

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

RAKENNUSAUTOMAATIO ENERGIA- TEHOKKUUDEN NÄKÖKULMASTA

TEKIJÄ Niko Leppänen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma			
Työn tekijä Niko Leppänen			
Työn nimi Rakennusautomaatio energiatehokkuuden näkökulmasta			
Päiväys	1.3.2023	Sivumäärä/Liitteet	42/0
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Voimatel Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön aiheena on rakennusautomaatio ja sen tarkasteleminen energiatehokkuuden näkökulmasta, joka on työn kirjoitushetkellä hyvin ajankohtainen. Työn toimeksiantajana oli Voimatel Oy:n Energiapalveluliiketoimintayksikkö, joka on mukana Horisontti Eurooppa -puiteohjelmaan sisältyvässä STREAM-kehityshankkeessa. Hankkeen tavoitteena on kehittää asiakaskesteistä ja joustavaa energiaekosysteemiä, jossa rakennusautomaatio on keskeisessä roolissa. Opinnäytetyön tavoitteena oli muodostaa työn toimeksiantajalle kokonaiskuva rakennusautomaatiojärjestelmistä ja niiden toiminnoista, joilla rakennuksen energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa. Työn tarkoitus on toimia toimeksiantajan tukiprojektina STREAM-hankkeessa.</p> <p>Työ toteutettiin tutkielmaluonteisesti tutustumalla aihetta käsittelevään kirjalliseen aineistoon. Työ ei sisältänyt kokeellista osuutta. Opinnäytetyössä käsiteltiin toimeksiantajaa kiinnostavia asioita ja teemoja. Työssä käsiteltiin rakennusautomaatiojärjestelmän rakennetta, laitteita, tiedonsiirtoa, säätöjä ja ohjauksia sekä vesikierroksen lämmityksen ja ilmanvaihtokoneen toimintaa säätökaavioiden avulla. Lisäksi työssä tarkasteltiin energiatehokkuusteemaa lainsäädännön ja energiatehokkuusstandardin näkökulmista sekä selvitettiin rakennusautomaatiojärjestelmän toimintoja, joilla on vaikutusta energian kulutukseen ja energiatehokkuuteen.</p> <p>Työn tuloksena toimeksiantaja sai kaipaamaansa tietoa rakennusautomaatiosta. Lopputuloksena syntyi tietopaketti rakennusautomaatiosta, jota toimeksiantajayrityksen lisäksi voivat hyödyntää myös muut, joita aihe kiinnostaa. Työn mahdollisena jatkokehityksenä voisi olla tarkempi syventyminen ohjelmistorajapintoihin ja selvittäminen, kuinka kulutusjousto eli sähköenergian pörssihintoihin perustuvat ohjaukset saadaan käytännössä integroitua jo olemassa oleviin rakennusautomaatiojärjestelmiin.</p>			
Avainsanat rakennusautomaatio, HVAC, energiatehokkuus			

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author Niko Leppänen	
Title of Thesis Building Automation from the Energy Efficiency Point of View	
Date 1 March 2023	Pages/Appendices 42/0
Client Organization /Partners Voimatel Oy	
<p>Abstract</p> <p>The subject of this thesis is building automation systems and examining them from the energy efficiency point of view, which is a very current theme at the time of writing. The client organization was the Energy Services Unit of Voimatel Oy which is involved in the STREAM project which is a part of Horizon Europe funding program. The objective of the STREAM project is developing an innovative and flexible energy ecosystem in which building automation has an important role. The aim of the thesis was to provide the client with an overall picture of building automation systems and the building automation system functions, which can be used to improve the energy efficiency of buildings. The purpose of the thesis was to be a support project for the client in the STREAM project.</p> <p>The thesis was carried out by getting familiar with the existing written material about the topic and empirical experiments were not made. The thesis was written based on the issues and themes that the client found interesting. The focus was on the structure of the building automation system, devices, data transmission, controls, as well as the operation of the water heating system and ventilation machine which were demonstrated using control diagrams. In addition, energy efficiency was examined from the perspective of the current legislation and the energy efficiency standard. In addition, the functions of the building automation system that have an impact on energy consumption and energy efficiency were examined.</p> <p>As a result, the client company got the desired information about building automation systems. The result was an informational written work about building automation which can be used by the client and by others who are interested in the topic. One possible further development of the thesis could be to take a closer look at the application programming interfaces and to find out how the energy consumption flexibility i.e., automated control inputs based on the exchange prices of electric energy can practically be integrated into already existing building automation systems.</p>	
<p>Keywords</p> <p>building automation and control, HVAC, energy efficiency</p>	

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	9
1.1	Työn tavoite	9
1.2	Aiheen ajankohtaisuus.....	9
1.3	Toimeksiantajan esittely	10
2	YLEISTÄ RAKENNUSAUTOMAATIOSTA.....	11
2.1	Määritelmä	11
2.2	Historiakatsaus	11
2.3	Rakennusautomaatiojärjestelmän tavoitteet.....	12
3	RAKENNUSAUTOMAATIOJÄRJESTELMÄN RAKENNE.....	13
3.1	Automaatiojärjestelmän tasot	13
3.2	Hallintotaso	13
3.3	Automaatiotaso.....	13
3.3.1	Valvonta-alakeskukset.....	14
3.3.2	Hajautettu järjestelmä	16
3.4	Kenttätaso.....	17
3.4.1	Anturit ja lähettimet.....	17
3.4.2	Toimilaitteet.....	18
3.4.3	Moottorikäytöt.....	19
3.4.4	Säätimet	20
3.4.5	Energiamittarit.....	21
4	TIEDONSIIRTO RAKENNUSAUTOMAATIOSSA.....	22
4.1	Topologia	22
4.2	Tiedonsiirtoprotokolla.....	23
4.3	Yleisimpiä protokollia ja väylätekniikoita	23
4.3.1	TCP/IP-protokollapino	23
4.3.2	BACnet	23
4.3.3	Modbus.....	24
4.3.4	M-bus	24
4.3.5	KNX	25
4.4	Väyläsovittimet	25
4.5	Ohjelmointirajapinnat ja niiden hyödyntäminen.....	26
5	SÄÄTÖPIIRIN TOIMINTAPERIAATE.....	27

5.1	Suljettu säätöpiiri	27
5.2	PID-säädin	27
6	OHJAUKSIA JA OHJELMALLISIA TOIMINTOJA	29
6.1	Aika- ja kalenteriohjaus	29
6.2	Tehonrajoitus	29
6.3	Vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän ohjaus	30
6.4	Koneellinen ilmanvaihto.....	32
6.4.1	Ilmanvaihtokoneen ohjaukset.....	32
6.4.2	Lämmöntalteenottotavat	34
7	RAKENNUSAUTOMAATIO JA ENERGIA TEHOKKUUS	35
7.1	Lainsäädännöllinen viitekehys	35
7.2	Energiatehokkuus	36
7.3	Energiatehokkuusstandardin näkökulma	36
7.4	Keinoja energiatehokkuuden parantamiseen	38
8	YHTEENVETO JA POHDINTA	39
	LÄHTEET	41

KUVALUETTELO

KUVA 1. Voimatel Oy:n asiakasryhmät (Voimatel Oy, 2022)	10
KUVA 2. Rakennusautomaatio ja muita järjestelmiä (kuvaleikkeet Gebwell Oy ja HK Instruments Oy, 2023)	11
KUVA 3. Automaatiojärjestelmän tasojen perinteinen jaottelu (ST-käsikirja 17 2018, 60)	13
KUVA 4. Esimerkkikuva valvonta-alakeskuksesta (Prosessiautomaatio, 2022)	14
KUVA 5. Modulaarinen valvonta-alakeskus ja siihen kytkeytyviä esimerkkilaitteita (kuvaleikkeet: Centraline, Honeywell Oy, Onninen Oy, Produal Oy, Systemair Oy 2022).....	15
KUVA 6. KNX-järjestelmä (KNX Finland ry, 2022)	16
KUVA 7. Paine-erolähetintä voidaan käyttää ilmaisemaan IV-koneen suodattimen likaisuutta (Produal Oy, 2022).....	17
KUVA 8. Lämpötila-anturi soveltuu nesteen tai ilman lämpötilan mittaukseen (Produal Oy, 2022).....	17
KUVA 9. Läsäolo-anturilla voidaan ohjata esimerkiksi tilojen valaistusta tai ilmanvaihtoa tarpeen mukaan (Produal Oy, 2022).	17
KUVA 10. Venttiilitoimilaitteella (vasen) voidaan portaattomasti ohjata 2-tieventtiiliä, mikä tapahtuu venttiilin karaa liikuttamalla (kuvaleikkeet Onninen Oy, 2023).....	18
KUVA 11. Magneettiventtiiliä voidaan käyttää ON/OFF-tyyppisiin ohjauksiin (Produal Oy, 2022).	18
KUVA 12. Belimo-peltimoottori, joita käytetään ilmanvaihtokoneen peltien ohjaamiseen (Onninen Oy, 2022).....	18
KUVA 13. Taajuusmuuttaja soveltuu oikosulkumoottorien ohjaamiseen (Honeywell Oy, 2022)	19
KUVA 14. Grundfos-kiertovesipumppu, jossa on integroituna taajuusmuuttaja (Onninen Oy, 2023)	19
KUVA 15. Kanavapuhallin, jossa on integroituna EC-moottori (Systemair Oy, 2022).....	19
KUVA 16. Fidelix:n valmistama huonesäädin (Fidelix Oy, 2022)	20
KUVA 17. Kosketusnäytöllinen huonesäädin (Produal Oy, 2022)	20
KUVA 18. Yksikkösäädin (Ouman Oy, 2023).....	20
KUVA 19. Sähkökeskuksen DIN-kiskoon asennettava energiamittari (Onninen Oy, 2022)	21
KUVA 20. Väylätopologia	22
KUVA 21. Tähtitopologia	22
KUVA 22. Rengastopologia.....	23
KUVA 23. Carlo Gavazzi UWP3.0 väyläsovitin (Carlo Gavazzi, 2023).....	25
KUVA 24. Suljettu säätöpiiri	27
KUVA 25. Havainnekuva P-, PI- ja PID-säätöjen reagoinnista asetusarvon muutokseen	28
KUVA 26. Huonosti viritetyn säädön ulostulo värähtelee kuluttaen turhaan energiaa ja toimilaitetta.	28
KUVA 27. Kaukolämpölaitteiston komponentteja (Gebwell Oy, 2022)	30
KUVA 28. Lämmityskaavio (CADMATIC Oy, 2022)	31
KUVA 29. Lämmityksen toimintaselostus ja esimerkissäätökäyrät (CADMATIC Oy, 2022)	32
KUVA 30. Havainnekuva IV-koneesta pyörivällä lämmöntalteenotolla (HK Instruments, 2022).....	33

KUVA 31. Pyörivällä LTO-kiekolla varustetun IV-koneen säätökaavio (CADMATIC Oy, 2023)	33
KUVA 32. IV-koneen venttiilien ja lämmöntalteenoton säädön periaatteellinen kaavio (CADMATIC Oy, 2023).....	34
KUVA 33. Direktiivi uudistuksen kohteena olevat rakennukset (RESA-hanke, 2018–2019)	35
KUVA 34. Kioton pyramidi (Sähköinfo Oy, 2020)	36

LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

AC	Alternating Current. Vaihtovirta tai -jännite
AI	Analog Input. Analoginen tulo
AO	Analog Output. Analoginen lähtö
API	Application Programming Interface. Ohjelmistorajapinta
CPU	Central Processing Unit. Laskentayksikkö
DC	Direct Current. Tasajännite
DDC	Direct digital control. Suora digitaalinen säätö
DI	Digital Input. Digitaalinen tulo
DO	Digital Output. Digitaalinen lähtö
HMI	Human-Machine-Interface. Automaatiojärjestelmän käyttöliittymä
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning. Lämmitys, ilmanvaihto, ilmastointi
I/O-pisteet	Automaatiojärjestelmän tulot (input) ja lähdöt (output)
LTO	Lämmöntalteenotto
IP	Internet-kerroksen protokolla
PLC	Programmable Logic Controller. Ohjelmoitava logiikka
TCP/IP	Tietoliikenneprotokollapino
Protokolla	Laitteiden välisen tiedonsiirron määrittelevä käytäntö
RAU	Rakennusautomaatio
SQL	Structured Query Language. Kyselykieli, jolla tiedonsiirto tietokantoihin tapahtuu.
Toimilaite	Laite, joka tuottaa halutun liikkeen tai toiminnon signaalin perusteella.
Topologia	Verkon fyysinen rakenne tai looginen toimintaperiaate
UI	Universal Input. Ohjelmoitava tulo
VAK	Valvonta-alakeskus
Väylä	Automaatiojärjestelmän tiedonsiirtokanava
XML	Extensible Markup Language. Standardoitu merkintäkieli, jota käytetään tiedonvälityksessä ja tiedostomuotona dokumenttien tallentamisessa.

1 JOHDANTO

1.1 Työn tavoite

Työn tavoitteena on muodostaa toimeksiantajalle (Voimatel Oy:n Energiapalvelut) kokonaiskuva rakennusautomaatiojärjestelmistä ja niiden toiminnoista, joilla rakennusten energiatehokkuuteen voidaan vaikuttaa. Opinnäytetyössä käsitellään rakennusautomaatiojärjestelmän toiminnallisuuksia, rakennetta, laitteita, tiedonsiirtoa, säätöjä ja ohjauksia, energian säästämahdollisuuksia sekä automaation mahdollisuuksia kiinteistöjen energiatehokkuuden parantamisessa. Työ toteutetaan tutkielmaluonteisesti perehtymällä olemassa olevaan tietoon eikä työ sisällä empiiristä osuutta.

Voimatel Oy on mukana Horisontti Eurooppa -ohjelmaan sisältyvässä STREAM-kehitysohjelmassa, jonka tavoitteena on kehittää asiakaskeksistä ja joustavaa energiaekosysteemiä. Rakennusautomaatio, energiatehokkuus ja energian hallinta ovat keskeisessä osassa siirryttäessä kohti joustavampaa energiajärjestelmää ja sähkömarkkinoita. Opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa toimeksiantajalle tietoperusta rakennusautomaatiosta ja sen mahdollisuuksista energiatehokkuuden parantamisessa. Tämä tietoperusta toimii toimeksiantajan tukiprojektina STREAM-kehitysohjelmalle ja energiapalveluiden liiketoiminnan kehitykselle, sillä sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi palveluiden markkinoinnissa.

1.2 Aiheen ajankohtaisuus

Työn aihe on ajankohtainen, koska rakennusten automaatiojärjestelmät yleistyvät, kehittyvät ja monipuolistuvat jatkuvasti. Lisäksi kansalliset ilmastotavoitteet, yleinen ympäristötietoisuuden lisääntyminen ja sähköenergian viimeaikainen hintakehitys ovat saaneet yhä useammat kuluttajat ja yritykset kiinnittämään huomiota kiinteistöjensä energiatehokkuuteen ja energian käytön optimointiin. Mainittakoon myös, että opinnäytetyön kirjoitushetkellä Suomessa pohditaan sähköenergian kansallista riittävyyttä ja mahdollisia kiertäviä sähkökatkoja, joten energiatehokkuus on tällä hetkellä erittäin ajankohtainen teema.

Euroopan unionin jäsenmaat ovat sitoutuneet pienentämään kasvihuonekaasupäästöjään vuoden 1990 tasoon verrattuna vähintään 55 % vuoteen 2030 mennessä (Eurooppalainen ilmastolaki, 2021/1119/EU). Yleisten arvioiden mukaan rakennusten lämmitys ja sähkönkäyttö aiheuttavat yli 30 % kasvihuonekaasupäästöistä, joten rakennusten energiatehokkuuden parantamisella voitaisiin osaltaan toteuttaa päästövähennystavoitetta.

Lisäksi vuonna 2018 uudistettiin aiempaa rakennusten energiatehokkuusdirektiiviä (Direktiivi 2010/31/EU¹. Energy Performance of Buildings Directive). Direktiiviuudistus korostaa automaation merkitystä rakennusten energiatehokkuuden tavoittelussa. Direktiiviuudistuksen myötä Suomessa astui voimaan laki, joka edellyttää rakennusautomaatiojärjestelmän asentamista uusiin tai olemassa oleviin ei-asuinrakennuksiin, joiden lämmitysjärjestelmän tai yhdistetyn lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmän nimellisteho ylittää 290 kW (Laki rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä 733/2020, 11 § ja 13 §). Näin ollen markkinavetoisen kehityksen lisäksi automaatiojärjestelmien yleistymistä ohjaa Suomessa nykyään myös lakisääteiset velvoitteet.

1.3 Toimeksiantajan esittely

Opinnäytetyön aihe on työelämälähtöinen ja työn toimeksiantaja on Voimatel Oy:n Energiapalveluliiketoimintayksikkö. Työ toteutettiin yhteistyössä toimeksiantajan kanssa ja työssä tarkasteltiin toimeksiantajaa kiinnostavia rakennusautomaation osa-alueita ja teemoja. Voimatel Oy on vuonna 2001 perustettu suomalainen yritys, joka muun muassa rakentaa ja ylläpitää sähkö- ja tietoliikenneverkkoja sekä tarjoaa energiapalveluita, jotka kattavat esimerkiksi aurinkopaneelijärjestelmät, sähköisen liikenteen latausjärjestelmät, energiankäytön optimoinnin palvelut ja energian varastoinnin palvelut. (Voimatel Oy, 2022)

Yrityksellä on useita tytäryhtiötä, joita ovat muun muassa OptiWatti Oy, Sun Solar Oy ja Bofitel Estonia OÜ Virossa. Vuonna 2021 Voimatelin liikevaihto oli 133 milj. € ja yritys työllistää noin 1000 työntekijää. Voimatelin päätoimipaikka on Toivalassa, Siilinjärvellä ja yrityksellä on useita pienempiä toimipisteitä ympäri Suomen. (Voimatel Oy, 2022)

Voimatelin asiakkailleen tarjoamia palveluita ovat tietoverkko-, jakeluverkko-, siirtoverkko-, sähköasema-, teollisuus- ja energiapalvelut sekä managed services -palvelusopimukset. Voimatelin asiakasryhmiä on havainnollistettu seuraavassa kuvassa. (Voimatel Oy, 2022)



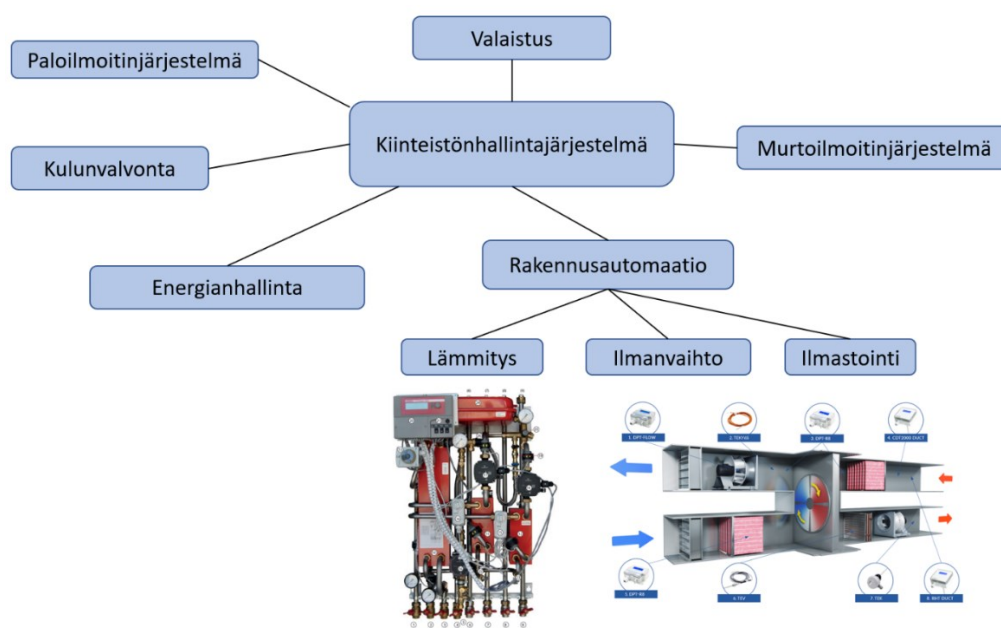
KUVA 1. Voimatel Oy:n asiakasryhmät (Voimatel Oy, 2022)

2 YLEISTÄ RAKENNUSAUTOMAATIOSTA

2.1 Määritelmä

Rakennusautomaatio on automaatiotekniikan osa-alue, jolla tarkoitetaan ensisijaisesti rakennuksen lämmitys-, jäähdytys-, ilmanvaihto- ja ilmastointiprosessien automaattista ohjaamista rakennuksen sisäolosuhteiden hallitsemiseksi. Rakennusautomaation yhteydessä saatetaan käyttää englanninkielistä lyhennettä HVAC, joka tarkoittaa lämmitystä (Heating), ilmanvaihtoa (Ventilation) ja ilmastointia (Air Conditioning). Toisaalta voidaan puhua myös rakennuksen LVI-prosessien (lämpö, vesi ja ilma) automaattisesta ohjaamisesta. Englanninkielisessä kirjallisuudessa rakennusautomaatiosta käytetään puolestaan lyhennettä BAC (Building Automation and Control).

Edellä mainittujen järjestelmien lisäksi rakennusautomaatioon voi olla integroitu myös muita taloteknisiä järjestelmiä, kuten valaistus- ja kulunvalvontajärjestelmät, jolloin kyse on laajemmasta kiinteistöautomaatiokokonaisuudesta. Käytännössä termejä ”rakennusautomaatio” ja ”kiinteistöautomaatio” saatetaan toisinaan käyttää häilyvästi tarkoittamaan samoja taloteknisiä toimintoja, mutta tässä opinnäytetyössä rakennusautomaatio-käsitteellä viitataan erityisesti LVI-automaatioprosesseihin. Käsitteistöä on havainnollistettu kuvassa 2.



KUVA 2. Rakennusautomaatio ja muita järjestelmiä (kuvaleikkeet Gebwell Oy ja HK Instruments Oy, 2023)

2.2 Historiakatsaus

Rakennusautomaatiota on ollut olemassa erilaisissa muodoissa jo monia kymmeniä vuosia. Ilmanvaihtotekniikka alkoi koneellistua 1950- ja 1960-luvuilla, mikä antoi alkusysäyksen todelliselle automaation kehitykselle, sillä syntyi tarve ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden säädölle ja valvonalle. Vuonna 1960 standardoitiin nykyäänkin käytettävä 4...20 mA analogiasignaali. Samoihin aikoihin puolijohdetekniikan kehittyminen mahdollisti transistoreihin perustuvat säätimet, joilla pystyttiin toteuttamaan useampiportaisia säätöjä. Lisäksi markkinoille tuli vuonna 1962 tietokone, joka ensimmäistä kertaa mahdollisti analogisen säätöjärjestelmän korvaamisen suoralla digitaalisella säädöllä (DDC). (ST-käsikirja 17, 13.)

1970-luvun öljykriisin myötä syntyi tarve pystyä tarkemmin seuraamaan ja ohjaamaan taloteknisiä järjestelmiä, jolloin kehitettiin täysin erillinen talovalvontajärjestelmä lämmityksen säätämiseen. 1970-luvun lopulla tulivat ensimmäiset keskitetyt talovalvontajärjestelmät, joissa monia taloja kytkettiin samaan valvomoon. 1980-luvulla mikroprosessoritekniikan kehitys laajensi digitaalisten järjestelmien käyttöä, mutta kaapeloinnit olivat pitkiä, koska alakeskusten määrää rajoitti järjestelmien kalliit hinnat. (ST-käsikirja 17, 15.)

Puolijohde- ja ohjelmistotekniikan kehityksen myötä 1990-luvulla vakiintui nykyäänkin käytetty kolmikerroksinen hierarkia, joka koostuu valvomo-, alakeskus- ja huonelaitetasoista. Alakeskusten kustannukset pienenivät, joten niitä asennettiin jopa ilmastointikonekohtaisesti. 1990-luvulla yleistyivät myös GSM-verkon kautta välitettävät hälytykset ja huoltoyritykset, jotka vastasivat useampien kiinteistöjen ylläpidosta. (ST-käsikirja 17, 16.)

2000-luvun alussa internetin yleistyminen mahdollisti usean kiinteistön valvomisen ja ohjaamisen keskitetysti etänä niiden sijainnista riippumatta. Internet-selainten kautta pystyttiin käyttämään kaikkia markkinoilla olevia järjestelmiä. 2000-luvun alun jälkeen tietoliikenneominaisuudet ovat kehittyneet reippaasti, ja energiatehokkuuden ja tiedonsiirron standardit ovat monipuolistuneet. Nykyään markkinoilla on tarjolla monikäyttöisiä järjestelmiä, joilla rakennusten ylläpitoa ja energiatehokkuutta voidaan tehokkaasti parantaa. Tulevaisuuden visioina ovat kenties tekoälyn integrointi osaksi taloteknisiä järjestelmiä ja laajat pilvipalvelut. (ST-käsikirja 17, 16.)

2.3 Rakennusautomaatiojärjestelmän tavoitteet

Rakennusautomaatiojärjestelmillä on monia tavoitteita. Keskeiset tavoitteet ovat toteuttaa ohjattavien prosessien (esimerkiksi lämmitys tai ilmanvaihto) säädöt ja ohjaukset suunnitellusti, valvoa rakennuksen teknisiä toimintoja mittauksin ja antaa tarvittaessa hälytyksiä. Lisäksi automaatiojärjestelmän tehtävänä on tuottaa kulutus-, energiatehokkuus-, olosuhde- ja tilastoanalytiikkaa, jolla voidaan tehostaa kiinteistön toiminnallista ja energiatehokasta ylläpitoa. Automaatiojärjestelmässä tulisi olla selkeä ja päivittäistä käyttöä tukeva käyttöliittymä rakennuksen käyttäjille tai järjestelmän ylläpitäjälle. (ST-käsikirja 17, 21.)

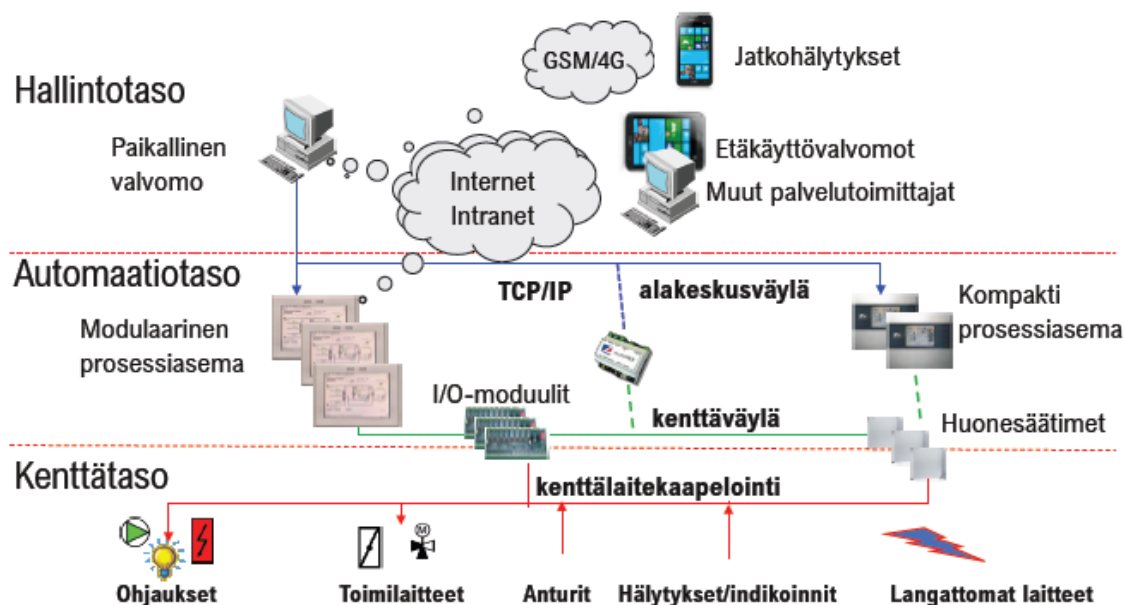
Onnistuneilla automaatiojärjestelmän toimintojen toteutuksilla huolehditaan osaltaan rakennuksen pitkäikäisyydestä, sisäilman laadusta ja ylläpidetään sellaisia olosuhteita, että rakennuksessa on miellyttävää oleskella. Voitaneen sanoa, että automaatiojärjestelmän toiminnot ovat toteutettu hyvin, jos tilassa oleskelevat henkilöt eivät kiinnitä huomiota esimerkiksi tilan lämpötilaan tai ilmanvaihtoon. Toisaalta ihmisillä on erilaisia mieltymyksiä esimerkiksi huonelämpötilojen suhteen.

Keskeisessä osassa energiatehokkuutta onkin riittävä määrä tietoa rakennuksen olosuhteista ja kerättyyn dataan perustuva analytiikka. Sen avulla voidaan esimerkiksi seurata energiankulutusta ja puuttua poikkeamiin tai laitevikoihin jo hyvissä ajoin, jolloin minimoidaan energiahäviöt, jotka aiheutuisivat poikkeamista pidemmällä aikavälillä. Seuranta voitaisiin toteuttaa esimerkiksi tuomalla vesimittarista vuotohälytys automaatiojärjestelmään ja asentamalla suurimmille sähkön kulutuskohteille omat energiamittarinsa. Myös automaatiojärjestelmän käyttäjien tai ylläpitäjien opastaminen on tärkeää, jotta automaation käyttö ja hyödyntäminen olisi mahdollisimman tehokasta.

3 RAKENNUSAUTOMAATIOJÄRJESTELMÄN RAKENNE

3.1 Automaatiojärjestelmän tasot

Rakennusautomaatiojärjestelmä jakaantuu perinteisesti kolmeen tasoon; hallintotasoon, automaatiotasoon ja kenttätasoon, joita yhdistävät tiedonsiirtoyhteydet. Rakennetta on havainnollistettu seuraavassa kuvassa.



KUVA 3. Automaatiojärjestelmän tasojen perinteinen jaottelu (ST-käsikirja 17 2018, 60)

Kuvan mukainen malli oli kuitenkin kehitetty keskitettyjen automaatiojärjestelmien aikaan ja nykyään hajautettujen automaatiojärjestelmien yleistyessä eri tasojen väliset rajat ovat hämärtyneet, kun älyä hajautetaan yhä kasvavassa määrin eri laitteille. (ST-käsikirja 17, 59.)

3.2 Hallintotaso

Hallintotaso eli hierarkian ylin taso sisältää käyttöliittymän, joka voi olla paikallinen valvomotietokone tai etävalvomo, jossa valvomoa käytetään internet-selaimella tai erillisellä sovelluksella. Valvomon kautta voidaan muun muassa tarkkailla prosesseja, muokata asetusarvoja, kuitata hälytyksiä, luoda raportteja ja analysoida mittaustietoja. Hallintotason valvomonäyttöillä on yleensä graafisesti esitetty rakennuksen kaikki ohjattavat prosessit ja niiden säätökaaviot.

Etävalvomot mahdollistavat valvomotoimintojen käytön paikasta riippumatta esimerkiksi tablet-tietokoneella, mutta tietoturvaan on syytä kiinnittää erityistä huomiota esimerkiksi käyttämällä palomureja, salattuja VPN-yhteyksiä (Virtual Private Network) ja rajoittamalla käyttäjien pääsyoikeuksia. (ST-kortti 710.02, 6)

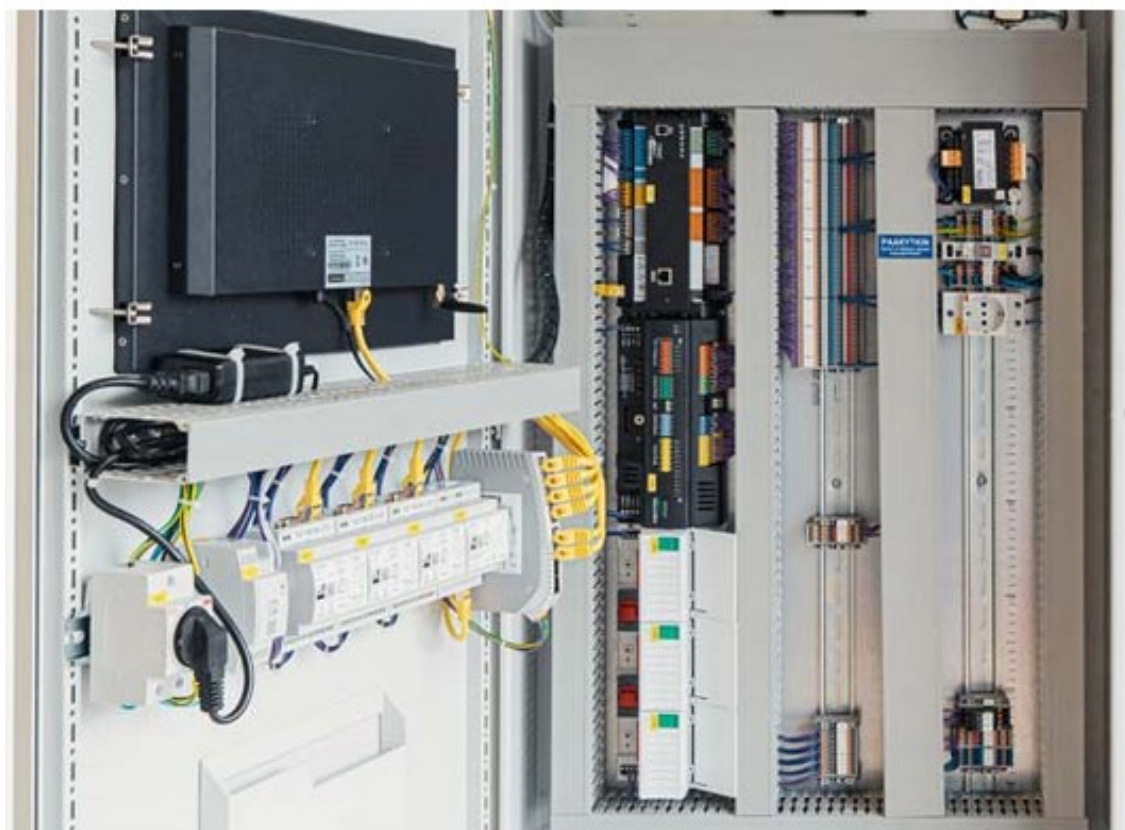
3.3 Automaatiotaso

Automaatiotasoa voisi luonnehtia järjestelmän aivoiksi, sillä se sisältää järjestelmän toimintalogiikan ja ohjelmallisen laskentakapasiteetin. Rakennusautomaatiojärjestelmä voi olla keskitetty tai hajautettu. Keskitetyssä ratkaisussa prosessien ohjaus on keskitetty valvonta-alakeskuksiin (lyhennetään

VAK), jotka ovat automaatiojärjestelmän solmupisteitä. Hajautetussa järjestelmässä puolestaan laskentakapasiteettia ja valvomotoimintoja on hajautettuna järjestelmän eri laitteille. Automaatiojärjestelmien laitetoimittajia ovat muun muassa Caverion, Schneider Electric, Honeywell, Siemens, Ouman ja Fidelix. Tässä työssä laitteita ei käydä läpi kovin syvällisesti, koska niissä on valmistajakohtaisia eroavaisuuksia ja toiminnalliset perusperiaatteet kuitenkin pätevät valmistajasta riippumatta.

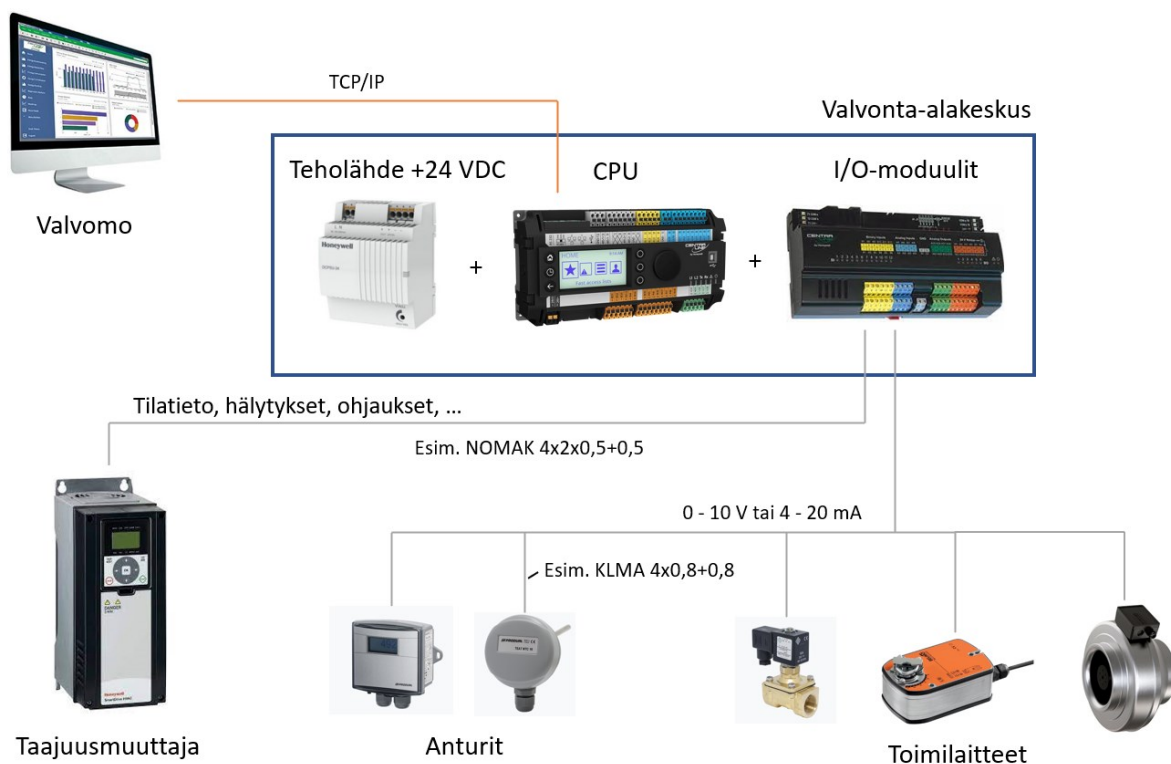
3.3.1 Valvonta-alakeskukset

Valvonta-alakeskukset sijaitsevat tyypillisesti rakennuksen ilmanvaihdon konehuoneessa, lämmönjakohuoneessa tai sähkötilassa. Samassa rakennuksessa voi olla useitakin valvonta-alakeskuksia, jotka liitetään toisiinsa tiedonsiirtoväylillä. Valvonta-alakeskuksen sisältämiä keskeisimpiä laitteita ovat teholähde, ohjelmoitava logiikka (PLC) tai laskentayksikkö (CPU) ja moduulit, jotka sisältävät järjestelmän fyysiset I/O-pisteet eli tulot (input) ja lähdöt (output). I/O-pisteet voivat olla digitaalisia tai analogisia. Lisäksi alakeskukset yleensä sisältävät tiedonsiirtolaitteita, kuten väyläsovittimia, reitittimiä tai Ethernet-kytkimiä. Alakeskuksista voi edelleen löytyä lisäksi myös yksittäisiä perinteisiä releitä.



KUVA 4. Esimerkkikuva valvonta-alakeskuksesta (Prosessiautomaatio, 2022)

Alakeskusten fyysisiin I/O-pisteisiin kytketään esimerkiksi toimilaitteiden ohjauksia, mittausantureita tai hälytystuloja. Mittaukset ja tilatiedot kytketään tuloihin, ja ohjaukset lähtöihin. Tilatieto kuvaa laitteen tilaa eli onko esimerkiksi pumppu käynnissä vai pysähtyneenä. Seuraavassa kuvassa on havainnollistettu modulaarista alakeskusta. Modulaarisuuden etuina ovat muokattavuus ja se, että yksittäisen moduulin vikaantuessa se voidaan helposti vaihtaa.



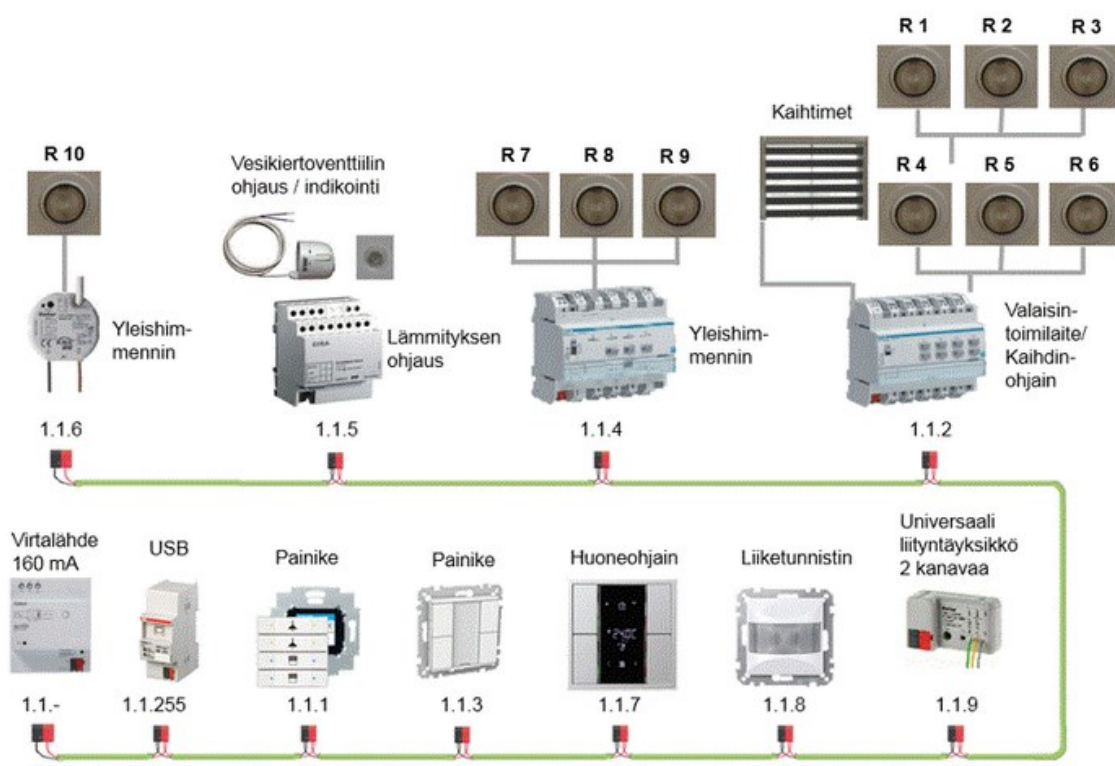
KUVA 5. Modulaarinen valvonta-alakeskus ja siihen kytkeytyviä esimerkkilaitteita (kuvaleikkeet: Centraline, Honeywell Oy, Onninen Oy, Produal Oy, Systemair Oy 2022)

Alakeskukset voivat olla myös kiinteäpistemääräisiä keskuksia, jotka koostuvat yhdestä elektroniikkakortista, johon voidaan liittää rajallinen määrä liitäntöjä. Kortille on integroitu CPU ja muistit. Kiinteäpistemääräinen keskus voi sisältää UI-pisteitä (Universal Input), jotka ovat vapaasti ohjelmoitavissa ja esimerkiksi analoginen mittaustulo voidaan ohjelmoida myös hälytyspisteeksi. (ST-käsikirja 17, 69.)

3.3.2 Hajautettu järjestelmä

Hajautetussa järjestelmässä puolestaan ei ole keskustietokonetta (CPU), joka ohjaisi koko automaatiojärjestelmää itsenäisesti, vaan sen sijaan laskentakapasiteettiä, säätö- ja ohjaustoimintoja on laajemmin hajautettu eri laitteille. Tyypillinen esimerkki hajautetusta kiinteistöautomaatiojärjestelmästä on KNX-standardiin pohjautuva automaatiojärjestelmä. Hajautetulla järjestelmällä voidaan ohjata vaikkapa valaistusta tai lämmitystä huonekohtaisesti, mutta se ei kuitenkaan ole soveltuva esimerkiksi suurten ilmanvaihtokoneiden ohjaamiseen.

Nykyään kehityksen suuntana vaikuttaa muutenkin olevan älyn hajauttaminen myös kenttälaitetalle, kuten älykkäille toimilaitteille. Hajauttaminen hämärtää kuvan 3 mukaista perinteistä automaatiojärjestelmän tasojen jaottelua. Hajautettujen järjestelmien yleistyessä korostuvat laitteiden väliset tiedonsiirtoyhteydet ja tietoturvallisuus.



KUVA 6. KNX-järjestelmä (KNX Finland ry, 2022)

3.4 Kenttätaso

Kenttätaso sisältää laitteet, jotka sijaitsevat eri puolilla rakennusta liittyneinä prosessien ohjaamisiin. Kenttälaitteita ovat anturit, lähettimet ja toimilaitteet. Anturit ja lähettimet tuottavat reaaliaikaista mittaustietoa prosesseista automaatiojärjestelmälle. Toimilaitteilla puolestaan ohjataan ja säädetään prosesseja, kuten esimerkiksi ohjataan rakennuksen lämmitystä vaikuttamalla nesteen tai ilman virtaukseen.

3.4.1 Anturit ja lähettimet

Rakennusautomaatiossa on paljon erilaisia antureita, joilla voidaan mitata esimerkiksi lämpötilaa, kosteutta, painetta, virtausta, paine-eroa, valoisuutta tai sisäilman hiilidioksidipitoisuutta. Anturit antavat ulostulona standardoidun virtaviestin 4 ... 20 mA tai jänniteviestin 0 ... 10 V. Lähetin on mitta-laite, joka muuntaa mittaussuureen automaation ymmärtämään muotoon. Muutamia esimerkkejä antureista on esitetty seuraavissa kuvissa.



KUVA 7. Paine-erolähetintä voidaan käyttää ilmaisemaan IV-koneen suodattimen likaisuutta (Produal Oy, 2022).



KUVA 8. Lämpötila-anturi soveltuu nesteen tai ilman lämpötilan mittaukseen (Produal Oy, 2022)



KUVA 9. Läsäolo-anturilla voidaan ohjata esimerkiksi tilojen valaistusta tai ilmanvaihtoa tarpeen mukaan (Produal Oy, 2022).

3.4.2 Toimilaitteet

Toimilaitteiden tehtävä on ohjata prosesseja, kuten rakennuksen lämmitystä tai ilmanvaihtoa. Automaatiojärjestelmä vertaa antureilta saatavia mittausrvoja asetusarvoihin ja ohjaa toimilaitteita tavoitearvojen saavuttamiseksi. Toimilaitteita ovat muun muassa venttiilit ja peltimoottorit. Toimilaitteet voivat olla ON/OFF-tyyppisiä tai portaattomasti säädettäviä. (ST-käsikirja 17, 92.) Toimilaitteita on paljon erityyppisiä ja erilaisia käyttökohteita varten, joten niitä ei tässä työssä käydä yksityiskoh- taisesti läpi, vaan seuraavissa kuvissa on esimerkkejä tyypillisimmistä toimilaitteista.



KUVA 10. Venttiilitoimilaitteella (vasen) voidaan portaattomasti ohjata 2-tieventtiiliä, mikä tapahtuu venttiilin karaa liikuttamalla (kuvaleikkeet Onninen Oy, 2023)



KUVA 11. Magneettiventtiiliä voidaan käyttää ON/OFF-tyyppisiin ohjauksiin (Produal Oy, 2022).



KUVA 12. Belimo-peltimoottori, joita käytetään ilmanvaihtokoneen peltien ohjaamiseen (Onninen Oy, 2022).

3.4.3 Moottorikäytöt

Rakennusautomaatiossa on tarve pyörittää pumppuja ja puhaltimia moottorien avulla. Perinteistä teollisuudesta tuttua oikosulkumoottoria ohjataan taajuusmuuttajalla, joka ohjaa moottorin pyörimisnopeutta säätämällä moottorin syöttöjännitteen amplitudia ja taajuutta. Taajuusmuuttajaohjaus mahdollistaa oikosulkumoottorien energiatehokkaamman ohjaamisen ja sen avulla puhaltimille voidaan asettaa nopeusprofiileja. Erityisesti HVAC-käyttöön tarkoitetuissa taajuusmuuttajissa voi olla vähemmän toimintoja kuin esimerkiksi vastaavissa teollisuuskäytössä olevissa taajuusmuuttajissa. Lämmitysjärjestelmän kiertovesipumppuja on saatavilla integroiduilla taajuusmuuttajilla varustettuna.



KUVA 13. Taajuusmuuttaja soveltuu oikosulkumoottorien ohjaamiseen (Honeywell Oy, 2022)



KUVA 14. Grundfos-kiertovesipumppu, jossa on integroituna taajuusmuuttaja (Onninen Oy, 2023)

Toinen rakennusautomaatiossa yleisimmin käytetyistä moottorityypeistä on EC-moottori, joka on elektronisesti kommutoitu tasavirtamoottori. EC-moottorit sisältävät ohjauselektronikan tehon säätöä varten ja niitä käytetään erityisesti puhallinkäytöissä. EC-moottoreita ohjataan 0–10 V DC-ohjausviestillä. EC-moottorien toiminta-alue on 0–100 %, joka on laajempi kuin taajuusmuuttajilla ja EC-moottorien hyötysuhde on koko säätöalueella parempi kuin taajuusmuuttajaohjatuilla oikosulkumoottoreilla (ST-käsikirja 17, 98). Seuraavan kuvan kanavapuhaltimessa on integroituna EC-moottori.



KUVA 15. Kanavapuhallin, jossa on integroituna EC-moottori (Systemair Oy, 2022)

3.4.4 Säätimet

Huonesäätimet sijoittuvat perinteisessä hierarkiamallissa automaatiotason ja kenttätason välimaastoon. Niillä voidaan hoitaa yksittäisten huoneiden tai huoneistojen automaatiotoiminnot itsenäisesti. Huonesäätimet sijaitsevat yleensä rakennuksessa käytävän puolella alas lasketun katon yläpuolella tai ohjattavan prosessin liittyvän huoneen seinällä. Huonesäätimiä voidaan käyttää esimerkiksi lämmitysventtiilien, lämmityspattereiden, ilmanvaihdon peltien, puhaltimien tai valaistuksen ohjaamiseen (ST-käsikirja 17, 65).

Huonesäätimet mahdollistavat vähäisemmän kaapeloinnin määrän ja pienemmät alakeskukset. Huonesäätimet voidaan yhdistää toisiinsa kenttäväylällä (esimerkiksi Modbus tai BACnet), jolloin niitä voidaan hallita keskitetysti. Esimerkiksi seuraavassa kuvassa olevassa Fidelix-huonesäätimessä on 8 tuloa ja lähtöä. Niissä voi olla integroituna myös kosketusnäyttö, kuten kuvassa 16 olevassa Produalin huonesäätimessä.



KUVA 16. Fidelix:n valmistama huonesäädin (Fidelix Oy, 2022)



KUVA 17. Kosketusnäytöllinen huonesäädin (Produal Oy, 2022)

Yksikkösäätimillä puolestaan säädetään nimensä mukaisesti vain yhtä säätöpiiriä tai -suuretta. Yksikkösäädin löytyy esimerkiksi pientalon kaukolämpöjärjestelmästä, jossa sillä ohjataan menoveden lämpötilaa. Jos rakennus on varustettu rakennusautomaatiojärjestelmällä, ei yksikkösäätimiä välttämättä tarvita, vaan rakennusautomaatiojärjestelmä korvaa niiden säätötoiminnot.



KUVA 18. Yksikkösäädin (Ouman Oy, 2023)

3.4.5 Energiamittarit

Rakennuksen energiatehokkuuden parantamiseksi olisi tärkeää saada riittävästi tilasto- ja mittaustietoja energian kulutuksesta ja tehon käyttöprofiileista. Tietoa voitaisiin saada tekemällä yksittäisiä mittauksia tehoanalysointilaitteella, mutta rakennuksessa energian kulutusta voitaisiin mitata jatkuvasti siten, että suurimmille kulutuskohteille lisättäisiin omat energiamittarinsa.

Mittausten avulla energiankulutusta voitaisiin tarkemmin eritellä kohteittain ja kerätä dataa energian käytöstä, jota voitaisiin hyödyntää rakennuksen energiatehokkuuden tavoittelussa. Joissakin laitteissa voi olla sisäänrakennettuna tallenuskapasiteettia, joka kuitenkin on rajallinen, joten tietoa voidaan tallentaa pilvipalveluihin. Käyttäjän näkökulmasta olisi tärkeää koostaa eri kulutuskohteista saatava mittausdata havainnolliseen ja helposti analysoitavaan muotoon.

Nykyään energiamittarit kytketään automaatiojärjestelmään väyläkaapelilla tai langattomasti eivätkä ne vaadi sähkökeskuksesta kovin paljoa tilaa. Haittapuolena on, että pitäisi punnita mittareiden kustannukset saavutettuihin hyötyihin nähden. Seuraavassa kuvassa on esimerkkinä Carlo Gavazzi -energiamittari, joka vie saman verran tilaa kuin 3-vaiheinen johdonsuojakatkaisija.

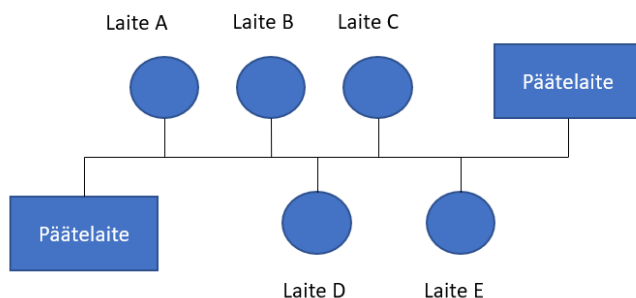


KUVA 19. Sähkökeskuksen DIN-kiskoon asennettava energiamittari (Onninen Oy, 2022)

4 TIEDONSIIRTO RAKENNUSAUTOMAATIOSSA

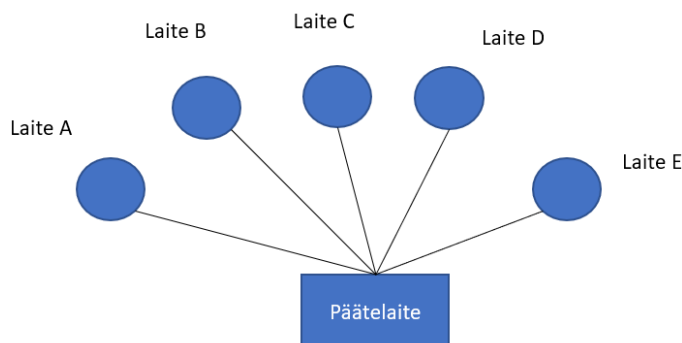
4.1 Topologia

Topologia tarkoittaa laiteverkon fyysistä rakennetta tai loogista toimintaperiaatetta. Erilaisia topologioita ovat mm. väylä-, tähti- ja rengastopologia. Käytettävä topologia riippuu muun muassa laitteistosta. (ST-käsikirja 21, 16.) Erilaisia topologioita on havainnollistettu seuraavissa kuvissa.



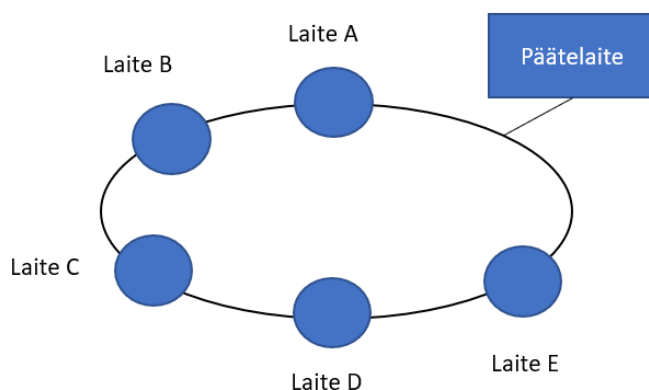
KUVA 20. Väylätopologia

Väylätopologiassa kaikkien laitteiden käytössä on ainoastaan yksi kaapeli, joten vain yksi laitepari voi kommunikoida keskenään väylällä kerrallaan ja sanoma on välittömästi kaikilla verkon laitteilla. Väylätopologian etuina ovat yksinkertaisuus ja laajalle levinnyt käyttö, mutta haittapuolena on se, että järjestelmän toiminta loppuu esimerkiksi väyläkaapelin katketessa. (ST-käsikirja 21, 16.)



KUVA 21. Tähtitopologia

Tähtitopologiassa kaikki laitteet on kytketty samaan laitteeseen, joka toimii verkon viestien välittäjänä. Etuna on muokattavuus ja haittapuolena on keskuslaitteen korostunut merkitys luotettavuuden kannalta. (ST-käsikirja 21, 17.)



KUVA 22. Rengastopologia

Rengastopologiassa laitteiden kytkentä muodostaa renkaan, jossa sanoma kulkee laitteelta toiselle ja se on vain yhden laitteen kerrallaan kuultavissa. Haittana on huono luotettavuus kaapelin tai yksittäisen laitteen rikkoontuessa ja se, että rengastopologia ei sovellu käytettäväksi niin sanotuissa kilpavaraukseen perustuvissa järjestelmissä. (ST-käsikirja 21, 16.) Esimerkiksi KNX-järjestelmä ja M-bus-väylää käyttävät laitteet eivät siten sovellu asennettavaksi renkaaseen.

4.2 Tiedonsiirtoprotokolla

Protokolla on standardi, joka määrittelee laitteiden tai ohjelmien väliset tiedonsiirtoyhteydet; laite A lähettää viestin laitteelle B, joka reagoi viestiin ja mahdollisesti vastaa toisella viestillä protokollan eli yhteyskäytännön mukaisesti. Kommunikaatio tapahtuu sanomien välityksellä. Sanomilla on tarkkaan määritelty rakenne, joka on protokollakohtainen. (ST-käsikirja 21, 71.) Protokollia ovat esimerkiksi TCP/IP-protokollaperhe ja Modbus RTU -sarjaliikenneprotokolla.

4.3 Yleisimpiä protokollia ja väylätekniikoita

Tiedonsiirtoväylien käytöllä on saatu vähennettyä perinteisen kaapeloinnin määrää. Väylä on protokolla, joka mahdollistaa kaiken tiedon eli sekä mittauksen että säädön välittämisen samassa kaapelissa. Rakennusautomaatiossa yleisimpiä protokollia ovat muun muassa BACnet, Modbus, M-bus ja KNX, joita käsitellään seuraavissa kappaleissa.

4.3.1 TCP/IP-protokollapino

TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) on tietoliikenteessä käytettävä protokollapino eli usean protokollan kokoelma. Lyhenne TCP/IP lienee tuttu tietokoneiden välisestä internetliikenteestä. Esimerkiksi BACnet-väylätekniikan TCP/IP-profiili ja Modbusin TCP-versio käyttävät tiedonsiirrossa kyseistä protokollapinoa, ja fyysisenä tiedonsiirtoyhteytenä voi toimia rakennuksen yleiskaapelointi eli Ethernet-verkko. TCP/IP-protokollaa käytetään tiedonsiirtoon erityisesti valvomotasolla ja automaatiotason ja valvomotason välillä.

4.3.2 BACnet

BACnet-protokolla (Building Automation and Control Network) on kehitetty erityisesti LVI-tekniikan ohjausta varten, mutta se soveltuu muidenkin järjestelmien ohjaamiseen. BACnet on avoin ja ilmainen alusta, jossa laitteet mallinnetaan objekteina, joita ovat esimerkiksi järjestelmän I/O-pisteet,

asetusarvot sekä aika- ja kalenteriohjelmat. Objektit koostuvat ominaisuuksista (properties). (ST-käsikirja 21, 72.)

Rakennusautomaatiojärjestelmän eri tasoilla tulee olla tietynlainen BACnet-profiili, joka määrittelee, kuinka paljon laitteen tai ohjelmiston tulee ymmärtää BACnet-protokollaa. Käytettäviä tiedonsiirtoyhdistyksiä ovat muun muassa IP-protokolla, kierretty parikaapeli ja langaton ZigBee-tiedonsiirto. BACnet TCP/IP-profiili voi puolestaan hyödyntää rakennuksen yleiskaapelointia, jota käytetään siirrettävien tietomäärien ollessa suuria. BACnet TCP/IP-profiilissa laitteille annetaan IP-osoitteet ja määritellään osoiteavaruudet. (ST-käsikirja 21, 72.)

4.3.3 Modbus

Modbus on jo vuonna 1979 julkaistu, alun perin ohjelmoitavien logiikoiden väliseen tiedonsiirtoon tarkoitettu väylä. Se on avoin, lisenssimaksuton väylä eli Modbus-väylää käyttäviä laitteita voi kuka tahansa valmistaa ilman väylän kehittäjälle maksettavia korvauksia. Modbus on laajasti käytössä erityisesti teollisuudessa ja se on kustannustehokas tapa liittää eri valmistajien laitteita toisiinsa. (ST-käsikirja 21, 77.)

Modbus-protokollasta on useita eri versiota, joista keskeisimmät ovat Modbus RTU, Modbus ASCII ja Modbus TCP/IP. Kaksi ensimmäistä ovat sarjaväyliä ja Modbus TCP/IP puolestaan on ethernet-versio. (ST-käsikirja 21, 72.)

Modbus RTU on primääri-sekundääri protokolla eli tiedonvaihto tapahtuu pollauksena; tiedonsiirto vaatii aina kyselyn primäärilaitteelta sekundaarilaitteelle palauttaa haluttu datamäärä tietystä kohdasta rekisteriavaruutta. Primäärilaitte voi kysellä sekundaarilaitteilta kahdessa eri tilassa; yksilöllisessä lähetystilassa tai monilähetystilassa. (ST-käsikirja 21, 78.)

Yksilöllisessä lähetystilassa primäärilaitte kyselee yksittäiseltä laitteelta, joka lähettää vastauksen takaisin. Monilähetystilassa primäärilaitte lähettää sanoman kaikille sekundaarilaitteille ja sekundaarilaitteet eivät lähetä vastausta. Yhteen primäärilaitteeseen voidaan kytkeä 247 sekundaarilaitetta ja perusversiossa primäärilaitteita voi olla vain yksi. Modbus-kaapeli päätetään 120 Ω tai 150 Ω vastuksella. (ST-käsikirja 21, 78–79.)

4.3.4 M-bus

M-bus (Meter-bus) on vesi-, energia-, ja kaasumittareiden tiedonsiirtoon kehitetty väylä, jota voidaan soveltaa esimerkiksi siten, että kiinteistön lämmitysenergian ja käyttöveden kulutustiedot kerätään mittareilta ja siirretään tietoliikenneverkon kautta automaattisesti laskutettaviksi. M-bus ei sovellu suoraan hälytysten ilmaisemiseen. (ST-käsikirja 21, 80.)

M-bus-järjestelmä sisältää keskuksen ja päätelaitteet, joita ovat mittarit, pulssinkeruuyksiköt, anturit ja toimilaitteet. Modbus-väylän tapaan myös M-bus perustuu primääri-sekundääri-periaatteeseen; keskus lähettää kyselyn päätelaitteelle, joka lähettää vastaussanoman keskukselle. Tiedonsiirto M-bus väylässä voi tapahtua yhteen suuntaan kerrallaan ja vain yhden päätelaitteen ja keskuksen välillä. Tiedonsiirtoon käytetään kaksijohtimista kaapelia, jolla syötetään laitteille myös käyttöjännite. Topologia voi olla väylä-, tähti tai yhdistelmätopologia, mutta ei rengas. (ST-käsikirja 21, 79.)

4.3.5 KNX

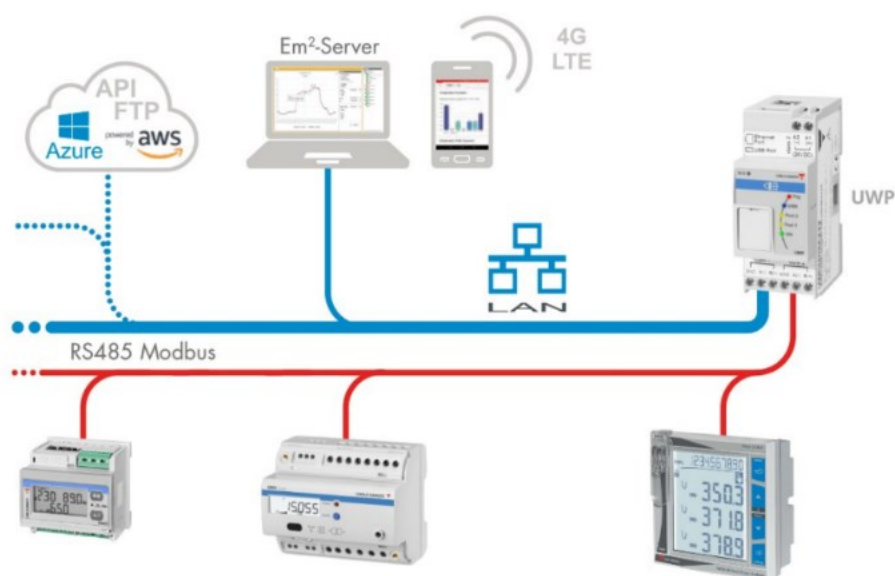
KNX on avoin standardi ja KNX-järjestelmää voidaan käyttää lähes kaikkien taloteknisten järjestelmien ohjaukseen tai niiden osana. KNX-järjestelmä voidaan yhdistää esimerkiksi BACnet:iin tai DALI-väylään. KNX on väyläpohjainen järjestelmä, jossa laitteet kommunikoivat itsenäisesti ilman keskus-tietokonetta. (ST-käsikirja 21, 74.)

KNX-järjestelmässä väyläkaapelina on 2-napainen kaapeli, jonka kautta laitteet saavat käyttöjännitteen sekä valvonta- ja ohjauskäskyt. KNX-järjestelmä koostuu linjoista ja yhteen linjaan voidaan liittää 256 laitetta. Linjat muodostavat alueita. Linjoja voi olla yhdessä alueessa korkeintaan 15 ja alueiden maksimimäärä on myös 15. (ST-käsikirja 21, 74.)

Kaikki KNX-toimilaitteet saavat yksilöllisen osoitteen, joka ilmaisee laitteen sijainnin järjestelmässä. Tiedonsiirto KNX-väylässä tapahtuu kierretyllä parikaapelilla, langattomasti (RF tai WIFI), Ethernetin välityksellä tai käyttämällä normaalia sähkökaapelointia. Käytettävä topologia eli rakenne voi olla väylä-, tähti tai puurakenne, mutta ei rengas. (ST-käsikirja 21, 74–75.)

4.4 Väyläsovittimet

Tiedonsiirto automaatiojärjestelmässä eri tasojen tai laitteiden välillä voi edellyttää siirtymistä protokollasta toiseen, jolloin tarvitaan väyläsovittimia. Väyläsovittimen avulla voidaan myös vaihtaa fyysistä tiedonsiirtotapaa, kuten esimerkiksi vaihtaa kierretystä JAMAK-parikaapelista CAT6-ethernet-kaapeliin tai langattomaan tiedonsiirtoon. Väyläsovittimissa voi lisäksi olla sisäänrakennettuna esimerkiksi datan tallennus- ja palvelintoimintoja. Esimerkiksi Carlo Gavazzi UWP3.0 -väyläsovittimella saataisiin modbus RTU -kenttäväylään kytketyistä energiamittareista mittausdata valvomoon tai data voitaisiin automaattisesti ladata pilvipalveluihin ja edelleen hyödyntää ohjelmistorajapintojen avulla esimerkiksi analyysien ja raporttien muodostamiseen tai kulutusjoustoön.



KUVA 23. Carlo Gavazzi UWP3.0 väyläsovitin (Carlo Gavazzi, 2023)

4.5 Ohjelmointirajapinnat ja niiden hyödyntäminen

Ohjelmointirajapinta API (Application Programming Interface) tarkoittaa ohjelmallista rajapintaa, jonka avulla tiedonsiirto eri ohjelmistojen välillä tapahtuu. Ohjelmistorajapintoja tarvitaan esimerkiksi valvomotoimintojen toteutuksessa ja tiedonsiirrossa rakennusautomaatiojärjestelmän ja ulkoisten järjestelmien, kuten pilvipalveluiden välillä. Rakennusautomaatiossa käytettäviä ohjelmistorajapintoja ovat muun muassa REST API, OPC UA, FTP ja MQTT. Lisäksi jotkin laitevalmistajat ovat kehittäneet omia rajapintojaan.

Ennen ohjelmistorajapintojen yleistymistä datan siirrossa käytettiin tavallisesti tiedosto- tai tietokantapohjaisia ohjelmistojen integraatiotapoja, jotka ovat joissain tapauksissa edelleen käyttökelpoisia menetelmiä, mutta yleensä muilla tavoilla päästään reaaliaikaisempaan ja tietoturvalisempaan tiedonsiirtoon. Tiedostopohjaista integraatiota sovelletaan tyypillisesti historiatietojen välitykseen järjestelmien välillä silloin, kun datan reaaliaikaisuudella ei ole suurta painoarvoa. Esimerkiksi energiankulutuksen tuntisarjoja on mahdollista saada useimmista järjestelmistä automaattisesti tallennettuna esimerkiksi XML- tiedostoon, joka voidaan välittää ulkoiseen järjestelmään datan analysointia varten. (Integrio Oy, 2020.)

Tietokantapohjaiset (esimerkiksi SQL-tietokanta) integraatiot olivat hyvin yleisiä silloin, kun lähes kaikki järjestelmät liitettiin paikalliseen dataa tallentavaan valvomojärjestelmään. SQL-tietokannasta dataa voidaan hakea suoraan internet-verkon yli, mutta tietoturvalisen yhteyden rakentaminen on useimmiten melko raskasta. Toinen vaihtoehto on sellaisen client- tai agenttiohjelman käyttö valvomopalvelimella, joka paikallisesti hakee datan tietokannasta ja lähettää sen jollain muulla tavalla (esimerkiksi http-protokollaa käyttäen) ulkopuoliseen palveluun. Nykyisin kuitenkin valvomopalvelimet ovat keskittyneitä tai pilvipohjaisia palveluita, joten agenttiohjelmien asentaminen ei aina ole mahdollista ja ohjelmistopohjaiset rajapinnat eli API:t ovat muutenkin korvanneet muut tavat monissa tapauksissa. (Integrio Oy, 2020.)

Ohjelmistorajapintojen avulla on mahdollista esimerkiksi integroida sähkön pörssihinnat osaksi rakennusautomaatiojärjestelmää, jolloin sähköenergian ja erityisesti lämmityksen käyttöä voidaan ohjata edullisemmille tunneille, jolloin saavutettaisiin kustannussäästöjä. Spot-hintadata voidaan hakea spot-hinnan tarjoavista palveluista rakennusautomaation käyttöön API-rajapinnan avulla. Esimerkiksi sähköpörssi Nord Poolilla on API-rajapinta, jota sen asiakkaat voivat hyödyntää. Myös kantaverkko-yhtiö Fingridillä on API, jonka käyttö vaatii rekisteröitymisen.

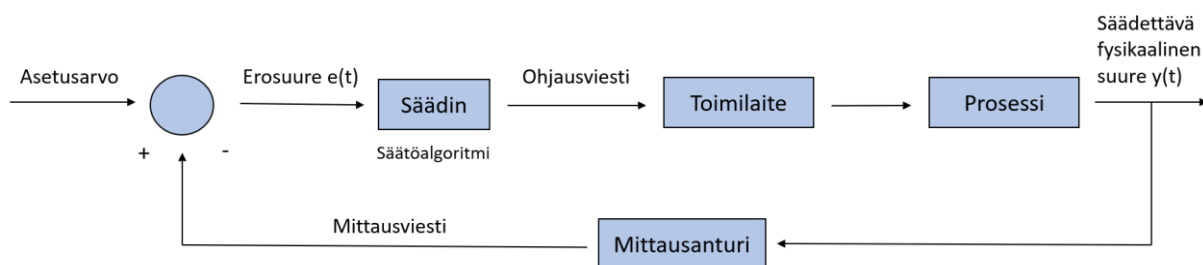
Tulevaisuuden isossa kuvassa vielä paljon merkittävämpää lienee se, että pilvipalveluiden ja ohjelmointirajapintojen tehokkaalla hyödyntämisellä voitaisiin mahdollisesti saada yksittäiset, varsinkin suuremmat kiinteistöt mukaan kulutusjoustoon, jolla ylläpidetään koko kansallisen sähköjärjestelmän tehotasetta ja mahdollistetaan joustavuus, jota tarvitaan liikenteen sähköistyessä, uusiutuvan energiantuotannon ja hajautetun sähkön pientuotannon määrien kasvaessa.

5 SÄÄTÖPIIRIN TOIMINTAPERIAATE

5.1 Suljettu säätöpiiri

Säätöpiirien perusteiden ymmärtäminen on lähtökohta energiatehokkaampien säätöjen ja ohjausten tavoitteluun. Avoimessa ohjauspiirissä ohjattavaa suuretta ei mitata, vaan ohjaus perustuu täysin oletukseen tai tietoon ohjauksen lopputuloksesta. Tällainen ohjaus on esimerkiksi perinteisen lämpötilatermostaatin säätäminen käsin. Suljetussa säätöpiirissä puolestaan mitataan säädettävää suuretta, jonka säätö pyrkii pitämään automaattisesti asetusravossaan takaisinkytkennän avulla.

Suljetussa säätöpiirissä prosessiin vaikutetaan erosuureen eli asetusravon ja mittausarvon erotuksen minimoimiseksi. Suljetussa säätöpiirissä on takaisinkytkentä säädettävästä prosessista mittauksen kautta säätimelle, jonka ulostulo ohjaa toimilaitetta säätimen sisältämän säätöalgoritmin eli matemaattisen mallin mukaisesti. Suljetun säätöpiirin periaatetta on havainnollistettu seuraavassa kuvassa.



KUVA 24. Suljettu säätöpiiri

Esimerkiksi lämpötilan mittausarvon ollessa 18 °C ja asetusravon ollessa 22 °C on erosuure 4 °C, jolloin säädin antaisi ulostulona ohjausviestin esimerkiksi säätöventtiilin avaamiseksi tai puhaltimen ohjaamiseksi. Ohjausviestiin vaikuttaa erityisesti käytetty säädin ja sen viritys.

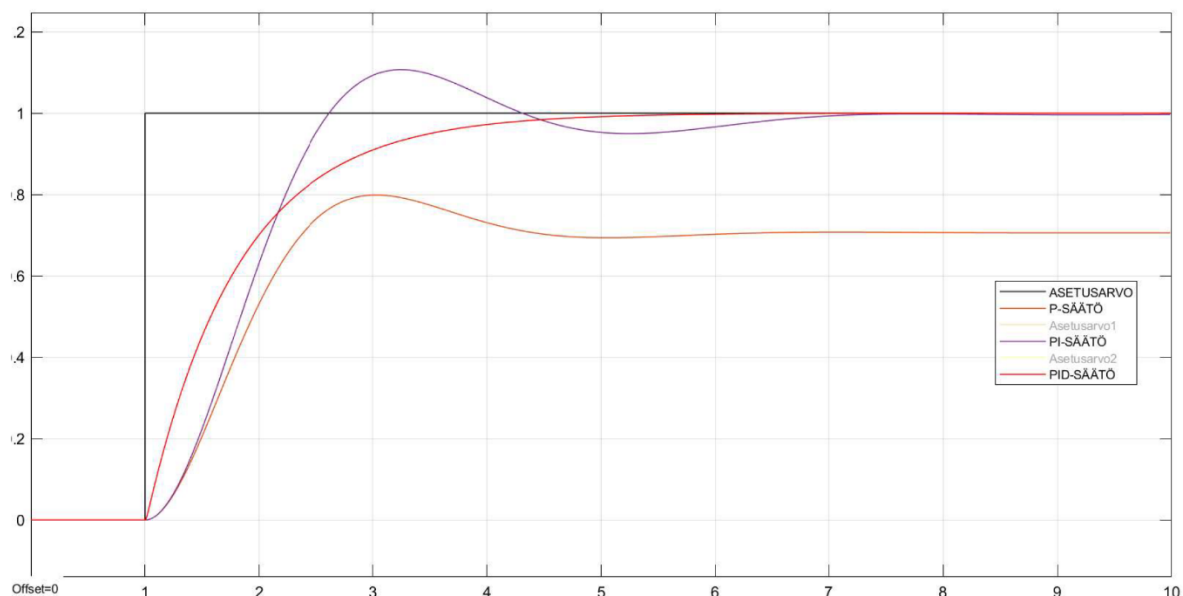
5.2 PID-säädin

PID-säädin on yksi perussäätimistä, jonka ulostulo on yhdistelmä kolmesta termistä, jotka ovat vahvistus P (Proportional), integroiva termi I (Integral) ja derivaiva termi D (Derivative). Säätimen sisäisenä menona on asetusravon ja mittausarvon erotus $e(t)$. Matemaattisesti PID-säätimen ulostulo $u(t)$ esitetään kaavalla

$$u(t) = \underbrace{K_P \cdot e(t)}_{P\text{-termi}} + \underbrace{K_I \cdot \int e(t) dt}_{I\text{-termi}} + \underbrace{K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t)}_{D\text{-termi}}, \quad (1)$$

missä K_P on vahvistuskerroin, K_I on integrointiaika ja K_D on derivointiaika (ST-käsikirja 17, 31). Säädin virityksellä tarkoitetaan näiden parametrien arvojen määrittämistä ja asettamista siten, että säätö toimisi optimaalisesti eli se olisi mahdollisimman tarkka ja riittävän nopeasti reagoiva. Virittäminen voidaan tehdä kokeellisesti (askelvastekoe), kokemusperäisesti tai käyttäen erilaisia vakiintuneita viritysmenetelmiä.

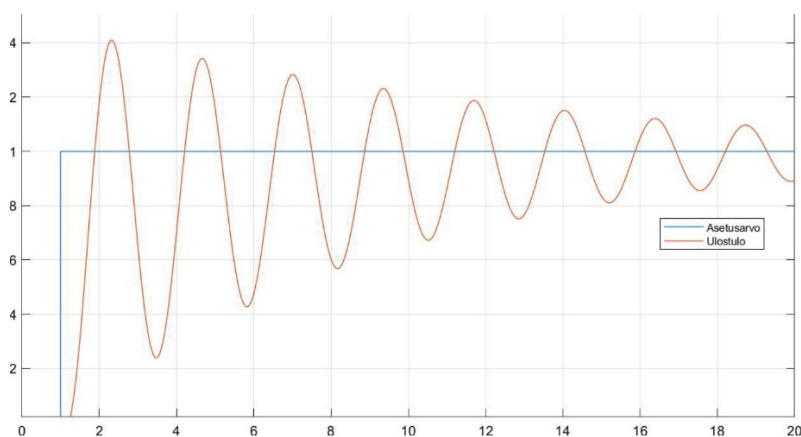
Vahvistus eli P-osa skaalaa asetusarvon ja mittausarvon erotuksen $e(t)$ kertoimella K_p , jolloin säädin antaa sitä suuremman ulostuloviestin, mitä isompi poikkeama asetusarvon ja mittausarvon välillä on. Säätimessä pelkän vahvistuksen P käyttö yksinään aiheuttaa pysyvän säätöpoikkeaman, joten säätimen I-osa eli integroiva termi pyrkii pienentämään tämän poikkeaman. D-osa puolestaan kasvattaa säätimen reagointinopeutta ja se pyrkii ennakoimaan säädettävän prosessin käyttäytymistä. (ST-käsikirja 17, 31.) P-, PI-, ja PID-säätimien eroja on havainnollistettu seuraavassa kuvassa.



KUVA 25. Havainnekuva P-, PI- ja PID-säätöjen reagoinnista asetusarvon muutokseen

Rakennusautomaatiossa käytetään tavallisesti P, PI ja PID-säätöjä. Pelkkää P-säätöä käytettäessä hyväksytään säädön tarkkuus käyttökohteeseen riittävän hyväksi ilman I- ja D osia. PI-säädössä D-osaa ei ole ja hitaasti reagoivissa prosesseissa D-termin vaikutus olisi pieni, koska tällöin erosuureen muutosnopeus (de/dt) on pieni (ST-käsikirja 17, 31). Hitaasti reagoiva prosessi on esimerkiksi sellainen, jossa lämpöä varaavaa massaa on paljon.

Liian suuri vahvistus tai liian nopea reagointiaika voivat johtaa säätimen ulostuloviestin värähtelyyn, jolloin säätö liikuttaa toimilaitetta (kuten venttiiliä) tarpeettomasti, jolloin toimilaite kuluu ylimääräisten käyttösyklien vuoksi nopeammin ja energiaa kuluu turhaan (ST-käsikirja 17, 227). Säädön viritykselläkin on siten vaikutusta energiatehokkuuteen ja samalla myös mukavuuteen, kun esimerkiksi lämpötilan säätö ei vaihtelee edestakaisin.



KUVA 26. Huonosti viritetyn säädön ulostulo värähtelee kuluttaen turhaan energiaa ja toimilaitetta.

6 OHJAUKSIA JA OHJELMALLISIA TOIMINTOJA

6.1 Aika- ja kalenteriohjaus

Aikaohjelmilla voidaan ohjata lähes kaikkia rakennuksen taloteknisiä järjestelmiä ja aikaohjausten asetuksilla onkin suuri vaikutus rakennuksen energiankäyttöön. Energiankäytön kannalta on tärkeää, että aikaohjelmat on asetettu vastaamaan tilojen todellisia käyttöprofileja ja että aikaohjauksia säädetään tilojen käytön muuttuessa. (ST-kortti 710.10, 2.)

Aikaohjelmissa voidaan asettaa viikoittain toistuva ohjaus, joka on aikaohjelman normaali viikoittainen käyntiaika. Aikaohjaus voidaan määritellä koskemaan esimerkiksi tiettyjä päiviä tai tunteja. Nykyään on tavallista, että aikaohjelmat ohjelmoidaan myös alakeskuksiin, joten tiedonsiirtohäiriön satuesssa varmistetaan ohjausten toiminta. (ST-kortti 710.10, 2.)

Yksinkertaisimmillaan aikaohjelma määrittää jonkin yksittäisen laitteen käynnistymistä tai pysähtymistä. Aikaohjaus voi myös olla pelkkä käyntilupa, jolloin ohjattavaan prosessiin liittyy muitakin ehtoja. Esimerkiksi tilakohtaisissa säädöissä voidaan aikaohjelmaa käyttää käyntilupana, jolloin säätö käynnistyy valmiustilaan ja lopullinen käynnistymiskäsky tulee läsnäolotunnistimelta. (ST-kortti 710.10, 2.)

Aikaohjausta voidaan käyttää esimerkiksi lämmityksen, valaistuksen tai ilmanvaihtokoneiden ohjaamiseen. Esimerkiksi lattian betonilaattaan asennettu varaava lämmitys reagoi ohjaukseen hitaasti, koska lattialaatta varastoi itseensä lämpöenergiaa, minkä vuoksi se sekä lämpenee että luovuttaa lämpöä hitaasti. Tällöin aikaohjaus voisi olla tehokas tapa lämmityksen käyttöön. Esimerkiksi pesutiloissa lämmitys yleensä ohjataan päälle ennakoivissa sykleissä. Toisaalta aikaohjelmilla voidaan pienentää lämmitysverkoston lämpötila-asetusta, kun tiloilla ei ole käyttöä. Lisäksi ilmanvaihtoa tai valaistusta voidaan tarpeenmukaisesti ohjata aika- tai kalenteriohjelmilla.

6.2 Tehonrajoitus

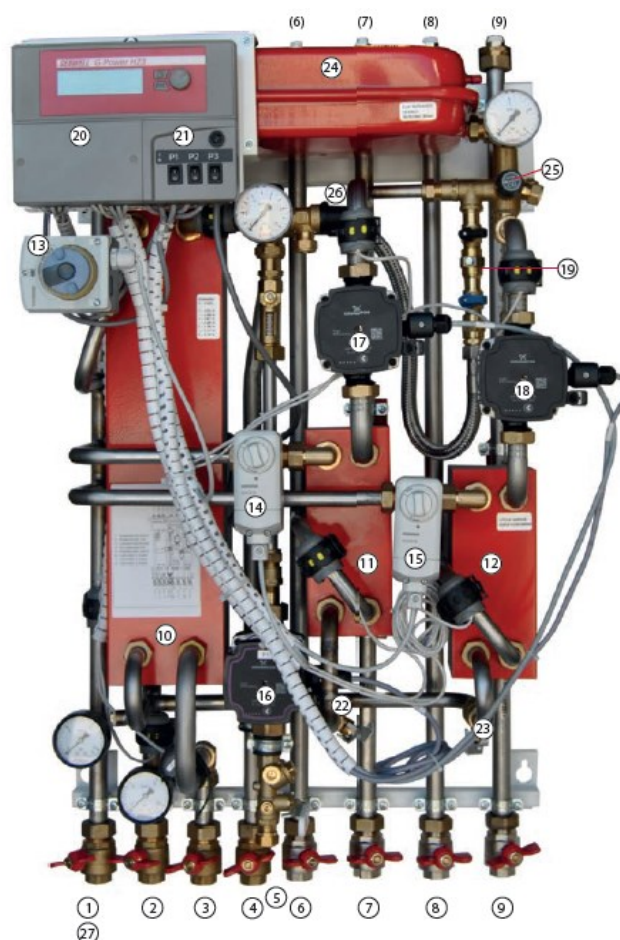
Tehonrajoitusohjelmilla voidaan rajoittaa sähkötehoa, kuten esimerkiksi lämmitykseen käytettävän tehon määrää sellaisissa tilanteissa, joissa lähestytään kiinteistön huipputehoa. Käytettävissä olevan huipputehon määrän rajoittaa käytännössä kiinteistön pääsulakekoko tai kaupalliset sopimukset. Tehonrajoitustoiminnolla voi olla myös laskeva vaikutus energiankulutukseen, koska se ei mahdollista yhtä suurta tehon käyttöä kuin ilman sitä. (ST-kortti 710.10, 7.)

Esimerkiksi omakotitaloissa tyypillinen tilanne on sähköauton lataamisen ohjaaminen lataustehoa rajoittamalla kuormanhallinnan avulla, mutta useimmiten lataustehon rajoittamisen tarve koskee suurempiakin kiinteistöjä. Lataustehoa pienennetään, jos kiinteistön kokonaiskulutus uhkaa kasvaa liian suureksi. Nykyään markkinoilla on saatavilla kuormanhallintaa varten myös releitä, joilla voidaan ohjata kuormia päälle tai pois päältä käyttäen esimerkiksi WI-FI-verkkoyhteyttä.

6.3 Vesikiertoisen lämmitysjärjestelmän ohjaus

Suomessa asuin- ja palvelurakennusten lämmityksestä noin 46 % tuotetaan kaukolämmöllä (Energiateollisuus ry:n kaukolämpötilasto), joten työssä käsitellään esimerkinomaisesti vesikiertoisen lämmityksen säädön periaatetta. Kaukolämpölaitoksissa tuotettu kuuma vesi siirretään kaukolämpöputkia pitkin kiinteistöihin, joiden lämmönvaihtimissa lämpöenergia siirtyy rakennuksen toisiopiiriin, johon on kytketty vesikiertoinen lattialämmitys, lämpöpatterit, lämmin käyttövesi ja mahdollisesti myös ilmanvaihtokoneen tuloilman lämmityspatterit.

Vesikiertoista lämmitystä voidaan ohjata menoveden lämpötilaa säätämällä venttiilien avulla tai kiertovesipumppua ohjaamalla. Vesikiertoinen lattialämmitys ja patteriverkosto ovat ohjattavissa yksittäin tai ryhminä siten, että kullakin ohjattavalla lämmityspiirillä on oma toimilaitteensa. Lämmitysjärjestelmän sisältämiä komponentteja on havainnollistettu alla olevan pientalokeskuksen kuvan avulla.



Nro Komponentti

- 1 Kaukolämpö paluu
- 2 Kaukolämpö tulo
- 3 Lämmin käyttövesi
- 4 Kylmän veden syöttö
- 5 Lämminkäyttövesikierto
- 6 Lämmitys 1 meno
- 7 Lämmitys 1 paluu
- 8 Lämmitys 2 meno
- 9 Lämmitys 2 paluu
- 10 Käyttövesi lämmönsiirrin LS1
- 11 Lämmitys lämmönsiirrin LS2
- 12 Lämmitys lämmönsiirrin LS3
- 13 Käyttövesi, säätöventtiili TV1
- 14 Lämmitys 1, säätöventtiili TV2
- 15 Lämmitys 2, säätöventtiili TV3

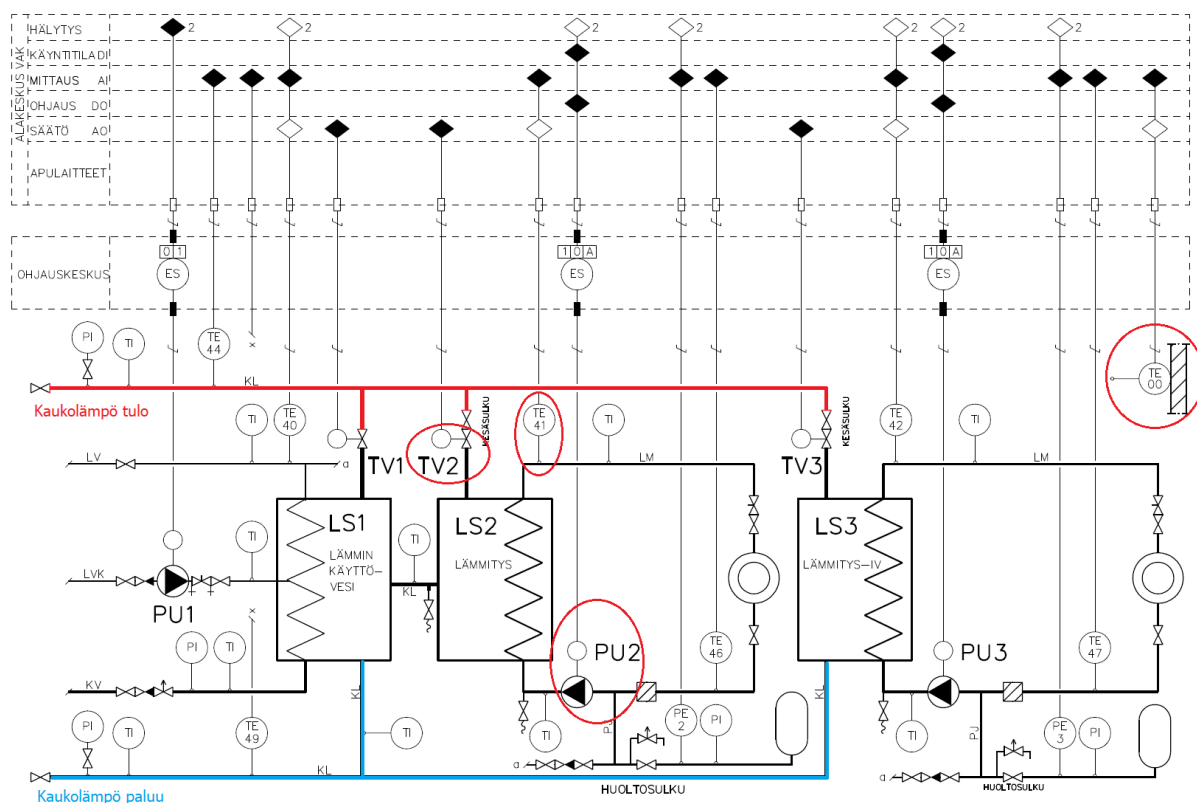
Nro Komponentti

- 16 Käyttövesi, taajuusmuuttajapumppu P1
- 17 Lämmitys 1, taajuusmuuttajapumppu P2
- 18 Lämmitys 2, taajuusmuuttajapumppu P3
- 19 Lämmityspiirien täyttöventtiili
- 20 Käyttövesi- ja lämmityssäädin
- 21 Käyttövesi- ja lämmityskiertovesipumppujen käyttökytkimet
- 22 Lämmitys 1, kaukolämmön kesäsulku
- 23 Lämmitys 2, kaukolämmön kesäsulku
- 24 Lämmityspiirien paisunta-astia
- 25 Lämmityspiirien varoventtiili DN15/2,5 bar
- 26 Käyttöveden varoventtiili DN15/10 bar
- 27 Paine-erosäädin (lisävaruste)

Suluissa esitetty vaihtoehtoiset kytkentäsuunnat

KUVA 27. Kaukolämpölaitteiston komponentteja (Gebwell Oy, 2022)

Vesikiertoisen lämmityksen säädön peruseriaatetta on havainnollistettu seuraavassa kuvassa CAD-MATIC-suunnitteluohjelman mallikaaviopohjan avulla. Automaatiojärjestelmä ohjaa venttiileitä ja pumppuja. Säätkäavion olennaisimmat laitteet ovat löydettävissä myös edellisen sivun kuvasta; numerot 10-12 ovat lämmönsiirtimet, venttiili on numero 14 ja numerot 16-18 ovat pumput.



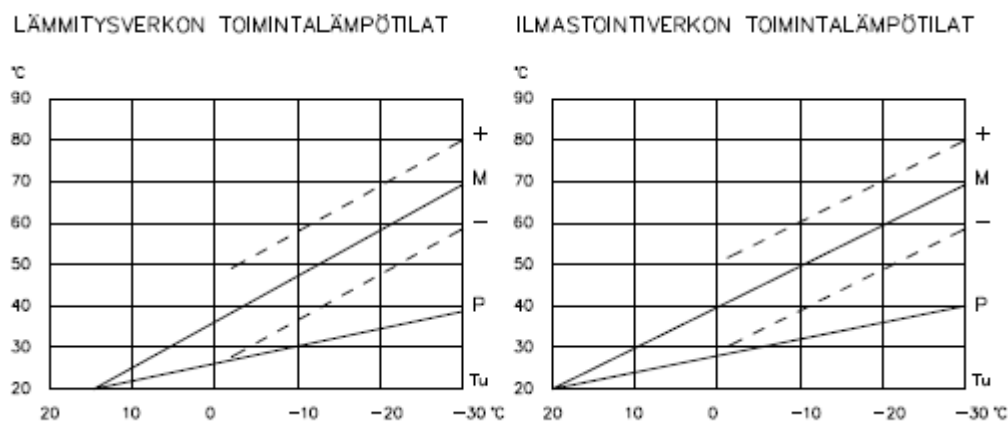
KUVA 28. Lämmityskaavio (CADMATIC Oy, 2022)

Toimintaselostus on sanallinen kuvaus ohjattavasta prosessista. Automaatio ohjaa venttiiliä TV2 menoveden lämpötila-anturin TE41 arvon perusteella pitäen menoveden lämpötilan säätökäyrän mukaisena. Venttiilillä siis rajoitetaan kuuman kaukolämpöveden virtausta lämmönvaihtimelle.

Kiertovesipumppu PU2 käynnistyy ulkolämpötila-anturin TE00 mittausarvon laskiessa alle asetusarvon ja pumppu pysähtyy ulkolämpötilan noustessa asetusarvoa suuremmaksi. Vesiverkon lämpötiloille ohjelmoidaan ylä- ja alarajahälytykset ja lisäksi pumppujen tilaa voidaan valvoa tilatiedoin ja hälytyksin, jolloin saadaan hälytys, jos pumppu ei pyöri silloin kun sen pitäisi.

Kuten kuvan yläosan viivastolta nähdään, niin lämpötila-anturit ovat kytketty valvonta-alakeskuksen (VAK) analogisiin tuloihin, venttiilit analogisiin lähtöihin ja pumppujen ohjaukset digitaalisiin lähtöihin.

Automaatiojärjestelmä ohjaa pumppuja ja venttiileitä esimerkiksi alla olevien säätökäyrien mukaisesti ulkolämpötilan funktiona. Ulkolämpötilaa mitataan lämpötila-anturilla. Esimerkiksi ulkolämpötilan ollessa 0 °C olisi lämmitysverkon lämpötilan asetusarvona noin 35 °C ja ilmanvaihtokoneen lämmityspatterin asetusarvona 40 °C.



KUVA 29. Lämmityksen toimintaselostus ja esimerkkisäätökäyrät (CADMATIC Oy, 2022)

6.4 Koneellinen ilmanvaihto

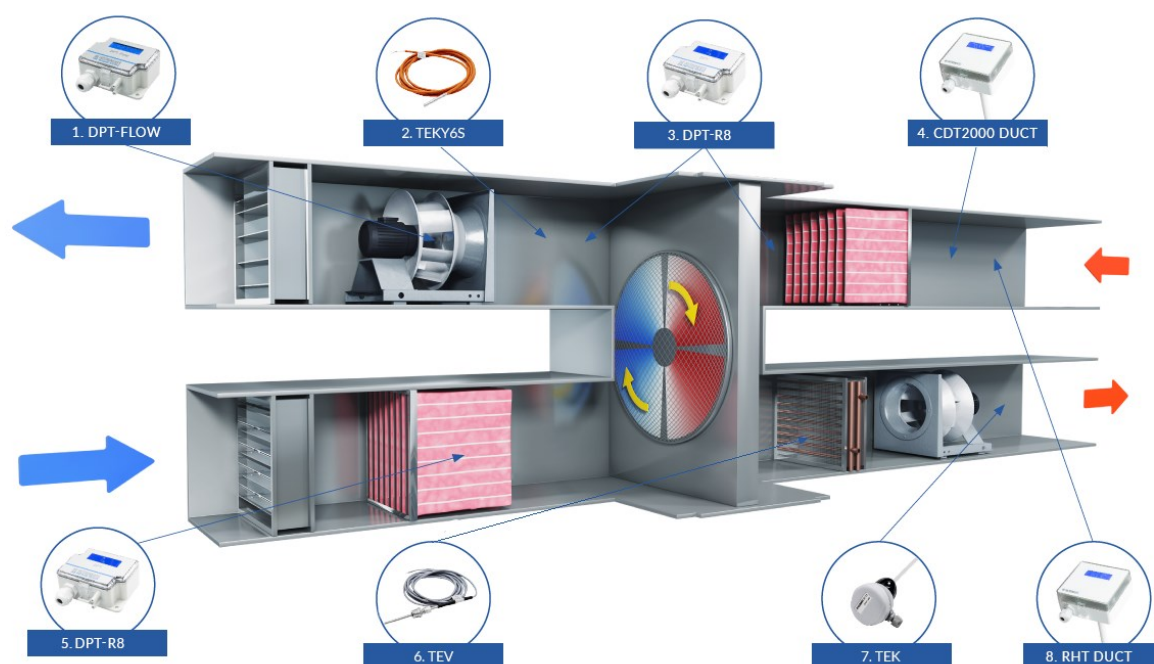
Ilmanvaihtoa tarvitaan, jotta rakennuksen sisäilmassa olevat hiilidioksidi, kosteus ja epäpuhtaudet saadaan poistettua. Tuloilma otetaan ulkoilmasta ja se suodatetaan sekä tarvittaessa lämmitetään ennen puhaltamista rakennuksen sisätiloihin. Rakennuksen ilmanvaihtokoneessa voi olla vesikiertoinen tai sähkötoiminen lämmityspatteri tuloilman lämmitystä varten. Lisäksi IV-koneessa voi olla jäähdytyspatteri. IV-koneissa on myös lämmöntalteenotto, jolla ilmanvaihdon energiatehokkuutta voidaan merkittävästi parantaa. Lämmöntalteenotolla siirretään osa poistoilman sisältämästä lämpöenergiasta takaisin tuloilmaan.

IV-koneissa voi olla pieniä eroavaisuuksia, mutta kaikista koneista löytyvät keskeisimmät osat ovat peltimoottoreilla ohjattavat tulo- ja poistoilmapellit, suodattimet, lämmöntalteenottolaitteisto (pyörivä LTO-kiekko tai kuutiolämmöntalteenotto), lämmityspatteri, jäähdytyspatteri, erilaiset anturit sekä tulo- ja poistoilmapuhaltimet. Tulo- ja poistoilmapuhaltimia ohjataan yleensä taajuusmuuttajilla.

6.4.1 Ilmanvaihtokoneen ohjaukset

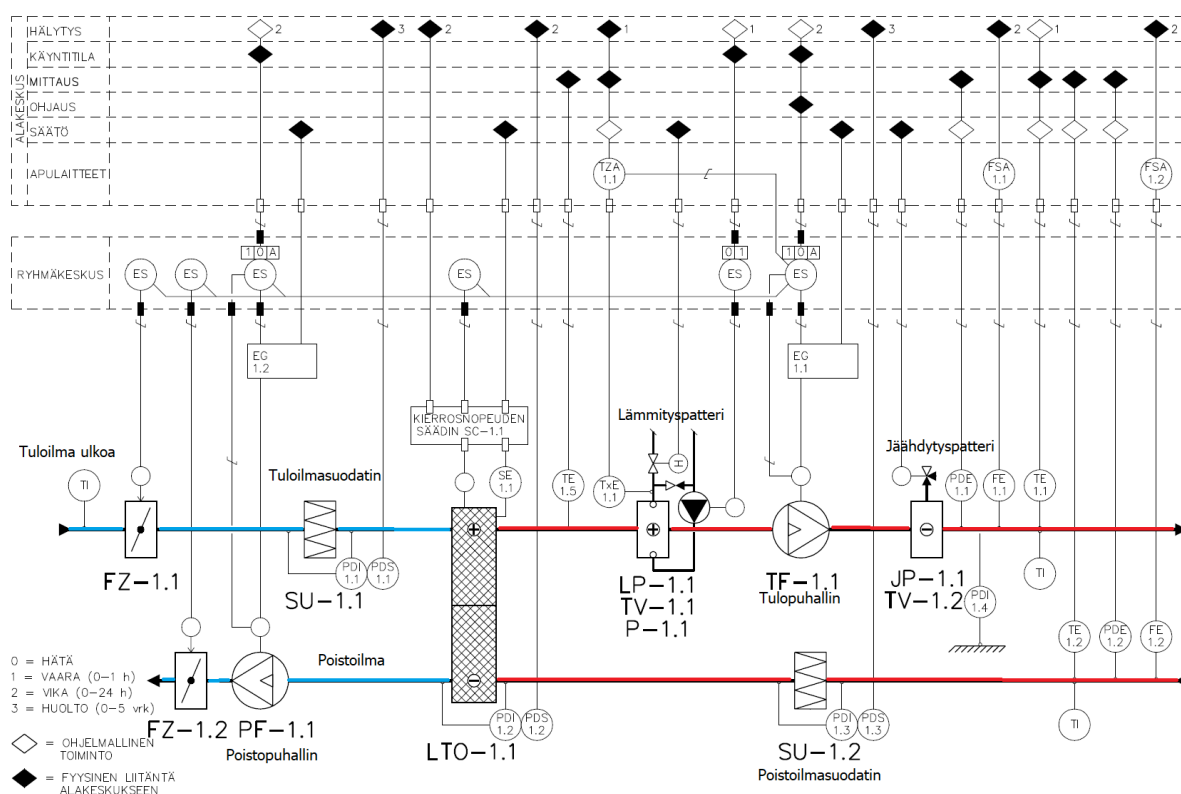
Ilmanvaihtokoneen ohjauksia käsitellään toisena erityisenä säätöesimerkinä ja ilmanvaihtokoneeseen liittykin melko paljon automaation I/O-pisteitä. Koneen ohjattavia toimilaitteita ovat peltimoottorit, puhaltimet sekä lämmityspatterin venttiilit ja kiertovesipumput. IV-koneen sisältämiä antureita puolestaan ovat muun muassa lämpötila-, paine- ja virtausanturit sekä paine-erolähettimet.

Pyörivällä LTO-kiekkolla varustetun IV-koneen rakennetta ja antureita on havainnollistettu seuraavassa kuvassa. Raitisilma puhalletaan rakennukseen sisälle alavasemmalla tuloilmasuodattimen lävitse, se kulkee lämmöntalteenoton ja lämmityspatterin lävitse ja edelleen rakennuksen sisätiloihin ilmanvaihtokanavia pitkin. Poistoilma puolestaan imetään rakennuksen sisältä ja lämmöntalteenoton kennostoon varastoituu poistoilman sisältämää lämpöenergiaa, joka LTO-kiekon hitaasti pyöriessä siirtyy tuloilmaan.



KUVA 30. Havainnekuva IV-koneesta pyörivällä lämmöntalteenotolla (HK Instruments, 2022)

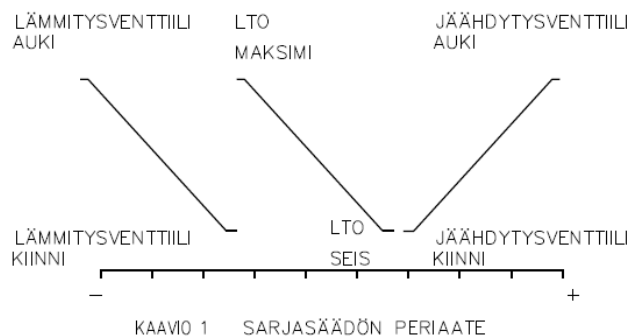
Pyörivällä LTO-kiekkolla varustetun IV-koneen säätökaavio on esitetty seuraavassa kuvassa.



KUVA 31. Pyörivällä LTO-kiekkolla varustetun IV-koneen säätökaavio (CADMATIC Oy, 2023)

Koneen käynnistyessä pellit (FZ) avautuvat ja poistoilmapuhallin (PF) käynnistyy. Koneen pysähtyessä puolestaan poistoilmapuhallin ja LTO-kiekkopuhallin pysähtyvät sekä kaikki venttiilit sulkeutuvat. Tuloilmapuhallin (TF-1.1) vuorokautista käyntiaikaa ohjataan aikaohjelman mukaan ja säätöjärjestelmä pitää taajuusmuuttajien (EG) ja paine-erolähettimien avulla kanavapaineet vakiona. Lämpöti-

lan säätö tapahtuu ohjaamalla LTO-kiekon pyörimisnopeutta kierrosnopeussäätimellä sekä ohjaamalla lämmitys- ja jäähdytysventtiilejä siten, että rakennuksen IV-kanavistoon ohjattavan ilman lämpötila pysyy asetusarvossaan. Seuraavassa kuvassa on venttiilien ja lämmöntalteenoton säätökäyrät.



KUVA 32. IV-koneen venttiilien ja lämmöntalteenoton säädön periaatteellinen kaavio (CADMATIC Oy, 2023)

Lisäksi IV-koneessa on pakkokytkeä ja hälytyksiä, jotka voivat olla toteutettu fyysisillä kytkennöillä tai ohjelmallisesti. Esimerkiksi tuloilmapuhallin ja poistoilmapuhallin käyvät aina samanaikaisesti ja tuloilmapuhallin ei saa käynnistyä, jos lämmityspatterin kiertovesipumppu ei ole käynnissä. Ohjelmallisia hälytyksiä voivat olla esimerkiksi lämpötilojen ala- ja ylärajahälytykset liian matalista tai korkeista lämpötiloista sekä virtaushälytykset, jos anturit eivät havaitse riittävää ilman virtausta puhaltimien käydessä. Ilmansuodattimien paine-erolähtimiltä puolestaan saadaan hälytykset, kun suodattimet ovat niin likaantuneet, että ne vaativat vaihtoa.

6.4.2 Lämmöntalteenottotavat

Keskeisimpinä eroina erilaisissa IV-koneissa on lämmöntalteenoton toteutustavat. Edellä esitetty pyörivä lämmönsiirrin rakentuu kennomaisesta kiekosta, joka pyörii hitaasti sähkömoottorin välityksellä. Lämmönsiirrimen kennosto valmistetaan yleensä ohuesta alumiinista ja rakenne on valmistettu siten, että kennoston lämmönvarauskyky ja lämmönsiirtopinta-ala ovat suuria. Lämmönsiirrimen kennostoon varautuu ensin puolen kierroksen ajan poistoilman sisältämää lämpöenergiaa, joka LTO-kiekon pyöriessä siirtyy tuloilmaan. Tulo- ja poistoilmavirrat kulkevat siis kennostoon nähden vastakkain ja lämpötilahyötysuhde on yleensä jopa 70–80 %. Sähkömoottorin osuus ilmanvaihtokoneen kokonaisenergian kulutuksesta on myös pieni. Pyörivä lämmönsiirrin soveltuu myös jäähdytyksen talteenottoon. Rakennusautomaation avulla lämmön talteenottoa voidaan säätää portaattomasti muuttamalla kiekon pyörimisnopeutta tai pysäyttämällä se kokonaan.

Kuutiolämmöntalteenotossa puolestaan on kiinteä, kuution muotoinen kennosto, jonka joka toisessa välissä virtaa lämmin poistoilma ja joka toisessa välissä rakennukseen tuotava viileämpi raitisilma. Poistettavasta ilmasta siirtyy lämpöä kennoston seinämien läpi rakennuksen sisälle tuotavaan ilmaan. Levylämmönsiirtimien hyötysuhde on tyypillisesti luokkaa 55–70 %. Kuutiolämmöntalteenoton laitteita on niin sanottuja vasta- ja ristivirtalämmönsiirtimiä sen mukaan, miten ilma virtaa kennostoissa.

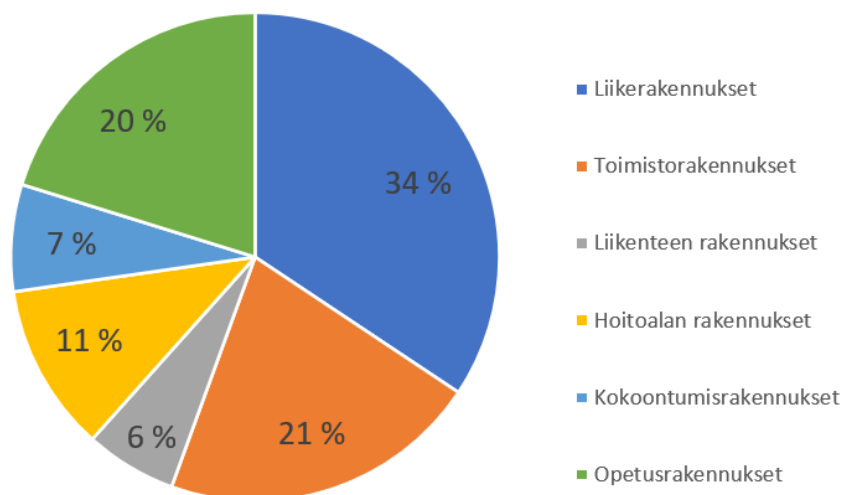
7 RAKENNUSAUTOMAATIO JA ENERGIA TEHOKKUUS

7.1 Lainsäädännöllinen viitekehys

Euroopan unionissa on sitouduttu pienentämään kasvihuonekaasupäästöjä vuoden 1990 tasoon verrattuna vähintään 55 % vuoteen 2030 mennessä (Eurooppalainen ilmastolaki, 2021/1119/EU). Lisäksi vuonna 2018 uudistettiin aiempaa rakennusten energiatehokkuusdirektiiviä (Direktiivi 2010/31/EU¹. Energy Performance of Buildings Directive), joka korostaa automaation merkitystä rakennusten energiatehokkuuden tavoittelussa.

Direktiivi uudistuksen myötä Suomessa tuli voimaan laki, joka edellyttää rakennusautomaatiojärjestelmän asentamista uusiin tai olemassa oleviin ei-asuinrakennuksiin, joiden lämmitysjärjestelmän tai yhdistetyn lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmän nimellisteho ylittää 290 kW (Laki rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä 733/2020, 11 § ja 13 §).

Direktiivi uudistuksen kansallisen toimeenpanon vaikutuksia oli selvitetty ja arvioitu ennen lain toimeenpanoa ympäristöministeriön rahoittamassa RESA-hankkeessa (2018–2019), jossa olivat mukana Suomen ympäristökeskus SYKE, Tampereen ammattikorkeakoulu, Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Benviroc Oy ja Aalto yliopiston kauppakorkeakoulu. Hankkeen aineiston lähteenä oli pääasiassa asiantuntijahaastattelut ja järjestetyt työpajat. Seuraavassa kuvassa on havainnollistettu arviota uuden lain piirissä olevien rakennusten suhteellisista osuuksista hankkeen tietojen perusteella.



KUVA 33. Direktiivi uudistuksen kohteena olevat rakennukset (RESA-hanke, 2018–2019)

Hankkeen johtopäätöksenä todettiin, että automaatiojärjestelmät ovat niin yleisiä ja hyvätasoisia etenkin suurissa ei-asuinrakennuksissa, että automaatiovelvoite aiheuttaa lopulta vain vähän vaikutuksia. Sen sijaan lain piiriin kuulumattomien asuinrakennusten automaatio aiheuttaisi hankkeen arvon mukaan enemmän vaikutuksia kuin direktiivin ei-asuinrakennuksiin kohdistuvat edellytykset. Hankkeen mukaan lainsäädännöllisen ohjauksen vaikutuksia vähentää myös automaatiojärjestelmien nopea markkinavetoinen kehitys. (RESA-hanke, 2018–2019.)

7.2 Energiatehokkuus

Rakennusten energiatehokkuus on kokonaisuuden hallintaa ja lähtökohdat erilaisten energiatehokkuutta parantavien ratkaisujen painottamiseen on esitetty seuraavan kuvan Kioto-pyramidissa, jossa on kuvattu energiatehokkaan rakentamisen portaat ja esimerkkejä eri tasojen automaatiotoiminnoista.



KUVA 34. Kioto pyramidin (Sähköinfo Oy, 2020)

Alimmaisella tasolla on eli tärkeimmäksi keinoksi pyramidin mukaan nähdään lämpöhäviöiden pienentäminen, jota voidaan toteuttaa esimerkiksi pitämällä lämmityksen ja käyttöveden lämpötilat tarpeenmukaisina ja vähentämällä jäähdytyksen tarvetta käyttämällä aurinkosuojauksia. Lämpöhäviöiden minimointi lähtee kuitenkin jo energiatehokkaasta rakentamisesta eli energiatehokkaista rakenneteknisistä ratkaisuista sekä materiaali- ja laitevalinnoista, joihin vaikutetaan jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa.

Tasojen ylöspäin mentäessä on energiankäytön optimointi, ilmaisenergian hyödyntäminen esimerkiksi IV-koneen lämmöntalteenotolla, energian kulutuksen ohjaus huone- tai laitekohtaisesti ja ylimpänä on energialajikohtainen raportointi ja tehokkaimman energiamuodon hetkittäinen valinta.

7.3 Energiatehokkuusstandardin näkökulma

Standardi SFS-EN ISO 52120-1:2022:en käsittelee rakennusten energiatehokkuutta automaation näkökulmasta. Standardi jakaa rakennuksen automaation neljään tehokkuusluokkaan, jotka on esitetty seuraavassa taulukossa; luokka A on paras ja D on huonoin. Samaa luokittelua käytetään asuin- ja muissa kiinteistöissä. Standardissa on tuotu esille toimintoja ja laskentamenetelmiä, joilla voidaan vaikuttaa rakennusten energiatehokkuuteen eri tehokkuusluokissa (A, ..., D).

TAULUKKO 1. Automaatiotasot standardia SFS-EN ISO 52120-1:2022:en mukaillen

A	Erittäin energiatehokas automaatio ja käytössä on laajasti teknisen kiinteistönhallinnan toimintoja
B	Kehittynyt automaatio ja muutamia yksittäisiä teknisen kiinteistönhallinnan toimintoja
C	Automaation tavanomainen minimitaso
D	Manuaaliohjaukset, joita ei tulisi enää rakentaa

Luokan D sisältämä automaatio koostuu käsikäyttöisistä ohjauksista. Luokan D automaatio on energiatehotonta ja sen luokan järjestelmiä ei pitäisi enää rakentaa, vaan ne tulisi uudistaa. Luokan C ratkaisut vastaavat nykyistä tavanomaista minimiratkaisua. Liike- ja toimistorakennuksissa taso C on yleensä toteutettu keskitetyillä ohjaus- ja säätöjärjestelmillä, mutta myös hajautetusti käyttäen erillisiä laitteita. (ST-käsikirja 20, 8.)

Tehokkuusluokan B automaatio edellyttää tavanomaista edistyneempää automaatiota, joka on varustettu muutamilla yksittäisillä teknisen kiinteistönhallinnan toiminnoilla. Lähtökohtana on, että toiminnot ovat toteutettu luokkaa C tehokkaammin. Tasolla B on käytössä rakennusten eri järjestelmien optimointi tarpeenmukaisten ohjausten toteuttamiseksi. Esimerkiksi huonesäätimet ovat yhdistetty rakennusautomaatioon tiedonsiirtoväylällä. (ST-käsikirja 20, 8.)

Luokan A automaatio vastaa erittäin pitkälle vietyä automaatiojärjestelmää, joka on varustettu kattavasti myös teknisen kiinteistönhallinnan toiminnoilla. Luokassa A huonesäätimillä hoidetaan tarpeenmukaiset lämmityksen, ilmanvaihdon, ilmastoinnin ja muiden järjestelmien monimutkaisetkin toiminnot. (ST-käsikirja 20, 8.)

Luokitusten soveltaminen vaatii kuitenkin tulkintaa. Samaa tilaa palvelevien automaatiotoimintojen automaatioluokitus määräytyy järjestelmien alimman luokan mukaan; esimerkiksi päällekkäisten lämmitysjärjestelmien automatisoinnin tasoissa voi olla eroja, jos käytetään yhtäaikaaisesti useampaa eri lämmitysratkaisua. Lisäksi korkeimman tehokkuusluokan ratkaisua ei liene välttämättä järkevää käyttää jokaista siivouskomeroa tai varastoa myöten.

7.4 Keinoja energiatehokkuuden parantamiseen

Energiansäästöissä ja energiatehokkuudessa kyse on kokonaisuuksien hallinnasta. Jotta automaatiota voisi tehokkaasti ja turvallisesti hyödyntää energiatehokkuuden parantamisessa ja energiankäytön optimoinnissa, on tunnettava automaatiojärjestelmien toiminnalliset perusperiaatteet, järjestelmän rakenne ja laitteet.

Lisäksi on tärkeää ymmärtää ohjattavat prosessit, kuten lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmien toiminta sekä energiansäästön turvalliset reunaehdot, joilla vältetään esimerkiksi kosteuden kondensoituminen rakennuksen rakenteisiin, IV-koneen jäätyminen tai Legionella-bakteerien lisääntyminen käyttövesiputkistossa. Seuraavaan luetteloon on koottu yleisen tason keinoja, joilla voidaan vaikuttaa rakennusten energiatehokkuuteen.

- Lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmanvaihdon tarpeenmukainen käyttö ja ohjaus
 - Pysytään järkevissä asetusarvoissa
 - Huonelämpötilan pienentäminen ja ilmanvaihdon vähentäminen, kun tiloilla ei ole käyttöä
 - Lämmitysverkoston pumppujen pysäytys lämpötilan mukaan (esimerkiksi kesäajaksi)
 - Estetään lämmityksen ja jäähdytyksen yhtäaikainen käyttö
 - Ennakoidaan lämmityksen tarvetta säätietojen perusteella
- Aika- ja kalenteriohjelmien hyödyntäminen
- Valaistuksen tarpeenmukainen ohjaaminen esimerkiksi läsnäolotunnistimilla, valoisuusantureilla ja aikaohjelmilla
- Energian tehokas hyödyntäminen
 - IV-koneen lämmöntalteenotto
 - Yöjäähdytys
- Säättöjen oikeanlainen viritys
 - Värähtely aiheuttaa toimilaitteiden tarpeetonta liikettä ja siten energiahäviöitä
- Tarpeeksi olosuhdemittauksia ja hälytyksiä prosesseista
 - Ylä- ja alarajahälytykset, lämmöntalteenoton hyötysuhdehälytykset
- Riittävästi trendejä ja analytiikkaa
 - Energiankulutuksen seuranta
 - Poikkeamiin tai virhetoimintoihin puuttuminen ajoissa (minimoidaan aiheutuvat energiahäviöt)
- Vesimittarista vuotohälytys automaatiojärjestelmään
- Energiankäyttöprofiilien erittely kulutuskohteittain ja kulutuksen tarkempi seuranta
 - Suurimmille kulutuskohteille omat energiamittarit
- Järjestelmien ennakoiava kunnossapito lisää energiatehokkuutta
 - IV-koneen suodattimien kunto, peltien tiiveys, moottoreiden hihnojen kireydet, ym.
- Vanhojen laitteiden ja automaatiojärjestelmien päivittäminen energiatehokkaammiksi
- Käyttäjien opastaminen ja energiatehokkuus-tietoisuuden lisääminen

8 YHTEENVETO JA POHDINTA

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin rakennusautomaatiojärjestelmän perusteita, kuten rakennetta, laitteita, toiminnallisuuksia, tiedonsiirtoa sekä säätöjä ja ohjauksia. Lisäksi työssä käsiteltiin energian säästämismahdollisuuksia kiinteistöissä, energiatehokkuutta sekä automaation roolia kiinteistöjen energiatehokkuuden parantamisessa. Työssä tuli esille useita energiatehokkuuteen vaikuttavia perustavanlaatuisia rakennusautomaation toimintoja ja asioita, jotka huomioimalla päästään kohti energiatehokkaampaa rakennuksen käyttöä ja ylläpitoa.

Rakennusten automaatiojärjestelmät yleistyvät, kehittyvät ja monipuolistuvat jatkuvasti, ja muun muassa kansalliset ilmastotavoitteet, yleisen ympäristötietoisuuden lisääntyminen ja sähköenergian viimeaikainen hintakehitys lienevät lisänneen yhä useampien kuluttajien ja yritysten kiinnostusta energioptimointi- ja energiatehokkuusteemoja kohtaan. Lisäksi uusien suurten rakennusten, kuten toimistorakennusten varustamista automaatiojärjestelmillä ohjataan nykyään EU-direktiiveihin perustuvalla kansallisella lainsäädännöllä.

Rakennusautomaatiossa ja energiatehokkuudessa kyse on kokonaisuuksien hallinnasta. Energiatehokkuutta parantavien ratkaisuiden toteuttamiseksi automaation avulla on tunnettava rakennusautomaatiojärjestelmien toiminnalliset peruseräpäätteet, järjestelmän rakenne ja laitteet. Lisäksi on ymmärrettävä ohjattavien prosessien toiminta sekä energiansäästöön turvalliset reunaehdot. Automaatio-osaamisen lisäksi hyötyä on myös tietämys energiatehokkuuteen vaikuttavista rakenneteknisistä ratkaisuista ja tietotekninen osaaminen.

Energiatehokkuuden tavoittelu sulauttamalla uudempia ja vanhempia tai eri valmistajien automaatiojärjestelmiä yhteen voi olla haastavaa. Siihen tarvitaan perinteisen automaatio-osaamisen lisäksi väylätekniikan ja ohjelmistorajapintojen hallitsemista. Lisäksi laiteintegraatioissa korostuu dokumentaation tärkeys sekä sulauttamisen onnistumisen että tulevaisuuden ylläpidon kannalta.

Energiansäästö on pitkäjänteistä toimintaa, koska sinänsä pienistä yksittäisistä energiansäästökoh-teista voi rakennuksen käyttöaikana eli monien vuosikymmenten kuluessa kertyä melko huomattavat taloudelliset säästöt ja hiilijalanjäljen sekä kasvihuonekaasupäästöjen pieneneminen. Varsinkin, jos tarkastellaan pitkän aikavälin yhteiskunnallisia vaikutuksia. Vaikka nykyään varsinkin isojen kiinteistöjen automaatiojärjestelmät ovat jo yleisiä ja hyvätasoisiaakin, lienee niissäkin olevan vielä hyödyn-tämätöntä energiansäästöpotentiaalia, johon voidaan ottaa kantaa energiakatselmoineilla.

Tulevaisuuden isossa kuvassa yksi merkittävä asia on se, että pilvipalveluiden ja ohjelmointirajapintojen tehokkaalla hyödyntämisellä voitaisiin mahdollisesti saada yksittäiset kuluttajat osallistumaan valtakunnalliseen kulutusjouktoon, jolla ylläpidetään koko kansallisen sähköjärjestelmän tehotasetta ja mahdollistetaan parempi joustavuus, jota tarvitaan uusiutuvan energiantuotannon ja hajautetun tuotannon määrän lisääntyessä verkossa. Lisäksi tulevaisuuden rakennusautomaatiossa saattavat mahdollisesti yleistyä sellaiset säätimet ja automaatiojärjestelmät, jotka perinteisten säätimien sijaan perustuvat uudenlaisiin algoritmeihin, kuten esimerkiksi säätietoja ennakoiviin algoritmeihin tai koneoppimiseen, kuten neuroverkkoihin. Niissä voisi mahdollisesti olla tulevaisuudessa hyödynnettävissä olevaa potentiaalia energiatehokkuuden parantamiseen.

Kun rakennusautomaatioon yhdistetään energiatehokkuus ja tulevaisuuden näkökulmat, on aihe laajempi ja monitahoisempi kokonaisuus kuin osasin ennalta odottaa. Kiinnostukseni aihetta kohtaan kasvoi työn kirjoittamisen edetessä. Toivon, että työn toimeksiantajalle, Voimatelin Energiapalveluille muodostui tämän tutkielmaluonteisen opinnäytetyön avulla kokonaiskuva rakennusautomaatiosta. Opinnäytetyön myötä he saivat kaipaamaansa tietoa rakennusautomaatiojärjestelmistä ja energiatehokkuutta parantavista keinoista sekä mahdollisesti uusia näkökulmia liiketoimintaansa varten.

Insinööriopintojeni aikana koen saaneeni hyvän kokonaiskuvan sähkö- ja automaatioalojen monipuolisuudesta eli ne sisältävät monia erilaisia osa-alueita. Olikin varsin mielenkiintoista syventää omaa tietämystäni tämän automaatiotekniikan osa-alueen eli rakennusautomaation osalta ja tarkastella sitä ajankohtaisesta energiatehokkuusnäkökulmasta.

LÄHTEET

Asetus 2021/1119/EU: Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus puitteiden vahvistamisesta hiili-neutraaliuden saavuttamiseksi sekä asetusten (EY) N:o 401/2009 ja (EU) 2018/1999 muuttamisesta (eurooppalainen ilmastolaki). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>. Viitattu 30.12.2022.

CADMATIC Oy 2023. Suunnitteluohjelmisto. HVAC-mallikaaviopohjat.

Carlo Gavazzi. Väyläsovitin. Verkkosivusto. <https://www.gavazzionline.com/CGNA/energy>. Viitattu 11.11.2023

Centraline 2022. Valvomo-PC. Verkkosivusto. <https://www.centraline.com/enGB/centraline/news-page/2.html>. Viitattu 23.12.2022.

Direktiivi 2010/31/EU1. Energy Performance of Buildings Directive. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/;ELX_SESSIONID=FZMjThLLzfxmmMCQGp2Y1s2d3TjwD8QS3pqdk-hXZbwqGwlgY9KN!2064651424?uri=CELEX:32010L0031. Viitattu 7.12.2022.

Energiateollisuus ry. Kaukolämpötilasto 2021. <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilastot>. Viitattu 15.11.2022.

Fidelix Oy 2022. Huonesäädin. <https://www.fidelix.fi/tuotteet/>. Viitattu 15.11.2022.

Gebwell Oy. G-power pientalokeskukset. Pdf-tiedosto. <https://gebwell.fi/app/uploads/2021/09/G-Power-pientalokeskus-asennusohje-v-4-6-05052021.pdf>. Viitattu 31.12.2022.

HK Instruments Oy 2023. IV-kone. <https://hkinstruments.fi/fi/sovellukset/iv-koneen-saato/>. Viitattu 3.1.2023.

Honeywell Oy 2022. Honeywell SmartDrive sovelluskäsikirja. Pdf-tiedosto. <https://products.ecc.emea.honeywell.com/norway/pdf/fi2b0370-ge51r0112.pdf>. Viitattu 23.12.2022.

Honeywell Oy 2022. Teholähde. Verkkosivu. <https://buildings.honeywell.com/gb/en/brands/our-brands/centraline/resources/products-documents>. Viitattu 23.12.2022.

KNX Finland ry. KNX-järjestelmä. <https://www.knx.fi/index.php?k=220460>. Viitattu 23.1.2023.

Laki rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä 733/2020. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20200733#Pdm45053758741552>. Viitattu 27.11.2022.

Onninen Oy 2023. Grundfos Magna -kiertovesipumppu. <https://www.onninen.fi/grundfos-kayttovesipumppu-grundfos-magna3-25-100-n-180-1x230v/p/ATC728>. Viitattu 19.1.2023.

Onninen Oy 2022. Energiamittari Carlo Gavazzi. <https://www.onninen.fi/carlo-gavazzi-energiamittari-carlo-gavazzi-em340-3v-65a-lk-b-3-din/p/CER417>. Viitattu 8.1.2022.

Onninen Oy 2022. Peltimoottori. Verkkosivu. <https://www.onninen.fi/belimo-peltimoottori-lf230-4nm-0-8m2-pelt-jousipal-/p/ABF254>. Viitattu 23.12.2022.

Onninen Oy 2023. Venttiilitoimilaite. Verkkosivu. <https://www.onninen.fi/esbe-toimilaite-esbe-alf264-prop-3-p-24v-1000n-15-6/p/CEF574>. Viitattu 2.2.2023.

Onninen Oy 2023. 2-tiesäätöventtiili. Verkkosivu. <https://www.onninen.fi/esbe-saatoventtiili-esbe-2-tie-vle122-g1-1-2-dn25-10-sk/p/CEF508>. Viitattu 2.2.2023.

Ouman Oy 2023. Yksikkösäädin. <https://ouman.fi/tuote/ouman-eh-800-ja-eh-800b/>. Viitattu 23.1.2023.

Produal Oy 2022. Huonesäädin. Verkkosivu. <https://www.produal.com/fi/trc-a-3a.html>. Viitattu 15.11.2022.

Produal Oy 2022. Lämpötila-anturi. Verkkosivu. <https://www.produal.com/fi/teat.html>. Viitattu 15.11.2022.

Produal Oy 2022. Läsnaolotunnistin. Verkkosivu. <https://www.produal.com/fi/rll-bac.html>. Viitattu 25.12.2022.

Produal Oy 2022. Magneettiventtiili. Verkkosivu. <https://www.produal.com/fi/mv.html>. Viitattu 15.11.2022.

Produal Oy 2022. Paine-erolähetin. Verkkosivu. <https://www.produal.com/fi/sku-1131360.html>. Viitattu 15.11.2022.

Prosessiautomaatio Oy 2022. Valvonta-alakeskus. Verkkosivu. <https://prosessiautomaatio.com/tuotteet/>. Viitattu 2.1.2022.

RESA-hanke. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin muutosten kansallisen toimeenpanon vaikutusten selvitys ja arviointi.

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwia9Ij5jaL8AhWIXosKHV1TCcYQFnoECBkQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ym.fi%2Fdownload%2Fnoname%2F%257B069B79BA-48AE-4D78-B9BB-E995B7F0E06A%257D%2F146152&usg=AOvVaw1oeYj0uWbgLQVKV8kO3wq>. Viitattu 30.12.2022.

Silver, Timo 2020. EKAT-hanke, nopeat kokeilut 2020. Integrio Oy. Pdf-tiedosto.

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwi--r3klpL9AhUKPOwKHVOjAxgQFnoECCgQAQ&url=https%3A%2F%2Fenergiaviisaat.fi%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F11%2FEnergiaviisaat_Integraatiokuvaus_Integrio.pdf&usg=AOvVaw2ZcwbCetzF4B2MPlhvKIF. Viitattu 11.11.2022.

Standardi SFS-EN ISO 52120-1:2022: en. Energy performance of buildings. Suomen Standardisointiliitto SFS ry.

ST-käsikirja 17. Rakennusautomaatiojärjestelmät 2018. Sähköinfo Oy. 6. painos. Espoo: Sähkötieto ry.

ST-kortti 710.10. Rakennusautomaatiojärjestelmän hyödyntäminen 2017. Sähköinfo Oy. Espoo: Sähkötieto ry.

ST-käsikirja 21. Taloteknisten järjestelmien tiedonsiirto 2022. Sähköinfo Oy. 3. painos. Espoo: Sähkötieto ry.

ST-ohjeisto 20. Automaation vaikutus rakennusten energiatehokkuuteen. 2020. Sähköinfo Oy. 2. painos. Espoo: Sähkötieto ry.

Systemair Oy 2022. Kanavapuhallin. <https://shop.systemair.com/fi-FI/k--200--ec--sileo--kanavapuhallin/p107474>. Viitattu 31.12.2022.

Voimatel Oy 2022. Esite. <https://www.esitteemme.fi/Voimateloy/WebView/>. Viitattu 15.11.2022.