

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

### Laajan spektraalisen vasteen valelaite

**Terho Kololuoma**, Johtava tutkija, VTT Oy, +358 40 756 8167, [terho.kololuoma@vtt.fi](mailto:terho.kololuoma@vtt.fi)  
**Arttu Huttunen**, Tutkija, VTT Oy

Hankkeessa tutkittiin painetun elektroniikan ja rullalta rullalle valmistuksen mahdollisuuksia valmistaa laitteita, joilla on mahdollista vaikuttaa tiedusteluun spektrissä. Laitteiden tulee olla paitsi edullisia myös pystyä esittämään kuvattavaa kohdetta eri spektrialueen sensoreille. Tärkeimmät sensorit ovat SAR-tutka, lämpökuvauus ja näkyvän alueen kuvantaminen. Projektissa valmistettiin VTT:n painetun elektroniikan valmistuslaitteistoja hyödyntäen erilaisia testirakenteita, joilla konseptin toimivuutta voitiin arvioida.

#### 1. Johdanto

Eräs sodankäynnin keskeisiä piirteitä on ammoisista ajoista asti ollut vihollisen harhauttaminen. Sotajoukko pyrkii omalla tiedustelullaan selvittämään vihollisen sijainnin ja aiheet sekä vastaavasti suojaamaan oman toimintansa tiedustelulta sekä luomaan viholliselle väärää tilannekuvaa. Nyky-päivän tiedustelussa merkittävä paino on erilaisten sensoreiden käytöllä. Sensoreina voidaan käyttää eri aallonpituuksilla toimivia tutkia sekä kameroita. Kamerat voivat olla näkyvän valon-, infrapuna- (lämpösäteily) tai ns. hyperspektrikameroita joilla voidaan kuvata käyttäen kapeaa aallonpituusalueita. Tutkista mainittakoon SAR-tutka (synthetic-aperture radar) jossa liikkuvan antennin ansiosta saadaan tarkempi paikka resoluutio kuin perinteisellä tutkalla. Tutkia ja kameroita voidaan käyttää satelliiteista, lentokoneista, miehittämättömistä lennokeista tai maasta käsin. Voidaan myös olettaa, että tulevaisuudessa sensoreiden suorituskyky kasvaa ja hinta laskee, jolloin niitä käytetään yhä enemmän. Keinoälyn kehitys sallii myös tietokoneiden käytön sensoreiden tuottamien valtavien data-aineistojen seulontaan.

Sensoritiedustelua vastaan omat joukot pyritään maastouttamaan sekä vihollisen tilannekuvaa hämärtämään valelaitteilla. Valelaitteen toivottavia ominaisuuksia ovat suorituskyky (kohdettava vastaava sensorijälki), liikuteltavuus ja helppokäyttöisyys sekä edullinen hinta. Hinnalla on suuri merkitys koska tällöin laitteita voidaan hankkia enemmän, valelaitteiden luonteeseen myös kuuluu, että niitä tuhoutuu vihollisen toiminnan takia. Painettu elektroniikka ja rullalta-rullalle valmistustekniikat tarjoavat keinon tuottaa edullisesti suuria pinta-aloja toiminnallisia kalvorakenteita.

VTT:llä on tutkittu laajapinta-alaisen elektroniikan rullalta-rullalle valmistustekniikoita jo vuodesta 2000. Tämä aikana on kyetty kehittämään valmistusteknologioita useille elektroniikan keskeisille komponenteille ja niistä koostuville laitteille. Tutkimuksen ja pilot-valmistamisen tueksi VTT:lle on hankittu mittavat rullalta-rullalle elektroniikan koetuantolaitteistot. Tämän kyvykyyden ansiosta olisi mahdollista kehittää laajan pinta-alan tuotantotekniikoita haluttujen laajan spektraalisen vasteen antamien kalvojen valmistamiseksi.

Tyypillinen kohde valelaitteelle on esimerkiksi panssariajoneuvo. Valelaitteen tulisi tarpeeksi uskottavasti kyetä esittämään ajoneuvoa ilmasta suoritettavalle sensoritiedustelulle. Tällöin laitteen tulee näyttää maastoutetulle ajoneuville, luoda uskottava lämpöjälki sekä tutkavaste.

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihe 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Hankkeen tavoitteena oli sotilasajoneuvon sivuprofiilia esittävän valelaitteen valmistuksen kyvykkyuden selvittäminen ja projektin tavoite rajattiin sensorivasteen yksittäisten osien demonstroimiseen. Tutkittavia alueita olivat: Tutkavaste laitteen metalloinnilla, infrapunavaste lämmityselementeillä ja pintavaste kalustomaalilla.

## 3. Aineisto ja menetelmät

Painetussa elektroniikassa käytetään rullalta rullalle prosessointia, jossa kantajakalvo päällystetään kuvioidulla toiminnallisella musteella. Tyypillisessä tapauksessa muovikalvolle (esim. PET) kuvioidaan johtimet hopeamusteella, käyttäen esim. silkkipainoa, joka kuivauksen jälkeen muodostaa sähköjohtimet. VTT:n koelaitteiston dimensiot asettavat joitakin rajoituksia tutkimukselle, esimerkiksi kalvon maksimi leveys on 30cm ja toistopituus n. 40cm jolloin suuret pinta-alat tulee koostaa pienemmistä elementeistä.

VTT:llä usein käytetty materiaali kombinaatio on käyttää Asahi LS-411AW hopeapastaa ja Melinex ST506 125 µm paksua PET-muovikalvoa, tässä projektissa pyrittiin näiltä osin pitäytymään toimiviksi tunnetuissa tekniikoissa.



Kuva 1. VTT:n MAXI pilot painokone.

Kuva 2. VTT:n DELTA konvertointilinja.

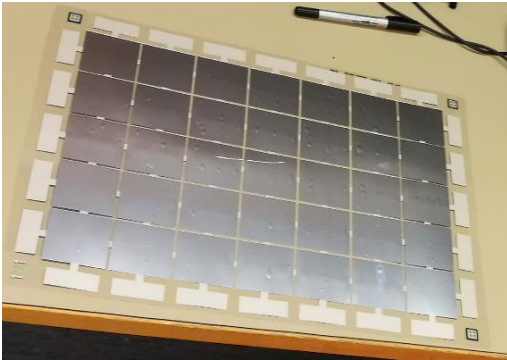
### 3.1 Muovikalvon metallointi

Muovikalvon metallointia testattiin laminoimalla PET-kalvoon kiinni alumiinifolio. Kantokalvolla varustettu alumiinifolio leikattiin "die cut" -prosessilla neliöiksi käyttäen VTT:n DELTA-laitetta. Leikattava kuvio voi olla mielivaltainen mutta leikkausroskan poistamiseksi tulisi rakojen olla vähintään 1 mm leveitä. Metalloinnin todettiin onnistuvan hyvin.



Kuva 3. Rulla die cut -leikkaus työkalu.

---



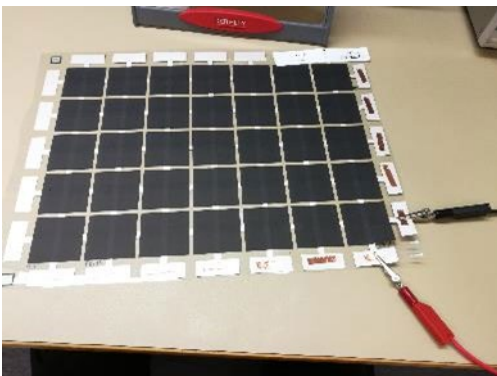
Kuva 4. Muovikalvoon laminoitua ja kuvioitua alumiinia.

### 3.2 Lämmityselementtien valmistus

Lämmityselementtien toteutusta testattiin painamalla hiilipohjaista pastaa vastuselementeiksi. Käytetyn hiilipastan (Loctite EDAG PF 407A E&C) nimellinen neliövastus on 20 ohmia/neliö, 25  $\mu\text{m}$  paksuna kerroksena. Johtimia valmistettiin Asahi LS-411AW hopea pastalla, jonka nimellinen neliövastus on 40 milliohmia/neliö, 10  $\mu\text{m}$  paksuna kerroksena. Adheesion takia pyrittiin hopea painamaan suoraan muovikalvoon ja hiilipasta sen päälle. Käytännössä adheesion kanssa ei havaittu ongelmia. Painokokeet suoritettiin VTT:n ROKO rullalta rullalle koepainolaitteistoa.



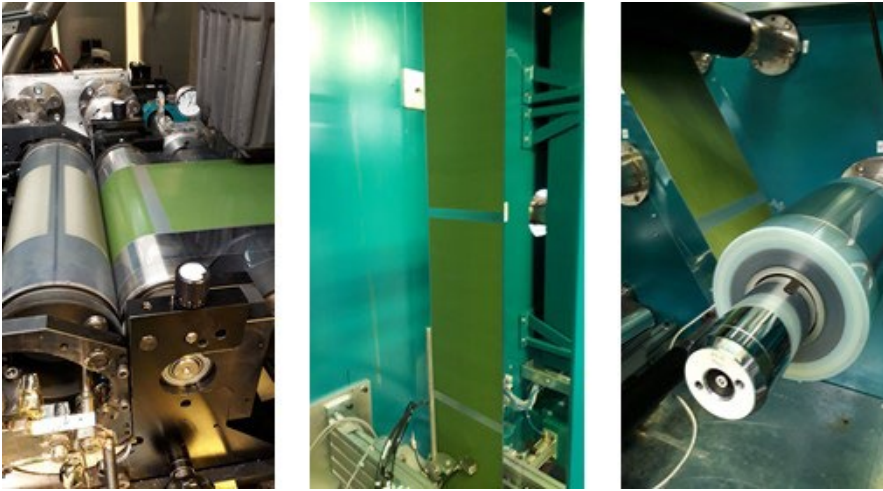
Kuva 5. Hiilipastan painaminen rullalta rullalle menetelmällä. Kuvassa valmiin rainan kelaus rullaksi prosessin lopussa.



Kuva 6. Valmistettu matriisi elementti jossa hopeajohdinten päällä on hiilipasta vastus.

### 3.3 Pintavaste kalustomaalilla

Visuaalinen ja hyperspektraalinen vaste riippuu vahvasti rakenteen pintakerroksesta, samoin kuin lämpösäteilyn pintaemissiivisyys. Tavallista kalustomaalia painettiin rullalta rullalle prosessissa. Testeissä todettiin, että vaaditaan kaksi tai kolme painokerrosta, että saavutetaan haluttu peitto. Lisäksi havaittiin, ettei maalikerros saa olla liian paksu, muuten siitä tulee liian jäykkä ja se murtuu, mikäli muu rakenne pääsee taipumaan.



Kuva 7. Kalustomaalin painaminen rullalta rullalle painokoneella.

### 3.4 Liitännät

Lämmityselementit täytyy liittää virtalähteeseen tai mahdollisesti toisiinsa. Parhaaksi tavaksi todettiin käyttää tavallisia vaateneppareita (Prym Jersey) jotka varsinkin kupariteipillä vahvistettuun hopeajohtimeen kiinnitettynä muodostavat irrotettavan kontaktin jonka resistanssi on alle 1 ohmi. Messinkinen neppari voidaan liittää tavallisiin sähköjohtoihin puristusliitoksella tai juottamalla.

## 4. Tulokset ja pohdinta

### 4.1. Elementtien konsepteja

Valelaitteen elementtejä tutkittiin kahden eri konseptin pohjalta: 1) Kohdelaitteen mukaan räätälöity valelaite sekä 2) Yleiskäyttöinen ohjelmallisesti ohjattava laite.

Räätälöidyn laitteen etuna on tarkasti kohteen mukaan mitoitettujen muodot ja vaste. Haittapuolina taas valmistuserän koko laitetyyppiä kohti täytyy olla suuri, jotta hinta saadaan alas, laitteen muokkaaminen lennosta voi olla haasteellista sekä riski sotilassalaisuuksien vuotamisesta koska laite itsessään sisältää salassa pidettävää informaatiota.

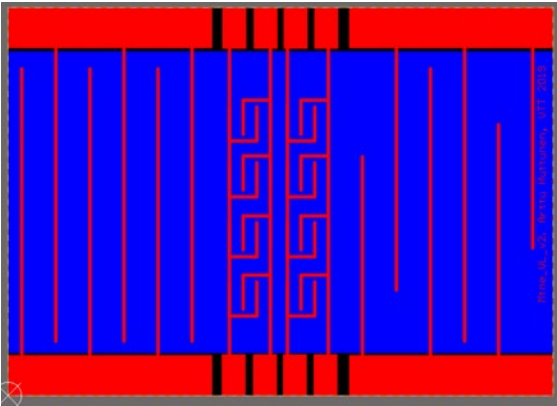
Yleiskäyttöisen laitteen etuna on edullisempi suunnittelu ja valmistuskustannus koska tarvitaan vain yhtä mallia, lisäksi laitteen itsessään ei tarvitse sisältää mitään salattavaa.

---

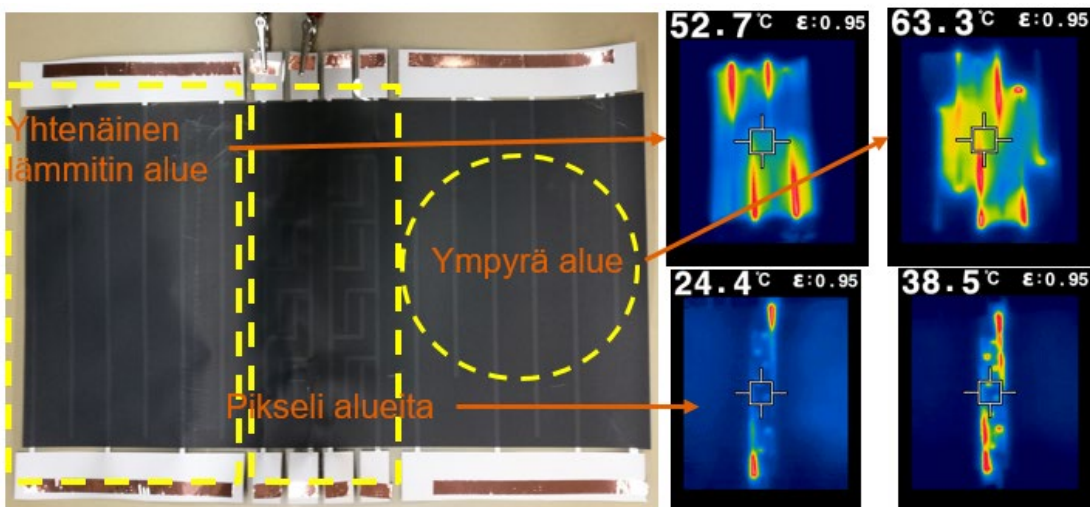
## 4.2 Kohteen mukaan räätälöity laite

Kohteen mukaan räätälöitävää elementtiä testattiin valmistamalla lämmitinelementtikalvo, jossa oli kolme erillistä osaa: Yhtenäinen lämmitettävä alue, pienemmistä elementeistä, 'pikseleistä', koostuva alue sekä ympyrän muotoa muistuttava alue. Painoteknisesti tämän testikappaleen valmistus onnistui hyvin.

Toiminnalliset testit suoritettiin syöttämällä eri alueisiin jännitettä sekä mittaamalla lämpötilaa lämpökameralla (FLIR TG167). Rakenteella pystytään saavuttamaan suuriakin lämpötiloja mutta varsinkin suuren yhtenäisen alueen tapauksessa tarvittava sähköteho on varsin suuri, n. 40 W alueelle jonka koko on n. 150x300mm. Sähkösyötön kannalta vaaditaan 12 tai 24V järjestelmä joka kykenee syöttämään useiden ampeerien virran. Kaikkien rakenteiden tapauksessa todettiin, että tarkalla syöttöjohtimien ja lämmitysvastusten suunnittelulla voitaisiin toteuttaa varsin monimutkaisia kuvioita. Eräs merkittävä ongelma on 'kuumat pisteet' joita muodostuu varsinkin syöttöjohtimien kohdalle. Rakenteen kääntöpuolelle laminoitava alumiinikalvo tasoittaa kuumien pisteiden vaikutusta merkittävästi.



Kuva 8. Layout piirros testirakenteesta. Punainen väri tarkoittaa johtimia, sininen hiilimustaa. Vasen alue toimii yhtenäisenä lämmittimenä, keskellä pienempiä pikseleitä, vasemmalla ympyrän mallinen alue.



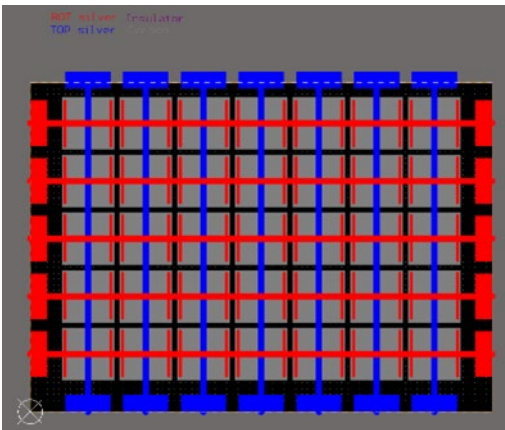
Kuva 9. Testirakenteen toiminnallinen testaus. Lämpökameran kuvissa erottuu kuumia pisteitä paikoissa, joissa virrantiheys on suuri.

---

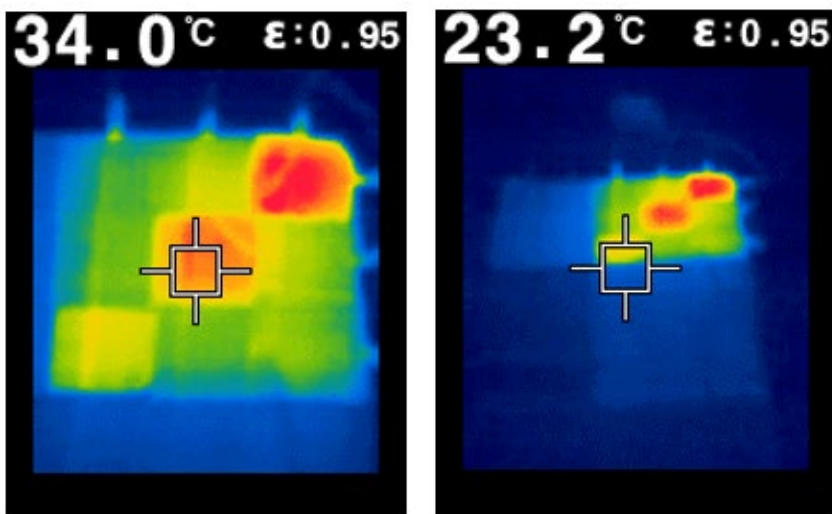
### 4.3 Yleiskäyttöinen elementti

Yleiskäyttöisen lämmitinelementin konseptia testattiin valmistamalla lämmitinvastusmatriisi. Kutsakin matriisin 'pikseliä' voidaan lämmittää kytkemällä pikseliä vastaavat johtimet plus ja miinus navoiksi. Ohjauselektronikalla voidaan käydä läpi kaikki pikselit ja lämmittää niitä halutun lämpökuvan mukaan. Testissä valmistettiin 5x7 matriisi jossa pikselien koko on 5x5cm. Yksittäisen pikselin resistanssiksi mitattiin n. 4 ohmia josta johdinten osuus on noin puolet.

Toiminnallisissa testeissä havaittiin että laitteeseen voidaan muodostaa haluttuja kuvioita, joskin lämmöllä on taipumusta vuotaa viereisiin pikseliä. Tämä johtuu hopea johtimien liian suuresta resistanssista suhteessa lämmitysvastusten resistanssiin jolloin osa virrasta karkaa väärin pikselien kautta. Tätä voidaan korjata pienentämällä johdinten resistanssia leventämällä tai paksuntamalla johtimia sekä käyttämällä paremmin johtavaa materiaalia.



Kuva 10. Yleiskäyttöisen pikselöitävän lämmittimen testirakenne. Sininen ja punainen kuvaavat eri johdin kerroksia joiden välissä on eriste. Harmaa kuvaa hiilikerrosta joka yhdistää johtimet toisiinsa.



Kuva 11. Lämpökuva pikseleistä kun vasemmasta yläkulmasta alkaen lämmitetään diagonaalia. Lämmitys virtaa pääsee karkaamaan myös muiden rivin elementtien kautta.

---



---

## 5. Käytännön huomioita

### 5.1 Tehon kulutus

Laitteen lämmittämiseen kuluva tehoa voidaan karkeasti arvioida yksinkertaisilla laskelmilla. Tehon tarve riippuu lämmitettävästä pinta-alasta, pinnan lämmönsiirtokertoimesta sekä lämpötilaerosta ulkoilmaan. Pinta-ala esimerkiksi Leopard 2 panssarivaunulla on noin 120 m<sup>2</sup> ja lämmön siirtokertoimena (h) voidaan käyttää piirilevyille usein käytettyä arvoa  $h=10 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Tällöin lämpövuoksi (Q) saadaan  $Q = A \cdot h = 1200 \text{ W/K}$  eli 1,2 kW jokaista ulkolämpötilaa korkeammaksi lämmitettyä astetta kohti. Kokoluokaltaan virtalähde on tällöin esim. sähköaggregaatti. Tehon kulutusta voidaan pienentää lämmittämällä vain kriittisiä kohteita.

### 5.2 Hinnan arviointia

Käytännössä laite joudutaan todennäköisesti tukemaan jollakin materiaalilla, esimerkiksi vanerilla. Joitakin raja-arvoja laitteen hinnalle voidaan saada tarkastelemalla materiaalien hintoja. Erittäin suurissa valmistusmäärissä tuotantoprosessin kustannus tuotettua yksikköä kohti on lähellä nollassa jolloin jäljelle jää materiaalien kustannus. Sotilaslaitteiden suuri koko asettaa haasteita myös vaelaitteiden hinnalle, esimerkiksi Leopard 2 panssarivaunun sivuprofiilin koko on noin 30 m<sup>2</sup>. Tätä kokoa voidaan pienentää käyttämällä osittaista naamiointia.

Materiaali	Hinta [euroa/m <sup>2</sup> ]
PET muovikalvo	3
Vaneri	10
Teräslevy	13

## 6. Loppupäätelmät

Tutkimuksessa selvitettiin laajan spektraalisen vasteen vaelaitteen valmistusta painetun elektronikan keinoin. Tutkimuksessa todettiin että painoteknisesti sekä laminoimalla voidaan toteuttaa rakenteita joita käyttäen voidaan valmistaa vaelaitteita.

## 7. Lähteet

## 8. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

---