



Eero Gröhn

# Paikallisakuston käyttöolosuhteet ja akkujen suunniteltu elinikä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

26.11.2021

## Tiivistelmä

Tekijä:	Eero Gröhn
Otsikko:	Paikallisakuston käyttöolosuhteet ja akkujen suunniteltu elinikä
Sivumäärä:	36 sivua + 1 liite
Aika:	26.11.2021
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	Sähkölaitteiston käytön johtaja Ari Kokkonen Lehtori Eero Kupila

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli lisätä työn tilanteen teollisuuslaitoksen teoreettista tietoa akustojen käyttöolosuhteista, kunnossapidosta ja niiden käyttöikään vaikuttavista tekijöistä. Opinnäytetyön tilaajalla on käytössä avoimia lyijyakkuja osana UPS-varavoimajärjestelmää, jolla suojataan prosessin kriittisiä osia.

Tämän opinnäytetyön ensimmäinen osa sisältää teoreettista tietoa yleisimmistä UPS-järjestelmissä käytetyistä akkutyypeistä, niiden toiminnasta ja ominaisuuksista: avoimet lyijyakut (VLA), suljetut lyijyakut (VRLA), nikkeli-kadmiumakut (Ni-Cd) ja litiumioniakut (Li-Ion). Opinnäytetyön ensimmäinen osa sisältää teoreettista tietoa yleisimmistä UPS-järjestelmissä käytetyistä akkutyypeistä, niiden toiminnasta ja ominaisuuksista: avoimet lyijyakut (VLA), suljetut lyijyakut (VRLA), nikkeli-kadmiumakut (Ni-Cd) ja litiumioniakut (Li-Ion). Osana työtä tarkasteltiin akkuvalmistajien ohjeita, paikallisia turvallisuus- ja käyttöstandardeja sekä muita alan tutkimuksia ja kirjallisuutta.

Opinnäytetyön aikana suoritettu testaus sisälsi akkuhuoneen ja ulkoilman lämpötilan vertailumittauksia. Tutkimustyötä varten rakennettiin akkuhuoneen ilmanvaihtojärjestelmän prototyyppi, jonka avulla arvioitiin eri puhaltimien soveltuvuutta akkuhuoneeseen. Akkuhuoneen lämpötilan hallintaa varten tutkittiin mahdollisuuksia puhaltimien lämpötilaperusteiseen ohjaukseen ohjelmoitavan logiikkaohjaimen (PLC, programmable logic controller) avulla tasaamaan akkuhuoneen lämpötilaa valmistajan suositusten mukaisesti kaikkina vuodenaikoina.

Opinnäytetyön tuloksena syntyi dokumentti, joka auttaa uusien ja vanhojen akkujärjestelmien suunnittelussa, käytössä ja huollossa teollisuuslaitoksessa.

Avainsanat: avoin lyijyakku, kunnossapito, turvallisuus, PLC

## Abstract

Author: Eero Gröhn  
Title: Stationary Battery System Operating Conditions and Design Life  
Number of Pages: 36 pages + 1 appendix  
Date: 26 November 2021

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering  
Professional Major: Electric Power Engineering  
Instructors: Ari Kokkonen, Mission Critical Facilities Engineer  
Eero Kupila, Senior Lecturer

---

The purpose of this thesis work was to increase theoretical knowledge of battery operation, maintenance and factors that affect their service life. The client of the thesis work is an industrial plant that uses vented lead-acid batteries (VLA) as part of their uninterruptable power supply system (UPS) to protect the functionality of a critical process.

First part of this the thesis consists of theoretical information about the function and characteristics of the most common battery types used in UPS-systems; vented lead-acid batteries (VLA), valve regulated lead acid batteries (VRLA), nickel-cadmium batteries (Ni-Cd) and lithium-ion batteries (Li-Ion). As part of the work, battery manufacturer's instructions, local safety and usage standards and other studies in the field were examined.

The testing that was conducted during the thesis project included comparative measurements of battery room temperature to outside ambient temperature. A prototype ventilation system was built to evaluate the suitability of different fans in battery room ventilation according to the local safety standards and to explore the possibilities of temperature-based ventilation system using a modular programmable logic controller (PLC) to equalize the temperature inside the battery room to manufacturer's recommendations around the year.

The result of the thesis is a document that aids the design, usage, and service of new and old battery systems in the industrial plant.

Keywords: vented lead-acid battery, maintenance, safety, PLC

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Akkutekniikka	1
2.1	Avoin lyijyakku	3
2.2	Suljettu lyijyakku	5
2.3	Nikkeli-kadmiumakku	6
2.4	Litiumioniakku	7
3	Avoimien lyijyakkujen ikääntyminen	9
3.1	Lämpötilan vaikutus akun kapasiteettiin	9
3.2	Purkaus- ja latauskertakestävyys	12
4	Akustojen turvallisuusvaatimukset	13
4.1	Työskentely akustotilassa	15
4.2	Akustojen ilmanvaihto	16
4.3	Varauskaasut ja turvallinen etäisyys	19
4.4	Erillisen akustotilan erityisvaatimukset	20
5	Akuston kunnossapito	21
5.1	Akuston kuormituskoe	22
5.2	Avoimien akkujen vesitys ja elektrolyytin mittaukset	23
5.3	Kennojen impedanssin ja kennoyhdistimien resistanssin mittaukset	23
6	Akkuhuoneen lämpötilanhallinta	25
6.1	Ulkolämpötilan vaikutus akkuhuoneen lämpötilaan	25
6.2	Akkuhuoneen lämpötilanhallinnan prototyyppi	27
6.3	Puhaltimien ohjaus lämpötilan avulla	32
7	Yhteenveto	33
	Lähteet	35
	Liitteet	
	Liite 1: Puhaltimien mittaustulokset	

## Lyhenteet

- K: Kelvin. SI-järjestelmän mukainen absoluuttinen lämpötila-asteikko.
- KVA: Kilovoltiampeeri. Näennäistehon yksikkö.
- PLC: Programmable Logic Controller. Ohejelmoitava logiikkaohjain.
- UPS: Uninterruptible power supply. Keskeytymättömän tehonsyötön takaava järjestelmä.
- VLA: Vented Lead-Acid battery. Avoin lyijyakku.
- VRLA: Valve Regulated Lead-Acid battery. Suljettu lyijyakku, varustettu varoventtiilillä.

## 1 Johdanto

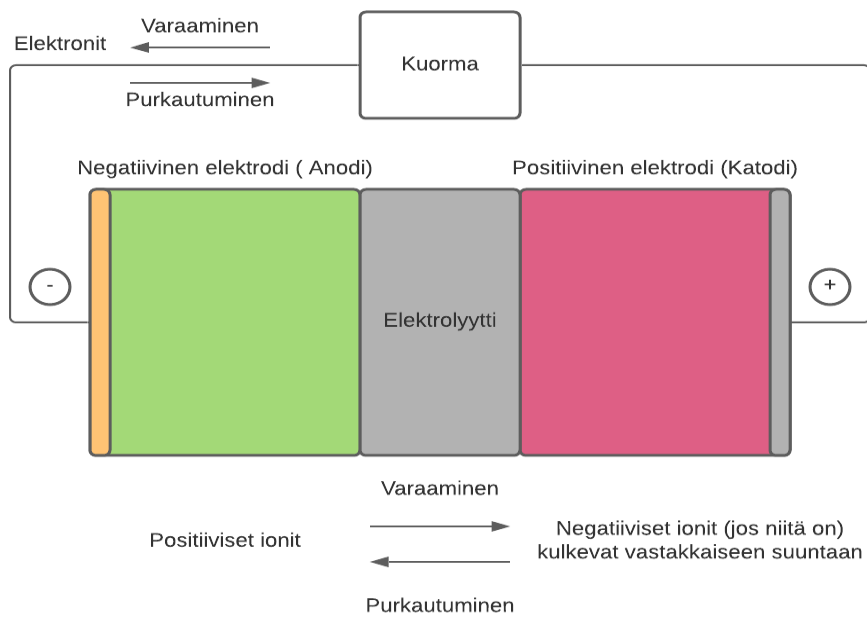
Opinnäytetyön tilaaja on teollisuuslaitos, jonka sähköjärjestelmä on varmennettu UPS-järjestelmällä ja generaattorilla. Työn tarkoituksena on lisätä organisaation teoreettista tietotaitoa UPS-järjestelmän osana toimivista akuista, kehittää akkujen kunnossapitoa ja selvittää millaisia vaikutuksia akkujen käyttöolosuhteilla on niiden elinikään. Työn tuloksena syntynyttä dokumentaatiota tullaan käyttämään akkujen kanssa työskentelevien henkilöstön koulutuksessa ja uusien akustojen suunnittelussa.

Työn ensimmäisessä vaiheessa tutustutaan akkujen toimintaan, UPS-järjestelmissä käytettyihin akkutyyppeihin, sekä niitä koskeviin turvallisuusvaatimuksiin ja standardeihin. Työn toisessa vaiheessa syvennytään akkujen elinikään vaikuttaviin tekijöihin ja vanhenemiseen sekä akkujen kunnossapitoon. Teoreettisen tiedon pohjalta tehdään alustava suunnitelma ja prototyyppi järjestelmästä, jonka avulla ylläpidetään akustotilassa akuille suotuisa lämpötila sekä riittävä ilmanvaihto akkujen turvallisen käytön ja pitkän eliniän varmistamiseksi.

## 2 Akkutekniikka

Akun avulla varastoidaan sähköä myöhempää käyttöä varten. Akku koostuu yhdestä tai useammasta varattavasta kennosta, jotka sisältävät positiivisesti ja negatiivisesti varautuneet elektrodilevyt. Elektrodilevyt on erotettu toisistaan erotinlevyillä, joilla estetään elektrodilevyjen välinen oikosulku. Elektrodilevyt on upotettu elektrolyyttiin, joka johtaa sähkövirtaa napojen välillä. [1, s. 5.]

Kennon sisältämä kemiallinen energia muuttuu sähköenergiaksi hapetus-pelkistymisreaktiossa, kun positiivisen ja negatiivisen navan välille syntyy virtapiiri. Purkautumistilassa kennon negatiivinen elektrodilevy hapettuu ja luovuttaa elektroneja ulkoiseen virtapiiriin. Positiivinen elektrodilevy puolestaan pelkistyy eli ottaa vastaan elektroneja ulkoisesta virtapiiristä. Varaustilanteessa tilanne kääntyy, kun negatiivinen elektrodilevy pelkistyy ja positiivinen elektrodilevy hapettuu. Yksittäisen kennon toiminta on havainnollistettu kuvassa 1. [1, s. 5.]



Kuva 1. Akkukennon toimintaperiaate [1, s. 5].

Kennon jännite riippuu elektrodilevyjen ja elektrolyytin materiaalivalinnoista. Taulukossa 1 on esitetty eräiden akkutyyppien elektrodien materiaalit, elektrolyytit ja nimelliset kennojännitteet. Taulukon kennojännitteet ovat suuntaa antavia ja todellisuudessa esimerkiksi lyijyakkujen avoimen piirin kennojännitteeseen vaikuttaa muun muassa elektrolyytin tiheys ja lämpötila. [1, s. 5.]

Taulukko 1. Eräiden akkukennotyyppien sähkökemialliset parit ja nimellisjännitteet [2, s. 8].

Akkutyyppi	Negatiivinen elektrodi	Positiivinen elektrodi	Elektrolyytti	Nimellinen jännite
Lyijyhappo	Pb	PbO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2,00 V
Nikkeli-kadmium	Ni	Cd	HOH / NaOH	1,2 V
Nikkelimetalli-hydridi	Ni	MH	KOH	1,2 V
Nikkelirauta	Ni	Fe	KOH	1,2 V
Hopeasinkki	Ag	Zn	KOH	1,55 V

Akut voidaan jakaa käyttösovellusten perusteella paikallisakkuihin, ajovoima-akkuihin ja siirrettäviin akkuihin. Eri käyttösovellukset antavat erilaisia vaatimuksia akkujen rakenteelle, kestävyydelle ja käytölle. Paikallisakut ovat pääasiallisesti avoimia tai suljettuja lyijyakkuja, nikkeli-kadmiumakkuja tai litiumakkuja. Akut asennetaan kiinteästi tasasähkölähteeseen, eikä niitä ole tarkoitus siirtää akun eliniän aikana.

## 2.1 Avoin lyijyaku

Avointen lyijyakkujen eli VLA-akkujen (Vented Lead-Acid battery) yleisimpiä käyttökohteita ovat sähkönjakelun, teollisuuden ja infrastruktuurin varmennetut sähkönsyöttöjärjestelmät. Avointen lyijyakkujen tyypillinen elinikä on 15–20 vuotta. Avoimet lyijyakut asennetaan tyypillisesti erillisiin huoneisiin avoimiin hyllyihin tai suuriin kaappeihin, joihin on rajattu pääsy. [3, s. 2.]

Avoimissa lyijyakuissa käytettävä elektrolyytti on vedellä laimennettua rikkihappoa. Lyijyakun kennon positiivinen elektrodilevy on valmistettu lyijyoksidista (PbO<sub>2</sub>) ja negatiivinen elektrodilevy lyijystä (Pb). Nimellinen kennojännite lyijyakuille on noin 2,1 V. Avoimet lyijyakut vaativat jatkuvaa huoltoa niiden koko



elinkaaren ajan. Avoimen akun kannessa tai korkissa on venttiili, jonka kautta veden elektrolyysissä syntyneet latauskaasut johdetaan ulos. Latauskaasut ovat pääasiassa vetyä ja happea. Avointen lyijyakkujen kennojen kotelot ovat pääsääntöisesti läpinäkyviä elektrodilevyjen kunnan ja elektrolyytin tason valvontaa varten. Kuvassa 2 on nähtävillä kolme erikokoista Hoppecken valmistamaa avointa lyijyakkua. [1, s. 5.]



Kuva 2. Hoppecken valmistamia avoimia lyijyakkua, jotka on varustettu kaasun-keräyskorkeilla [4].

Lyijyakut voidaan varustaa kuvassa 2 esiintyvillä kaasunkeräyskorkeilla tai kansilla, joiden avulla varaustilanteessa syntyvä vety ja happi kerätään. Vety yhdistetään hapen kanssa vesihöyryksi korkin sisältämän reaktiota nopeuttavan katalyytin avulla. Vesihöyry tiivistyy vedeksi ja palautuu takaisin akun sisälle. Korkkien käyttö alentaa akkuveden kulutusta ja pidentää tarvittavia täyttövälejä. [5.]

## 2.2 Suljettu lyijy Akku

Suljettujen lyijyakkujen (VRLA, Valve Regulated Lead-Acid battery) kennot ovat normaaliolosuhteissa suljettuja, eikä niitä ole suunniteltu avattaviksi. Normaaliolosuhteissa akun latauskaasut vety ja happi yhdistyvät takaisin vedeksi akun sisällä, eikä akkuvettä juurikaan haihdu. Akkujen kannessa on varalla venttiili, jonka kautta latauskaasut pääsevät purkautumaan, jos kennon sisäinen paine nousee liian korkeaksi vikatilanteessa. Suljettujen lyijyakkujen kotelot ovat läpinäkymättömiä. Kotelointia valmistetaan pääasiassa polypropeenista, joka kestää hyvin happoja ja emäksiä. Suljetut lyijyakit voidaan sijoittaa erillisiin akkukoteloihin, mutta ne eivät tarvitse erillistä akkuhuonetta. Kuvassa 3 on esitetty erään keskijännitekojeiston 110 V:n apusähköjärjestelmän akusto, joka koostuu yhdeksästä 12 V:n 85 Ah suljetusta lyijyakkusta. [6, s. 4.]



Kuva 3. Keskijännitekojeiston 110 VDC apusähköjärjestelmän akusto.

Suljettuja lyijyakkuja käytetään pääasiassa alle 500 kVA:n järjestelmissä. Yleisiä käyttökohteita ovat esimerkiksi UPS-laitteet ja hätävalaistusjärjestelmät. Suljettujen lyijyakkujen tyypillinen elinikä on 3–10 vuotta. Suljetuissa lyijyakuissa elektrolyytti on imeytetty elektrodilevyjen väliseen väliaineeseen. Yleisimmät suljetuissa lyijyakuissa käytetyt väliaineet ovat lasikuitumatto (AGM, Absorbent Glass Mat) ja hyytelö (GEL eli geeli- tai hyytelöakut). AGM- ja geeliakkujen rakenne on väliainetta lukuun ottamatta samanlainen. AGM- ja GEL- tyyppin VRLA-akut voidaan imeytetyn elektrolyytin ansiosta asentaa mihin tahansa asentoon, eivätkä ne vaadi jatkuvaa kunnossapitoa, kuten vesitystä. Vaikka suljetut akut ovatkin ”huoltovapaita”, on niitä kuitenkin hyvä puhdistaa ja testata määräajoin. [3, s. 2–3.]

### 2.3 Nikkeli-kadmiumakku

Nikkeli-kadmium eli NiCd-akkuja käytetään laajalti teollisuudessa ja sähkönjake-lussa varavoima- ja käynnistysakkuina. NiCd-akkuja suositaan myös junissa ja lentokoneissa niiden kestäväen rakenteen ja laajan käyttölämpötilan vuoksi. Niiden käyttö kuluttajatuotteissa ei ole enää sallittua EU:n alueella kadmiumin myrkyllisyyden takia. Akkuja on saatavilla lyijyakkujen tavoin suljettuina ja avoimina kennoina. Kuvassa 4 on lajitelma erikokoisia ranskalaisen SAFTin valmistamia avoimia NiCd-akkuja, jotka soveltuvat osaksi teollisuuden UPS-järjestelmiä tai esimerkiksi varavoimakoneiden käynnistysakkuiksi. [7.]



Kuva 4. Teollisuuskäyttöön suunniteltuja avoimia NiCd-akkuja [7].

NiCd-akkujen positiivisten elektrodien eli katodien materiaalina käytetään kadmiumia. Negatiivisena elektrodina käytetään nikkelihydroksidia. NiCd-akkujen elektrolyytinä käytetään vahvasti emäksistä natrium- tai kaliumhydroksidiliuosta. NiCd-akkujen nimellinen käyttöjännite on noin 1,2 V. Avoimet kennot vaativat VLA-akkujen tavoin säännöllistä vesitystä tislattulla vedellä. NiCd-akkujen tyypillinen käyttöikä on lyijyakkujen tavoin 15–20 vuotta. [2, s. 8; 7.]

## 2.4 Litiumioniakku

Litiumioni eli Li-Ion-akut ovat nopeasti yleistymässä sähköisissä ajoneuvoissa ja sähkövarastointijärjestelmien akustoissa, kuten UPS-laitteissa. Litiumioniakut ovat lyijy- ja nikkeli-kadmiumakkuihin verrattuina pieniä ja kevyitä, joten niillä voidaan saavuttaa parempi energiatiheys. Litiumioniakun nimellinen kennojännite on noin 3,7 V, minkä ansiosta yhdellä litiumionikennolla voidaan korvata useampi sarjaan kytketty VLA-, VRLA- tai NiCd-kenno. Litiumkennojen itsepurkautumisnopeus on myös merkittävästi pienempi kuin VLA-, VRLA- ja NiCd-kennoilla. [1, s. 12.]

Litiumioniakut jaetaan useisiin alaryhmiin positiivisen elektrodin eli katodin materiaalin perusteella. Positiivisen elektrodin materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidia (NMC-akku) tai litium-nikkeli-koboltti-alumiini-oksidia (NCA-akku). Litiumioniakkujen negatiivisena elektronina eli anodina käytetään pääasiassa grafiittia. Akuissa käytettävä elektrolyytti määrittyy elektrodien materiaalin mukaan. Elektrolyytinä käytetään esimerkiksi etyleenikarbonaattia ( $C_3H_4O_3$ ). [1, s. 16–19.]

Paikallisakustokäytössä litiumioniakut sijoitetaan VRLA-akkujen tavoin pääasiassa erillisiin akkukaappeihin tai kiinteästi osaksi latauslaitetta. Kuvassa 5 on esimerkki Vertivin valmistamasta litiumioniakuilla varustetusta akkukaapista. Kaappi koostuu kuudesta NMC-tyypin litiumioniakusta ja sen nimellinen kapasiteetti on 78 Ah. [8.]



Kuva 5. Vertiv HPL -akkukaappi [8].

Lyijy- ja nikkeli-kadmiumakuista poiketen litiumionikennot vaativat toimiakseen oman akunhallintajärjestelmän (BMS, Battery Management System), jolla varmistetaan niiden turvallinen toiminta. Piirin avulla latausvirtaa ja jännitettä

säädetään automaattisesti akkukennon lämpötilan perusteella. Hallintajärjestelmä valvoo myös kennojen jännitetasoja, sillä litiumionikennot ovat hyvin herkkiä yllilataukselle. [1, s. 12.]

### 3 Avoimien lyijyakkujen ikääntyminen

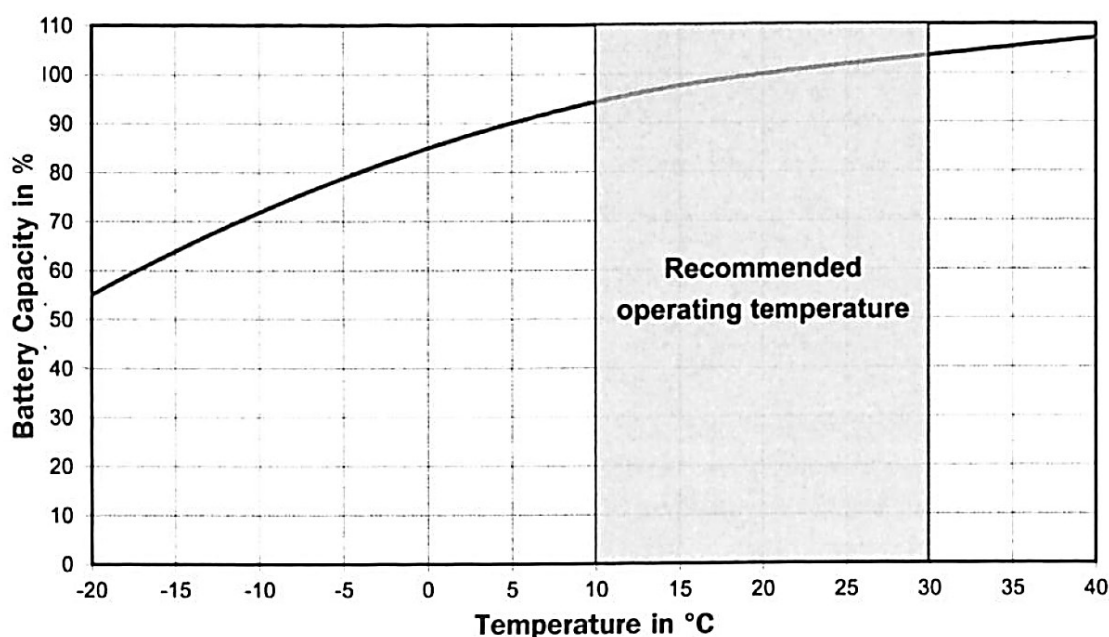
Akkukennot eivät ole ikuisia, vaan niiden tehokkuus heikkenee vähitellen ajan myötä kemiallisten sivureaktioiden ja kemikaalien fyysisten muutosten takia. Akkukennojen ikääntymistä ei voi täysin pysäyttää tai peruuttaa ja se johtaakin lopulta akkukennon tuhoutumiseen. Kennojen elinikää voi kasvattaa oikeaoppisella käytöllä ja säännöllisellä kunnossapidolla. Ikääntymisen muodot vaihtelevat akkutyypeittäin. Seuraavissa osioissa tutustutaan erityisesti avoimia lyijyakkuja koskeviin ikääntymisen muotoihin. [1, s. 25.]

Akun väärinkäyttö voi johtaa akkukennon tuhoutumiseen. Väärinkäytöksi luetaan esimerkiksi väärän latausprofiilin käyttö, yllilataaminen ja altistaminen liian korkeille tai alhaisille käyttö- ja varastointilämpötiloille. Yksittäisen akkukennon oikosulku sarjaan kytketyssä akustossa kasvattaa muiden kennojen kuormitusta, mutta akusto pystyy edelleen syöttämään energiaa kriittiselle kuormalle. Akkujen fyysistä rakennetta ei myöskään tule muuttaa tai vaurioittaa. Akkuun kohdistuvia iskuja, kolhuja, jäätymistä ja tulelle altistamista tulee välttää kaikissa olosuhteissa. Eri akuille annetut vaatimuksia tulee selvittää valmistajan ohjeista ja paikallisista standardeista. Valmistajan ohjeita tulee kaikissa olosuhteissa. [9, s. 1–3]

#### 3.1 Lämpötilan vaikutus akun kapasiteettiin

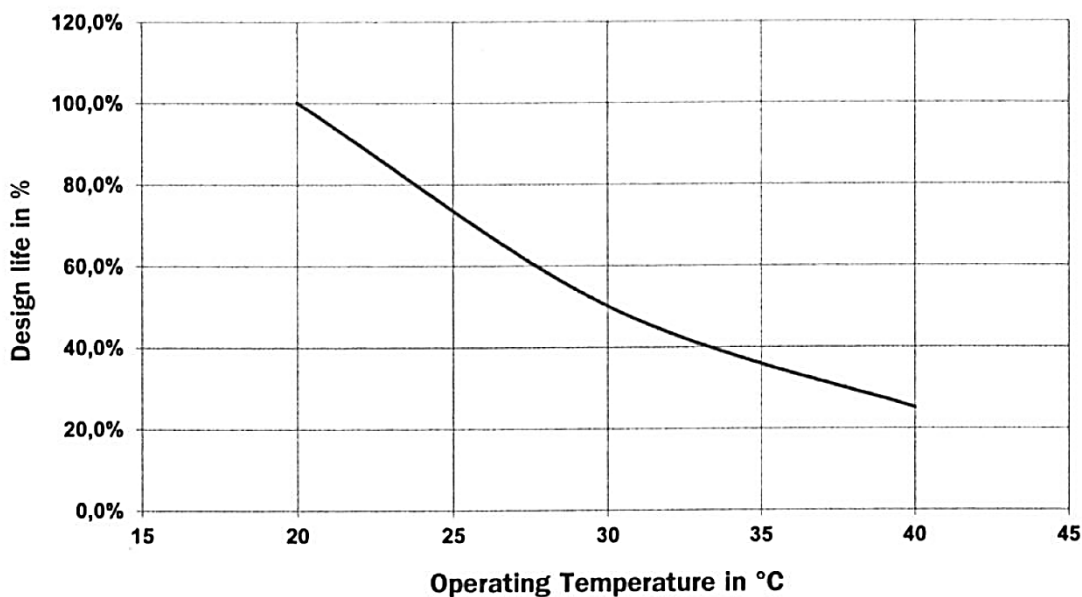
Ympäristön lämpötila vaikuttaa merkittävästi avoimen lyijyakun käytettävissä olevaan kapasiteettiin. Lämpötilan laskiessa käytettävissä oleva kapasiteetti laskee. Kohonnut lämpötila taas kasvattaa käytettävissä olevaa kapasiteettia. Akun kapasiteetin vaihtelu tulee ottaa huomioon akustoa mitoitettaessa. Akkujen tyyppi kilvessä ilmoitettu nimellinen kapasiteetti vastaa akun kapasiteettia 25 °C:n lämpötilassa. Lämpötilan vaikutus Hoppecken valmistaman *sun | power V*

L avoimen lyijyakun kapasiteettiin on esitetty kuvassa 6. Akun käyttöalue on  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mutta suositeltu käyttölämpötila akulle on  $10\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [10, s. 44.]



Kuva 6. Hoppecken valmistaman avoimen lyijyakun sun | power V L kapasiteetti ympäristön lämpötilan funktiona [10, s. 44].

Lämpötilan kasvu kiihdyttää avoimissa lyijyakuissa akkukennon sisällä tapahtuvaa korroosioprosessia, joten akun käyttöympäristön lämpötilalla on suuri vaikutus akun käyttöikään. Arrheniuksen yhtälön mukaisesti kemiallisen reaktion nopeusvakio on riippuvainen lämpötilasta. Nyrkkisääntönä korrosio prosessin nopeus kaksinkertaistuu, kun lämpötila nousee 10 K (kelvin) astetta. Yhden kelvinasteen muutos lämpötilassa vastaa yhden celsiusasteen muutosta. Toisin sanoen akun käyttöikä puolittuu aina lämpötilan noustessa  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ilmiö on havaittavissa kuvassa 7, jossa on esitetty Hoppecke avoimen lyijyakun sun | power V L käyttöikä ympäristön lämpötilan funktiona akun ollessa kestovaraustilassa. [10, s. 44.]



Kuva 7. Hoppecken avoimen lyijyakun sun | power V L suunniteltu käyttöikä ympäristön lämpötilan funktiona kestovarauksella [10, s. 44].

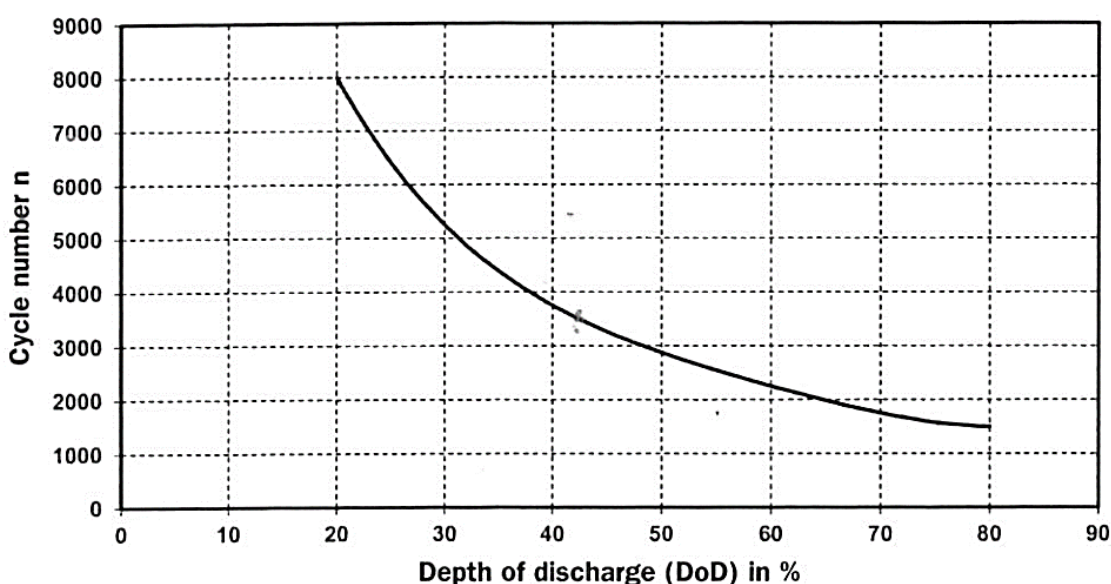
Korroosioprosessi ilmenee akun sisäisen impedanssin kasvuna. Akkukennojen kohonnut sisäinen impedanssi rajoittaa tehoa, jonka kenno voi syöttää ulkoiselle kuormalle. Lyijyakujen elektrodilevyjen resistanssi kasvaa hapetus-pelkistymisreaktion aiheuttaman kristallisoitumisen seurauksena. Reaktiossa elektrodeista irtoaa materiaalia purkautumisen aikana, eikä materiaali yleensä pala samaan paikkaan varaustilanteessa. Kristallisoituminen pienentää kennon elektrodien hyödynnettävissä olevaa pinta-alaa. [1, s. 25; 11, s. 1.]

Kennon elektrodilevyjen turpoaminen, levyjen pinnoille puumaisesti kristallisoituneet metallit ja paikalliset ylikuumenemiset voivat myös vaurioittaa elektrodilevyjen välisiä erotinlevyjä. Erotinlevyjen vauriot kiihdyttävät akkukennojen itsepurkautumista ja voivat pahimmassa tapauksessa johtaa kennon sisäiseen oikosulkuun. Elektrodilevyjen fyysiset muutokset voivat myös aiheuttaa murtumia, jotka pienentävät levyjen hyödynnettävissä olevaa pinta-alaa ja kasvattavat kennojen sisäistä resistanssia. [1, s. 26.]



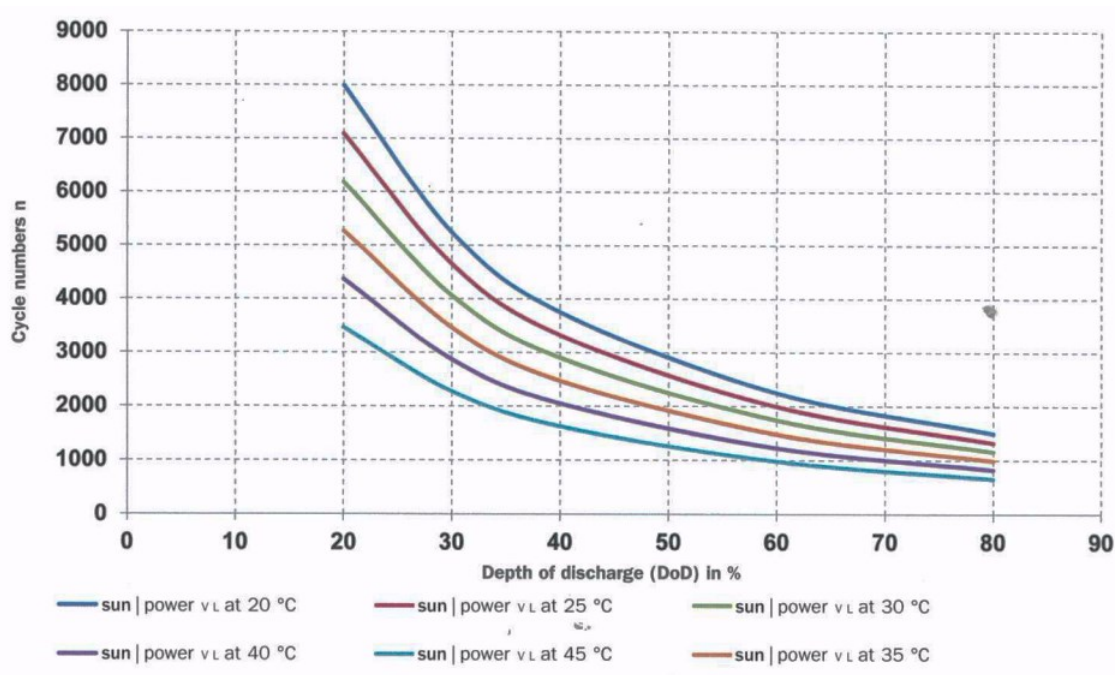
### 3.2 Purkaus- ja latauskertakestävyys

Akkujen elinikää arvioidaan myös akun purkaus- ja latauskertakestävyysnä eli lataussykleinä. Kestävyttä kuvataan purkaus- ja latauskertojen lukumäärällä, kunnes akun todellinen käytettävissä oleva kapasiteetti laskee alle 80 % nimellisarvosta ( $C_{10}$ ). Kestävyyteen vaikuttaa purkaussyvyys (DoD, Depth of discharge) ja akkukennojen elektrodien ja levyjen rakenne. Kuvassa 8 on esitetty Hoppecke sun | power V L-lyijyakun purkaus- ja latauskerrat purkaussyvyyden funktiona lämpötilan ollessa 20 °C. [10, s. 45.]



Kuva 8. Hoppecken avoimen lyijyakun sun | power V L purkaus- ja latauskerrat purkaussyvyyden funktiona lämpötilassa 20 °C [10, s. 45].

Lämpötilan vaikutus lyijyakun käyttöikään on myös havaittavissa, kun tarkkailaan purkaus-latauskertakestävyttä. Kuvassa 9 esitetään saman akkutyypin lataussyklikestävyttä eri lämpötiloissa välillä 20–45 °C.



Kuva 9. Lämpötilan vaikutus Hoppecke sun | power VL-lyijyakun purkaus- ja latauskertakestävyyteen [10, s. 46].

Kuvaajasta voidaan havaita, kuinka lämpötilan merkitys laskee purkaussyvyyden kasvaessa. Pienillä purkaussyvyyksillä akuston lämpötilan merkitys sen elinikään kasvaa.

#### 4 Akustojen turvallisuusvaatimukset

Akustojen yleiset turvallisuusvaatimukset on esitetty standardissa SFS-EN IEC 62485-1:2018, *Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Yleiset vaatimukset*. Standardisarjan osat 2, 3 ja 4 antavat erityisvaatimuksia paikallisakuille, ajovoima-akuille ja siirrettäville akuille. Eri akkujen käyttösovellukset ja niitä koskevat IEC 62485 standardisarjan osat on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Akkuja koskevat IEC 62485 standardisarjan osat jaoteltuna käyttösovelluksen perusteella [2, s. 9].

Käyttösovellus	Paikallisakku IEC 62485-2	Ajovoima-akku IEC 62485-3	Siirrettävä akku IEC 62485-4
Tietoliikennelaitteet ja järjestelmät	X		
Voimalaitokset / sähköasemat	X		
Tasasähkösyöttöiset järjestelmät, hälytysjärjestelmät, signalointijärjestelmät, rautatietasoristeykset jne.	X		
Varavoima ja turvajärjestelmät	X		
Keskeytymättömän tehonsyötön järjestelmät (UPS-järjestelmät)	X		
Paikallaan pysyvien sovellusten ja raideliikenteen kulkuneuvojen sekä vastaavien polttomootorien käynnistysakut	X		
Aurinkosähköjärjestelmät	X		
Trukit / sähköiset nosto- ja siirtokoneet		X	
Automaattisesti ohjatut kulkuneuvot, liikkuvat robotit		X	
Siivouslaitteet, pyörätuolit		X	
Räjähdyksen kestävät akut, kaivosakut		X	
Vapaa-ajan laitteiden kuten matkailuvau- nujen ja huviveneiden akut		X	
Laivojen, veneiden, raideliikenteen ja muiden kulkuneuvojen akut		X	
Siirrettävät akut			X
Yleiskäytön akut	X	X	X

#### 4.1 Työskentely akustotilassa

Akkujen ja varaajien normaaleja käyttötoimenpiteitä (varaaminen ja vesitys) saavat tehdä kyseisiin tehtäviin opastetut henkilöt. Varaajien korjaustöitä saavat tehdä vain sähköalan ammattihenkilöt, joilla on riittävät urakointioikeudet. [11, s. 1.]

Akkunapojen suojausten tulee mahdollistaa normaalit huoltotoimenpiteet, ja niiden on minimoitava mahdollisuus koskettaa jännitteisiin osiin. Eristävää suojavaatetusta ja paikallisia erityissuojauksia tulee käyttää akustotiloissa, joissa nimellisjännite ylittää 120 VDC. Suojauksen avulla estetään henkilön koskettaminen lattiaan tai osiin, jotka on maadoitettu.

Elektrolyyttiä ja/tai avoimia akkukennoja käsiteltäessä elektrolyyttiä saattaa roiskua. Elektrolyytin roiskeet voivat aiheuttaa silmien ja ihon ärsytystä tai palamista. Elektrolyytin hengittäminen ja nieleminen on vaarallista.

Avoimien lyijyakkujen käsittelyyn vaaditaan vähintään seuraavat suojavaälineet:

- suojalasit ja kasvovisiiri
- suojakäsineet (haponkestävät)
- esiliina (haponkestävä)
- suojajalkineet
- eristetyt työvälineet
- alkusammutusvälineet (sähköpalolle soveltuva)
- silmähuuhde
- hapon imeytys- ja neutralointiaineita.

On tärkeää muistaa poistaa kaikki metalliset henkilökohtaiset esineet, kuten kellot, korut ja sormukset ennen akkuhuoneessa työskentelyä. Huoltotöitä tehdessä ei myöskään tule käyttää sellaisia jalkineita tai vaatteita, jotka voivat synnyttää staattisia sähköpurkauksia. Akkuhuoneen ilmanvaihdon toimivuus on myös tarkistettava aina huoltokäyntien yhteydessä ja ennen huoltotöiden aloittamista. Akkuhuoneessa tai sen välittömässä läheisyydessä on myös oltava

riittävän kokoinen sähköpalojen sammuttamiseen soveltuva palonsammutin. [9, s. 1.]

## 4.2 Akustojen ilmanvaihto

Akuista vapautuu kaasuja varaamisen, kestovaraamisen ja ylivaraamisen aikana lukuun ottamatta kaasutiiviitä kennoja. Syy kaasujen muodostumiselle on veden elektrolyysi eli kemiallinen hajoaminen, jonka aiheuttaa akun varausvirta. Kaasut ovat avoimien lyijyakkujen tapauksessa pääasiassa vetyä ja happea, jotka voivat muodostaa akustotilassa- tai kotelossa räjähdysvaarallisen ilma-seoksen, jos vetykonsentraatio ylittää ilmassa 4 %<sub>vol</sub> ja on alle 77 %<sub>vol</sub>. Vedyn itsesyttymislämpötila on 560 °C, jonka vuoksi vedyn ja ilman seos voi syttyä esimerkiksi avotulen, kipinöiden tai staattisen sähkövarauksen seurauksena. [12, s, 20; 13.]

Ilmanvaihdon tarkoituksena on pitää akustotilan tai akkukotelon vetykonsentraatio vedyn alemman syttymisrajan (LEL) alapuolella. Paikallisakkujen ja akustojen turvallisuusvaatimuksia koskevassa standardissa *SFS-EN IEC 62485-2:2018* kohdassa 7.2 on esitetty laskukaava, jonka avulla määritetään akustotilan tai kotelon pienin mahdollinen ilman virtaus, jolla vetykonsentraatio saadaan pidettyä turvallisella tasolla (kaava 1). Vedyn muodostumiseen vaikuttaa merkittävästi akkukennojen lukumäärä ja varausvirta. [12, s. 21–22.]

$$Q = v \times q \times s \times n \times l_{gas} \times C_{rt} \times 10^{-3} \quad (1)$$

$Q$  on ilmanvaihdon virtaus (m<sup>3</sup>/h)

$v$  on vedyn tarvittava laimennus (100 % – 4 %) / 4 % = 24

$q$  on  $0,42 \times 10^{-3}$  m<sup>3</sup>/Ah syntynyt vety 0 °C lämpötilassa,

25 °C lämpötilassa käytetään korjauskerrointa 1,095

$s$  on 5, yleinen turvakerroin

$n$  on kennojen lukumäärä

$l_{gas}$  on kaasua tuottava virta mA/Ah nimelliskapasiteettia kohti

kestovarausvirralla  $I_{float}$  tai pikalatausvirralla  $I_{boost}$

$C_{rt}$  on kapasiteetti C<sub>10</sub> lyijyakuille (Ah),  $U_f = 1,80$  V/kenno lämpötilassa 20 °C tai kapasiteetti C<sub>5</sub> nikkeli-kadmiumakuille (Ah),  $U_f =$

1,00 V/kenno lämpötilassa 20 °C.

Kaavassa 1 esiintyvä kaasua tuottava virta  $I_{gas}$  lasketaan kaavan 2 mukaisesti [12, s. 21].

$$I_{gas} = I_{float/boost} \times f_g \times f_s \quad (2)$$

$I_{gas}$  on kaasua tuottava virta mA/Ah nimelliskapasiteettia kohti kesto-  
tovarausvirralla  $I_{float}$  tai pikalatausvirralla  $I_{boost}$

$I_{float}$  on kestovarausvirta täysin varautuneessa tilassa määrättyllä  
kestovarausjännitteellä lämpötilassa 20 °C

$I_{boost}$  on pikavarausvirta täysin varautuneessa tilassa määrättyllä  
kestovarausjännitteellä lämpötilassa 20 °C

$f_g$  on kaasuntuottokerroin, täysin varautuneessa tilassa kaasua tuot-  
tavan virran osuus

$f_s$  on turvakerroin, jolla otetaan huomioon vialliset kennot ja akkujen  
ikäntyminen.

Standardissa on määritetty arvot kaavassa 2 esiintyville virroille  $I_{float}$  ja  $I_{boost}$ , joita tulee käyttää laskennassa, mikäli akun valmistaja ei ole antanut omia suosituksia. Virrat on listattu taulukkoon 3 akkutyypeittäin. Taulukon arvoissa on otettu huomioon varausvirtojen nousu lämpötilan vaikutuksesta aina 40 °C:seen saakka. Avoimien akkujen katalyyttitulppia käytettäessä kaasua tuottavaa virtaa  $I_{gas}$  voidaan laskea 50 %:lla avokennojen virtaan verrattuna. [12, s. 22.]

Taulukko 3. Akkujen varausvirran  $I_{gas}$  arvot eri akkutyypeille ilmanvaihdon laskukaavaa varten [12, s. 22].

Parametri	Avoimet lyijyakut	Suljetut lyijyakut	Avoimet nikkeli-kadmiumakut
Virta (kestovaraus) $I_{gas}$ (mA/Ah)	5	1	5
Virta (pikavaraus) $I_{gas}$ (mA/Ah)	20	8	50

Luonnollista ilmanvaihtoa varten akustotiloissa ja -koteloissa tulee olla omat tuuletusaukot tulo- ja poistoilmaa varten. Tuuletusaukot on pyrittävä sijoittamaan akustotilan tai kotelon vastakkaisille seinille parhaan ilmanvaihdon saavuttamiseksi. Aukkojen on oltava vähintään 2 metrin etäisyydellä toisistaan, jos

ne joudutaan sijoittamaan samalle seinälle. Akustotilojen ja koteloiden tulo- ja poistoilma-aukkojen pinta-ala on oltava vähintään kaavasta 3 saatavan arvon mukaiset luonnollista ilmanvaihtoa käytettäessä. Kaavassa ilmanvirtauksen nopeudeksi on oletettu 0,1 m/s. [12, s. 23.]

$$A = 28 \times Q \quad (3)$$

$A$  on tuuletusaukkojen vapaa pinta-ala ( $\text{cm}^2$ )  
 $Q$  on akustotilan tai -kotelon vaadittava ilmanvaihto ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

Ilmanvaihto voidaan toteuttaa koneellisesti, mikäli luonnollinen ilmanvaihto ei täytä SFS-EN IEC 62485-2:2018 standardin vaatimuksia. Koneellinen ilmanvaihto toteutetaan tyypillisesti poistopuhaltimen avulla. Koneellinen ilmanvaihtojärjestelmä tulee kytkeä akkujen varaajaan tai järjestelmän on lähetettävä hälytys vikatilanteessa, jotta voidaan varmistua akkutilan riittävästä ilmanvaihdosta. Akustotilan poistoilma on johdettava suoraan rakennuksen ulkopuolelle. Kaasuja paljon tuottavan akuston pikalatauksen jälkeen akustotilan tuuletusta tulee jatkaa tehostetusti yhden tunnin ajan myös latauksen jälkeen, mikäli ilmanvaihto on riippuvainen akuston lataustilasta. Akuston ilmanvaihto voidaan mitoittaa myös suoraan pikalataustilanteen vaatimaan arvoon, mikäli erillistä säätöjärjestelmää ei käytetä. [12, s. 23.]

Ilmanvaihdon vaatimusten pienentämistä ei sallita tilanteissa, joissa kaasunkehitys on määritetty kokeellisesti akkujen testistandardin mukaisesti ja saatu arvo on pienempi kuin voimassa olevassa standardissa. Ilmanvaihtoa on lisättävä, jos kokeellinen arvo ylittää standardin arvon. [12, s. 20.]

Avoimien lyijyakkujen kaasunkeräyskorkeja, -kansia tai -putkia ei käsitellä vielä missään tuote-, testimenetelmä- tai turvallisuusstandardissa. Korkeja ja kansia käytettäessä suositellaan vakavasti, että akustohuoneen tai tilan ilmanvaihto toteutetaan standardin SFS-EN IEC 62485-2:2018 kohdassa 7 annettujen vaatimusten mukaisesti. [12, s. 23.]

### 4.3 Varauskaasut ja turvallinen etäisyys

Varauskaasujen laimeneminen akkukennojen läheisyydessä ei ole täysin varmaa. Kaasun leviämiseen vaikuttaa sen syntymisnopeus ja kaasua synnyttävän kohteen lähistön ilmanvaihto. Tästä johtuen akkujen ympärille määritetään laskennallinen suoja-alue, jonka sisäpuolella ei saa esiintyä kipinöitä, valokaaria, liekkejä tai laitteita, joiden pintalämpötila ylittää 300 °C. Turvallisen etäisyyden laskeminen on esitetty kaavassa 4. [12, s. 24.]

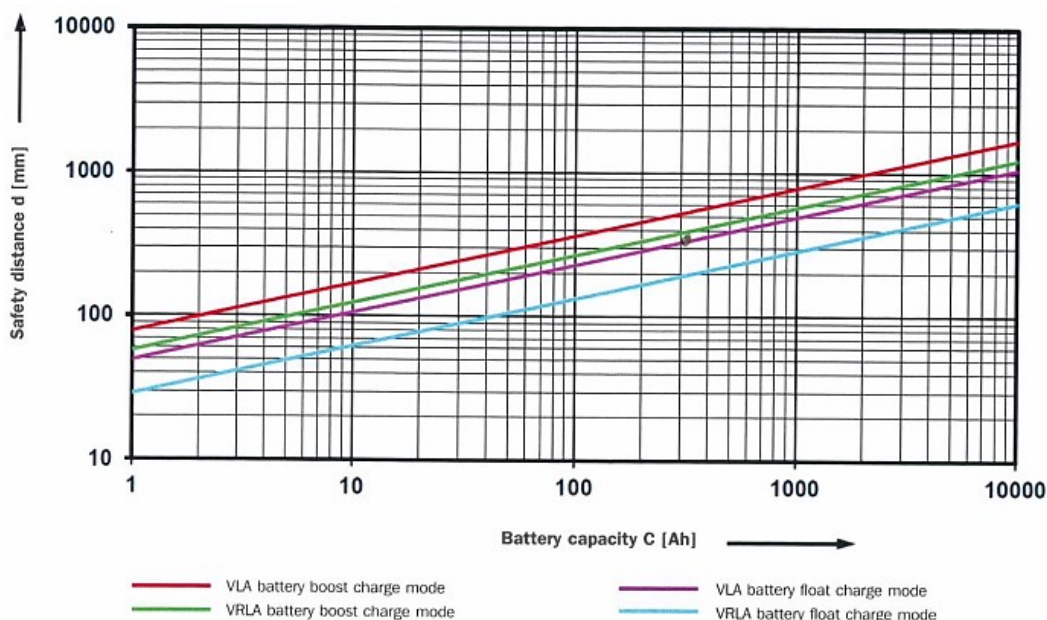
$$d = 28,8 \times \sqrt[3]{I_{gas}} \times \sqrt[3]{C_{rt}} \quad (4)$$

$d$  on turvallinen etäisyys (mm)

$I_{gas}$  on kaasua tuottava virta mA/Ah

$C_{rt}$  on nimelliskapasiteetti (Ah).

Kuvassa 10 on havainnollistettu avoimien (VLA) ja suljettujen (VRLA) lyijyakkujen turvallinen etäisyys akun nimelliskapasiteetin funktiona kesto- ja pikalatausvirroilla. Etäisyydet on laskettu standardin SFS-EN IEC 62485-2 luvun 7.2 taulukon 1 mukaisilla latausvirtojen ohjearvoilla.



Kuva 10. Avoimen ja suljetun lyijyakun laskennallinen turvaetäisyys nimelliskapasiteetin funktiona kesto- ja pikalataustilassa [10, s. 23].



Kaavassa 4 ja kuvassa 10 esiintyvä turvallinen etäisyys  $d$  voidaan saavuttaa myös kipinöivän laitteen ja akun välisellä väliseinällä. Väliseinää käytettäessä tulee kuitenkin ottaa huomioon sen mahdolliset vaikutukset latauskaasujen laimenemiseen ja ilmanvaihtoon vaikuttaviin tekijöihin. [12, s. 24.]

Jos akku on kiinteästi osa teholähteen rakennetta (esimerkiksi UPS-järjestelmä), voidaan turvallista etäisyyttä  $d$  pienentää laitteen valmistajan omien laskelmien ja mittausten perusteella. Vedyn konsentraatio ilmassa on pidettävä alle 1 %<sub>vol</sub> tehostetun ilmanvaihdon avulla syttymisriskin poistamiseksi, mikäli turvallista etäisyyttä pienennetään kaavan 4 arvosta. [12, s. 24.]

#### 4.4 Erillisen akustotilan erityisvaatimukset

Standardin SFS-EN IEC 62485-2:2018 osiossa 9.2 on esitetty erityisvaatimuksia erillisille akustotiloille. Erillisen akkutilan lattian on kestettävä akuston paino ja huoneen rakenteessa tulee ottaa huomioon mahdolliset tulevaisuuden laajennukset. Akustotilan ovi tulee olla lukittavissa ainoastaan huoneen ulkopuolelta, jos asiaankuulumattomien henkilöiden kulkua rajoitetaan. Oven tulee aueta ulospäin ja sen sisäpuolella on oltava hätämekanismi (paniikkisalpa), jolla oven saa hätätilanteessa avattua. Akkuhuoneiden sähköasennusten on noudatettava voimassa olevien standardien vaatimuksia. [12, s. 25–26.]

Avokennoja käytettäessä tilan lattian tulee olla elektrolyyttiä läpäisemätöntä ja kemiallisia vaikutuksia kestävää materiaalia tai kennot on sijoitettava niille sopiville alustoille. Akkukennojen sijoittelussa tulee noudattaa valmistajan antamia ohjeita ja standardin SFS-EN IEC 62485-2 mukaisia turvaetäisyyksiä. [12, s. 25–26.]

## 5 Akuston kunnossapito

Akuston kunnossapidon tavoitteena on estää odottamattomat toimintahäiriöt ja minimoida käyttökatkokset.

Akkujen kuntoa ylläpidetään kunnossapitosuunnitelman avulla muiden sähköjärjestelmien tavoin. Akkujen kunnossapitosuunnitelmaan sisällytetyissä huoltotoimenpiteissä tulee lähtökohtaisesti noudattaa akkujen valmistajan ohjeistuksia. Avoimia lyijyakkuja koskevassa kunnossapitosuunnitelmassa voi esiintyä esimerkiksi seuraavia huoltotehtäviä:

Kuuden kuukauden välein

- Koko akkujärjestelmän jännitteen mittaus (kestovaraus)
- Jännitteen mittaus valituista kennoista (kestovaraus)
- Elektrolyytin tiheyden mittaus valituista kennoista
- Elektrolyytin lämpötilan mittaus valituista kennoista
- Elektrolyytin määrän tarkistus kaikissa kennoissa
- Akustotilan lämpötila mittaus.

Kahdentoista kuukauden välein

- Koko akkujärjestelmän jännitteen mittaus (kestovaraus)
- Jännitteen mittaus kaikista kennoista (kestovaraus)
- Elektrolyytin tiheyden mittaus kaikista kennoista
- Elektrolyytin lämpötilan mittaus kaikista kennoista
- Elektrolyytin määrän tarkistus kaikista kennoista
- Akustotilan lämpötila
- Kaikkien liitosten visuaalinen tarkistus
- Kaikkien liitosten kireyden tarkistus
- Akustohyllyjen ja/tai kaappien visuaalinen tarkistus
- Akustotilan ilmanvaihdon tarkistus.

Akut on hyvä puhdistaa ulkoisesti säännöllisesti, vähintään kerran vuodessa. Akkujen muoviosat puhdistetaan vedellä tai vedellä kostutetulla liinalla. Puhdistuskankaan on oltava puuvillaa staattisten sähköpurkausten ehkäisemiseksi. Muita puhdistusvälineitä tai nesteitä ei tule käyttää akkujen puhdistuksessa, jotta vältetään mahdollisilta staattisilta sähkövarauksilta ja akkukoteloiden vaurioilta. Puhdistuksen jälkeen akkujen pinnat tulee kuivata oikeaoppisesti antistaattisella liinalla (esimerkiksi puuvilla). [10, s. 51.]

## 5.1 Akuston kuormituskoe

Akuston kuormituskoe on paras tapa selvittää akuston luotettavuus ja kokonaiskapasiteetti. Kokeen aikana akustoa puretaan vakiovirralla tai -teholla erilliseen kuormaan tai kyseisen akuston varmistamaan todelliseen kuormaan. Suuremmissa UPS-järjestelmissä on usein sisäänrakennettu kuormituskoe, joka voidaan käynnistää laitteen ohjauspaneelistä. Akusto ei kykene ylläpitämään kriittistä kuormitusta heti kuormituskokeen jälkeen tai sen aikana. Akustoa kuormitetaan kokeessa vähintään 20 % sen kokonaiskapasiteetista. Kokeessa pyritään kuitenkin välttämään yli 50 %:n purkausta, sillä liian syvät purkaukset kuormittavat akustoa turhaan ja rajoittavat akuston varmistuskykyä kokeen jälkeen. [9, s. 3.]

Kuormituskokeen aikana akustosta mitataan kokeen pituudesta riippuen 1–30 minuutin välein akuston virta, kokonaisjännite ja mahdollisuuksien mukaan yksittäisten kennojen tai akkujen jännitteet. Mittaustulokset kirjataan ylös ja niitä verrataan saman akuston aiempiin mittaustuloksiin. Yli 10 %:n ero edellisiin mittaustuloksiin tai valmistajan ohjearvoihin viittaa akuston toimintahäiriöön tai vanhenemiseen. [9, s. 3; 11, s. 3.]

Kuormituskokeen aikana akkukennojen välisten liitosten kuntoa tarkkaillaan jännitehäviö- tai lämpötilamittauksen avulla. Löysät ja vialliset liitokset on helppo havaita esimerkiksi lämpökameran avulla. Akustotilan ilmanvaihdosta on huolehdittava kuormituskokeen aikana, sillä suuret akustot luovuttavat purkautessaan suuren määrän lämpöenergiaa. [9, s. 3.]

## 5.2 Avoimien akkujen vesitys ja elektrolyytin mittaukset

Avoimien lyijyakkujen elektrolyytin tasoa tulee tarkkailla säännöllisesti. Akut voidaan vesittää yksitellen suppilon ja täyttökannun avulla tai akusto voidaan varustaa keskitetyllä vesitysjärjestelmällä. Automaattisella täyttökannulla akkuun saadaan lisättyä oikea määrä tislattua vettä eli akkuvettä. Automaattinen vesityskannu täytyy muistaa säätää akkukennolle sopivaksi, jotta akun valmistajan määrittämä elektrolyyttitaso ei ylitä. Keskitetyssä järjestelmässä akkukennot varustetaan vesitystulpilla, jotka lisäävät kennoihin akkuvettä putkiston kautta. Keskitetyn järjestelmän käyttö on kannattavaa etenkin suurissa akustoissa, sillä kennojen vesitys yksittäin vie paljon aikaa.

Elektrolyytin tiheys voidaan mitata avoimista lyijyakuista ominaispainomittarin eli hydrometrin tai tiheysmittarin avulla. Hoppecke on määrittänyt tyyppin grid | power V H (OSP.XC) avoimille lyijyakuille elektrolyytin nimelliseksi tiheydeksi 1,27 kg/l sen lämpötilan ollessa 20 °C. Elektrolyytin tiheys muuttuu lämpötilan mukaan. Pienessä lämpötilassa elektrolyytin tiheys kasvaa ja lämpötilan noustessa elektrolyytin tiheys laskee. Hoppecke ohjeistaa, että elektrolyytin tiheydelle tulee käyttää korjauskerrointa 0,0007 kg/l / K sen lämpötilan ollessa muu kuin 20 °C. [10, s. 39.]

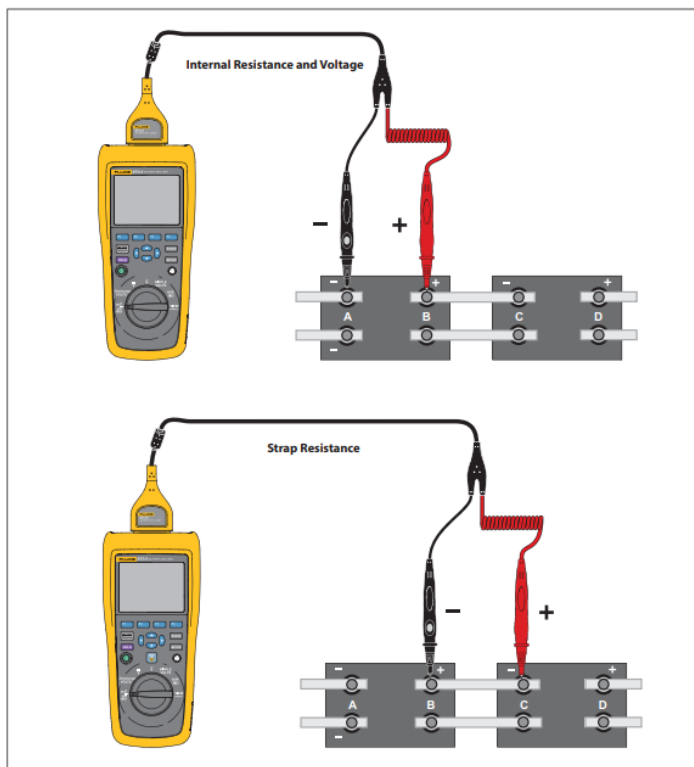
Tiheyden mittausta varten kennon elektrolyyttitason tulee olla akun valmistajan suositamassa tasossa. Elektrolyytin tiheyden mittausta ei tule kuitenkaan suorittaa, mikäli kennoon on äskettäin lisätty akkuvettä, koska sen sekoittuminen elektrolyytin kanssa vie aikaa. Akkuvesi jää kellumaan elektrolyytin päälle, koska sen tiheys on pienempi. Akun tulee olla myös ladattuna vähintään 72 tuntia ennen mittauksen suorittamista. [10, s. 39.]

## 5.3 Kennojen impedanssin ja kennoyhdistimien resistanssin mittaukset

Akkukennojen sisäisen vastuksen eli impedanssin mittauksen avulla voidaan selvittää akkujen jäljellä oleva käyttöikä. Akkujen sisäinen vastus kasvaa ja kapasiteetti pienenee niiden eliniän loppuvaiheessa. Mittauksia tulee kuitenkin

tehdä akun koko eliniän aikana, koska yksittäiset mittatulokset ovat merkityksetömiä.

Mittausta varten on omia mittalaitteita, joiden avulla mittaus voidaan suorittaa akun ollessa käytössä. Laitoksessa on käytössä kuvan 11 mukainen Fluke BT510 -akkuanalysoija, jonka avulla voi mitata yksittäisten kennojen jännitteet ja sisäiset impedanssit. Mittaustulokset tallentuvat kennokohtaisesti ja niitä voi helposti vertailla tietokoneella. [14, s. 1.]



Kuva 11. Akun impedanssin ja jännitteen sekä kennoyhdistimen resistanssin mittaaminen Fluke BT510-akkuanalysoijalla [14, s. 35].

Akun impedanssi mitataan akun napojen väliltä ja mittaus voidaan tehdä akun ollessa käytössä. Kuvassa 11 on esitetty, kuinka kennon impedanssi ja kennoyhdistimen resistanssi mitataan Fluke BT510 -akkuanalysoijalla.

## 6 Akkuhuoneen lämpötilanhallinta

Työn tilaajan teollisuuslaitoksessa sijaitseva akkuhuone on UPS-järjestelmän paikallisakusto, jonka avulla varmistetaan katkeamaton ja tasalaatuinen sähkösyöttö laitoksen kriittiselle prosessille. Akkuhuoneeseen on asennettu 1440 kappaletta Hoppecke GmbH:n valmistamia *10 OSP.XC 400* avoimia lyijyakkuja, jotka on suunniteltu käytettäväksi UPS-laitteistoissa. Luku 10 ilmaisee akkukennon positiivisten levyjen lukumäärää ja 400 akun nimellistä kapasiteettia. Akut on suunniteltu käytettäväksi UPS-laitteistoissa, teholähteissä ja sähkönjakelun ohjauslaitteistoissa. Akkujärjestelmän akut on jaettu kuuteen sarjaan, joissa jokaisessa on 240 akkua. Jokaisessa akussa on yksi kenno, jonka nimellinen jännite on 2,25 V ja todellinen kapasiteetti 440 Ah. Laitoksen UPS-järjestelmä toimii akuston lataajana.

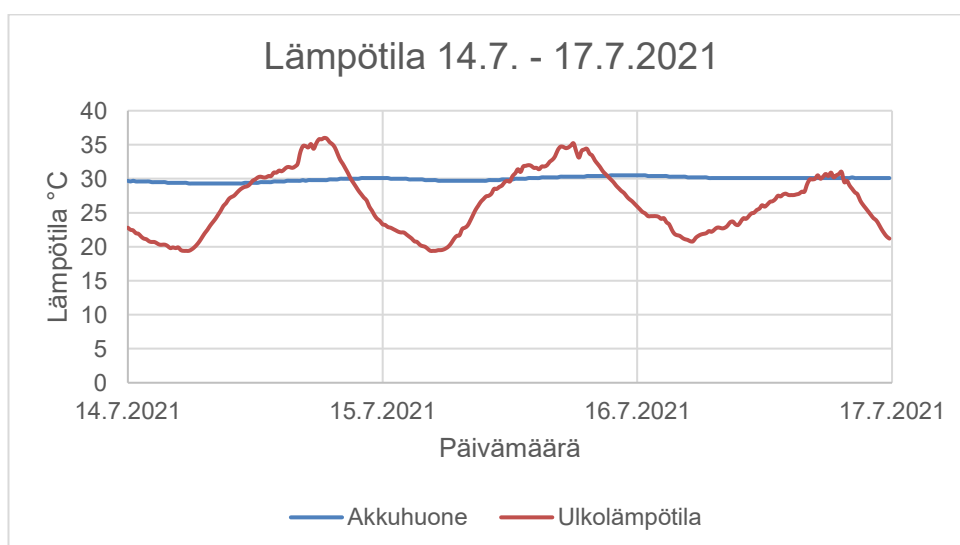
Akkuhuoneen ilmanvaihto on toteutettu koneellisesti Ziehl-Abegg FN025-4IL.Z8.A5P4-tyyppin aksiaalipuhaltimella, jonka nopeutta säädetään manuaalisesti tyristorisäätimellä. Puhallin toimii akkuhuoneen poistopuhaltimena. Korvausilma johdetaan akustotilaan vapaasti putkella laitoksen ulkopuolelta. Poistopuhallin on varustettu rajakytkimellä, joka lähettää hälytyksen kiinteistön hälytysjärjestelmään puhaltimen pysähtyessä tai kun ilmavirta laskee liian alhaiseksi. Poistopuhallin on kytketty pistotulpalla akustotilan siivoukseen tarkoitettuun pistorasiaryhmään. Sähkönsyöttöä ei ole varmennettu varavoimalla. Tuolilmaa ei valvota tai ohjata erillisellä valvonta- tai säätölaitteella.

### 6.1 Ulkolämpötilan vaikutus akkuhuoneen lämpötilaan

Akkuhuoneen lämpötilanhallintalaitteiston suunnittelu aloitettiin tutkimalla ulkolämpötilan vaikutusta akkuhuoneen sisälämpötilaan. Työn teoreettisessa osuudessa luvussa 4 huomattiin, kuinka merkittävä vaikutus akkujen lämpötilalla on niiden elinikään. Akkuhuoneen korvausilma otetaan suoraan rakennuksen ulkopuolelta, joten ulkolämpötilan muutosten vaikutukset akkuhuoneen sisälämpötilaan haluttiin selvittää.

Akkuhuoneen sisälämpötilan seuraamista varten tilaan oli asennettu yksi Pro-dual TEHR PT-100 -huoneanturi, joka on kytketty laitoksen valvontajärjestelmään. Anturi oli sijoitettu keskelle akkuhuoneen takaseinää, akkusarjojen 3 ja 4 väliin. Anturi oli aseteltu tallentamaan tuloksia 15 sekunnin välein, jonka vuoksi järjestelmän muistiin mahtui vain edeltävän 133 päivän mittaustulokset. Mittausväli muutettiin 15 minuuttiin, jolloin mittaustietoja on mahdollista saada usean vuoden ajalta ja akkuhuoneen lämpötilaa pystytään seuraamaan tulevaisuudessa pidemmällä aikavälillä. Ulkolämpötilan mittausta varten laitoksen ulkopuolelle asennettiin Pro-dual TEU PT 100 -ulkoanturi, joka liitettiin myös osaksi laitoksen valvontajärjestelmää. Antureiden mittaustarkkuudet tarkistettiin erillisen FLIR EM54 -ympäristömittarin lämpötilamittauksen avulla.

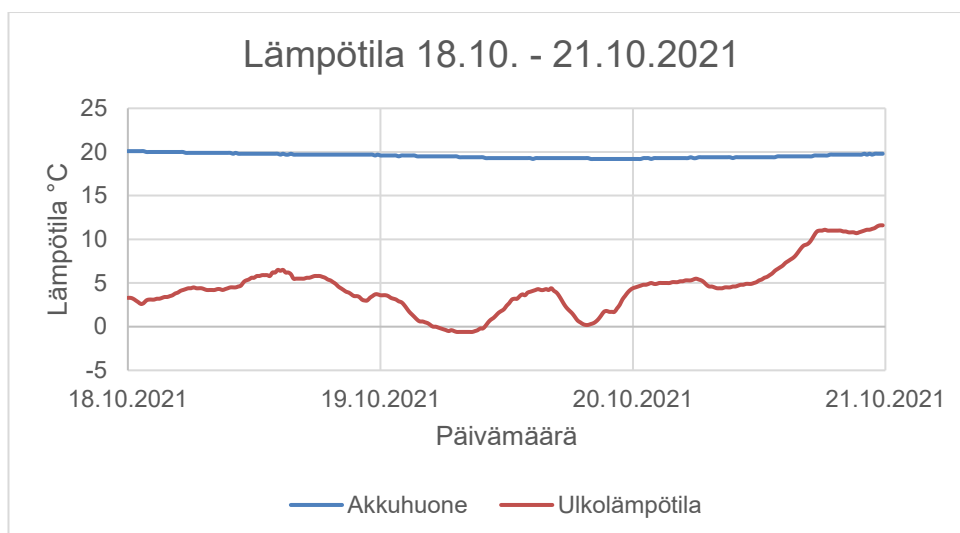
Mittaukset aloitettiin 13.7.2021. Mittaustulokset ladattiin valvontajärjestelmästä ja tuloksista etsittiin mittaussjakson lämpimin ja kylmin päivä. Tulosten perusteella piirrettiin kuvaajat havainnollistamaan ulkolämpötilan ja akkuhuoneen sisälämpötilan välistä suhdetta. Kuvaajat on esitelty kuvissa 12 ja 13.



Kuva 12. Ulkolämpötilan vaikutus akkuhuoneen lämpötilaan aikavälillä 14.7.–17.7.2021.

Mittaussajanjakson lämpimin päivä oli torstai 15.7.2021, jolloin ulkolämpötilaksi mitattiin 36 °C klo 18.30. Akkuhuoneen lämpötila pysyi kolmen hellepäivän ajan

lähes vakiona, koska akkuhuoneen lämmin huoneilma sitoutuu akkujen elektrolyyttiin lämpöenergiana. Akkujen suuren määrän vuoksi lämpöenergian vapautuminen takaisin ilmaan on hidasta, eikä alentunut yölämpötila riitä muuttamaan akkuhuoneen sisälämpötilaa merkittävästi.



Kuva 13. Ulkolämpötilan vaikutus akkuhuoneen lämpötilaan aikavälillä 18.10. – 21.10.2021.

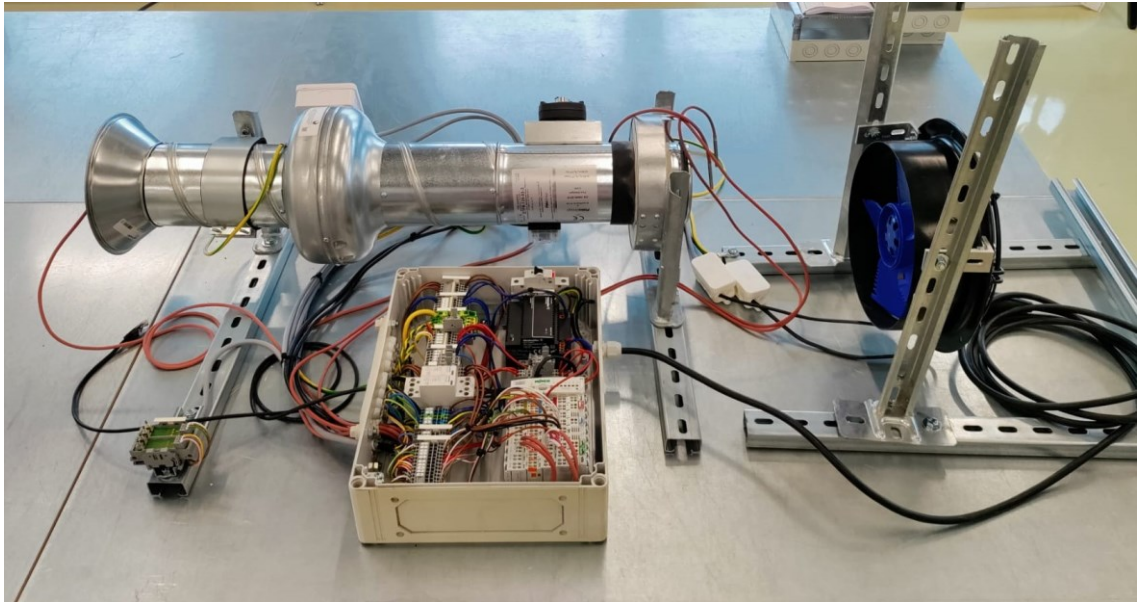
Mittausjakson kylmin päivä oli tiistai 19.10.2021, jolloin lämpötilaksi mitattiin  $-0,6$  °C klo 07.30. Akkuhuoneen lämpötila on heinäkuun mittaustuloksiin verrattuna laskenut  $10$  °C. Lämmön sitoutuminen akkujen elektrolyyttiin on edelleen havaittavissa ja akkuhuoneen lämpötila pysyttelee noin  $20$  °C:ssa.

## 6.2 Akkuhuoneen lämpötilanhallinnan prototyyppi

Akkuhuoneen lämpötilanhallinnan kehittämistä varten rakennettiin prototyyppi-laitteisto. Laitteiston avulla tutkittiin puhaltimien ohjausjännitteen vaikutusta puhaltimien ilmavirran nopeuteen ja siirtyvään ilmamäärään, sekä arvioitiin puhaltimien soveltuvuutta akkuhuoneeseen. Prototyypin puhaltimia ohjataan ohjelmoitavan logiikkaohjaimen eli PLC:n (Programmable Logic Controller) avulla. Laitteisto koostuu tuloilmakanavaa mukailevasta ilmanvaihtokanavasta ja akkuhuoneen poistoilmapuhaltimena käytettävästä aksiaalipuhaltimesta.



Tuloilmakanavaan asennettiin kanavapuhallin ja palopelti. Puhaltimien lisäksi laitteisto sisältää ohjainkotelon, ohjauspainikkeita ja lämpötila-antureita. Prototyyppi on nähtävissä kuvassa 14.



Kuva 14. Prototyyppilaitteisto.

Seuraavassa on luettelo prototyypissä käytetyistä puhaltimista ja palopellistä:

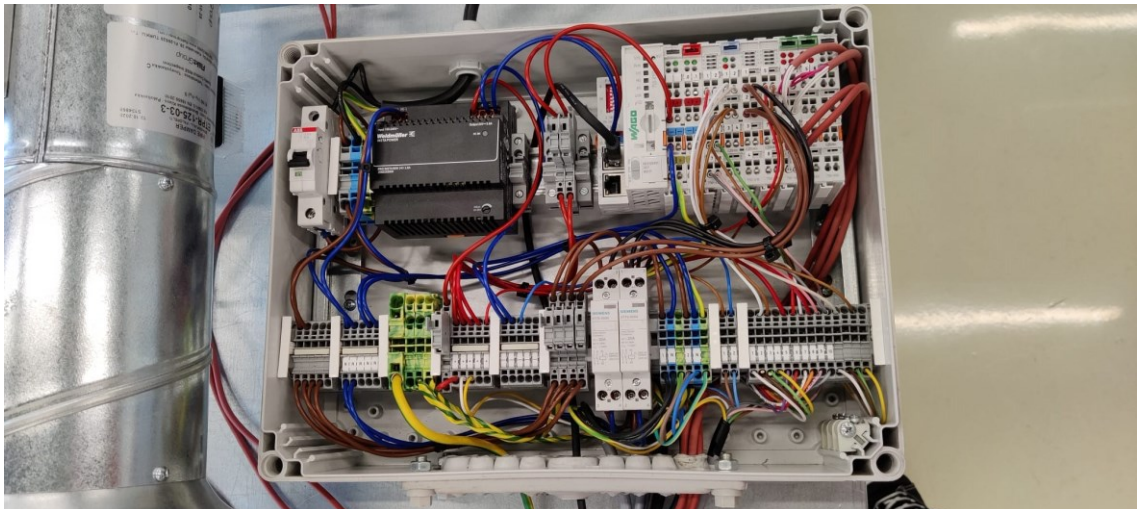
- Onnline CK 125 C1 EC-kanavapuhallin
- Fläkt ETPR-125-03-3 24 V-palopelti
- Ziehl-Abegg FN025-4IL.Z8.A5P4-aksiaalipuhallin
- Ziehl-Abegg FN030-4IL.ZC.A5P4-aksiaalipuhallin.

Laitteen ohjelmoitavaksi logiikkaohjaimeksi valittiin Wago 750-8100 PFC100 -ohjain. PFC100 on varustettu ARM Cortex A8 prosessorilla. Ohjain tukee kaikkia Wagon 750 ja 753 sarjan I/O-laajennuskortteja. Ohjaimen ohjelmointi tapahtuu Wagon oman e!COCKPIT -ohjelmiston kautta, joka perustuu CODESYS 3 ohjelmointiympäristöön. e!COCKPIT tukee kaikkia IEC 61131-3-standardin ohjelmointitapoja. [15, s. 24.]

Logiikkaohjaimen yhdistettiin seuraavat WAGO 750 sarjan I/O-laajennuskortit:

- 750-602 Teholähde 24 VDC
- 750-501 Digitaalilähtö 24 VDC (2 kanavaa)
- 750-430 Digitaalitulo 24 VDC (8 kanavaa)
- 750-559 Analogialähtö 0–10 VDC (4 kanavaa)
- 750-515 Potentiaalivapaa rele (4 kanavaa, 2 kpl)
- 750-460 Analogiatulo PT-100 anturille (4 kanavaa, 2 kpl)
- 750-600 Päätetuuli.

Kuvassa 15 on kuvattuna prototyypilaitteiston ohjainkotelo, joka sisältää PLC-logiikan (oikealla ylhäällä), 24 VDC:n teholähteen ja kontaktorit puhaltimien ohjaukselta varten. 230 VAC:n ja 24 VDC:n kytkennät on jaettu omille riviliittimilleen.

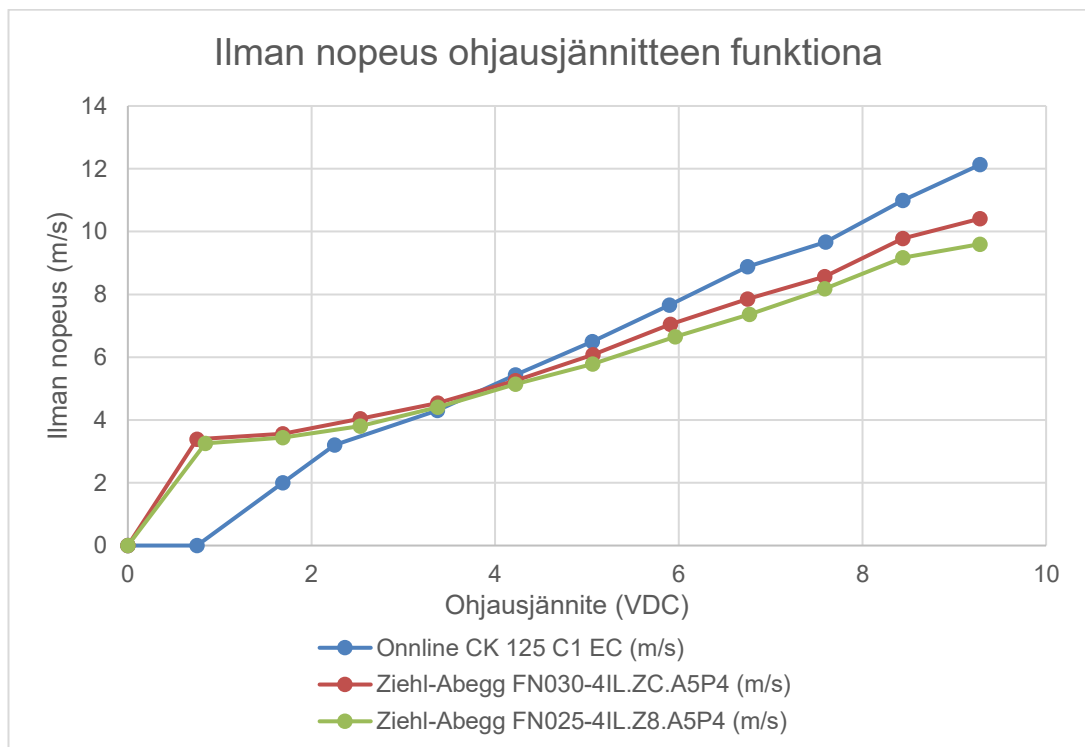


Kuva 15. Prototyypin logiikkaohjainkotelo.

Puhaltimien arviointia varten tehtiin koe, jonka tavoitteena oli selvittää EC-moottorilla varustetun puhaltimen 0–10 VDC:n ohjausjännitteen vaikutus puhaltimen ilman nopeuteen ja siirtyvään ilmamäärään.

Puhaltimien ohjausjännitettä säädettiin Wagon 750-559 analogisen lähtömoduulin avulla välillä 1–10 V. Ohjausjännitteen arvo syötettiin ohjelmistoon

desimaalilukuna. Puhaltimien kontaktoreita ohjattiin logiikkaohjaimen potentiaalivapaan 750-515 relemoduulin avulla. Ilmanvirran nopeutta mitattiin FLIR EM54 -ympäristömittarin anemometrin avulla puhaltimen takapuolelta. Ohjausjännitteen suuruutta seurattiin yleismittarilla ohjainkotelon riviliittimistä ja kaikki mitaustulokset kirjattiin ylös excel-taulukkoon. Koe suoritettiin kolmella eri puhaltimella. Kuvassa 16 on mittaustuloksia havainnollistava kuvaaja. Tulokset on esitetty taulukkomuodossa liitteessä 1.



Kuva 16. Ohjausjännitteen vaikutus ilman nopeuteen.

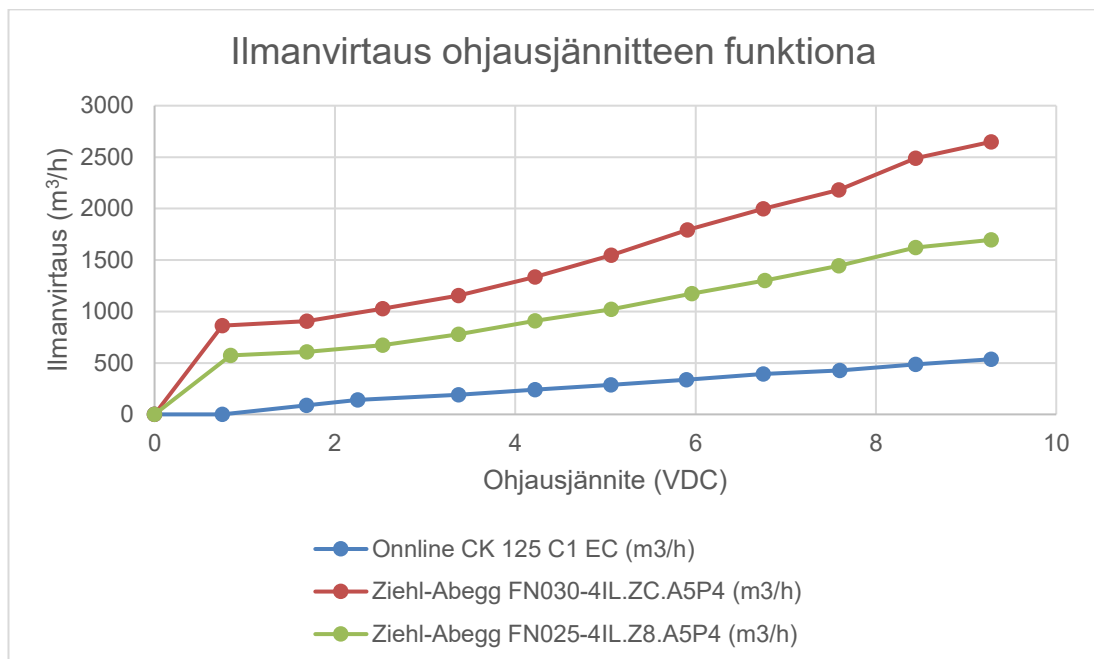
Kuvaajasta nähdään, että kolmen samalla jännitetasolla toimivan puhaltimen ilman nopeuksissa ei ilmene merkittävää eroa. Alle 1 V:n ohjausjännite ei riittänyt käynnistämään Onnline CK 125 kanavapuhallinta. Onnline CK 125 kanavapuhaltimen ilman nopeus 9,3 V ohjausjännitteellä oli 12,1 m/s. Ziehl-Abegg FN030 puhaltimella ilman nopeus vastaavalla ohjausjännitteellä oli 10,4 m/s.

Mitattujen ilman nopeuksien avulla laskettiin puhaltimien tuottama ilmanvirtaus ilmanvaihtoputken lävitse kuutiometreinä tunnissa käyttäen kaavaa 5.

$$Q = v \times A \times t \quad (5)$$

$Q$  on ilmavirtaus tunnissa ( $\text{m}^3/\text{h}$ )  
 $V$  on ilman nopeus ( $\text{m}/\text{s}$ )  
 $A$  on ilmanvaihtoputken pinta-ala ( $\text{m}^2$ )  
 $t$  on 3600 sekuntia, eli yksi tunti.

Kaavan 5 avulla lasketut ilmavirtaukset on havainnollistettu kuvan 17 kuvaajassa, jossa ilmavirtauksia verrataan ohjausjännitteeseen. Tulokset on esitetty myös liitteen 1 taulukoissa.



Kuva 17. Ohjausjännitteen vaikutus puhaltimien ilmavirtaukseen.

Kuvaajasta nähdään, kuinka merkittävä vaikutus ilmanvaihtokanavan pinta-alalla on ilmavirtauksen määrään. 9,3 V:n ohjausjännitteellä Online CK 125 C1 EC-puhaltimella ilmavirtaukseksi halkaisijaltaan 125 mm:ä olevan ilmastointikanavan läpi laskettiin 535,9  $\text{m}^3/\text{h}$ . Suuremmilla Ziehl-Abeggin valmistamilla 250 ja 300 mm:n aksiaalipuhaltimilla saavutetaan yli 600  $\text{m}^3/\text{h}$  ilmavirtaus jo alle 2 VDC:n ohjausjännitteellä. Suuret ohjausjännitteet eli puhaltimien pyörimisnopeudet kasvattavat puhaltimien melutasoa kuitenkin merkittävästi. Suuret nopeudet myös rasittavat puhaltimia turhaan kokoaikaisessa käytössä.

Laitoksen akkuhuoneelle laskettiin kaava 1 käyttäen akkuhuoneen pienin mahdollinen ilmanvirtaus pikalatausvirralla. Akkuhuone sisältää 1440 kappaletta Hoppecken valmistamia *10 OSP.XC 400* avoimia lyijyakkuja. Kaavassa pikalatausvirran  $I_{gas}$  arvona käytettiin valmistajan ohjeen mukaisesti SFS-EN IEC 62485-2:2018 standardin arvoja, jotka on esitetty taulukossa 3. Kaavaa 1 käyttäen akkuhuoneen pienin mahdollinen ilmanvirtaus on:

$$Q = 0,05 \times 1440 \times 20 \times 440 \times 10^{-3} = 633,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Yhdellä 125 mm:n puhaltimella ei saada akkuhuoneeseen riittävää ilmanvirtausta pikalataustilanteessa. Testilaitteistoon kytketty Ziehl-Abegg FN025- ja FN030-aksiaalipuhaltimet saavuttavat akkuhuoneeseen standardin mukaisen ilmanvaihdon jo pienillä nopeuksilla. Testatuista puhaltimista akkuhuoneen poistopuhaltimeksi soveltuu parhaiten FN025-tyypin aksiaalipuhallin. FN030-puhaltimella saavutettavaa yli 2500 m<sup>3</sup>/h ilmanvirtausta ei tarvita missään normaalissa akuston varaustilanteessa. Koneellista tuloilmaa käytettäessä tarvitaan vähintään kaksi 125 mm:n tuloilmapuhallinta riittävän ilmanvirtauksen saavuttamiseksi.

### 6.3 Puhaltimien ohjaus lämpötilan avulla

Wagon logiikkaohjaimen 750-460 analogiatulomoduuliin liitettiin neljä PT-100 lämpötila-anturia. Antureiden signaalit syötettiin Wagon e!COCKPIT -ohjelmiston PID-säätimeen, joka on sisällytetty valmiiseen HVAC-ohjelmakirjastoon. Yhtä lämpötila-anturia käytettiin PID-säätimen asetusarvona eli tavoiteltuna lämpötilana. Kolmen muun anturin keskimääräistä lämpötilaa käytettiin säätimen mitattuna lämpötila-arvona. PID-säädin pyrkii säätämään mitatun arvon asetusarvoon. Säätimen ulostulona saadaan analoginen signaali, jonka suuruus riippuu asetteluarvon ja mitatun arvon suhteesta. Analogiasignaali on itseisarvoltaan suuri, kun mitattu arvo on kaukana asetusarvosta. Säätimen analoginen tulosignaali muunnettiin 750-559 analogialähtömoduulin 0–10 VDC:n jännitteeksi, joka toimi Onnline CK 125 C1 EC-kanavapuhaltimen ohjausjännitteenä.

Säätimen tulosignaaliille voidaan asettaa raja-arvot, joiden avulla määritetään puhaltimen maksimi- ja minimi nopeudet.

Akkuhuoneen poistopuhallinta mukailevaa Ziehl-Abegg FN025-aksiaalipuhallinta varten logiikkaohjaimen ohjelmoitiin vakionopeudet eli ohjausjännitteet akuston kesto- ja pikavaraustilanteille. Tieto varaustilanteesta syötetään logiikkaohjaimelle digitaalisena signaalina painikkeen avulla. Lopullisessa järjestelmässä tieto varaustilanteesta saadaan UPS-järjestelmästä esimerkiksi kosketintietona tai digitaalisena signaalina.

Prototyypin kanavapuhaltimen yhteyteen asennettiin toimilaitteellinen Fläkt ETPR-125-03-3 24 V-palopelti, jota ohjataan logiikkaohjaimen potentiaalivaipalla releellä. Palopeltien toimilaitteita on saatavilla 24 VDC:n ja 230 VAC:n jännitetasoilla. Palopelti on myös varustettu lämpöilmaisimella, joka laukaisee palopellin ilmanvaihtokanavan lämpötilan noustessa liian korkealle. Palopellissä on myös sen asentoa ilmaisevat mikrokytkimet. Kanavapuhaltimen käynnistymisen estettiin ohjelmallisesti palopellin ollessa suljettuna mikrokytkimen tiedon avulla. Palopellin toimintaa testattiin painikkeella, jolla simuloitiin paloilmoitinjärjestelmän lähettämää palohälytysignaalia. Palohälytystilanteessa kanavapuhallin pysähtyy ja palopelti sulkeutuu. Palopeltien ohjauksen suunnittelussa hyödynnettiin Sähkötieto ry:n ST korttia 666.09 [16, s. 1–4].

## **7 Yhteenveto**

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää paikallisakustojen käyttöolosuhteita koskevat vaatimukset ja akkujen suunniteltuun käyttöikänsä ja akkujen vanhenemiseen vaikuttavat tekijät. Työn aikana tehty teoreettinen ja kokeellinen tutkimustyö antaa hyvät lähtökohdat lähteä suunnittelemaan ja toteuttamaan akkuhuoneen lämpötilaa, ilmanvaihtoa ja hälytyksiä ohjaavaa järjestelmää käytännössä teollisuuslaitoksen akkuhuoneeseen. Työn aikana kerättyä materiaalia voidaan myös hyödyntää akkujen kunnossapidon kanssa työskentelevien henkilöiden perehdyttämisessä.

Akuilla on merkittävä rooli eri järjestelmien kriittisten osien sähkönsyötön turvaamisessa. Akustojen oikealla lämpötilalla, akkujen valmistajan ohjeistamilla varustavoilla ja säännöllisellä kunnossapidolla varmistetaan koko akuston pitkä ja turvallinen elinkaari. Akuston lämpötilan hallinta on erityisen tärkeää suurissa akustoissa lämmön sitoutumisen vuoksi. Parhaat tiedot akkujen käytöstä ja käyttöympäristön vaatimuksista saadaan paikallisista turvallisuusstandardeista ja valmistajien antamista ohjeista.

Ohjelmoitavat logiikkaohjaimet tarjoavat monipuoliset mahdollisuudet akustojen käyttöolosuhteiden valvontaan ja hallintaan. Akustotilan ilmanvaihdon hallinta, hälytykset ja valvontajärjestelmät on helppo sisällyttää yhdeksi kokonaisuudeksi modulaaristen tulo- ja lähtömoduulien ansiosta. Valmiit ohjelmistokirjastot ja niiden kattavat dokumentit antavat järjestelmän suunnittelijalle hyvät lähtökohdat järjestelmän toteuttamiseen. Akkuhuoneen ilmanvaihdon ja puhaltimien oikealla mitoituksella säästytään turhilta kustannuksilta ja pidetään akkuhuoneen melutaso siedettävänä.

## Lähteet

- 1 Plett, Gregory. 2015. Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling. Norwood: Artech House.
- 2 SFS-EN IEC 62485-1:2018 Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Yleiset vaatimukset. 2018. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry. Vaatii käyttöoikeuden.
- 3 McCluer, Stephen. 2011. Battery Technology for Data Centers and Network Rooms: Lead-Acid Battery Options. Schneider Electric – Data Center Science Center.
- 4 grid | power V H. Verkkoaineisto. Hoppecke GmbH. <<https://www.hoppecke.com/en/product/grid-power-v-h/>> Luettu 23.10.2021.
- 5 grid | aquagen pro. Verkkoaineisto. Hoppecke GmbH. <<https://www.hoppecke.com/en/product/grid-aquagen-pro/>> Luettu 23.10.2021
- 6 The large UPS battery handbook. 2020. Cleveland: Eaton Corporation.
- 7 SPH engine starting nickel battery. Verkkoaineisto. Saft Groupe SAS. <<https://www.saftbatteries.com/products-solutions/products/sph-engine-starting-nickel-battery>> Luettu 27.10.2021.
- 8 Vertiv™ HPL Lithium-Ion Battery Energy Storage System. Verkkoaineisto. Vertiv Group Corp. <<https://www.vertiv.com/en-us/products-catalog/critical-power/uninterruptible-power-supplies-ups/vertiv-hpl-lithium-ion-battery-energy-storage-system/>> Luettu 26.10.2021.
- 9 ST 96.30 Akkujen hoito ja kunnossapito. 2016. Espoo: Sähkötieto ry. Vaatii käyttöoikeuden.
- 10 Installation, commissioning and operating instructions for vented stationary lead-acid batteries (V1.4, 03.2021). 2017. Brilon: Hoppecke GmbH.
- 11 Vara-akkujärjestelmien parhaan mahdollisen käyttötehon ja luotettavuuden ylläpitäminen. 2014. Vantaa: Fluke Finland Oy.
- 12 SFS-EN IEC 62485-2:2018 Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 2: Paikallisakut. 2018. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry. Vaatii käyttöoikeuden.
- 13 Työterveyslaitos. OVA-ohje: VETY. Verkkoaineisto. <<https://www.ttl.fi/ova/vety.html>>. Luettu 25.8.2021.
- 14 BT510 Battery Analyzer User's Manual. 2015. Everett: Fluke corporation.



- 15 WAGO I/O System 750, 750-8100 PFC100 Manual. 2020. Minden. WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG.
- 16 ST 666.09 Palopeltien ohjaus- ja valvontajärjestelmien toteutus. 2019. Espoo: Sähkötieto ry. Vaatii käyttöoikeuden.

## Puhaltimien mittaustulokset

PLC Ohjausarvo (Desimaali)	Ohjausjännite (VDC)	Onnline CK 125 C1 EC (m/s)	Onnline CK 125 C1 EC (m <sup>3</sup> /h)
0	0	0	0
2764.8	0.8	0.0	0.0
5529.6	1.7	2.0	88.4
8294.4	2.3	3.2	141.4
11059.2	3.4	4.3	190.0
13824	4.2	5.4	240.3
16588.8	5.1	6.5	287.2
19353.6	5.9	7.7	338.4
22118.4	6.8	8.9	392.3
24883.2	7.6	9.7	427.2
27648	8.4	11.0	485.5
30412.8	9.3	12.1	535.9

PLC Ohjausarvo (Desimaali)	Ohjausjännite (VDC)	Ziehl-Abegg FN030-4IL.ZC.A5P4 (m/s)	Ziehl-Abegg FN030-4IL.ZC.A5P4 (m <sup>3</sup> /h)
0	0	0	0
2764.8	0.8	3.4	862.6
5529.6	1.7	3.6	905.9
8294.4	2.5	4.0	1028.1
11059.2	3.4	4.5	1155.3
13824	4.2	5.3	1336.0
16588.8	5.1	6.1	1547.2
19353.6	5.9	7.1	1794.0
22118.4	6.8	7.9	1997.6
24883.2	7.6	8.6	2180.8
27648	8.4	9.8	2488.7
30412.8	9.3	10.4	2649.0

PLC Ohjausarvo (Desimaali)	Ohjausjännite (VDC)	Ziehl-Abegg FN025- 4IL.Z8.A5P4 (m/s)	Ziehl-Abegg FN025- 4IL.Z8.A5P4 (m3/h)
0	0	0	0
2764.8	0.8	3.3	574.3
5529.6	1.7	3.4	607.9
8294.4	2.5	3.8	671.5
11059.2	3.4	4.4	779.3
13824	4.2	5.1	908.3
16588.8	5.1	5.8	1021.4
19353.6	6.0	6.7	1175.2
22118.4	6.8	7.4	1300.6
24883.2	7.6	8.2	1445.5
27648	8.4	9.2	1620.5
30412.8	9.3	9.6	1696.5