Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Ronja Kaurola

DALI-valaistusjärjestelmän energiatehokkuus toimistorakennuksissa

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Kandidaatintutkielma
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Tekijä: Ronja Kaurola
Tutkielman nimi: DALI-valaistusjärjestelmän energiatehokkuus toimistorakennuksissa
Tutkinto: Tekniikan kandidaatti
Koulutusohjelma: Energia- ja informaatiotekniikan ohjelma
Opintosuunta: Sähkö- ja energiatekniikka
Työn ohjaaja: Teemu Ovaska
Valmistumisvuosi: 2025 **Sivumäärä:** 32

TIIVISTELMÄ:
LED-valaistusteknologia on yleistynyt viime vuosikymmeninä erityisesti rakennusten valaistusratkaisuissa. Ledeillä on korkea energiatehokkuus ja pitkä käyttöikä, minkä vuoksi ne ovat vakiinnuttaneet asemansa valaistusmarkkinoilla. LED-teknologian kehitys on tehnyt mahdolliseksi aiempaa tarkemman valaistuksen säätämisen, mikä on lisännyt tarvetta älykkäille valaistuksen ohjausjärjestelmille.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan DALI-tiedonsiirtoprotokollaan perustuvaa järjestelmää ja sen toimintaperiaatteita. Lisäksi selvitetään, miten se eroaa perinteisistä valaistuksen ohjausjärjestelmistä ja millaisia energiatehokkuushyötyjä se voi tarjota toimistorakennusten valaistuksessa. Energiantehokkuushyötyjä tarkastellaan esimerkkitapauksen avulla, jossa hyödynnetään läsnäolo- ja päivänvaloantureita.

Tämä tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena hyödyntäen tuoretta tutkimustietoa. Teoriaosuudessa esitellään DALI-järjestelmän tekniset ominaisuudet, kuten osoitteellinen ohjaus, kaksisuuntainen tiedonsiirto sekä antureiden liittäminen järjestelmään. Näiden ominaisuuksien ansiosta DALI mahdollistaa joustavan ja tarkasti säädettävän valaistusratkaisun. Täten DALI tarjoaa huomattavasti paremmat ohjaus- ja automaatiomahdollisuudet verrattuna perinteisiin valaistuksen ohjausratkaisuihin.

Tutkielman lopussa analysoidaan tuoretta tutkimusta, jossa on hyödynnetty läsnäolo- ja päivänvaloantureita. Tulokset osoittavat, että läsnäolo- ja päivänvaloantureiden käyttö osana DALI-protokollaa säästävät merkittävästi energiaa. Täten DALI soveltuu erityisesti tiloihin, joissa valaistustarpeet muuttuvat tilan käyttöasteen ja luonnonvalon määrän mukaan.

Tutkielma osoittaa, että DALI on tehokas ja laajennettavissa oleva ohjausratkaisu, joka soveltuu erityisen hyvin toimistorakennusten vaihteleviin valaistustarpeisiin. Lisäksi sen tarjoamat ohjaus- ja automaatiomahdollisuudet mahdollistavat merkittävät energiansäästöt.

AVAINSANAT: energiatehokkuus, valaistustekniikka, ledit, anturit, ohjausjärjestelmät

Sisällys

1 Johdanto 5

2 Rakennusten valaistus ja energiatehokkuus 7

2.1 LED järjestelmien sovellukset 8

2.2 LED-teknologian merkitys energiatehokkuudelle 9

2.3 Perinteiset valaistuksen ohjausratkaisut 11

3 DALI-valaistusjärjestelmä 12

3.1 DALI-järjestelmän keskeiset komponentit 13

3.2 Tekninen toimintaperiaate 14

3.3 Ominaisuudet valaistuksen hallinnassa 15

3.3.1 Yksittäisten valaisimien ja ryhmien hallinta 15

3.3.2 Käyttäjän ohjausmahdollisuudet 16

4 Energiatehokkuus DALI-järjestelmillä toimistorakennuksissa 18

4.1 Läsnäolo- ja liikeantureiden käyttö 18

4.2 Päivänvalon hyödyntäminen 19

5 Esimerkkitapaus älykkään valaistuksen energiansäästöstä 21

5.1 Valaistuksen ohjausperiaatteiden arviointi esimerkkitutkimuksessa 21

5.2 Esimerkkitutkimuksen ohjausstrategiat 22

5.3 Esimerkkitutkimuksen tulokset ja energiankulutuksen vertailu 23

5.4 Yhteenveto esimerkistä 25

5.5 Sovellettavuus toimistorakennuksiin ja DALI-järjestelmiin 26

6 Johtopäätökset 28

7 Yhteenveto 29

Lähteet 30

Kuvat

Kuva 1. Valaistuksen tehokkuuden kehitys 2010–2030 (IEA, 2023a) 7

Kuva 2. LED-valaistuksen tärkeimmät sovellukset (Esteki & muut, 2023, s. 38326). 9

Kuva 3. LED lamppujen osuus valaistuksesta (IEA, 2023b). 10

Kuva 4. DALI-valaistusjärjestelmä (LogosLED, 2024) 13

Kuva 5. Käyttäjän valaistusmukavuus diagrammi (Liu & muut, 2016, s. 98) 16

Kuva 6. Päivänvalon intensiteetti toimistossa (Petkovic & muut, 2022). 20

Taulukot

Taulukko 1. Energiankulutus tulokset eri skenaarioissa (Widartha & muut, 2024, s. 6) 23

Lyhenteet

LED	light-emitting diode
DALI	Digital Addressable Lighting Interface

1 Johdanto

Rakennusten energiankulutus muodostaa merkittävän osan maailmanlaajuisesta kokonaisenergiankulutuksesta koko maailmassa. Useiden lähteiden mukaan rakennukset kuluttavat jopa 40 % kaikesta energiasta. Acostan ja muiden (2018, s. 1) mukaan valaistus puolestaan edustaa 15–30 % rakennusten energiankulutuksesta. Erityisesti toimistorakennuksissa valaistus voi muodostaa merkittävän osan energiankulutuksesta, koska valaistusta käytetään pitkiä aikoja päivän aikana. Täten energiatehokkuuden parantaminen valaistusratkaisuissa on olennainen osa rakennusten suunnittelua.

Viime vuosikymmeninä valaistusteknologia on muuttunut paljon, sillä loiste- ja hehkulamppujen tilalle ovat tulleet energiatehokkaat LED (light-emitting diode) -valaisimet. Pelkkä energiatehokas valonlähde ei kuitenkaan yksinään riitä kattamaan optimaalista energiankäyttöä. Täten tarvitaan myös älykkäitä ohjausratkaisuja, joiden avulla valaistus voidaan sovittaa käyttäjän tarpeiden, läsnäolon ja luonnonvalon määrän mukaan.

Yksi keskeisistä valaistuksen ohjausjärjestelmistä on digitaalinen osoitteellinen valaistusliitäntä DALI (Digital Addressable Lighting Interface), joka on kansainvälisesti standardoitu valaistuksen tiedonsiirtoprotokolla (Adam, 2019, s. 4). DALI-protokolla mahdollistaa valaistuksen tarkan ja joustavan hallinnan. Sen avulla valaistusta voidaan säätää automaattisesti ja älykkäästi energiatehokkuuden, käyttömukavuuden ja tilojen monikäyttöisyyden parantamiseksi.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan DALI-protokollaa hyödyntävän järjestelmän toimintaa ja sen vaikutusta toimistorakennusten energiatehokkuuteen. Erityisesti perehdytään siihen, miten DALI-järjestelmä eroaa perinteisistä valaistuksen ohjausratkaisuista ja millaisia energiasäästöjä sen avulla voidaan saavuttaa. Lisäksi käsitellään päivänvalon ja läsnäoloantureiden merkitystä osana DALI-valaistusjärjestelmää. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena, jossa hyödynnetään tutkimuskirjallisuutta.

Tutkimuskysymykset ovat:

1. Mikä on DALI-tiedonsiirtoprotokollaan perustuva järjestelmä ja miten se toimii?
2. Miten DALI-järjestelmä eroaa perinteisistä valaistuksen ohjausratkaisuista?
3. Millaisia energiansäästöjä DALI-valaistus mahdollistaa toimistorakennuksissa läsnäolo- ja päivänvaloantureiden avulla?

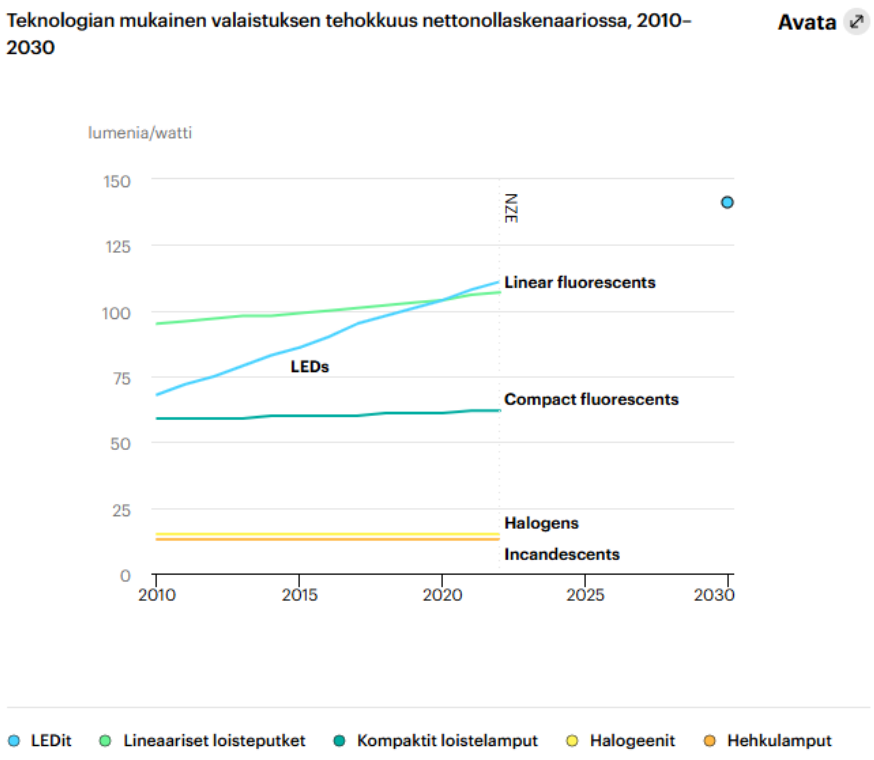
Tutkielma keskittyy DALI-valaistusjärjestelmien hyödyntämiseen toimistorakennusten energiatehokkuuden parantamisessa. Työssä ei käsitellä muita älykkäitä valaistusteknologioita tai rakennusautomaation ohjausjärjestelmiä. Lisäksi energiatehokkuutta tarkastellaan valaistuksen sähkönkulutuksen näkökulmasta. Tutkielman esimerkkitarkastelu perustuu olemassa olevaan tieteelliseen kirjallisuuteen, eikä työssä toteuteta omia mittauksia tai simulaatioita.

Tutkielman rakenne etenee siten, että ensin tarkastellaan rakennusten valaistusta ja energiatehokkuutta sekä LED-teknologian merkitystä. Seuraavaksi syvennytään DALI-järjestelmän tekniseen toimintaan ja ohjausominaisuuksiin. Tämän jälkeen analysoidaan energiatehokkuutta toimistorakennuksissa ja lopuksi analysoidaan esimerkin avulla järjestelmän energiatehokkuutta.

2 Rakennusten valaistus ja energiatehokkuus

Rakennusten energiankulutuksesta merkittävä osa kuluu valaistukseen, erityisesti toimistorakennuksissa. Useiden kansainvälisten tutkimusten mukaan valaistus voi muodostaa jopa 15–30 % rakennuksen sähkön kulutuksesta (Acosta & muut, 2018; Pompei & muut, 2022). Täten energiatehokkuuden parantaminen valaistuksessa on yksi tärkeimmistä keinoista vähentää energian kulutusta ja hiilidioksidipäästöjä.

Viimeisen sadan vuoden aikana valaistusteknologiat ovat kokeneet merkittävän kehityksen. Hehkulamput ja halogeenit olivat pitkään yleisin valaistusratkaisu, mutta niiden hyötysuhde on melko alhainen. Kuvasta 1 nähdään, että niiden hyötysuhde on vain noin 10 lumenia wattia kohden eikä hyötysuhde ole kehittynyt vuosien varrella ollenkaan. Loisteputkitekniikka paransi tilannetta hieman, mutta todellisen läpimurron toi LED-teknologia.



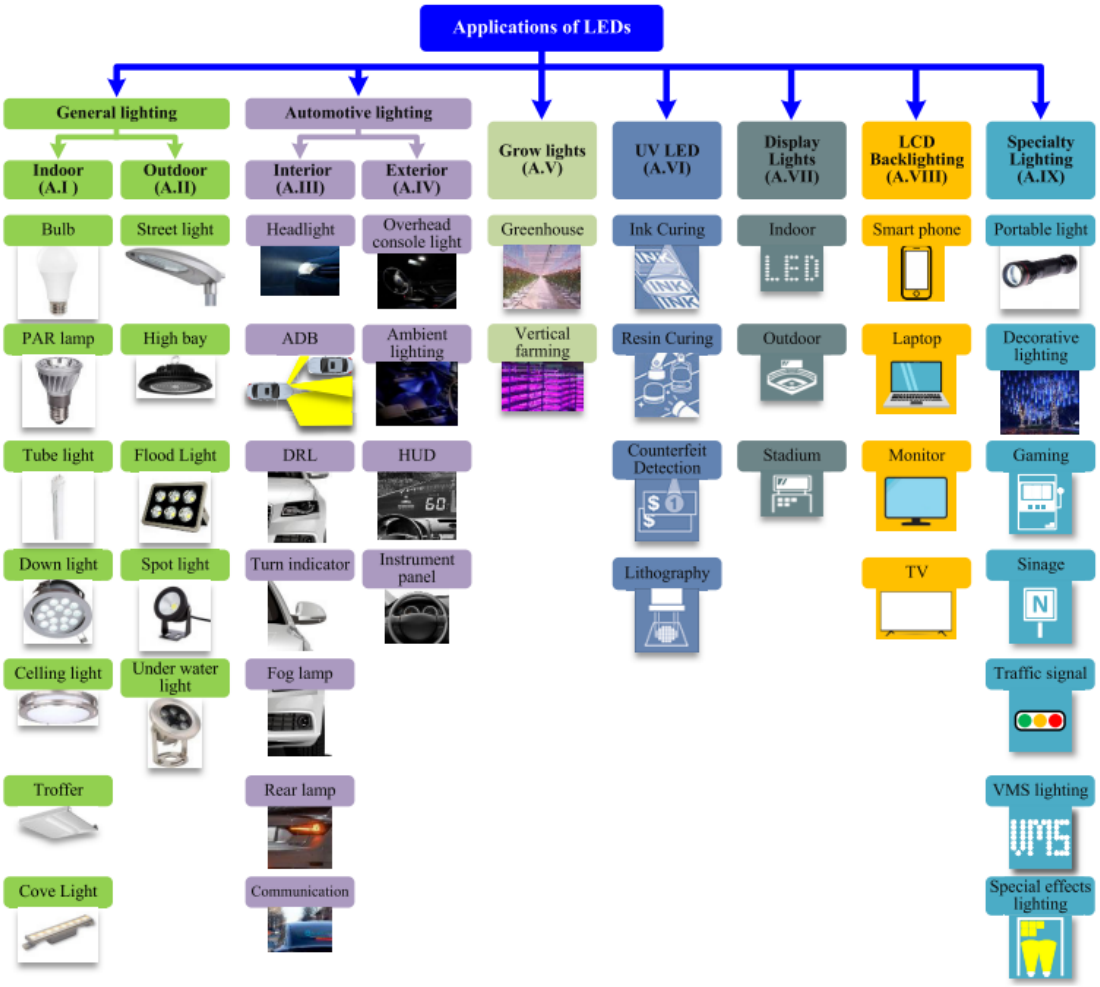
Kuva 1. Valaistuksen tehokkuuden kehitys 2010–2030 (IEA, 2023a)

Kuvasta 1 voidaan huomata myös, että ledien tehokkuus on parantunut tasaisesti vuosien aikana. Nykyisin LED-valaisimet saavuttavat jo yli 100 lumenin valotehon wattia kohden ja vuoteen 2030 mennessä sen arvellaan nousevan lähes 150 lumeniin.

Ainoastaan energiatehokas valonlähde ei kuitenkaan yksin riitä optimoimaan energiankulutusta. Suurin osa energiansäästöpotentiaalista saavutetaan yhdistämällä tehokkaat valonlähteet älykkäisiin ohjausjärjestelmiin, joiden avulla valaistus sovitetaan todelliseen käyttöön ja olosuhteisiin (Adam, 2019, s. 1). Tarkastellaan seuraavaksi LED-järjestelmien sovelluksia, LED-teknologian merkitystä energiatehokkuudelle ja perinteisiä ohjausratkaisuja.

2.1 LED järjestelmien sovellukset

LED-teknologia on kehittynyt nopeasti ja syrjäyttänyt monia perinteisiä valonlähteitä. Samalla ledien ominaisuuksien monipuolistuminen on laajentanut niiden käyttöalueita huomattavasti. LED-sovellukset luokitellaan seitsemään pääluokkaan (Kuva 2), jotka ovat yleisvalaistus, autovalaistus, kasvivalot, AC-UV-LED-valot, näytöt, LCD-taustavalaistus sekä erikoisvalaistus. Kussakin näistä käyttökohteista vaaditaan ledeiltä käyttötarkoitukseen soveltuvia ominaisuuksia. Lisäksi niitä ohjaavilta laitteistoilta edellytetään tiettyjä ominaisuuksia tai vaatimuksia sovelluksen tarpeiden täyttämiseksi (Esteki & muut, 2023, s. 38326). Näiden esimerkkien perusteella voidaan todeta, että LED-teknologia on keskeisessä roolissa monilla eri sovellusalueilla ja tarjoaa tehokkaita ratkaisuja useisiin valaistustarpeisiin.

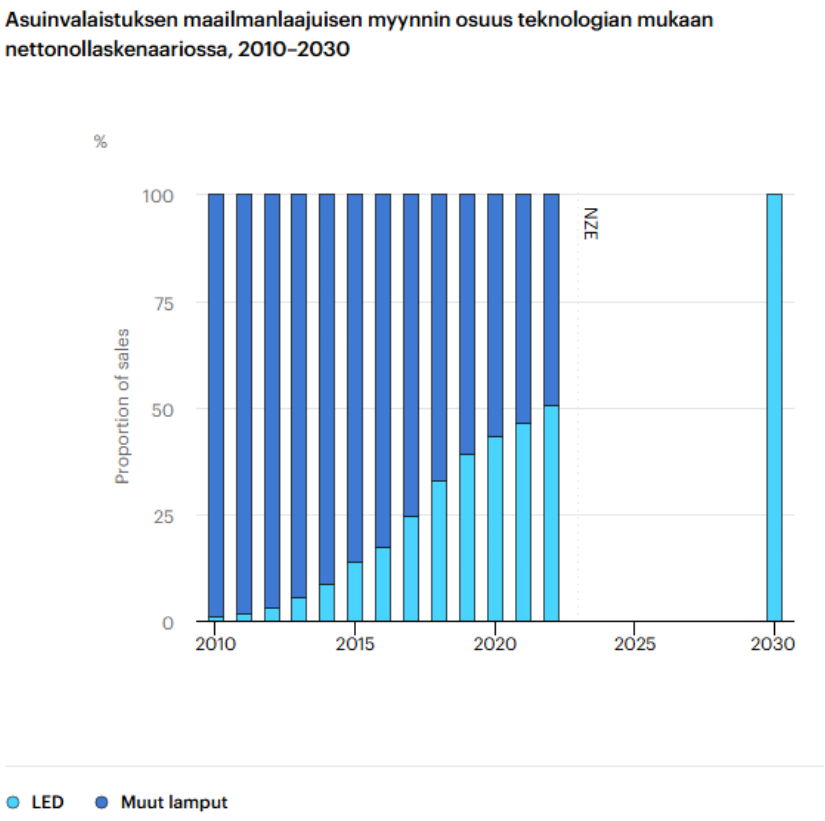


Kuva 2. LED-valaistuksen tärkeimmät sovellukset (Esteki & muut, 2023, s. 38326).

2.2 LED-teknologian merkitys energiatehokkuudelle

Viimeisen kahden vuosikymmenen aikana LED-teknologia on noussut valaistusmarkkinoiden kärkeen. Keskeisinä etuina ovat korkea energiatehokkuus, pidempi käyttöikä ja monipuolinen ohjattavuus. LED-lamput kuluttavat noin 70–80 % vähemmän energiaa ja niiden käyttöikä on 10–50 kertaa pidempi kuin hehkulampuilla (Montoya & muut, 2017, s. 55). Esimerkkinä voidaan todeta, että ledien käyttöikä on noin 40 000 tuntia, joka on noin 10 vuotta normaalikäytössä. Kun taas hehkulamppujen käyttöikä on vain 1 000 tuntia ja loistelamppujen 6 000 tuntia (Bessho & Shimizu, 2011, s. 5). Ledien pidempi käyttöikä vähentää huoltotarvetta ja elinkaarikustannuksia.

Ledien yleistymistä on vauhdittanut myös lainsäädäntö. Yhdysvaltain energiariippumattomuus- ja turvallisuuslaki ja eurooppalainen hehkulamppujen kielto perustettiin yleisvalaistuksen energiatehokkuuden ja energiansäästön parantamiseksi (Montoya & muut, 2017, s. 55). Kuvasta 3 nähdään, että vuodesta 2010 lähtien ledien osuus on kasvanut joka vuosi. Tällä hetkellä ledien osuus on yli 50 % ja vuonna 2030 ledien osuus ennustetaan olevan 100 % kaikista käytetyistä lampuista.



Kuva 3. LED lamppujen osuus valaistuksesta (IEA, 2023b).

Olajiga ja muut (2024, s. 1099) korostavat sitä, että ledit soveltuvat erinomaisesti älykkääseen ohjaukseen. Niiden valaistusvoimakkuutta voidaan säätää ilman merkittävää hyötysuhteen heikkenemistä ja ne reagoivat välittömästi ohjaussignaaleihin. Täten ledejä voidaan ohjata erilaisilla ohjausstrategioilla, kuten päivänvaloa hyödyntämällä tai läsnäolo-ohjauksella. Ledit eivät myöskään kärsi samassa määrin sytytyskertojen aiheut-

tamasta kulumisesta. LED-teknologia ei siis ainoastaan paranna energiatehokkuutta itsessään, vaan sen toimii myös alustana älykkäille valaistusratkaisuille, kuten DALI-järjestelmälle.

2.3 Perinteiset valaistuksen ohjausratkaisut

Ensimmäinen valaistuksen ohjauskeino olivat manuaaliset kytkimet, jotka ovat vielä nykyäänkin valaistuksenohjauksen yksinkertaisin ja yleisin muoto. Manuaaliseen valonohjaukseen kuuluu tavallisia katkaisimia ja himmentäviä säätimiä. Himmentävän säätimen avulla käyttäjä voi säätää valon kirkkautta ilman, että valot täytyy vain sammuttaa tai sytyttää (Helvar, n.d). Näin voidaan luoda erilaisia valaistusolosuhteita ja samalla säästää energiaa.

Näissä ratkaisuissa on kuitenkin useita rajoituksia. Ensinnäkin valaistus ei useinkaan vastaa todellista tarvetta, koska valot ovat usein päällä myös silloin, kun tilat ovat tyhjillään. Toisaalta valot saattavat olla täydellä teholla, vaikka luonnon valoa olisi runsaasti tarjolla. Tämä johtaa tarpeettomaan energian kulutukseen. Lisäksi perinteiset järjestelmät eivät tarjoa joustavuutta tilojen monipuoliseen käyttöön, mikä rajoittaa niiden energiatehokkuuspotentiaalia.

Käytännön esimerkkinä voidaan todeta avotoimistot, joissa koko kerroksen valaistus on päällä jopa työajan ulkopuolellakin, vaikka ainoastaan osa työpisteistä on käytössä. Näiden rajoitteiden myötä, on syntynyt tarve älykkäämmille valaistuksenohjausratkaisuille. Älykkäät valaistuksen ohjausratkaisut, kuten DALI-järjestelmät mahdollistavat valaisimien ohjauksen ryhmissä tai yksittäin. Ne voidaan liittää antureihin ja valaistus voidaan mukauttaa käyttäjän tarpeisiin. Nämä ominaisuudet voivat johtaa merkittäviin energiansäästömahdollisuuksiin, joita tarkastellaan myöhemmissä luvuissa.

3 DALI-valaistusjärjestelmä

Digital Addressable Lighting Interface (DALI) on kansainvälisesti standardoitu valaistuksen ohjausjärjestelmässä käytettävä tiedonsiirtoprotokolla. Se on suunniteltu erityisesti energiatehokkaaseen ja joustavaan valaistuksen hallintaan. DALI-protokolla perustuu digitaaliseen ja osoitteelliseen väyläviestintään, jonka avulla jokainen valaisin tai valaisinryhmä voidaan ohjata yksilöllisesti (Adam, 2019, s. 4). Tämä mahdollistaa huomattavasti tarkemman, monipuolisemman ja älykkäämmän valaistuksen ohjauksen ilman monimutkaisia kaapelointiratkaisuja.

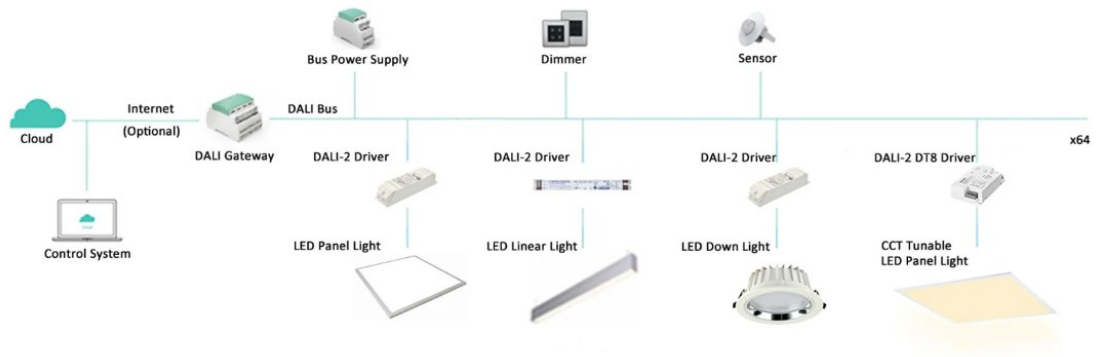
DALI-2 on DALI-protokollan uusin versio, joka määritellään IEC 62386-standardisarjassa. DALI-2 toi mukanaan merkittäviä parannuksia yhteensopivuuteen, anturien ja ohjainten standardointiin sekä järjestelmän luotettavuuteen (Adam, 2019, s. 2). DALI-2 mahdollistaa entistä laajemman tiedonsiirron valaisimien ja ohjausyksiköiden välillä.

Ordaz-García ja muut (2020, s. 2) toteavat DALI-protokollan keskeisiksi eduiksi sähkö- ja lamppuvikojen havaitsemisen, valaisimien tilatietojen raportoinnin, tehotason ja kirkkauden säädön sekä mahdollisuuden asettaa käyttöarvojen enimmäis- ja oletusarvot. Järjestelmän hallittavuutta ja kunnossapitoa parantaa järjestelmän kyky välittää valaisimien sähköisiä ominaisuuksia, kuten jännite-, virta ja tehotietoja (Ordaz-García & muut, 2020, s. 2). Valaisimia voidaan ohjata sekä yksittäin että ryhmissä ja lisäksi jokaisella laitteella on yksilöllinen ID-osoite. Tämä tekee järjestelmästä hyvin skaalautuvan erilaisiin tiloihin.

DALI-järjestelmät voidaan liittää myös osaksi laajempaa rakennusautomaatiojärjestelmää yhdyskäytävien avulla. Yhdyskäytävien ansiosta DALI voidaan integroida esimerkiksi BACnet-, KNX- tai IP-pohjaisiin ohjausjärjestelmiin (Admin, 2025). Tällöin valaistusta voidaan hallita yhdessä muiden taloteknisten järjestelmien kanssa.

3.1 DALI-järjestelmän keskeiset komponentit

DALI- ja DALI-2-valaistusjärjestelmät muodostuvat useista toisiaan täydentävistä komponenteista. Järjestelmän perusrakenne rakentuu kolmesta päätyypistä, jotka ovat ohjauslaitteet, syöttölaitteet ja väylän virtalähteet. Näiden lisäksi sovellustasolla käytetään sovellusohjaimia, jotka muodostavat järjestelmän päätöksenteko- ja ohjauslogiikan (Dali-alliance, n.d. -a). Kuvassa 4 on esitetty peruskaavio DALI-valaistusjärjestelmästä ja sen komponenteista.



Kuva 4. DALI-valaistusjärjestelmä (LogosLED, 2024)

Ohjauslaitteet syöttävät virtaa valonlähteille ja toteuttavat varsinaiset valaistuksen säätötoiminnot. Tyypillinen esimerkki ohjauslaitteesta on LED-ajuri, joka muuntaa syöttöjännitteen valaisimille sopivaksi (Dali-alliance, n.d. -a). Lisäksi se toteuttaa DALI-komentojen mukaisen himmennyksen, kytkennän ja valaistustilanteiden muutokset. Ohjauslaitteiden rooli on keskeinen energiatehokkuuden näkökulmasta, koska ne vastaavat himmennyskäskyjen toteuttamisesta sekä esimerkiksi päivittäisestä valaistuksen optimoinnista päivänvalosäätöä hyödyntävissä tiloissa.

Sovellusohjaimet vastaanottavat syöttölaitteilta, ohjauslaitteilta ja muilta järjestelmiltä tulevaa tietoa. Tämän lisäksi ne tekevät päätöksiä valaistuksen ohjauksesta ja lähettävät

komentobittejä ohjauslaitteille (Dali-alliance, n.d. -a). Tieto voi perustua useisiin lähteisiin, kuten läsnäolo- ja valoantureihin, manuaalisiin painikkeisiin, muihin sovellusohjaimiin tai ulkoisiin järjestelmiin.

Syöttölaitteet puolestaan keräävät tietoa käyttäjiltä tai ympäristöstä ja välittävät sen sovellusohjaimille. Ne voivat sisältää antureita tai käyttäjän manuaalisia ohjauslaitteita. Tyypillisiä syöttölaitteita ovat läsnäoloanturit, päivänvalo- ja valoanturit, painikkeet, liukusäätimet sekä tilanneohjaimet (Dali-alliance, n.d. -a).

DALI-väylä edellyttää erillistä virtalähdettä, joka syöttää väylälle tyypillisesti 16 V jännitteen ja jopa 250 mA virran. Usein väylän virtalähde on integroitu sovellusohjaimeen, mutta se voi olla myös itsenäinen laite (Dali-alliance, n.d. -a).

3.2 Tekninen toimintaperiaate

DALI-järjestelmässä ohjaus toteutetaan yhden matalajännitteisen kaksijohtimisen väylän kautta, joka välittää ohjaus- ja palautesignaalit kaikkien verkon laitteiden välillä. Verkkoon voidaan liittää ohjain ja enintään 64 yksilöllisesti osoitettua laitetta, kuten valaisinta, liitäntälaitetta tai ohjauspaneelia. Nämä yksilölliset laitteet voidaan ryhmitellä enintään 16 ryhmään (Adam, 2019, s. 4). Tämä osoitteellisuus mahdollistaa joustavan valaistuksen hallinnan, koska valaisimia voidaan ohjata yksittäin, ryhmittäin tai koko järjestelmän laajuisesti.

DALI-käskyjärjestelmä on digitaalisen osoitteellisen valaistusliittymän ydinosa. Sitä käytetään valaistuslaitteiden tarkkaan ja joustavaan ohjaamiseen ja hallintaan. DALI-komentojen avulla voidaan kytkeä yksittäisiä tai useampia valaisimia päälle ja pois sekä säätää niiden kirkkautta. Lisäksi järjestelmä mahdollistaa laitteiden tilatietojen kyselyn ja erilaisten parametrien määrittämisen (Long & muut, 2025, s. 4540).

Longin ja muiden (2025, s. 4540) mukaan DALI-käskyt koostuvat yleensä kolmesta osasta, jotka ovat osoitebitti, komentobitti ja databitti. Osoitebitit määrittävät kohdelaitteen yksilöllisen tunnisteen, mikä varmistaa, että ohjeet ohjautuvat oikealle valaisimelle tai laitejoukolle. Komentobittejä käytetään puolestaan tietyntyyppisten toimintojen, kuten valojen sytyttämisen, valojen himmentämisen tai tilan kyselyn määrittelemiseen. Databitit välittävät lisätietoa, kuten kirkkausarvoja tai kohtausnumeroita. Tällainen jäsennelty komentoarkkitehtuuri mahdollistaa DALI-järjestelmässä tiedonsiirron tehokkaan toteutuksen sekä monimutkaisten ohjaustoimintojen suorittamisen siten, että järjestelmän joustavuus ja skaalautuvuus säilyvät (Long & muut, 2025, s. 4540).

DALI on kaksisuuntainen kommunikaatiojärjestelmä. Tämä tarkoittaa sitä, että ohjausyksiköt voivat sekä lähettää että vastaanottaa tietoa. Näin mahdollistuu valojen ohjaus, mutta myös reaaliaikainen palaute valaisimien tilasta, kuten toimintahäiriöistä, polttimon eliniästä ja tehonkulutuksesta (Adam, 2019, s. 5). Kyseinen ominaisuus parantaa järjestelmän ylläpidettävyyttä sekä mahdollistaa ennakoivan huollon.

3.3 Ominaisuudet valaistuksen hallinnassa

Dali-järjestelmäarkkitehtuurin on oltava joustava ja muokattavissa, jotta sitä voidaan parantaa ja kehittää käyttäjän määrittämien järjestelmäspesifikaatioiden ja -vaatimusten mukaisesti (Adam, 2019, s. 6). Tämä joustavuus tekee DALI-järjestelmästä sovellettavan hyvin erilaisiin kohteisiin. Etenkin sellaisiin, joissa valaistuksen tarpeet ja käyttöolosuhteet vaihtelevat.

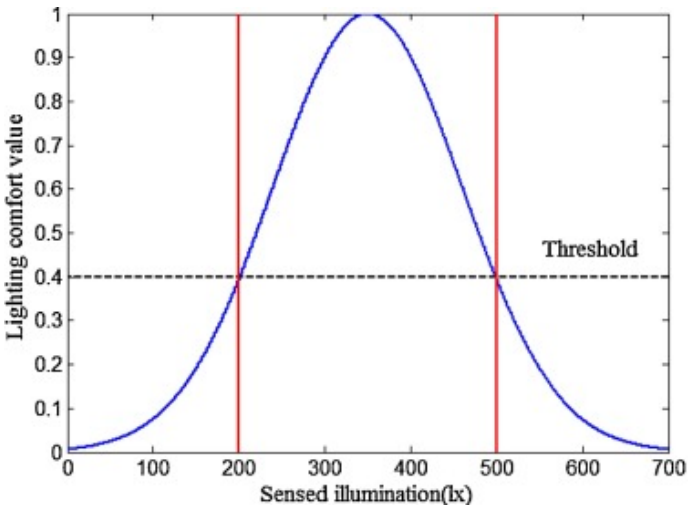
3.3.1 Yksittäisten valaisimien ja ryhmien hallinta

Adamin (2019, s. 5) mukaan DALI-järjestelmässä jokainen valaisin tai liitäntälaite voidaan osoittaa erikseen. Tämä mahdollistaa yksittäisten valaisimien hallinnan, jolloin valaistuksen tasoa voidaan säätää siellä, missä sitä tarvitaan. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että yksittäinen työpiste voidaan himmentää tai sammuttaa, vaikka koko muu tila pysyy valaistuna.

Lisäksi DALI-ohjausjärjestelmällä onnistuu ryhmäohjaus, jossa useita valaisimia voidaan ohjata samanaikaisesti. Yhteen DALI-verkkoon voidaan määrittää enintään 16 valaisinryhmää, jolloin tiettyjä alueita voidaan ohjata yhtenä kokonaisuutena (Adam, 2019, s. 4). Tämä tekee valaistuksen hallinnasta erittäin joustavaa, koska valaisimet voidaan ryhmitellä tilojen käytön, käyttäjien mieltymysten tai päivänvalon määrän perusteella. Ryhmittelyä on myös helppo muuttaa ohjelmallisesti ilman fyysisiä johdotusmuutoksia, mikä helpottaa tilamuutoksia ja tilasuunnittelua.

3.3.2 Käyttäjän ohjausmahdollisuudet

Toimistoissa työntekijät suosivat tyypillisesti tuottavampia ympäristöolosuhteita kuin olosuhteita, joissa he tuntevat olonsa epämukavaksi. Liu ja muut (2016, s. 98) esittävät hyödyllisyysfunktion, jota käytetään käyttäjien valaistusmukavuuden määrittämiseen. Hyödyllisyysfunktio on esitetty kuvassa 5 ja siitä voidaan nähdä, että mukavimmat valaistustasot ovat 200–500 luksin välillä. Käyttäjien kannalta mukavimpana valaistustasona pidetään 350 luksia. Kuvasta 5 nähdään myös, että alle 200 luksin ja yli 500 luksin valaistusvoimakkuus vähentää henkilöiden valaistusmukavuutta. Tämä voi johtaa työn tuottavuuden laskuun. Liun ja muiden (2016, s. 103) tutkimustulokset osoittivat, että erilaisten valaistusmieltymysten perusteella voidaan säästää merkittävästi energiaa.



Kuva 5. Käyttäjän valaistusmukavuus diagrammi (Liu & muut, 2016, s. 98)

DALI-järjestelmä voi toimia täysin automaattisesti, mutta se tarjoaa myös käyttäjille monipuoliset ohjausmahdollisuudet. Käyttäjä voi säätää valaistusta painikkeilla, kosketuspaneeleilla, etäohjaimilla tai mobiilisovelluksilla. Tämä lisää työntekijöiden tyytyväisyyttä ja mahdollistaa yksilöllisen valaistuksen säädön työpistekohtaisesti.

4 Energiatehokkuus DALI-järjestelmillä toimistorakennuksissa

Yksi DALI-järjestelmien suurin vahvuus on niiden kyky mukautua erilaisiin käyttökohteisiin ja valaistustarpeisiin. Toimistorakennuksissa eri tilat voidaan ohjata eri periaattein, mikä maksimoi energiatehokkuuden sekä käyttäjämukavuuden.

Esimerkiksi käytävillä valaistus voi toimia liiketunnistimen ohjaamana, jolloin valot syttyvät vain liikkeen havaittaessa ja sammuvat automaattisesti, kun tila on tyhjä. Avokonttoreissa voidaan puolestaan hyödyntää päivänvalosäätöä, joka säätää valaistuksen voimakkuutta luonnonvalon määrän mukaan. Tällainen tilakohtainen ohjaus on yksi keskeisistä energiatehokkuutta parantavista ominaisuuksista. Joustava ohjelmointi ja automaattinen säätö nimittäin vähentävät valaistuksen turhaa käyttöä ja pidentävät valaisimien käyttöikää.

Antureiden ja ohjausjärjestelmien avulla luonnonvaloa voidaan hyödyntää toimistoympäristöissä siten, että keinovalaistukseen tarvittava sähköenergia vähenee merkittävästi (Shishegar & Boubekri, 2017, 87). Acosta ja muut (2018) korostavat, että valaistuksen ohjausstrategiat voivat vähentää energiankulutusta jopa 50 % himmennysjärjestelmiä käytettäessä ja lähes 30 % läsnäoloantureita käytettäessä. Tarkastellaan seuraavaksi läsnäoloantureiden ja päivänvalon hyödyntämisen periaatteita.

4.1 Läsnäolo- ja liikeantureiden käyttö

Soorin ja Vishwasin (2013, s. 331) mukaan läsnäoloanturit ovat laitteita, joiden avulla valaistuksen ohjausjärjestelmä pystyy sammuttamaan valot automaattisesti silloin, kun tilassa ei ole toimintaa. Ne perustuvat liiketunnistukseen ja niiden toiminta riippuu herkkyysasetuksista. Liian korkea herkkyys ei välttämättä säästä energiaa, kun taas liian matala herkkyys voi aiheuttaa viiveitä, jotka häiritsevät työntekijöitä toimistossa. Tehokkain ratkaisu saadaan, kun läsnäoloanturit yhdistetään valosähköisiin antureihin eli luksian-

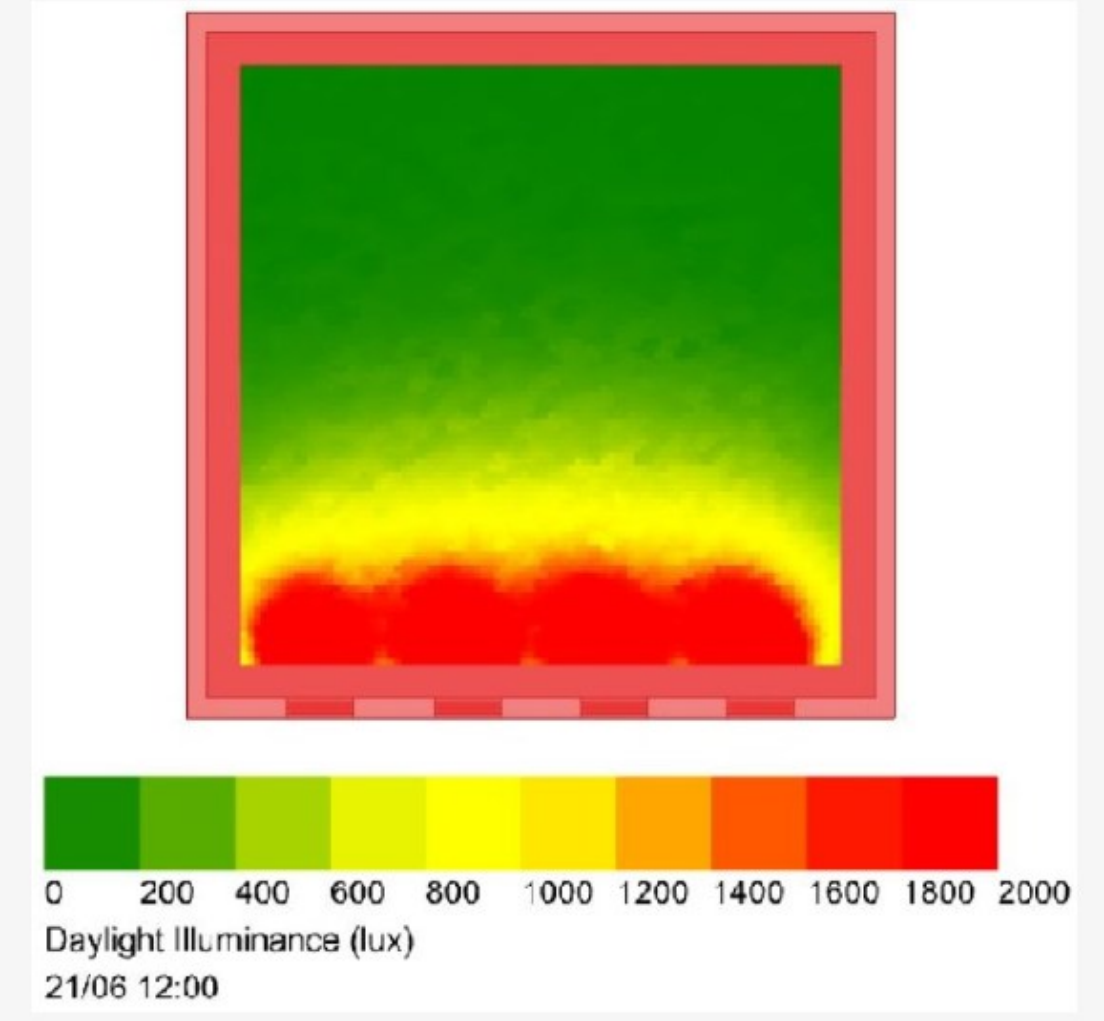
tureihin. Tällöin voidaan hyödyntää molempien teknologioiden vahvuudet. Kun läsnäoloanturi havaitsee henkilön, se tarkistaa ensin tilan valaistustason ennen valojen sytyttämistä (Soori & Vishwas, 2013, s. 331).

4.2 Päivänvalon hyödyntäminen

Päivänvalon hyödyntäminen on yksi keskeisimmistä keinoista parantaa rakennusten valaistuksen energiatehokkuutta. DALI on suunniteltu etenkin himmennystä varten, sillä se mahdollistaa valotasojen tarkan, toistettavan ja standardoidun säädön (dali-alliance, n.d. -b). Sen perusajatuksena on säätää keinovalaistuksen voimakkuutta luonnonvalon määrän mukaan (Shishegar & Boubekri, 2017, s. 88). DALI-järjestelmässä tämä voidaan toteuttaa automaattisen himmennyksen avulla, jossa valaisinten tehoa säädetään reaaliajassa päivänvalon määrän mukaan.

Himmennys tarkoittaa valovoiman säätämistä ohjaamalla valomoottorille tai LED-ajurille syötettyä tehoa. Estekin ja muiden (2023, s. 38333) mukaan LED-valaisimia voidaan himmentää laajalla alueella, jopa täydestä 100 % kirkkaustasosta alle 1 %:iin. Toisin kuin perinteisissä valonlähteissä, ledien himmennys ei heikennä valotehokkuutta eikä aiheuta merkittävää valon laadun heikkenemistä. Lisäksi ledien käyttöikä ei lyhene himmennyksen seurauksena vaan voi jopa pidentyä, koska pienempi teho alentaa puolijohdeliitoksen lämpötilaa (Esteki & muut, 2023, s. 38333).

Kuva 6 havainnollistaa päivänvalon intensiteetin jakautumista eräässä toimistotilassa puolen päivän aikaan, jolloin auringon säteily on voimakkaimmillaan. Ikkunat on sijoitettu kuvan alaosaan. Kuvasta voidaan nähdä, että valaistus on selvästi voimakkainta ikkunoiden läheisyydessä, jolloin valaistustaso ylittää jopa 1600 luxia. Tilan takaosassa valaistusvoimakkuus on puolestaan vain alle 200 luxia. Acostan ja muiden (2018, s. 4) mukaan toimistojen valaistusvoimakkuuden kynnysarvo on 500 luxia. Kuvasta 6 nähdään, että tilan etuosassa arvo on yli kolminkertainen ja takaosassa valaistusvoimakkuus jää huomattavasti alle 500 luxin.



Kuva 6. Päivänvalon intensiteetti toimistossa (Petkovic & muut, 2022).

Ylivalaistuksella voi olla haitallisia vaikutuksia rakennusten käyttäjien terveyteen ja hyvinvointiin. Soorin ja Vishwasin (2013, s. 329) mukaan liian voimakas valaistus voi aiheuttaa esimerkiksi migreenipäänsärkyä, stressiä ja ahdistusta. Lisäksi ylivalaistus voi heikentää keskittymiskykyä ja pitkällä aikavälillä työntekijöiden tuottavuus voi laskea. Erityisesti ikkunoiden läheisyydessä valaistusvoimakkuutta on tarpeen himmentää, jotta päivänvalon ja keinovalon yhteisvaikutuksesta syntyvä liiallinen kirkkaus voidaan estää. Vastaavasti tilan takaosassa tarvitaan lisävaloa, jotta valaistus pysyy riittävällä tasolla koko työskentelyalueella.

5 Esimerkkitapaus älykkään valaistuksen energiansäästöstä

Tässä luvussa tarkastellaan konkreettista esimerkkitapausta, joka havainnollistaa älykkäiden valaistusstrategioiden vaikutusta energiankulutukseen. Edellisissä luvuissa käsitellyt DALI-järjestelmän periaatteet, ohjausominaisuudet ja energiatehokkuuspotentiaali sovitetaan nyt käytännön sovellukseen hyödyntäen tuoretta tutkimustietoa. Esimerkki perustuu Widartha & muut (2024) esittämään älykkään valaistuksen kehitysmalliin, jossa energiansäästöä tarkastellaan läsnäoloantureiden ja päivänvalosäädön näkökulmasta.

5.1 Valaistuksen ohjausperiaatteiden arviointi esimerkkitutkimuksessa

Älykkäiden valaistusjärjestelmien energiatehokkuutta voidaan tarkastella konkreettisesti hyödyntämällä tuoretta tutkimusesimerkkiä, joka yhdistää automaattisen valaistuksen ohjauksen ja anturiteknologiat. Widartha & muut (2024) esittävät tutkimuksessaan kehitysmallin, jossa energiatehokkuutta parannetaan säätämällä valaistuksen kirkkautta dynaamisesti läsnäolo- ja päivänvalotietojen perusteella. Tutkimus tarjoaa selkeän ja havainnollisen esimerkin siitä, miten anturipohjainen valaistuksenohjaus voi tuottaa merkittäviä energiasäästöjä erityisesti rakennuksissa, joissa valaistuksen käyttö vaihtelee tilan käytön ja luonnonvalon mukaan.

Widartha & muut (2024) tarkastelevat kahta keskeistä anturilähdettä eli liikettä havaitsevia sensoreita ja valon voimakkuutta mittaavia päivänvaloantureita. Valaistuksen säätö toteutettiin tilanteissa, joissa tilan käyttöaste vaihteli ja luonnonvalon määrä vaihtui päivittäin. Nämä olosuhteet ovat tyypillisiä toimistoympäristöille, joissa valaistuksen tarve elää jatkuvasti käyttäjämäärien ja ulkoisten valaistusolosuhteiden mukaan.

Tämä esimerkki vastaa suoraan tämän tutkielman keskeisiin teemoihin eli automaattiseen ohjaukseen, dynaamiseen valaistuksen säätöön ja energiatehokkuuden optimointiin. Samalla kyseinen esimerkki tarjoaa vertailukelpoista aineistoa, jonka avulla voidaan arvioida, miten eri ohjausstrategiat kuten pelkkä läsnäoloanturi, pelkkä päivänvalosäätö tai näiden yhdistelmä vaikuttavat energiankulutukseen.

Tämän vuoksi tutkimus toimii sopivana esimerkkitapauksena arvioitaessa, miten vastaavat ohjausperiaatteet voidaan toteuttaa DALI-järjestelmän avulla todellisissa toimistotiloissa. Tutkimuksessa tarkastellaan moderniin LED-teknologiaan perustuvaa valaistusta ja sen ohjausta tavalla, joka muistuttaa toimistorakennusten käytäntöjä. Lisäksi se tarjoaa suuntaa siitä, kuinka merkittäviä energiansäästöjä voidaan käytännössä saavuttaa, kun valaistus reagoi dynaamisesti tilan käyttöön ja luonnonvalon vaihteluihin.

5.2 Esimerkkitutkimuksen ohjausstrategiat

Widartha ja muut (2024) tutkivat energiatehokkaan älyvalaistuksen toteuttamista kolmessa eri ohjausskenaariossa, joissa hyödynnettiin sekä anturidataa että päivänvaloinformaatiota. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten valaisinten kirkkautta voidaan säädellä dynaamisesti muuttuvien käyttö- ja valaistusolosuhteiden perusteella. Kokeellinen data kerättiin viiden peräkkäisen päivän aikana 5.–10. lokakuuta 2023 (Widartha & muut, 2024, s. 5).

Ensimmäinen tarkasteltu ohjausstrategia perustui pelkkien anturilaitteiden käyttöön, jossa valaistuksen ohjaus perustui tilassa havaitun liikkeen mukaan. Valaistuksen kirkkaus asetettiin maksimiin, kun läsnäoloanturi havaitsi ihmisen liikkeen. Jos liikettä ei ollut havaittavissa, anturin mittaama sisätilan valoarvo määritti kirkkaustason suhteessa ennalta asetettuun kynnysarvoon.

Toinen tarkasteltu ohjausstrategia hyödynsi päivänvalodataa, jossa valaistuksen säätö perustui sääolosuhteisiin ja pilvipeitteen prosenttiosuuteen. Valaistuksen kirkkaus asetettiin automaattisesti maksimitasolle kompensoimaan luonnonvalon puutetta, mikäli sää oli pilvinen tai pilvipeitteen määrä ylitti 75 %. Selkeällä säällä tai vähäisen pilvisyyden aikana valaistuksen voimakkuutta alennettiin tarkoituksellisesti, jotta keinovalaistuksen käyttöä voitiin vähentää silloin, kun luonnonvaloa oli riittävästi. Tällä tavalla päivänvalostrategia pyrki minimoimaan turhan energian kulutuksen ulkoisen valaistuksen vaihtelun perusteella.

Kolmas strategia yhdisti molemmat edellä mainitut lähestymistavat. Yhdistelmästrategiassa kirkkaustaso asetettiin automaattisesti maksimiin tilanteissa, joissa sää oli pilvinen, pilvipeite ylitti 75 % tai valoanturin mittaama arvo jäi alle ennalta määritellyn kynnysarvon (Widartha, 2024, s. 5). Toisaalta valaistusjärjestelmä vähensi automaattisesti valaisinten tehoa tilanteissa, joissa tilassa ei havaittu liikettä tai joissa luonnonvalo tarjosi riittävän valaistusvoimakkuuden. Tämä skenaario mahdollisti valaistuksen tarkan optimoinnin tilanteissa, joissa pelkkä sisäinen anturitieto tai ulkoinen päivänvalodata ei yksinään tarjoaisi riittävää ohjaustietoa.

5.3 Esimerkkitutkimuksen tulokset ja energiankulutuksen vertailu

Widartha ja muut (2024) kokeelliset tulokset osoittavat, että eri ohjausstrategiat vaikuttavat energiankulutukseen hieman eri tavoin, mutta erot niiden välillä ovat melko pieniä. Taulukon 1 tuloksista voidaan havaita, että jokainen tarkasteltu skenaario johti merkittävään energiansäästöön verrattuna tilanteeseen, jossa kirkkaussäätöä ei olisi hyödynnetty lainkaan. Energiankulutuksen prosentuaaliset erot skenaarioiden välillä ovat pienet. Tämä osoittaa, että kaikki kolme ohjausstrategiaa tuottivat suhteellisen samankaltaisen kokonaisenergiankulutuksen tarkastelluissa olosuhteissa.

Taulukko 1. Energiankulutus tulokset eri skenaarioissa (Widartha & muut, 2024, s. 6)

Skenaario	Kokonaisenergiankulutus (kWh)	Energiansäästöprosentti (%)
Anturilaitteet	1,2	60,83
Päivänvalotiedot	0,93	61,29
Sekä anturilaite että päivänvalotiedot	1,12	60,60

Tutkimuksen data osoitti, että anturistrategian tuottama säästö ei ollut merkittävästi suurempi kuin muissa skenaarioissa, vaikka läsnäoloantureihin perustuvan ohjauksen

voisi lähtökohtaisesti olettaa vähentävän energiankulutusta selvästi. Tämä voidaan selittää kahdella tekijällä. Ensinnäkin koetilassa havaittiin lähes jatkuvasti liikettä, minkä vuoksi läsnäoloanturi piti valaisimien kirkkaustason useimmiten 75–100 prosentin välillä. Toiseksi anturidatan siirrossa pilvipalveluun havaittiin viivettä, mikä hidasti kirkkaustason päivittymistä ja heikensi anturipohjaisen ohjauksen reagointikykyä (Widartha & muut, 2024, s. 6). Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että ratkaisu olisi tehoton tai huono. Päinvastoin kaikki skenaariot tuottivat yli 60 % energiansäästön, mikä on erittäin merkittävä tulos.

Sen sijaan päivänvalodataan perustuva skenaario osoittautui energiatehokkuuden kannalta merkittäväksi. Keinovalaistuksen tehoa voitiin laskea usein ja merkittävästi, koska päivänvalo pystyi osittain tai kokonaan kattamaan tilan valaistustarpeen. Se myös reagoi valaistusolosuhteiden muutoksiin tehokkaammin kuin pelkkä läsnäolohavainto. Tämä selittää huikean 61,29 prosentin energiansäästön, joka oli tutkimuksen korkein yksittäinen prosenttiluku.

Tämän tutkimuksen tulokset ovat linjassa myös muihin tutkimuksiin. Esimerkiksi Acosta ja muut (2018, s. 2) toteavat, että valaistuksen ohjausstrategiat voivat vähentää energiankulutusta jopa 50 % himmennysjärjestelmiä käytettäessä ja lähes 30 % läsnäoloilmaisimia käytettäessä. Myös Leen ja Kangin (2024, s. 6) saamat tulokset osoittavat, että himmennysohjauksella saadaan merkittävästi säästettyä energiaa, sillä energiankulutus laski jopa 85,65 % tavalliseen valaistukseen verrattuna.

Kokonaisuutena tulokset osoittavat, että kaikki skenaariot vähensivät energiankulutusta huomattavasti. Päivänvalon hyödyntäminen oli keskeisin energiansäästöön vaikuttava tekijä ja läsnäoloantureiden vaikutus jäi tutkimusolosuhteissa vähäiseksi, koska tila oli lähes jatkuvasti käytössä. On kuitenkin tärkeää huomata, että tämä havainto ei vähennä läsnäoloon perustuvan ohjauksen potentiaalia muissa käyttökohteissa. Joissakin tiloissa käyttöaste vaihtelee huomattavasti, kuten käytävissä, varastoissa ja neuvotteluhuoneissa. Tällaisissa ympäristöissä läsnäoloon perustuva valaistuksen ohjaus voi tuottaa selvästi tätä tukimusta suurempia energiansäästöjä.

5.4 Yhteenveto esimerkistä

Tarkasteltu tutkimus (Widartha & muut, 2024) tarjoaa ajankohtaisen ja konkreettisen esimerkin siitä, miten älykkäällä valaistuksenohjauksella voidaan saavuttaa merkittäviä energiansäästöjä sisäympäristöissä. Keskeisin havainto on, että kaikkien tarkasteltujen ohjausstrategioiden avulla pystyttiin vähentämään valaistuksen energiankulutusta yli 60 % verrattuna tilanteeseen, jossa valaistuksen kirkkautta ei säädetty. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että kirkkaussäätöön perustuva valaistuksen ohjaus on tehokas keino parantaa rakennusten energiatehokkuutta.

Tulokset korostivat erityisesti päivänvalodatan merkitystä valaistuksen energiatehokkuudessa, sillä päivänvaloon perustuva ohjaus tuotti suurimman energiansäästön. Tutkimustulokset tukevat myös vahvasti aiemmissa luvuissa esitettyä näkemystä siitä, että luonnonvalon hyödyntäminen on yksi keskeisimmistä keinoista valaistuksen energiankulutuksen vähentämiseksi toimistorakennuksissa. Läsnäoloantureiden hyöty puolestaan korostuu vaihtelevasti käytetyissä tiloissa, mutta jatkuvassa käytössä niiden vaikutus jää vähäiseksi.

Peilaamalla tutkimuksen havaintoja DALI-järjestelmiin, voidaan todeta, että DALI muodostaa erittäin toimivan pohjan vastaavien valaistuksen ohjausstrategioiden toteutukselle. Järjestelmän osoitteellinen rakenne ja kaksisuuntainen tiedonsiirto sekä päivänvalo- että läsnäoloantureille mahdollistavat joustavan ja laajennettavan älyvalaistuksen toimistorakennuksissa. Lisäksi DALI-2-standardin mukaiset anturit ja paikallinen ohjausratkaisu auttavat minimoimaan viiveitä, joita tutkimuksessa ilmeni pilvipohjaisessa ohjauksessa.

5.5 Sovellettavuus toimistorakennuksiin ja DALI-järjestelmiin

Widartha ja muut (2024) tutkimuksessa esitetyt tulokset ovat hyvin sovellettavissa toimistorakennusten älykkääseen valaistukseen. Etenkin silloin, kun käytössä on DALI-ohjaukseen perustuva järjestelmä. DALI mahdollistaa yksittäisten valaisimien ja valaisinryhmien tarkan hallinnan, dynaamisen himmennyksen sekä anturien integroinnin osaksi valaistusjärjestelmää. Tutkimuksessa käytetyt ohjausperiaatteet eli läsnäolotunnistus, päivänvalosäätö ja näiden yhdistetty käyttö ovat kaikki ominaisuuksia, joita DALI- ja DALI-2-järjestelmät tukevat IEC 62386 standardin kautta (Adam, 2019, s. 4–5).

Päivänvalon hyödyntämisen keskeinen rooli energiansäästössä näkyy vahvasti myös toimistorakennuksissa. DALI-järjestelmään on mahdollista liittää päivänvaloantureita, jotka mittaavat tilaan tulevan valon määrää ja säätävät valaisinten valotehoa automaattisesti. Tämä vastaa suoraan tutkimuksessa havaittua tilannetta, jossa päivänvalodataan perustuva ohjaus tuotti suurimman energiansäästön. Dynaamisesta päivänvalosäädöstä hyötyvät etenkin avokonttorit ja työtilat, joissa on suuria ikkunoita. DALI-verkossa nämä päivänvaloanturit toimivat osana osoitteellista väylää, mikä mahdollistaa nopeat muutokset valaisinten kirkkaustasossa ilman ylimääräisiä viiveitä.

Läsnäoloantureiden osalta tutkimuksen tulokset tuovat esille sen, että niiden tehokkuus riippuu tilan todellisesta käyttöasteesta. Tutkimuksessa tila oli suurimman osan ajasta käytössä, joten läsnäoloantureista ei saatu maksimaalista hyötyä. Toimistorakennuksissa tilojen käyttöaste kuitenkin vaihtelee huomattavasti riippuen tilan käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi käytävät, sosiaalitilat, varastot ja kokoushuoneet ovat tyypillisiä alueita, joissa ihmiset liikkuvat epäsäännöllisesti. Tällaisissa tiloissa läsnäolotunnistus voi tuottaa huomattavasti suurempia energiansäästöjä kuin tutkimuksen tapauksessa. DALI-järjestelmässä läsnäoloantureiden ohjaus voidaan määritellä joko yksittäisille valaisimille tai valaisinryhmille, mikä tekee järjestelmästä erittäin joustavan tällaisissa vaihtelevissa ympäristöissä.

Yhdistetty ohjausstrategia eli päivänvalon ja läsnäolotiedon hyödyntäminen on toimistorakennuksissa erityisen käytännöllinen. DALI-järjestelmissä tämä voidaan toteuttaa antureiden yhteistoiminnalla ja ohjelmoiduilla valaistussäädöillä, jotka ottavat huomioon sekä ulkoiset valaistusolosuhteet että tilan käyttöasteen. Tämän tyyppinen ohjaus soveltuu erityisen hyvin tiloihin, joissa työskentely on ajoittaista ja luonnonvalon määrä muuttuu nopeasti.

6 Johtopäätökset

Tämän tutkielman tavoitteena oli tarkastella, miten DALI-järjestelmä toimii, miten se eroaa perinteisistä valaistuksenohjausjärjestelmistä ja millaisia energiansäästöjä sen avulla voidaan saavuttaa erityisesti toimistoympäristöissä. Tutkielmassa tehty tarkastelu osoitti, että DALI perustuu digitaaliseen ja osoitteelliseen väylärakenteeseen, joka mahdollistaa yksittäisten valaisimien ja ryhmien monipuolisen, tarkan ja joustavan hallinnan. Tämä erottaa sen selvästi perinteisistä valaistuksenohjausratkaisuista, jotka eivät tarjoa samanlaista joustavuutta ja kaksisuuntaista tiedonsiirtoa.

DALI-järjestelmä osoittautui kirjallisuuden ja esimerkkitutkimuksen perusteella energiatehokkaaksi ratkaisuksi. Anturipohjainen järjestelmä, jossa hyödynnettiin läsnäolo- ja päivänvaloantureita, mahdollisti huomattavia energiasäästöjä verrattuna perinteiseen valaistukseen. Esimerkkitapauksessa energiansäästöt olivat yli 60 %, mikä tukee aiempia tutkimuksia siitä, että dynaaminen valaistuksen ohjaus vähentää energiankulutusta erityisesti tiloissa, joissa luonnonvalon määrä vaihtelee tai tilan käyttöaste ei ole jatkuva.

Energiansäästöjen suuruus riippuu käytetystä ohjausstrategiasta, koska mitä dynaamisempi ja paremmin tilan käyttöön sovitettu ohjaus on, sitä suurempi energiansäästö on saavutettavissa. Tämä korostaa sitä, että DALI-järjestelmien suunnittelussa on kiinnitettävä erityisesti huomiota tilojen käyttöasteeseen, anturien sijoitteluun ja ohjausstrategian valintaan. Tällä tavoin järjestelmän energiatehokkuus ja toiminnallinen hyöty voidaan saavuttaa täysin.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että DALI on laajennettavissa oleva ja energiatehokas ratkaisu, joka soveltuu erityisen hyvin nykyaikaisiin toimistorakennuksiin. Järjestelmän vahvuudet näkyvät erityisesti vaihtelevissa käyttöympäristöissä, joissa automaatio ja valaisinkohtainen ohjaus tuottavat lisäarvoa.

7 Yhteenveto

Tämän tutkielman tavoitteena oli tarkastella DALI-valaistusjärjestelmän toimintaperiaatetta, sen eroja perinteisiin valaistuksen ohjausjärjestelmiin sekä sen tarjoamia energiatehokkuushyötyjä toimistorakennuksissa. Tutkielmassa esiteltiin DALI-protokollan keskeiset elementit, kuten digitaalinen ja osoitteellinen ohjaus, kaksisuuntainen tiedonsiirto sekä anturien liittämismahdollisuudet.

Tutkielman perusteella DALI tarjoaa huomattavasti joustavampia ja tarkempia ohjausmahdollisuuksia kuin perinteiset järjestelmät. DALI-järjestelmään liitetyt läsnäolo- ja päivänvaloanturit mahdollistavat valaistuksen automaattisen säädön tilan käyttöasteen ja luonnonvalon määrän mukaan. Tutkielmassa esitellyn esimerkin tulokset osoittavat, että DALI-järjestelmään liitetyiden läsnäolo- ja päivänvaloantureiden käytöllä voidaan saavuttaa merkittäviä energiasäästöjä.

Kokonaisuudessaan tämä tutkielma osoittaa, että DALI on toimiva ja energiatehokas valaistuksen ohjausratkaisu, joka soveltuu erityisen hyvin moderneihin toimistorakennuksiin. Järjestelmän joustavat ohjausmahdollisuuden, laaja yhteensopivuus sekä kyky integroitua osaksi rakennusautomaatiojärjestelmiä tekevät siitä erittäin hyvän vaihtoehdon älykkäiden valaistusratkaisujen toteuttamiseen.

Lähteet

Acosta, I., Campano, M. Á., Domínguez-Amarillo, S., & Muñoz, C. (2018, 13. marraskuuta). Dynamic daylight metrics for electricity savings in offices: window size and climate smart lighting management. *Energies, 11,* 3143. https://doi.org/10.3390/en11113143

Adam, G. K. (2019, 12. syyskuuta). DALI LED Driver Control System for Lighting Opera tions Based on Raspberry Pi and Kernel Modules. *Electronics. 8(9), 1021*. MDPI. https://doi.org/10.3390/electronics8091021

Admin. (2025, 5. syyskuuta). *DALI gateways & integration with KNX, BACnet & IoT.* KNXHUB. https://www.knxhub.com/dali-gateways-integration-knx-bacnet-iot/

Bessho, M. & Shimizu, K. (21. joulukuuta 2011). Latest trends in LED lighting. Electronics and communications in Japan. https://onlinelibrary-wiley-com.proxy.uwasa.fi/doi/epdf/10.1002/ecj.10394

Dali-alliance. DALI-2 sytems and components. Noudettu 29.11.2025 osoitteesta https://www.dali-alliance.org/dali/systems.html

Dali-alliance. DALI protocol: Key features. Noudettu 28.11.2025 osoitteesta https://www.dali-alliance.org/dali/keyfeatures.html

Delmastro, C. & Chen, O. (2023, 11. heinäkuuta). Buildings. The international Energy Agency (IEA). Noudettu 7.9.2025 osoitteesta https://www.iea.org/energy-system/buildings

Esteki, M., Khajehoddin, S. A., Safaee, A., & Li, Y. (2023, 21. huhtikuuta). LED systems applications and LED driver topologies*: A review. IEEE Access, 11, 38324-38358.* https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3267673

Helvar. *Mitä on valaistuksenohjaus?* Noudettu 21.10.2025 osoitteesta https://helvar.com/fi/mita-on-valonohjaus/

IEA. (2023b). Global residential lighting sales share by technology in the net zero scenario, 2010-2030. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-residential-lighting-sales-share-by-technology-in-the-net-zero-scenario-2010-2030 License: CC BY 4.0

IEA. (2023a). Lighting efficacy by technology in the net zero scenario, 2010–2030. https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/lighting-efficacy-by-technology-in-the-net-zero-scenario-2010-2030 License: CC BY 4.0

Lee, J. H., & Kang, J.-S. (2024, 11. heinäkuuta). Study on lighting energy savings by apply ing a daylight-concentrating indoor louver system with LED dimming control. *Energies, 17(14), 3425*. https://doi.org/10.3390/en17143425

Liu, J., Zhang, W., Chu, X., & Liu, Y. (2016, 20. toukokuuta). Fuzzy logic controller for en ergy savings in a smart LED lighting system considering lighting comfort and day-light. *Energy and buildings, 127, 95–104.* https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.1016/j.enbuild.2016.05.066

LogosLED. (2024, 1. elokuuta*). How does DALI lighting work? -A comprehensive Guide.* Noudettu 10.12.2025 osoitteesta https://logoslighting.com/blog/how-does-dali-lighting-work-a-comprehensive-guide/

Long, R., Huang, Z., Wei, Z. & Liu, H. (2025, 10. lokakuuta). Design and implementation of intelligent bionic dimming system based on DALI protocol for chemical industry. *IEEE Xplore. 4538–4542.* https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.23919/CCC64809.2025.11179141

Montoya, F., Peña-García, A., Juaidi, A. & Manzano-Agugliaro, F. (2017, 1. huhtikuuta). Indoor lighting techniques: An overview of evolution and new trends for energy saving. Energy and buildings.

Olajiga, O., Ani, E., Sikhakane, Z. & Olatunde, T. (2024, 28. maaliskuuta). A comprehend sive review of energy-efficient lighting technologies and trends. *Engineering Sci ence & Technology journal*. https://fepbl.com/index.php/estj/article/view/973/1220

Ordaz-García, O. O., Ortiz-López, M., Quiles-Latorre, F. J., Arceo-Olague, J. G., Solís-Ro bles, R., & Bellido-Outeiriño, F. J. (2020, 30. lokakuuta). DALI bridge FBGA-based implementation in a wireless sensor node for IoT street lighting applications. *Electronics, 9(11), 1803*. https://doi.org/10.3390/electronics9111803

Petkovic, M., Bajovic, D., Vukobratovic, D., Machaj, J., Brida, P., McCutcheon, G., Stankovic, L., & Stankovic, V. (2022, 5.marraskuuta*). Smart dimmable LED systems.*

Sensors, 22(21), 8523. https://doi.org/10.3390/s22218523

Pompei, L., Blaso, L., Fumagalli, S., & Bisegna, F. (2022, 16. maaliskuuta). The impact of key parameters on the energy requirements for artificial lighting in Italian build ings based on standard EN 15193-1:2017. *Energy and buildings, 263, 112025* https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.1016/j.enbuild.2022.112025

Shishegar, N. & Boubekri, M. (2017, 29. kesäkuuta). Quantifying electrical energy savings in offices through installing daylight responsive control systems in hot climates. *Energy and buildings, 153*, 87-98. https://doi-org.proxy.uwasa.fi/10.1016/j.enbuild.2017.07.078

Soori, P. & Vishwas, M. (2013, 12. kesäkuuta). Lighting control strategy for energy effi cient office lighting system design. *Energy and buildings, 66*, 329-337.

Widartha, V. P., Ra, I., Lee, S.-Y., & Kim, C.-S. (2024, 15. tammikuuta). Advancing smart lighting: A developmental approach to energy efficiency through brightness adjustment strategies. *Journal of low power electronics and applications, 14(1), 6* https://doi.org/10.3390/jlpea14010006