen ollessa elinkaarensa loppu puolella ja siten se halutaan vaihtaa huoltovarmempaan puhaltimeen. Tilanmuutoshankkeissa vanha puhallin voidaan joutua uusimaan, mikäli vanhan puhaltimen ilmavirta ei ole riittävä. Uuden kokonaisilmavirran määrittämisessä tulee huomioida uusimmat määräykset. Mikäli ilmavirta muuttuu puhaltimen vaihdon yhteydessä, tulee ilmanvaihtojärjestelmän muut komponentit tarkistaa ja uusida, jos ne rajoittavat ilmavirran muuttamista. Nykyisin yleinen syy puhaltimen vaihdolle on myös

ilmanvaihtojärjestelmän muuttaminen tarpeenmukaiseksi, jolloin uuden puhaltimen ilmavirtaa tulee voida säätää. (Fläkt 2015)

EC-moottoreilla toimivat puhaltimet ovat energiatehokkaimpia jopa 93 % hyötysuhteellaan. Tästä syystä niitä tulisi suosia puhallinten saneerauksissa energiankulutuksen minimoimiseksi. Koska niiden maksimi moottoriteholla on rajoitteensa, suuremman ilmamäärän ja moottoritehon vaativissa ilmanvaihtokoneissa niitä voidaan asentaa useampia rinnakkain. Tällöin puhutaan niin sanotuista monipuhallinseinistä. EC-puhaltimien avulla voidaan säästää tilaa, koska ne ovat lyhyempiä kuin AC- ja PM-puhaltimet. Lisäksi EC-puhaltimilla on paremmat SFP-luvut, pienempi melutaso ja parempi toimintavarmuus. Huoltotöiden määrä vähentyy selkeästi hihnavetoisiin radiaalipuhaltimiin verrattuna. Esimerkkikuva kahden puhaltimen EC-puhallinseinästä on esitetty kuvassa 6. (Mastervent 2021)



Kuva 6. Kaksi EC-kammiopuhallinta asennettuna samaan ilmanvaihtokoneeseen (Mastervent 2021).

Mikäli kohteessa vaihdetaan hihnakäyttöinen radiaalipuhallin EC-kammiopuhaltimeksi, on myös hyvä huomioida, että tapauskohtaisesti äänenvaimennin voidaan poistaa

painehäviön minimoimiseksi. Myös päätyseinän lyhyt kanavaosuus voidaan avartaa vähintään sitä seuraavan kanavan kokoiseksi painehäviön minimoimiseksi.

4.4 Lämmöntalteenottojärjestelmät

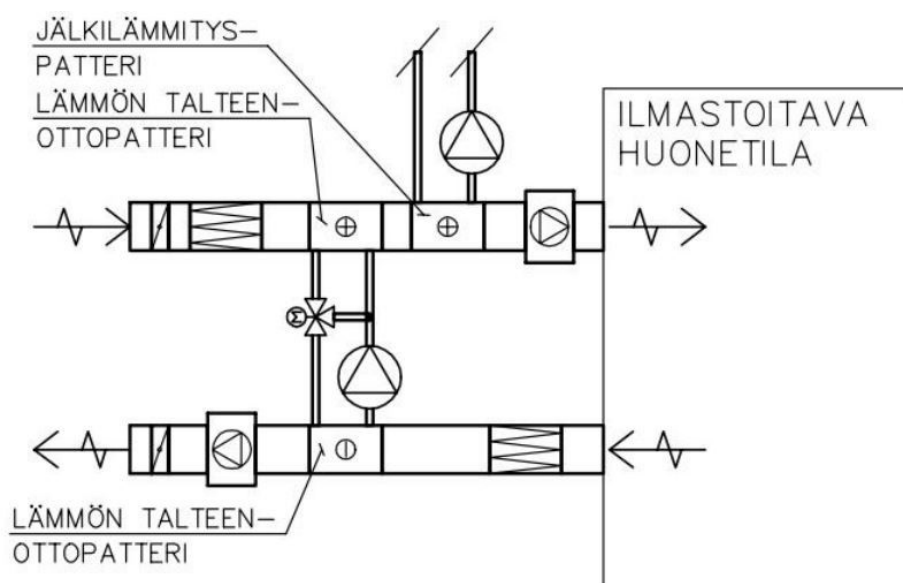
Suomessa sairaaloissa käytetään lähes poikkeuksetta nestekiertoista lämmöntalteenottojärjestelmää, kun puhutaan sairaanhoidollisista tiloista. Tämä johtuu siitä, että muissa olemassa olevissa lämmöntalteenottojärjestelmissä tulo- ja poistoilma voivat sekoittua keskenään, jolloin ilmajälitteiset mikrobit voivat levitä ilmanvaihtojärjestelmässä. Sen sijaan esimerkiksi sairaaloiden porraskäytävien, teknisten tilojen tai toimistojen ilmanvaihtojärjestelmiin voidaan asentaa pyörivä lämmönsiirrin (kiekko), koska näissä tiloissa ei tehdä sairaanhoidollisia toimenpiteitä ja toisaalta ilmansuodatuksella tuloilmasta saadaan riittävän puhdasta. Iso-Britanniassa paikallisen HTM 03-01 -standardin mukaisesti myös sairaanhoidollisissa tiloissa voidaan hyödyntää paremman hyötysuhteen omaavia pyöriviä lämmönsiirtimiä. Siellä epäpuhtauksien leviämistä poistoilmasta tuloilmaan ei nähdä merkittävänä uhkana pyörivissä LTO-järjestelmissä. (Ignatius 2019)

Nestekiertoinen lämmöntalteenotto

Nestekiertoinen lämmöntalteenotto on käytetyin LTO-järjestelmä suomalaisissa sairaaloissa. Nestekiertoisessa lämmöntalteenotossa lämpö siirtyy poistoilmasta poistoilmapatterin lamellien kautta putkessa olevaan nesteeseen, joka kulkee tuloilmapatterin lamellien läpi ja täten siirtää lämpöä tuloilmaan. Lämpö siirtyy siis poistoilmasta kiertävään nesteeseen ja tämän jälkeen kiertävästä nesteestä tuloilmaan. Koska tulo- ja poistoilmavirrat ovat täysin erotetut toisistaan, soveltuu LTO-järjestelmä olosuhteiltaan korkeammat vaatimukset omaaviin kohteisiin. (Sandberg 2016a) Tyypillisiä kohteita sairaaloiden lisäksi ovat esimerkiksi lääke- ja bioteollisuus, elektroniikkateollisuus, pakkausteollisuus, elintarviketeollisuus ja tutkimuslaboratoriot (Sandberg 2016b).

Nestekiertoisen lämmöntalteenottojärjestelmän poisto- ja tuloilmapattereiden rakenne on samanlainen kuin lämmitys- ja jäähdytyspattereissa, mutta LTO-hyötysuhteen maksimoimiseksi pinta-alaa tarvitaan enemmän. Nestekiertoinen LTO koostuu patterien lamelleista sekä putkista, jossa neste kiertää poisto- ja tuloilmapatterien välillä. Materiaaleina käytetään yleensä alumiinia lamelleissa ja kuparia putkissa, koska niillä on hyvä lämmönjohtavuus. (Sandberg 2016a)

Nestekiertoisen lämmöntalteenottojärjestelmän tehoa säädetään 3-tieventtiin avulla, jotta optimaalinen tuloilman lämpötila saavutetaan. Eli aina järjestelmästä ei oteta maksimaalista tehoa irti, vaan halutaan viileämpää tuloilmaa kuin järjestelmällä voisi parhaimmillaan saada. Lisäksi järjestelmän säädöllä voidaan estää poistoilmapatterin huurtuminen, mikä tapahtuu myös lämmöntalteenottoa rajoittamalla. (Sandberg 2016a) Nestekiertoisen LTO:n periaate on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Nestekiertoisessa LTO:ssa lämpö siirretään poistoilmasta tuloilmaan nesteen välityksellä. Kuvan kytkennässä ei ole jäähdytyspatteria, joka on yleinen ratkaisu sairaalakohteissa optimaalisen sisäilmaolosuhteen takaamiseksi. (Kasari 2010)

Nestekiertoisen LTO-laitteiston lämmönsiirtonesteinä käytetään veden ja jäätymisenestoainetta, jotta neste ei jäädy. Jäätymisenestoaine vähentää nesteen lämmönsiirto-ominaisuutta, minkä vuoksi sen pitoisuus nesteessä pidetään mahdollisimman matalana. Nestekiertoisen LTO:n lämpötilahyötysuhde on keskimäärin luokkaa 50 %, jolloin ilmanvaihdon lämmittämiseen tarvittavan energian määrä puolittuu. Hyötysuhteen vaikuttaa muun muassa pattereissa olevien lamellien profilointi, putkirivien määrä ja käytettävä lämmönsiirtoneste. (Sandberg 2016a)

Useimmin käytetty lämmönsiirtoneste on etyleeniglykoli, koska sen lämmönsiirto-ominaisuus on hyvä. Se on myrkyllinen aine ja osittain siitä syystä markkinoilla on myös muita jäätymisen estoon yleisesti käytettäviä aineita, kuten propyleeniglykoli, kaliumformiaatti ja betaiini. Taulukossa 1. on esitetty edellä mainittujen lämmönsiirtonesteiden ominaisuuksia. (Sandberg 2016a)

Taulukko 1. Nestekiertoisessa LTO:ssa käytettävien yleisimpien lämmönsiirtonesteiden ominaisuuksia (Sandberg 2016a).

Ominaisuus	Etyleeniglykoli	Propyleeniglykoli	Kaliumformiaatti	Betaiini
Lämmönsiirto-ominaisuudet normaali LTO-lämpötilassa	Hyvä, kun pitoisuus ei ylitä 30%:a	Huono. Seoksen viskositeetti korkea ja lämmönsiirto heikko	Hyvä	Hyvä
Toiminta matalassa lämpötilassa	Kohtuullinen, viskositeetti kasvaa ja lämmönsiirto heikkenee	Huono. Seoksen viskositeetti kasvaa ja lämmönsiirto heikkenee	Hyvä	Kohtuullinen, viskositeetti kasvaa ja lämmönsiirto heikkenee
Toiminta korkeassa lämpötilassa	Hyvä	Hyvä	Lämpöteknisesti hyvä. Korroosio kasvaa. Huomioitava materiaalivalinnoissa	Hyvä
Myrkyllisyys	Myrkyllinen	Ei-myrkyllinen	Ei-myrkyllinen	Ei-myrkyllinen
Korroosio	Ei aiheuta korroosiota	Ei aiheuta korroosiota	Aiheuttaa korroosiota. Huomioitava materiaalivalinnoissa	Ei aiheuta korroosiota

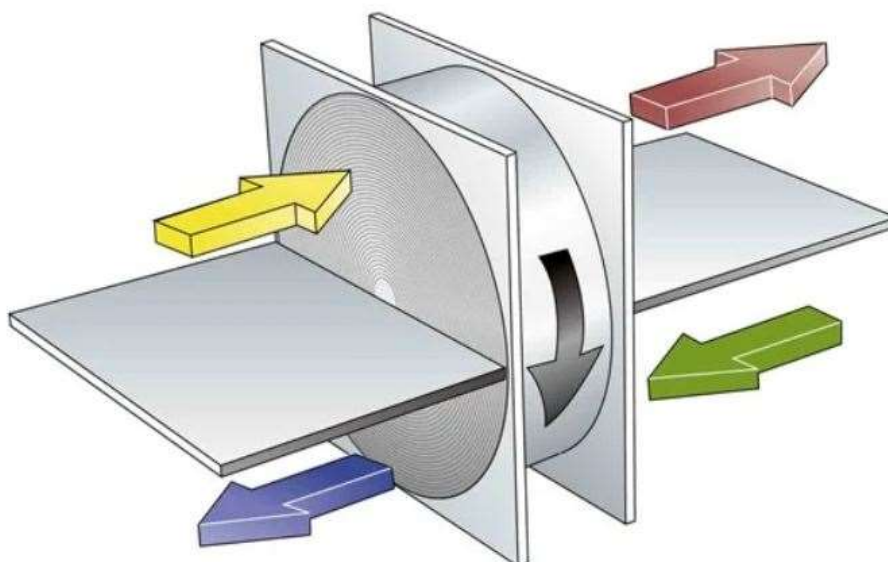
Nestekiertoinen Econet lämmöntalteenotto

Econet tuotenimellä kulkeva nestekiertoinen lämmöntalteenottojärjestelmä eroaa hie- man perinteisestä nestekiertoisesta lämmöntalteenottojärjestelmästä. Econet järjestel- mässä ilmanvaihtokoneen jälkilämmityspatteri sekä mahdollinen jäähdytyspatteri on jä- tetty kokonaan pois. Tällöin lämmitys- ja jäähdytyspattereiden aiheuttama painehäviö ilmanvaihtokanavassa jää pois. Sen sijaan talviaikaan tarvittava lisälämpö ja kesäajan jäähdytys tuodaan samaan lämmöntalteenoton nestekierto on erillisten lämmönsiirrinten avulla. (Sandberg 2016a)

Econet järjestelmässä on oma pumppuyksikkö ja säätö. Tämän avulla nestekierto sää- detään tarpeen mukaiseksi kuhunkin lämmityksen tai jäähdytyksen käyntitilaan. Econet huomioi myös muuttuvilmavirtajärjestelmässä ilmavirtojen muutokset optimoiden nes- tekierron sopivaksi. (Sandberg 2016a) Uusimmassa nestekiertoisessa Econet lämmön- talteenottojärjestelmässä lämpötilahyötysuhde on jopa 80 % (Fläkt 2018b).

Pyörivä lämmönsiirrin

Pyörivää lämmönsiirrintä käytetään suomalaisissa sairaaloissa poistoilman lämmöntalteenotossa vain ei-sairaanhoidollisissa tiloissa. Näitä ovat esimerkiksi toimistotilat, käytävät ja porrashuoneet. Pyörivästä lämmönsiirtimestä käytetään myös termiä LTO-kiekko. Se on jaettu kahteen puoliympyrän muotoiseen osaan, joista toiseen johdetaan poistoilma ja toiseen tuloilma. Kun roottori pyörii, se siirtää lämmön poistoilmasta tuloilmapuolelle. Roottori on kennorakenne, joka sisältää hyvin pieniä virtauskanavia. Poistoilman lämpö siirtyy siis ensin tähän kennorakenteen materiaaliin ja kun roottori on pyörähtänyt puoli kierrosta, siirtyy se roottorin kennomateriaalista tuloilmavirtaan. (Sandberg 2016a) Pyörivän lämmönsiirtimen periaate on esitetty kuvassa 8.

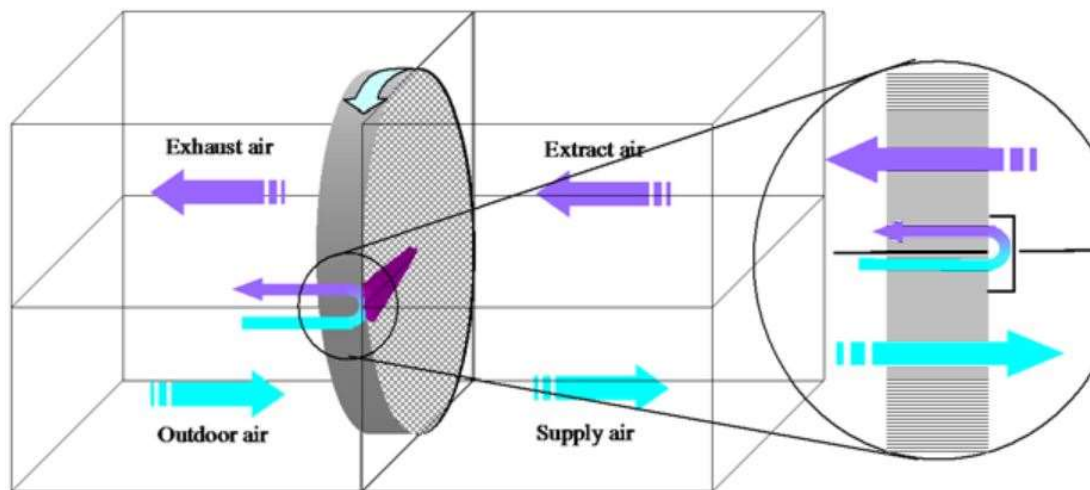


Kuva 8. Pyörivä lämmönsiirrin siirtää lämmön tehokkaasti poistoilmasta tuloilmaan pyörivän kennorakenteensa avulla. Poisto- ja tuloilmavirrat kulkevat vastakkaisiin suuntiin. (Swegon 2021)

Pyörivän lämmönsiirtimen roottori on yleensä tehty ohuesta alumiinilevystä. Roottorin kolmiomaiset ja pienet virtauskanavat ovat vain noin 1,5...3,0 mm korkeita. Tämän ansiosta lämmönsiirtopinta-ala on erittäin paljon. Suuren lämmönsiirtopinta-alan lisäksi roottorin toimiminen puhtaalla vastavirtaperiaatteella takaa järjestelmälle korkean lämpötilahyötysuhteen, joka pyörivällä lämmönsiirtimellä on tyypillisesti luokkaa 80 %. Pyörivä lämmönsiirrin takaakin energiatehokkaan ilmanvaihdon eikä jälkilämmitykselle ole juurikaan tarvetta muuta kuin kylmimpänä vuodenaikana. Lämmönsiirtimen aiheuttama painehäviö on myös kohtuullinen huomioiden siitä saatava ilmanvaihtoon käytettävän lämpöenergian säästö. Esimerkiksi case-kohteessa painehäviöt pyörivillä

lämmönsiirtimillä olivat 100...300 Pa ilmanvaihtokoneen koosta riippuen. Täten puhaltimen sähkökulutus ei kasva suuresti pyörivän lämmönsiirtimen vaikutuksesta. (Sandberg 2016a)

Pyörivän lämmönsiirtimen läpi kulkevan poistoilman sekoittumista pyörivän roottorin mukana tuloilmapuolelle estetään puhtaaksipuhallussektorin avulla. Siinä osa raitisilmasta huuhtelee virtauskanavat ennen kuin kyseinen roottorin kohta siirtyy tuloilmapuolelle. Tämä saavutetaan oikeilla painesuhteilla eli poistoilmassa on oltava suurempi alipaine verrattuna raitisilmaan. (Sandberg 2016a) Puhtaaksipuhallussektorin toimintaperiaate on esitetty kuvassa 9. Mahdollisten epäpuhtauksien siirtymistä poistoilmasta tuloilmaan estetään myös poistoilman suodatuksen ja tuloilman suodatuksen avulla.



Kuva 9. Pieni osa raitisilmasta huuhtelee kennon virtauskanavat ja kulkeutuu jäteilman mukana ulos oikean painesuhteen avulla (Roulet & Krüttli 2000).

Suurimpaan osaan pyörivistä lämmönsiirtimistä puhtaaksipuhallussektori on asennettu kiinteästi ja on siten vakioratkaisu kyseisissä lämmönsiirtimissä. Puhtaaksipuhallussektorin johdosta ilmanvaihtokoneen ilmavirtoja nostetaan arvion mukaan keskimäärin noin 5...7 %. Siksi kyseisen ratkaisun käyttöä tulisi harkita aina tapauskohtaisesti energiankulutuksen minimoimiseksi. (Dynamic Air Corporation 2012)

5 ENERGIATEHOKKAAN ILMANVAIHDON HAASTEET SAIRAALOISSA

5.1 Tiukat hygieniavaatimukset

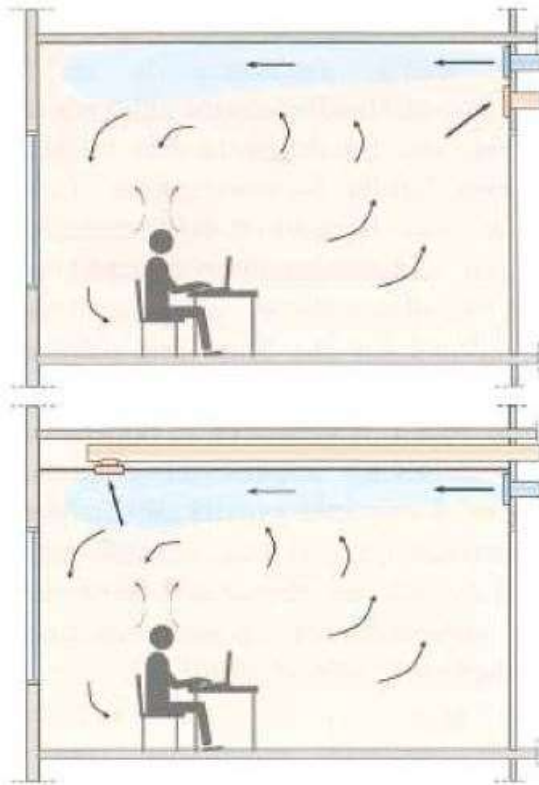
Sairaalat on suunniteltava niin, että infektioiden leviämismahdollisuudet käyttäjien kesken minimoidaan. On kuitenkin selvää, että sairaalassa tapahtuu infektioita vuosittain, vaikka niiltä suojauduttaisiin. Yhdysvalloissa sairaalainfektioita on arvioitu tapahtuvan noin 700 000 vuodessa (Magill ym. 2014). Suomessa vastaavan luvun on arvioitu olevan 48 000 (Kanerva ym. 2008). Tartuntareitit jaetaan kolmeen eri reittiin: kosketus-, pisara- tai ilmapälitteinen. Soveltuvilla henkilösuojaimilla ja turvallisilla työskentelytavoilla voidaan ehkäistä infektioiden leviämistä tehokkaasti. Tämän lisäksi hyvin suunnitellulla ilmanvaihdolla voidaan vähentää ilmapälitteisten infektioiden leviämistä. Suunnitteluohjeiden ja ulkomaisten standardien mukaisesti sairaalan ilmanvaihto suositellaan suunniteltavaksi sekoittavalla ilmanjakomenetelmällä, jolloin sisäilman epäpuhtaudet jakautuvat tasaisesti tilassa ja laimenevat. (Kalliomäki & Koskela 2018)

Epäpuhtauksien määrää sisäilmassa voidaan hallita ilmansuodatuksella tai sopivalla ilmanvaihtokertoimella eli niin, että tuodaan puhdasta ilmaa tilaan riittävä määrä. Tällöin epäpuhtaudet saadaan laimennettua mahdollisimman nopeasti. Toisinaan epäpuhtauksien kulkeutumissuuntia voidaan hallita määrittämällä erilaisten tilojen välille sopiva paine-ero. Esimerkiksi ilmavirran ei haluta liikkuvan eristyshuoneista kohti puhtaampia tiloja, jolloin eristyshuoneen ilmanpaine suunnitellaan alipaineiseksi. Tällöin virtaus-suunta on puhtaammasta tilasta epäpuhtaampaan. Kolmantena tekijänä voidaan mainita ilmanvaihdon huonevirtauskuviot eli puhtaan ilman tulisi huuhdella tilat mahdollisimman tehokkaasti ja niin, että epäpuhtaudet kulkeutuvat kohti poistoa. (Kalliomäki & Koskela 2018)

5.1.1 Sekoittavan ilmanjakojärjestelmän energiatehokkuus

Sekoittavassa ilmanvaihdossa puhdas tuloilma sekoitetaan mahdollisimman tehokkaasti huoneilmaan. Sekoittavalla ilmanvaihdolla epäpuhtauspitoisuudet ja lämpötila pyritään pitämään tasaisena koko tilassa. Tällä menetelmällä epäpuhtaudet laimenevat alhaisiksi ja se tekee sisäilmasta turvallisen. Huoneilmaa, joka sekoittuu tuloilmaan, kutsutaan

induktioilmaksi tai sekundääri-ilmaksi. Induktiosuhde on induktioilmavirran ja tuloilmavirran suhde. Suurella tuloilman lähtönopeudella, yleisesti 1,5...10 m/s, taataan tehokas sekoittava ilmanvaihto. Tehokkuuteen vaikuttavat oleellisesti myös tuloilmalaitteiden ominaisuudet ja sijainnit huoneessa. (Sandberg 2016b) Kuvassa 10. on esitetty sekoittavan ilmanvaihdon periaate.

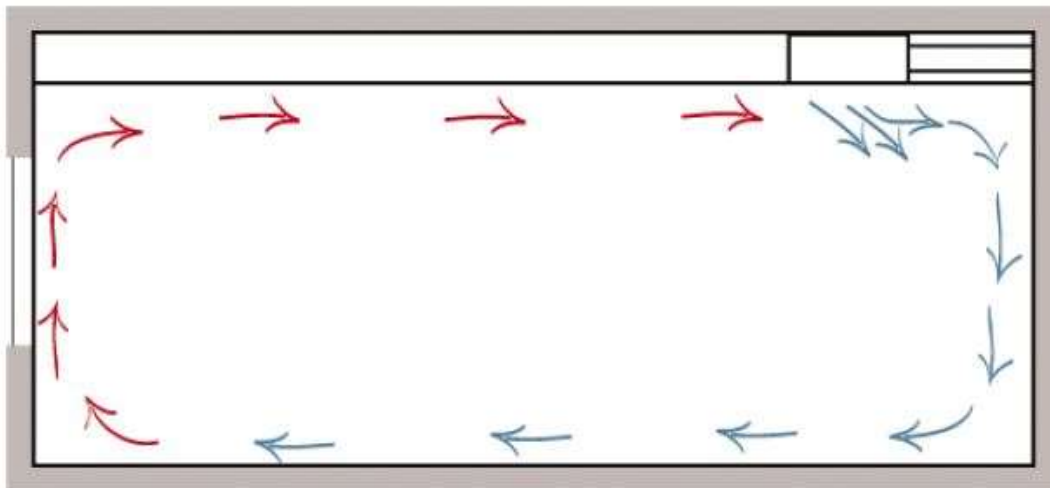


Kuva 10. Sekoittavassa ilmanjaossa hyödynnetään tuloilmasuikun kiinnittymistä kattoon ja seinään (Sandberg 2016a).

Sekoittavaa ilmanjakoa hyödynnetään sairaaloiden eri tilatyypeissä, mutta ei kaikissa. Esimerkiksi leikkaussalit voivat toimia sekoittavalla tai laminaarisella ilmanjaolla. Leikkaussalien lisäksi monen muun erikoistilan ilmanvaihdon suunnittelu jää suunnittelijan tai rakennuttajan päätettäväksi. Tärkeintä on, että sairaalahenkilökunnalla on turvalliset työskentelyolosuhteet ja potilaiden mahdollisimman nopea parantuminen turvataan hyvillä sisäilmaolosuhteilla. (Ryynänen 2007)

Eri ilmanjakojärjestelmien energiankulutusta on tutkittu Karimipanahin ja Moshfeghin tutkimuksessa, jossa vertailtiin sekoittavaa, syrjäyttävää, pintoihin törmäävää ja kerrostavaa ilmanjakojärjestelmää. Energiatehokkuutta on arvioitu siinä puhallintehon perusteella niin, että teho suhteutetaan saman sisäilmamäärän saamiseksi. Tulosten perusteella suurin osa puhallintehosta kuluu sisäilman sekoittamiseen ja kerrostava

ilmanjakojärjestelmä vaati vähiten energiaa saman sisäilmaympäristön luomiseksi. Sekoittava ilmanjakojärjestelmä kulutti eniten energiaa, jota kului jopa 5,8-kertaisesti kerrostavaan ilmanjakojärjestelmään verrattuna. (Karimipannahin & Mosfegh 2007) Kerrostavan ilmanvaihdon periaate on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Energiätehokkaassa kerrostavassa ilmanjakojärjestelmässä huoneilma jakautuu oleskeluvyöhykkeen puhtaampaan ja ylemmän huoneosan mahdollisia epäpuhtauksia sisältävään kerrokseen (Stravent 2011).

Ilmanjaon suunnittelulla ja toteutuksella on merkittävä rooli, kun puhutaan oleskeluviihtyvyydestä ja koetusta sisäilman laadusta. Ilmanjakomenetelmän valintaan vaikuttaa moni asia. LVI-suunnittelijalla tulee olla tiedossa esimerkiksi tavoiteltavat olosuhteet ja sisäilmastoluokka, tulevat lämpökuormat ja epäpuhtauslähteet, ilmavirtauksen esteet sekä painesuhteet ympäröiviin tiloihin nähden. (Sandberg 2016b)

5.2 Erilaisten tilatyypin suuri määrä ja niiden epäsäännölliset käyttöajat

Sairaalaympäristössä sijaitsee monta erilaista tilatyypin, mikä tarkoittaa sitä, että myös ilmanvaihdollisia vaatimuksia on paljon erilaisia. Esimerkiksi leikkaussaleissa ilmanvaihdolle asetetaan korkeat vaatimukset, kun epäpuhtauslähteistä tulevien mikrobien leviäminen potilaan leikkausalueelle halutaan minimoida. Ohjeistuksien mukaan leikkaushuoneiden ilmanvaihtokertoimen tulee olla 17 1/h, kun potilashuoneissa sen tulee olla 4 1/h. Ilmanvaihdolla ohjataan myös tilojen olosuhteita. Sairaaloiden eri tiloilla on omat vaatimuksensa suhteellisen kosteuden, lämpötilan, suodatusluokan ja ilmanpaineen suhteen. (Ryynänen 2007)

Sairaaloiden eri tilatyypin suuri määrä ja tilojen epäsäännölliset käyttöajat aiheuttavat haastetta ilmanvaihdon suunnittelulle. Haluttujen olosuhteiden takaamiseksi useimmilla tilatyypeillä tulee olla omat ilmanvaihtokoneensa. Esimerkiksi tämän opinnäytetyön kenttäkohteena (case-kohde) olleessa sairaalarakennuksessa ilmanvaihtokoneita on yhteensä 28 kpl. Sairaaloiden ilmanvaihtokoneet ovat suurimmaksi osaksi 24/7 toimivia. Poikkeuksena saattavat olla esimerkiksi toimistotilat. Ilmanvaihdon energiatehokkuuden näkökulmasta yhtälö on vaikea.

6 KYSELY SAIRAALOIDEN TALOTEKNIIKASTA, ILMANVAIHDOSTA JA ENERGIATEHOKKUUDESTA

6.1 Tutkimuskyselyn laatiminen

Osana opinnäytetyötä eri sairaanhoitopiirien kiinteistöpäälliköille ja ilmanvaihdon asiantuntijoille laadittiin tutkimuskysely, jossa selvitettiin heidän vastuullansa olevien sairaaloiden energiankulutuksen seurantaan, LVI-tekniikkaan ja ilmanvaihtoon liittyviä asioita erityisesti energiatehokkuusnäkökulmasta. Lisäksi kyselyssä tiedusteltiin heidän näkemyksiään tulevaisuuden sairaalan LVI-teknisistä ratkaisuista. Kysely laadittiin Webropol-kyselynä.

6.2 Osallistujat

Kyselyyn vastasi yhteensä 11 henkilöä. Vastaajat olivat kiinteistöpäälliköitä sekä ilmanvaihdon asiantuntijoita seuraavista sairaanhoitopiireistä:

- Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiiri – HUS
- Keski-Suomen sairaanhoitopiiri – KSSHP
- Pohjois-Savon sairaanhoitopiiri – PSSHP
- Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiri – VSSHP

6.3 Kysymykset ja tulokset

Laaditut kysymykset liittyivät sairaaloiden energiankulutukseen, LVI-tekniikkaan yleisesti sekä ilmanvaihtojärjestelmiin ja niiden energiatehokkuuteen. Lisäksi kysyttiin tulevaisuuden suuntauksista sairaaloiden taloteknisessä suunnittelussa. Mikäli vastaajalla oli vastualueellaan useampi sairaalakiinteistö, pyydettiin häntä vastaamaan kyselyyn uusimman kiinteistön mukaan, joka on kuitenkin ollut käytössä vähintään vuoden.

Tutkimuskyselyn kysymykset ovat liitteessä 1. Tutkimuskysely sisälsi yhteensä 33 kysymystä.

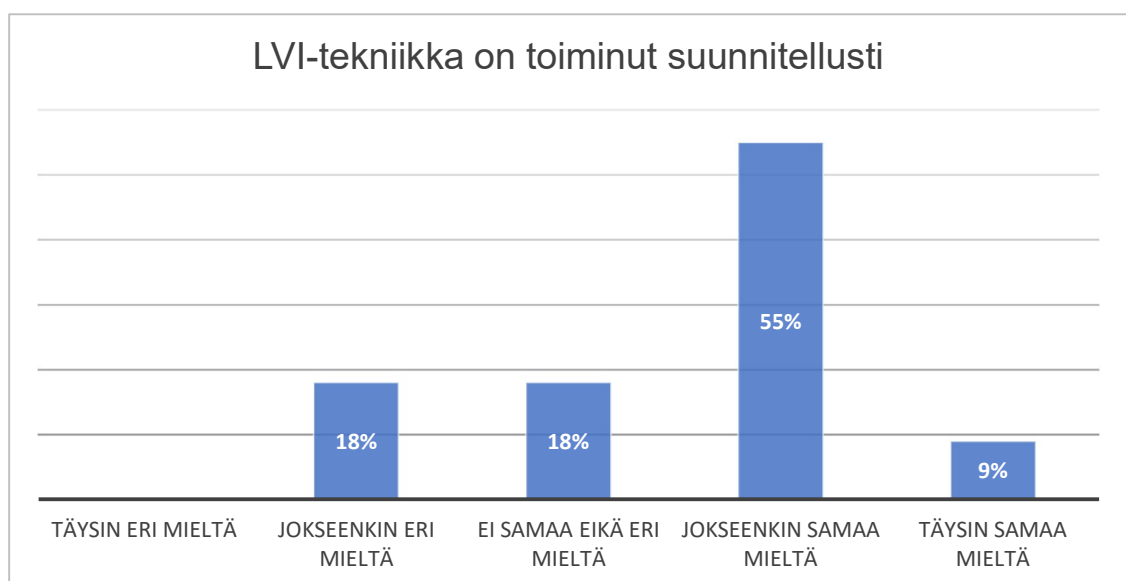
6.3.1 Energiankulutus

Energiankulutusosiossa, kysymykset 2-7, kysyttiin energiankulutusseurannasta ja energiansäästöpotentiaalista sairaaloissa. Tutkimuskyselyn perusteella eri sairaanhoitopiireissä tehdään tiivistä seuranta lämmitysenergian ja sähköenergian kulutuksesta. Kaikki vastaajat kertoivat, että näitä kokonaisuuksia seurataan sairaaloissa. Yli puolet vastaajista kertoivat, että seuranta tehdään useammin kuin neljännesvuosittain. Tarkempaa lämmitys- ja sähköenergian eri osa-alueiden, kuten valaistuksen tai tuloilman lämmityksen, kulutuksen seuranta ei tehty kuin kahdessa kohteessa yhteensä yhdestätoista kohteesta.

Kiinteistön suurimpana energiankuluttajana nähtiin lämmitysjärjestelmä. Eritoten tuloilman lämmitys nostettiin esille yksittäisenä lämmityksen osa-alueena. Lämmityksen osuutta energiankulutuksessa korostettiin erityisesti vanhojen kiinteistöjen kohdalla. Vastaajista 55 % näki lämmityksen merkittävimpänä järjestelmänä, jossa on eniten energiansäästöpotentiaalia. Seuraavaksi eniten eli 27 % vastaajista näki ilmanvaihdossa eniten energiansäästöpotentiaalia.

6.3.2 LVI-tekniikka

LVI-tekniikkaosiossa, kysymykset 8 ja 9, kysyttiin ensin, onko sairaalakiinteistöjen LVI-tekniikka toiminut suunnitellun mukaisesti. Kuviossa 4. on esitetty väittämän tulokset.



Kuvio 4. Tulos väittämälle: Kiinteistön LVI-tekniikka on toiminut suunnitellun mukaisesti.

Vastaajista 55 % oli sitä mieltä, että LVI-tekniikka on jokseenkin toiminut suunnitellun mukaisesti sairaalakiinteistöissä. Vain yksi vastaajista oli väittämän kanssa täysin samaa mieltä. Tuloksen perusteella voidaan todeta, että sairaalan LVI-teknisissä järjestelmissä on lähes poikkeuksetta joitain haasteita. Seuraavan kysymyksen vastausten perusteella suurimmat haasteet ovat olleet automaatiojärjestelmissä, jonka jälkeen toiseksi ja kolmanneksi suurimmat haasteet ovat olleet ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmissä.

6.3.3 Ilmanvaihto ja energiatehokkuus

Ilmanvaihto-osiossa, kysymykset 10-22, kysyttiin laajasti ilmanvaihtojärjestelmistä ja ilmanvaihdon energiatehokkuudesta sairaaloissa. Tutkimuskyselyn perusteella sairaaloiden ilmanvaihtojärjestelmiin tehdään suurimmat muutostyöt isojen saneerausten yhteydessä. Kysyttäessä edellisten ja tulevien lähivuosien suurimpia ilmanvaihtojärjestelmien korjaustoimenpiteitä, esille nousi yksittäisten puhaltimien tai ilmanvaihtokoneiden uusimiset. Syinä ovat olleet puhaltimien rikkoutuminen tai puhaltimien säätömahdollisuuksien parantaminen energiatehokkaammaksi.

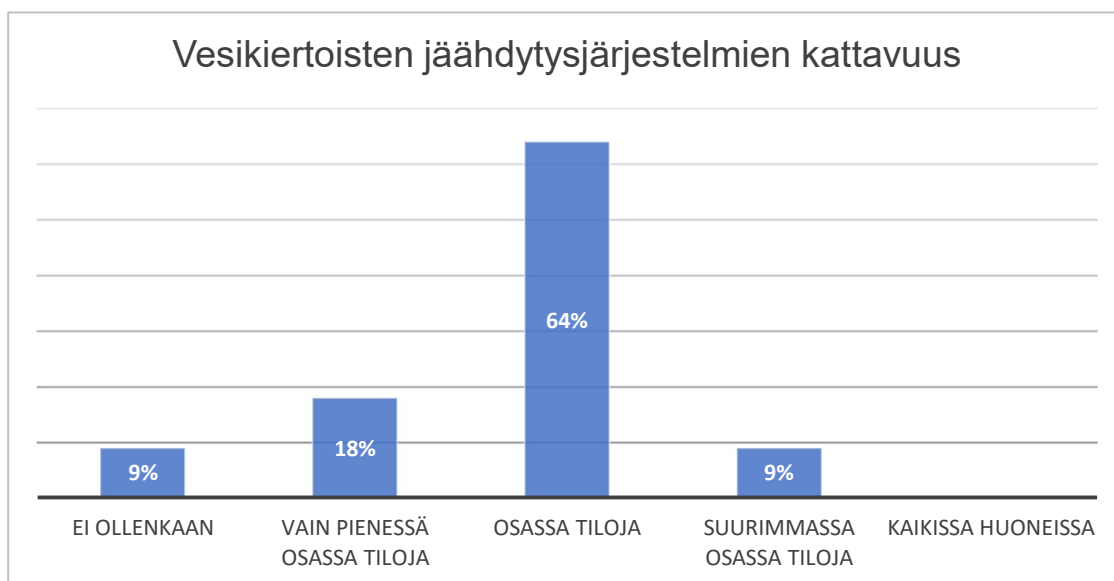
Sairaaloiden käyttäjien eli henkilökunnan ja asiakkaiden kokemukset sairaaloiden sisäilman laadusta ovat olleet pääsääntöisesti hyviä. Vastaajista 57 % kertoi sisäilman laadun olleen jokseenkin hyvä ja 14 % erittäin hyvä tehtyjen kartoitusten perusteella. Sisäilman lämpötila oli koettu suurimmaksi osaksi neutraalina, mutta osittain myös liian lämpimänä.

Ilmanvaihdon energiatehokkuudesta kysyttäessä selvisi, että suurin osa ilmanvaihdon lämmöntalteenotosta on järjestetty nestekiertoisella lämmönsiirinjärjestelmällä. Lisäksi kyselyssä arvioitiin sairaalan ilmanvaihdon lämmöntalteenottojärjestelmien keskimääräiset lämpötilahyötysuhteet ja keskiarvoksi hyötysuhteelle saatiin 56 %.

Kyselyn perusteella osassa sairaaloiden tiloista on ilmanvaihdon ohjaukseen automaattiset jatkuvatoimiset säätöpellit / ilmamääräsäätimet (IMS). Niitä ohjataan yleisimmin joko lämpötilan tai hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Kolmessa kohteessa käytetään myös ihmisen läsnäoloon perustuvaa ilmanvaihdon ohjausta. Puolet vastaajista ilmoitti, että säätöpellit / IMS:t eivät toimi luotettavasti. Syinä olivat peltien jumiutuminen tiettyyn asentoon, epätarkkuus ja huojunta. Jatkuvien teknisten vikojen ja huollon saavutettavuuden vuoksi osassa kohteista säätöpellit oli lukittu auki asentoon.

6.3.4 Jäähdytys

Jäähdytysosiossa, kysymykset 23-27, kysyttiin jäähdytyksen kattavuudesta koko sairaalakiinteistössä sekä kokemuksista järjestelmien toimivuudesta potilashuoneissa. Kuviossa 5. on esitetty, kuinka kattavasti huonekohtaisia vesikiertoisia jäähdytysjärjestelmiä, kuten jäähdytyspalkkeja tai -paneeleita, löytyy sairaalan eri tiloista.



Kuvio 5. Tulos kysymykseen: Arvionne, kuinka kattavasti huonekohtaisia vesikiertoisia jäähdytysjärjestelmiä (esim. jäähdytyspalkkeja tai -paneeleita) löytyy eri tiloista.

Vesikiertoinen jäähdytysjärjestelmä löytyy kaikista kyselyn sairaaloista vähintään pienestä osasta tiloja lukuun ottamatta yhtä sairaalaa. Vastaajista 64 % arvioi järjestelmien kattavan osan tiloista, mutta suurimman osan tiloista enää 9 %.

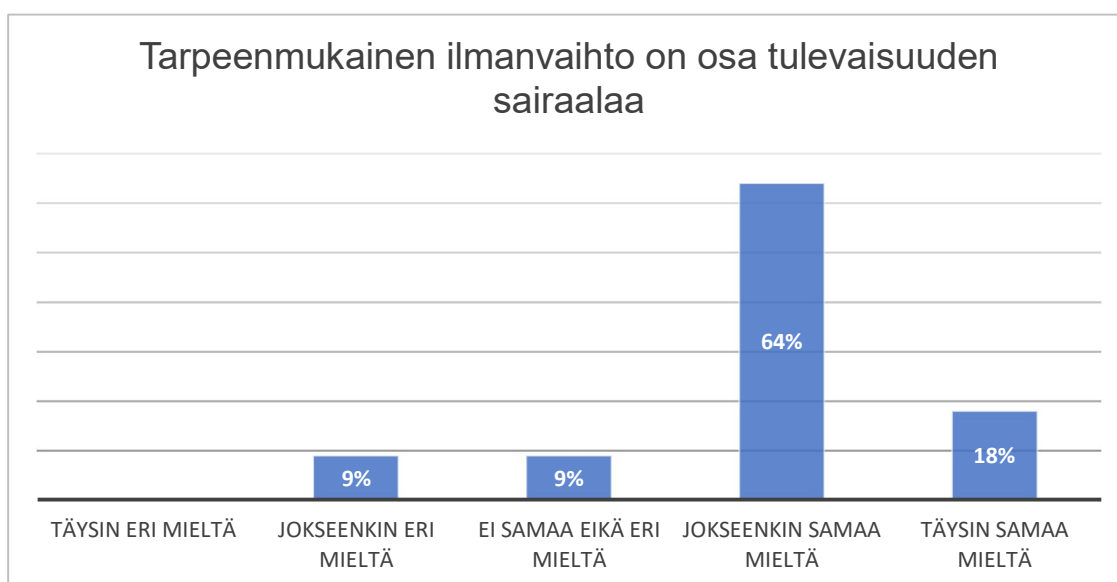
Kysyttäessä jäähdytyspaneelien ja -palkkien soveltuvuudesta potilashuoneisiin 55 % näki palkit ja 64 % paneelit hyvänä vaihtoehtona potilashuoneiden jäähdytykseen. Vastajat, jotka eivät kokeneet niitä hyvinä jäähdytysjärjestelminä potilashuoneisiin, vetosivat jatkuvaan puhdistuksen tarpeeseen, paneelien suureen tilantarpeeseen ja järjestelmien mahdollisesti aiheuttamaan vedon tunteeseen. Lisäksi potilaiden paikallaanolo nähtiin asiana, joka vähentää tarvetta jäähdytykselle.

Kyselyssä kysyttiin myös se, että kuuluuko sairaalakiinteistö kaukojäähdytyksen piiriin. Kohteista 55 %:ssa oli kaukojäähdytys. Määrä tulee todennäköisesti lisääntymään tulevaisuudessa, kun kaukojäähdytyksen alueellinen kattavuus laajenee.

6.3.5 Tulevaisuus

Kysymykset 28-33 liittyivät siihen, millainen tulevaisuuden sairaala tulee olemaan taloteknisestä näkökulmasta. Vastaajista 64 % ilmoitti mielipiteenään, että sairaaloiden talotekniikka tulee muuttumaan huomattavasti lähitulevaisuudessa. Eniten muutosta odotetaan rakennusautomaatiojärjestelmiin, joilla pyritään tulevaisuudessa järjestelmien entistä älykkäämpään ja energiatehokkaampaan ohjaukseen. Myös sairaaloiden ilmanvaihtojärjestelmiin odotetaan kehitystä lähitulevaisuudessa. Lisäksi jäähdytysjärjestelmien uskotaan kehittyvän.

Kyselyssä kysyttiin näkemystä siitä, että onko tarpeenmukainen ilmanvaihto osallisena tulevaisuuden sairaalassa. Väittämän tulokset on esitetty kuviossa 6.



Kuvio 6. Tulos väittämälle: Tarpeenmukainen ilmanvaihto on osa tulevaisuuden sairaalaa (IV-koneiden käyttöaikojen säädöt ja ilmavirran säädöt).

Vastaajista 82 % oli jokseenkin tai täysin sitä mieltä, että tarpeenmukainen ilmanvaihto on osa tulevaisuuden sairaalaa. Kysyttäessä mielipidettä, millä tavalla tarpeenmukaista ilmanvaihtoa ohjataan tulevaisuudessa, vastaajista eniten eli 46 % oli hiilidioksidipitoisuuden perustuvan ohjauksen kannalla ja 27 % lämpötilaan perustuvan ohjauksen kannalla. Loput 27 % jakautuivat aikaohjelmien ja läsnäoloon perustuvan ohjauksen kesken.

Tulevaisuuden sairaalan osalta tiedusteltiin myös vesikiertoisten jäähdytysjärjestelmien käytöstä. Vastaajista 45 % oli jokseenkin tai täysin samaa mieltä, että huonekohtaiset vesikiertoiset jäähdytysjärjestelmät ovat osa tulevaisuuden sairaalaa. Vastaajista 27 % oli jokseenkin tai täysin eri mieltä ko. väitteestä. Loput vastaajista eivät olleet samaa eikä

eri mieltä väitteen kanssa. Tulos kertoo osittain siitä, että tulevaisuuden sairaalassa jäähdytysratkaisujen paras mahdollinen toteutustapa on mahdollisesti vielä löytämättä.

Kysyttäessä, mihin sairaalan ilmanvaihtojärjestelmien suunnittelussa tulisi kiinnittää erityishuomiota tulevaisuudessa, seuraavat asiat nousivat esiin:

- Hyviin sisäilmaolosuhteisiin
- Tilakohtaisten ilmavirtojen ja lämpötilan säätömahdollisuuksiin
- IV-järjestelmien elinkaarikustannuksien laskentaan
- IV-suunnitelmien täsmällisyyteen
- Tilojen muunneltavuuden huomioon ottamiseen IV-järjestelmissä.

6.4 Johtopäätökset

Energiankulutuksen seuranta on tärkeä osa kiinteistön hoitoa. Sitä tehdäänkin aktiivisesti sairaalakiinteistöissä, mutta tulevaisuudessa olisi tärkeää, että kulutuksen eri osat alueet mittaroitaisiin erikseen. Tämän avulla päästään paremmin kiinni siihen, millä osat alueilla olisi parannettavaa energiatehokkuuden osalta.

Oleellista energiankulutusseurannassa on kulutustiedon analysointi eikä pelkästään niiden keruu. Tällöin mahdollisten poikkeamien syyt saadaan selvitettyä. Kulutusseuranta on tehty perinteisesti kuukausitasolla, mutta nykyisin kulutustietojen seuraaminen tuntitasolla on mahdollista. Kulutusseurannan avulla saadaan tietoa laitteiden ja järjestelmien toiminnasta, voidaan seurata tehtyjen toimenpiteiden vaikutusta energiankulutukseen ja verrata kulutusta tavoitetasoon. (Motiva 2018)

Ilmanvaihdon osalta uusimmissa sairaaloissa on panostettu energiatehokkuuteen hyvin. Järjestelmien tekniset ongelmat ovat kuitenkin aiheuttaneet haasteita ja joissain tapauksissa ilmanvaihdon energiatehokkuus on kärsinyt. Esimerkiksi ilmanvaihdon lämmöntalteenoton ja säätöpeltien kanssa oli ollut ongelmia. Nestekiertoisen LTO:n lämpötilahyötysuhteen arvioitiin olevan keskimäärin 56 %, joka tulisi olla parempi tulevaisuuden sairaalassa. Säätöpeltien / IMS-järjestelmien tekniset viat on saatava korjattua, jotta niitä voidaan käyttää jatkossa luotettavasti eikä niitä tarvitse jättää auki asentoon.

Jäähdytysjärjestelmissä on kyselyn tulosten perusteella vielä kehitettävää. Nykyisin tilojen jäähdytys hoidetaan usein pelkästään tuloilmaa jäähdyttämällä. Tämä voi suurentaa ilmanvaihtopuhaltimien kokoa huomattavasti. Jäähdytyspalkit ja -paneelit ovat osan

mielestä mahdollisia ratkaisuja tulevaisuudessa, mutta niihin liittyvät omat ongelmansa. Lisäksi on tärkeää varmistaa, että tilojen jäähdytys ja lämmitys eivät ole yhtä aikaa päällä.

Suurimmat kehitysaskleet tulevaisuuden sairaalan talotekniikassa arvioidaan tulevan rakennusautomaatiojärjestelmissä, joilla on tärkeä rooli lämmitys-, jäähdytys- ja ilmanvaihtojärjestelmien ohjauksessa energiatehokkaasti. Uutta teknologiaa kehitetään rakennusautomaation saralla jatkuvasti.

7 CASE: YLIOPISTOLLINEN SAIRAALA

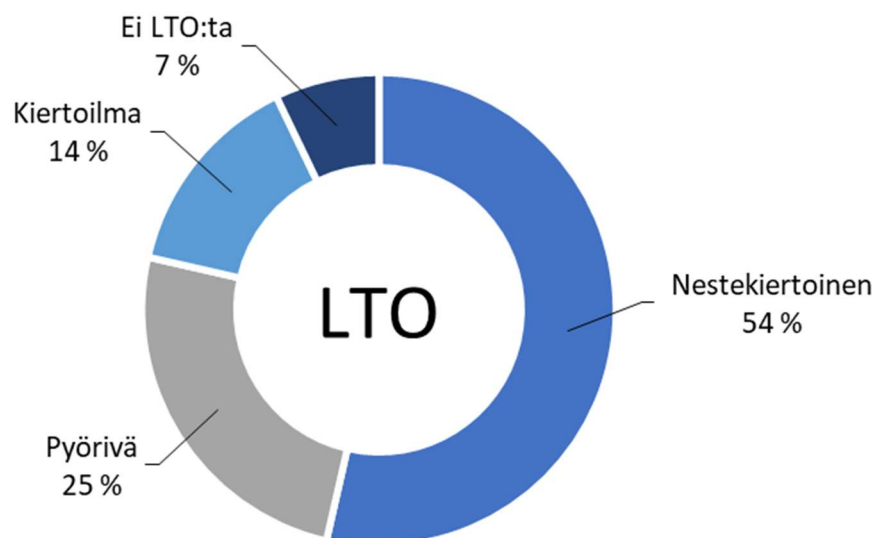
7.1 Kohde

Tämän opinnäytetyön tutkimuskohteeksi valikoitui suuri yliopistollinen sairaalarakennus, joka on rakennettu vuonna 1965. Sairaala koostuu 16. kerroksisesta rakennuksesta, jonka 1–3 henkilöä vetävissä potilashuoneissa on yhteensä 360 vuodepaikkaa. Potilashuoneiden kokonaismäärä on 262. Sairaalan kokonaispinta-ala on 36 500 Brm² ja tilavuus 115 000 m³.

Kohteeseen on tehty peruskorjaus vuosina 2011–2015, jolloin myös sen energiatehokkuutta on parannettu. Toimenpiteinä olivat energiavirtojen kierrätyksen ja talteenoton hyödyntäminen, maalämpöjärjestelmän rakentaminen, ikkunoiden uusiminen sekä aurinkokeräimien asentaminen. Peruskorjauksen myötä energiankulutuksen arvioitiin vähenevän lämmityksen osalta 25 % ja sähkön osalta 5 %. (STT 2015)

Ilmanvaihto

Kohteen IV-konehuone sijaitsee ylimmässä eli 16. kerroksessa. IV-koneita on yhteensä 28 kpl, joista pieni osa sijaitsee myös kellarikerroksessa. IV-koneissa on taajuusmuuttajalla ja AC-moottoreilla toimivat puhaltimet. Tuloilma suodatetaan F7-luokan esisuodattimilla sekä F9-luokan hienosuodattimilla. Poistoilmansuodattimina käytetään F7-luokan suodattimia. Yli puolessa IV-koneista lämmöntalteenottojärjestelmänä käytetään neste-kiertoista lämmönsiirintä ja osassa IV-koneita pyörivää lämmönsiirintä, jotka ovat olleet poissa käytöstä jo yli vuoden koronaviruksen leviämisen välttämiseksi. Käytössä on myös kiertoilmakoneita. Lämmöntalteenottojärjestelmien jakauma on esitetty kuviossa 7.

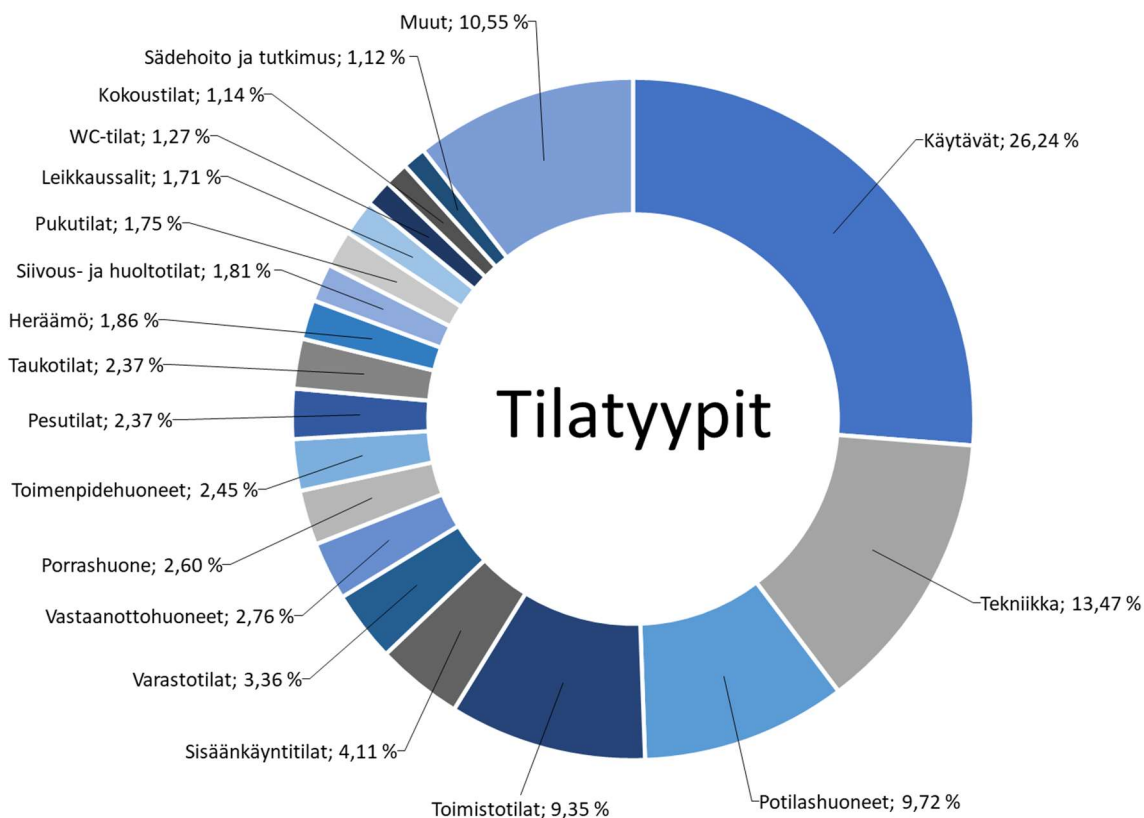


Kuvio 7. Ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenottojärjestelmien jakauma esimerkkisairaalassa.

Nestekiertoista lämmöntalteenottoa käytetään 54 %:sti IV-koneissa, jotka palvelevat muun muassa potilashuoneita, käytäviä, vastaanottohuoneita ja eristyshuoneita. Pyörivä lämmönsiirrin on käytössä 25 %:sti IV-koneissa ja ne palvelevat muun muassa käytäviä, porrashuoneita ja toimistotiloja. Loput IV-koneista ovat kiertoilmakoneita tai niissä ei ole LTO:ta.

7.2 Merkittävimmät tilatyypit

Opinnäytetyössä selvitettiin esimerkkikohteen pohjapiirustuksista, mitkä ovat pinta-alan perusteella sairaalan merkittävimmät tilatyypit. Kohde sisältää yli 30 erilaista tilatyyppeä. Kuviossa 8. on esitetty eri tilatyyppeiden osuus koko sairaalan pinta-alasta. Kolme suurinta tilatyyppeä (käytävät, tekniikka ja potilashuoneet) kattavat noin 50 % koko sairaalan pinta-alasta. Kymmenen suurinta tilatyyppeä kattavat 76 % sairaalan pinta-alasta eli suurimmilla tilatyypeillä on merkittävä rooli, kun puhutaan ilmanvaihtojärjestelmien koosta ja energiankulutuksesta.



Kuvio 8. Esimerkkisairaalan eri tilatyypin prosentiosuus koko pinta-alasta.

Esimerkkisairaalan tilatyypitarkastelun suurimpana tilatyypinä pinta-alan perusteella on käytävät 26 %:n osuudella koko rakennuksen pinta-alasta. Toiseksi suurimpana tilatyypinä on tekniset tilat 13 %:n osuudella. Kolmanneksi suurimpana tilatyypinä kohteessa on potilashuoneet 10 %:n osuudella.

7.2.1 Merkittävimpien tilatyypin ilmamäärät

Sairaaloiden käytävillä on hyvin vaihteleva henkilömäärä eikä siellä yleisesti oleskella pitkiä aikoja yhtä henkilöä kohden. On huomioitava, että käytävät tilatyypinä sisältävät usein myös odotustilat, joissa voidaan oleskella pitempiäkin aikoja. Ilmanvaihdon näkökulmasta sairaalan käytävillä ja erityisesti odotustiloissa tulee olla korkea ilmanvaihtokerroin, jotta mahdolliset epäpuhtauspitoisuudet eivät nousisi korkeiksi. Pitkillä käytävillä tarpeenmukaisen ilmanvaihdon toteuttaminen on haastavaa.

Esimerkkisairaalassa on teknisiä tiloja lähes joka kerroksessa. Suurin tekninen tila on IV-konehuone, joka kattaa koko 16. kerroksen. Ilmanvaihdollisesti tekniset tilat eivät ole merkittävässä roolissa, koska niissä käy pelkästään pieni henkilömäärä harvakseltaan.

Potilashuoneita on kohteen jokaisessa kerroksessa pois lukien 16. kerros sekä pohjakerros. Potilashuoneissa henkilöitä on vaihtelevasti, toisinaan ei ollenkaan ja toisinaan useampi henkilö. Tilojen ollessa tyhjiään, ilmamäärien ei luonnollisesti tarvitsisi olla suuria. Osassa potilashuoneita on lämpötilaohjaukseen perustuva ilmamäärien säätö.

Kolmen suurimman tilatyypin jälkeen mainittakoon toimistotilat, vastaanottohuoneet ja toimenpidehuoneet tilatyypeinä, joissa voisi olla potentiaalia tarpeenmukaiselle ilmanvaihdolle. Toimistotilat kattavat noin 9 %, vastaanottohuoneet noin 3 % ja toimenpidehuoneet noin 2 % koko sairaalan pinta-alasta. Näissä tiloissa on IV-kuvien perusteella suurehkot ilmanvaihtokertoimet ja toisinaan niissä oleskelee henkilöitä epäsäännöllisesti. Potilashuoneiden, toimistotilojen, vastaanottohuoneiden ja toimenpidehuoneiden pinta-alat, keskimääräiset ilmamäärät ja ilmanvaihtokertoimet (ACH) on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Pinta-alaltaan ja ilmanvaihdollisesti merkittävät tilatyypit esimerkkisairaalassa. Tilatyypit ovat pinta-alan mukaisessa suuruusjärjestyksessä. Ilmanvaihtokertoimet ja ilmamäärät on laskettu kymmenen huoneen keskiarvoina.

	Tilatyyppi	Kokonaispinta-ala (m ²)	Prosentti-osuus	Tilojen määrä	ACH (1/h)	Ilmamäärä/tila	
						(m ³ /h)	(dm ³ /s)
1	Potilashuoneet	6681,7	9,72 %	262	3,6	231,5	64,3
2	Toimistotilat	6426,7	9,35 %	423	4,7	179,0	49,7
3	Vastaanottohuoneet	1895,2	2,76 %	128	4,8	177,5	49,3
4	Toimenpidehuoneet	1680,4	2,45 %	64	7,1	464,2	129,0

Taulukon 2. ilmanvaihtokertoimet ja ilmamäärät on laskettu IV-suunnitelmien perusteella kymmenestä eri puolella sairaalaa olevasta huoneesta keskiarvona kutakin tilatyyppejä kohden. Ilmamäärät ylittävät selkeästi FINVACin ja S3-sisäilmastoluokan minimiohjeet. Neliöiden mukaan mitoitettaessa kohteen yhden hengen potilashuoneiden minimisuunnitteluarvoksi saadaan 35 dm³/s, joka on noin puolet todellisesta ilmamäärästä 64 dm³/s. Tämä johtuu siitä, että ilmamäärien mitoitusta on ohjannut kesäaikainen

jäähdytyksen tarve. Jäähdytys on toteutettu ilmanvaihtojärjestelmän avulla jäähdyttäen tuloilmaa. Lisäksi ilmamäärien mitoituksessa on huomioitava huoneiden lämpökuormat.

Tilatyypitarkastelun jälkeen kohteesta valittiin merkittävimpien tilatyypien joukosta potilashuoneet tarkempaan energiatehokkuusanalyysiin, koska niissä nähdään potentiaalia ilmanvaihtojärjestelmän parempaan energiatehokkuuteen ja ne ovat yleisesti merkittävä tilatyypit useissa sairaaloissa. Potilashuoneet kattavat noin 10 % koko esimerkkisairaalan pinta-alasta. Kohteessa on yhteensä 262 potilashuonetta ja ne ovat joko yhden, kahden tai kolmen hengen potilashuoneita. Tulevaisuuden suuntaus on rakentaa yhden hengen potilashuoneita potilasturvallisuuden ja tietoturvan takaamiseksi.

7.3 Potilashuoneiden ilmanvaihdon energiatehokkuuteen vaikuttavat asiat

Ilmajärjestelmät

Kohteen potilashuoneiden ilmavirtoja ohjataan pääsääntöisesti huonekohtaisella VAV-järjestelmällä, jossa ilmavirtoja säädetään huonekohtaisen lämpötilakuormituksen perusteella. Tutkimusosassa tarkasteltiin IMS-peltien toimintaa kevään 2021 aikana kahden kuukauden ajalta. Automaatiodatasta selvitettiin IMS-peltien asennot, tulo- ja poistoilmavirrat sekä lämpötilat kuuden potilashuoneen osalta. Automaatiodata kerättiin aikaväliltä 22.2.-23.4.2021.

Kaikkien tarkastelussa olleiden kuuden potilashuoneen IMS-pellit olivat koko jakson ajan kokonaan auki ja ilmamäärät sekä tulo- että poistoilman osalta tasaiset. IMS-peltejä ohjataan lämpötilan mukaan ja lämpötila pysyi koko ajan asetusarvon 22,5 °C yläpuolella, minkä vuoksi IMS-pellit olivat koko ajan auki asennossa.

Ilmansuodatus

Tornisairaalan potilashuoneiden ilmansuodatus on toteutettu kaksiportaisella tuloilman suodatuksella F7 + F9. Ohjeistuksen mukaan minimivaatimus potilashuoneille on kaksiportainen F5 + F8 suodatus (Ryynänen 2007). Esisuodatuksessa käytetään alhaisen painehäviön suodattimia. Hienosuodattimena käytetään Camfillin Hi-Flo F9-luokan hienosuodattimia. Kyseessä on nykypäivän tekniikalla tehdyt modernit suodattimet, jotka eivät aiheuta ilmanvaihdon energiankulutukseen suurta lisäystä.

Ilmanvaihtopuhaltimet

Potilashuoneiden palvelualueilla toimii yhteensä seitsemän ilmanvaihtokonetta. Ilmanvaihtokoneet ovat vuodelta 2015, jolloin kohteessa tehtiin peruskorjaus ja ilmanvaihtojärjestelmä uusittiin kokonaisuudessaan. Ilmanvaihtopuhaltimet ovat taajuusmuuttajalla ohjattavia AC-moottoreilla toimivia energiatehokkaita kammiopuhaltimia. Puhaltimet ovat kuusi vuotta vanhoja ja vielä elinkaarensa alkupuolella.

Lämmöntalteenottojärjestelmät

Potilashuoneiden ilmanvaihdon lämmöntalteenottojärjestelmänä toimii nestekiertoiset lämmönsiirtimet. Lämmönsiirtimet ovat joko konekohtaiset tai yhteiskäytössä usean ilmanvaihtokoneen kesken. Teknisten haasteiden vuoksi rakennusautomaatiodatasta ei saatu tietoa lämmöntalteenoton mitatuista lämpötilahyötysuhteista.

7.4 Potilashuoneiden olosuhdemittaukset

Kohteen sisäilman laatua mitattiin kuudessa potilashuoneessa eri puolella sairaalaa. Tulevaisuuden suuntaus on rakentaa yhden hengen potilashuoneita potilasturvallisuuden ja tietoturvan takaamiseksi, minkä vuoksi olosuhdemittaukset tehtiin yhden hengen potilashuoneissa. Mittausten avulla tarkasteltiin, mitkä sisäilman tavoitearvot toteutuvat tarkastelujakson aikana. Anturien sijoitussuunnitelma on esitetty taulukossa 3. Antureita oli yhteensä kuusi.

Taulukko 3. Esimerkkisairaalan potilashuoneiden anturien sijoitussuunnitelma.

Potilas- huone	Pinta- ala (m ²)	IV-kone	Raken- nuksen puoli	Tuloilma (dm ³ /s)	Pois- toilma (dm ³ /s)	Automatiikka		Mitat- tavat suureet	Huom.
						IMS	Lämpö- tila		
4. krs	15,8	TK12	Itä	40	40	X	X	T, CO ₂ , RH, TVOC	Poistosta 20 L/s KPH:ssa
5. krs	11	TK10	Länsi	30	30	X	X	T, CO ₂ , RH, TVOC	Koko poisto WC:ssä
6. krs	13,2	TK05	Länsi	35	35	X	X	T, CO ₂ , RH, TVOC	Poistosta 20 L/s KPH:ssa
7. krs	15,8	TK04	Itä	40	40	X	X	T, CO ₂ , RH, TVOC	Poistosta 20 L/s KPH:ssa
8. krs	11	TK10	Länsi	30	30	X	X	T, CO ₂ , RH	Koko poisto WC:ssä
9. krs	13,2	TK13	Länsi	35	35	X	X	T, CO ₂ , RH	Poistosta 20 L/s KPH:ssa

Sijoitussuunnitelman mukaisesti kuuteen yhden hengen potilashuoneeseen asennettiin Miran DLS (Pietiko Oy, Suomi) langattomat anturit olosuhdemittauksia varten noin kahden kuukauden ajaksi mittaamaan sisäympäristön olosuhteita. Asennus tehtiin 16.3.2021 ja seuranta lopetettiin 13.5.2021. Anturit sijoitettiin potilashuoneisiin niin, että ne antaisivat mahdollisimman edustavan kuvan huoneiden olosuhteista. Hyvällä sijoittelulla ihmisten ja lämpökuormien suora vaikutus minimoitiin. Miran-anturit mittasivat lämpötilaa (T), hiilidioksidipitoisuutta (CO₂), suhteellista kosteutta (RH) ja osasta tiloja TVOC-pitoisuutta. Anturit keräsivät dataa yhden minuutin resoluutiolla. Mittaustarkkuudet olivat seuraavat: lämpötila ± 0,3 °C, suhteellinen kosteus ± 2,5 %, hiilidioksidi ± 50 ppm, TVOC Typ. ± 20 %, Max. ± 40 %.

7.4.1 Tulokset

Kohteen olosuhdemittausten tulokset on esitetty taulukossa 4. Mittausten ajankohtana oli 16.3.2021-13.5.2021.

Taulukko 4. Esimerkkisairaalan potilashuoneiden olosuhdemittausten tulokset.

Potilas- huone	Pinta- ala (m ²)	Mittausdata *			
		Temp. (°C)	CO ₂ (ppm)	% RH	TVOC (ppb)
4. krs	15,8	22,7	486	23,5	6568
5. krs	11,0	23,1	481	30,0	3563
6. krs	13,2	24,1	464	29,8	2309
7. krs	15,8	23,2	515	23,6	2316
8. krs	11,0	23,3	479	22,7	
9. krs	13,2	23,4	562	22,1	

* keskiarvo mittausajankohtana 16.3.2021-13.5.2021

Potilashuoneiden lämpötilojen keskiarvot vaihtelivat välillä 22,7...24,1 °C. Lämpötilat ovat kevätkuukausille tyypillisiä sisälämpötiloja. Seuraavassa on esitetty mitattujen sisälämpötilojen suuntaa antava vertailu sisäilmastoluokitukseen. Vertailun tekemiseksi ulkolämpötilana on käytetty tarkastelujakson keskimääräistä ulkolämpötilaa, joka oli vuoden 2021 maaliskuu-toukokuun tarkastelujaksolla Helsingissä 5,1 °C (Ilmatieteen laitos 2021). Sijoitettaessa tämä ulkolämpötila kappaleessa 3.1 esitettyyn kaavaan, saadaan S1-luokan suositellun operatiivisen tavoitelämpötilan vaihteluväliksi 20,9...23,3 °C ja S2-luokan vaihteluväliksi 20,6...24,0 °C. Potilashuoneista neljässä on S1-luokan mukainen tavoitelämpötila tarkastelujakson aikana, yhdessä S2-luokan ja yhdessä S3-luokan mukainen tavoitearvo. Esimerkkikohteessa tuloilman lämmitykselle on määritetty asetusravoksi 22,5 °C, jota korkeampia kaikki mittaustulokset ovat olleet mittausajankohtana.

Hiilidioksidin keskimääräiset pitoisuudet potilashuoneissa olivat välillä 464...562 ppm. Pitoisuudet ovat hyvät, kun huomioidaan, että ulkoilman taustapitoisuus on noin 400 ppm. Keskimääräiset hiilidioksidipitoisuudet alittavat kaikissa huoneissa erittäin hyvän eli S1-luokan sisäilmaston tavoitearvon 750 ppm. Opinnäytetyössä tehdyn laskelman mukaan yhden potilaan vaikutus sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen on 114 ppm. Yhden henkilön vaikutus on laskettu jakamalla paikallaan olevan ihmisen hiilidioksidituotto

0,004 dm³/s (Persily & de Jonge 2017) potilashuoneen tuloilmavirralla 35 dm³/s ja kertomalla tämä 1 000 000:lla, jolloin yksiköksi saadaan ppm.

Suhteellisen kosteuden arvot olivat keskimäärin välillä 22,1...30,0 %, jotka ovat tyypillisiä kevätkuukausien suhteellisen kosteuden pitoisuuksia sisäympäristössä, kun ilmanvaihtojärjestelmässä ei ole kostutusta, kuten tässä tapauksessa. Tällöin sisäympäristön suhteellisen kosteuden arvot vaihtelevat ulkoilman kosteuden ja lämpötilan mukaan. Optimaalinen sisäilmaston suhteellisen kosteuden pitoisuusväli on 40...60 % (Ryynänen 2007).

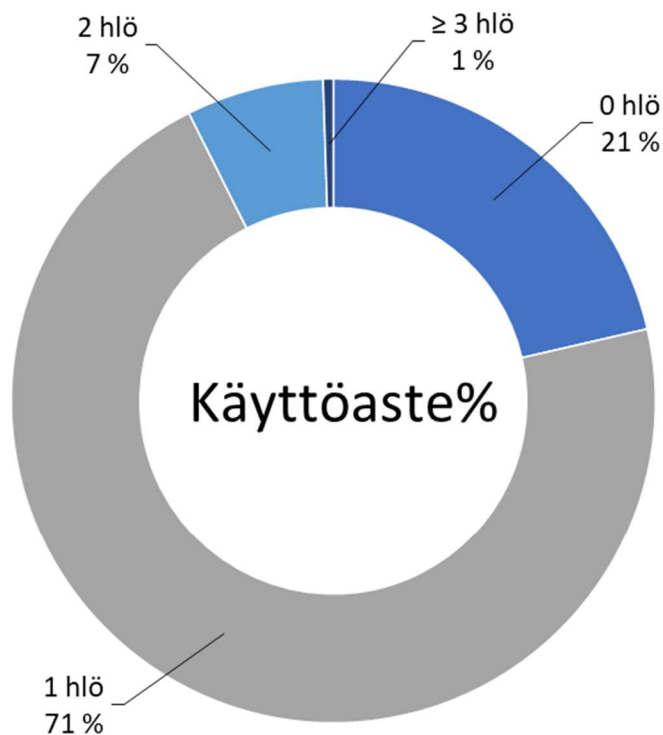
TVOC -pitoisuudet mitattiin neljästä potilashuoneesta ja keskimääräiset pitoisuudet vaihtelivat välillä 2309...6568 ppb. Pitoisuudet ovat koholla todennäköisesti ihmisperäisistä lähteistä tai toiminnasta johtuen, kuten esimerkiksi etanolipohjaisten käsihuuhteiden runsaasta käytöstä johtuen. Tähän viittaa TVOC -pitoisuuksien vuorokausivaihtelut. Yöaikaan pitoisuudet laskevat alle 100 ppb:n ja päivällä nousevat korkeimmillaan anturin maksimiarvoon 60 000 ppb. Etanolin hajukynnys on 55 000 ppb (Szulczynski ym. 2017). Yksikkömuunnoksen tekeminen ppb:stä µg/m³:oon vaatisi tilassa olevien eri VOC -yhdisteiden yksityiskohtaiset tiedot, joita ei tässä opinnäytetyössä tutkittu.

Olosuhdemittausten mittausdata kokonaisuudessaan on esitetty liitteen 2. kuvioissa, joissa data on kymmenen minuutin resoluutiolla.

7.5 Potilashuoneiden ilmanvaihdon energiatehokkuuden parantaminen

Kohde on peruskorjattu vuosina 2011-2015, jolloin koko ilmanvaihtojärjestelmä on modernisoitu. Automaatiodatan ja olosuhdemittausten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että huonekohtainen VAV-järjestelmä ei ole säätänyt ilmavirtoja tarkastelun kohteena olleiden kuuden potilashuoneen kohdalla ollenkaan vaan pitänyt ne vakioarvoissaan kevään 2021 tarkastelujakson aikana.

Yhden hengen potilashuoneiden olosuhdemittausten datasta tehdyn analyysin perusteella potilashuoneet olivat osan ajasta tyhjillään välillä 16.3.2021-13.5.2021, jolloin mitaukset tehtiin. Tarkastelussa olleiden kuuden potilashuoneen keskimääräinen käyttöaste on esitetty kuviossa 9.



Kuvio 9. Esimerkkisairaalan yhden henkilön potilashuoneiden käyttöaste 16.3.-13.5.2021. Data perustuu kuuden potilashuoneen hiilidioksidipitoisuuden perusteella arvioituun henkilömäärään.

Potilashuoneet ovat olleet tyhjillään kevään 2021 mittausajankohtana 21 % ajasta. Huoneissa on ollut yksi henkilö (pelkkä potilas) 71 % ajasta, kaksi henkilöä (potilas + hoitaja / vierailija) 7 % ajasta ja kolme henkilöä 1 % ajasta. Datan perusteella ilmavirtoja voisi laskea osittain silloin, kun huoneet ovat tyhjillään. Tulokset potilashuoneiden käyttöasteista perustuvat mitattuihin hiilidioksidipitoisuuksiin.

Potilashuoneiden ilmanvaihdon energiatehokkuustoimenpiteenä nykyiseen huonekohtaiseen VAV-järjestelmään voitaisiin liittää hiilidioksidipitoisuuden perustuva ohjaus. Järjestelmään asennettaisiin tällöin hiilidioksidianturit. Uudessa järjestelmässä ilmavirta voitaisiin esimerkiksi puolittaa, kun hiilidioksidipitoisuus huoneessa laskee alle 450 ppm:n eli, kun se on tyhjillään.

8 POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä laaditun tutkimuskyselyn perusteella voidaan todeta, että uusimmissa sairaalakiinteistöissä ilmanvaihdon energiatehokkuus on melko hyvällä tasolla. Rajoitteita tutkimuskyselyn johtopäätöksille aiheuttaa verrattain pieni vastaajamäärä (11), jolloin yksittäisellä vastaajalla on ollut melko suuri merkitys kokonaistulokseen. Kyselystä saatiin kuitenkin hyviä suuntaviivoja nykypäivän ja tulevaisuuden sairaalarakennuksen taloteknisten ratkaisujen tasosta. Ilmanvaihtojärjestelmissä on yleisesti käytössä nestekiertoinen lämmöntalteenotto ja puhaltimet ovat suurimmaksi osaksi taajuusmuuttajaohjattavia puhaltimia uusimmissa sairaalakiinteistöissä. Ilmanvaihtojärjestelmien energiatehokkuuden parantamiseen sairaaloissa liittyy omat haasteensa, joihin toivottavasti löydetään vastauksia lähitulevaisuudessa.

VAV- eli muuttuvailmavirtajärjestelmiä on käytössä uusimmissa sairaaloissa osassa tiloista, joissa on henkilö- / lämpökuorman vaihteluita ja niissä on täten nähty potentiaalia energiansäästölle ilmavirtoja säätämällä. Kyselyn perusteella useassa tapauksessa säätöpeltien tekninen toimivuus oli kuitenkin aiheuttanut haasteita. Aika näyttää, onko esimerkiksi ultraääni-ilmamääräsäätimistä tulossa teknisesti luotettavampi laite. Tarvetta teknisesti toimintavarmalle IMS-järjestelmälle on.

Tämän opinnäytetyön tutkimusosiossa selvitettiin kuuden potilashuoneen keskimääräinen käyttöaste prosentti hiilidioksidimittausten perusteella. Käyttöaste oli keskiarvoltaan 79 % kahden kuukauden seurantajaksolla eli huoneet olivat tyhjillään 21 % ajasta. Otos on pieni ja kattaa vain 2,3 % koko sairaalan kaikista potilashuoneista opinnäytetyön rajallisten resurssien ja opinnäytetyöhön käytettävän ajan vuoksi. Näiden tulosten perusteella ilmavirtoja voisi pienentää jatkossa henkilökuorman näkökulmasta esimerkiksi pienentämällä ilmavirtoja puoleen maksimi-ilmavirroista, kun potilashuone on tyhjillään. Uskon, että sairaaloiden kymmenistä eri tilatyypeistä löytyy myös muita tiloja, joissa tarpeenmukainen ilmanvaihto olisi hyvä tekninen ratkaisu.

Turun AMK:n Rakennetun ympäristön tutkimusryhmä on tutkinut potilashuoneiden lisäksi toimenpidehuoneiden, vastaanottohuoneiden, käytävien, potilashuoneiden, eristystilojen ja toimistohuoneiden käyttöastetta sairaalassa. Siinä hiilidioksidipitoisuuden perustuvan henkilömääräarvioinnin tuloksena erityisesti toimenpide-, vastaanotto- ja toimistohuoneiden käyttö oli vähäisempää kuin potilashuoneiden ja eristystilojen useana ajankohtana. Erityisesti normaalien toimistoaikojen ulkopuolella toimenpide-,

vastaanotto- ja toimistohuoneiden käyttö oli tyypillisesti vähäistä. (Kalliomäki ym. 2021) Tässä työssä saadut tulokset potilashuoneiden käyttöasteen osalta olivat linjassa Kalliomäki ym. (2021) tulosten kanssa.

Jäähdytys on osa nykypäivän sairaalaa myös Suomessa. Tulevaisuudessa yhä pidemmät kesän hellejaksot lisäävät tarvetta jäähdytykselle myös sairaaloiden useissa tilatyypeissä, kuten esimerkiksi potilashuoneissa ja lääkevarastoissa. Jäähdytys on toteutettu usein tuloilman avulla ja se on ollut ilmavirtojen mitoittavana tekijänä. Ilmavirta voi olla tällöin moninkertainen verrattaessa henkilökuorman mukaiseen ilmavirtojen mitoittamiseen. Ilmanvaihdon energiatehokkuutta olisi mahdollista parantaa, mikäli IV-koneiden ilmamäärät pienenisivät ja jäähdytys toteutettaisiin muilla keinoin kuin tuloilmaa jäähdyttämällä. Kyselyn perusteella vesikiertoiset jäähdytysjärjestelmät, kuten jäähdytyspalkit ja -paneelit, jakavat mielipiteitä niiden käytettävyydestä sairaaloissa. Uskon kuitenkin, että kun jäähdytyspalkkien tai -paneelien tilantarve on huomioitu hyvin jo suunnitteluvaiheessa ja huolto sekä puhdistettavuus huomioidaan elinkaaren aikana, ne ovat jatkossa hyviä vaihtoehtoja jäähdytysjärjestelmiksi.

Ilmanvaihdon energiatehokkuus sairaaloissa voi olla ja todennäköisesti onkin keskimäärin huonompi, kun puhutaan vanhemmista sairaalakiinteistöistä. Osassa vanhemmista sairaalarakennuksista energiatehokkuutta on jo parannettu tehtyjen peruskorjausten yhteydessä. Case-kohteena ollut sairaala on hyvä esimerkki 1960-luvun sairaalasta, jonka peruskorjauksessa tehtiin mittavia toimenpiteitä energiatehokkuuden parantamiseksi. Vuotuisesti energiansäästöksi arvioitiin 25 % lämmitysenergian ja 5 % sähköenergian osalta (STT 2015). Peruskorjauksessa uusittiin koko ilmanvaihtojärjestelmä, joka on nykyisellään moderni sairaalarakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä.

9 YHTEENVETO

Suurina rakennuksina sairaaloiden energiankulutus on merkittävää. Vaatimukset rakennusten energiatehokkuudelle ovat nousseet ja näin on myös sairaalarakennusten kohdalla. Sairaaloiden ilmanvaihdon energiatehokkuuteen tulee kiinnittää huomiota jatkossa entistä enemmän, koska sillä on merkittävä rooli rakennuksen kokonaisenergiankulutuksesta.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat ilmanvaihdon energiatehokkuuteen sairaalarakennuksissa. Esimerkkikohteena olleen sairaalarakennuksen osalta haluttiin selvittää, miten potilashuoneiden ilmanvaihdon energiatehokkuutta voitaisiin parantaa nykyisiä järjestelmiä hyödyntäen tai niitä tehostamalla.

Sairaaloiden sisäilman tarkat olosuhdevaatimukset aiheuttavat haasteita ilmanvaihdon energiatehokkaalle suunnittelulle ja toteutukselle sairaalarakennuksissa. Ilmanvaihdon energiatehokkuus koostuu ilmajärjestelmistä, ilmanvaihdon lämmöntalteenotosta, ilmanvaihtopuhaltimista ja ilmansuodattimista. Verrattuna moneen muuhun rakennustyyppiin edellä mainituissa asioissa tulee tehdä osittaisia kompromisseja energiatehokkuusnäkökulmasta. Uusimmissa suomalaisissa sairaaloissa käytetään tilatyypistä riippuen sekä vakioilmavirta- että muuttuvailmavirtajärjestelmiä. Yleisimmin käytössä on nestekiertoinen lämmöntalteenotto ja kaksi- tai kolmiportainen tuloilman suodatus. Puhaltimina käytetään energiatehokkaita kammio puhaltimia.

Sairaanhoidopiireille tehdystä tutkimuskyselystä saatiin tietoa, miten tiiviisti sairaaloiden energiankulutusta seurataan, millä tasolla ilmanvaihtojärjestelmät ovat energiatehokkuusnäkökulmasta ja mitä tulevaisuuden sairaalan taloteknisiltä ratkaisuilta voidaan odottaa. Sairaaloiden energiankulutusseurantaa tulisi tarkentaa niin, että lämmitys- ja sähköenergian eri osa-alueita mittaroitaisiin, jolloin potentiaaliset energiatehokkuustoitteet olisi helpommin todettavissa ja mahdolliset poikkeamat havaittavissa. Ilmanvaihtojärjestelmien energiatehokkuus on melko hyvällä tasolla uusimmissa sairaaloissa, mutta lämmöntalteenottojärjestelmien arvioidun keskimääräisen lämpötilahyötysuhteen 56 % tulisi parantua ja säätöpeltien / IMS-järjestelmien tekniset viat olisi selvitettävä. Tulevaisuuden sairaalassa korostuvat lämmitys-, jäähdytys- ja ilmanvaihtojärjestelmien tarpeenmukainen säädettävyys rakennusautomaation avulla.

Tutkimuskohteena olleen sairaalarakennuksen osalta selvitettiin merkittävimmät tilatyy-
pit ja valittiin potilashuoneet yhtenä merkittävimmistä tilatyypeistä tarkempaan energia-
tehokkuusanalyysiin. Ilmanvaihdon tekniset ratkaisut olivat niissä hyvällä tasolla. Opin-
näytetyössä kuuteen potilashuoneeseen tehtyjen olosuhdemittausten hiilidioksidipitoi-
suuksien perusteella, huoneiden keskimääräinen käyttöaste oli 79 % kahden kuukauden
tarkastelujaksolla keväällä 2021. Huoneet olivat tyhjillään 21 % ajasta, jolloin ilmanvaihto
toimi kuitenkin samoilla ilmavirroilla kuin käytössä ollessaan. Ko. potilashuoneissa on
lämpötilaohjaukseen perustuva ilmamäärien säätö. Tulosten perusteella kohteen poti-
lashuoneissa olisi potentiaalia ilmanvaihdon tarpeenmukaistukselle, jossa nykyisen IMS-
järjestelmän käytettävyyttä tulisi tehostaa.

Sairaaloiden ilmanvaihtojärjestelmien suunnittelu on haastavaa, koska rakennuksessa
on useita eri tilatyyppisiä erilaisine käyttöaikoineen. Monella tilatyyppillä on omat erityis-
vaatimuksensa sisäilmaston näkökulmasta. Lisäksi tilojen muunneltavuus on huomioi-
tava suunnittelussa. Nämä aiheuttavat haasteita ilmanvaihdon energiatehokkaalle suun-
nittelulle. On kuitenkin selvää, että tulevaisuudessa sairaaloiden taloteknisessä suunnit-
telussa kiinnitetään entistä enemmän huomiota myös energiatehokkuuteen.

LÄHTEET

2018/2002/EU. 2018. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2002. Viitattu 20.6.2021. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2002&from=EN>

ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2017. 2017. Ventilation of Health Care Facilities. ASHRAE.

DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. 2004. Conversion between $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and ppb. Viitattu 21.6.2021. Saatavissa: https://www2.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/Expost/database/docs/PPM_conversion.pdf

Dynamic Air Corporation. 2012. Energy Recovery Wheel, Purge Section. Viitattu 6.6.2021. Saatavissa: <https://www.dac-hvac.com/energy-recovery-wheel-purge-section/>

FINVAC ry. 2019. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. Viitattu 18.5.2021. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Opas-ilmanvaihdon-mitoitukseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2019b-D9B578DC_66D4_44BC_B1AE_DCAB875D5907-144726.pdf/9f1ca28e-57de-3fa4-5388-a00f4d973afb/Opas-ilmanvaihdon-mitoitukseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2019b-D9B578DC_66D4_44BC_B1AE_DCAB875D5907-144726.pdf?t=1603260098252

Fläkt Group Finland Oy. 2018a. Radiaalipuhallin. Viitattu 17.6.2021. Saatavissa: <http://resources.flaktwoods.com/Perfion/File.aspx?id=25219d21-fc8b-4cc4-851c-b95d64482a33>

Fläkt Group Finland Oy. 2018b. Econet Premium. Viitattu 7.6.2021. Saatavissa: <https://www.flaktgroup.com/api/v1/Documents/d3ad75cc-ce04-4688-b8fb-ccd5988a6175>

Fläkt Group Finland Oy. 2021. Kammiopuhallin. Kuva vastaanotettu sähköpostilla 3.6.2021.

Fläkt Woods Oy. 2015. Puhaltimen vaihto. Opas ilmankäsittelykoneen puhaltimen vaihtoon. Viitattu 2.6.2021. Saatavissa: <http://resources.flaktwoods.com/Perfion/File.aspx?id=70072eb6-48a7-4534-a1e1-9db6709cb22b>

Harju P. 2014. Talotekniikan perusteet 2. PackageMedia Oy.

Huhtaniemi P. 2009. Puhaltimen valintaprosessin tehostaminen tarjouspyyntövaiheessa. Opinnäytetyö. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/3268/Pekka.Huhtaniemi.Insinoorityo.2009.pdf?sequence=1>

HUS. 2021. Meilahden tornisairaala. Viitattu 19.6.2021. Saatavissa: <https://www.hus.fi/potilaalle/sairaalat-ja-toimipisteet/meilahden-tornisairaala>

Ignatius M. 2019. Sairaaloiden ilmanvaihtoratkaisut Suomessa. Opinnäytetyö. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/263937/Ignatius_Mikael.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Ilmasto-opas. 2018. Energiatehokkuustoimista on taloudellista hyötyä. Viitattu 22.5.2021. Saatavissa: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/75ef09a7-01a2-489a-862e-0dce463a8e1c/energiatehokkuustoimista-on-taloudellista-hyotya.html>

Ilmatieteen laitos. 2021. Kuukausitilastot. Viitattu 22.6.2021. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kuukausitilastot>

Isku-Yhtymä Oy. 2020. HUS – Meilahden tornisairaala. Viitattu 22.5.2021. Saatavissa: <https://www.isku.com/fi/fi/hus-meilahden-tornisairaala>

Kalliomäki P.; Koskela H. 2018. Suojaava ilmanjako sairaaloiden eristystiloissa. Turun ammattikorkeakoulun raportteja 244. Saatavissa: <http://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522166715.pdf>

Kalliomäki P.; Maula H.; Koskela H. 2021. Tilojen käyttöaste ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon säästöpotentiaali sairaaloissa. Sisäilmastoseminaari 2021, Sisäilmayhdistys Raportti 39.

Kanerva M.; Ollgren J.; Virtanen MJ.; Lyytikäinen O. 2008. Sairaala infektiot aiheuttavat huomattavan tautitaakan. Suomen Lääkärilehti, 63, 18-19, 1697-1702.

Karimipana T.; Mosfegh B. 2007. Kerrostavan ilmanvaihtojärjestelmän tehokkuus toimistotilassa. Roomvent 2007 konferenssin luentomateriaali. Viitattu 22.5.2021. Saatavissa: http://stravent.fi/uploads/file/pdf/kerrostava_toimistot.pdf

Kasari I. 2010. Teollisuuskiinteistön Ilmanvaihtokoneen LTO-laitteiston hyötysuhteen parantaminen. Kandidaatintyö. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/67965/nbnfi-fe201103181358.pdf?sequence=3>

Keyter Technologies. 2019. The importance of HVAC systems in hospitals. Viitattu 23.5.2021. Saatavissa: <https://www.keyter.com/la-importancia-de-los-sistemas-hvac-en-los-hospitales/>

Kämäräinen V. 2018. Ilmanvaihtokoneiden energiatehokkuuden parantaminen. Opinnäytetyö. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/150897/kamarainen_ville_opinnaytetyo.pdf;jsessionid=1144C87B23A4B47240BE3F74B41F2303?sequence=1

LVI-talotekniikkateollisuus ry. 2009. SFP-opas. Opas ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehon määrittämiseen, laskentaan ja mittamiseen. Viitattu 2.6.2021. Saatavissa: https://filtech.fi/data/sfpopas3_060709.pdf

Lång M. 2017. Energiatehokas puhallinmuutos. Opinnäytetyö. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/128709/Lang_Mikko.pdf?sequence=1

Magill SS.; Edwards JR.; Stat M.; Bamberg W.; Beldavs ZG.; Dumyati G.; Kainer MA.; Lynfield R.; Maloney M.; McAllister-Hollod L.; Nadle J.; Ray SM.; Thompson DL.; Wilson LE.; Fridkin SK. 2014. N Engl J Med 2014; 370:1998-1208. Viitattu 22.6.2021. Saatavilla: <https://www.nejm.org/doi/full/10.1056/nejmoa1306801>

Mastervent Oy. 2021. Ajankohtaista – EC-puhallinseinät. Viitattu 18.5.2021. Saatavissa: <http://www.mastervent.fi/fi/Ajankohtaista.html>

Motiva Oy. 2012. Energiatehokas ilmanvaihto. Viitattu 18.4.2021. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/6147/Energiatehokas_ilmanvaihto2012.pdf

Motiva Oy. 2018. Kulutus seuranta. Viitattu 16.6.2021. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiöt/energiaeksperttitoiminta/lahtotilanteeseen_tutustuminen/kulutus seuranta

Motiva Oy. 2020. Rakentaminen ja rakennukset. Viitattu 24.4.2021. Saatavissa: https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/rakentaminen_ja_rakennukset

- Mourujärvi M. 2017. Asuinkerrostalojen energiatehokkuuden parantaminen. Opinnäytetyö. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/135849/mourujarvi_mika.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pelkkikangas A. 2012. Energiakorjaustoimenpiteet julkisissa rakennuksissa. Diplomityö. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21145/Pelkkikangas.pdf?sequence=3&isAllowed=y>
- Persily A.; de Jonge L. 2017. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*. 2017; 27:868-879.
- Päivän Lehti Digital Oy. 2018. Uusi lastensairaala aukesi. Viitattu 18.6.2021. Saatavissa: <https://www.paivanlehti.fi/uusi-lastensairaala-aukeaa-pikku-potilasta-johdattaa-eteenpain-hannen-valitsemansa-virtuaalinen-hahmo/>
- Rakennustieto Oy. 2018. Sisäilmastoluokitus 2018. RT 07-11299.
- REHVA. 2018. Residential Heat Recovery Ventilation guidebook.
- Roulet C-A.; Krüttli H. 2000. Recommendations for improving performances of air handling units equipped with rotating heat exchangers. ResearchGate. Viitattu 19.6.2021. Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-the-purging-sector-A-part-of-the-outdoor-air-cleans-the-wheel-structure_fig2_299600886
- Ryynänen J. 2007. Sairaalarakennusten suunnitteluohjeita 2007. Opinnäytetyö.
- Sandberg E. 2016a. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1. Talotekniikka-Julkaisut Oy
- Sandberg E. 2016b. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka osa 2. Talotekniikka-Julkaisut Oy
- Sillanpää L. 2012. Sairaalarakennusten energiatehokkuuden kehittäminen rakennusautomaation avulla. Opinnäytetyö. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201204024032>
- Sisäilmayhdistys ry. 2008. Fysikaaliset tekijät. Viitattu 21.6.2021. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Fysikaaliset-tekijat>
- Sisäilmayhdistys ry. 2020. Ilmanvaihdon vaikutus. Viitattu 21.6.2021. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Ilmanvaihdon-vaikutus>
- Stravent Oy. 2011. Kerrostava ilmanvaihto – Luonnonmukaisesti toimiva ilmastointi. Viitattu 23.5.2021. Saatavissa: https://stravent.fi/uploads/file/pdf/stravent_kerrostava.pdf
- STT Viestintäpalvelut Oy. 2015. Peruskorjaus valmis, Meilahden tornisairaala potilaiden käytössä. Tiedote. Viitattu 5.5.2021. Saatavissa: <https://www.sttinfo.fi/tiedote/peruskorjaus-valmis-meilahden-tornisairaala-potilaiden-kaytossa?publisherId=23980819&releaseId=26937956>
- Swegon Oy. 2016. Tarpeenmukainen ilmanvaihto. Viitattu 19.5.2021. Saatavissa: https://www.swegon.com/globalassets/_product-documents/flow-control/demand-controlled-ventilation/_fi/dcv-overview.pdf
- Swegon Oy. 2021. Erilaiset lämmönsiirintyytit. Viitattu 19.6.2021. Saatavissa: <https://www.swegon.com/fi/oppaat/tekniikat/erilaiset-lammonsiirintyytit/>

Szulczynski B.; Wasilewski T.; Wojnowski W.; Majchrzak T.; Dymerski T.; Namiesnik J.; Gebicki J. 2017. Different Ways to Apply a Measurement Instrument of ENose Type to Evaluate Ambient Air Quality with Respect to Odour Nuisance in a Vicinity of Municipal Processing Plants. Viitattu 21.6.2021. Saatavissa: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5712908/>

Tamminen J. 2020. Jatkuvatoimisen mittalaitteen ja keräinmenetelmän vertailu TVOC-mittauksessa. Opinnäytetyö. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/355192/Tamminen_Johanna.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Valvira. 2016. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. Osa III. Asumisterveysasetus § 14-19. Viitattu 22.6.2021. Saatavissa: <https://docplayer.fi/19209414-Asumisterveysasetuksen-soveltamisohje-osa-iii-asumisterveysasetus-14-19.html>

YMa 1010/2017. 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Viitattu 22.6.2021. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22.

Ziehl-Abegg. 2021. FANselect -puhallinvalintaohjelmisto. Saatavissa: <https://www.fanselect.net>

Tutkimuskyselyn kysymykset

Kysely: Sairaalan LVI-tekniikka, ilmanvaihtojärjestelmät ja energiatehokkuus

Olet vastaamassa sairaalakiinteistöjen LVI- ja ilmanvaihtoteknisistä asioista vastaaville kiinteistöpäälliköille ja asiantuntijoille suunnattuun tutkimuskyselyyn. Kyselyn tavoitteena on kartoittaa eri sairaanhoitopiirien sairaaloiden LVI-tekniikan ja erityisesti ilmanvaihtojärjestelmien ratkaisujen tasoa.

Kyselyn täyttämiseen menee aikaa 10-15 minuuttia. Kysymykset 1-27 liittyvät vastuullasi olevan sairaalakiinteistön talotekniikkaan ja kysymykset 28-33 näkemyksiisi siitä, millaisia tulevaisuuden sairaalan talotekniset ratkaisut voisivat olla.

Kyselyn on toteuttanut Turun ammattikorkeakoulun insinööriopiskelija (YAMK) Henri Heinonen ja siitä vastaa Turun ammattikorkeakoulun Rakennetun ympäristön tutkimusryhmän erikoistutkija Petri Kalliomäki. Kysely on osa Henri Heinosen opinnäytetyötä, joka käsittelee ilmanvaihdon energiatehokkuutta sairaalaympäristössä. Opinnäytetyön raportti on tarkoitus julkaista kesällä 2021 ja se tulee nähtäville ammattikorkeakoulujen opinnäytetyötietokantaan Theseukseen (www.theseus.fi).

Vastaukset käsitellään luottamuksellisesti ja siten ettei yksittäinen vastaaja ole tunnistettavissa. Kyselyyn vastaamisen voi halutessaan keskeyttää milloin vain sulkemalla selaimen. Mikäli kyselyn keskeyttää, sen täyttämistä ei voi jatkaa kohdasta, mihin jäi vaan se on aloitettava alusta. Vastaukset tallentuvat vasta, kun olet painanut lopussa "Lähetä" -painiketta.

Vastauksesi on meille tärkeä, kiitos jo etukäteen vastauksestasi!

HUOM: Mikäli vastuullasi on useampi kuin yksi sairaalakiinteistö, vastaa kysymyksiin uusimman rakennuksen mukaan, joka on kuitenkin ollut käytössä vähintään vuoden.

1. Sairaanhoitopiiri

Sairaanhoitopiiri, jossa työskentelet:

ENERGIANKULUTUS

2. Mitä sairaalan energiankulutuksen kokonaisuuksia kohteesta seurataan?

- Lämmitysenergia
- Jäähdytysenergia
- Sähköenergia
- Ei mitään näistä
- En osaa sanoa

3. Seurataanko edellä mainitun lisäksi lämmitys- ja sähköenergian osa-alueita (esim. tilalämmitys ja valaistus) erikseen?

- Kyllä
- Ei
- En osaa sanoa

4. Mitä energiankulutuksen osa-alueita kohteesta seurataan?

- Ilmanvaihto (lämmitys)
- Tilalämmitys (lämmitys)
- Lämmin käyttövesi (lämmitys)
- Valaistus (sähkö)
- LVI-laitteet (sähkö)
- Muut laitteet (sähkö)
- Jokin muu, mikä
- En osaa sanoa

5. Kuinka tiheään energiankulutusta seurataan?

- Vuosittain
- Puolivuosittain

- Neljännesvuosittain
- Useammin
- En osaa sanoa

6. Arviosi, mikä tai mitkä kokonaisuudet ovat kiinteistön merkittävimmät energiankuluttajat?

7. Missä LVI-teknisessä järjestelmässä näet suurimman energiansäästöpotentiaalin?

LVI-TEKNIikka

8. Mitä mieltä olet seuraavasta väittämästä: Kiinteistön LVI-tekniikka on toiminut suunnitellun mukaisesti.

Täysin eri mieltä	Jokseenkin eri mieltä	Ei samaa eikä eri mieltä	Jokseenkin samaa mieltä	Täysin samaa mieltä
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

9. Millä LVI-tekniikan osa-alueilla on ollut suurimmat haasteet (voit valita yhden tai useamman vaihtoehdon)?

- Lämmitysjärjestelmä

- Jäähdytysjärjestelmä
- Vesijohtojärjestelmä
- Viemärijärjestelmä
- Ilmanvaihtojärjestelmä
- Automaatiojärjestelmä
- Jokin muu, mikä:
- Ei erityisiä haasteita

ILMANVAIHTO

10. Mitkä ovat olleet ilmanvaihtojärjestelmän suurimmat tehdyt korjaus- tai parannustoimenpiteet viimeisten viiden vuoden aikana?

11. Mitkä ovat ilmanvaihtojärjestelmän suurimmat suunnitellut korjaus- tai parannustoimenpiteet seuraavan viiden vuoden aikana?

12. Onko käyttäjien (henkilökunta ja asiakkaat) kokemusta sisäilman laadusta tai lämpöoloista kartoitettu viimeisen viiden vuoden aikana?

- Kyllä
- Ei

13. Millaisena käyttäjät ovat keskimäärin kokeneet sisäilman laadun?

Erittäin huonona	Jokseenkin huonona	Ei huonona eikä hyvänä	Jokseenkin hyvänä	Erittäin hyvänä	En osaa sanoa
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

14. Millaisena käyttäjät ovat keskimäärin kokeneet lämpöolot?

Kylmä	Viileä	Hieman viileä	Neutraali	Hieman lämmin	Lämmin	Kuuma	En osaa sanoa
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Kysymykset ilmanvaihdon energiatehokkuuden yleisestä tasosta:

15. Onko puhaltimien moottoreissa taajuusmuuttajalla tai EC-tekniikalla toteutettu pyörimisnopeussäätö?

- Kyllä
- Ei
- En osaa sanoa

16. Onko IV-koneissa yleisesti lämmöntalteenotto?

- Kyllä
- Ei
- En osaa sanoa

17. Mikä lämmöntalteenottojärjestelmä IV-koneissa pääsääntöisesti on?

- Levylämmönsiirrin

- Pyörivä lämmönsiirrin (kiekko)
- Nestekiertoinen lämmönsiirrin
- En osaa sanoa

18. Mikä on arviosi lämmöntalteenoton keskimääräisestä tehokkuudesta?

- < 20 %
- 20 - 30 %
- 30 - 40 %
- 40 - 50 %
- 50 - 60 %
- 60 - 70 %
- 70 - 80 %
- 80 - 90 %
- En osaa sanoa

19. Säädetäänkö joidenkin tilojen ilmamääriä automaattisilla jatkuvatoimisilla säätöpelleillä / IMS:illä (ilmamääräsäätimillä)?

- Kyllä
- Ei
- En osaa sanoa

20. Millä perusteella säätöpeltejä / IMS:iä ohjataan (voit valita yhden tai useamman vaihtoehdon)?

- Aikaohjelmien
- Lämpötilan
- Hiilidioksidin

- VOC-yhdisteiden
- Läsnäolon
- Jokin muu, mikä
- En osaa sanoa

21. Toimivatko säätöpellit / IMS:t luotettavasti?

- Kyllä
- Ei
- En osaa sanoa

22. Minkälaisia ongelmia säätöpeltien / IMS:ien toiminnassa on esiintynyt?

JÄÄHDYTYS

23. Arvionne, kuinka kattavasti huonekohtaisia vesikiertoisia jäähdytysjärjestelmiä (esim. jäähdytyspalkkeja tai -paneeleita) löytyy eri tiloista:

- Kaikista huoneista
- Suurimmasta osasta tiloja
- Osasta tiloja
- Vain pienestä osasta tiloja
- Ei ollenkaan
- En osaa sanoa

24. Näetkö / näkisitkö jäähdytyspalkit hyvänä jäähdytysjärjestelmänä potilashuoneissa?

- Kyllä
- Ei
- En osaa sanoa

25. Näetkö / näkisitkö jäähdytyspaneelit hyvänä jäähdytysjärjestelmänä potilashuoneissa?

- Kyllä
- Ei
- En osaa sanoa

26. Miksi et näe jäähdytyspalkkeja tai -paneeleita hyvänä jäähdytysjärjestelmänä potilashuoneissa?

27. Kuuluuko rakennus kaukojäähdytyksen piiriin?

- Kyllä
- Ei
- En osaa sanoa

TULEVAISUUS

28. Koetteko, että sairaaloiden talotekniikka tulee muuttumaan

huomattavasti lähitulevaisuudessa?

Liite 1 (10)

- Kyllä
- Ei
- En osaa sanoa

29. Millä talotekniikan osa-alueilla odotatte muutosta / kehitystä?

30. Mitä mieltä olet seuraavasta väittämästä: Tarpeenmukainen ilmanvaihto on osa tulevaisuuden sairaalaa (eli IV-koneiden käyttöaikojen säädöt ja ilmavirran säädöt).

Täysin eri mieltä	Jokseenkin eri mieltä	Ei samaa eikä eri mieltä	Jokseenkin samaa mieltä	Täysin samaa mieltä
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

31. Minkä tavan koette hyödyllisimmäksi tarpeenmukaisen ilmanvaihdon ohjaukseen?

- Aikaohjelmat
- Lämpötila
- Hiilidioksidi
- VOC-yhdisteet
- Läsnäolo
- Jokin muu, mikä:
- En osaa sanoa

--

32. Mitä mieltä olet seuraavasta väittämästä: Huonekohtaiset vesikiertoiset jäähdytysjärjestelmät ovat osa tulevaisuuden potilashuoneita.

Täysin eri
mieltä

Jokseenkin eri
mieltä

Ei samaa eikä eri
mieltä

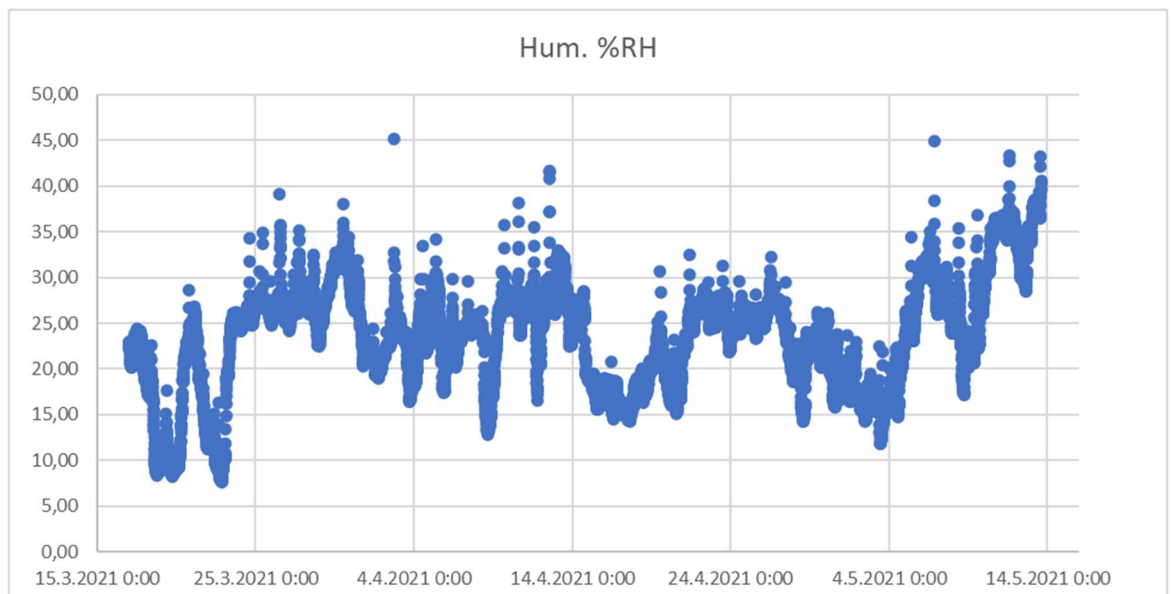
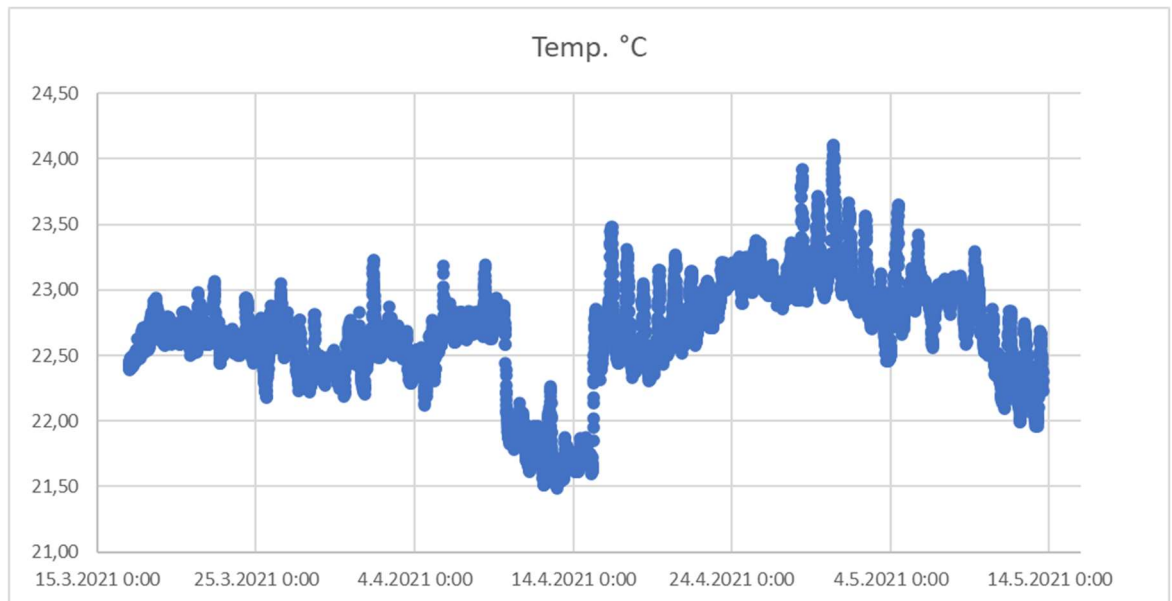
Jokseenkin samaa
mieltä

Täysin samaa
mieltä

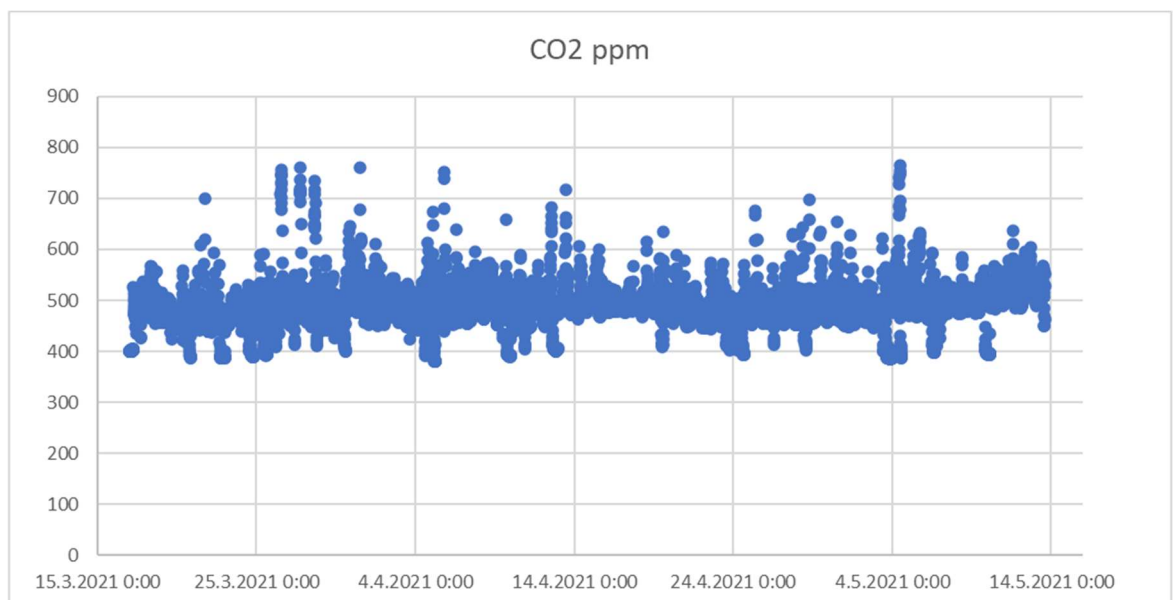
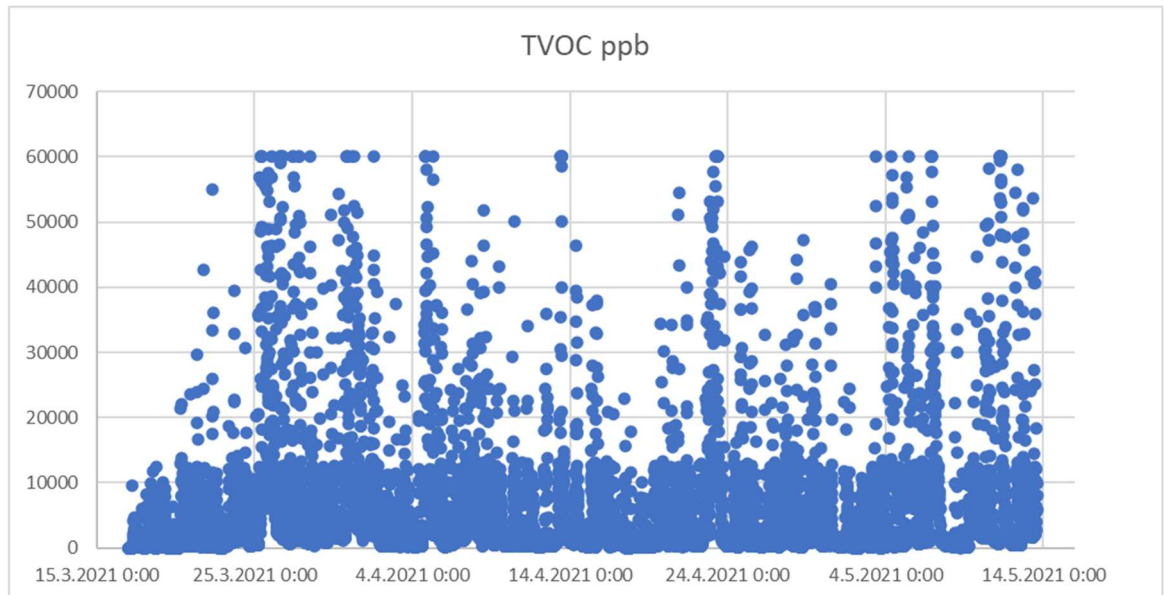
33. Mihin tulevaisuuden sairaalan ilmanvaihdon suunnittelussa tulisi kiinnittää erityishuomiota?

Kuuden potilashuoneen olosuhdemittaustulokset, kevät 2021

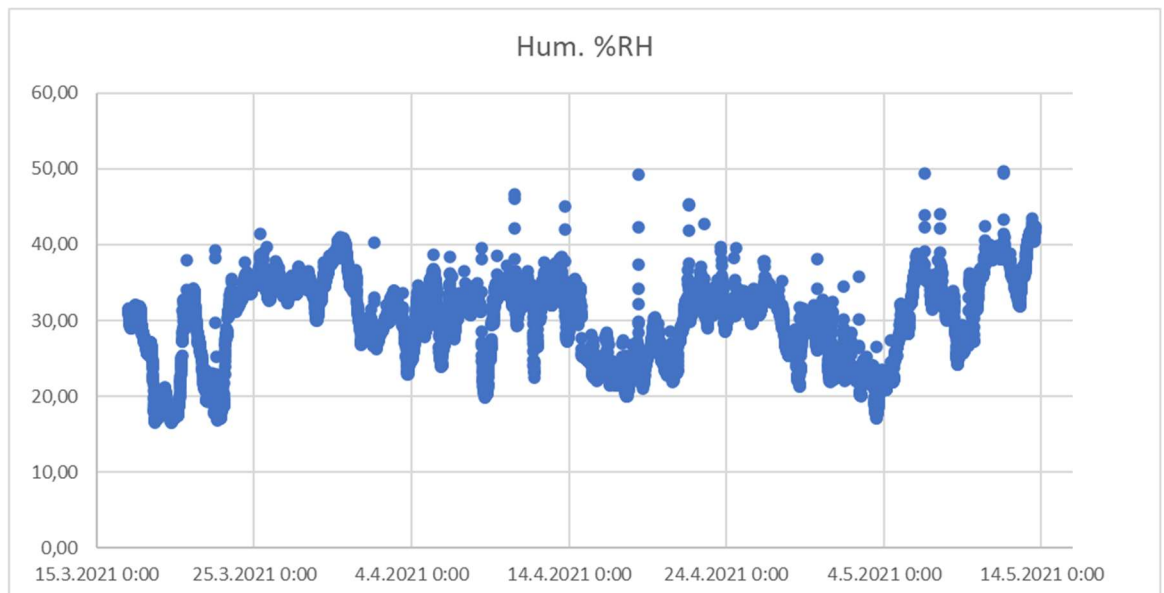
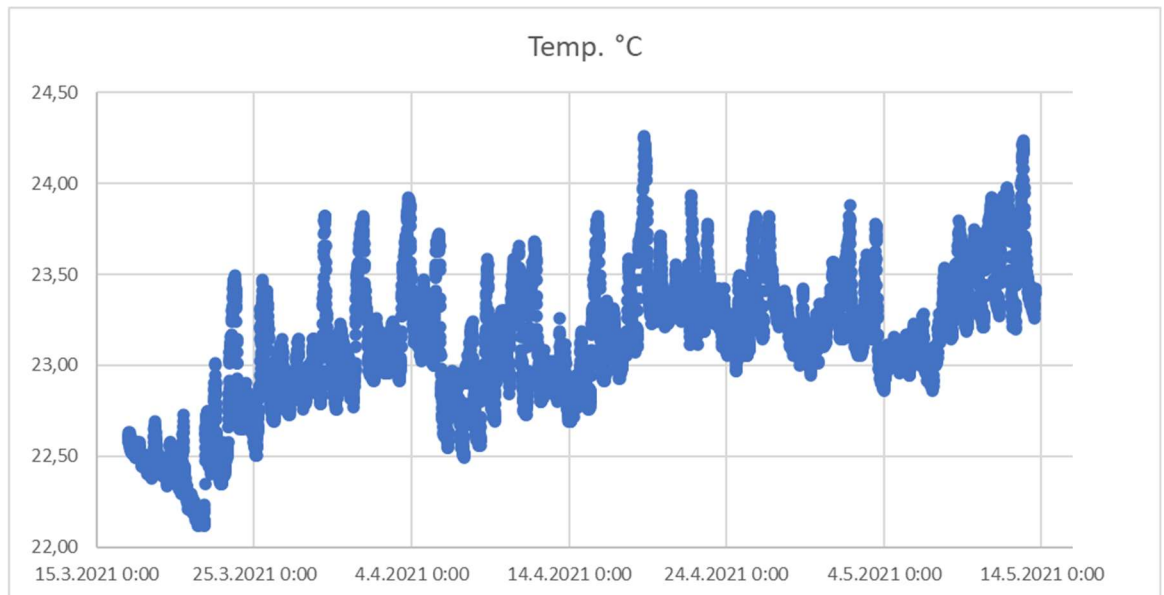
Potilashuone 4 krs.



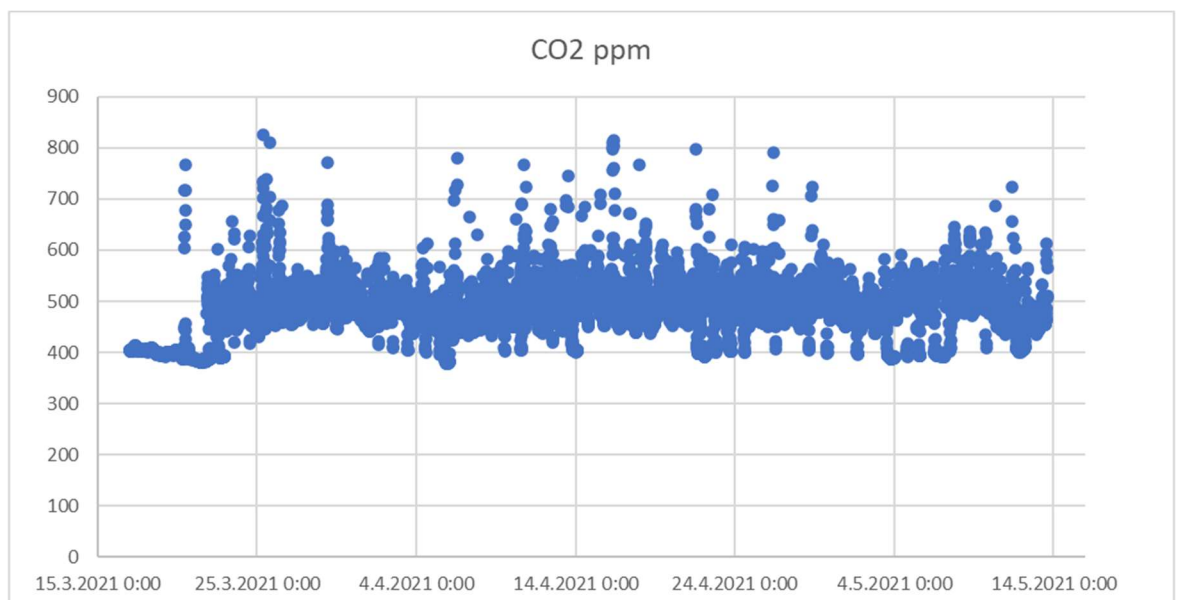
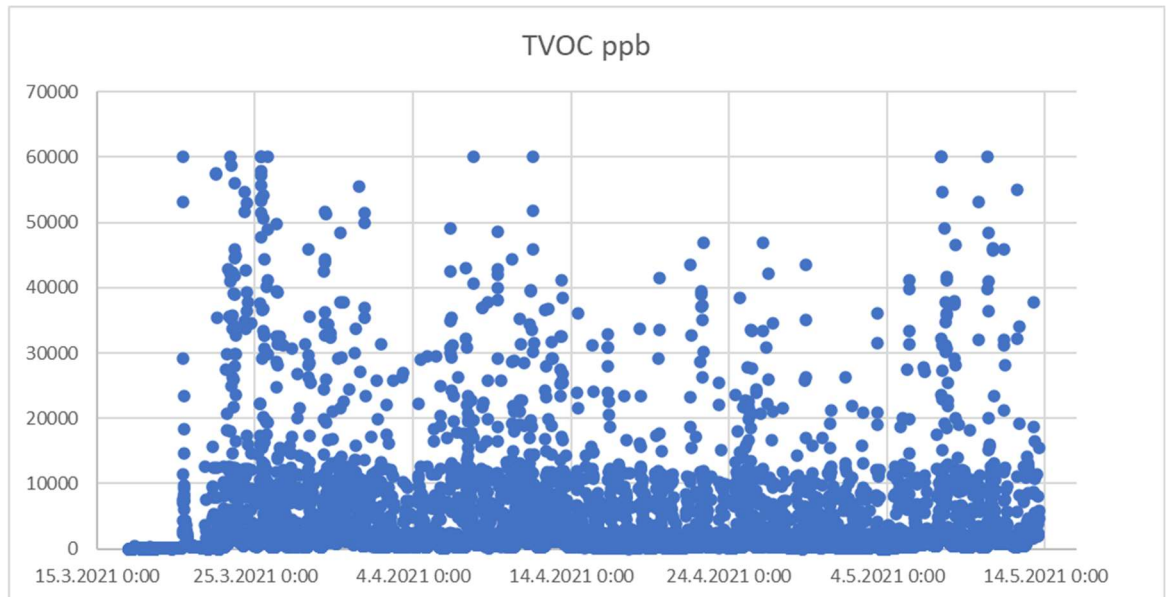
Potilashuone 4 krs. (jatkuu)



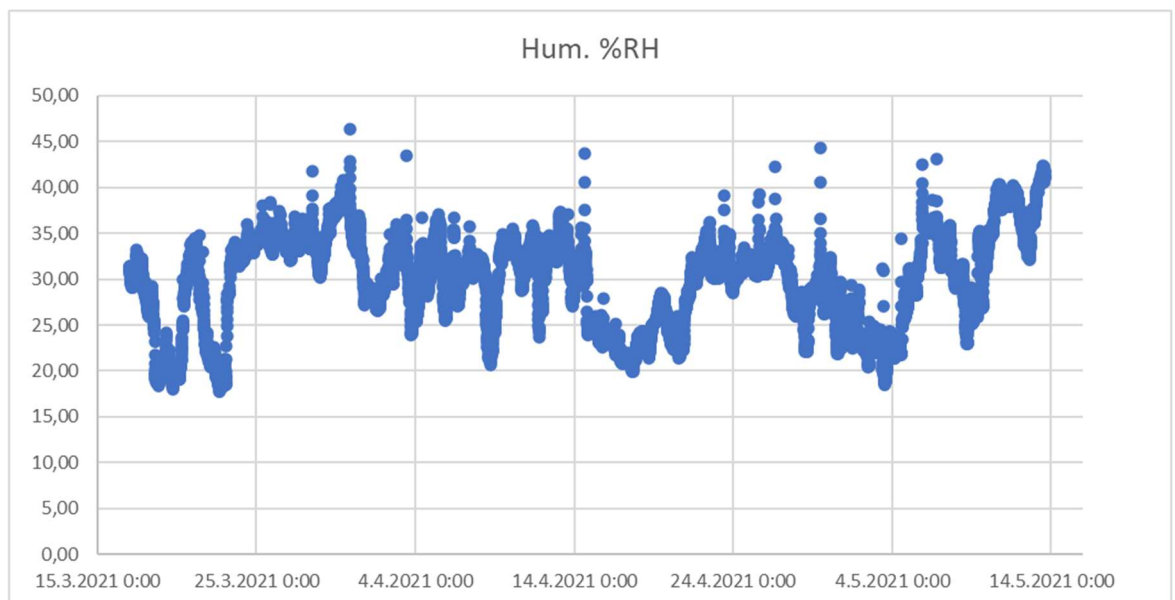
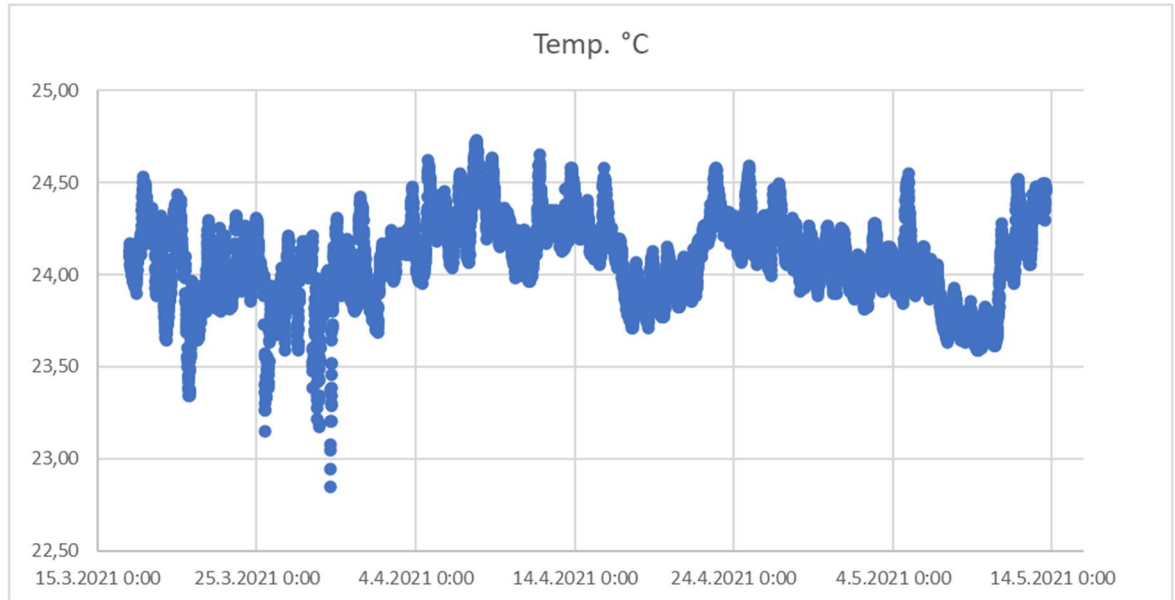
Potilashuone 5 krs.



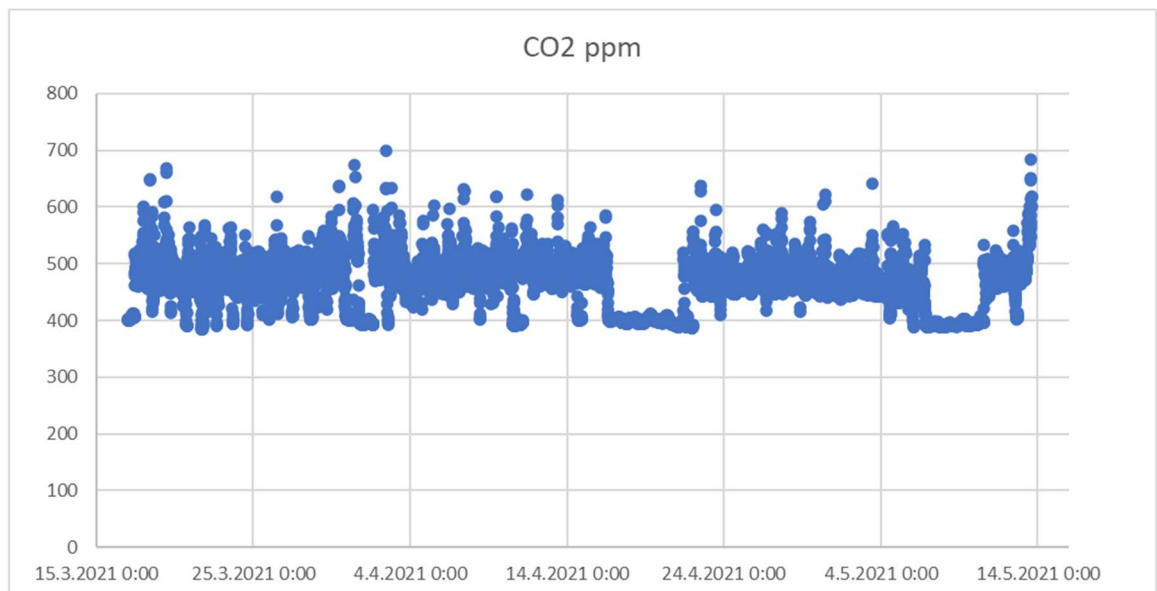
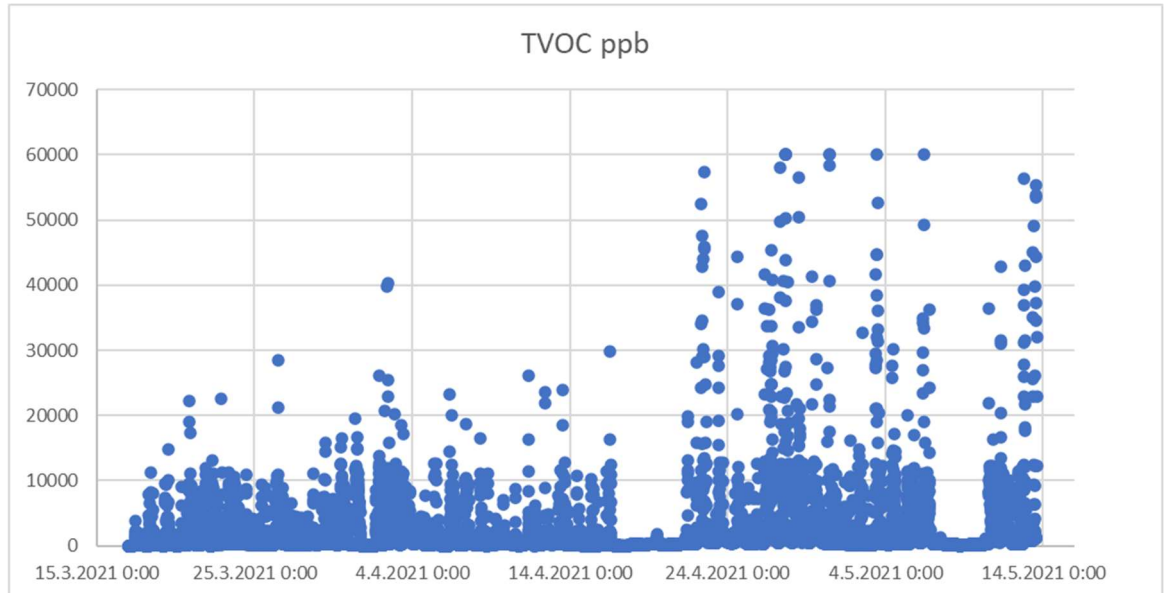
Potilashuone 5 krs. (jatkuu)



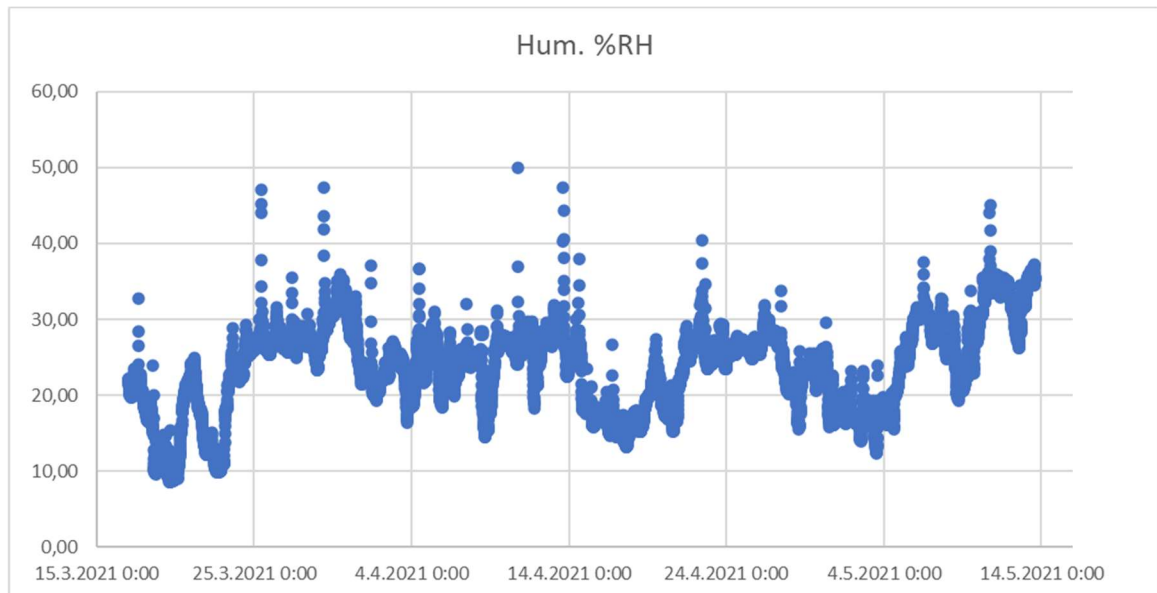
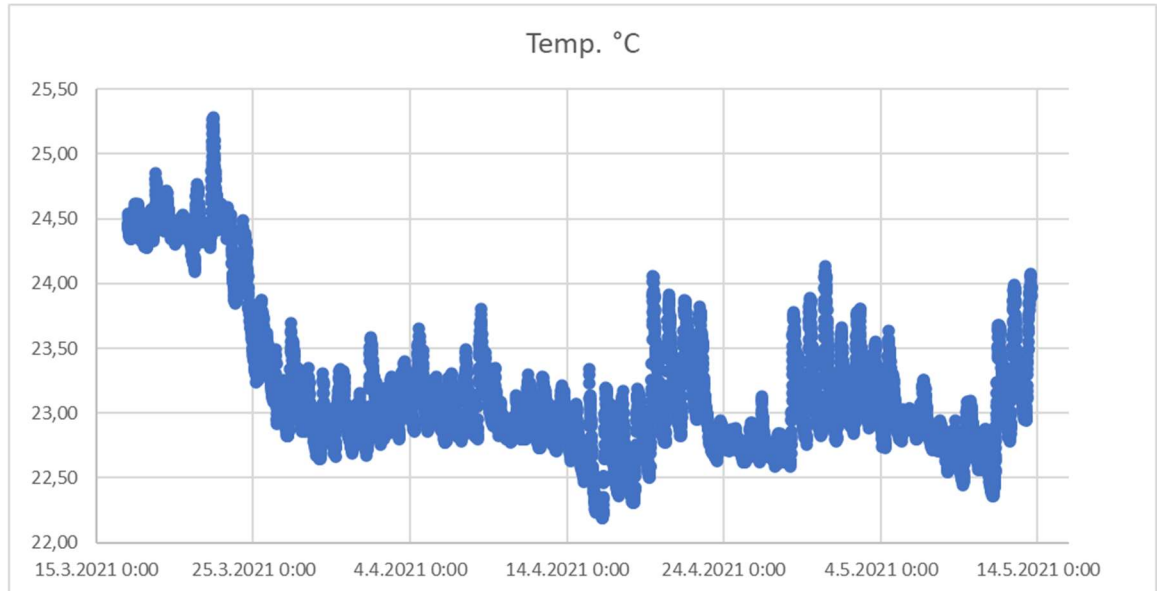
Potilashuone 6 krs.



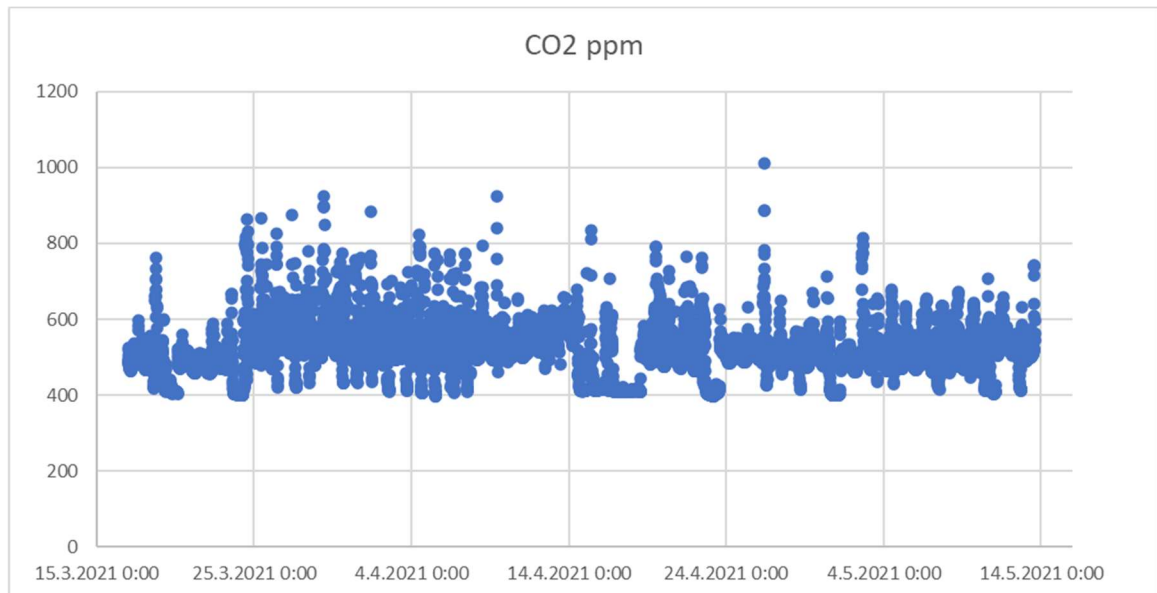
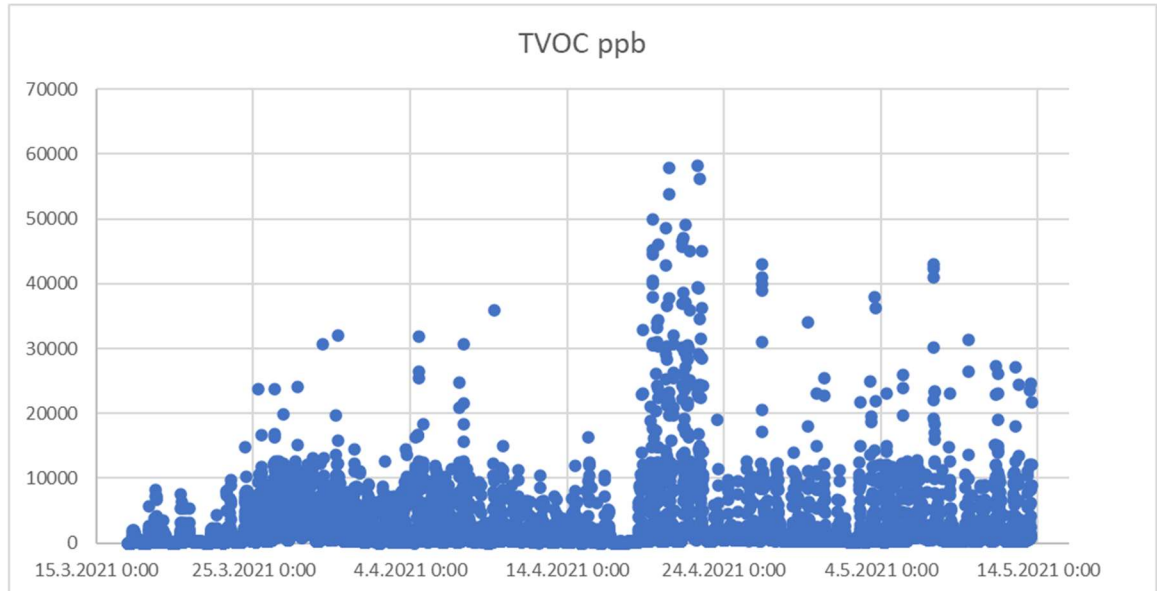
Potilashuone 6 krs. (jatkuu)



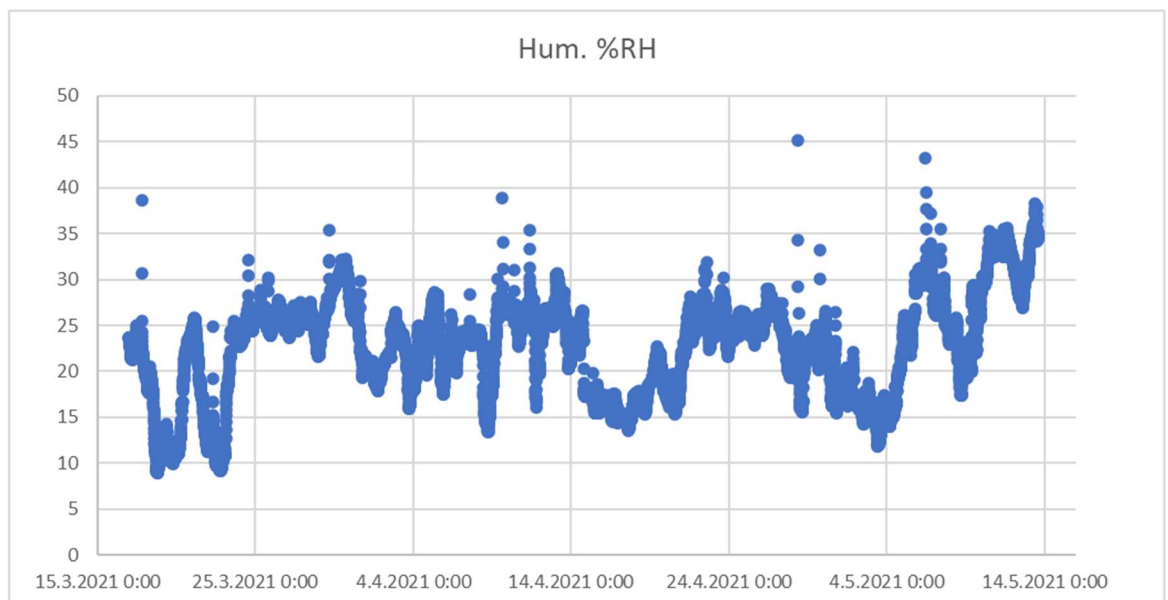
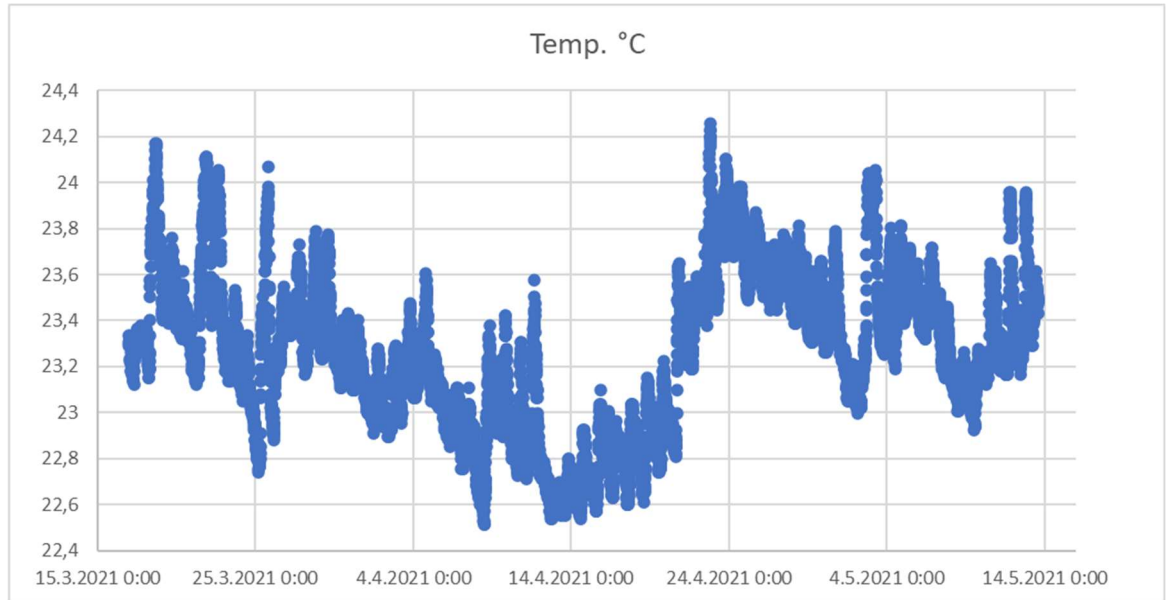
Potilashuone 7 krs.



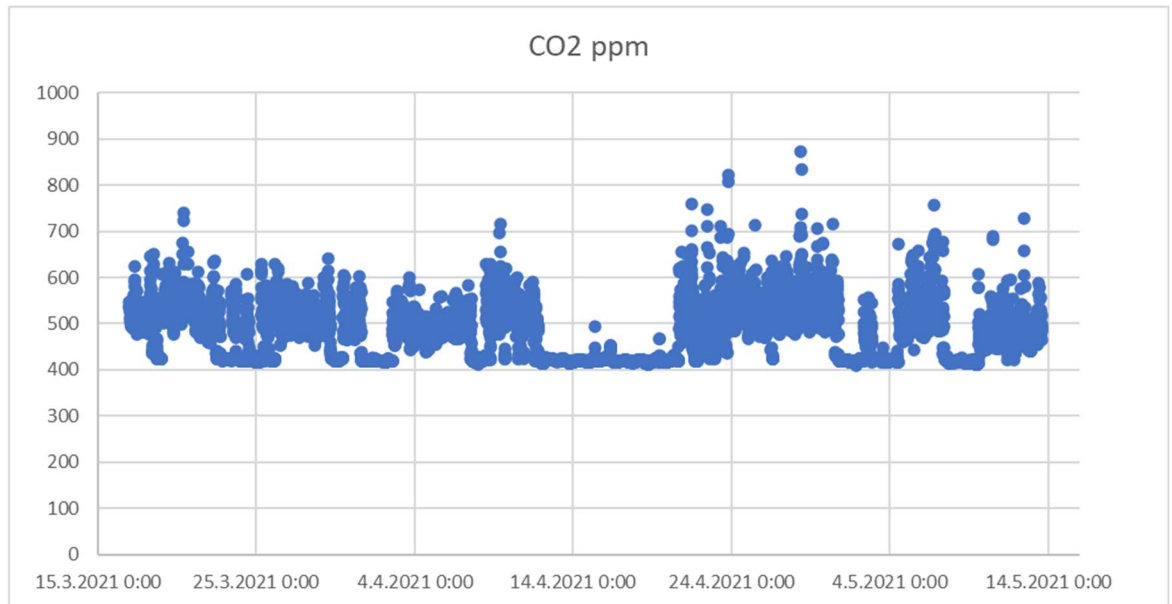
Potilashuone 7 krs. (jatkuu)



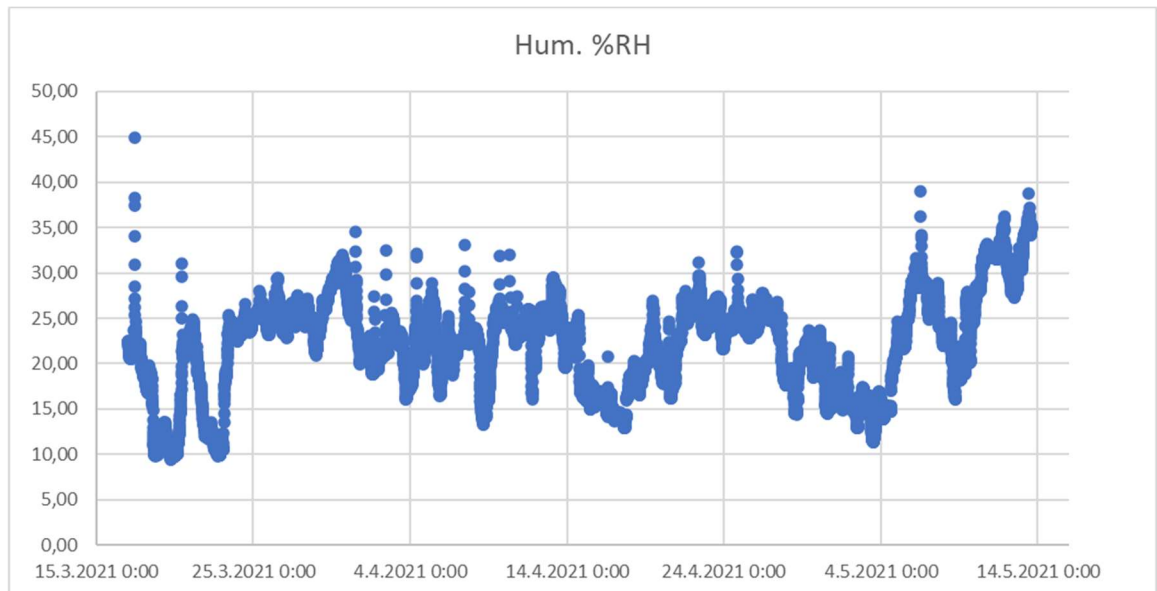
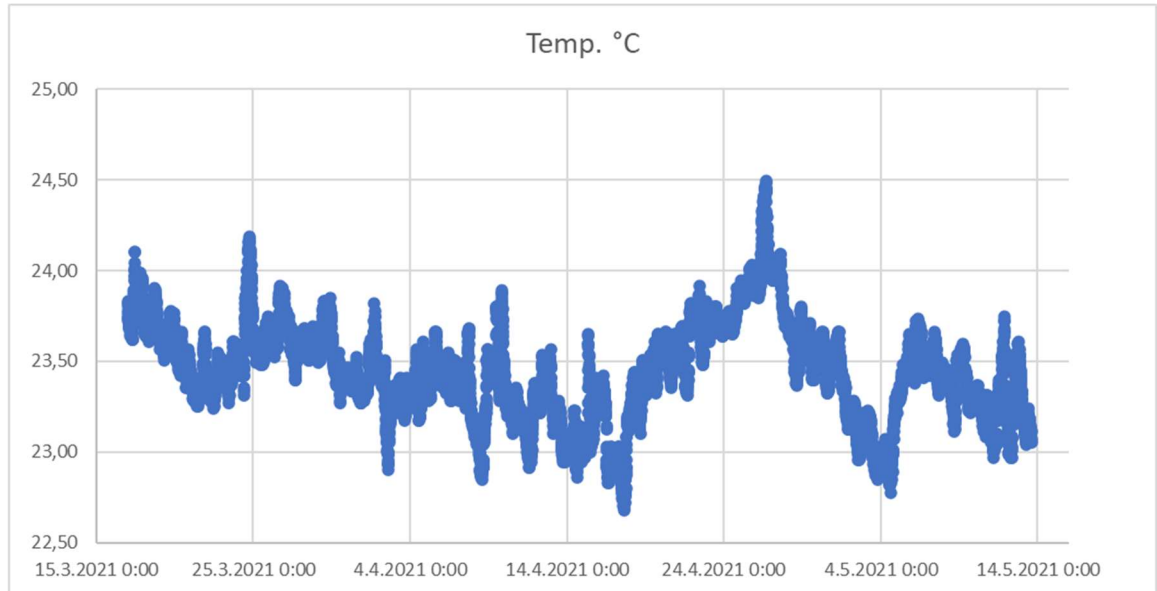
Potilashuone 8 krs.



Potilashuone 8 krs. (jatkuu)



Potilashuone 9 krs.



Potilashuone 9 krs. (jatkuu)

