

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2025

Joonas Itälä

Akkujen rikkovan testauksen sammutuslaitteiston suunnittelu ja mitoitus



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

18.5.2025 | 37 sivua

Joonas Itälä

Akkujen rikkovan testauksen laitteiston sammutusjärjestelmän suunnittelu ja mitoitus

Tämän opinnäytetyön aiheena oli litiumioniakkumoduulien rikkovan testauksen tutkimusalueen palonsammutuslaitteiston suunnittelu ja mitoitus. Työn tarkoituksena oli vertailla vettä ja nestemäistä hiilidioksidia litiumakkupalon sammutuksessa, laskea tarvittavat sammutusaineiden määrät sekä sammutuksen aikana muodostuvan kaasun määrä. Lisäksi tehtiin kustannustarkastelu laitteistolle.

Työn toimeksiantajana toimi Turun ammattikorkeakoulu. Työn tavoitteena oli tehdä alustavaa tiedonhakua ja suunnittelua, jota voidaan myöhemmin hyödyntää Turun ammattikorkeakoulun tiloihin hankittavan akkujen testausympäristön rakentamisessa.

Opinnäytetyö alkoi lyhyellä katsauksella RIKKOVA-hankkeeseen, jonka jälkeen esiteltiin litiumioniakkuteknologia ja akkupalon sammuttamisen teoria. Tämän jälkeen aloitettiin sammutusjärjestelmän mitoittaminen laskemalla tarvittavat sammutusaineiden määrät, jonka jälkeen mitoitettiin kaasunpoisto. Työn lopussa tarkasteltiin vielä molempien sammutusratkaisujen kustannuksia sekä pohdittiin ratkaisujen kannattavuutta.

Opinnäytetyössä voitiin todeta, että vesisammutus on yksinkertaisin, tehokkain, turvallisimmin sekä kustannustehokkain tapa sammuttaa thermal runaway-tilassa oleva akkupalo kontrolloidussa testiympäristössä.

Avainsanat: Thermal Runaway, Li-ion Akku, Rikkova Testaus, Suunnittelu

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical engineering

18.5.2025 | 37 pages

Joonas Itälä

Designing of a fire suppression system for a research platform for destructive testing of batteries

The subject of this thesis is the design and sizing of a fire suppression system for a research platform for destructive testing of lithium-ion battery modules. The goal of this thesis was to compare water and liquid carbon dioxide in extinguishing lithium battery fires, to calculate the required amounts of extinguishing agents, and to determine the quantity of gas vapors generated during extinguishment. Additionally, a cost analysis for the system was conducted.

This thesis was commissioned by Turku University of Applied Sciences. Its purpose was to conduct preliminary research and planning that could later be applied to the construction of a battery testing environment at Turku University of Applied Sciences.

The thesis includes a brief overview of the RIKKOVA-project, followed by an introduction to lithium-ion battery technology and the theory behind battery fire suppression. Subsequently, the design of the suppression system commenced by calculating the required amounts of extinguishing agents and sizing the gas ventilation. Finally, the thesis examined the costs of both extinguishing solutions and evaluates their cost-effectiveness.

As a conclusion, water-based extinguishment is the simplest, most effective, safest, and cost-efficient method for suppressing thermal runaway battery fires in a controlled test environment.

Keywords: Thermal Runaway, Li-ion Battery, Destructive Testing, Design

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	6
1 Johdanto	7
2 Taustatiedot	8
2.1 RIKKOVA-investointihanke	8
2.2 Litiumioniakkuteknologia	9
2.3 Lämpöryntäys (Thermal runaway)	9
2.4 Suunnittelun aloitus	10
2.5 Akkumoduuli	11
3 Sammutusjärjestelmä	14
3.1 Vesisammutus	14
3.2 Hiilidioksidisammutus	17
3.3 Mekaaniset ratkaisut	19
4 Kaasunpoisto	22
5 Kustannukset	26
5.1 Investointikustannukset	26
5.2 Käyttökustannukset	30
6 Johtopäätökset ja yhteenveto	31
Lähteet	34

Kuvat

Kuva 1 Akkujen lämpötilankestoa testaava testikammio (Russells tech n.d).	11
Kuva 2 Skoda Enyaq iV sähköauton akusto (Saariluoma 2025).	12
Kuva 3 VW MEB ID4/ID3 8S akkumoduuli (Secondlife EV Batteries 2025).	13

Kuva 4 45kg kaasupullo sekä tekniset tiedot (Unique Fire Holdings n.d).	18
Kuva 5 Vesisammutukselle esitetty mekaaninen ratkaisu.	19
Kuva 6 Sivukuvanto hiilidioksidijärjestelmän toiminnasta.	20
Kuva 7 Yläkuvanto hiilidioksidijärjestelmän toiminnasta.	21
Kuva 8 Magneettiventtiili 2M15 1/2 tuumaa (Hpcontrol n.d).	26
Kuva 9 Kupariputki Cupori 110 Premium kova 12x10 (K-rauta n.d).	27
Kuva 10 PLC-aloitussarja 6DI (4D/A) 4DO 24V (Elfa Disrelec Suomi n.d. a).	27
Kuva 11 Lämpöanturi -50 ... 400°C (Elfa Disrelec Suomi n.d. b).	28
Kuva 12 Painelähetin, 0 ... 0.700bar, 4...20 mA (Elfa Disrelec Suomi n.d. c).	29
Kuva 13 TGS2600 – Kaasuanturi (Elfa Disrelec Suomi n.d. d).	29

Taulukot

Taulukko 1 Taulukko litiumioniakkujen yleisimmistä kemioista	9
--	---

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

Thermal Runaway	Lämpöryntäys / Terminen karkaaminen
CO ₂	Hiilidioksidi
NMC	Lithium - Nickel - Manganese akkukemia
PLC	Ohjelmoitava logiikka

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on suunnitella litiumioniakkujen rikkovaan testaukseen tarkoitettun tutkimusalustan palonsammutuslaitteisto ja mitoittaa soveltuva kaasunpoistojärjestelmä.

Työssä vertaillaan nestemäistä hiilidioksidia ja vesisammutusta, sekä haetaan molemmille soveltuvaa mekaanista ratkaisua. Sammutuksessa muodostuvan kaasun määrän mukaan mitoitetaan kaasunpoistojärjestelmä. Lisäksi laaditaan myös kustannusarviot laitteistoille ja materiaaleille, sekä mitoitetaan testikammio. Suunnittelun ja mitoituksen vertailukohtana käytetään Skoda Enyaq akkumoduulin palamisen mukaista tilannetta.

Tällaisella tutkimusalustalla voidaan kerätä tietoa akkujen hallitsemattomista palotilanteista eli lämpöryntäyksistä (Thermal Runaway), jotka tulevat liikenteen sähköistymisen myötä yleistymään merkittävästi tulevaisuudessa. Tämä lisää tietämystä akkujen käyttäytymisestä palotilanteessa ja siten myös akkujen turvallisuudesta. Ensiarvoisen tärkeää tällaiselle järjestelmälle on kuitenkin toimiva sekä tehokas sammutusjärjestelmä, joka kykenee tukahduttamaan vaikeasti sammutettavan akkupalon.

2 Taustatiedot

Opinnäytetyön toimeksiantaja on Turun ammattikorkeakoulu ja lähtökohtana toimii Akkujen rikkova testaus (investointihanke) – RIKKOVA, jonka tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa Turun AMK:n EduCity - kampukselle tutkimusalusta akkujen turvalliseen testaamiseen ääriolosuhteissa (Turun Ammattikorkeakoulu 2024, 2). Opinnäytetyön tekijä on tehnyt aikaisempaa tutkimustyötä liittyen olemassaoleviin kaupallisiin ratkaisuihin akkujen testausympäristöistä, vertailut mahdollisia sammutusmenetelmiä, sekä analysoinut akkupaloihin liittyvää teoriaa, vaaratekijöitä ja ympäristöriskejä.

2.1 RIKKOVA-investointihanke

Akkujen rikkova testaus (investointihanke) – RIKKOVA on osana Uudistuva ja osaava Suomi 2021-2027 EU:n alue- ja rakennepolitiikan ohjelmaa.

Rahoittajana toimii Uudenmaan liitto. Hanke toteutetaan Turun ammattikorkeakoulu Oy:lle toimintalinjana hiilineutraali suomi ja erityistavoitteena kiertotalouteen siirtymisen edistäminen.

Keskeiset kohderyhmät hankkeelle ovat ajoneuvojen akkujen kierrätykseen ja kiertotalouteen liittyvät toimijat. Hankkeessa rakennettava testauslaitteisto mahdollistaa akkujen testaamisen sekä käyttäytymisen simuloinnin turvallisesti ja siihen liittyvän analytiikan kehittämisen. Se edistää akkujen vanhenemismekanismien ymmärrystä, joka lisää yritysten edellytyksiä harjoittaa kiertotalouden mukaista liiketoimintaa. (Turun Ammattikorkeakoulu 2024, 4.)

2.2 Litiumioniakkuteknologia

Akkujen paloturvallisuuteen sekä ominaisuuksiin vaikuttavat merkittävästi sekä elektrolyytin tyyppi että katodimateriaalina käytettävä metallioksidi. Näiden yhdistelmää kutsutaan akkukemiaksi. Eri akkukemioilla on omat erityispiirteensä, kuten kyky varastoida energiaa. Varauskyky ilmoitetaan yleensä wattitunteina kilogrammaa kohden (Wh/kg). Tavalliset litiumioni kemiat pystyvät varastoimaan noin 120–150 Wh/kg. (Battery University 2024.) Yleisin sähköautokäytössä oleva akkukemia on NMC (Automotive Manufacturing Solutions 2024).

Chemistry	Lithium Cobalt Oxide	Lithium Manganese Oxide	Lithium Nickel Manganese Oxide	Lithium Iron Phosphate	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide	Lithium Titanate Oxide
Short form	Li-cobalt	Li-manganese	NMC	Li-phosphate	Li-aluminum	Li-titanate
Abbreviation	LiCoO ₂ (LCO)	LiMn ₂ O ₄ (LMO)	LiNiMnCoO ₂ (NMC)	LiFePO ₄ (LFP)	LiNiCoAlO ₂ (NCA)	Li ₂ TiO ₃ (common) (LTO)
Nominal voltage	3.60V	3.70V (3.80V)	3.60V (3.70V)	3.20, 3.30V	3.60V	2.40V
Full charge	4.20V	4.20V	4.20V (or higher)	3.65V	4.20V	2.85V
Full discharge	3.00V	3.00V	3.00V	2.50V	3.00V	1.80V
Minimal voltage	2.50V	2.50V	2.50V	2.00V	2.50V	1.50V (est.)
Specific Energy	150–200Wh/kg	100–150Wh/kg	150–220Wh/kg	90–120Wh/kg	200–260Wh/kg	70–80Wh/kg

Taulukko 1. Taulukko litiumioniakkujen yleisimmistä kemioista (Battery University 2024).

2.3 Lämpöryntäys (Thermal runaway)

Litiumioniakun lämpöryntäys on vaarallinen ilmiö, jossa akun lämpötila nousee hallitsemattomasti, mikä voi johtaa kaasuuntumiseen, rakenteiden pettämiseen ja tulipaloon. Tämä itsestään etenevä ketjureaktio käynnistyy esimerkiksi akun ylikuumenemisen, rakenteellisen vaurion tai ylilatauksen seurauksena. (Presto n.d. b)

Reaktion alkuvaiheessa akusta vapautuu näkymättömiä kaasuja, joita voidaan havaita lämpökameralla tai kaasusensoreilla. Jos reaktio jatkuu, akku voi revetä ja vapauttaa palavia kaasuja, jotka saattavat syttyä liekkisuihkuina. Kaikkiin tapauksiin ei kuitenkaan liity näkyvää liekipalaa. Akkupalon sammuttaminen on ongelmallista, sillä se sisältää itsessään kaikki palamiseen tarvittavat elementit. Lämpöä sekä happea vapautuu palossa kiihtyvällä tahdilla ja akku itsessään, sekä sen ympäröivät rakenteet toimivat palavana aineena. (Presto n.d. b)

Lämpöryntäyksen riskiä voidaan vähentää tehokkailla akunhallintajärjestelmillä, turvallisilla lataustavoilla ja välttämällä akun altistamista iskuille tai korkeille lämpötiloille. Akun oikea käyttö ja huolto ovat avainasemassa sen turvallisuuden varmistamisessa. (Presto n.d. b)

2.4 Suunnittelun aloitus

Kaupallisilta markkinoilta löytyy laajalti eri kokoluokkiin ja testausmenetelmiin soveltuvia testausympäristöjä akkumoduuleille ja jopa kokonaisille sähköautoille. Tällaista palvelua ei kuitenkaan ole hakijoiden tietojen mukaan tarjolla Suomessa. Koska kokonaisen testauslaitteiston suunnittelu olisi aivan liian laaja aihe opinnäytetyölle, on työ rajattu keskittymään pelkästään sammutusjärjestelmään, sekä siihen liittyvään kaasunpoistoon. Sammutusjärjestelmien vertailu on myös rajattu kahteen erilaiseen järjestelmään taustatutkimuksissa kerätyn tiedon perusteella.



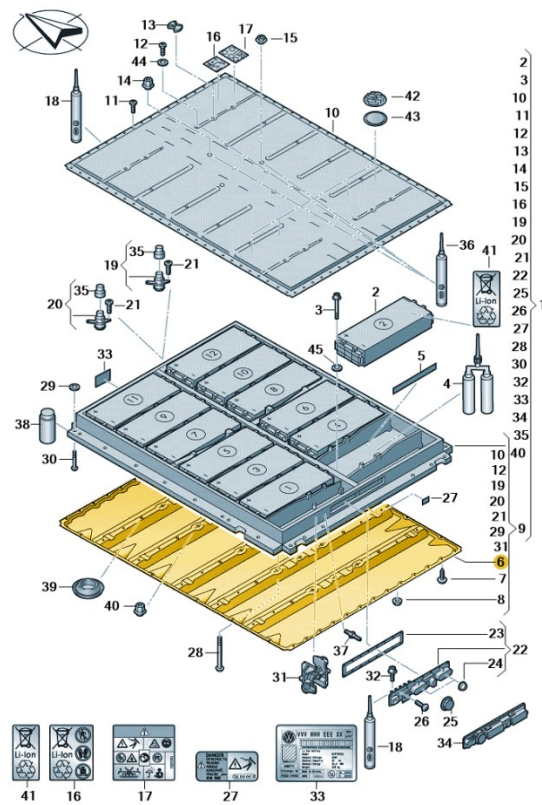
Kuva 1 Akkujen lämpötilankestoa testaava testikammio (Russells tech n.d).

Työhön valitut sammutusjärjestelmät ovat vesisammutus, jossa tavallista vesijohtovettä käytetään akkupalon sammuttamiseen. Tämä on hyvin yleinen menetelmä sen yksinkertaisuuden ja kustannustehokkuuden myötä. Toisena tarkastelun kohteena olevassa järjestelmässä käytetään nestemäistä hiilidioksidia. Tämä ratkaisu voisi tarjota paremman jäähdytyksen akkumoduulille, sillä hiilidioksidi sitoo paljon energiaa muuttuessaan nesteestä kaasuksi. Se myös syrjäyttäisi happea muuttuessaan kaasuksi.

Kustannustehokkuus ei ole päällimmäinen murhe ainakaan laitteiston osalta, sillä testialustoja valmistettaisiin vain yksi kappale. Laitteiston käyttökustannukset siis merkitsevät enemmän tässä tapauksessa.

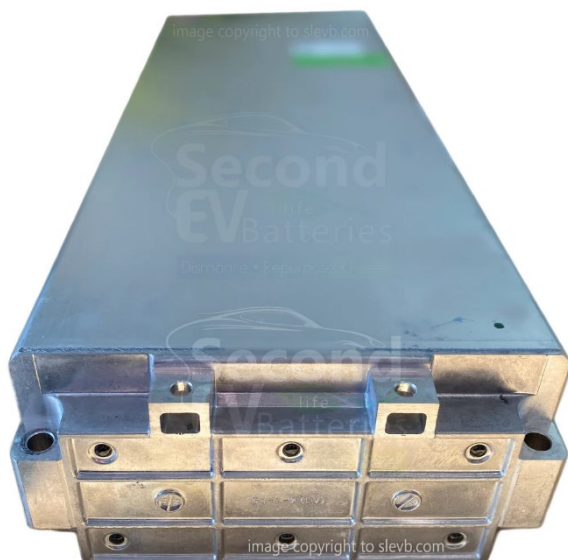
2.5 Akkumoduuli

Työssä tehtävät mitoitukset perustuvat Skoda Enyaq iV sähköauton akkumoduuliin. On siis selvitettävä kyseisen moduulin tekniset tiedot ennen laskelmien aloittamista.



Kuva 2 Skoda Enyaq iV sähköauton akusto (Saariluoma 2025).

Kuvasta 2 nähdään, että akusto koostuu 12 kappaleesta VW MEB ID4/ID3 8S akkumoduuleja. Seuraavaksi tarkastellaan yhden akkumoduulin tietoja.



Kuva 3 VW MEB ID4/ID3 8S akkumoduuli (Secondlife EV Batteries 2025).

Kuvassa 3 nähdään yksittäinen akkumoduuli. Sen pituus on 590mm, leveys 225mm ja korkeus 110mm. Paino 32kg. Yhden moduulin kapasiteetti on 234 Ah / 6,85 kWh. Nimellisjännite 29,6V. Huippuvirta 10 sekunnin ajan 1 000A. (Secondlife EV batteries 2025.)

3 Sammutusjärjestelmä

Kun lähdetään suunnittelemaan ja vertailemaan vesi- ja hiilidioksidisammutusjärjestelmiä, on laskettava paljonko sammutusvettä tai hiilidioksidia tarvitaan kokonaisuudessaan palon sammuttamiseen. Koska tällainen laskutoimitus on haastava tehdä ilman oikeita kokeita akun käyttäytymisestä palotilanteessa, on lähdettävä liikkeelle johtamalla tiedetyistä akun arvoista ja veden, sekä hiilidioksidin ominaisuuksista kaava, jolla määritetään teoreettinen ideaalitilanne, jossa koko akun sähköenergiasäilytys sitoutuu sammuttavaan aineeseen. Laskuista jätetään pois useita muuttujia, kuten akkua ympäröivien muovi ja alumiinirakenteiden palaminen. Laskuista saadut sammutusainemäärät ovat todellisuudessa mahdollisesti pienempiä, kun sammutus aloitetaan hyvissä ajoin, eivätkä esimerkiksi jokainen akkukenno tai muut rakenteet ole vielä ehtineet syttyä palamaan.

3.1 Vesisammutus

Veden käyttö akkupalojen hallinnassa ja sammutuksessa on jo ennestään todettu tehokkaaksi menetelmäksi. Varsinkin hallitussa ympäristössä vesisammutuksella voidaan saavuttaa tehokas vaikutus akkupaloon. Vesi tarjoaa tehokkaan jäähdytyksen, joka auttaa thermal runaway tilanteessa ehkäisemään akun uudelleensyttymistä. Akun upottaminen veteen tarjoaa parhaan mahdollisen sammutustehokkuuden. (Tukes 2021.)

Aloitetaan laskemalla akkumoduulin kokonaisenergia kilojouleina. Se saadaan sähköenergian kaavalla:

$$E = U \cdot I \cdot t$$

Kaava 1. Sähköenergian laskukaava

Missä: E = akun energia jouleina

U = akun jännite

I = akun virta

t = aika

Sijoitetaan arvot kaavaan, jolloin saadaan akun energiaksi 24 935 kilojoulea. Seuraavaksi lasketaan tarvittavan veden määrä, joka saadaan höyrytettyä tällä energialla. Oletetaan, että sammutusveden lämpötila on 20 celsiusastetta. Se lasketaan lämpöenergian kaavalla (Peda.net n.d. a).

$$m = \frac{E}{c \cdot \Delta T + r}$$

Kaava 2. Lämpöenergian kaava

Missä:

E = akun energia kilojouleina

c = veden ominaislämpökapasiteetti (4,186 kJ/kg·K)

ΔT = veden lämpötilan muutos (80 celsiusastetta)

r = veden höyrytyslämpö (2 260 kJ/kg)

m = tarvittavan jäähdytysveden määrä (kg)

(Peda.net n.d. b; Peda.net n.d. c).

Tulokseksi saadaan 9,6 kg vettä.

Seuraavaksi lasketaan veden määrä, joka saadaan kiehumaan tällä energialla. Käytetään samaa kaavaa kuin aikaisemmin, mutta ilman höyrystymislämpöä:

$$m = \frac{E}{c \cdot \Delta T}$$

Kaava 3. Lämpöenergian kaava ilman höyrystymislämpöä

Tulokseksi saadaan 74,4 kg vettä

Todellisuudessa tarvittavan sammutusveden määrä tulisi olemaan saatujen arvojen välillä, sillä ei ole taattua, että kaikki vesi päätyy höyrystymään tai kiehumaan. Valitaan akun veteen upottaminen työssä vertailtavaksi sammutustavaksi. Seuraavaksi lasketaan akun upottamiseen tarvittava veden määrä.

Alustavalla suunnittelulla testikammion mitat olisivat seuraavat: leveys 625mm, syvyys 1 000mm ja korkeus 500mm. Näillä mitoilla testattavan akun ympärille jää 20cm tyhjää tilaa, sekä korkeussuunnassa hieman enemmän. Näin on mahdollista testata myös hieman isompia akkuja kun mitoituksessa käytettävä esimerkki.

Koko kammion tilavuus siis olisi 312,5L. Mitoitukseen käytettävän akun tilavuus on 14,6L. Jotta tiedetään akun upottamiseen tarvittava vesimäärä, on laskettava akun korkeimpaan kohtaan asti kammion tilavuus ja vähennettävä siitä sitten akun tilavuus. Kun akun korkeus on 110mm, täytyy vedenpinnan olla vähintään samalla tasolla. Tämä vaatisi 68,75L vettä ilman akkua. Akun kanssa siis 54,15L. Vesijäähdytyksen tapauksessa lasketuista vesimääristä lähimpänä todellista tarvittavaa määrää olisi 74,4L. Ottaen huomioon että kohtalaisen pieni määrä tulisi oikeasti höyrystymään, varsinkin jos sammutus aloitetaan hyvissä ajoin kun vain osa akun kennoista palaa. Tarvittava määrä olisi hyvä olla ainakin akun täydelliseen upottamiseen tarvittava määrä, mutta todennäköisesti pienempi, kuin pahimman mahdollisen tapauksen määrä, jolloin koko akun energia sitoutuisi veteen. Oletetaan siis akun täydelliseen sammuttamiseen tarvittavan vesimäärän olevan 70L tulvittamalla.

3.2 Hiilidioksidisammutus

Nestemäistä hiilidioksidia käytetään laajalti palonhallinnassa niin teollisuudessa kuin yksityiskäytössäkin. Hiilidioksidisammuttimia käytetään kotitalouksissa pienien alkupalojen tukahduttamiseen vesisammuttimien ja jauhesammuttimien ohella. Ne ovat turvallinen vaihtoehto esimerkiksi elektroniikkapalon sammutuksessa. (Presto n.d. a) Teollisuudessa hiilidioksidisäiliöt on usein kytketty sammutusjärjestelmään, jolla voidaan nopeasti tulvittaa suuria tiloja hiilidioksidikaasulla.

Hiilidioksidin tehokkuus palonhallinnassa perustuu hapen syrjäyttämiseen. Akkupaloon liittyvässä lämpökarkaamisessa palo kuitenkin ruokkii itse itseään hapella, jota vapautuu kemiallisen reaktion seurauksena. Vaikka hiilidioksidi vapautuessaan onkin hyvin kylmää, kaasumaisessa olomuodossaan se on huono johde. Tämä saattaa muodostua ongelmaksi, sillä lämmön poisjohtaminen ja akun jäähtyminen ovat avaintekijöitä tehokkaan sammutuksen kannalta. Jos hiilidioksidin jäähdytysteho ei riitä lämpökarkaamisen pysäyttämiseen, palo saattaa jatkua akun sisällä, vaikkei ulkopuolella liekkejä näkyisikään.

Lasketaan seuraavaksi samaa kaavaa käyttäen, paljonko hiilidioksidia vaaditaan absorboimaan akun energia. Laskukaavaa, jossa höyrystymistä ei oteta huomioon, ei tarvitse käyttää, sillä höyrystyminen tapahtuu nestemäiselle hiilidioksidille välittömästi sen poistuessa paineistetusta säiliöstä.

CO₂ sammuttimen kaasusuihku on lämpötilaltaan -78 celsiusastetta (Safelincs 2024). Otetaan tämä lämpötilan lähtöpisteeksi ja oletetaan, että lämpeneminen jatkuu aina sataan asteeseen asti. Perustellaan tämä hiilidioksidin nopealla laajenemisella, jolloin kaasu poistuu nopeasti kammioista, eikä ehdi lämmentä kovin kuumaksi.

$$m = \frac{E}{c \cdot \Delta T + r}$$

Kaava 4. Lämpöenergian kaava

Missä:

E = akun energia kilojouleina

c = hiilidioksidin ominaislämpökapasiteetti (0,82 kJ/kg·K)

ΔT = hiilidioksidin lämpötilan muutos (178 celsiusastetta)

r = hiilidioksidin höyrystymislämpö (573 kJ/kg)

m = tarvittavan hiilidioksidin määrä (kg)

(Peda.net n.d. b; Peda.net n.d. c).

Tulokseksi laskukaavasta saadaan 34kg hiilidioksidia. Tämä on teoreettinen arvo ideaalitilanteesta, jossa kaikki hiilidioksidin lämpenemiseen sekä höyrystymiseen kuuluva energia olisi peräisin palavasta akusta. Määrän ollessa jo valmiiksi suhteellisen suuri, ja oikeassa sammutustilanteessa tarvittava määrä voi olla jopa paljon suurempi, valitaan hiilidioksidisammutukseen 45kg hiilidioksidipullo.

45kg Seamless Cylinder with CO2 Gas

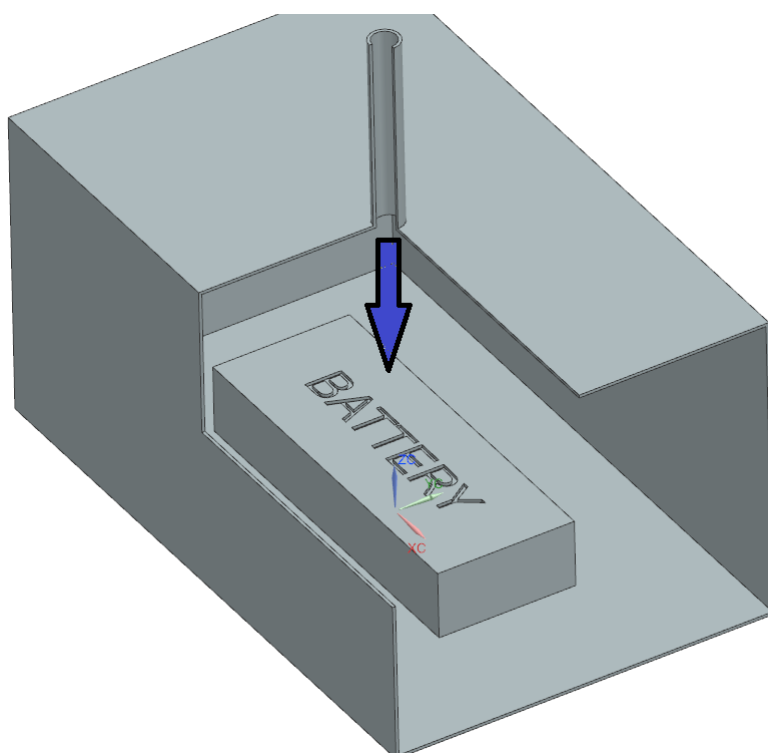


TECHNICAL DATA	
Part No.	CYL-N
Water Capacity	68L
CO2 Gas Capacity	45kg
Working Pressure	150 bar
Test Pressure	225 bar
Empty Weight	Approx. 68kg
Material	Mn Steel
Manufactured	GB5099-1-2017

Kuva 4 45kg kaasupullo sekä tekniset tiedot (Unique Fire Holdings n.d).

3.3 Mekaaniset ratkaisut

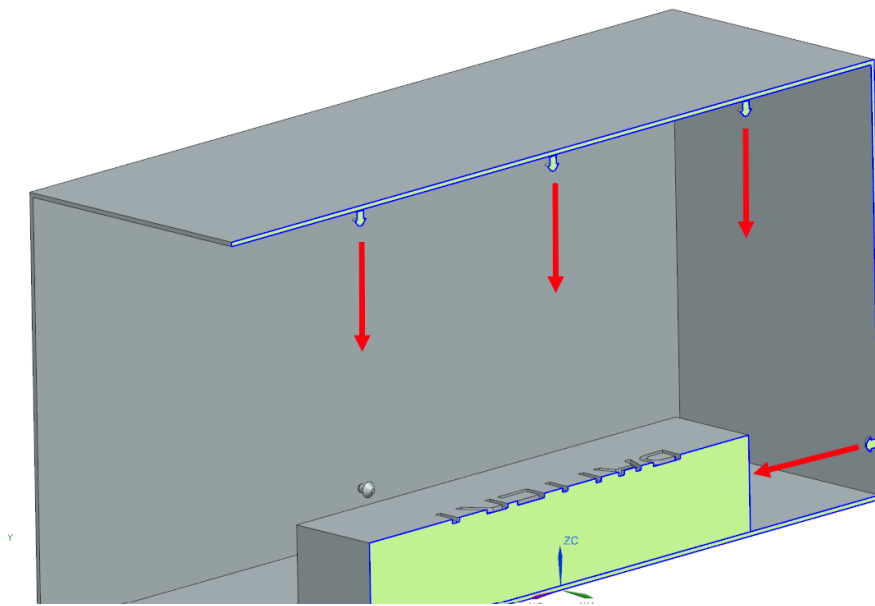
Tässä osiossa esitellään molemmille sammutusjärjestelmille yksilöity mekaaninen ratkaisu. Vesisammutuksen tapauksessa kammioon tulvitetaan tarvittava määrä sammutusvettä esimerkiksi kammion kattoon sijoitettavasta putkesta. Tällöin sammutusvesi suihkuu palavan akun päälle ja alkaa heti jäähdyttää tehokkaasti kammion täytyessä vedellä. Venttiili ohjaa sammutusveden käyttöä ja on yhteydessä ohjausyksikköön, joka saa käskynsä antureilta (lämpötila-, savuilmaisin, paineilmaisin). Paineenkorotuspumppua voidaan käyttää, jos halutaan vesijohtoverkkoa vahvempi paine. Vedenpoistojärjestelmä kerää käytetyn sammutusveden myöhempää käsittelyä varten.



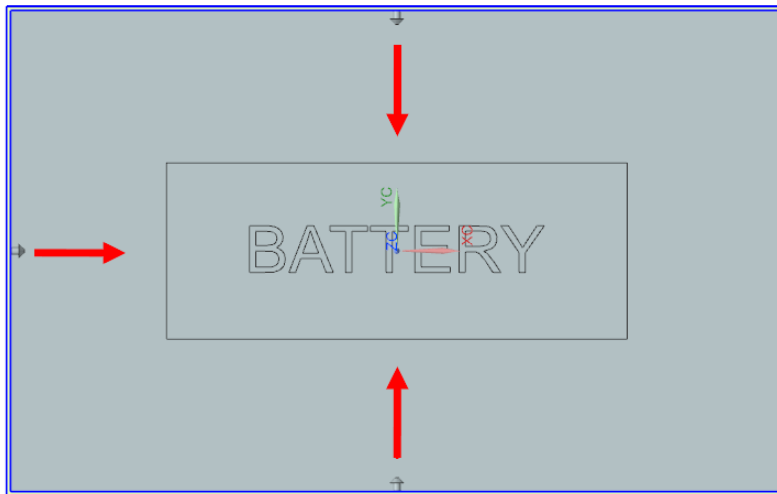
Kuva 5 Vesisammutukselle esitetty mekaaninen ratkaisu.

Kuvassa 5 nähdään havainnollistava luonnos testikammioista, sekä miten vesi päästetään kammioon akun päälle nuolen osoittamassa suunnassa. Osa kammioista on leikattu pois paremman havainnollistamisen saavuttamiseksi.

Hiilidioksidijärjestelmälle toimivin mekaaninen rakaisu olisi sijoittaa akkuun kohdistettuja hiilidioksidisuuttimia ympäri kammiota. Tämä voisi tarjota tehokkaamman sammutustehon, kuin esimerkiksi vain kattoon sijoitetut suuttimet ja samalla maksimoida jäähdytystehon. Muilta osin järjestelmä toimisi samalla periaatteella kuin vesisammutuksen ratkaisu. Hiilidioksidin vapautus on automatisoitu solenoidiventtiilillä, joka saa käskynsä antureilta. Kun palo havaitaan jonkin anturin kautta, venttiili aukeaa.



Kuva 6 Sivukuvanto hiilidioksidijärjestelmän toiminnasta.



Kuva 7 Yläkuvanto hiilidioksidijärjestelmän toiminnasta.

4 Kaasunpoisto

Kaasunpoistoa suunnitellessa on tärkeä tietää tarvittava poistokapasiteetti. Tämän selvittämiseksi täytyy laskea paljonko vesi sekä hiilidioksidi laajenevat höyrystyessään. Aloitetaan laskemalla vesilitran ainemäärä n . Käytetään ainemäärän laskukaavaa (Peda.net n.d. d).

$$n = \frac{1\text{kg}}{0,018015\text{kg/mol}} \approx 55,5 \text{ mol}$$

Kaava 5. Ainemäärän laskukaava

Missä:

Veden nestetiheys 1L = 1kg

Veden moolimassa = 18,015 g/mol

Höyrymuodostuksen lämpötila: 100 °C (373,15 K).

Paine: 1 atm (101 325 Pa).

Ideaalikaasun vakio: $R=8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$.

(Peda.net n.d. a; Peda.net n.d. d).

Nyt voidaan käyttää kaasujen tilanyhtälöä, jolla ratkaistaan tilavuus (Omaan Tahtiin Fysiikkaa n.d).

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Kaava 6. Kaasujen tilanyhtälö

Missä:

V = tilavuus

n = 55,5 mol

R = 8,314 J/(mol·K)

T = 100 °C (373,15 K)

P = 1 atm (101325 Pa)

Tulokseksi saadaan noin 1 700 litraa höyryä per litra vettä. Aikaisempien laskujen perusteella suurin mahdollinen höyrystyvän veden määrä on 9,6L. Kun sammutusvettä tarvitaan 70L, oletetaan, että noin 5% eli 3,5L höyrystyy. Tällöin höyryn määrä olisi 5 950L. Tämä oletus perustuu siihen, että veden höyrystyminen vaatii paljon suuremman määrän energiaa kuin lämpeneminen. Höyryä alkaa muodostua vasta veden ollessa tarpeeksi kuumaa, jolloin suurin osa akun energiasta kuluu sammutusveden lämpenemiseen.

Toistetaan samat laskut hiilidioksidille. Aloitetaan laskemalla hiilidioksidin moolimäärä:

$$n = \frac{0,82\text{kg}}{0,040\text{kg/mol}} \approx 20,5 \text{ mol}$$

Kaava 7. Ainemäärän laskukaava

Missä:

Hiilidioksidin nestetiheys: 1L = 0,82kg

Hiilidioksidin moolimassa = 44g/mol

(Air Liquide Finland Oy 2025)

Lasketaan litrasta nestemäistä hiilidioksidia saatavan hiilidioksidikaasun määrä kaasujen tilanyhtälöllä:

$$V = \frac{nRT}{P}$$

Kaava 8. Kaasujen tilanyhtälö

Missä:

$n = 20,5 \text{ mol}$

$R = 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

$T = 0 \text{ }^\circ\text{C (273 K)}$

$P = 1 \text{ atm (101325 Pa)}$

Tulokseksi saadaan 459 litraa kaasumaista hiilidioksidia. Pidetään tätä luotettavana tuloksena Woikosken nettisivuihin vedoten, jossa kerrotaan, että yhdestä nestemäisestä hiilidioksidilitrasta saadaan noin 440 litraa kaasumaista hiilidioksidia (Woikoski n.d).

Sammutukseen tarvittavan hiilidioksidimäärän ollessa 34kg, olisi siitä muodostuvan höyryn määrä 15 606 litraa.

Seuraavaksi lasketaan kaasunpoistolle tarvittava kapasiteetti, kun tiedetään poistettavan hiilidioksidin, sekä vesihöyryn määrä.

Oletetaan, että vettä käytettäessä aiemmin arvioitu 5 950 litraa höyryä vapautuisi kammiossa 60 sekunnin kuluessa. Lasketaan tästä muodostuvan vesihöyryn määrä sekunnissa.

$$\frac{5\,950L}{60s} = 99,16L/s$$

Seuraavaksi lasketaan hiilidioksidisammutuksessa vapautuvan kaasun määrä sekunnissa, olettaen sammutuksen kestoksi 60 sekuntia:

$$\frac{15\,606L}{60s} = 260,1L/s$$

Nämä tulokset kertovat suoraan, kuinka paljon kaasua kammioista pitää poistaa sekunnissa sammutuksen aikana, jotta paine ei pääse nousemaan.

5 Kustannukset

Tässä osiossa tarkastellaan testauskammion sammutusjärjestelmien kustannuksia. Kustannuslaskelmat perustuvat järjestelmien keskeisiin komponentteihin, kuten suihkutusjärjestelmään, venttiileihin, sekä ohjausjärjestelmään. Komponenttien ollessa pitkälti samanlaiset molemmissa järjestelmissä, laaditaan molempia järjestelmiä koskeva ”investointikustannukset” laskelma. Suurin kustannusero tulee eri järjestelmien käyttökustannuksista, joten perehdytään niihin erillisessä osiossa.

Kustannusarvion tavoitteena on antaa realistinen kuva järjestelmän hankinta- ja käyttökustannuksista. Laskelma auttaa arvioimaan ja vertaamaan kummankin järjestelmän investoinnin kannattavuutta.

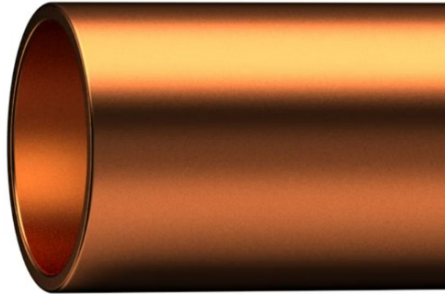
5.1 Investointikustannukset

Sammutusaine vapautetaan kammioon PLC logiikan ohjaaman magneettiventtiilin kautta. Sammutus alkaa automaattisesti, kun anturit havaitsevat palotilanteen ja venttiili aukeaa.



Kuva 8 Magneettiventtiili 2M15 1/2 tuumaa (Hpcontrol n.d).

Käytetään esimerkkinä kuvan 8 mukaista venttiiliä. Hinta noin 25 euroa (Hpcontrol n.d). Valitaan seuraavaksi järjestelmässä käytettävä putki.



Kuva 9 Kupariputki Cupori 110 Premium kova 12x10 (K-rauta n.d).

Valitaan kuvan 9 mukainen ulkohalkaisijaltaan 12mm oleva kupariputki. Hinta ilmoitetaan olevan 9,50 euroa metriltä. Järjestelmän rakentamiseen riittää arviolta 5 metriä putkea. Tällöin kustannukset olisivat 47,50 euroa. (K-rauta n.d.)



Kuva 10 PLC-aloitussarja 6DI (4D/A) 4DO 24V (Elfa Disrelec Suomi n.d. a).

Sammutusjärjestelmän ohjaukseen valitaan kuvan 10 mukainen Schneider Electricin valmistama PLC logiikkaohjain jossa on kuusi paikkaa tuleville signaaleille ja neljä relelähtöä. Arvonlisäverollinen hinta tuotteelle on ilmoitettu olevan 292,42 euroa (Elfa Disrelec Suomi n.d. a)

Antureita sammutusjärjestelmästä tulisi löytyä kolmea tyyppiä palon havaitsemiseksi joka tilanteessa. Nämä ovat lämpöanturi, joka tunnistaa kammiossa äkillisen lämpötilan nousun, kaasunilmaisin, joka havaitsee jo palon ensivaiheessa muodostuvat kaasut, sekä paineanturi, joka aistii äkillisen paineen muutoksen kammiossa ja käynnistää sammutuksen välittömästi esimerkiksi räjähdysten tapahtuessa. Aloitetaan lämpöanturilla.



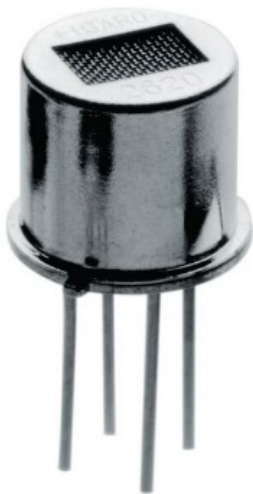
Kuva 11 Lämpöanturi -50 ... 400°C (Elfa Disrelec Suomi n.d. b).

Kuvassa 11 nähdään valittu lämpöanturi. Ruostumaton teräs tarjoaa hyvän suojan vaativiin olosuhteisiin testikammiossa. Anturin mitta-asteikko on -50°C - 400°C. Anturi sijoitetaan kammion kattoon, jossa se havaitsee nopeasti lämpötilan muutoksen palotilanteessa. Hinta on 41,99 euroa (Sis. ALV) tai 33,46 (Ilman ALV). (Elfa Disrelec Suomi n.d. b)



Kuva 12 Painelähetin, 0 ... 0.700bar, 4...20 mA (Elfa Disrelec Suomi n.d. c).

Kuvassa 12 nähdään työhön valittu paineanturi. Mitta-asteikko on 0 - 0,7 bar. Paineanturi havaitsee äkillisen paineenkasvun kammiossa, joka viittaa palon ensivaiheessa tapahtuvaan kaasupurkaukseen tai räjähdykseen. PLC logiikkaan yhdistettynä voidaan sammutus ohjelmoida aktivoitumaan tietyn suuruisen paineenmuutoksen jälkeen. Hinta on 215,11 euroa (Sis. ALV) tai 171,40 euroa (Ilman ALV). (Elfa Disrelec Suomi n.d. c)



Kuva 13 TGS2600 – Kaasanturi (Elfa Disrelec Suomi n.d. d).

Kuvassa 13 nähdään työhön valittu Figaro TGS2600 kaasuanturi. Anturi kykenee havaitsemaan häkää sekä vetyä. Luonnollisin paikka kaasuanturille on kaasunpoistojärjestelmän putkeen kiinnitettynä, johon palokaasut ohjautuvat. Siellä se on myös suojassa kovilta lämpötiloilta. Hinta on 44,48 euroa (Sis. ALV) tai 35,44 euroa (Ilman ALV). (Elfa Disrelec Suomi n.d. d)

Kaikkien komponenttien yhteenlaskettu hinta alv. vähennyksillä on 605,22 euroa.

5.2 Käyttökustannukset

Vesisammutusjärjestelmän varsinaiset käyttökustannukset olisivat hyvin maltilliset, sillä sammutus vaatisi laskelmien mukaan vain 70L vesijohtovettä. Vesijohtoveden keskihinta on 5 euroa per kuutiometri (Suomen ympäristökeskus 2019). Tästä voidaan laskea 70L hinnaksi 0,35 euroa. Lisäkustannuksiksi täytyy myös laskea saastuneen sammutusveden käsittely. Käytetään Ekopartnerit.fi sivustolta löytyvää jätteidenkäsittelyn hinnastoa. Erityisjätteen käsittelymaksu on 470e / 1000kg (Ekopartnerit.fi). Tästä voidaan laskea 70L vesimäärän osuudeksi 32,90e. Näihin kustannuksiin perustuen, yhden sammutuksen hinnaksi tulisi 33,25e.

Hiilidioksidisammutuksen tapauksessa kustannuksia tulisi olemaan enemmän. Kaasupullo pitäisi vaihtaa ja viedä täytettäväksi jokaisen sammutuksen jälkeen. Kärkkäinen.com tarjoaa hiilidioksidipullojen täyttöjä 59e / 15kg (Kärkkäinen.com n.d). Tästä voidaan laskea 45kg kaasupullon täytön olevan 177e. On kuitenkin huomioitava hintojen olevan kuluttajahintoja ja kaasusopimuksella hinnat voisivat olla alhaisempia. Lisäksi kaasunpoiston suodattimet ovat kovemmalla rasiuksella suurien kaasumäärien vuoksi, joten myös suodatinkustannukset ovat isommat, kuin vesisammutuksella. Suodatinkustannukset on kuitenkin päätetty jättää pois tämän työn kustannuslaskelmista. Myös laitteiston testauskustannukset saattavat olla kovemmat hiilidioksidin tapauksessa. Tarvitaan useita koekäyttöjä, jotta voidaan varmistua järjestelmän turvallisuudesta.

6 Johtopäätökset ja yhteenveto

Työn tavoitteena oli suunnitella ja mitoittaa Turun AMK tiloihin kaavaillun li-ion akkujen rikkovan testauksen laitteiston palonsammutusjärjestelmä.

Sammutusjärjestelmän suunnittelussa vertailtiin veden ja nestemäisen hiilidioksidin ominaisuuksia akkupalon sammutuksessa.

Työtä lähdettiin toteuttamaan tutustumalla aluksi li-ion akkuteknologiaan sekä kyseisten akkujen palotilanteisiin liittyvään teoriaan. Tämän jälkeen pohdittiin eri sammutusaineiden vahvuuksia ja heikkouksia, jonka jälkeen lähdettiin suorittamaan laskuja sammutusaineiden tarvittavista määristä. Tehdyt laskut antoivat paremman kuvan sammutustapojen käytön kannattavuudesta kontrolloidussa testiympäristössä.

Tuloksista selvisi, että vettä käyttäen ja testikammio tulvittamalla akkupalo saataisiin sammumaan tehokkaasti noin 70 litralla vettä. Laskukaavoja oli helppo soveltaa ja tulokset olivat loogisia. Hiilidioksidin kohdalla laskut tuottivat aluksi ongelmia, sillä oli vaikeaa arvioida esimerkiksi hiilidioksidin lämpenemistä sammutustapahtuman aikana. Yrityksenä oli myös etsiä olisiko tällaiselle sammutustapahtumalle laadittu valmiiksi jokin standardi, jolla selviäisi tarvittavan hiilidioksidin määrä ilman erillistä laskujen tekoa. Tämä etsintä ei kuitenkaan tuottanut tulosta, ja lopuksi laskut päätettiin tehdä kuitenkin kaavojen avulla. Laskuista selvisi, että sammutukseen tarvittaisiin 34kg nestemäistä hiilidioksidia, joka vaikuttaa kutakuinkin realistiselta arvolta. Lopuksi laadittiin ehdotukset molempien sammutustapojen mekaanisesta ratkaisusta 3D-malleja apuna käyttäen.

Seuraavaksi tehtävänä oli laskea paljonko kaasua muodostuisi sammutuksen aikana kummallakin aineella. Tätä lähdettiin laskemaan kaasujen tilanyhtälöllä. Tulokseksi saatiin, että litrasta vettä syntyy 1700 litraa kaasua höyrystyessään. Arvioidessa, että noin 5% käytetystä sammutusvedestä päätyisi höyrystymään, saatiin lopulliseksi muodostuvan höyryn määräksi 5 950 litraa. Hiilidioksidille tulokseksi saatiin, että 34:stä litrasta nestemäistä hiilidioksidia syntyy 15 606 litraa hiilidioksidikaasua.

Näistä tuloksista laskettiin, paljonko kaasua pitää vapautua sekunnissa kaasunpoistojärjestelmän kautta, jos sammutustapahtuma kestää arviolta minuutin verran.

Lopuksi laadittiin vielä kustannusarvio laitteistolle. Kustannusarviossa käytettiin yhteistä investointikustannukset arviota, joka koskee molempia järjestelmiä. Tämän jälkeen pohdittiin vielä suurinta kustannuseroa järjestelmien välillä, mikä syntyy käyttökustannuksista.

Työn lopputulemana oli selvää, että veden käyttäminen li-ion akkumoduulin palon sammutuksessa sekä lämpökarkaamisen pysäyttämisessä on tehokkain menetelmä. Työn alussa vertailtavia sammutusmenetelmiä valitessa oli oletuksena, että nestemäinen hiilidioksidi olisi akkumoduulin päälle suihkutettaessa hyvin kylmää ja näin tarjoaisi tehokkaan jäähdytyksen ja pysäyttäisi lämpökarkaamisen. Suureksi eduksi myös ajateltiin hiilidioksidin ominaisuus syrjäyttää happea palotilanteessa. Tämä etu olisi kuitenkin pieni, sillä vaikka akkupalon näkyvät liekit saataisiin tukahdutettua, jatkuisi akun sisällä kennoissa tapahtuva lämpökarkaaminen yhä ja sytyttäisi akun pian uudestaan tuleen.

Suurimmaksi ongelmaksi hiilidioksidisammutuksessa osoittautuikin tehokkaan jäähdytyksen puute. Hiilidioksidi ei nimittäin pysy nestemäisessä olomuodossa ilman voimakasta paineistusta. Käytännössä se siis muuttuu kaasuksi heti tullessaan paineistamattomaan testikammioon. Vaikka kaasumainen hiilidioksidisuihku onkin erittäin kylmää, ei sen lämmönjohtokyky ole kuitenkaan todennäköisesti riittävä jäähdyttämään palavaa akkumoduulia läpikotaisin. Hiilidioksidin suuri määrä myös aiheuttaa huomattavia käyttökustannuksia vesisammutukseen verrattuna. Vaikka hiilidioksidi on ekologisempi vaihtoehto eikä jätä jälkeensä saastunutta jälkikäsittelyä vaativaa jätettä, olisi hiilidioksidipullojen täyttäminen silti merkittävä kustannuserä.

Ei pidä myöskään unohtaa hiilidioksiiniin liittyviä riskejä laitteiston käyttäjille. Vaikka järjestelmä rakennettaisiin toimintavarmaksi ja turvalliseksi, on aina mahdollista, että hengitettynä vaarallista hiilidioksidia pääsee vuotamaan ympäristöön esimerkiksi mekaanisen vian tai käyttäjävirheen seurauksena.

Lähteet

Air Liquide Finland Oy. 2025. Nestemäisen Hiilidioksidin Ominaisuudet. Viitattu 18.5.2025:

<https://fi.airliquide.com/catalogue/hiilidioksidi-nestemainen/15100>

Automotive Manufacturing Solutions. 2024. Top 5 EV Battery Chemistries. Viitattu 16.5.2025:

[Top 5 EV battery chemistries and formats across the world | Article | Automotive Manufacturing Solutions](#)

Battery University. 2024. Summary Table of Lithium Based Batteries. Viitattu 25.4.2025:

<https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>

Ekopartnerit. 2025. Jätteenkäsittelyn Hinnasto. Viitattu 16.5.2025:

<https://www.ekopartnerit.fi/hinnasto/>

Elfa Distrelec Suomi. n.d. d. Kaasuanturi. Viitattu 5.5.2025:

[TGS2600 | Figaro Kaasuanturi | Elfa Distrelec Suomi](#)

Elfa Distrelec Suomi. n.d. b. Lämpöanturi -50 ... 400°C. Viitattu 5.5.2025:

[TCR-M08-L050-K04 | EMKO Elektronik A.S. Lämpöanturi -50 ... 400°C Tyyppi J Ruostumaton teräs | Elfa Distrelec Suomi](#)

Elfa Distrelec Suomi. n.d. c. Painelähetin, 0 ... 0.700bar. Viitattu 5.5.2025:

[3500B700MG05G000 | Gems Painelähetin, 0 ... 0.700bar, 4...20 mA | Elfa Distrelec Suomi](#)

Elfa Distrelec Suomi. n.d. a. Schneider Electric PLC - Aloitusarja. Viitattu 29.4.2025:

[SR3PACKBD | Schneider Electric PLC-aloitusarja 6DI \(4D/A\) 4DO 24V | Elfa Distrelec Suomi](#)

Heikkilaakso. n.d. Sähköoppi. Viitattu 21.4.2025:

<https://heikkilaakso.com/vaao/yllapito/sahkooppi.html>

Hpcontrol. n.d. Magneettiventtiilin Tuotetiedot. Viitattu 11.5.2025:

<https://hpcontrol.fi/elektrozawor-2m15-1-2-cala-0-16bar-230v-24v-12v.html>

K-rauta. n.d. Kupariputki Cupori 110 Premium Kova 12x10. Viitattu 17.4.2025:

<https://www.k-rauta.fi/tuote/kupariputki-cupori-110-premium-kova-12x10-5m/6415815811118>

Kärkkäinen.com. n.d. Hiilidioksidipullon Täyttöhinnasto. Viitattu 16.5.2025:

[KSH Hiilidioksidi CO2 15KG täysipullo | Karkkainen.com verkkokauppa](#)

Peda.net. n.d. a. Fysiikkaa. Viitattu 15.4.2025:

<https://peda.net/p/vhalla/fysiikka/fl>

Peda.net. n.d. b. Ominaislämpökapasiteetteja. Viitattu 9.4.2025:

<https://peda.net/forssa/perusopetus/akvarelli/oppiaineet/fysiikka/pekka-lavi/arkisto/l%C3%A4mp%C3%B6oppi2019/taulukot/o>

Peda.net. n.d. c. Sulamis- ja Höyrystymislämpöjä. Viitattu 9.4.2025:

<https://peda.net/forssa/perusopetus/akvarelli/oppiaineet/fysiikka/pekka-lavi/arkisto/l%C3%A4mp%C3%B6oppi22/taulukot/sjh>

Peda.net. n.d. d. Kemian Opetuksen Aineistosivut. Viitattu 15.4.2025:

<https://peda.net/oppimateriaalit/kemianvertaistuki/taulukot>

Presto. n.d. a. Hiilidioksidisammuttimet. Viitattu 16.4.2025:

<https://www.presto.fi/hiilidioksidisammuttimet>

Presto. n.d. b. Litiumakku ja Akkupalot. Viitattu 24.4.2025:

<https://www.presto.fi/litiumakku-ja-akkupalot>

Russells Tech. n.d. Battery Testing Chambers. Viitattu 24.4.2025:

<https://russells-tech.com/products/battery-testing-chambers/>

Saariluoma. 2025. Henkilökohtainen tiedonanto. Skoda Enyaq iV sähköauton akusto. Viitattu 13.2.2025

Safelincs. 2024. Are CO2 Fire Extinguishers Dangerous? Viitattu 10.4.2025:

<https://www.safelincs.co.uk/blog/2024/11/08/are-co2-fire-extinguishers-dangerous/>

Secondlife EV batteries. 2025. VW MEB ID4/ID3 8S Battery Module Product Information. Viitattu 9.4.2025:

<https://www.secondlife-evbatteries.com/products/vw-id-meb-8s-battery-module-0z1915599h?srsId=AfmBOoqWparjv2vcjp9A3abZYMmdB5i-AQtW8Tg9O1uoZRAAfM0bpyWn>

Suomen Ympäristökeskus. 2019. Paljonko Vesi Maksaa. Viitattu 10.5.2025:

<https://www.vesi.fi/vesitieto/paljonko-vesi-maksaa/>

Tukes. 2021. Litiumakkupaloon Tarkoitettuja Käsisammuttimia. Viitattu

25.4.2025: <https://tukes.fi/-/litiumioniakkupaloon-tarkoitettuja-kasisammuttimia-testattu-sammutus-haastavaa-ja-sisaltaa-riskeja>

Turun Ammattikorkeakoulu, 2. 2024. Akkujen Rikkova Testaus – RIKKOVA - Hankesunnitelma. Viitattu 20.2.2025

Turun Ammattikorkeakoulu, 4. 2024. Akkujen Rikkova Testaus – RIKKOVA - Hankesunnitelma. Viitattu 20.2.2025

Unique Fire Holdings. n.d. 45kg Carbon Dioxide Gas Cylinder. Viitattu

20.4.2025: <https://uniquefire.com/product/45kg-seamless-cylinder-with-carbon-dioxide-gas/>

Woikoski. n.d. Hitsauskaasut. Viitattu 20.4.2025:

<https://www.woikoski.fi/hitsaus/hitsauskaasut/hiilidioksidi.html>

Omaan Tahtiin Fysiikkaa. n.d. Kaasujen Tilanyhtälöt. Viitattu 12.4.2025:

<https://fysiikka.omaantahtiin.com/etusivu/fysiikka-2/kaasujen-tilanyht%C3%A4l%C3%B6t>