



Sähköavusteisen polkupyörän virtalukon syytymis- ja palomahdollisuuden selvitys

Tilaaaja: Solo-International Oy



Tilaaaja	Solo-International Oy Jari Komulainen Komeetankatu 1 02210 Espoo	
Tilaus	Tilaus sähköpostilla 20.7.2016 / Jari Komulainen	
Käsittelijät	VTT Expert Services Oy Tapio Klasila Biologinkuja 7, Espoo PL 1001 02044 VTT Puh. 020 722 5317 email tapio.klasila@vtt.fi	Risto Parikka Biologinkuja 7, Espoo PL 1001 02044 VTT Puh. 020 722 4651 email risto.parikka@vtt.fi

Sähköavusteisen polkupyörän virtalukon syttymis- ja palomahdollisuuden selvitys

Näytteet Tutkimuksen kohteena oli Solifer-merkinen sähköavusteinen yksivaihteinen polkupyörä. Pyörä oli vastaavaa mallia kuin se, jonka epäillään aiheuttaneen rivitalopalon Nurmijärvellä 25.5.2015. Tutkittavaksi osoitetun pyörän toimitti VTT:lle Solo-International Oy.

Tutkimukset Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, voiko virtalukko syttyä voimakkaalla normaalikäytöllä ja kuormituksella palamaan ja sytyttää ympäröivää materiaalia. Lisäksi arvioidaan virtalukon syttymismahdollisuutta varastoitaessa. Vakuutusyhtiö Turvan rakennuspaloa koskevassa tutkimusraportissa todennäköisimpänä syynä tulipalolle pidetään virtalukon muoviosien syttymistä, joka on laajetessaan sytyttänyt akkujen suojakotelot palamaan.

VTT:n tutkimussuunnitelma on kolmivaiheinen ja kokonaisuudessaan se sisältää seuraavat vaiheet:

1. Virtalukon syttymismahdollisuus normaalikäytössä.
2. Virtalukon syttymismahdollisuus nk. ”worst case” olosuhteissa.
3. Simulaatio palotutkimushallissa

Tässä tutkimusselostuksessa raportoitava tutkimuksen ensimmäinen osa, virtalukon syttymismahdollisuus normaalikäytössä, koostui seuraavista osioista:

- A. Teoreettinen tarkastelu olemassa olevilla kuormitus-, materiaali-, suunnittelu-, jännite- ja virtatiedoilla käytön aikana ja varastoitaessa.
- B. Sähköavusteisen polkupyörän kuormittaminen ja lämpötilan mittaus kuormitusvaiheessa:

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

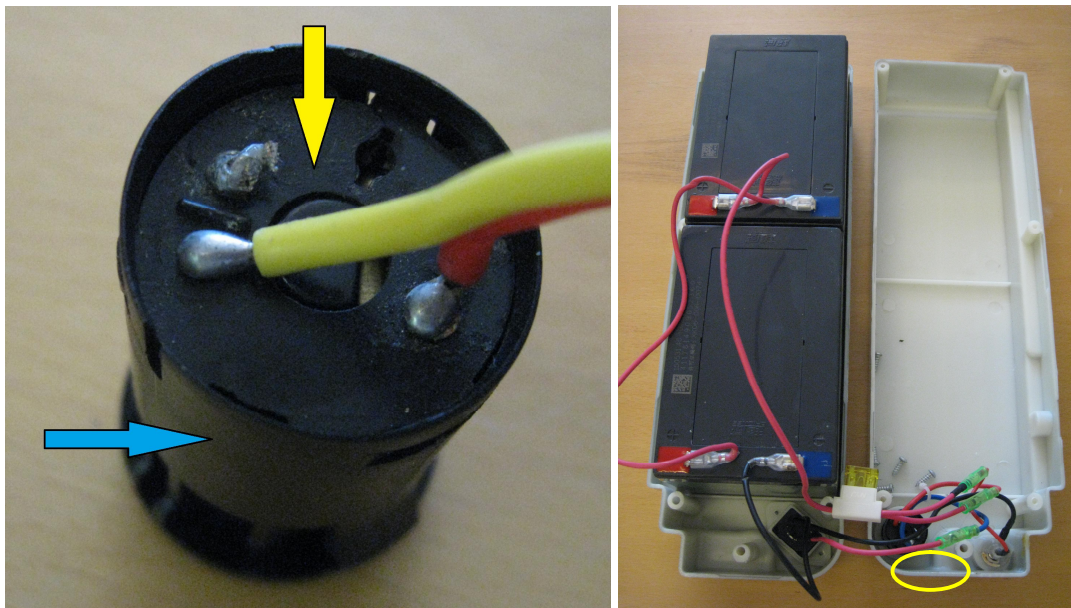
VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

- Polkupyörää kuormitettiin maksimiteholla täyteen ladatuilla akuilla jarrurullastoa hyödyntäen
 - Virtalukon pohjan lämpötilan mittaus.
- C. Virtalukon ja ympäröivän akkukotelon materiaalitutkimukset, koostumus, palonsuojaus ja palo-ominaisuudet:
- Materiaalitutkimukset tehtiin laboratorioissa seuraavilla menetelmillä: infrapunaspektroskopinen analyysi FTIR, termogravimetriset analyysit TG, DTA ja DTG, röntgenfluoresenssianalyysi XRF, energiadiispersiivinen röntgenanalyysi EDS sekä röntgendiffraktioanalyysi XRD.

Suoritus ja tulokset

Materiaalitutkimukset

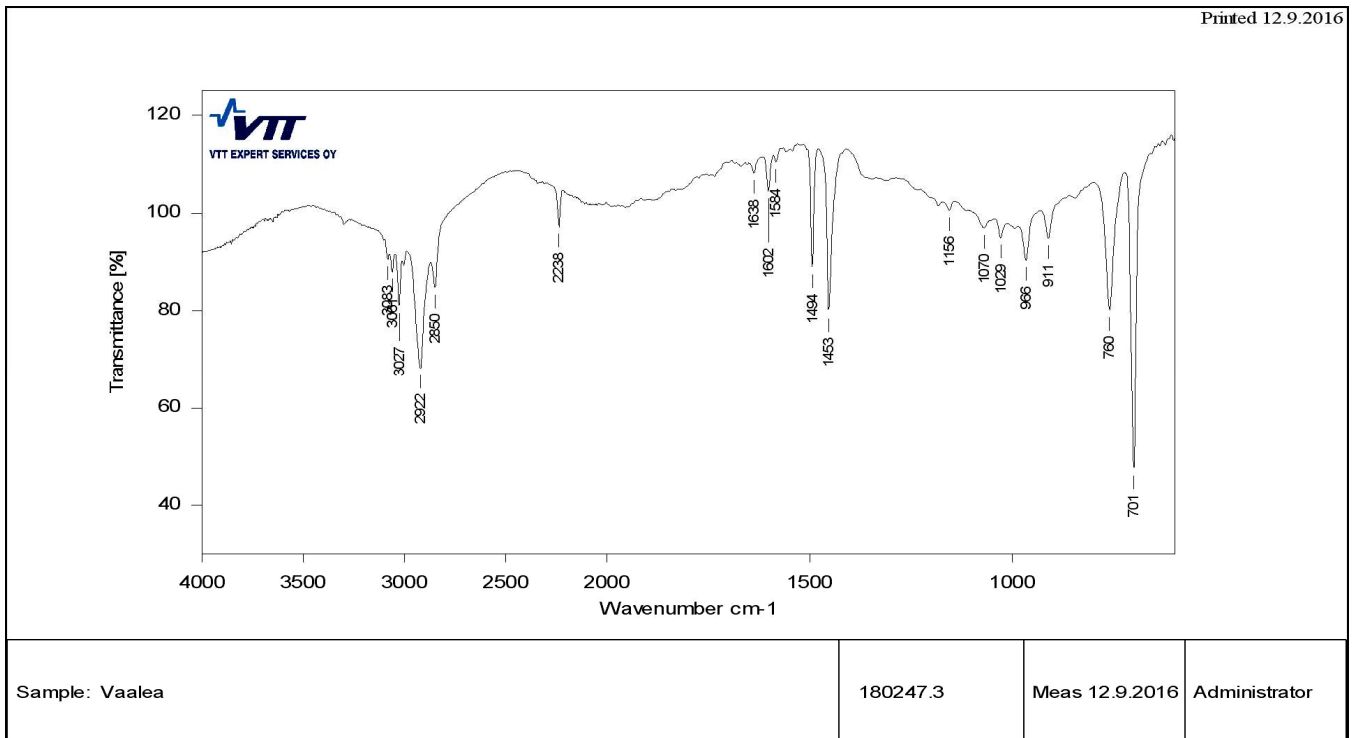
Virtalukko ja akkukotelo on esitetty *Kuvassa 1*. Virtalukon pohjasta (keltainen nuoli), virtalukon lieriöosasta (sininen nuoli) ja akkukotelosta virtalukon vierestä (ympyröity) otetuille materiaalinäytteille tehtiin laboratorioissa materiaalitutkimukset.



Kuva 1. Virtalukko pohja ylöspäin kuvattuna (vas.) ja akkukotelo avattuna (oik.). Näytteenottokohdat on merkitty nuolilla tai ympyröity.

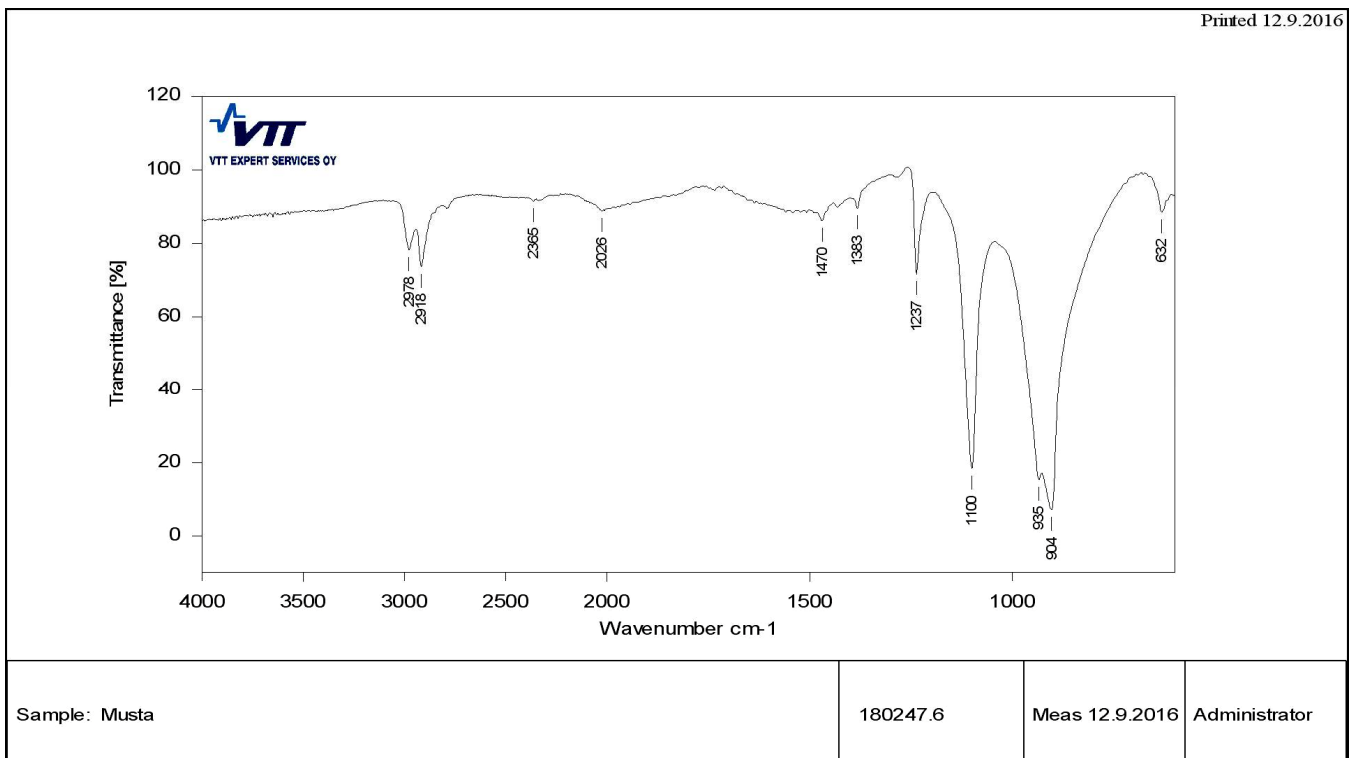
Materiaalien tunnistukset suoritettiin infrapunaspektrometrisesti FTIR-analyysin avulla. Kaikista näytteistä ajettiin FTIR-spektrejä Bruker Equinox 55 spektrometrillä käyttäen IR-mikroskooppia.

Akkukotelon materiaalin FTIR-spektri on esitetty *Kuvassa 2*. Spektrin perusteella kotelon materiaali on akryylinitriilibutadieenistyreeni eli ABS-muovi.



Kuva 2. Kotelon materiaalin FTIR-spektri.

Virtalukon lieriöosan materiaalin FTIR-spektri on esitetty *Kuvassa 3*. Spektrin perusteella virtalukon lieriöosan materiaali on polyasetaali eli POM-muovi.

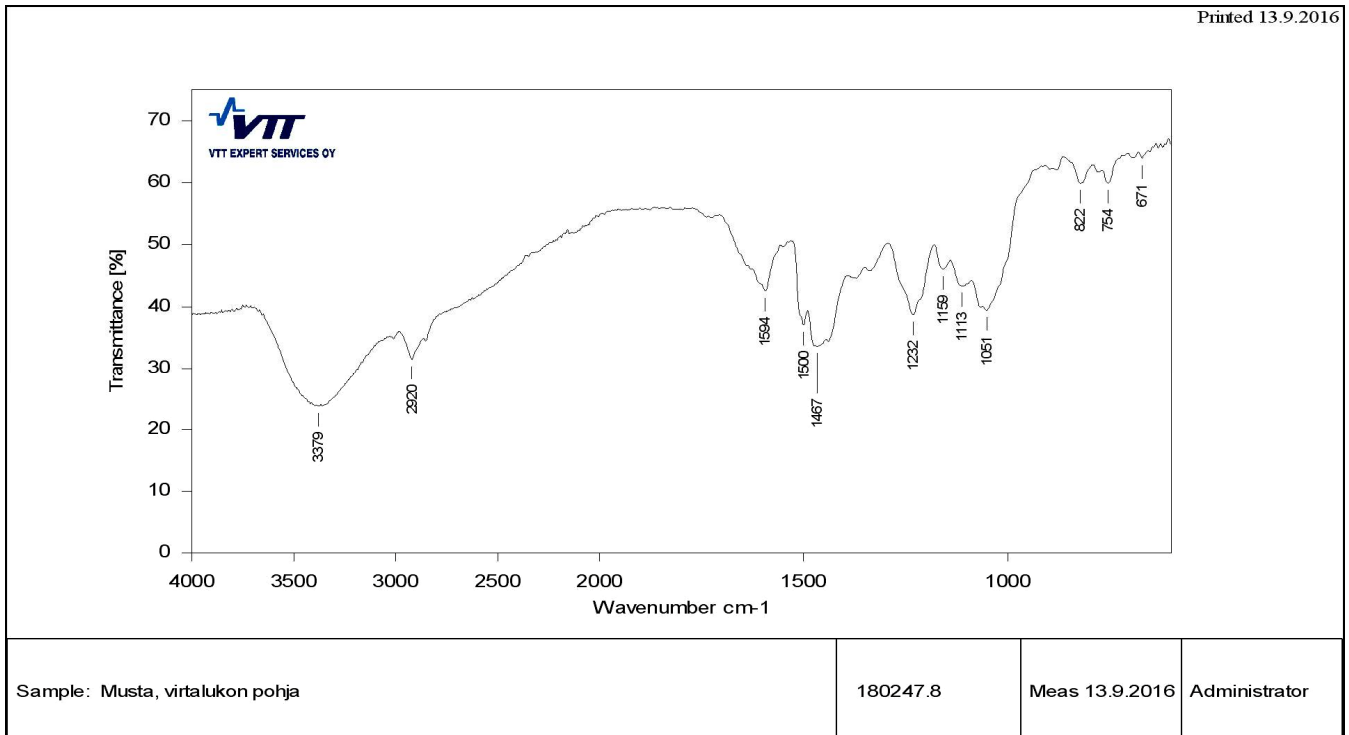


Kuva 3. Virtalukon lieriöosan materiaalin FTIR-spektri.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

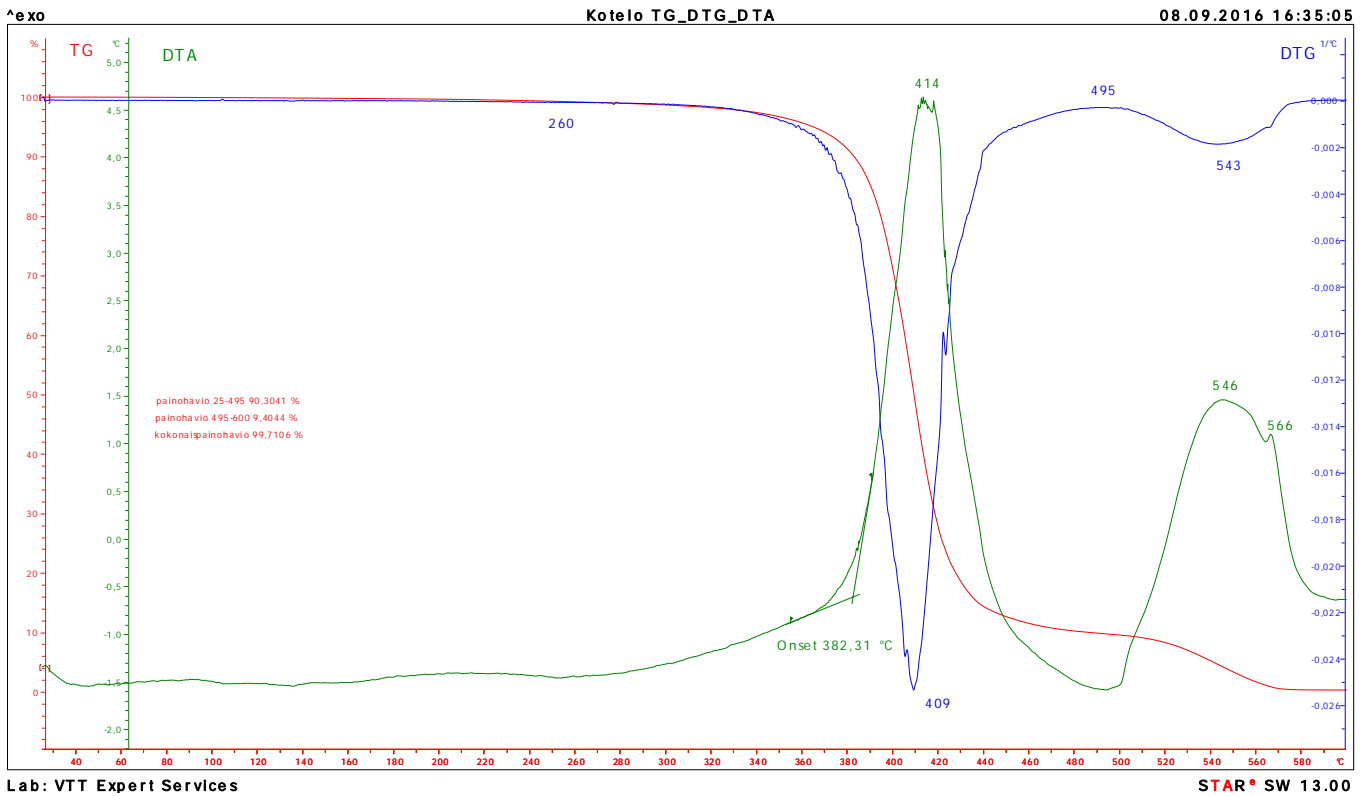
Virtalukon pohjan materiaalin FTIR-spektri on esitetty *Kuvassa 4*. Spektrin perusteella virtalukon pohjan materiaali on bakeliitti.



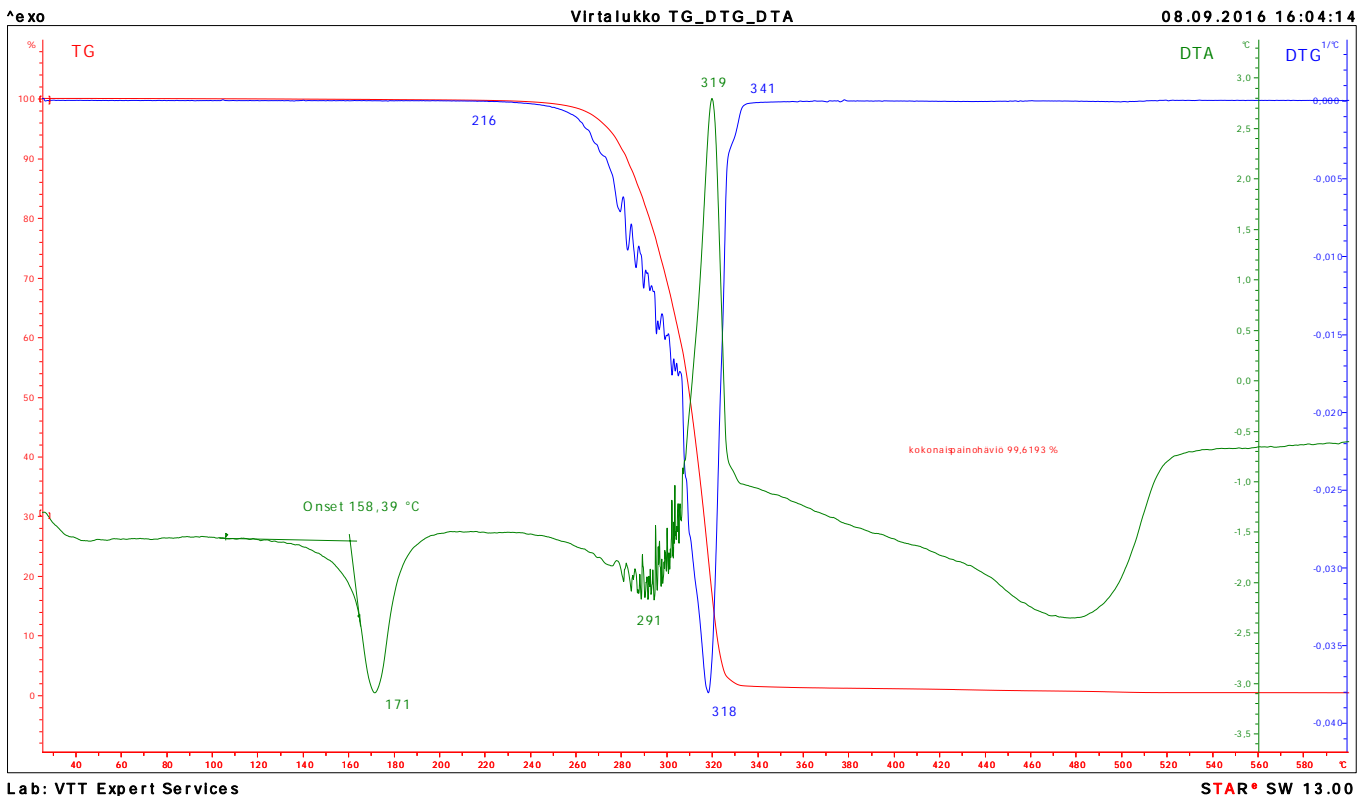
Kuva 4. Virtalukon pohjan materiaalin FTIR-spektri.

Edellä tunnistettujen muovien termiset ominaisuudet määriteltiin termoaalyysilla. Menetelmät, joita käytettiin, olivat TG (Thermogravimetry), DTA (Differential thermo analysis) ja DTG (Differential thermogravimetry). Termoaalyysissä käytetty lämpötilan muutosnopeus oli 5 °C/min. Termoaalyysin perusteella määritettiin lämpötila, jossa materiaalin massa alkaa pienentyä sekä se, luovuttaako vai vastaanottaako materiaali lämpöä. Massanmuutoksen ja näytteen luovuttavan energian (exotherm) perusteella määritettiin itsesyttymislämpötila. Itsesyttymislämpötila on hieman korkeampi kuin syttymislämpötila ulkoista sytytyslähdettä käytettäessä.

Termoaalyysien kuvaajat on esitetty *Kuvissa 5 - 7*.



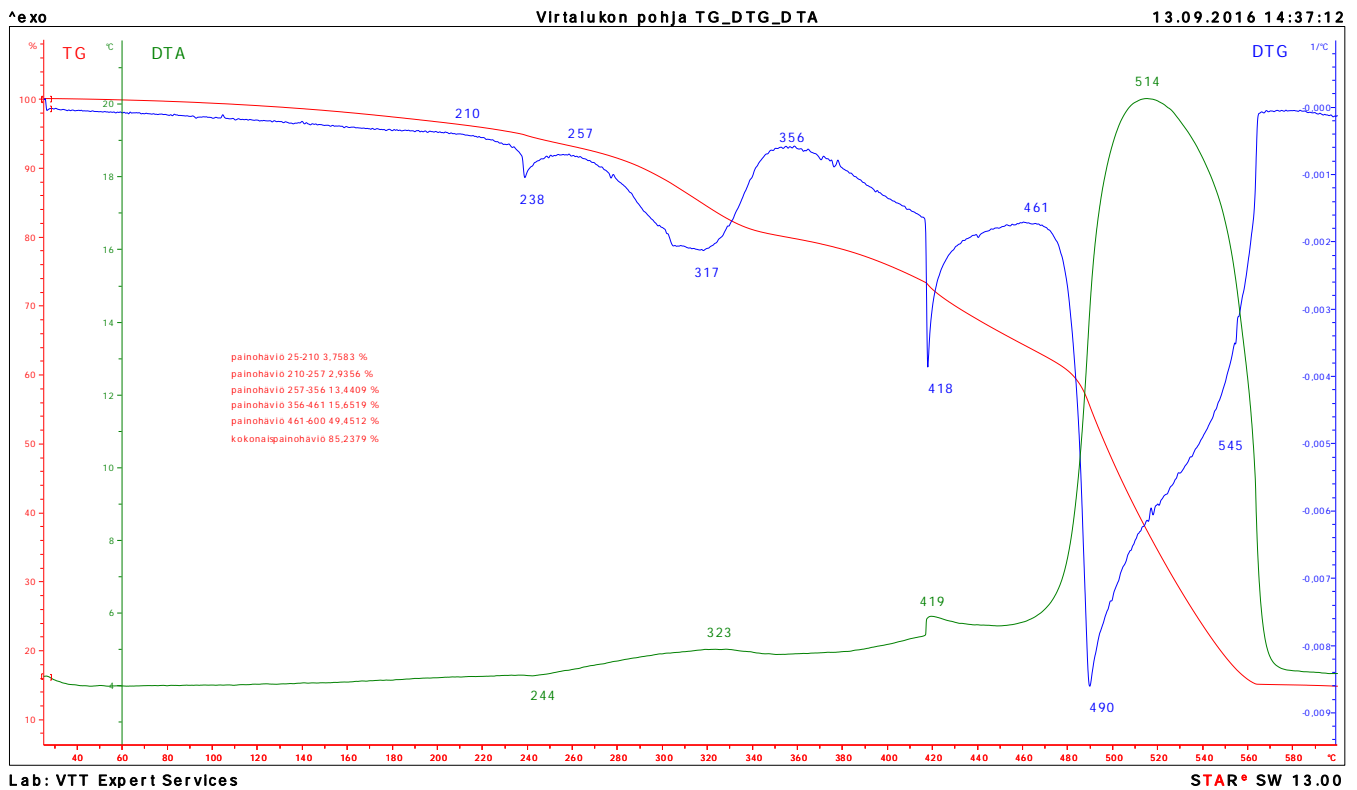
Kuva 5. Akkukotelon termoanalyysin kuvaaja.



Kuva 6. Virtalukon lieriöosan lämpöanalyysin kuvaaja.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.



Kuva 7. Virtalukon pohjan termoaalyysin kuvaaja.

Taulukkoon 1 on koottu termoaalyysien keskeisimmät tulokset.

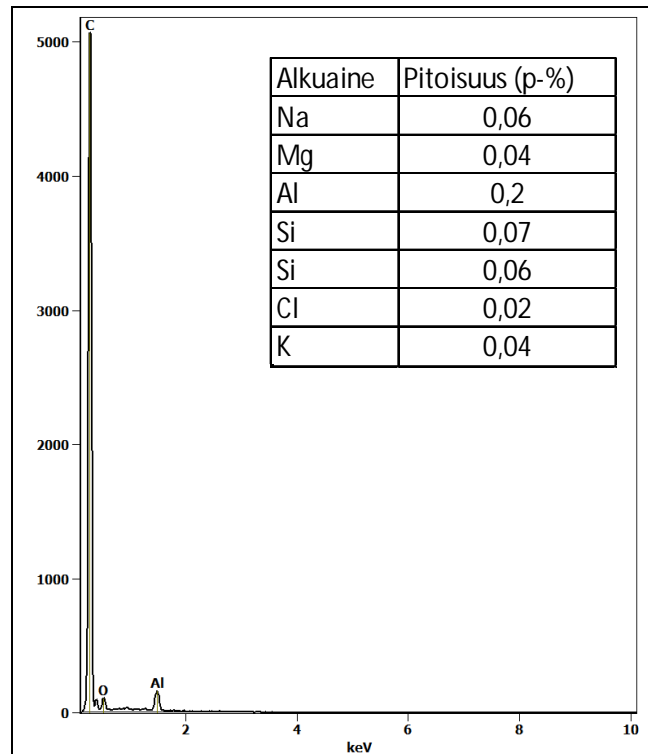
Taulukko 1. Termoaalyysien keskeisimmät tulokset.

Materiaali/osa	Sulamispiste (°C)	Itsesyttymislämpötila (°C)
Akkukotelo	Ei havaittavissa (amorfinen)	380
Virtalukon lieriöosa	158	290
Virtalukon pohja	Ei havaittavissa (amorfinen)	>400

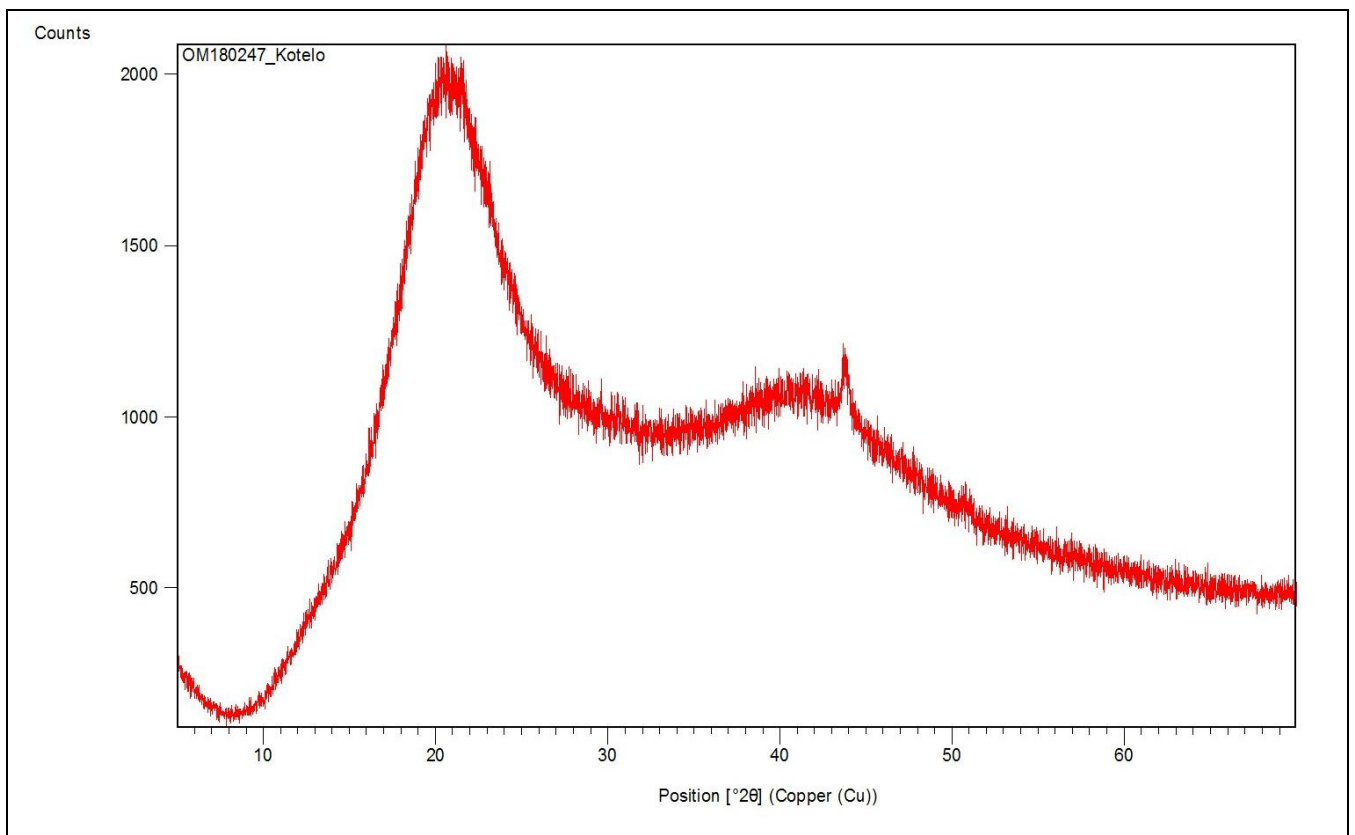
Materiaalien sisältämiä aineita tai yhdisteitä, jotka voivat toimia esimerkiksi palonestoaineina, analysoitiin pyyhkäisyelektronimikroskooppiin (SEM) liitetyn energiadiispersiivisen röntgenanalysointilaitteen (EDS), röntgenfluoresenssi-analyysin (XRF) ja röntgendifraktioanalyysin (XRD) avulla. EDS-spektrit, suuntaa-antavat pitoisuudet ja röntgendifraktogrammit on esitetty *Kuvissa 8 - 13*.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkittuille näytteille

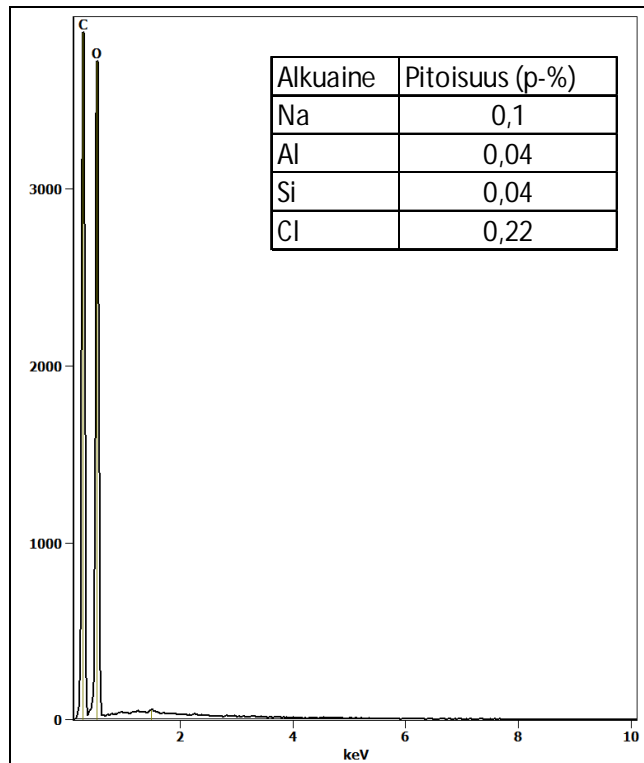
VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.



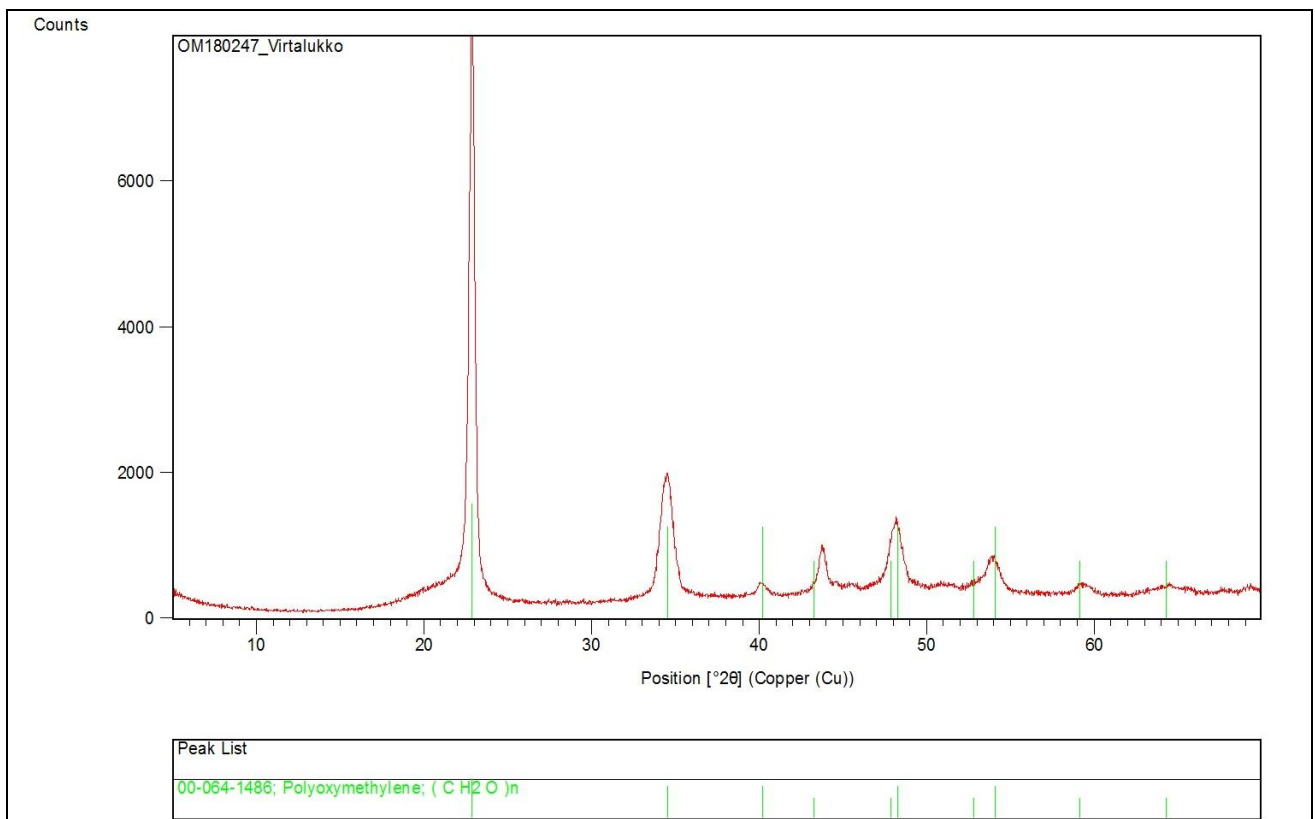
Kuva 8. Akkukotelon materiaalin EDS spektri ja happea raskaampien alkuaineiden pitoisuudet. Materiaali sisältää hiilen lisäksi hieman happea ja alumiinia. Muiden alkuaineiden pitoisuudet ovat hyvin pieniä.



Kuva 9. Akkukotelon materiaalin röntgendifraktogrammi. Rakenne on amorfinen.



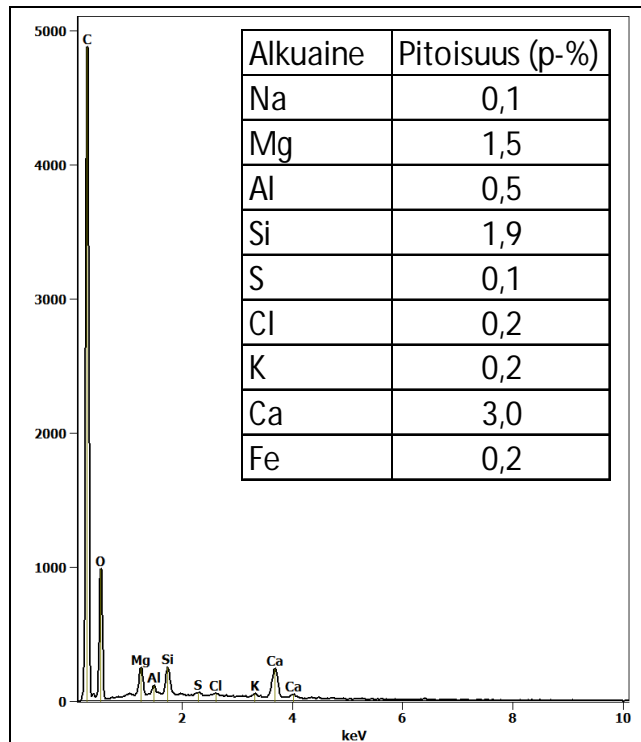
Kuva 10. Virtalukon lieriöosan EDS-spektri ja happea raskaampien alkuaineiden pitoisuudet. Materiaali sisältää hiilen lisäksi happea ja vain hyvin pienen määrän muita alkuaineita.



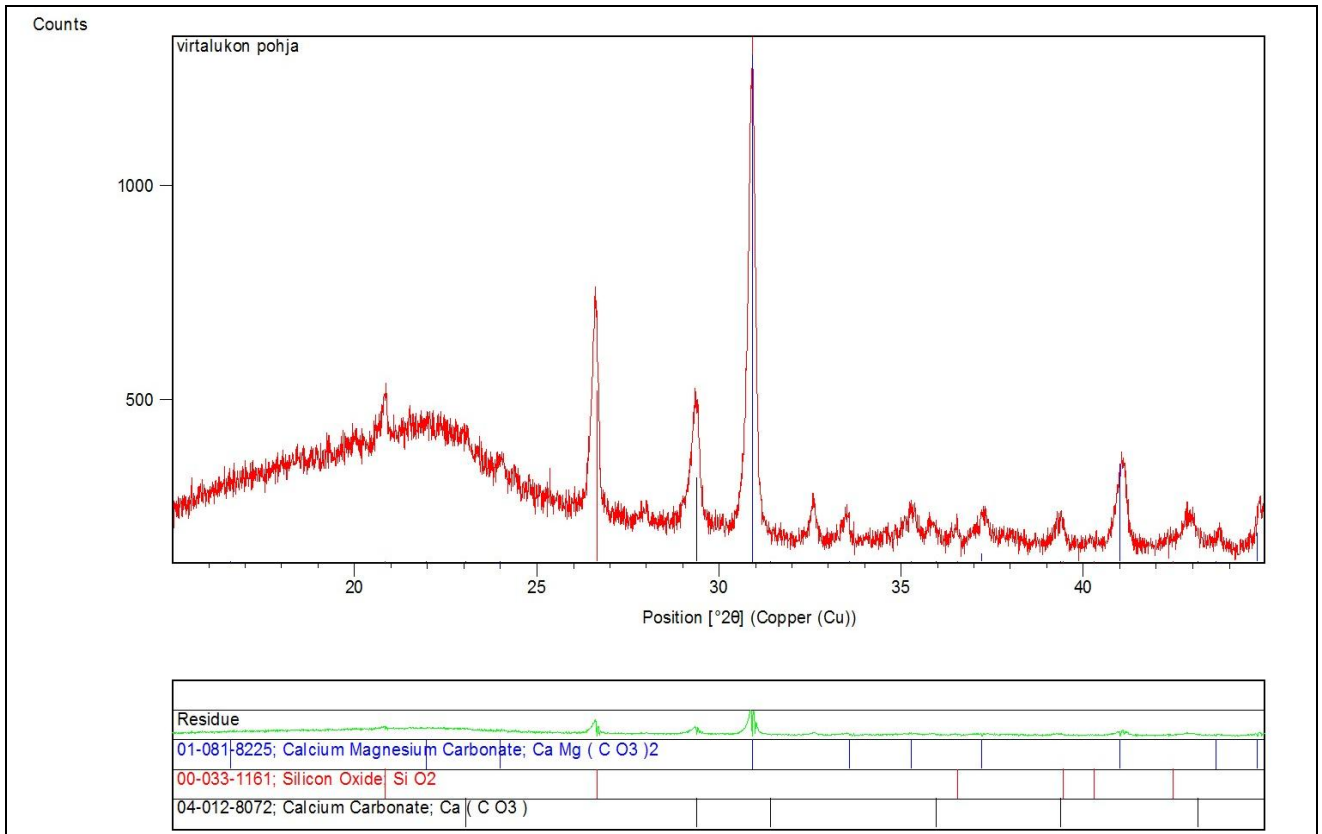
Kuva 11. Virtalukon lieriöosan röntgendiffraktogrammi. Diffraktogrammi sopii oxymetyleenimuovien (POM) rakenteelle.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.



Kuva 12. Virtalukon pohjan EDS-spektri ja happea raskaampien alkuaineiden viitteelliset pitoisuudet. Materiaali sisältää täyteaineita selvästi muita näytteitä enemmän.



Kuva 13. Virtalukon pohjan röntgendifraktogrammi. Materiaali sisältää amorfisen perusmateriaalin lisäksi kalsiumin ja magnesiumin karbonaatteja ja piidioksidia.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Edellä kuvattujen analyysien perusteella virtalukon pohjan materiaali sisältää noin 15 % epäorgaanisia täyteaineita, jotka ovat lähinnä kalsiumin ja magnesiumin karbonaatteja sekä piidioksidia. Virtalukon lieriöosan ja akkukotelon materiaaleissa ei käytännössä ole täyteaineita. Mitkään analyyseissä havaitut aineet eivät ole palonestoaineita.

Sähköavusteisen polkupyörän kuormitustesti

Polkupyörän koejärjestely on esitetty *Kuvassa 14*. Testauksen aikana polkupyörän polkimia pyöritettiin sähkömoottorin avulla. Sähkömoottorin kierros- luku oli säädetty normaalia käyttöä vastaavaksi taajuusmuuttajan avulla. Polkupyörän takapyörä oli kohotettu ilmaan, ja etupyörää jarrutettiin rullaston ja ilmajarruna toimivan siipipyörän avulla siten, että polkupyörän käyttömoottori kävi maksimiteholla. Akku oli ladattu täyteen ennen testauksen aloittamista. Tällöin testaus simuloi polkupyörän raskainta mahdollista todellista käyttöä.



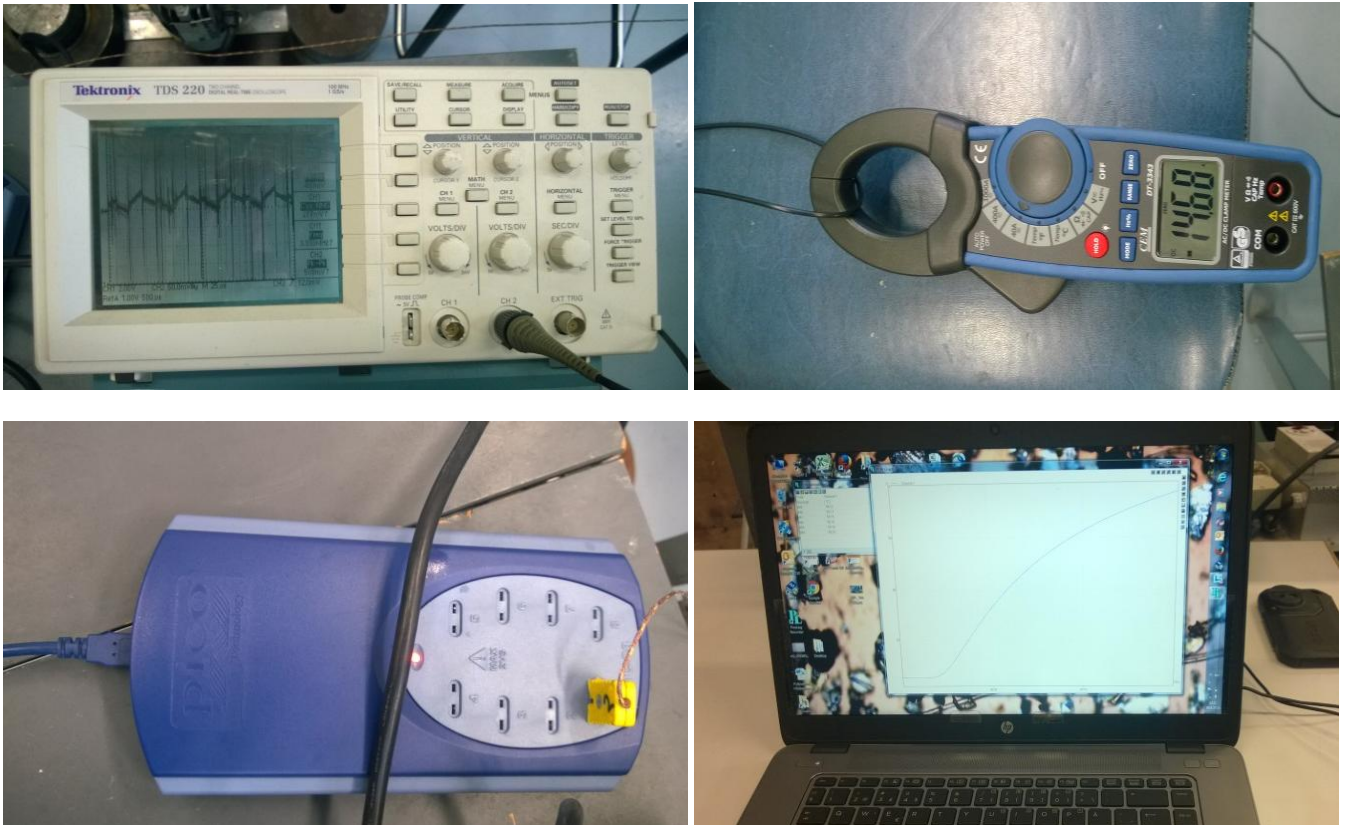
Kuva 14. Polkupyörän koejärjestely.

Polkupyörän yhteyteen liitettiin *Kuvassa 15* esitetyt mittauslaitteet:

- Käyttöä seurattiin oskilloskoopin (Tektronix TDS 220) avulla.
- Virtaa kytkimen yli mitattiin pihtivirtamittarilla (CEM DT 3343).
- Lämpötilaa mitattiin Pico TC-08 -lämpötilaloggerin ja virtalukon pohjaan sijoitetun termoelementin avulla.
- Lämpötiladataa kerättiin kannettavan tietokoneen avulla.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

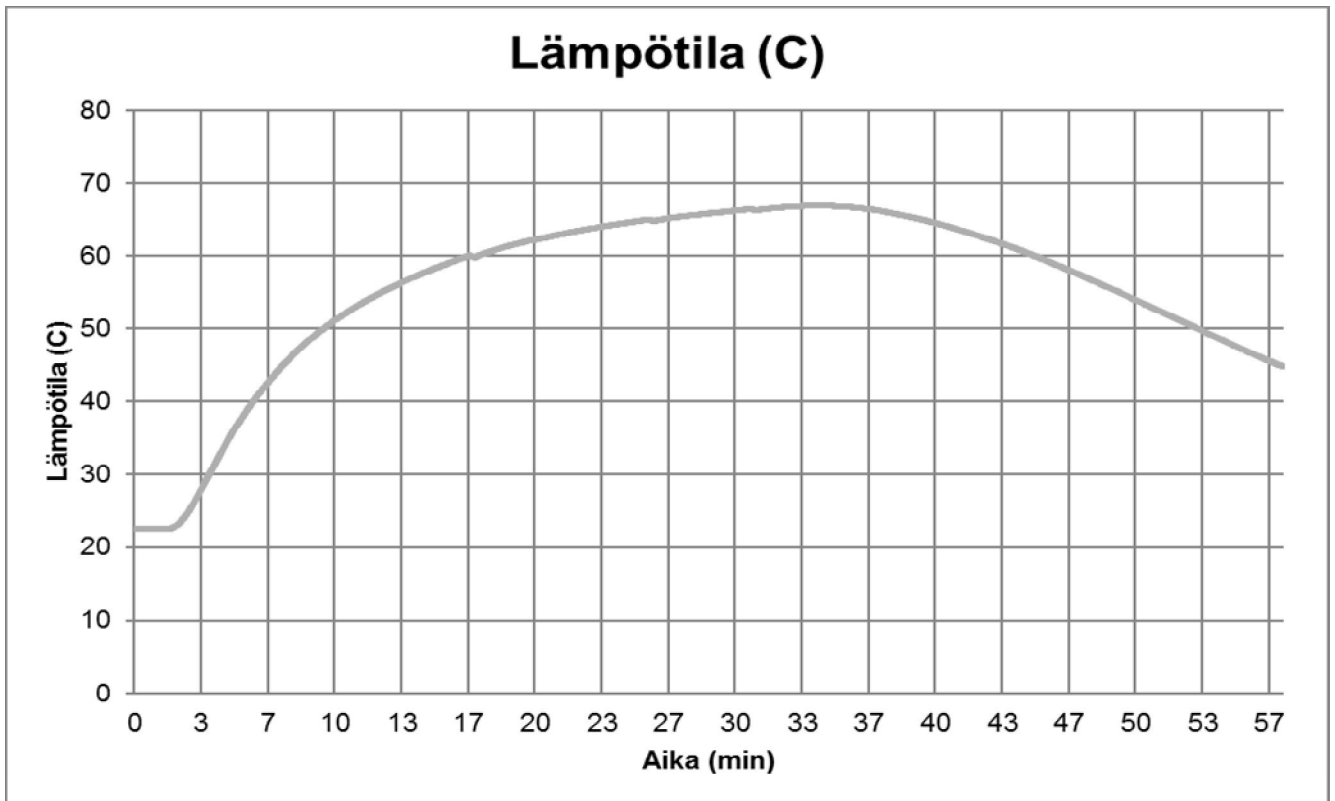
VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.



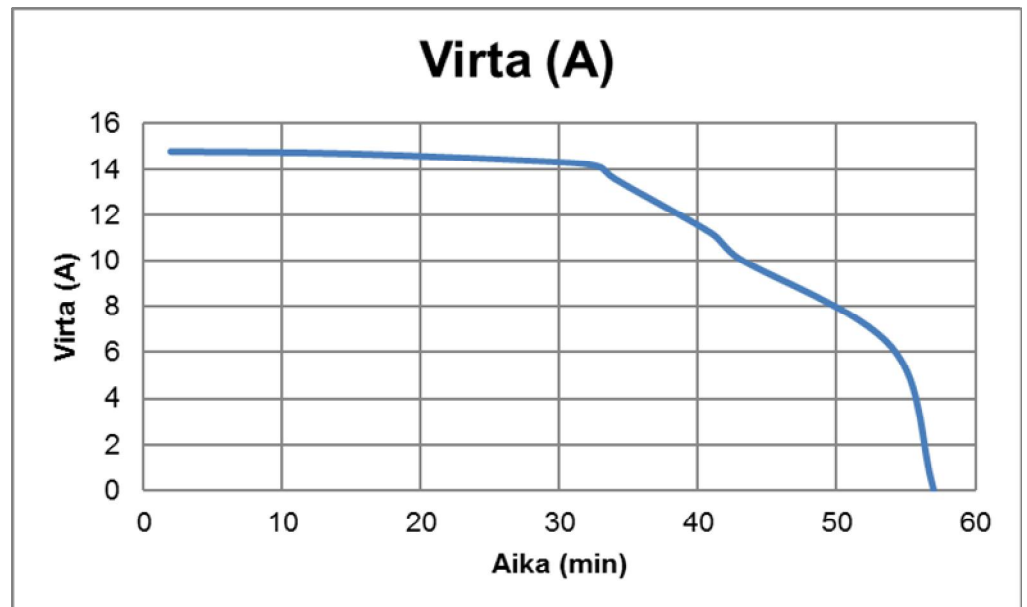
Kuva 15. Mittauslaitteet.

Virtalukon pohjan lämpötila testauksen aikana on esitetty *Kuvassa 16*. Polkupyörän virta kytkettiin kaksi minuuttia lämpötilamittauksen käynnistymisen jälkeen. Käyrästä havaitaan, että virtalukon pohjan lämpötila nousi noin 31 minuutin ajan, jolloin se saavutti maksimiarvonsa. Suurin mitattu arvo oli 66,9 °C. Noin 35 minuutin jälkeen lämpötila alkoi laskea. Samanaikaisesti myös virtalukon yli mitatun virran arvo alkoi pudota (*Kuva 17*). Virtamittauksen tiedonkeruu ei ollut reaaliaikainen, vaan arvoja otettiin ylös pihtivirtamittarin näytöltä mittauksen aikana. Mittausarvot on esitetty kuvaajana *Kuvassa 17*.

Testaus päättyi noin 55 minuuttia polkupyörän virran kytkemisen jälkeen, jolloin akun teho ei enää riittänyt ylläpitämään pyörimistä.



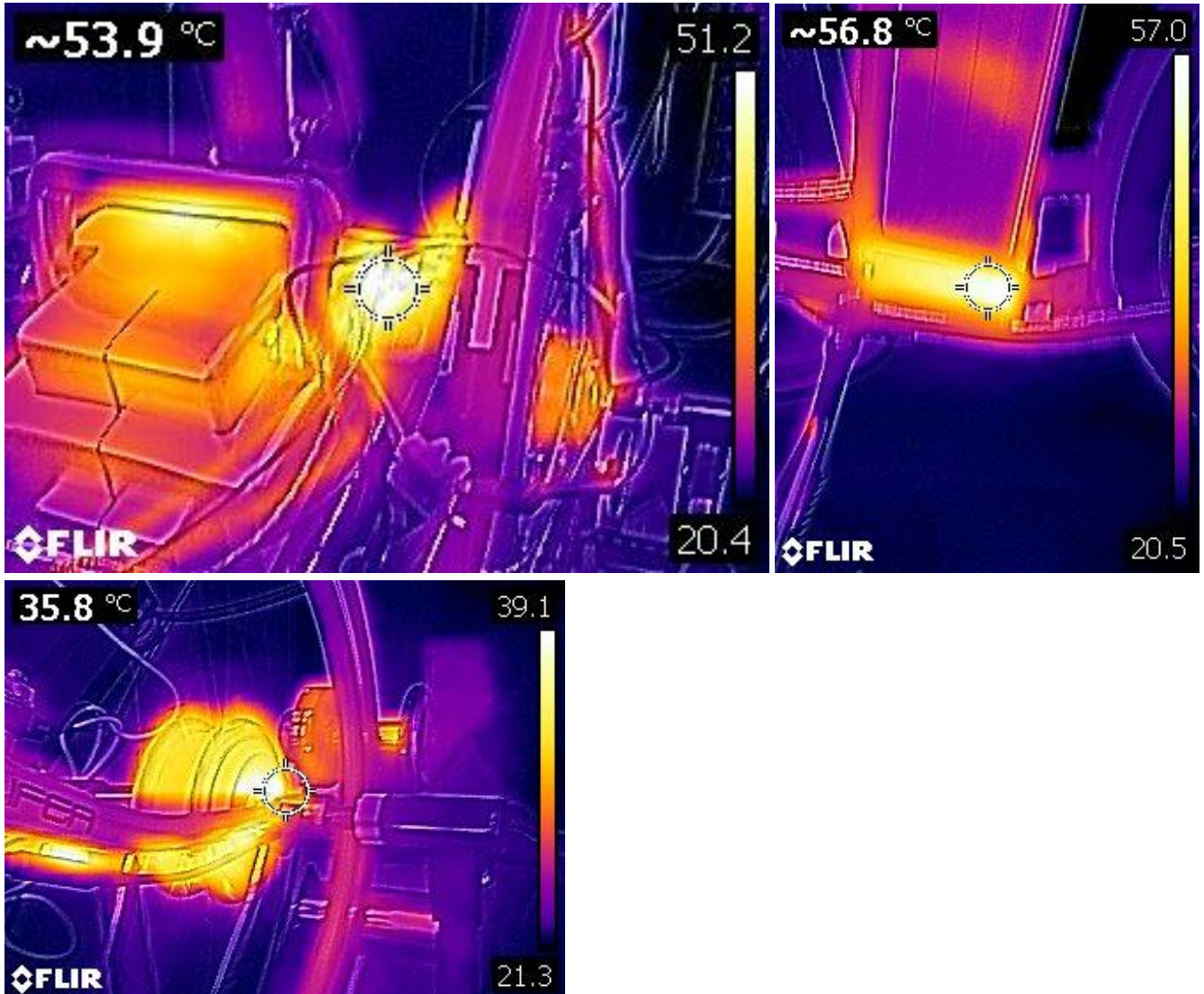
Kuva 16. Virtalukon pohjan lämpötila testauksen aikana.



Kuva 17. Pihtivirtamittarilla virtalukon yli mitattu virran arvo testauksen aikana.

Koelaitteistoa kuvattiin testauksen aikana myös lämpökameralla (Kuva 18). Kuvauksen perusteella lämpötila saattaa kohota akun alapuolella sijaitsevassa säätöyksikössä korkeammaksi kuin akkukotelon yläosassa sijaitsevissa virta-

lukossa ja sen johdotuksissa. Lämpötila kohoaa selvästi myös moottorissa ja johtimissa.



Kuva 18. Mittauksen aikana otettuja lämpökamerakuvia.

Teoreettinen tarkastelu syttymismahdollisuudesta

Tutkimuksen kohteena ollut laite oli Solifer-merkkinen yksivaihteinen sähköavusteinen polkupyörä. Seuraavassa on koottuna kyseisen polkupyörämallin sähköjärjestelmän tietoja:

- Polkupyörässä on 24 V kolmivaiheinen vaihtovirtakestomagneettimoottori. Moottorin tehoksi on ilmoitettu 250 W.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

- Akkupaketin tasajännite muutetaan kolmivaiheiseksi pulssimaiseksi jännitteeksi, jonka taajuutta säädetään ohjaustangossa olevaa nopeudensäätökahvaa kiertämällä, jolloin moottorin kierrosnopeus ja siten myös pyörän nopeus muuttuvat.
- Polkupyörä on anturoitu siten, että moottori kytkeytyy pois jarrutettaessa tai silloin, kun pyörää ei poljeta.
- Polkupyörän akkukotelo on sijoitettu pystyyn satulan alapuolelle. Kotelossa on kaksi sarjaan kytkettyä 12 V lyijyhyytelöakkaa, jolloin on saatu aikaan 24 V sähköjärjestelmä.
- Oikosulun tai ylikuormituksen varalta järjestelmä on suojattu 20 A sulakkeella, joka on kytketty akun plusjohtimeen.
- Virtalukko on sijoitettu akun yläpuolelle ja sitä käytetään virta-avaimella. Avainta kääntämällä virtalukon kontaktipintoina toimivat kuparinastat kytkeytyvät kytkentälevyn avulla toisiinsa. Kuparinastat ovat kiinni bakeliitista valmistetussa virtalukon pohjalevyssä ja johtimet on kiinnitetty niihin juotoksilla.

Suoritettu tutkimus osoittaa, että kuormitettaessa laitetta maksimikuormituksella ja maksimaalisella akun lataustilalla ja toiminta-ajalla, lämpötila virtalukossa ei kohoa niin korkeaksi, että virtalukon materiaalit voisivat ilman laitteiston virhetilannetta syttyä palamaan tai edes sulaa. Korkein virtalukon pohjasta mitattu lämpötila testin aikana oli noin 67 °C. Bakeliitista valmistetun virtalukon pohjan syttymislämpötila on huomattavasti tätä korkeampi, yli 400 °C. Seuraavaksi lähimpänä virtalukon kontaktipintoja sijaitsevien virtalukon osien syttymislämpötilat ovat tätä alempia, mutta nekin lähes 300 °C.

Virtalukon lämmön nousu normaalia käyttöä korkeammaksi on käsityksemme mukaan mahdollista virtalukon vikaannuttua. Johtimien juotosten sulamispiste on saatujen tietojen mukaan noin 260 °C, mikä on alempi kuin ympäröivien muovien syttymislämpötilat. Tällöin, virtalukon pohjan lämpötilan nousu yli 260 °C lämpötilan johtaisi todennäköisesti johtimien irtoamiseen, mikä pysäyttäisi lämpötilan nousun. Toisaalta, virtalukon toinen, avaimen puolella sijaitseva vastinpinta sijaitsee heikommin lämpöä kestävästä muovin puolella ja kauempana juotoksista. Tällä puolella virtalukkoa on myös voitelurasvaa.

Tutkimuksen kohteena olleen sähköavusteisen polkupyörän tai sen virtalukon toiminta ei poikennut normaalista. Virtalukon teoreettisia vikatilanteita sekä virheellisestä käytöstä tai vikaantumisesta johtuvia syttymissyitä on tarkoitus tutkia seuraavassa tutkimusvaiheessa.

Johtopäätökset

Suoritettu mittaus osoitti, että kuormitettaessa laitetta maksimikuormituksella ja maksimaalisella akun lataustilalla ja toiminta-ajalla, lämpötila virtalukossa ei kohoja niin korkeaksi, että sähköavusteisen polkupyörän virtalukon materiaalit voisivat ilman laitteiston vikatilannetta syttyä palamaan. Syttymismahdollisuutta ilman laitteiston vikatilannetta ei ole myöskään varastoinnin aikana. Tutkimuksen kohteena olleen polkupyörän tai sen virtalukon toiminta ei poikennut normaalista.

Espoo, 26.9.2016



Tapio Klasila
Tuotepäällikkö



Risto Parikka
Erityisasiantuntija

JAKELU

Tilaaaja, 1 kpl
VTT, arkisto, 1 kpl