PELASTUSOPISTO

POLIISI
POLIISIAMMATTIKORKEAKOULU

Polkupyörän akkupalon leviäminen lataustilanteessa

Tutkimusraportti – opintojakso Tutkimusmenetelmät

Ville Ala-Kokko, Panu Koski, Mikko Kuismanen ja Jarkko Yrjölä

21.5.2025

Tutkimusraportti / pelastusalan päällystötutkinto (AMK)

Tiivistelmä

TEKIJÄ: Ville Ala-Kokko, Panu Koski, Mikko Kuismanen ja Jarkko Yrjölä

TYÖN NIMI: Polkupyörän akkupalon leviäminen lataustilanteessa

JULKISUUSASTE: julkinen

OHJAAJA: Kimmo Rytkönen ja Jari Mikkonen

TUTKINTO: pelastusalan päällystötutkinto (AMK)

SIVUMÄÄRÄ: 38

TARKASTUSKUUKAUSI JA -VUOSI: 21.5.2025

AVAINSANAT: Akkupalo, litiumioniakku, polkupyörän akku, akun lataamisen turvallisuus, latauskaappi

Tässä tutkimuksessa tutkittiin akkupalon leviämistä akkujen lataustilanteessa. Tutkimuksessa käytettiin täyteen ladattuja polkupyörän akkuja. Tämä tutkimus kytkeytyy vahvasti Pelastusopiston käynnissä olevaan hankkeeseen ”Litiumioniakkujen elinkaaren paloturvallisuus- ja varautumisohjeet (LION-hanke)”. Hankkeen suunnittelija Kimmo Rytkönen, sekä tutkija Jari Mikkonen olivatkin ohjaamassa tätä tutkimusta.

Ensimmäisessä testissä tutkittiin akkupalon leviämistä, kun akkuja ladataan pöydällä. Toisessa testissä tutkittiin akkupalon leviämistä, kun akkuja ladataan kaapissa. Molemmissa tapauksissa palo levisi ympäröiviin akkuihin. Kun akku syttyy palamaan avoimessa tilassa, palavasta akusta leviää palavia heitteitä ja liekkejä ympäristöön ja ne uhkaavat levittää palon ympäristöön. Palo levisi testissä muihin akun ympäristössä oleviin akkuihin. Kun akku syttyy palamaan kaapissa, kaappi estää palon leviämisen ympäristöön, koska heitteet ja liekit jäävät kaapit sisään, mutta palo leviää toisiin akkuihin tehokkaasti ja nostaa kaapin sisälämpötilan korkeaksi. Lisäksi akkupalosta purkautuu kaapin sisään palokaasua, joka aiheuttaa vakavan palon humahtamisvaaran kaappia avatessa.

Sisällys

1 Johdanto 5
2 Akkupalo 5
2.1 Litiumioniakun rakenne ja toiminta 6
2.2 Litium akkujen yleisimpiä käyttö tarkoituksia 7
2.2.1 Sähköautot 7
2.2.2 Sähköpyörät 7
2.2.3 Sähköpotkulaudat 7
2.3 Tutkimuksessa käytettävät akkutyypit 7
2.3.1 Sylinterikenno 7
2.3.2 Prismakenno 7
2.3.3 Pussikenno (pouch cell) 8
3 Tutkimuksen kuvaus 8
3.1 Tutkimuskysymys 8
3.2 Hypoteesi 8
3.3 Tutkimusasetelma ja ympäristö 9
3.4 Testi 1 10
3.5 Testi 2 12
4 Tulokset 13
4.1 Yleistä 13
4.2 Happi- ja häkäpitoisuudet 14
4.2.1 Testi 1 14
4.2.2 Testi 2 14
4.3 Lämpötilamittausten tulokset 15
4.3.1 Testi 1 15
4.3.2 Testi 2 16
4.4 Visuaaliset havainnot 16
4.4.1 Testi 1 17
4.4.2 Testi 2 19
5 Pohdinta ja johtopäätökset 20
5.1 Palon leviämisen riskit 20
5.2 Humahdus, leimahdus vai lieskahdus? 21
5.3 Kaasujen pitoisuudet 21
5.4 Palon syttyminen ja lämpötilakehitys 22
5.5 Akkujen latauspaikan valinta ja käytännön sovellukset 22
5.6 Latauskaappien turvallisuus 23
5.7 Tutkimuksen merkitys ja hyödynnettävyys 23
5.8 Tutkimuksessa esiintyneet kehittämisnäkökulmat 23
5.9 Jatkotutkimustarpeet 23

Lähteet 24
Liite 1 Monikaasumittareiden mittauskaaviot 26
Liite 2 Lämpötilojen mittauskaaviot (testi 1) 28
Liite 3 Lämpötilojen mittaustaulukko (testi 1) 32
Liite 4 Lämpötilojen mittauskaaviot (testi 2) 33
Liite 5 Lämpötilojen mittaustaulukko (testi 2) 38

1 Johdanto

Litiumioniakut ovat kehittyneet ja laajalti hyödynnetty energianlähde erityisesti kevyissä sähköajoneuvoissa, kuten sähköpyörissä ja -skuuteissa. Niiden energiatiheys, keveys ja latauskyky tekevät niistä tehokkaan vaihtoehdon, mutta samanaikaisesti ne aiheuttavat turvallisuushaasteita, erityisesti latauksen aikana. Akkuihin liittyvä merkittävin turvallisuusriski on niin sanottu "termisen karkaamisen" ilmiö, jossa akun sisällä tapahtuva vika tai ylikuumeneminen aiheuttaa ketjureaktion, joka voi johtaa paloon tai jopa räjähdykseen (Huttu et al., 2022).

Pelastusopistolla on käynnissä ”Litiumioniakkujen elinkaaren paloturvallisuus- ja varautumisohjeet (LION-hanke)”. Hanke on alkanut 1.1.2024 ja päättyy tämän vuoden lopussa 31.12.2025. Tämä tutkimus kytkeytyy vahvasti hankkeeseen ja hankkeen suunnittelija Kimmo Rytkönen, sekä tutkija Jari Mikkonen ovatkin ohjaamassa tätä tutkimusta. Kimmon ja Jarin mukaan vastaavanlaisia tutkimuksista ei ole löydetty tietoa, jossa olisi tutkittu akkupalon leviämistä viereisiin akkuihin, kun kyseessä on polkupyörän kokoluokan akut. (Litiumioniakkujen elinkaaren paloturvallisuus- ja varautumisohjeet (LION-hanke) 2025.)

Viime syksynä AMK N23-päällystökurssin opiskelijat Rasilainen, Lahtinen, Turunen ja Evikoski ovat tutkineet työkaluakun kokoisten akkujen palon leviämistä työkaluseinässä ja peltikaapissa. Tuloksissa havaittiin, ettei palo levinnyt viereisiin akkuihin, mutta savunmuodostuksen alettua akku syttyi nopeasti palamaan. Mittauksilla saatiin tietoa hapen, hiilimonoksidin ja syttyvien kaasujen määristä sekä akkujen pintalämpötiloista. Johtopäätöksenä raportissa suositellaan, että suljettu peltikaappi on turvallisempi vaihtoehto akkujen lataamiseen termisen purkauksen varalta ja jatkotutkimuksia eri akkutyyppien ja erilaisten latausolosuhteiden vaikutuksista. (Rasilainen, Lahtinen, Turunen ja Evikoski 2024.)

Tällä tutkimuksella pyritään selvittämään, kuinka turvallista on ladata polkupyörän tai sitä vastaavan kokoisia litiumioniakkuja suljetussa latauskaapissa ja avoimessa tilassa. Leviääkö palo akusta toiseen ja leimahtaako suljetussa latauskaapissa akkupalossa vapautuvat palokaasut palamaan.

2 Akkupalo

Litiumioniakun paloriski perustuu pääosin sen kemialliseen rakenteeseen ja energiatiheyteen. Terminen karkaaminen käynnistyy usein kennon sisäisestä vauriosta, joka voi johtua mekaanisesta iskusta, ylilatauksesta tai korkeasta lämpötilasta. Tällöin akkukenno kuumenee nopeasti, ja elektrolyytti voi hajota muodostaen syttyviä kaasuja kuten hiilimonoksidia (CO) ja vetyfluoridia (HF). Nämä kaasut ovat erityisen vaarallisia suljetuissa tiloissa, joissa ilmanvaihto on puutteellista (Pelastusopisto 2022; Tukes 2023).

Palon leviäminen litiumioniakuissa voi tapahtua kahdella tavalla: lämmönjohtumisen seurauksena viereiseen kennoon tai palavien heitteiden ja pistoliekkien kautta. Akkujen lähekkäinen sijoittelu ilman lämpöeristystä lisää riskiä palon leviämisestä. Lämpötilan nousu yli 150 °C voi riittää laukaisevaan reaktioon, erityisesti jos kennot ovat rakenteellisesti vaurioituneita tai vanhoja (Hyttinen, 2007).

Lisäksi akun palossa muodostuvat palokaasut eivät ole ainoastaan myrkyllisiä, vaan ne voivat olla myös räjähdysherkkiä. Suljetuissa tiloissa kuten metallikaapeissa syntyy ylipaineen ja syttyvän kaasuseoksen yhdistelmä, joka voi johtaa räjähdykseen, jos kipinä tai kuuma pinta toimii sytytyslähteenä (Huttu et al., 2022).

”Litiumioniakuista johtuvia rakennuspaloja on sattunut vuosien 2020–2024 aikana noin 80 kappaletta, ja rakennuspalon vaaraa ne ovat aiheuttaneet noin 100 kertaa. Eniten paloja ovat aiheuttaneet akkutyökalut sekä sähköpolkupyörät ja -potkulaudat. Liikennevälinepaloja on tapahtunut noin 30, joista suurin osa on ollut sähköpolkupyörien tai -potkulautojen aiheuttamia. Yli puolet litiumioniakkupaloista tapahtuu lataamisen aikana.” (Rytkönen & Mikkonen 2024.)

Varsinaisissa litiumioniakkujen lataukseen suunnitelluissa latauskaapeissa on monia turvallisuushuomioita. Esimerkiksi Asecos-merkkisessä latauskaapissa on mm. seuraavia alla lueteltuja ominaisuuksia.

- Tyyppitestattu palonkestävyys 90 minuuttia (tyyppi 90) ulkopuolelta sisälle standardin DIN EN 14470-1 mukaisesti, palonkestävyys 90 minuuttia sisältä ulospäin standardin DIN EN 1363-1 mukaisesti.
- LED-toimintomerkkivalo visuaalisella ja akustisella hälytyksellä hätätilanteen nopeaan havaitsemiseen avaamatta kaapin ovia.
- Sisältää tuuletusaukon, joka estää lämmön kertymisen latauksen aikana.
- sisältää varoitus-/palonsammutusjärjestelmän. Kaapin sisäpuolen laadukas 3-vaiheinen hälytysjärjestelmä laukeaa automaattisesti tulipalon sattuessa.
- Kaapin mahdollisen paineen nousun estämiseksi kaapin pääosaan asetettiin paineenalennusaukko. Normaalitilassaan se on suljettu. Jos painetta kertyy, läppä avautuu ja paine voi poistua syntyvän aukon kautta.

(Asecos Litiumioniakun latauskaappi 2025.)

2.1 Litiumioniakun rakenne ja toiminta

Litiumioniakku koostuu kahdesta elektrodista: negatiivisesta anodista (yleensä grafiittia) ja positiivisesta katodista (usein litium-metallioksidia, kuten NMC). Näiden välillä on elektrolyytti, joka mahdollistaa litiumionien liikkeen latauksen ja purkauksen aikana. Elektrodien välissä sijaitseva huokoinen erotinkalvo estää elektrodien suoran kosketuksen, mutta sallii ionien liikkumisen. Ionien liikkuessa anodin ja katodin välillä syntyy sähkövirta, jota voidaan hyödyntää ulkoisessa piirissä (Soininen, 2015).

Litiumioniakut ovat yleistyneet etenkin sähköisissä liikkumisvälineissä ja kulutuselektroniikassa niiden korkean energiatiheyden, alhaisen itsepurkautuvuuden ja pitkän elinkaaren ansiosta (Pelastusopisto, 2023).

2.2 Litium akkujen yleisimpiä käyttö tarkoituksia

2.2.1 Sähköautot

Sähköautojen akustot ovat suurikokoisia, ja niiden kapasiteetti vaihtelee tyypillisesti 40–100 kilowattitunnin (kWh) välillä. Pienemmät, noin 20–30 kWh:n akut mahdollistavat 150–250 kilometrin toimintamatkan, kun taas suuremmat, 75–95 kWh:n akut voivat tarjota yli 500 kilometrin kantaman yhdellä latauksella (Motiva, 2025). Esimerkiksi Volkswagenin sähköautot, kuten ID.3 ja ID.4, tarjoavat akkuvaihtoehtoja 55–77 kWh:n välillä, mikä mahdollistaa 300–500 kilometrin toimintamatkan (Volkswagen, 2025).

2.2.2 Sähköpyörät

Sähköpyörissä käytetään yleensä 250–900 wattitunnin (Wh) litiumioniakkuja. Yleinen kapasiteetti on noin 500 Wh, mikä mahdollistaa 50–100 kilometrin ajomatkan yhdellä latauksella, riippuen muun muassa avustustasosta, maastosta ja sääolosuhteista (Classic Bike, 2024). Esimerkiksi FitNord Ranger 200 -sähköpyörässä on 520 Wh:n akku, joka tarjoaa riittävän kapasiteetin monenlaiseen käyttöön (Kuntokauppa, 2025).

2.2.3 Sähköpotkulaudat

Sähköpotkulautojen akkujen kapasiteetti vaihtelee suuresti mallin ja käyttötarkoituksen mukaan. Kevyemmät, kaupunkikäyttöön tarkoitetut mallit, kuten Xiaomi Electric Scooter Pro2, on varustettu noin 474 Wh:n akulla, joka mahdollistaa enintään 45 kilometrin toimintamatkan (Akulla.fi, 2025). Tehokkaammissa malleissa, kuten GPad F3 Max V2:ssa, on 2430 Wh:n akku, joka tarjoaa jopa 120 kilometrin kantaman yhdellä latauksella (Voltride, 2025).

2.3 Tutkimuksessa käytettävät akkutyypit

2.3.1 Sylinterikenno

Sylinterikenno on pyöreä ja metallikuorinen rakenne, jota käytetään laajalti sähkötyökaluissa ja sähköautoissa. Esimerkiksi 18650- ja 21700-koot ovat yleisiä. Sylinterikennon etuna on hyvä mekaaninen kestävyys ja tehokas lämmönhallinta. Haittapuolena on tilatehokkuuden heikkous verrattuna muihin kennomuotoihin (Soininen, 2015). Pyöreä muoto kestää kaasuuntumista paremmin, mutta kennot varustetaan silti paineventtiilillä. Tyypillinen varauskapasiteetti on 0,5–50 Ah. Sylinterikenno vaatii muotonsa vuoksi monimutkaisempia jäähdytysratkaisuja ja usein suuren määränsä takia, myös kehittyneempiä akunhallintajärjestelmiä. Esimerkiksi Tesla hyödyntää sylinterikennoja kaikissa sähköautoissaan. (Leinonen 2021.)

2.3.2 Prismakenno

Prismakenno on suorakulmainen ja jäykkäkenno, joka on pakattu alumiinikuoreen. Se mahdollistaa tehokkaan tilankäytön ja on suosittu erityisesti sähköautoissa ja suurissa akkupaketeissa. Sen rakenteellinen jäykkyys voi kuitenkin tehdä sen lämmönhallinnasta haastavampaa (Pelastusopisto, 2023). Metallikuori tekee kennosta jämäkän mutta lisää painoa. Kennossa on paineventtiili mahdollisen kaasun muodostumisen varalta. Varauskapasiteetti vaihtelee yleensä 1–100 Ah. Kenno tarvitsee lisäeristystä, ja sen monimutkainen sekä raskas rakenne nostaa

valmistus- ja materiaalikustannuksia. Rakenne kuitenkin yksinkertaistaa ja keventää akkupaketin tukirakenteita. (Leinonen 2021.)

2.3.3 Pussikenno (pouch cell)

Pussikenno on litteä ja pehmeäkenno, joka on pakattu alumiinilaminaattikuoreen. Sen etuna on erittäin hyvä energiatiheys ja kevyt rakenne, mikä tekee siitä suositun erityisesti sähköpyörissä ja kannettavissa laitteissa. Pussikenno on kuitenkin altis mekaanisille vaurioille ja paisumiselle, joten se vaatii ulkoista suojaa (Suomalaisten Kemistien Seura, 2020). (Li-Po) on kevyt ja joustava rakenne, jossa ei ole kovaa ulkokuorta. Kenno on suljettu alumiini- ja polymeerikalvoista valmistettuun pussiin. Varauskapasiteetti vaihtelee tyypillisesti 0,1–100 Ah. Koska rakenne ei ole itsessään tukeva, akkupakettitasolla tarvitaan tukevat rakenteet. Kennon joustavuus sallii kaasun laajenemisen ilman paineventtiiliä. Valmistuskustannukset ovat alhaiset, sillä komponentteja on vähän ja materiaali on edullista. Pussikennon energiatiheys on korkea, koska ulkokuori ei vie tilaa eikä painoa. (Leinonen 2021.)

3 Tutkimuksen kuvaus

3.1 Tutkimuskysymys

Testeillä haluttiin selvittää, **onko polkupyörän tai sitä vastaavan kokoisia litiumioniakkuja turvallista ladata umpinaisessa ”latauskaapissa” (ilman sammutusjärjestelmää) ja leviääkö palo akusta toiseen avoimessa tilassa ladatessa.**

Tutkimuskysymystä tarkentavia lisäkysymyksiä:

- Leviääkö litiumioniakun palo viereiseen akkuun latauskaapissa / avoimessa tilassa?
- Mikä on akkupalossa syntyvien CO- ja HF-kaasujen pitoisuus?
- Kuinka nopeasti akku leimahtaa liekkiin savunmuodostuksen alettua?
- Kuinka korkeaksi akun pintalämpötila nousee ennen syttymistä?
- Mikä on ”latauskaapin” sisälämpötila ja viereisten akkujen pintalämpötila testin aikana?
- Kuinka kauas ja laajalle akkupalossa syntyvät heitteet lentävät?
- Syttyvätkö akkupalosta vapautuvat palokaasut ”latauskaapissa” testin aikana?

3.2 Hypoteesi

Suljetussa latauskaapissa ladattava litiumioniakku aiheuttaa korkeampia palavien kaasujen pitoisuuksia ja suuremman riskin palon leviämiselle toisiin akkuihin verrattuna avoimessa tilassa tapahtuvaan lataukseen.

Termisesti karkaava akkupalo aiheuttaa suljetussa tilassa (latauskaappi) palon humahtamisvaaran ja sitä kautta palon leviämisvaaran ympäristöön.

Koeasetelma: Tutkimus sisältää kaksi käytännön testiä, joissa simuloidaan akkupaloa avoimessa tilassa ja suljetussa latauskaapissa. Mittauksilla (kaasupitoisuudet, lämpötilat) verrataan

palon käyttäytymistä eri olosuhteissa. Tämä mahdollistaa hypoteesin testaamisen mittaustulosten ja palon visuaalisen arvioinnin perusteella.

Tavoitteena on lisätä ymmärrystä litiumioniakkujen palokäyttäytymisestä lataustilanteissa ja tuottaa kokeellista tietoa palo- ja pelastustoiminnan sekä työturvallisuuden kehittämiseksi. Tuloksia voidaan hyödyntää ohjeistuksissa, kalustosuunnittelussa ja riskinarvioinnissa erityisesti akkujen varastointi- ja latausratkaisuissa.

Hyödynsaajat:

- Pelastusala: parempi tieto riskitekijöistä ja toimintamalleista
- Laitetoimittajat ja valmistajat: tuki turvallisempien tuotteiden suunnitteluun
- Koulutusorganisaatiot: tutkimustulokset osaksi opetusta

Yhteiskunnallinen vaikuttavuus: Tutkimus tukee turvallisen sähköisen liikkumisen yleistymistä ja antaa perustaa kansalliselle riskienhallintasuunnittelulle akkujen käsittelyssä ja varastoinnissa.

3.3 Tutkimusasetelma ja ympäristö

Akkujen testipoltot suoritettiin keskiviikkona 7.5 2025 Pelastusopiston harjoitusalueen palolaboratoriossa, jossa testitapahtumia voi havainnoida tarkkailutilasta ja mittausdatan, sekä videomateriaalin keräämiseen oli hyvät olosuhteet. Testihuoneen pinta-ala oli 42 m^2 ja tilavuus 118 m^3. Testi 2:ssa käytettiin peltikaappia demonstroimaan latauskaappia.

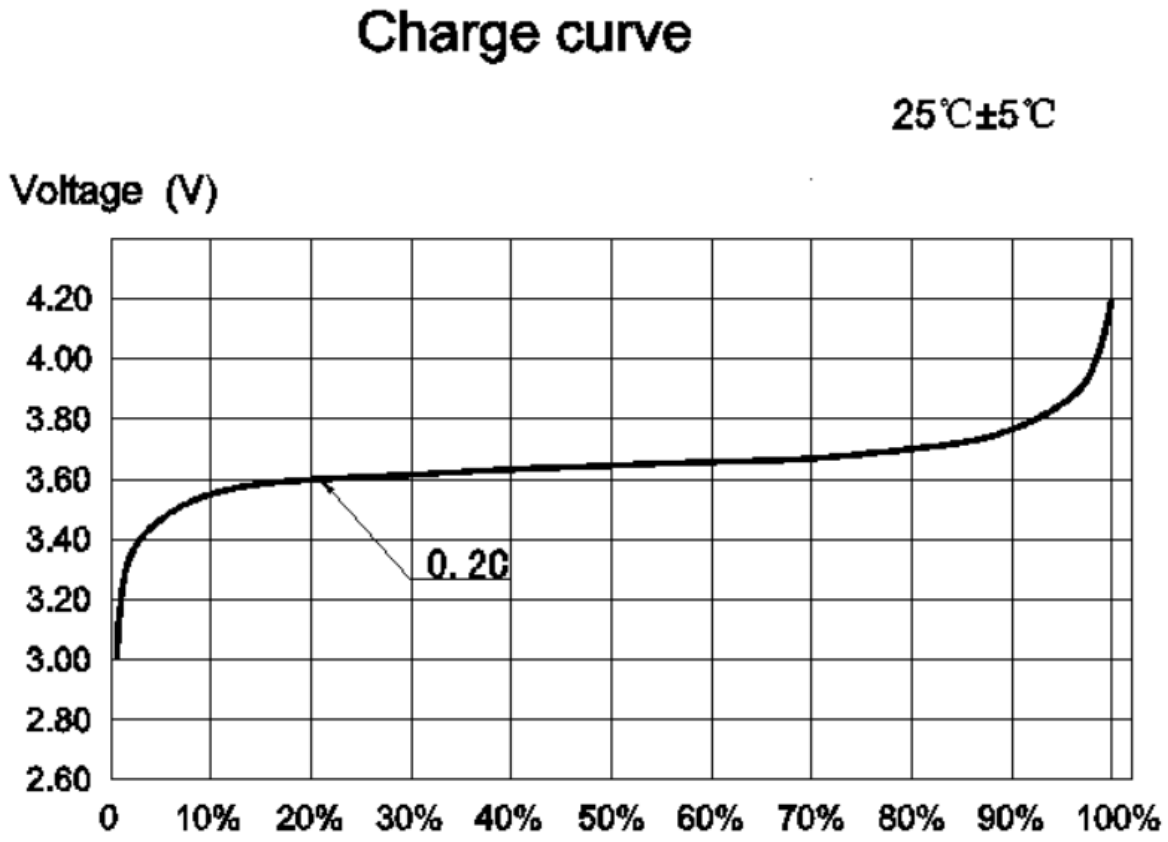
Kuva 1 Fluorivedyn mittauslaitteisto.

Kummassakin testissä mitattiin lämpötilaa, happi- ja häkä-, sekä fluorivetypitoisuutta. Lämpötilaa mitattiin dataloggerilla (katso kuva 2). Happi ja häkä pitoisuuksia mitattiin kolmella Drägerin monikaasumittarilla (X-am 5000). Fluorivetyä oli mittaamassa erillinen toimija. Mittausprosessi oli hyvin monimutkainen ja mittaustuloksia ei tähän raporttiin ehditty saada, sillä ne vaativat vielä tarkemman analyysin. Kuvassa 1 on fluorivedyn mittauksessa käytetty mittauslaitteisto.

Kuva 2 Datalogger.

Lämpötila mitattiin koko testin ajan sytytetyn akun sisältä ja viereisten akkujen pinnalta, sekä testipoltossa kaksi myös kaapin sisältä. Happi- ja häkä ja fluorivetypitoisuutta mitattiin testitilasta kahdesta pisteestä, sekä testissä kaksi myös kaapin sisältä. Testitila ja akkujen asettelu ja mittapisteet on esitetty kuvissa 5 ja 6.

Taulukoista 1 ja 2 selviää, että kaikki polttokokeessa olleet akut oli ladattu lähes täyteen ennen kokeen aloitusta. Kaaviosta (kuva 3.) voidaan päätellä jännitteen perusteella akun lataustaso. Kaikissa akuissa mitattu jännite yli 4V, joten lataustaso (Soc, State of charge) oli yli 96–97 %.

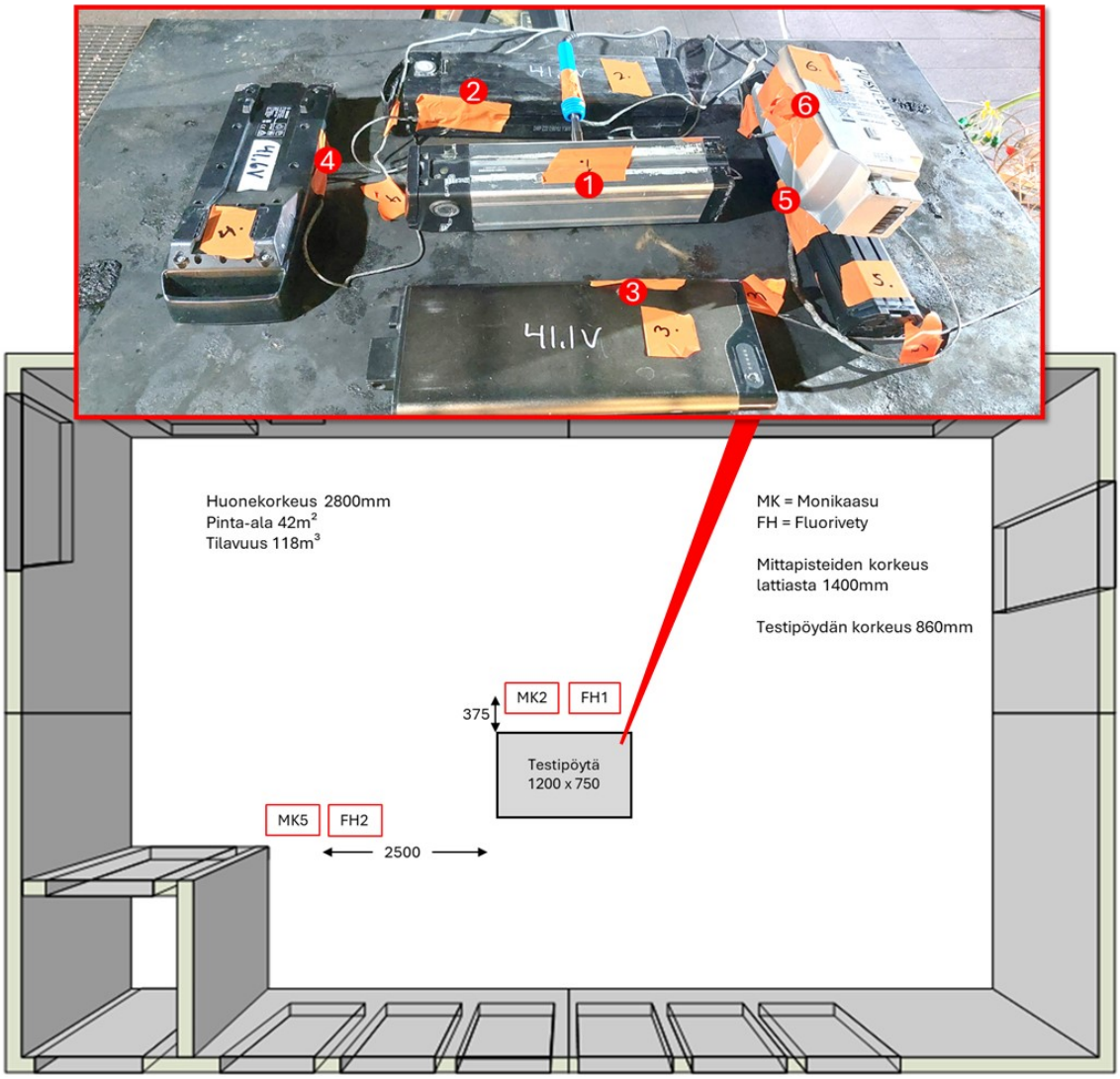


Kuva 3 Latausjännitekaavio (Youth Power 2024).

3.4 Testi 1

Ensimmäisessä testissä asetettiin kuusi polkupyöränakkua metalliselle pöytälevylle. Pöydän koko oli 750 mm x 1200 mm ja korkeus 860 mm. Akkujen etäisyys toisistaan oli noin 100 mm. Akut numerot viisi ja kuusi oli sijoitettu päällekkäin. Keskimmäiseen akkuun (numero 1) oli tehty reikä ja laitettu juotoskolvi, jolla lämmitettiin akun kennoa termisen karkaamisen aikaansaamiseksi (kuva 4). Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty tarkemmin akkujen tiedot.

Kuva 4 Akku 1, jossa kolvi.



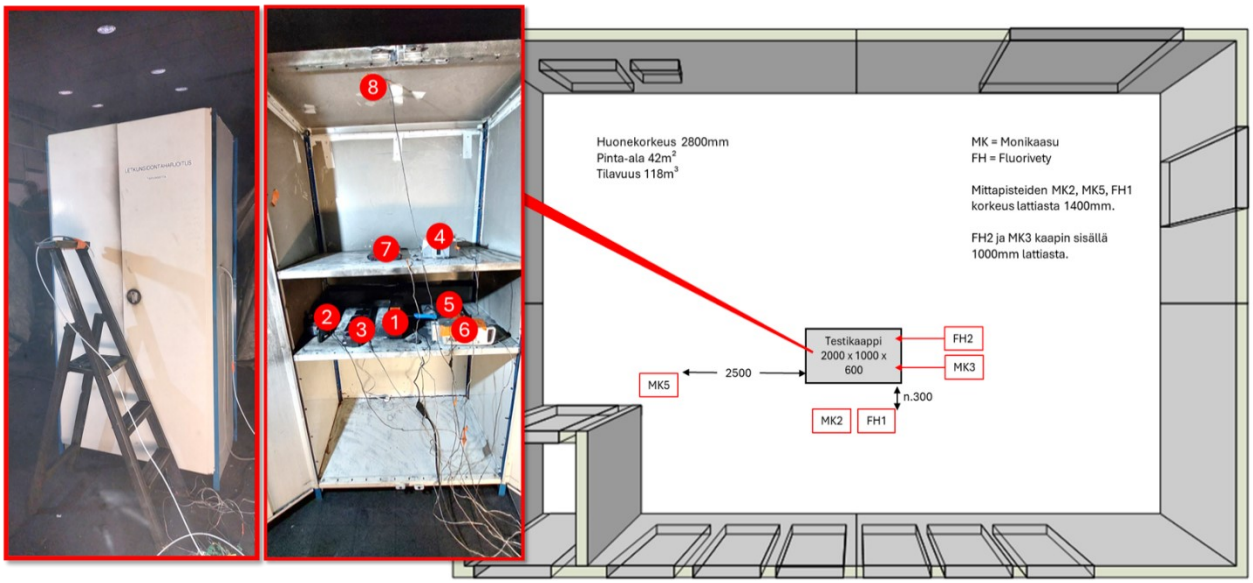
Kuva 5 Testitila, mittausasetelma ja mittapisteiden sijainti ensimmäisessä testissä.

Taulukko 1 Akkujen tiedot testissä 1.

Akun numero	**Valmistaja/malli**	**Jännite/ (Maksimi jännite, 100 % SOC)**	**Kennorakenne**	**Ulkokuori**
Akku 1. (lämmitetty)	Biltema Art.27-1401101 Li-NiCoMn 24V 7,8Ah/187Wh	4,1V ~ per kenno (4,2V)	Sylinterikenno	Metalli (päädyt muovia)
Akku 2.	Power Energy Li-ion 36V 11Ah/396Wh	41,6V (42V)	Sylinterikenno	Metalli (päädyt muovia)
Akku 3.	E-bike Battery Li-ion 36V 10Ah/378Wh	41,1V (42V)	Sylinterikenno	Metalli (päädyt muovia)
Akku 4.	Bosch Li-ion 36V 8,2Ah/300Wh	41,6V (42V)	Sylinterikenno	Muovia
Akku 5.	Bosch PowerTube 625 Li-ion 36V 16,7Ah/625Wh	41,1V (42V)	Sylinterikenno	Metalli (päädyt muovia)
Akku 6.	Helkama NKY231B02 10Ah	28,0V (29,4V)	Pussikenno	Muovia

3.5 Testi 2

Toisessa testissä asetettiin seitsemän polkupyöränakkua metalliseen eristämättömään peltikaappiin, jossa oli suljettavat ja salvattavat ovet. Kaapin mitat olivat leveys: 1000 mm, syvyys 600 mm ja korkeus 2000 mm. Kaapissa oli kaksi hyllyä. Lisäksi kaapin saumat oli tiivistetty silikonilla. Kaapin ovissa ei ollut erityisiä tiivisteitä. Viisi akkua oli sijoitettu keskimmäiselle hyllylle ja kaksi akkua ylähyllylle. Akkujen etäisyys toisistaan oli noin 100 mm. Keskimmäisen hyllyn keskimmäiseen akkuun (numero 1) oli tehty reikä ja laitettu juotoskolvi, jolla lämmitettiin akun kennoa termisen karkaamisen aikaansaamiseksi. Alla olevassa taulukossa 2 on esitetty tarkemmin akkujen tiedot.



Kuva 6 Testitila, mittausasetelma ja mittapisteiden sijainti toisessa testissä.

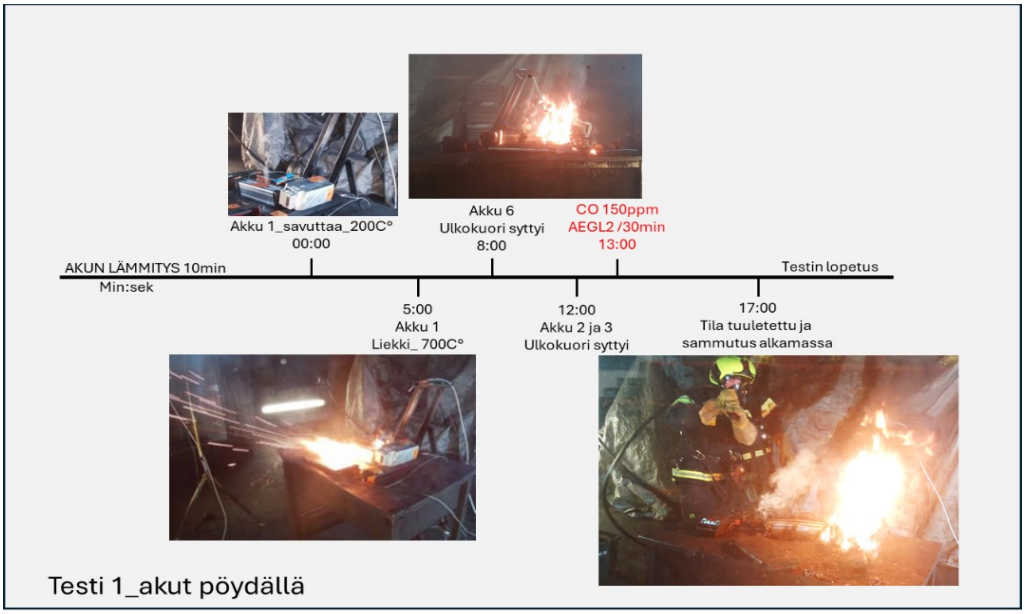
Taulukko 2 Akkujen tiedot testissä 2.

Akun numero	**Valmistaja/malli**	**Jännite (Maksimi jännite, 100 % SOC)**	**Kennorakenne**	**Ulkokuori**
Akku 1. (lämmitetty)	Haoyang battery Li-ion 60V 12Ah	62,2V (63V)	Sylinterikenno	Metalli (päädyt muovia)
Akku 2.	Power Energy Li-ion 36V 11Ah/396Wh	41,1V (42V)	Sylinterikenno	Metallia
Akku 3.	Canyon BT001 E-Bike Battery 19,6 Ah/720Wh	41,1V (42V)	Sylinterikenno	Muovia
Akku 4.	Panasonic 13,2Ah	4,0V ~ per kenno (4,2V)	Prismaattinenkenno	Muovia
Akku 5.	Bosch PowerTube 625 Li-ion 36V 16,7Ah/625Wh	41,1V (42V)	Sylinterikenno	Metallia
Akku 6.	Helkama NKY231B02 10Ah/259Wh	29,4V (29,4V)	Pussikenno	Muovia
Akku 7.	E-bike Battery Li-ion 36V 10Ah/378Wh	4,15V ~ per kenno (4,2V)	Sylinterikenno	Muovia

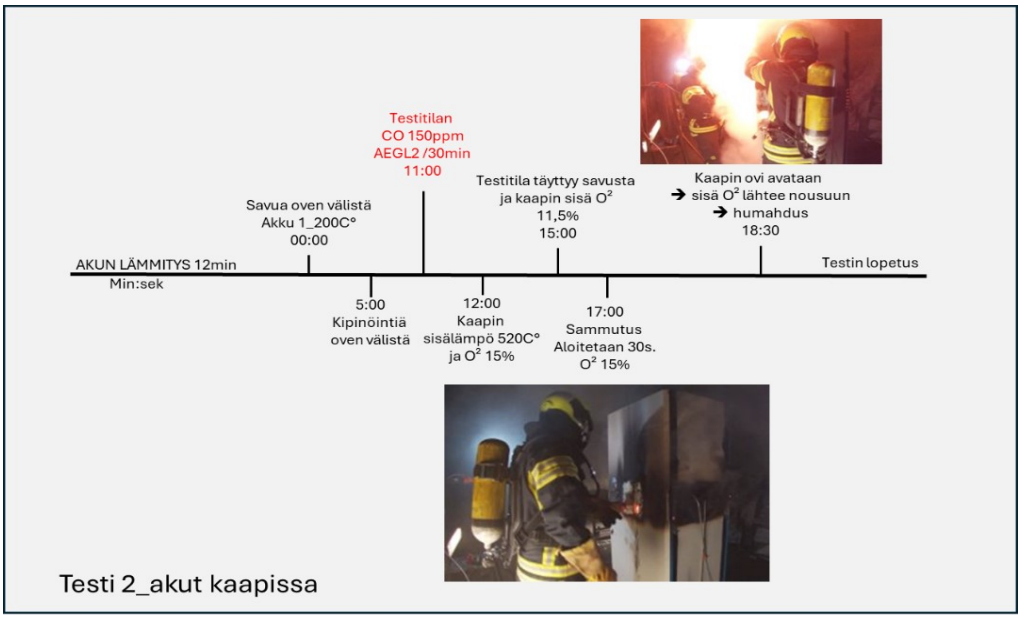
4 Tulokset

4.1 Yleistä

Testi 1 aloitettiin klo 10:16 ja testi 2 aloitettiin klo 12:16. Taulukoissa 3 ja 4 on päätapahtumat kummastakin testistä. Aikajanalla aloitusajaksi 00:00 on määritelty se hetki, kun akku muodosti näkyvää savua.



Taulukko 3_Tapahtumat testissä 1

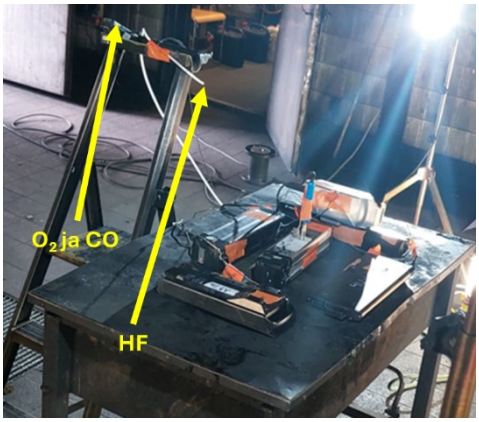


Taulukko 4 4_Tapahtumat testissä 2

5

4.2 Happi- ja häkäpitoisuudet

Liitteessä 1 on kuvaajat mittareiden mittaamista happi- ja häkäpitoisuuksista. Hapen osalta mitattiin hapen pitoisuutta ilmassa (%) ja hään osalta pitoisuutta **ppm** (tilavuusosuuden yksikkönä käytetään tilavuuden miljoonasosaa, jolle käytetään tunnusta ppm (miljoonasosa on englanniksi **parts per million**)). Häkäkaasun (hiilimonoksidin CO) HTP-pitoisuuden raja-arvot ovat $HTP_{15\ min}$ 75 ppm ja HTP_{8h} 20 ppm. Monikaasumittareiden hälytysraja-arvot ovatkin häkäkaasun osalta kalibroitu juuri näiden HTP-arvojen mukaisesti A1 20 ppm ja A2 75 ppm. Tulosdatasta on poistettu hälytysrivit, että tuloskäyrien tarkastelu on helpompaa. (HTP-ARVOT 2020, Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet 2020.)



Kuva 7 Kaasumittareiden sijainnit suhteessa ”latauspöytään”.

4.2.1 Testi 1

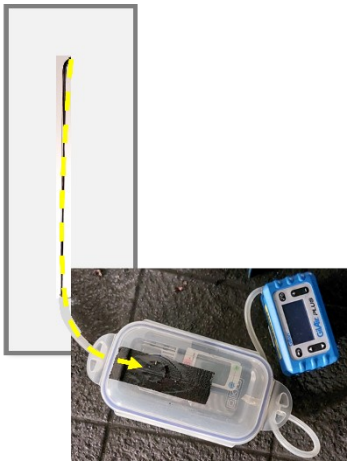
Ensimmäisessä testissä oli käytössä kaksi monikaasumittaria (monikaasumittarit X-am 5000 nro 2 ja 5). Monikaasumittari 2 oli testipöydän vieressä tasotikkailla noin 40 cm:n etäisyydellä pöydästä. Samassa kohdassa oli myös HF:N mittausputken imukohta (katso kuvat 5 ja 7). Monikaasumittari 5 oli 2,5 metrin etäisyydellä testipöydästä kiinnitettynä suojaverhoon (katso kuva 8). Molemmat monikaasumittarit olivat noin 1,5 metrin korkeudella.

Kuva 8 Monikaasumittari 5 sijoitus.

Testin 1 alkaessa klo 12:16 molemmat monikaasumittarit osoittivat, että happipitoisuus on 20,9 % ja häkäpitoisuus on 0 ppm. **Koko 1. testin ajan happipitoisuus pysyy testitilassa normaalina 20,9 % molemmilla mittareilla mitattuna.** Sen sijaan häkäpitoisuus lähti nousemaan noin klo 10:32 käyden hetkellisesti noin 10 sekunnin ajan arvoissa 50–174 ppm (mittari 2). Sen jälkeen häkäpitoisuus laski 14 ppm:ään, ja jatkoi taas sitten tasaista nousua. Suurimmat häkäpitoisuudet testin aikana mitattiin noin klo 10:43, jolloin mittarilla 2 oli 208 ppm ja mittarilla 5 oli 216 ppm, tämän jälkeen häkäpitoisuus lähti laskemaan nopeasti.

4.2.2 Testi 2

Testissä 2 oli käytössä 3 kpl monikaasumittareita, joista mittari nro 2 oli samassa paikassa kuin testissä 1. Mittari nro 2 oli samalla tavalla asetettuna tasotikkailla, mutta nyt se oli ”latauskaapin” ovien edessä noin 30 cm päässä (katso kuva 6). Testiin kaksi lisättiin mittari nro 3, jolle johdettiin ilmaa putkea ja letkua pitkin kaapin sisältä keskihyllyn kohdalta (katso kuva 9). Huom! Tasotikkaita siirrettiin noin metrin kauemmas kaapista, kun palomiehet aloittivat kaapin sammutuksen. Tällöin mittari nro 2:n mittauspaikka hiukan muuttui.



Kuva 9 Monikaasumittarin Nro 3 mittausjärjestelyt.

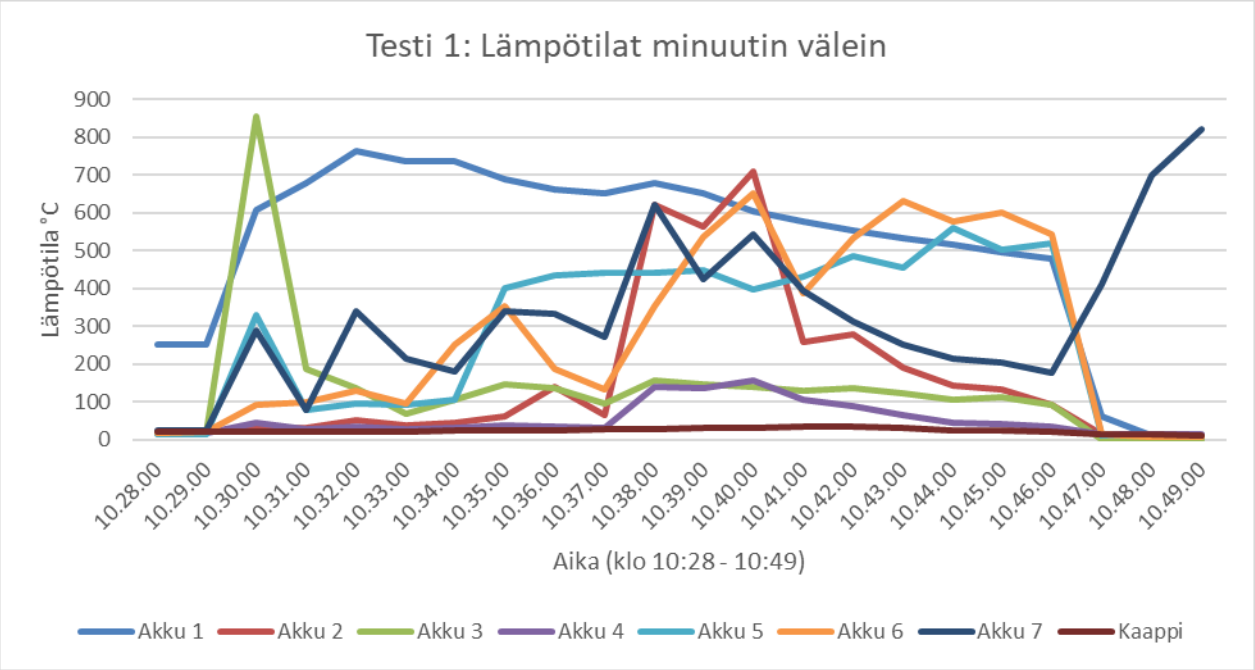
Klo 12:41:24 mittari 2 mittasi korkeimman häkäpitoisuuden 610 ppm ja alimman happipitoisuuden 20,2 %. Klo 12:41:09 mittari 5 mittasi korkeimman häkäpitoisuuden 655 ppm ja alimman

happipitoisuuden 20,4 %. Aikaerot johtunevat mittareiden aika-asetuksista. Testi 2 lopetettiin klo 12:41, jolloin testitilaa aloitettiin tuulettamaan ja palomiehet menivät tilaan sammuttamaan akku-palot. Tässä yhteydessä kaapin ovet avattiin ja palokaasut purkautuivat humahtaen pistoliekeillä ulos kaapista. Noin klo 12:35 ylittyi molempien mittareiden (2 ja 5) mukaan 15 minuutin HTP-arvo (75 ppm). Kaapin sisältä mittari nro 3 mittasi korkeita häkäpitoisuuksia, ja klo 12:39 – 12:56 pitoisuudet nousivat yli monikaasumittarin mittausrajan, joka on 2000 ppm. Pitoisuudet nousivat hyvin nopeasti yli 1000 ppm:ään, laskien kuitenkin noin 300 ppm:ään, kunnes ne nopeasti nousivat yli 2000 ppm. Kaapin sisällä happipitoisuus laski selvästi ja oli pitkään alhaalla. **Alimmillaan happipitoisuus oli 11,5 %** klo 12:43:38 – 12:45:15.

4.3 Lämpötilamittausten tulokset

Lämpötiloja mitattiin Dataloggerilla. Siinä oli käytössä kahdeksan mittauskohtaa. Ensimmäinen mittauskohta (akku 1) oli sijoitettu lämmitettävän akun sisälle. Testissä 1 seuraavat mittauskohdat (akku 2 – akku 6) oli sijoitettu akkujen pinnoille, akku 7 kolvin pinnalle ja viimeinen mittauskohta 8 mittasi ympäristön lämpötilaa. Testissä 2 mitattiin vastaavasti akkujen lämpötiloja (akku 2 – akku 7) ja viimeinen anturi mittasi ”latauskaapin” ylälämpötilaa. Testin 1 osalta liitteessä 2 on lämpötilojen mittauskuvaajat ja liitteessä 3 taulukko, jossa on lämpötilojen arvot mittauspisteistä minuutin välein. Liitteissä 3 ja 4 on vastaavat kuvaajat ja taulukko testin 2 osalta.

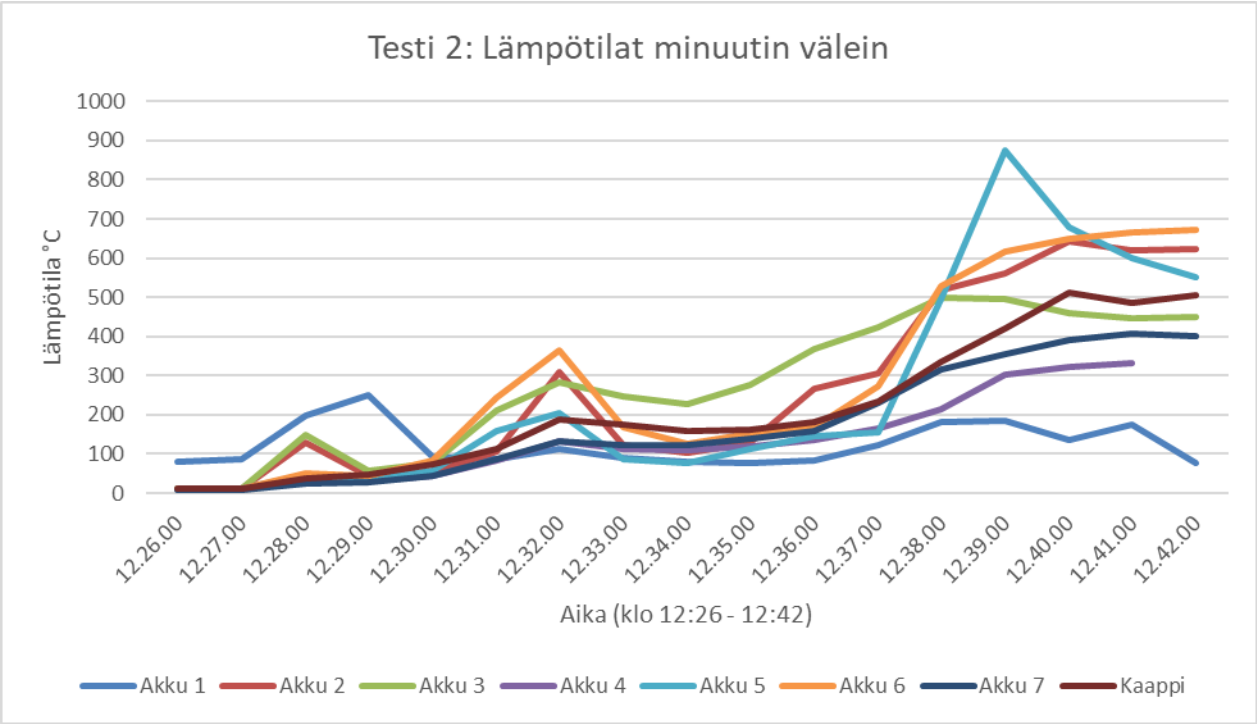
4.3.1 Testi 1



Kuva 10 Testi 1 Lämpötilat minuutin välein kuvaajana.

Tarkastellaan kuvaa 10. Testissä 1 akku 1 syttyy palamaan liekillä lämmittämisen seurauksena ja lämpötila nousee yli 700 asteeseen akun sisällä klo 10:30 jälkeen. Akkujen 2, 5 ja 6 lämpötilat nousevat myös usean minuutin ajaksi yli 300 asteeseen. Sen sijaan akkujen 2 ja 3 lämpötilat nousivat vaan hetkellisesti. Ympäristön lämpötila nousi testin aikana noin 30 asteeseen.

4.3.2 Testi 2



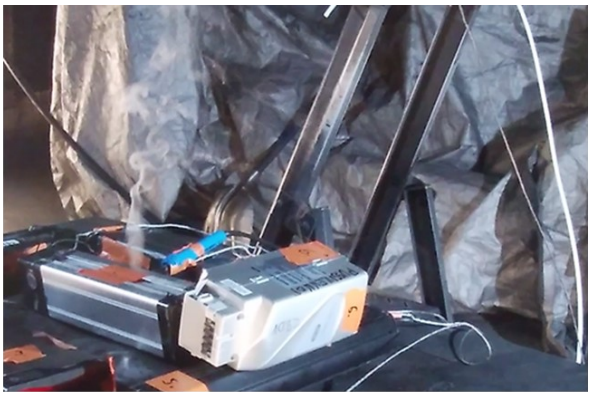
Kuva 11 testi 2 lämpötilat minuutin välein kuvaajana.

Tarkastellaan kuvaa 11. Testissä 2 voidaan todeta, että kaikkien akkujen lämpötilat kohoavat voimakkaasti klo 12:37 jälkeen eli noin 20 minuuttia testin aloituksesta. Kaapin sisälämpötila nousee testin lopussa yli 400 asteeseen. Huomioitavaa on, että lämmitetyn akun 1 lämpötila ei nouse kuin noin 250 asteeseen.

4.4 Visuaaliset havainnot

Testit taltioitiin kolmella videokameralla ja tutkimusryhmä seurasi tilannetta paloteatterin seurantatilan puolelta. Alla olevissa kuvissa on testien keskeiset havainnot kuvakaappauksina testejä taltioineesta Gopro videokamerasta, mikä oli testaustilassa.

4.4.1 Testi 1



1. Akku savuaa

1. Akku purkaa liekkiä

1. Akusta lentää heitteitä

1. Akusta liekkejä ja heitteitä

Kuva 12 Testin 1 tapahtumat 1.

Tila täyttyy savusta

Tila tuuletettu ja sammutus alkamassa

Akut testin jälkeen

1. Akku testin jälkeen

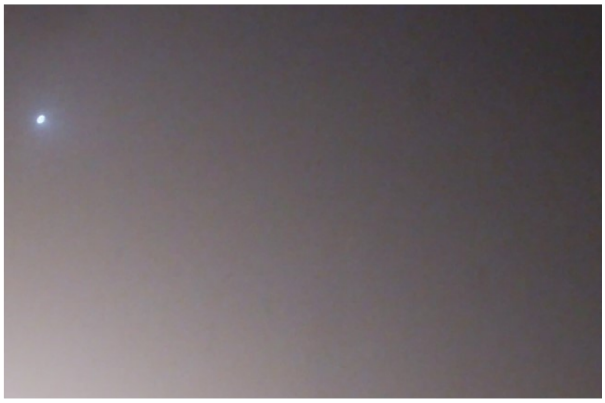
Kuva 13 Testin 1 tapahtumat 2.

4.4.2 Testi 2

Akku ”posahtaa” kaapissa

Palaminen jatkuu, tilaan kertyy savua

Palo purkautuu ulos kaapista



Tila täyttyy savusta

Kuva 14 Testin 2 tapahtumat 1.

Tila tuuletettu ja sammutus alkamassa

Sammutus ovenkahvan reiästä

Palokaasut humahtavat palamaan

Ylä- ja keskihyllyllä ollut kova palo

Kuva 15 Testin 2 tapahtumat 2.

5 Pohdinta ja johtopäätökset

Testeillä haluttiin selvittää, onko polkupyörän tai sitä vastaavan kokoisia litiumioniakkuja turvallista ladata umpinaisessa ”latauskaapissa” (ilman sammutusjärjestelmää) ja leviääkö palo akusta toiseen avoimessa tilassa ladatessa.

Tutkimus vahvistaa hypoteesimme oikeaksi. (Suljetussa latauskaapissa ladattava litiumioniakku aiheuttaa korkeampia palavien kaasujen pitoisuuksia ja suuremman riskin palon leviämiselle toisiin akkuihin verrattuna avoimessa tilassa tapahtuvaan lataukseen. Termisesti karkaava akkupalo aiheuttaa suljetussa tilassa (latauskaappi) palon humahtamisvaaran ja sitä kautta palon leviämisvaaran ympäristöön.)

5.1 Palon leviämisen riskit

Molemmissa testeissä palo levisi sytytetystä akusta muihin ympärillä oleviin akkuihin. Käytännössä molemmissa testeissä oli todellinen palon leviämisvaara ympäristöön, jos ympäristössä olisi ollut herkästi syttyvää materiaalia. Ensimmäisessä testissä palosta syntyi paljon heitteitä palokaasujen purkautuessa akun sisältä. Sytytetystä akusta purkautui voimakkaasti palavaa kaasua, joka paloi lähes metrin pituisena pistoliekkinä noin kymmenen sekuntia yhtäjaksoisesti. Yksi heite tuli mm. paloteatterin ikkunalle ja jäi palamaan liekillä ikkunan läheisyyteen. Testissä 2 palon leviämistä ja voimakkuutta kasvatti se, kun akut olivat suljetussa kaapissa. Siellä syntyi korkeampia häkäpitoisuuksia ja havaittiin selvä palokaasujen humahtamisen vaara, kun palokaasut

syttyivät. Tämä ilmiö aiheuttaa paitsi räjähdysvaaran myös potentiaalisen palon leviämisen riskin ympäristöön.

Kaapin ovien avaaminen aiheutti palokaasujen humahtamisen, mikä näkyy hyvin videolla ja kuvassa 15. Sammutuspari jäähdytti palavia akkuja ja peltikaappia sisältä ovenkahvan reiästä pikapalopostilla 20 sekuntia, mutta siitä huolimatta ovien avaamisen jälkeen palokaasut humahtivat. Huomioitavaa on myös se, että ovet eivät ensin meinanneet avautua ja palomiehet raottivat ovia ennen niiden avaamista noin viiden sekunnin ajan. Ehkäpä tämä itse asiassa vain tehosti tulevaa palokaasujen humahtamista, kun palokaasujen sekaan pääsi virtaamaan ilmaa ja sitä kautta happea. Sitten ovien avautumisen jälkeen palokaasut humahtivat palamaan kaapin yläosasta aiheuttaen kaapin levyisen hetkellisen ”liekkimeren” sammuttajien ”silmille”. Palomiehet olivat suojautuneet savusukeltajan varusteisiin, joten todellista vaaraa ei tilanteesta sammuttajille aiheutunut. Mielenkiintoista on, että kaapin 20 sekunnin jäähdytys ei estänyt humahdusta. Tämän selittänee se, että vesi ja muodostunut vesihöyry jäi kaapin keskiosaan, eikä vesi päässyt jäähdyttämään ylähyllyn osalla olleita palokaasuja lainkaan. Kaapin yläosasta mitattiin yli 400 asteen lämpötiloja testin loppuvaiheessa, mikä kertoo palokaasujen kuumuudesta.

5.2 Humahdus, leimahdus vai lieskahdus?

Oliko kyseessä humahdus, leimahdus vai lieskahdus? Kyseiset termit liittyvät rajatun tilan palon ilmiöihin ja ilmiöt on selitetty palofysiikan kirjassa ja TEPA-termipankissa seuraavasti.

Leimahdus on rajatussa tilassa olevien syttyvien kaasujen yhtäkkinen osittain tai kokonaan syttyminen. Leimahdus on palokaasun humahdus, joka saattaa syntyä esimerkiksi avattaessa ovea tilaan, joka on palanut pitkään. Leimahduksessa liekkirintama leviää polttoaineessa tyypillisesti nopeudella 1 m/s, ja koko tapahtuman kesto on enintään sekunteja. Leimahdus pysähtyy, kun kaikki polttoaine on palanut. (TEPA-termipankki 2025; Hyttinen & muut 2018.)

Lieskahdus on rajatussa tilassa olevien palavien tarvikkeiden kaikkien pintojen nopea syttyminen. Lieskahduksessa palo leviää jähmeän aineen pinnoilla tyypillisesti nopeudella 1 cm/s ja koko tapahtuman kesto on minuutteja. (TEPA-termipankki 2025; Hyttinen & muut 2018.)

Humahdus on räjähtävän aineen kemiallinen reaktio, jolle on tunnusomaista reaktion leviäminen pienemmällä nopeudella kuin äänen nopeus tässä aineessa. Savu humahtaa vain jos 1) koko savupatja on ehtinyt sekoittua palamisilmaan ennen syttymistä, 2) syttyminen tapahtuu viivästyneenä ja 3) savuilmaseos on syttymisalueella. Savu voi humahtaa ainoastaan silloin, jos se on ollut alkujaan liian rikas seos. (TEPA-termipankki 2025; Hyttinen & muut 2018.)

Yhteenvetona voidaan todeta, että termistö on osittain päällekkäistä ja tässä yhteydessä on perin hankalaa absoluuttisesti todeta, että mikä ilmiö oli tosiasiassa kyseessä. Humahtamis-termin käyttöä tukee, että kaapin sisältä mitattiin alhaisia happipitoisuuksia (alhaisin arvo 11,5 %). Asian selvittämiseksi tarkemmin tulisi palavien kaasujen osalta määrittää lisäksi syttymisrajat ja pitoisuudet.

5.3 Kaasujen pitoisuudet

Häkäpitoisuudet ylittivät molemmissa testeissä haitallisen pitoisuusrajan HTP_{15min} (75 ppm). Testissä 1 korkein mitattu pitoisuus oli 255ppm. Testissä kaksi kaapin sisällä pitoisuus nousi niin korkeaksi, ettei sitä pystynyt ko. mittarilla mittaamaan. Mittarin mittaaman korkein arvo oli 2000

ppm. Tällaiset pitoisuudet ylittävät merkittävästi terveydelle haitallisten pitoisuuksien raja-arvot ja ovat vakava työturvallisuusriski. Testi osoittaa, että ilman asianmukaista ilmanvaihtoa tai kaasunpoistoa suljetut tilat voivat muuttua hengenvaarallisiksi nopeasti.

Tutkimuksessa havaittiin, että happipitoisuus pysyi avoimessa tilassa (testi 1) normaalina (20,9 %) koko testin ajan, kun taas suljetussa kaapissa (testi 2) se laski alimmillaan 11,5 %:iin. Suljetussa tilassa palaminen kuluttaa ympäröivän ilman happea, ja ilmanvaihdon puuttuessa happipitoisuus alkaa laskea. Tämä voi edistää epätäydellistä palamista ja lisätä haitallisten palokaasujen, kuten hiilimonoksidin, syntyä. Avoimessa tilassa sen sijaan ilmanvaihto ja suuri ilmatilavuus takaavat riittävän happimäärän, jolloin palaminen pysyy täydellisempänä ja happitason laskua ei pääse tapahtumaan. Tämä osoittaa, että tilan avoimuus on tärkeä tekijä paitsi palon rajoittamisessa myös palokaasujen muodostumisen hallinnassa.

5.4 Palon syttyminen ja lämpötilakehitys

Molemmissa testeissä sytytettävä akku syttyy lähes samaan aikaan. Noin 10 minuutin kohdalla akku alkaa savumaan ja 15 minuutin kohdalla se syttyy palamaan liekillä. Akkujen päältä mitatut lämpötilat nousivat enimmillään noin 800 asteeseen. Testissä 2 suurin hetkellinen lämpötila oli jopa 1313 astetta. Tämä tukee aiempaa tietoa siitä, kuinka nopeasti terminen karkaaminen voi johtaa paloon. Lämpötilan kehittyminen sekä syttyvien kaasujen vapautuminen korostavat tarvetta palontorjuntaratkaisuille, jotka perustuvat varhaiseen havaitsemiseen ja palon sammuttamiseen.

5.5 Akkujen latauspaikan valinta ja käytännön sovellukset

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että sekä avoimessa tilassa että suljetussa peltikaapissa tapahtuva lataus aiheuttaa merkittävän riskin palon leviämiselle viereisiin akkuihin. Tästä herää kysymys, tulisiko litiumioniakkuja lainkaan ladata samassa fyysisessä tilassa, toistensa läheisyydessä. Avoimessa tilassa palo leviää palavien heitteiden kautta, kun taas suljetussa kaapissa riskiä lisäävät kaasujen kertyminen ja mahdollinen humahtaminen. Näiden havaintojen perusteella on perusteltua pohtia, tulisiko erityisesti yhteiskäyttötiloissa, kuten taloyhtiöiden varastoissa tai julkisissa latauspisteissä, suosia erillisiä latauspaikkoja tai väliseinillä eristettyjä lokeroita.

Lisäksi tutkimustuloksia voidaan verrata nykyiseen käytäntöön sähköpotkulautojen lataamisessa, joissa useita akkuja ladataan samanaikaisesti ja usein lähekkäin, esimerkiksi varikkotiloissa tai huoltopisteissä. Sähköpotkulaudoissa käytetään samankaltaisia litiumioniakkuja kuin sähköpyörissä, ja niillä on samat termisen karkaamisen riskit. Tällaiset käyttöympäristöt voivat vastata tutkimuksen avoimen tilan testiä, mutta niiden mahdollinen rajattu ilmanvaihto voi tehdä niistä osin vastaavia kuin suljetut kaapit. Tämä lisää jatkotutkimuksen tarvetta, erityisesti sellaisissa ympäristöissä, joissa akkuja ladataan suuremmissa määrin kerralla ja tilan ilmanvaihto ei ole optimaalinen.

Käytännön sovelluksena voidaan todeta, että akkujen turvallinen lataaminen ei ole pelkästään tekninen, vaan myös tilasuunnittelun ja toimintatapojen kysymys. Akkulatauksen turvallisuus ei riipu pelkästään käytettävästä kaapista, vaan myös siitä, kuinka monta akkua ladataan samanaikaisesti, kuinka lähekkäin ne sijaitsevat ja millaiset ovat tilan ilmanvaihto- ja palontorjuntaratkaisut.

5.6 Latauskaappien turvallisuus

Tulosten perusteella voidaan todeta, että täysin eristämättömät tai ilman sammutus- ja ilmanvaihtojärjestelmiä varustetut peltikaapit eivät ole riittäviä litiumioniakkujen turvalliseen latauksen. Kaapin tiivistäminen lisäsi kaasujen kerääntymistä ja pahensi riskiä. Tämä osoittaa, että kaupallisten, testattujen latauskaappien käyttö on perusteltua erityisesti julkisissa tai yhteiskäyttötiloissa.

5.7 Tutkimuksen merkitys ja hyödynnettävyys

Tutkimus tarjoaa konkreettista, kokeellista näyttöä siitä, miten litiumioniakut käyttäytyvät palo-olosuhteissa, ja tulokset ovat arvokkaita niin pelastustoimelle, laitesuunnittelijoille kuin koulutusorganisaatioillekin. Tulokset tukevat myös LION-hankkeen tavoitteita parantaa akkujen käsittelyyn liittyvää turvallisuutta ja ohjeistusta.

5.8 Tutkimuksessa esiintyneet kehittämisnäkökulmat

Tarkan tutkimustiedon taltioimiseksi kaikkien mittareiden ja kameroiden kellojen tulee olla sekunnilleen samassa ajassa. Nyt selvästi eri mittareiden osalta kellonaika vaihtelee. Testiryhmä tarkasti ja sääti vain osan mittauslaitteistojen ja kameroiden kelloista. Mittareiden käyttö tutkimusvälineenä oli tutkimusryhmälle uutta ja osan mittareiden kellonaikojen asettaminen vierasta, joten jatkossa näihin tulee ennalta perehtyä paremmin. Lisäksi videomateriaaleista on vaikea saada kellonaikaa selville, joten jatkossa vastaavissa tutkimuksissa on syytä käyttää kameroiden kuvassa näkyvää kellonaikaa / juoksevaa aikaa (esim. digitaalinen kellotaulu).

5.9 Jatkotutkimustarpeet

Tämän tutkimuksen perusteella tutkimusryhmä suosittelee, että jatkossa tutkittaisiin erilaisten kaupallisten latauskaappien turvallisuutta akkupalossa. Tutkimuksissa tulee ottaa huomioon latauskaappien erilaisuudet mm.

- kaappien rakenteissa
- palon eristävyydessä
- kaasutiiveydessä ja kaasujen hallinnassa (erillisten poistokanavien palonkesto)
- kaappien sammutusjärjestelmien toimivuudessa ja tehokkuudessa
- palon ilmaisujärjestelmissä.

Lisäksi on syytä tarkastella erilaisten pelastuslaitoksen sammutusjärjestelmien tehokkuutta akkupalon sammuttamisessa suljetussa tilassa (latauskaapissa). Nyt testeissä kaikki akut olivat täyteen ladattuja, jolla on todennäköisesti merkitystä termisen karkaamisen käynnistymisessä. Jatkossa olisi hyödyllistä tutkia myös, miten akkujen eri lataustasot vaikuttavat palon leviämiseen akkujen lataustilanteessa.

Lähteet

Akulla.fi (2025). *Xiaomi Electric Scooter Pro2 Sähköpotkulauta*. Saatavilla: https://akulla.fi/tuotteet/sahkopotkulaudat/xiaomi-electric-scooter-pro2-sahkopotkulauta/ [Viitattu: 10.5.2025].

Asecos Litiumioniakun latauskaappi. 2025. Denios. www-sivut. https://www.denios.at/asecos-lithium-ionen-akku-ladeschrank-smartstore-pro-b-1200-mm-3099460/309943. Viitattu 15.4.2025.

Classic Bike (2024). *Kuinka pitkän matkan sähköpyörällä voi ajaa?* Saatavilla: https://classicbike.fi/kuinka-pitka-matka-sahkopyoralla-voi-ajaa/ [Viitattu: 10.5.2025].

HTP-ARVOT 2020, Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. 2020. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja 2020:24. Helsinki. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162457/STM_2020_24_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Huttu, I., Laitinen, J. & Mäkinen, M. (2022). *Rakennuspalon sammutus*. Pelastusopiston julkaisu. http://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_A/A3_2022.pdf

Hyttinen, V., Tolonen, P. & Väisänen, T. 2018. *Palofysiikka* 9. uusittu painos. Pelastusopisto ja SPEK. Savion Kir-japaino Oy.

Kemistien Seura. (2020). *Suomestako uuden akkuteknologian edelläkävijä?* Saatavilla: https://suomalaistenkemistienseura.fi/suomestako-uuden-akkuteknologian-edellakavija/ [Viitattu 10.5.2025].

Kuntokauppa (2025). *Sähköpyöräsanasto*. Saatavilla: https://www.kuntokauppa.fi/sahkopyorasanasto [Viitattu: 10.5.2025].

Leinonen, J. (2021). Litiumioniakun fysikaaliset käyttäytymismallit ja akkukemian valinta. Metropolia Ammattikorkeakoulu. www-dokumentti. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/508707/Leinonen_Joakim.pdf?sequence=2

Litiumioniakkujen elinkaaren paloturvallisuus- ja varautumisohjeet (LION-hanke). 2025. Pelastusopison www-sivut. https://www.pelastusopisto.fi/tutkimus-ja-kehitys/hankkeet/litiumioniakkujen-elinkaaren-paloturvallisuus-ja-varautumisohjeet-lion-hanke/. Viitattu 27.4.2025.

Motiva (2025). *Sähköautot*. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot [Viitattu: 10.5.2025].

Pelastusopisto (2022). Litiumioniakkujen latauksen paloturvallisuus. https://www.pelastusopisto.fi [Viitattu 11.4.2025].

Pelastusopisto. (2023). *Litiumioniakkupalojen operatiivisen toiminnan suositukset*. [pdf] Pelastustoimen julkaisu. Saatavilla: https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/Litiumioniakkupalojen-operatiivisen-toiminnan-suositukset_Pelastustoimen-suositukset.pdf [Viitattu 10.5.2025].

Rasilainen, A., Lahtinen, N., Turunen, T. ja Evikoski, J. 2024. Litiumioniakkujen latauksen paloturvallisuus. Tutkimustoiminnan perusteet opintojakson tutkimusraportti. Pelastusopisto. https://www.pelastusopisto.fi/wp-content/uploads/Litiumioniakkujen-latauksen-paloturvallisuus-Tutkimusraportti-AmkN22.pdf.

Rytkönen, K. ja Mikkonen, J. 2024. Litiumioniakkupalot Suomessa. 15.5.2024 Blogi. Pelastusopisto. https://www.pelastusopisto.fi/blogi/litiumioniakkupalot-suomessa/.

Soininen, T. (2015). *Litium-ioniakku ja sen valmistus*. [pdf] Theseus. Saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/93410/soininen_tony.pdf [Viitattu 10.5.2025].

TEPA-termipankki. 2025. Erikoisalojen sanastojen ja sanakirjojen kokoelma - Sanastokeskus. https://termipankki.fi/tepa/fi/. Viitattu 20.5.2025.

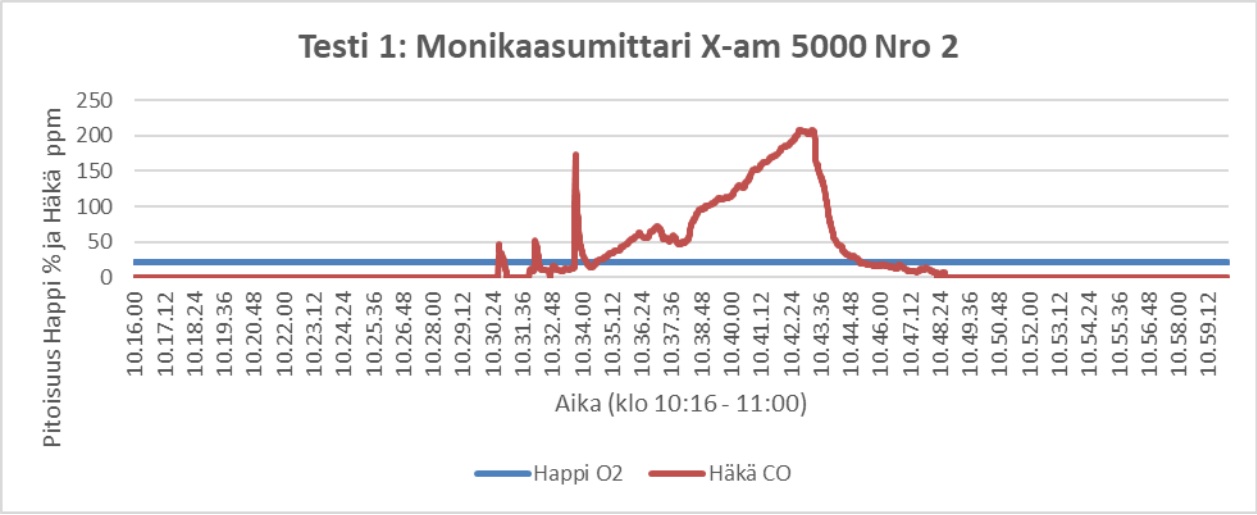
Tukes (2023). Litiumioniakkujen turvallinen käyttö. Saatavilla: https://tukes.fi/litiumioniakut [Viitattu 11.4.2025].

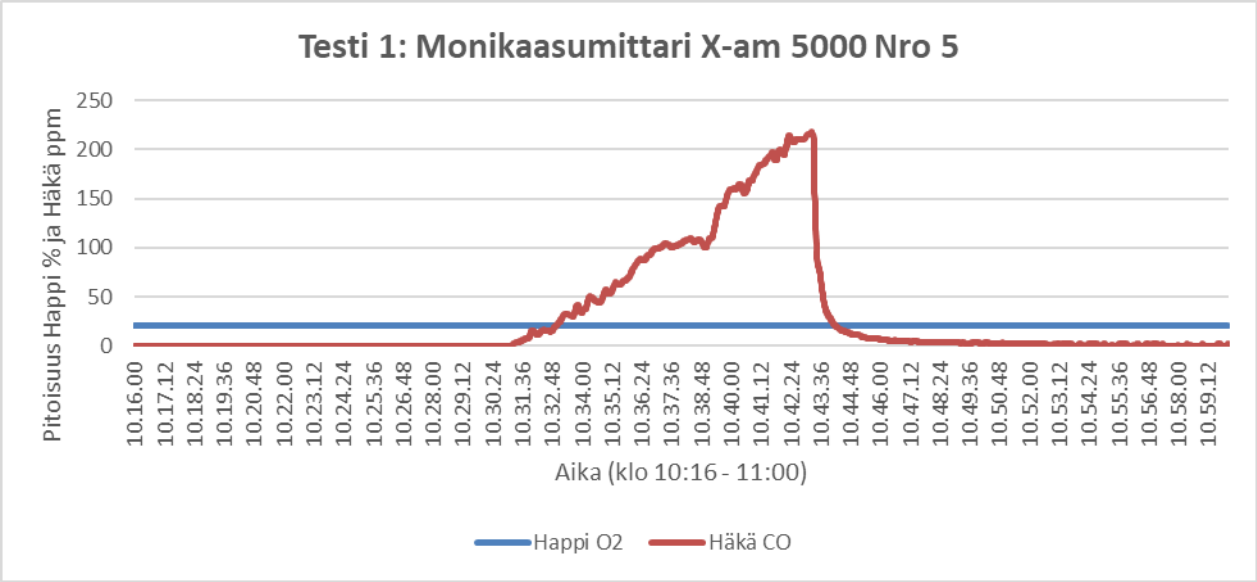
Volkswagen (2025). *Toimintamatka – Sähköautot ja hybridit*. Saatavilla: https://www.volkswagen.fi/fi/sahkoautot/toimintamatka.html [Viitattu: 10.5.2025].

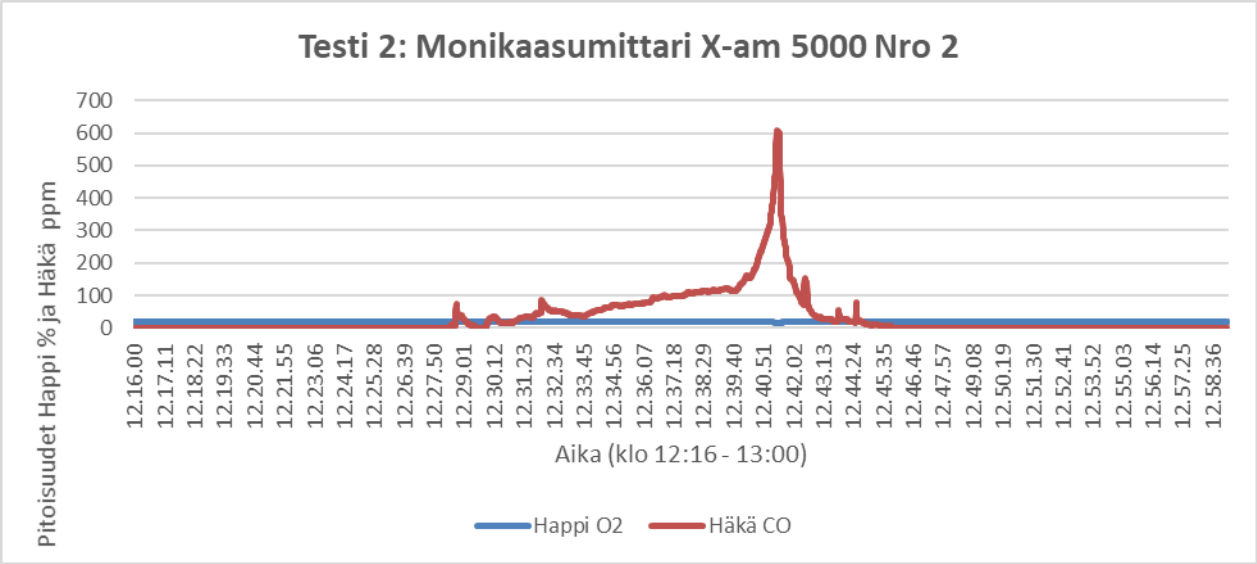
Voltride (2025). *GPad F3 Max V2*. Saatavilla: https://voltride.com/fi/gpad-f3-max-v2/ [Viitattu: 10.5.2025].

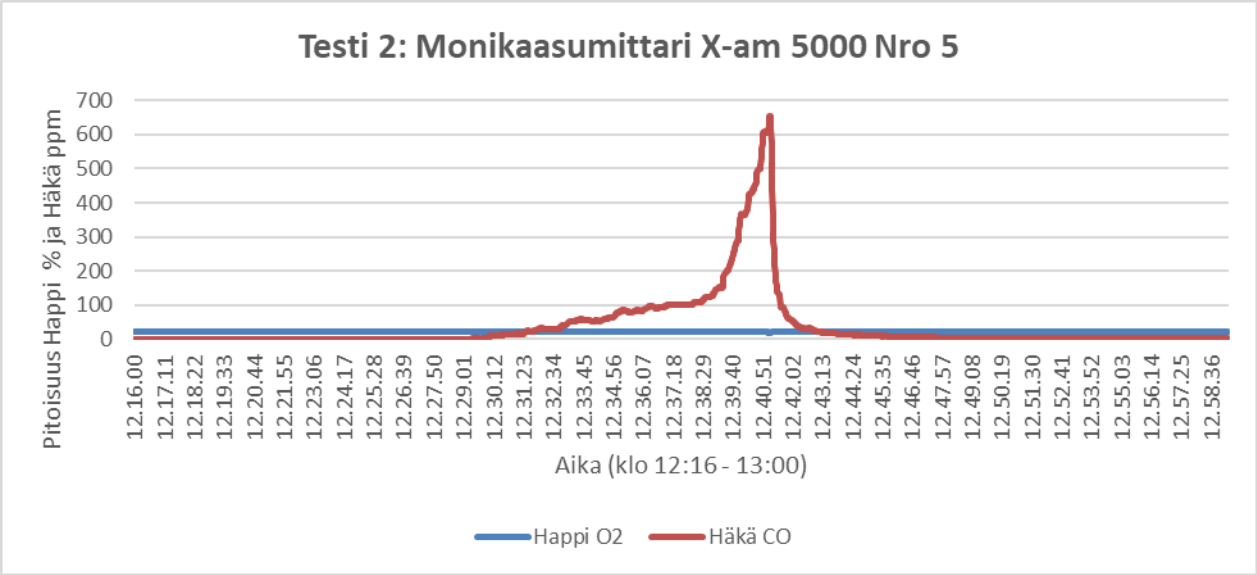
Youth Power (2024). Uutiset. Saatavilla: https://www.youth-power.net/fi/news/48v-lithium-ion-battery-voltage-chart/ [Viitattu 19.5.2025].

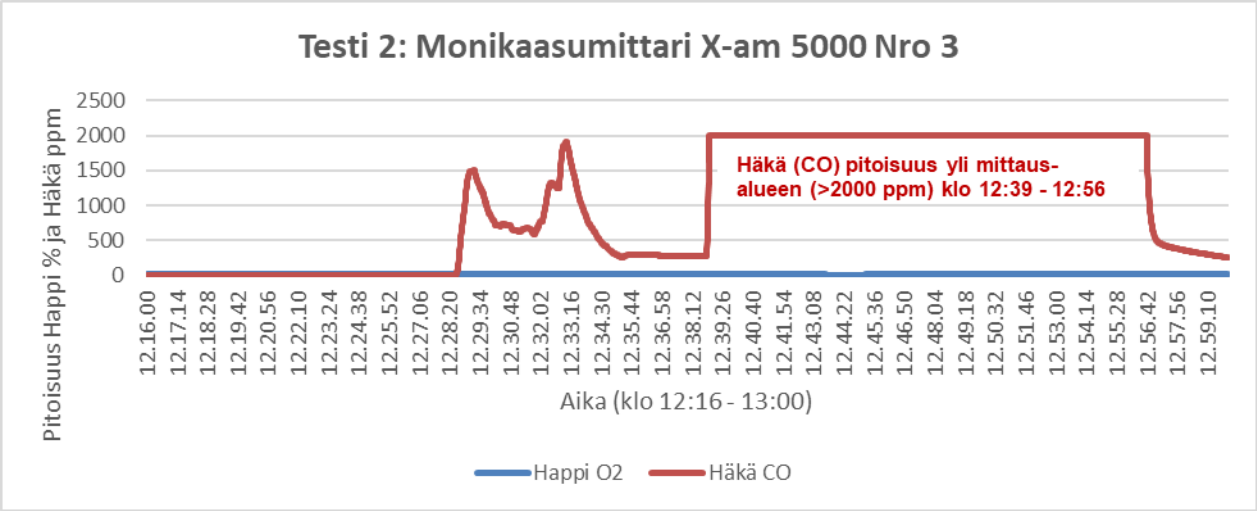
Liite 1 Monikaasumittareiden mittauskaaviot

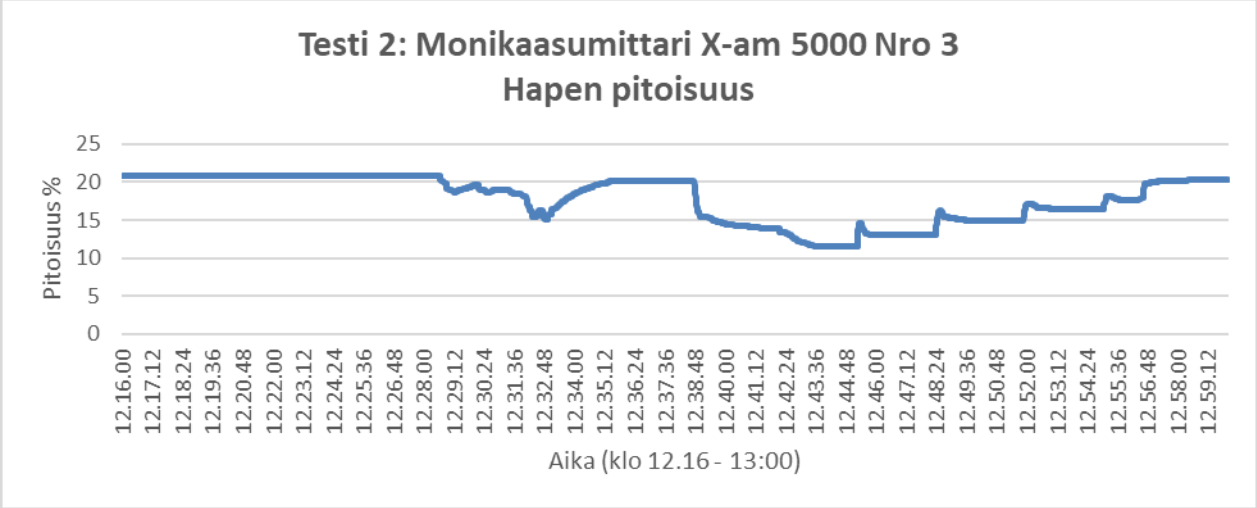




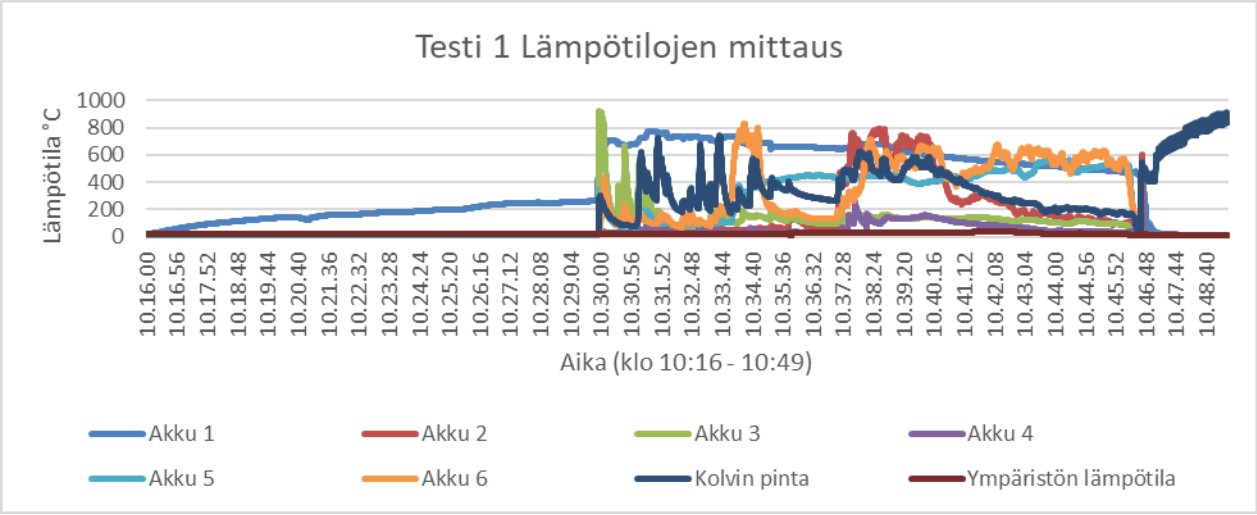


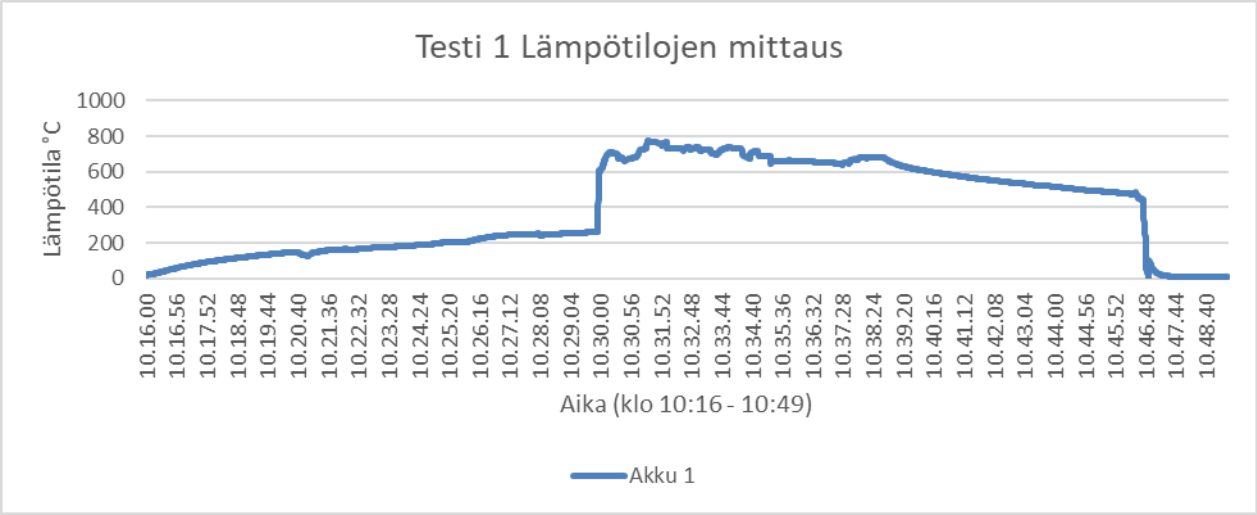

Testi 2: Monikaasumittari X-am 5000 Nro 5
Pitoisuus Happi % ja Häkä ppm
700
600
500
400
300
200
100
0
12.16.00
12.17.11
12.18.22
12.19.33
12.20.44
12.21.55
12.23.06
12.24.17
12.25.28
12.26.39
12.27.50
12.29.01
12.30.12
12.31.23
12.32.34
12.33.45
12.34.56
12.36.07
12.37.18
12.38.29
12.39.40
12.40.51
12.42.02
12.43.13
12.44.24
12.45.35
12.46.46
12.47.57
12.49.08
12.50.19
12.51.30
12.52.41
12.53.52
12.55.03
12.56.14
12.57.25
12.58.36
Aika (klo 12:16 - 13:00)
Happi O2
Häkä CO

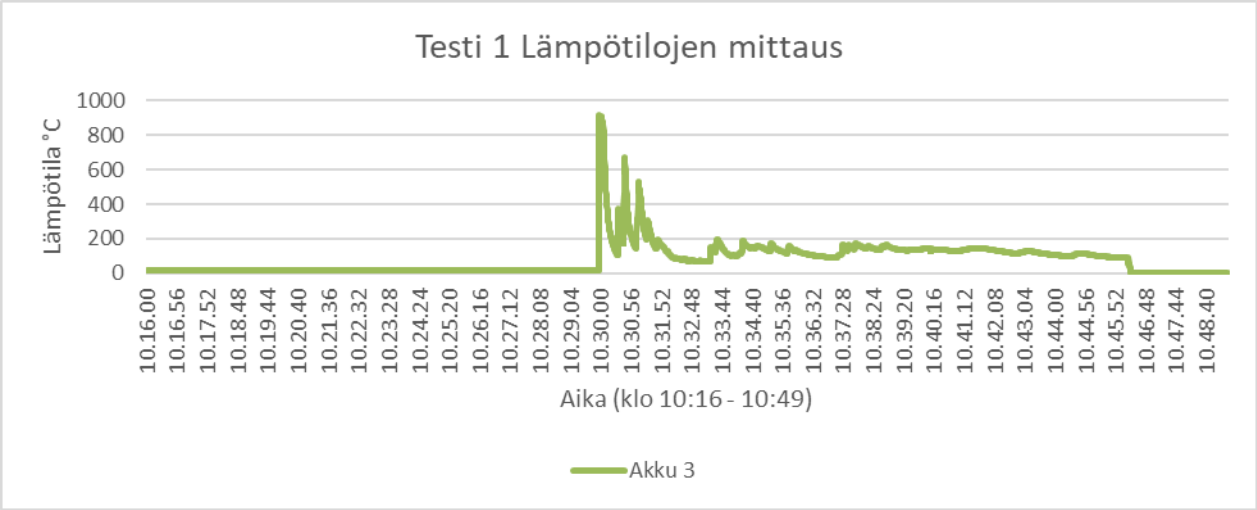

Testi 2: Monikaasumittari X-am 5000 Nro 3
Pitoisuus Happi % ja Häkä ppm
2500
2000
1500
1000
500
0
Häkä (CO) pitoisuus yli mittaus-
alueen (>2000 ppm) klo 12:39 - 12:56
12.16.00
12.17.14
12.18.28
12.19.42
12.20.56
12.22.10
12.23.24
12.24.38
12.25.52
12.27.06
12.28.20
12.29.34
12.30.48
12.32.02
12.33.16
12.34.30
12.35.44
12.36.58
12.38.12
12.39.26
12.40.40
12.41.54
12.43.08
12.44.22
12.45.36
12.46.50
12.48.04
12.49.18
12.50.32
12.51.46
12.53.00
12.54.14
12.55.28
12.56.42
12.57.56
12.59.10
Aika (klo 12:16 - 13:00)
Happi O2
Häkä CO

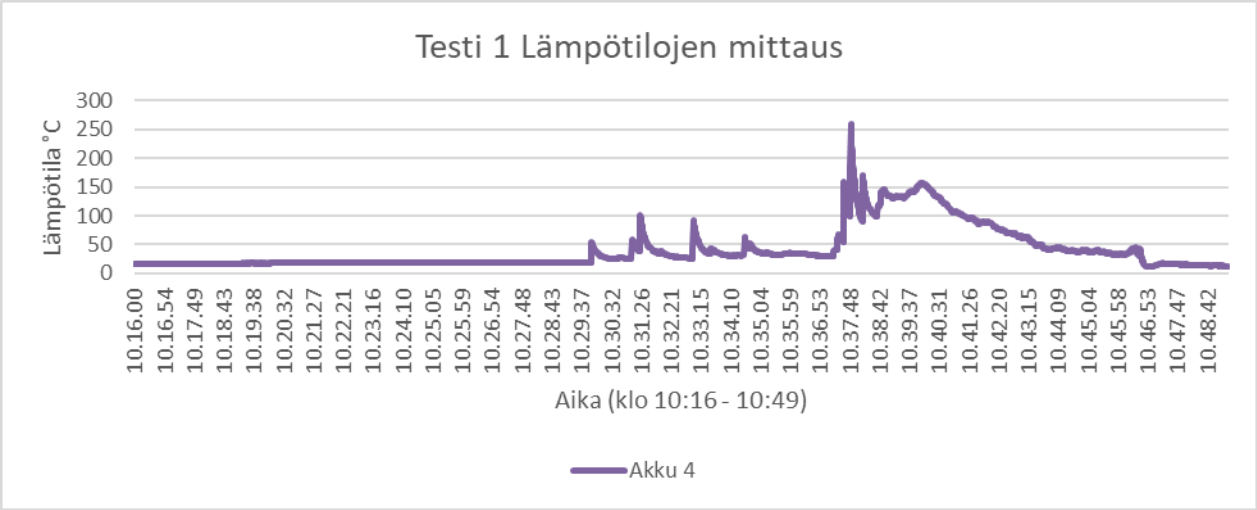

Testi 2: Monikaasumittari X-am 5000 Nro 3
Hapen pitoisuus
Pitoisuus %
25
20
15
10
5
0
12.16.00
12.17.12
12.18.24
12.19.36
12.20.48
12.22.00
12.23.12
12.24.24
12.25.36
12.26.48
12.28.00
12.29.12
12.30.24
12.31.36
12.32.48
12.34.00
12.35.12
12.36.24
12.37.36
12.38.48
12.40.00
12.41.12
12.42.24
12.43.36
12.44.48
12.46.00
12.47.12
12.48.24
12.49.36
12.50.48
12.52.00
12.53.12
12.54.24
12.55.36
12.56.48
12.58.00
12.59.12
Aika (klo 12.16 - 13:00)

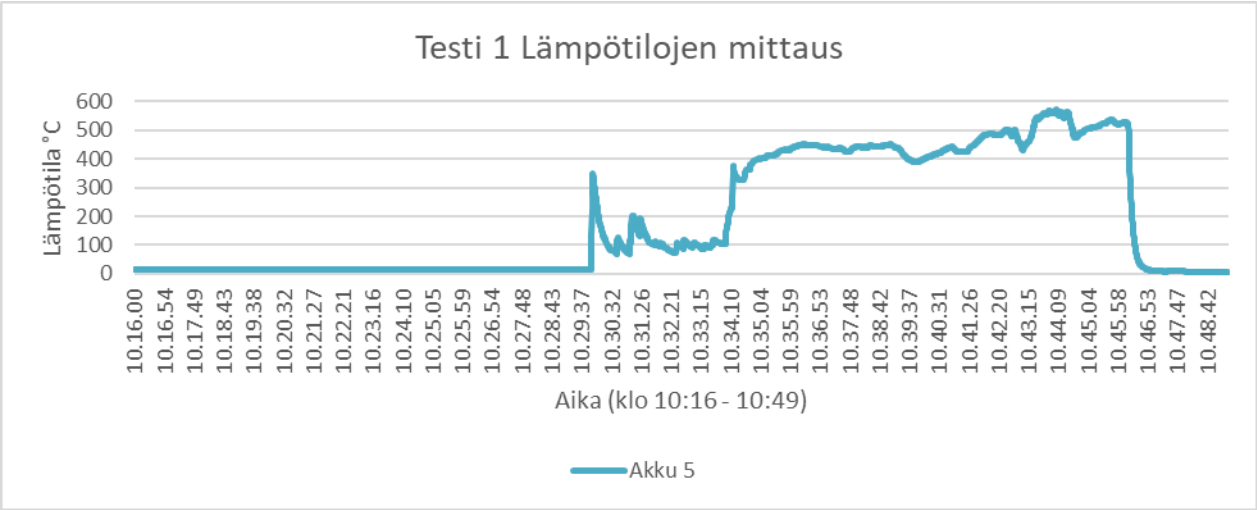
Liite 2 Lämpötilojen mittauskaaviot (testi 1)

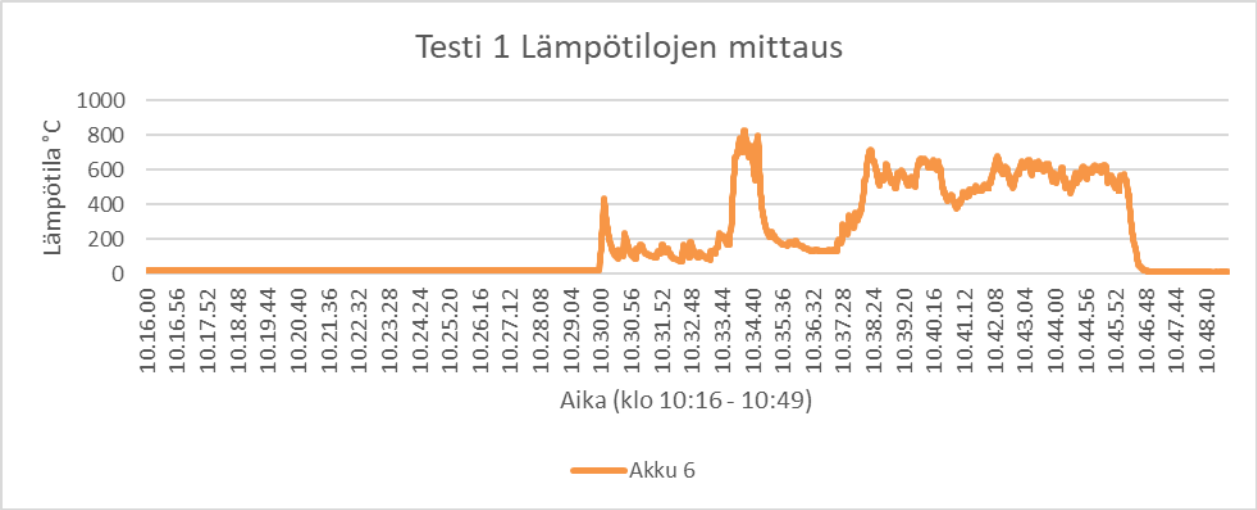


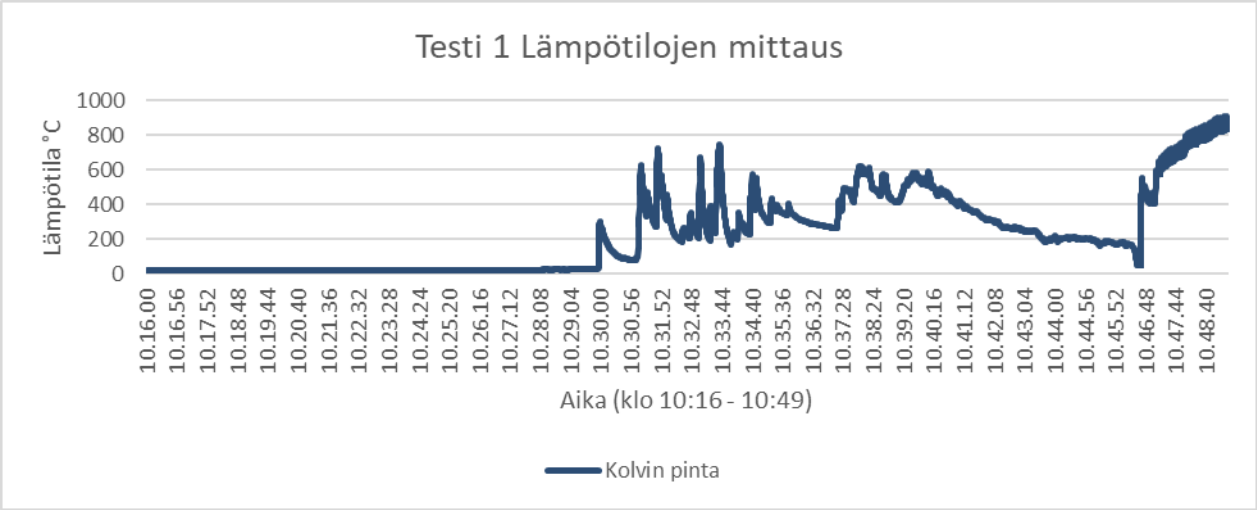


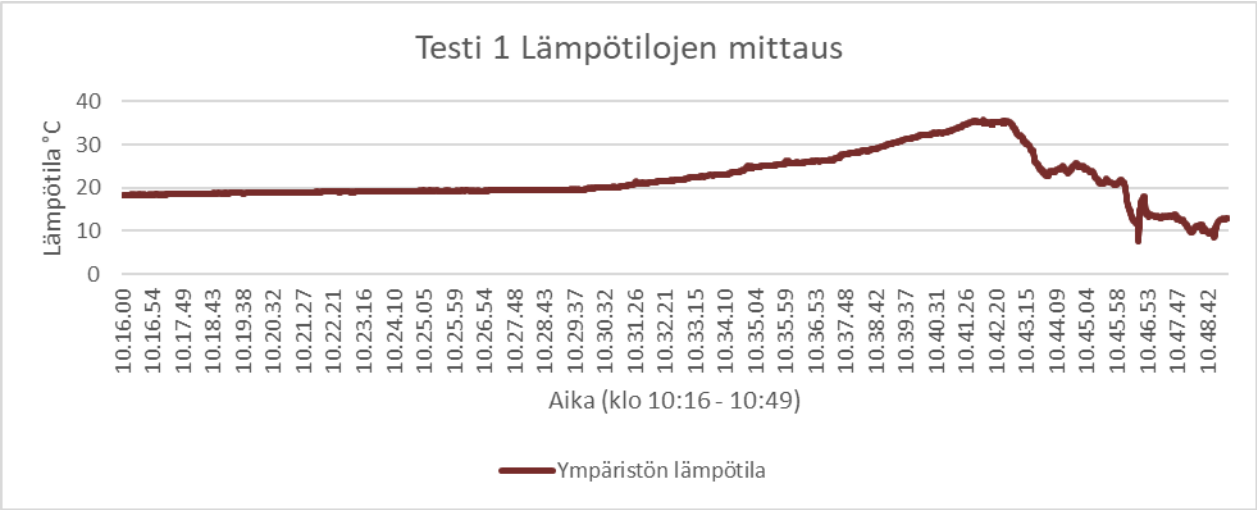

Testi 1 Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
1000
800
600
400
200
0
10.16.00
10.16.56
10.17.52
10.18.48
10.19.44
10.20.40
10.21.36
10.22.32
10.23.28
10.24.24
10.25.20
10.26.16
10.27.12
10.28.08
10.29.04
10.30.00
10.30.56
10.31.52
10.32.48
10.33.44
10.34.40
10.35.36
10.36.32
10.37.28
10.38.24
10.39.20
10.40.16
10.41.12
10.42.08
10.43.04
10.44.00
10.44.56
10.45.52
10.46.48
10.47.44
10.48.40
Aika (klo 10:16 - 10:49)
Akku 3

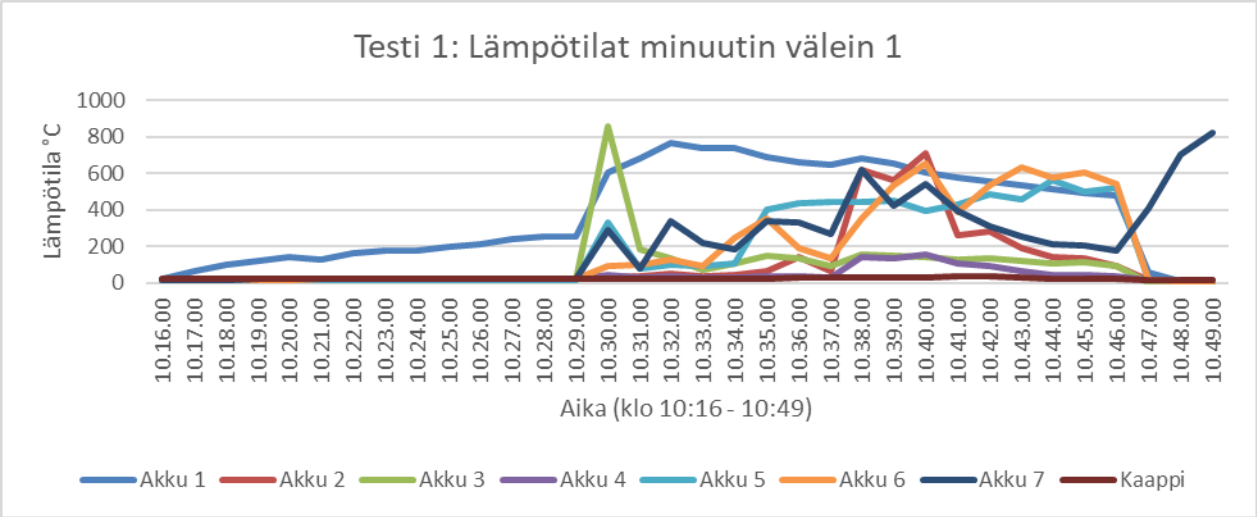

Testi 1 Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
300
250
200
150
100
50
0
10.16.00
10.16.54
10.17.49
10.18.43
10.19.38
10.20.32
10.21.27
10.22.21
10.23.16
10.24.10
10.25.05
10.25.59
10.26.54
10.27.48
10.28.43
10.29.37
10.30.32
10.31.26
10.32.21
10.33.15
10.34.10
10.35.04
10.35.59
10.36.53
10.37.48
10.38.42
10.39.37
10.40.31
10.41.26
10.42.20
10.43.15
10.44.09
10.45.04
10.45.58
10.46.53
10.47.47
10.48.42
Aika (klo 10:16 - 10:49)
Akku 4

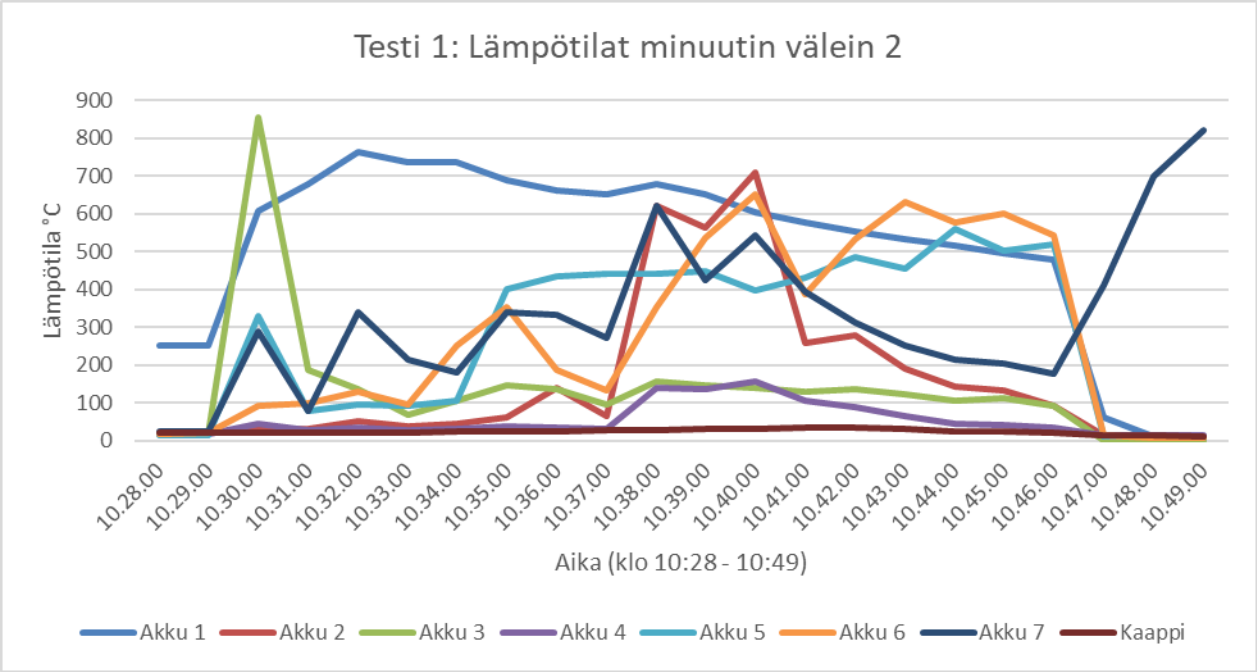

Testi 1 Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
600
500
400
300
200
100
0
10.16.00
10.16.54
10.17.49
10.18.43
10.19.38
10.20.32
10.21.27
10.22.21
10.23.16
10.24.10
10.25.05
10.25.59
10.26.54
10.27.48
10.28.43
10.29.37
10.30.32
10.31.26
10.32.21
10.33.15
10.34.10
10.35.04
10.35.59
10.36.53
10.37.48
10.38.42
10.39.37
10.40.31
10.41.26
10.42.20
10.43.15
10.44.09
10.45.04
10.45.58
10.46.53
10.47.47
10.48.42
Aika (klo 10:16 - 10:49)
Akku 5


Testi 1 Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
1000
800
600
400
200
0
10.16.00
10.16.56
10.17.52
10.18.48
10.19.44
10.20.40
10.21.36
10.22.32
10.23.28
10.24.24
10.25.20
10.26.16
10.27.12
10.28.08
10.29.04
10.30.00
10.30.56
10.31.52
10.32.48
10.33.44
10.34.40
10.35.36
10.36.32
10.37.28
10.38.24
10.39.20
10.40.16
10.41.12
10.42.08
10.43.04
10.44.00
10.44.56
10.45.52
10.46.48
10.47.44
10.48.40
Aika (klo 10:16 - 10:49)
Akku 6


Testi 1 Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
1000
800
600
400
200
0
10.16.00
10.16.56
10.17.52
10.18.48
10.19.44
10.20.40
10.21.36
10.22.32
10.23.28
10.24.24
10.25.20
10.26.16
10.27.12
10.28.08
10.29.04
10.30.00
10.30.56
10.31.52
10.32.48
10.33.44
10.34.40
10.35.36
10.36.32
10.37.28
10.38.24
10.39.20
10.40.16
10.41.12
10.42.08
10.43.04
10.44.00
10.44.56
10.45.52
10.46.48
10.47.44
10.48.40
Aika (klo 10:16 - 10:49)
Kolvin pinta


Testi 1 Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
40
30
20
10
0
10.16.00
10.16.54
10.17.49
10.18.43
10.19.38
10.20.32
10.21.27
10.22.21
10.23.16
10.24.10
10.25.05
10.25.59
10.26.54
10.27.48
10.28.43
10.29.37
10.30.32
10.31.26
10.32.21
10.33.15
10.34.10
10.35.04
10.35.59
10.36.53
10.37.48
10.38.42
10.39.37
10.40.31
10.41.26
10.42.20
10.43.15
10.44.09
10.45.04
10.45.58
10.46.53
10.47.47
10.48.42
Aika (klo 10:16 - 10:49)
Ympäristön lämpötila


Testi 1: Lämpötilat minuutin välein 1
Lämpötila °C
1000
800
600
400
200
0
10.16.00
10.17.00
10.18.00
10.19.00
10.20.00
10.21.00
10.22.00
10.23.00
10.24.00
10.25.00
10.26.00
10.27.00
10.28.00
10.29.00
10.30.00
10.31.00
10.32.00
10.33.00
10.34.00
10.35.00
10.36.00
10.37.00
10.38.00
10.39.00
10.40.00
10.41.00
10.42.00
10.43.00
10.44.00
10.45.00
10.46.00
10.47.00
10.48.00
10.49.00
Aika (klo 10:16 - 10:49)
Akku 1
Akku 2
Akku 3
Akku 4
Akku 5
Akku 6
Akku 7
Kaappi

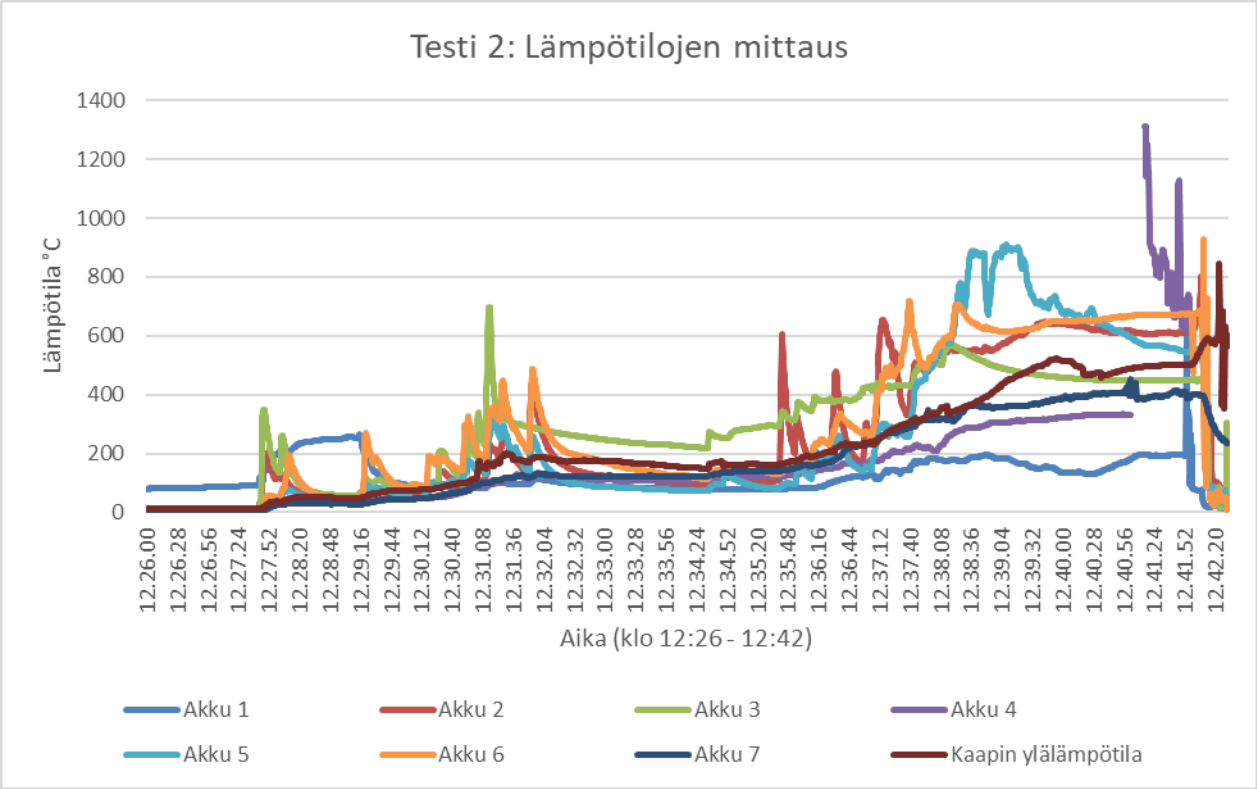

Testi 1: Lämpötilat minuutin välein 2
Lämpötila °C
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
10.28.00
10.29.00
10.30.00
10.31.00
10.32.00
10.33.00
10.34.00
10.35.00
10.36.00
10.37.00
10.38.00
10.39.00
10.40.00
10.41.00
10.42.00
10.43.00
10.44.00
10.45.00
10.46.00
10.47.00
10.48.00
10.49.00
Aika (klo 10:28 - 10:49)
Akku 1
Akku 2
Akku 3
Akku 4
Akku 5
Akku 6
Akku 7
Kaappi

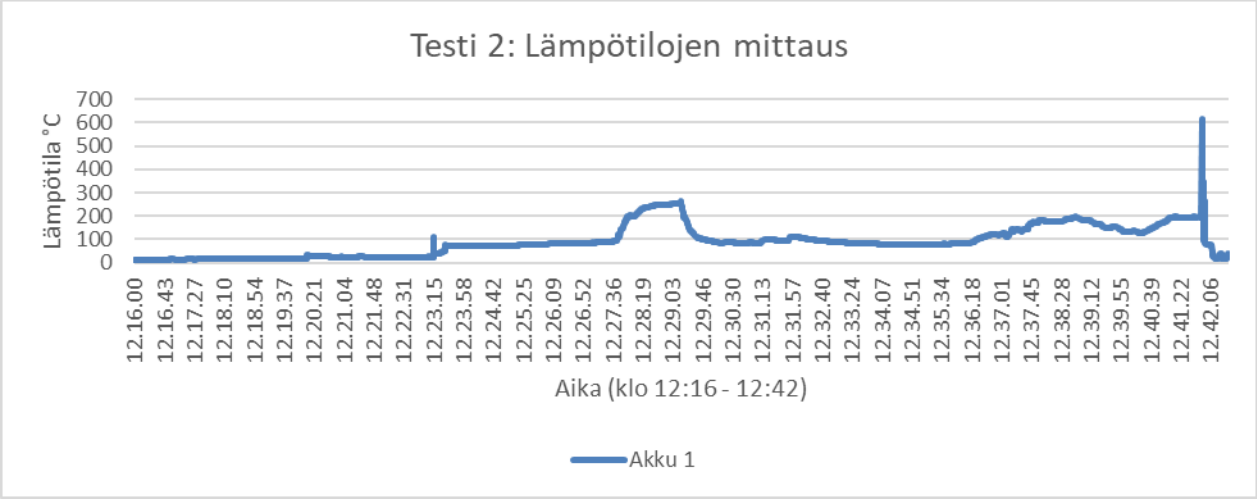
Liite 3 Lämpötilojen mittaustaulukko (testi 1)

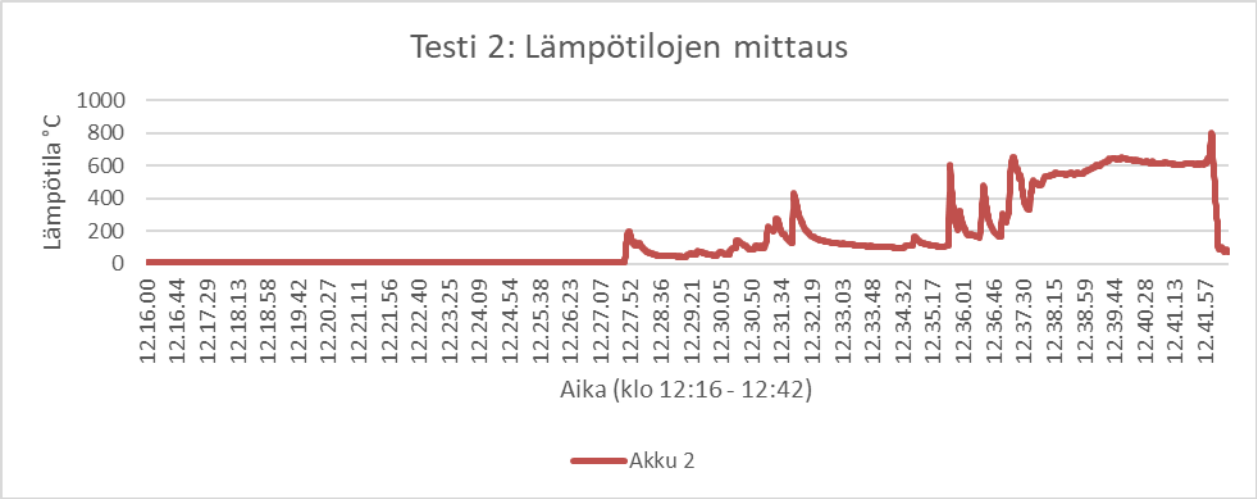
Mittauskohtien lämpötilat minuutin välein aikajaksolla 10:28 – 10:49

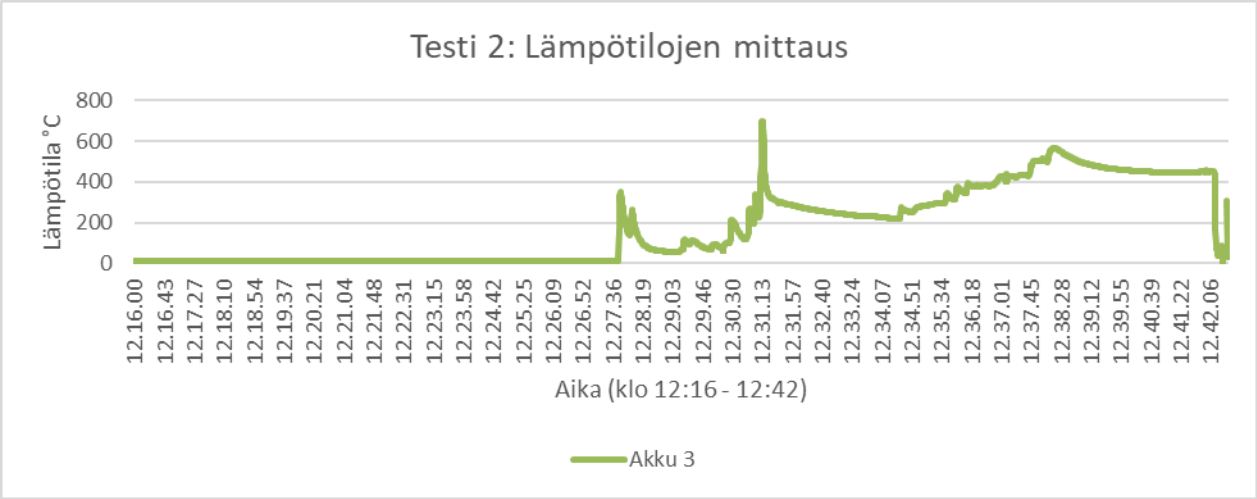
	Akku 1	Akku 2	Akku 3	Akku 4	Akku 5	Akku 6	Akku 7	Kaappi
10:28:00	250,8	18,7	17,7	18,3	14,9	18,8	22,8	19,4
10:29:00	251,7	19	18	18,5	15	19,1	23	19,5
10:30:00	607,9	31,1	855,2	44	330,5	92,4	287,4	19,8
10:31:00	679,6	32,4	185,4	26,1	78,1	98,8	78,4	20,3
10:32:00	763,8	50,2	135,1	34,3	96	130,4	340,4	21,3
10:33:00	735,4	37,2	68,2	26,3	92,9	95,1	215,1	22,1
10:34:00	737	45,6	104,2	31,4	105,1	249,8	180,9	23,1
10:35:00	688,3	61	146,7	37,5	399,9	353,1	339,7	24,9
10:36:00	661,3	140,4	137,2	35,5	432,9	188,3	333,8	25,6
10:37:00	650	63	94,1	30,1	440,7	133,9	270,1	26,2
10:38:00	679,2	622	156,9	138,4	441,6	352,7	620,5	28,2
10:39:00	652,4	563,6	145	136,2	448,9	536	425,4	29,7
10:40:00	605,5	710,4	140,3	157,4	396,3	652,6	543,6	31,9
10:41:00	576,6	258,9	130,4	106,5	432,6	385,3	392,6	33,4
10:42:00	553,4	279,7	137,5	88,9	484,8	532,1	312,8	35,3
10:43:00	533,4	190	122,4	66,3	454,9	632,3	250,9	32,1
10:44:00	515,5	143,8	105,7	43,8	561,5	576,3	214,6	23,8
10:45:00	494	133,3	112	40,3	502,2	601,6	202,6	24,7
10:46:00	478,5	92	91,8	32,6	520,3	542,2	176,5	20,8
10:47:00	59,7	12,2	BURNOUT	12,5	11,9	12,8	410,3	13,6
10:48:00	10,7	10,9	BURNOUT	15,3	9,2	8,4	700,7	12,2
10:49:00	8,4	9,6	BURNOUT	14,3	7	8,4	819,8	11,4

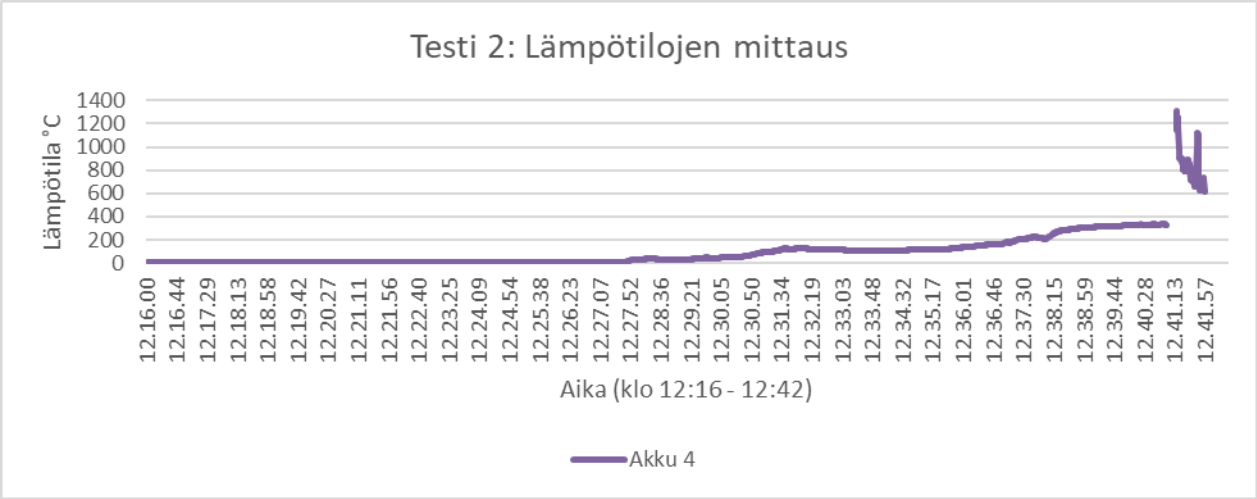
Liite 4 Lämpötilojen mittauskaaviot (testi 2)

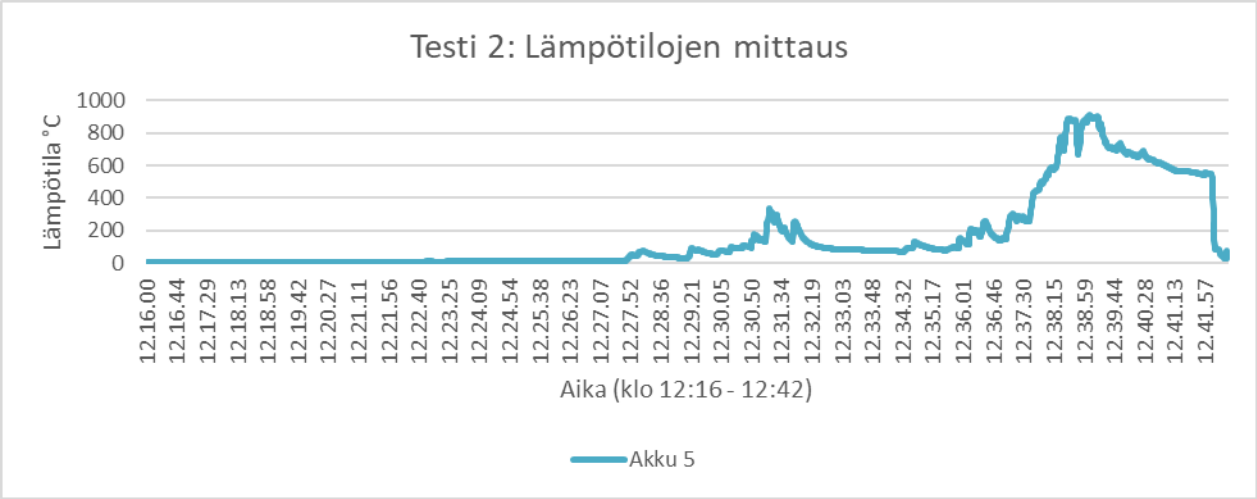


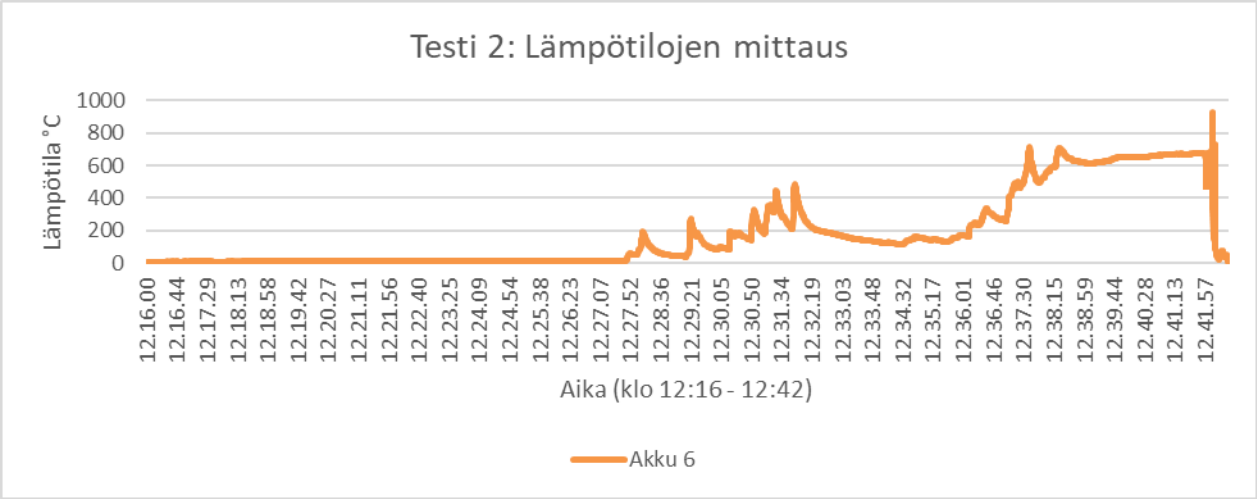


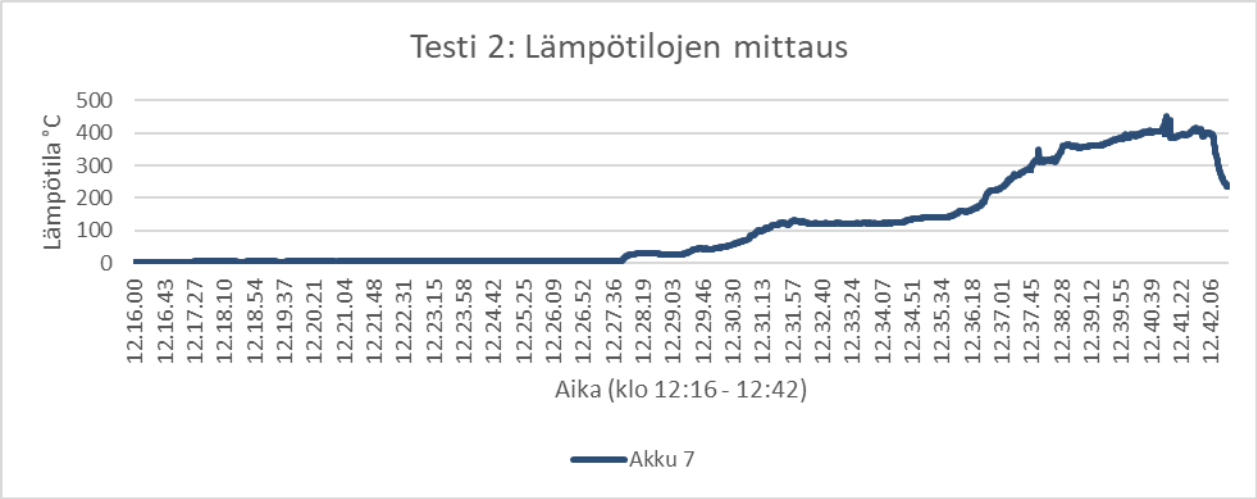

Testi 2: Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
1000
800
600
400
200
0
12.16.00
12.16.44
12.17.29
12.18.13
12.18.58
12.19.42
12.20.27
12.21.11
12.21.56
12.22.40
12.23.25
12.24.09
12.24.54
12.25.38
12.26.23
12.27.07
12.27.52
12.28.36
12.29.21
12.30.05
12.30.50
12.31.34
12.32.19
12.33.03
12.33.48
12.34.32
12.35.17
12.36.01
12.36.46
12.37.30
12.38.15
12.38.59
12.39.44
12.40.28
12.41.13
12.41.57
Aika (klo 12:16 - 12:42)
Akku 2


Testi 2: Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
800
600
400
200
0
12.16.00
12.16.43
12.17.27
12.18.10
12.18.54
12.19.37
12.20.21
12.21.04
12.21.48
12.22.31
12.23.15
12.23.58
12.24.42
12.25.25
12.26.09
12.26.52
12.27.36
12.28.19
12.29.03
12.29.46
12.30.30
12.31.13
12.31.57
12.32.40
12.33.24
12.34.07
12.34.51
12.35.34
12.36.18
12.37.01
12.37.45
12.38.28
12.39.12
12.39.55
12.40.39
12.41.22
12.42.06
Aika (klo 12:16 - 12:42)
Akku 3

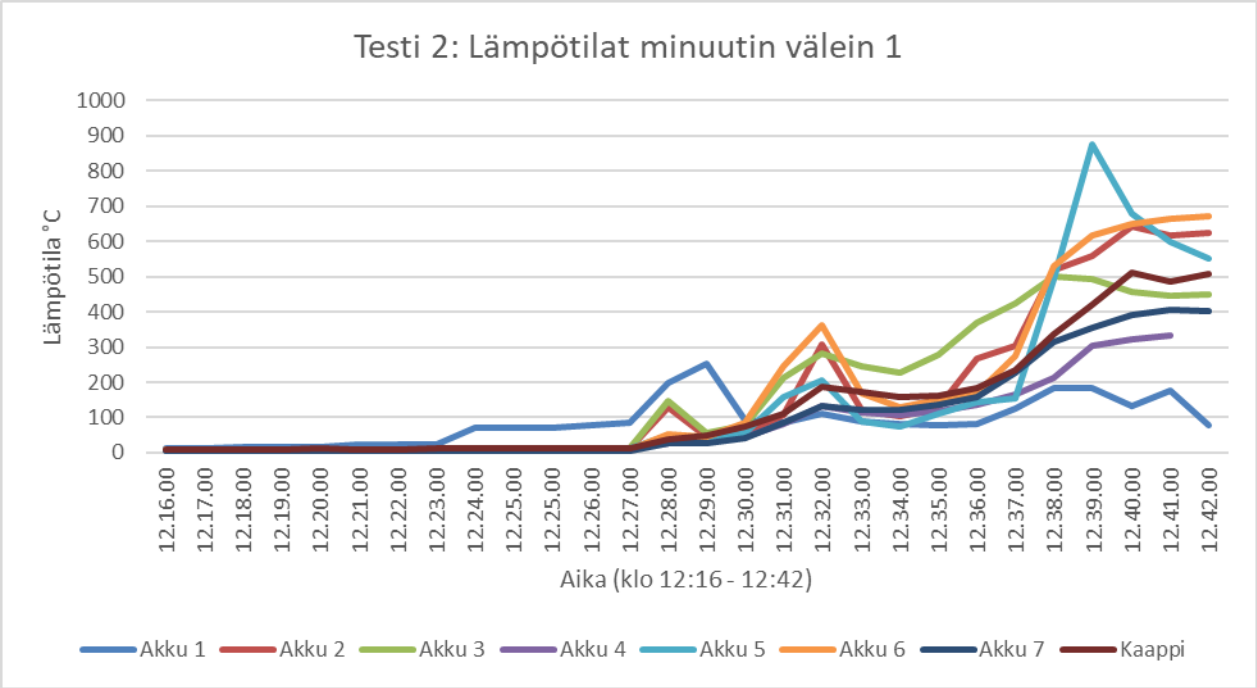

Testi 2: Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
1400
1200
1000
800
600
400
200
0
12.16.00
12.16.44
12.17.29
12.18.13
12.18.58
12.19.42
12.20.27
12.21.11
12.21.56
12.22.40
12.23.25
12.24.09
12.24.54
12.25.38
12.26.23
12.27.07
12.27.52
12.28.36
12.29.21
12.30.05
12.30.50
12.31.34
12.32.19
12.33.03
12.33.48
12.34.32
12.35.17
12.36.01
12.36.46
12.37.30
12.38.15
12.38.59
12.39.44
12.40.28
12.41.13
12.41.57
Aika (klo 12:16 - 12:42)
Akku 4

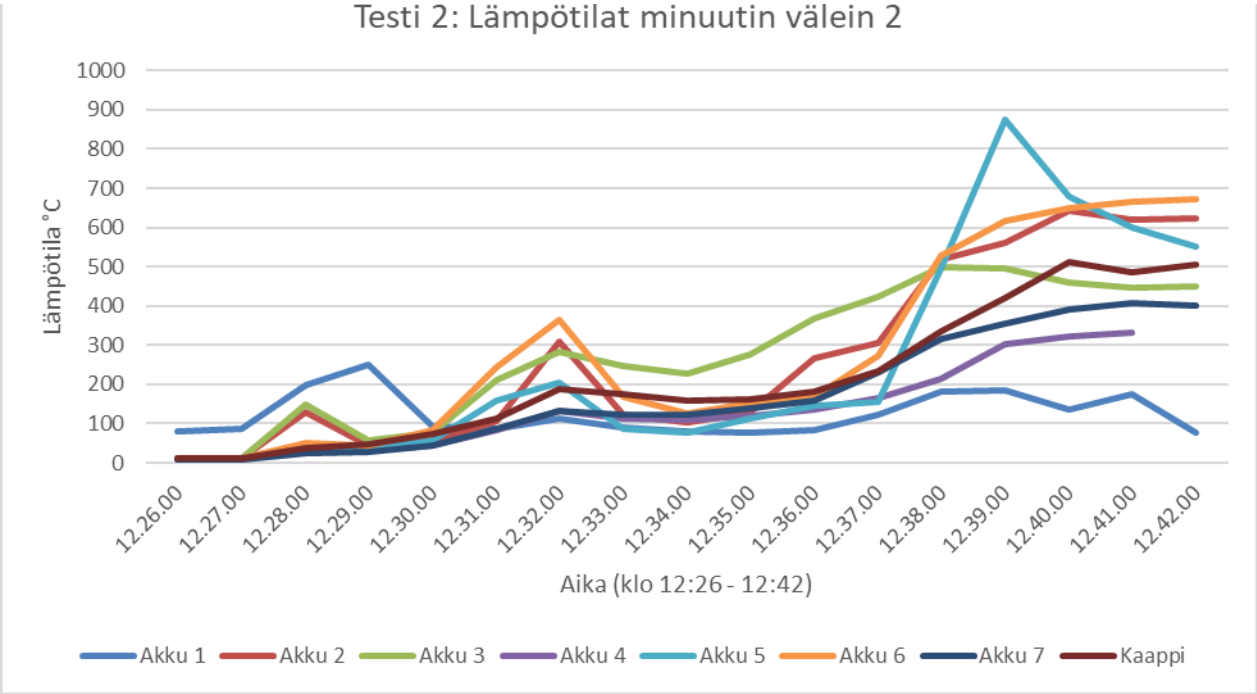

Testi 2: Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
1000
800
600
400
200
0
12.16.00
12.16.44
12.17.29
12.18.13
12.18.58
12.19.42
12.20.27
12.21.11
12.21.56
12.22.40
12.23.25
12.24.09
12.24.54
12.25.38
12.26.23
12.27.07
12.27.52
12.28.36
12.29.21
12.30.05
12.30.50
12.31.34
12.32.19
12.33.03
12.33.48
12.34.32
12.35.17
12.36.01
12.36.46
12.37.30
12.38.15
12.38.59
12.39.44
12.40.28
12.41.13
12.41.57
Aika (klo 12:16 - 12:42)
Akku 5


Testi 2: Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
1000
800
600
400
200
0
12.16.00
12.16.44
12.17.29
12.18.13
12.18.58
12.19.42
12.20.27
12.21.11
12.21.56
12.22.40
12.23.25
12.24.09
12.24.54
12.25.38
12.26.23
12.27.07
12.27.52
12.28.36
12.29.21
12.30.05
12.30.50
12.31.34
12.32.19
12.33.03
12.33.48
12.34.32
12.35.17
12.36.01
12.36.46
12.37.30
12.38.15
12.38.59
12.39.44
12.40.28
12.41.13
12.41.57
Aika (klo 12:16 - 12:42)
Akku 6


Testi 2: Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
500
400
300
200
100
0
12.16.00
12.16.43
12.17.27
12.18.10
12.18.54
12.19.37
12.20.21
12.21.04
12.21.48
12.22.31
12.23.15
12.23.58
12.24.42
12.25.25
12.26.09
12.26.52
12.27.36
12.28.19
12.29.03
12.29.46
12.30.30
12.31.13
12.31.57
12.32.40
12.33.24
12.34.07
12.34.51
12.35.34
12.36.18
12.37.01
12.37.45
12.38.28
12.39.12
12.39.55
12.40.39
12.41.22
12.42.06
Aika (klo 12:16 - 12:42)
Akku 7

Testi 2: Lämpötilojen mittaus
Lämpötila °C
1000
800
600
400
200
0
12.16.00
12.16.44
12.17.29
12.18.13
12.18.58
12.19.42
12.20.27
12.21.11
12.21.56
12.22.40
12.23.25
12.24.09
12.24.54
12.25.38
12.26.23
12.27.07
12.27.52
12.28.36
12.29.21
12.30.05
12.30.50
12.31.34
12.32.19
12.33.03
12.33.48
12.34.32
12.35.17
12.36.01
12.36.46
12.37.30
12.38.15
12.38.59
12.39.44
12.40.28
12.41.13
12.41.57
Aika (klo 12:16 - 12:42)
Kaapin ylälämpötila


Testi 2: Lämpötilat minuutin välein 1
Lämpötila °C
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
12.16.00
12.17.00
12.18.00
12.19.00
12.20.00
12.21.00
12.22.00
12.23.00
12.24.00
12.25.00
12.25.00
12.26.00
12.27.00
12.28.00
12.29.00
12.30.00
12.31.00
12.32.00
12.33.00
12.34.00
12.35.00
12.36.00
12.37.00
12.38.00
12.39.00
12.40.00
12.41.00
12.42.00
Aika (klo 12:16 - 12:42)
Akku 1
Akku 2
Akku 3
Akku 4
Akku 5
Akku 6
Akku 7
Kaappi


Testi 2: Lämpötilat minuutin välein 2
Lämpötila °C
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
12.26.00
12.27.00
12.28.00
12.29.00
12.30.00
12.31.00
12.32.00
12.33.00
12.34.00
12.35.00
12.36.00
12.37.00
12.38.00
12.39.00
12.40.00
12.41.00
12.42.00
Aika (klo 12:26 - 12:42)
Akku 1
Akku 2
Akku 3
Akku 4
Akku 5
Akku 6
Akku 7
Kaappi

Liite 5 Lämpötilojen mittaustaulukko (testi 2)

Mittauskohtien lämpötilat minuutin välein aikajaksolla 10:28 – 10:42

	Akku 1	Akku 2	Akku 3	Akku 4	Akku 5	Akku 6	Akku 7	Kaappi
12.26.00	79,7	10,3	11,6	11	10,5	10,3	6,5	11,1
12.27.00	85,6	10,7	11,8	11	10,6	10,2	6,8	11,8
12.28.00	197,2	130,3	147,9	28,7	47,6	51	25,1	37,2
12.29.00	251	44	57,1	30,6	34,7	43,8	28,3	48,2
12.30.00	91,8	54,6	76,3	43,8	56,9	84,3	43,2	72,5
12.31.00	86	105,2	212,4	81,9	158,8	243,7	86,3	111,5
12.32.00	112,1	308	283,1	132,3	203,8	363,3	131,3	187,3
12.33.00	88,9	122,2	246,6	112,5	87,3	169,9	122	173,7
12.34.00	80,7	102,4	228,6	108,5	75,8	127,4	123	157,4
12.35.00	77,6	128	276,8	118,5	111,3	152,2	137,7	161,4
12.36.00	82,1	266,9	368,8	135,6	145,1	169,4	157,5	182,1
12.37.00	123,8	304,9	424,1	165,6	154,8	272,9	229	234
12.38.00	182,7	519,5	499,7	214	494,3	528,3	314,9	335,7
12.39.00	184	559,6	494,7	303,6	874,9	617,1	356,2	419,7
12.40.00	134,1	642,1	458,1	323	678,7	649,6	389,9	512,4
12.41.00	175,5	618,5	446,9	331,5	598,7	665	407,4	487,2
12.42.00	77,6	624,4	450,5		552,7	673,2	400,8	505,9