

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

### Termokrominen adaptiivinen naamiointimenetelmä - osahanke A

**Terho Kololuoma**, Johtava tutkija, VTT Oy, +358 40 756 8167, [terho.kololuoma@vtt.fi](mailto:terho.kololuoma@vtt.fi)  
VTT:n työryhmä: Timo Kurkela, Arttu Huttunen, Dung Nguyen, Elina Jansson ja Martti Pentikäinen

#### TIIVISTELMÄ

Hankkeessa on kehitetty menetelmä, jonka avulla voidaan ohjata termokromisiin materiaaleihin perustuvia adaptiivisia näyttöpintoja. Ohjausmenetelmän avulla termokromimateriaaliin perustuvan pikselöidyn näyttöpinnan lämpötilaa kyetään pikseli kohtaisesti havainnoimaan ja ohjaamaan halutun värin muutoksen aikaansaamiseksi. Lämpötilasensori- ja lämmitinmatriisit valmistettiin painoteknisesti. Matriisit yhdistettiin toiminnalliseksi ohjainmatriisiksi, jota ohjataan pikseli kohtaisesti laiteohjelmiston avulla asetettuun lämpötilaan ja lämpötilasensorimatriisilta saatavaan pinnalta mitattuun lämpötilaan perustuen. Lisäksi hankkeessa tutkittiin mahdollisuuksia toteuttaa painoteknisesti pintojen viilennykseen soveltuvia rakenteita sekä toteutettiin termokromisiin materiaaleihin soveltuva 1 m<sup>2</sup> näyttöpintademonstraattori osahankkeiden A ja B yhteistuloksena.

## 1. Johdanto

Sotilaskalustolle asetettuja keskeisiä vaatimuksia ovat liikkuvuus, tulivoima ja suojautuminen. Kaluston suojautuminen kattaa vaatimukset suojautumiseen niin lukuisia fyysisiä uhkia vastaan kuin myös suojautumisen vihollisen tiedustelulta ja visuaaliselta havainnoinnilta. Huolimatta sotilasteknisen laitteiden kyvystä havaita kohteet monilla eri aallonpituusalueilla aina ultraviolettisäteilyistä tutka-aallonpituuksiin, perustuu sotilaan kyky havainnoida lähialuettaan edelleen suurelta osin visuaaliseen näkyvän aallonpituusalueen informaatioon. Siten kyky vaikuttaa vihollisen havainnointiin maastouttamalla sotilaat ja sotilaskalusto näkyvällä aallonpituusalueella ympäristöönsä on nykyaikaisellakin taistelukentällä edelleen merkittävässä asemassa.

Nykyaikaisen sodankäynnin edellyttämä joukkojen ja kaluston nopea liikkuvuus erityyppisten ympäristöjen välillä asettaa suojavärein toteutettavalle sotilaskaluston maastouttamiselle haasteita. Kohteiden naamiointi uudentyypiseen ympäristöön siirryttäessä vaatii aikaa ja väärän tyyppinen visuaalinen suojaväriyys jopa helpottaa kohteen havainnointia vastustajan näkökulmasta. Kohteen maastoväriyksen kyky adaptoitua, ideaalitulanteessa automaattisesti, muuttuvan toimintaympäristön värimaailmaan tehostaisi ja parantaisi merkittävästi kykyä sotilaskaluston maastouttamiseksi.

Menetelmiä adaptiiviseen naamiointiväriytykseen on haettu niin valoa säteilevistä ratkaisuista kuin värin heijastuksen muuttumiseen perustuvista materiaalinnoista. Aktiivisesti valoa säteileviä pintoja voidaan tuottaa LED-matriisien tai OLED- ja elektroluminesenssi pintojen avulla. Adaptiivisen naamiointin kannalta houkuttelevin näistä vaihtoehdoista on LED-matriisi, jonka avulla voidaan pinnan väriyys valita lähes rajoitteetta lukuun ottamatta mustaa tai muita tummia sävyjä. LED-komponenttien ongelmana on valolähteen pistemäisyys, joka naamioituvuuden kannalta vaatii tiheän, tarkasteluetaisyys riippuvaisen pistematriisin tai valon diffusaattori-rakenteen. Edelleen, emittoivana rakenteena LED:n kirkkauden säätäminen vaatii aktiivista ohjausta muuttuvissa valaistus- ja ympäristöolosuhteissa.

Värin heijastumisen muuttumiseen perustuvat adaptiiviset pinnat eivät puolestaan tuota valoa vaan vaihtavat väriä materiaalin molekyyli-tason orientaation, hapetusasteen tai jonkin muun ominaisuuden muuttuessa. Tämän tyyppiset pinnat tarvitsevat näin ollen ohjausta ainoastaan vaihtuessaan tilasta toiseen, minkä seurauksena pintojen energian kulutus on alhainen. Pintojen valmistaminen laaja pinta-alaisesti on myös huomattavan helppoa käyttämällä esimerkiksi painotekniikoita.

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	Vaihde 295 160 01	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			



Heijastavista, väriä vaihtavia pintoja voidaan valmistaa mm. termokromivärien, eli lämpötilan perusteella väriä vaihtavien materiaalien avulla. Termokromiset värit ovat hyvin tunnettuja ja halutut väripaletit eri toimintaympäristöihin ovat saatavilla. Termokromivärit voidaan totuttaa suojattavaan pintaan yksinkertaisesti maalamalla tai painoteknisesti, tarjoten näin ollen helpon ja edullisen menetelmän suurienkin adaptiivisen näyttöpintojen toteuttamiseksi.

Termokromiväreihin perustuvaa adaptiivista näyttöpintaa täytyy kyetä kuitenkin ohjaamaan hallitusti; pintaa täytyy kyetä lämmittämään ja viilentämään. Teknologia vaatii toimiakseen alueellisesti säädettävän lämmittämatriisin sekä menetelmän matriisin ohjaamiseen. Suomen nopeasti muuttuvasta sääympäristöstä johtuen näyttöpinnan todellinen lämpötila täytyy edelleen kyetä määrittelemään tarkasti, mistä syystä näyttöpinnassa täytyy olla myös halutussa yksikkökoossa pinnan lämpötilan aistiva sensorimatriisi.

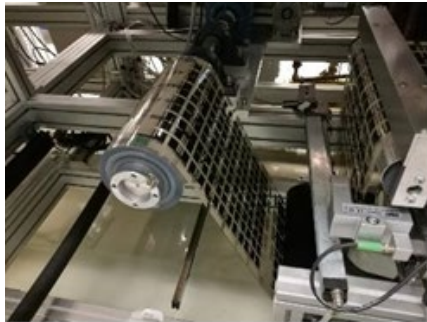
VTT:llä kehitettiin vuoden 2019 Valelaite Matine-projektissa menetelmä kohteen lämpövasteen muokkamiseksi 5x5 cm<sup>2</sup> pikseleistä koostuvan lämmityselementtimatriisin avulla. Matriisin kutakin pikseliä voidaan ohjata yksilöllisesti. Valmistettu lämmitysmatriisi soveltuu pienin muutoksin myös termokromisiin väreihin perustuvan adaptiivisen näyttöpinnan ohjaamiseen. Tampereen Yliopistolla on puolestaan kokemusta termokromisiin materiaaleihin perustuvan näyttöpinnan toteuttamisesta sekä sen adaptiivisesta ohjauksesta. Osaamisen yhdistämiseksi muodostettiin käsillä oleva Termonaamio-hanke, jossa on demonstroitu termokromimateriaaleihin perustuva näyttöpinta sekä sen ohjausmenetelmä. Hanke on jaettu VTT:llä toteutettavaan osahankkeeseen A, jossa tutkitaan menetelmiä adaptiivisen termokromipinnan aktiiviseen ohjaamiseen ja Tampereen yliopiston osahankkeeseen B, jossa toteutetaan itse termokromivärimatriisi.

Tässä osahankkeessa, Termonaamio - osahanke A, on tutkittu menetelmiä valmistaa painoteknisesti laaja-pinta-alainen termokromisiin väreihin perustuvan adaptiivisen näytön ohjausyksikkö. Ohjausyksikkö perustuu Matinen rahoittamassa Valelaite-hankkeessa kehitettyyn lämmityselementtimatriisiin, joka on muokattu soveltuvaksi termokromi-näyttöpinnan ohjaukseen. Ohjausyksikköön on yhdistetty lämpötilasensori rakenteita sekä ohjausmenetelmä, jolla ohjainyksikön pinta voidaan säätää haluttuun lämpötilaan. Hankkeessa on karotettu myös menetelmiä valmistaa näyttöpinnan alueelliseen ja aktiiviseen jäähdyttämiseen soveltuva komponentti, Peltier-elementti, painetussa kalvomuodossa. Tämän kaltainen komponentti mahdollistaisi myös uusia menetelmiä lämpöalueen herätteen hallintaan.

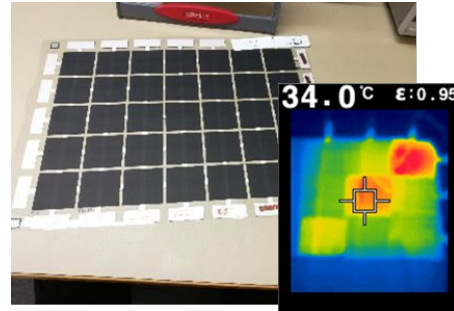
## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tämän osahankkeen tehtävät ja tavoitteet kohdentuvat termokromiväripinnan ohjaukseen tarvittavien menetelmien kehitykseen. Tämän osahankkeen tuloksena syntyy termokromivärikalvon ohjaukseen soveltuva lämmitys- ja kontrollointimatriisi

Termokromiväreihin perustuvan adaptiivisen näytön ohjausyksikön täytyy kyetä tuottamaan kontrolloidusti ja pikselikohtaisesti termokromimateriaalin värinmuutokseen tarvittava lämpötila. Tutkimuksen lähtökohtana on käyttää Matinen vuonna 2019 rahoittaman Valelaite-projektin tulosaineistona syntynyttä elektronisesti ohjattavaa rullalta-rullalle (R2R) painotekniikoin valmistettua lämpövastusmatriisia, joka on esitetty Kuvassa 1.



(a)



(b)

Kuva 1. a) Lämpövastuskalvon R2R-valmistusta, b) sähköisesti ohjattava lämpövastusmatriisileike sekä sen tuottama lämpökuvakuva

Lämpövastusmatriisin kehittäminen termokromisen adaptiivisen naamiopinnan ohjaamiseen soveltamiseksi vaatii seuraavia toimia:

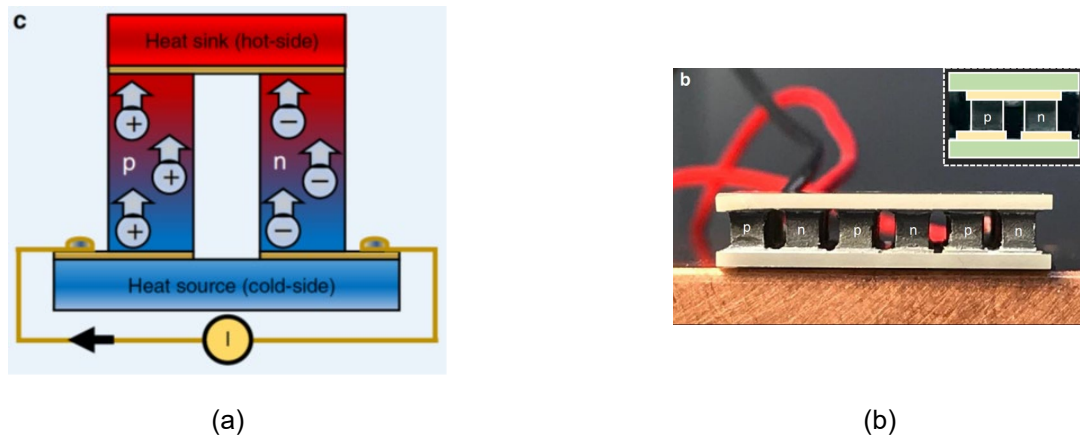
- Lämmitinmatriisi täytyy kyetä tuottamaan rullalta-rullalle paino- ja konversiotekniikoilla halutussa pikselikoossa ja muodossa sekä sen täytyy vastata sähköisiltä ominaisuuksiltaan sille asetetuja tavoitteita
- Lämpötilasensorimatriisirakenteen täytyy kyetä toteuttaa lämmitinmatriisin valmistuksessa käytetyillä menetelmillä
- Lämmitin- ja sensorimatriisin tulee integroida joko samalle ohjainkalvolle tai se tulee tuottaa erillisinä kalvorakenteina, jotka integroidaan toisiinsa toiminnallisen ohjainmatriisin toteuttamiseksi
- Laiteohjelmisto lämmitinmatriisin kontrolloimiseksi tulee ohjata lämmitinmatriisin lämpötilaa asetusarvoihin ja reaaliaikaiseen sensorimatriisilta tulevaan mittausdataan perustuen
- Tutkitaan pikselien viilentämiseen soveltuvien rakenteiden toteutettavuutta kirjallisuuteen ja esikokeisiin perustuen. Tämänkaltaisia elementtejä ei nykyisen tiedon mukaisesti ole saatavilla R2R-prosessiin soveltuvassa kalvom muodossa

Toiminnallinen ohjainmatriisi toteutetaan  $1 \text{ m}^2$  pinta-alaisena rakenteena, joka koostuu  $5 \times 5$  pikselimatriisista. Matriisin jokaisen pikselin lämpötila voidaan mitata ja säätää pikselikohtaisesti. Näyttöpinta toteutetaan ja integroidaan ohjainmatriisiin Tampereen Yliopiston toimesta osatehtävässä B.

### 3. Termoelektriset jäähdyttimet

Pintojen kontrolloitavaan lämmitykseen soveltuvia menetelmiä on ainoastaan muutamia; megneto- ja elektrokaliset ilmiöt sekä termoelektrinen jäähdytys. Näistä menetelmistä termoelektrinen jäähdytysratkaisu on ainoa "riittävän" lähellä käytännön toteutettavuutta oleva menetelmä.

Termoelektristen jäähdyttimien toiminta perustuu ns. Peltier-ilmiöön, jonka periaate on esitetty Kuvassa 2a. Peltier-elementissä kahden erilaisen johtimen rajapinnan välille muodostuu lämpötilagradientti, kun johtimien läpi syötetään sähkövirtaa. Tämän seurauksena toisessa rajapinnassa lämpötila laskee ja toisessa puolestaan nousee. Virransuunnasta riippuen laitetta voidaan käyttää joko jäähdyttämiseen tai lämmittämiseen. On huomioitava, että lämpö ei häviä prosessissa ja se on viilennysratkaisussa siirrettävä sopivaan lämpökäyttöön.

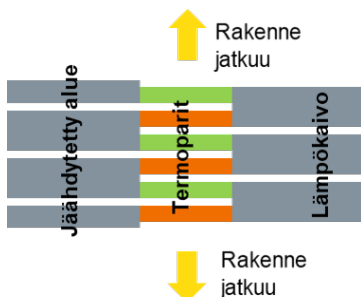


Kuva 2. a) Termoelektrisen jäädyttimen toimintaperiaate. b) Termoelektrinen jäädytyn koostuu p- ja n-tyyppin puolijohdavista ”termojaloista”, jotka on kytketty sähköisesti sarjaan ja termisesti rinnakkain.

Perinteiset termoelektrisinä jäädyttiminä käytettävät Peltier-elementit koostuvat kahden sähköisesti eristävän levyn välissä olevista useista termopareista, jaloista, kuten Kuvan 2b Peltier-elementin poikkileikkauksessa on esitetty. Rakenne on jäykkä, raskas ja kallis toteuttaa; n. 10 €/25 cm<sup>2</sup> elementti. Perusrakenteen kaltainen rakenne on haastava toteuttaa massavalmistustekniikoilla, kuten painamalla, koska termojalkojen pitää olla huomattavan paksuja (>>50 μm) tehokkaan jäähdytyksen eli isomman lämpötilaeron aikaansaamiseksi.

Toisessa rakenteen vaihtoehdossa, planaarisessa tasosuuntaisessa rakenteessa, termoparit, niitä yhdistävät johtimet, jäädytettävä alue ja lämpökaivo ovat kaikki samassa tasossa ja lämpöä johdetaan tasosuuntaisesti esimerkiksi piirilevyn keskellä olevasta sirusta piirilevyn reunoja kohden. Tämä rakenne on helpompi toteuttaa painamalla, sillä kerrospaksuusvaatimukset ovat huomattavasti pienempiä. Ongelmaksi painatussa rakenteissa muodostuu painettavassa olevien materiaalien ominaisuudet, koska perinteisiä materiaalien prosessointimenetelmiä, kuten keraamien sintrausta, ei voida käyttää. Tämä laskee rakenteiden suorituskykyä merkittävästi. Orgaaniset puolijohdemateriaalit ovat lupaavia materiaaleja mutta raportoituja parhaita ominaisuuksia on vaikea saavuttaa normaaliolosuhteissa, minkä lisäksi rakenteet kärsivät epästabiilisuudesta. Toinen käytännön ongelmana on painettujen termoelektristen rakenteiden tyypillinen käyttö sähkön tuottamiseksi lämpötilasäädön sijasta. Nämä rakenteet eivät ole jäähdytykseen optimaalisia. Myös tutkimuksissa raportoitujen koko on hyvin pieni ollen ainoastaan joitain senttimetrejä.

Kuvassa 3 on esitetty kirjallisuuteen perustuen painettavaksi ehdotettu Peltier-elementti rakenne.

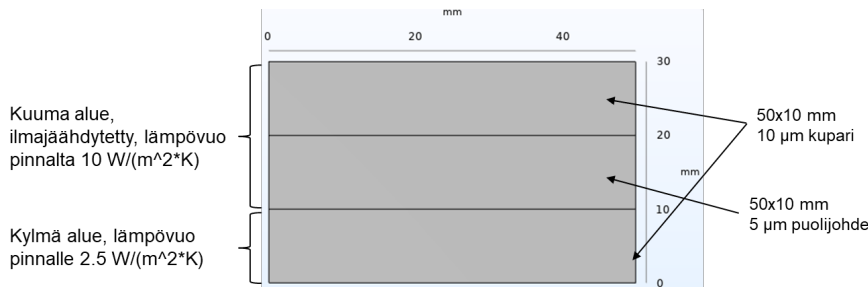


Kuva 3. Ehdotettu tasosuuntainen rakenne alustaviin painokokeisiin.

### 3.1. Termoelektristen rakenteiden mallinnustulokset

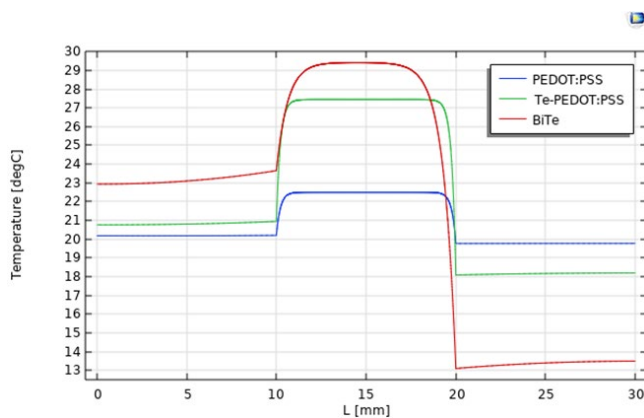
Painettavia termoelektrisiä jäähdynrakenteita mallinnettiin COMSOL Multiphysics ohjelmistolla. Simulointimalli on esitetty Kuvassa 4.

Mallinnuksissa selvisi, että jäähdytykseen soveltuva optimaalinen rakenne on mahdollisimman lyhyt, paksu ja leveä yksijalkainen rakenne. Johtimien, rakenteen päiden, on oltava mahdollisimman hyvin sähköä ja lämpö johtavia eli käytännössä metallisia.



Kuva 4. Painettavan Peltier-elementin simulointimalli

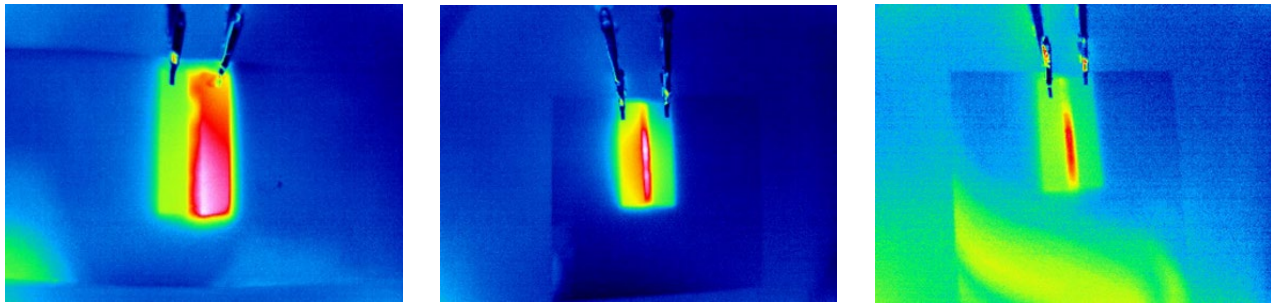
Kuvassa 5 on esitetty simulointituloksia käytettäessä eri materiaaleja. Simulointien mukaisesti saavutettavat lämpötilaerot, jopa keraamisella BiTe materiaalin arvoilla ovat suhteellisen alhaiset. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon puolijohde paksuus 5 µm. Lämpötilaeroja voidaan kasvattaa tätä paksuutta vastaavasti kasvattamalla.



Kuva 5. Simulointitulokset. PEDOT:PSS lämpötilaero  $0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ , Te-PEDOT:PSS  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  ja BiTe  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Puolijohde paksuutta kasvattamalla lämpötilaeroa voidaan lisätä.

### 3.2. Termoelektristen rakenteiden painokokeet

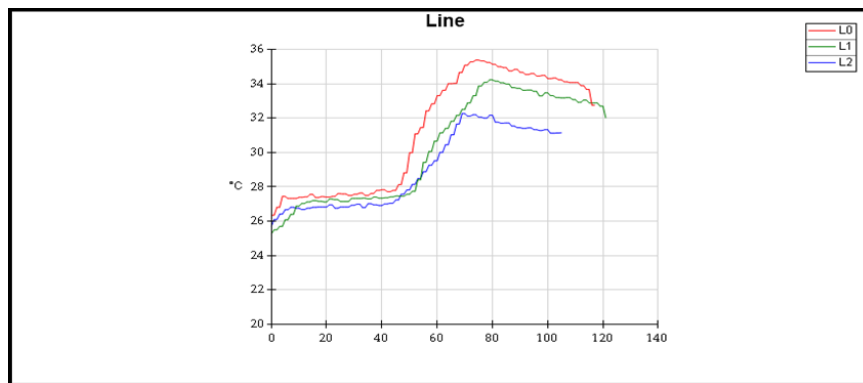
Termoelektriset rakenteet valmistettiin painamalla puolijohdemateriaali kahden muovialustalle asetetun kupariteipin väliin. Puolijohdemateriaaleina käytettiin kaupallisesti saatavia PEDOT:PSS SV4, PEDOT:PSS EL-P5015 sekä CNT-värejä. Lisäksi antimonilla seostetusta p-tyyppin vismutti telluridijauheesta valmistettiin painoväri. Materiaaleilla valmistettujen termoelektristen elementtien toiminta todennettiin kokeellisesti lämpökuvaamalla, Kuva 6.



(a)

(b)

(c)



(d)

Kuva 6. Lämpökuvat painoteknisesti valmistetusta termoelektrisestä rakenteesta (jäähdyttämätön). a) PEDOT:PSS SV4, b)  $Sb:Bi_2Te_3$ , c) CNT ja d) poikkileike PEDOT:PSS SV4 elementin lämpökuvasta.

Tulokset jäähdyttämättömillä PEDOT:PSS SV4:llä painetulla rakenteella olivat odotettua paremmat. Jäähdyttimet lämpenivät tehokkaasti toiselta puolelta, parhaimmillaan lähes 10 °C, toisen puolen pysyessä alkulämpötilassa. Valitettavasti myöhemmässä jäähdytyksessä mittauksessa jäähdyttimet eivät toimineet lainkaan. Aiempia jäähdyttämättömien mittausten tuloksia ei saatu toistettua myöhemmin, sillä puolijohdemateriaali lämpeni pistemäisesti. PEDOT:PSS SV4 valmistetut termoelektriset rakenteet osoittautuivat hyvin herkiksi. Elementtien toiminnasta jäähdytysmittausten aikana ei ole varmuutta.

Toisella PEDOT:lla, EL-P5015:llä, sekä BiTe-muste –jäähdyttimillä saatiin jäähdyttämättömissä rakenteissa aikaiseksi parhaimmillaan kuuma elektrodi lämpenemään noin 2 °C kylmää puolta lämpimämmäksi ja tällöinkin puolijohhteessa tapahtui merkittäviä lämpöhäviöitä. Hiilinanoputkipainatukset toimivat testatuista materiaaleista heikokiten, suurimpaan osaan ei muodostunut lainkaan lämpötilaeroja. Yhdistetty nanoputki+PEDOT toimi pelkkää PEDOT:ia heikommin.

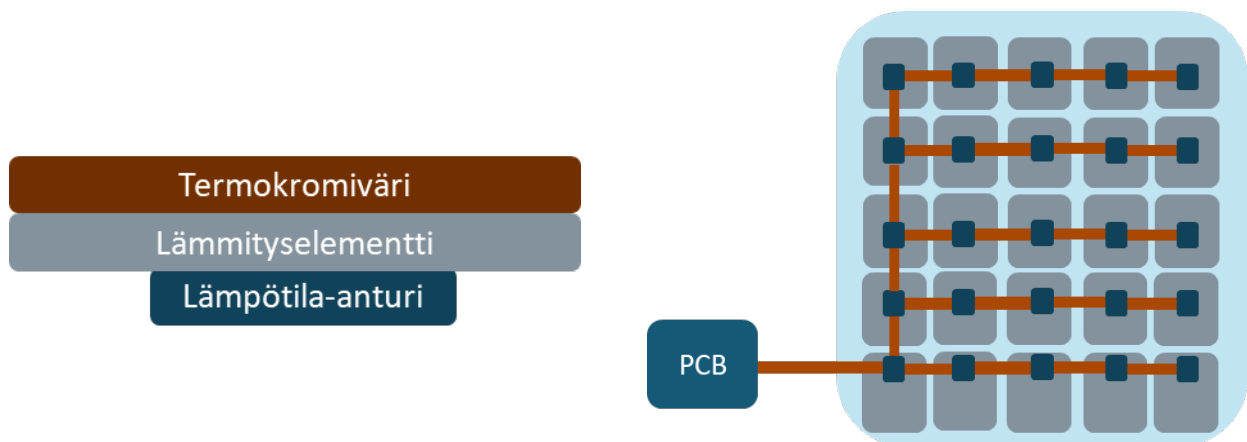
Johtopäätöksenä voidaan todeta, että Jäähdyttämättömillä elementeillä saavutetut lämpötilaerot osoittavat painettujen Peltier-elementtien toimivan jollain tasolla. Kuitenkin jäähdytetyjen elementtien toimimattomuus osoittaa, että käytetyt materiaalit eivät ole vielä riittävän hyviä toimivaan painettuun Peltier-jäähdytimeen. Myös itse rakenteen valmistaminen vaatisi kehitystä; puolijohteen ja kuparin välinen liitos oli usein epätasainen ja herkkä, ja useissa tapauksissa esti elementin toiminnan täysin.

## 4. Termokromimateriaali näyttöpinnan ohjausmenetelmä

Tutkimussuunnitelman mukaisesti projektin päätuotos on 1 m<sup>2</sup> suuruinen termokromimateriaaleihin perustuva näyttöpinta. Itse näyttöpinta ja sen ympäristön havainnoiva adaptiivinen älykäs ohjaus, jolla tarkoitetaan näyttöpintasysteemin kykyä havainnoida ympäristöä ja mukautua siihen, toteutetaan osahankkeessa B. Tässä hankkeessa on toteutettu menetelmä termokrominäyttöpinnan ohjaamiseksi, joka termokromimateriaaleja käytettäessä tarkoittaa kykyä kontrolloida halutulla tavalla pinnan lämpötilaa.

1 m<sup>2</sup> suuruinen näyttöpinta koostuu 5 x 5 matriisista, mikä on kohteelle, sen koosta riippumatta, tyypillinen maastouttamisresoluutio. Jokaisen matriisin pikselin lämpötila täytyy kyetä mittaamaan ja vertaamaan sitä haluttuun asetusarvoon. Mittaustietoon sekä asetusarvoon perustuen pikselin lämpötilaa täytyy kyetä ohjaamaan laiteohjelmistolla sekä valmistettavalla pikselikooltaan vastaavalla lämmitinmatriisilla.

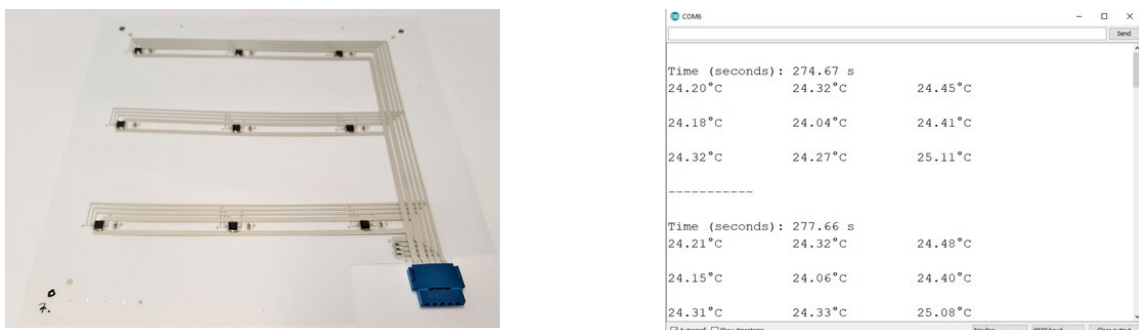
Lämmityspikselin periaatteellinen poikkileike, joka koostuu kolmesta toisiinsa laminoitavasta kalvokerroksesta, sekä näyttöpintademonstraattorin periaatekuva on esitetty Kuvassa 7.



Kuva 7. Vasen: pikselin poikkileike sisältäen kolme kalvokerrosta. Oikea: pikselimatriisin periaate kuva.

### 4.1. Lämpötila-anturimatriisi

Lämpötila-anturimatriisikalvo toteutettiin ensimmäisessä vaiheessa 3 x 3 matriisina 30 x 30 cm<sup>2</sup> PET-muovikalvolle menetelmän ja sen toiminnallisuuden valmistamiseksi. Anturin piirikaavio toteutettiin arkkisilkkipainotekniikalla 3-kerrosrakenteena. Lämpötila-anturit ja kondensaattorit ladottiin kalvolle käyttämällä VTT:n LAKOR2R-ladontalaitteistoa. Valmistettu anturimatriisi testattiin Arduinon mikrokontrollerilla. Kuvassa 7 on esitetty 3 x 3 anturimatriisi sekä Arduinon mikrokontrollerilta saatava sensoreiden mittausdata.

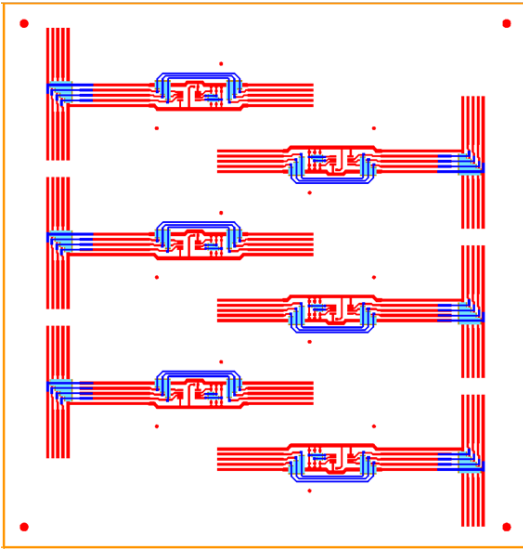


Kuva 8. Vasemmalla 3 x 3 anturimatriisi. Oikealla Arduinon mikrokontrollerilla matriisista saatava mittausdata.

Näyttöpintademonstraattori on pinta-alaltaan niin suuri, ettei sensorikalvo kyetä nykyisellä laitteistolla täysi kokoisena valmistamaan. Tästä syystä anturointi päätettiin toteuttaa yksittäisillä antureilla, jotka yhdistetään

toisiinsa ja ohjauselektroniikkaan kaapeleilla.

Kuten testausvaiheessa, valmistettiin anturin piirikuvio 3-kerrosrakenteena silkipainolla. Anturit (Texas Instruments (TMP165AIDGKT) ladottiin vastaavasti. Anturit yksilöitiin antamalla I2C-tiedonsiirtoväylän osoite kullekin anturille johdottamalla anturin osoitepinnit joko käyttöjännitteeseen, maahan tai jättämällä se kelluvaksi. Anturimatriisin valmistuksen helpottamiseksi johdotuksessa on liitännät kolmessa suunnassa. Kuvassa 9 on esitetty antureiden piirikaavio. Yhdestä painetusta arkista saadaan kuusi anturipohjaa.



Kuva 9. Antureiden piirikuviota ja silkipaino layout.

Lämpötilasensorin muodostamiseksi anturit leikattiin irti painoalustasta ja yhdistettiin toisiinsa liittimien ja lattakaapeleiden avulla siten, että yhteinen I2C väylä kulki kaikille antureille. Lämpötilasensorimatriisi koottiin kennomuoville. Sensorit sijoitettiin siten, että ne ovat jokaisen lämpötilamatriisin pikselin keskellä. Anturimatriisi yhdistettiin lopuksi kontrollielektroniikkaan joka vastaa antureiden datan lukemisesta ja lämmityselementtien lämmittämisestä. Anturiliitännät ja koottu lämpötilan mittausmatriisi ovat esitettyinä Kuvassa 10.



Kuva 10. Anturiliitännät ja koottu lämpötilan mittausmatriisi.

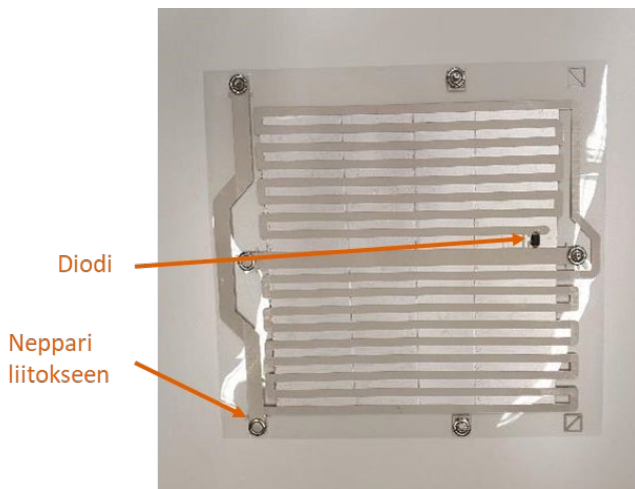
---



## 4.2. Lämmitysmatriisi ja sen integrointi sensorimatriisiin

Näyttöpintademonstraattorin lämmityspikselit valmistettiin 20 x 20 cm<sup>2</sup> pikselikokoon. Kuten lämpötilasensorimatriisissa, muodostettiin myös lämmitysmatriisi kokoamalla yhteen painoteknisesti valmistetut pikselit.

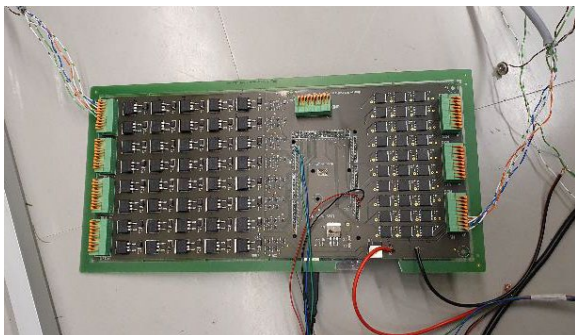
Lämmitin valmistettiin painamalla hopeapastalla lämmitin kuvio PET-muoville. Näin valmistetun lämmitinelementin tyypillinen resistanssi oli noin 45  $\Omega$ . Diodit (Diodes inc. SBR8UP60P5), jotka estävät passiivimatriisiohjauksesta johtuvaa parasiittistä lämpenemistä, liitettiin käsin johtavan liiman avulla rakenteeseen. Pikselit liitettiin toisiinsa neppareilla, jotka muodostavat pikseleiden välille myös sähköä johtavan väylän. Lämmittimen takapintaan asennettiin vielä alumiinikalvo lämpöheijastimeksi sekä tasoittamaan johtimien muodostamaa lämpökuviota koko pikselin alueelle tasaisen värinmuutoksen aikaansaamiseksi. Lämmitinpikseli on esitetty Kuvassa 10.



Kuva 11. Painoteknisesti valmistettu lämmitinpikseli.

Lämmitinpikselit yhdistettiin anturimatriisiin ja edelleen ohjainpiirilevyyn. Lämmitinmatriisia ohjataan aikajakoisesti, jolloin ainoastaan yhtä pikseliä lämmitetään kerrallaan; asetetulla aikajaksoalämmitys jakaantuu tavoite lämpötilan alapuolella olevien pikseleiden kesken. Kun aikajakso asetetaan 2,5 sekuntiin ja kaikki pikselit lämpenevät, lämmitetään kutakin pikseliä 2500 ms/25 eli 100 ms. Mikäli ainoastaan viittä pikseliä lämmitetään, on aika vastaavasti 500 ms. Menetelmän heikkoutena nähdään näin ollen suoraan, että lämmitykseen käytössä oleva teho per pikseli laskee nopeasti pikselimäärän lisääntyessä, joka vastaavasti rajoittaa saavutettavaa lämpötilaa.

Lämmitinmatriisia ajettiin sähköturvallisuuskulmasta johtuen 48 V jännitteellä käyttäen noin 1.5 A virtaa. Sähköteho oli siis noin 72 W. Sähkötehoa rajoittavat johtimien virrankesto sekä diodien lämpötilan kesto. Kuvassa 11 on esitetty lämmitinmatriisin ohjain piirilevy ja kuva lämmitin matriisin testauksesta.



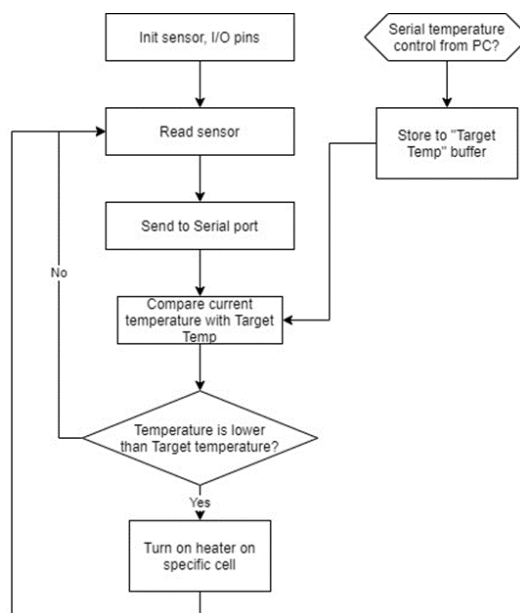
Kuva 12. Lämmitinmatriisin ohjain piirilevy ja lämmitinmatriisin testausta. Lämpökamerakuvassa näkyy läm-

mitinmatriisiin alarivi lämmitettynä.

Lämmitinmatriisin testauksen aikana havaittiin, että pikseleiden lämmönhallinta oli valitusta ohjausmenetelmästä johtuen haasteellista. Tavoiteltujen lämpötilojen saavuttaminen ei halutuissa pinta-aloissa pelkällä kalvolaminaattirakenteella onnistunut. Eristämällä lämmitinmatriisin rakennetta lämpötilaa voitiin nostaa. Eristäminen aiheuttaa toisaalta hitautta värinmuutokseen erityisesti, kun pinnan lämpötilan tulisi jäähtyä. Tämän lisäksi valmistettuja lämmitin pikseleitä jälkiprosessoitiin kalanteroimalla, jolloin niiden vastusta kyettiin alentamaan. Toimenpiteiden avulla kyettiin lämmitinmatriisissa vähintään 4 pikseliä nostamaan samanaikaisesti yli 50 °C lämpötilaan.

### 4.3. Laiteohjelmisto ja matriisin ohjaus

Termokromisen näyttöpinnan ohjain matriisi koostuu 5 x 5 lämmitinpikselirakenteesta, jota ohjataan aikajaksoitteisesti käymällä jokainen pikseli läpi. Pikseli valitaan valitsemalla pikseliä vastaava sarake ja rivi. Ohjain laitteena käytetään Arduino Mega 2560 kontrolleria. Lämmityselementit ja lämmityssensorimatriisi on kytketty samaan ohjauselektronikkaan, jota ohjataan tietokoneen käyttöliittymältä. Tietokoneen käyttöliittymä lukee sarjaportista jokaisen lämpötilasensorin lämpötilan ja näyttää sen. Käyttöliittymään voidaan jokaiseen pikseliin asettaa haluttu lämpötila, jonka jälkeen ohjauselektronikka ohjaa lämmityselementeille menevää virtaa, siten että se jakaantuu aikajaksoitteisesti niiden pikseleiden kesken, joiden lämpötila on alle asetusarvon. Kuvassa 12 on esitetty kaaviokuvana ohjausmatriisin ohjauslogiikka. Kuvassa 13 on esitetty käyttöliittymä eri ajanhetkillä.



Kuva 13. Ohjausmatriisin ohjauslogiikka



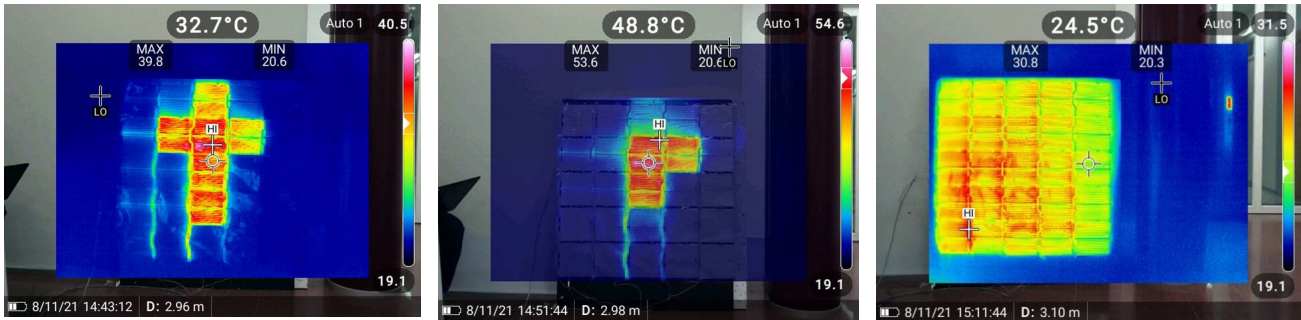
Viiteen pikseliin asetettiin halutuksi lämpötilaksi 50C

Ainoastaan näiden pikseleiden lämpötila lähti nousemaan

Muiden pikseleiden lämpötila pysyi lähes ympäröivän lämpötilan tasalla

Kuva 14. Ohjauselektronikan käyttöliittymä

Kuvassa 15 on esitetty termokrominäyttöpinnan ohjainmenetelmän toimintaa. Lämpökamera kuvissa näkyy erilaisia haluttuja lämmityskuviaita.



Kuva 15. Lämpökamerakuvat osoittavat termokrominäyttöpinnan toiminnallisuuden

## 6. Yhteenveto ja havaintoja

Hankkeen aikana suunniteltiin ja toteutettiin termokromimateriaaleihin perustuvan näkyvän alueen adaptiivisen näyttöpinnan ohjausmenetelmä ja siihen perustuva 1 m<sup>2</sup> suuruinen termokrominäyttöpinnan ohjainmatriisi. Lämpötilanmittausmatriisi ja lämmitinmatriisi koostuvat 20 x 20 cm<sup>2</sup> pikseleistä, jotka edelleen muodostavat 5 x 5 matriisin. Molemmat matriisit ovat painotekniikoin valmistettu. Lämmitinmatriisin jokaista pikseliä ohjataan itsenäisesti perustuen pikseliltä mitattuun lämpötilaan sekä sille annettuun asetustempötilaan.

Termokromimateriaaleihin perustuvan näyttöpinnan lämmön hallinta on suurissa pinta-aloissa haastavaa vaaten huomattavan paljon sähkötehoa. Tarvittavaa tehoa voidaan arvioida empiirisellä vakiolla ~10 W/K·m<sup>2</sup> joka mittauksen perusteella antaa oikean suuntaisia arvoja. Mikäli neliömetrin pinta-ala lämmitetään 30 astetta huoneenlämpötilan yläpuolelle 50 °C:seen tarvitaan tehoa arviolta 300 W. Projektissa käytettävien termokromien transitiolämpötilat olivat 32 °C ja 47 °C. Eryteisesti tuuli, pakkanen ja sade voivat viilentää termokromi näyttöpintaa nopeasti värimuutoslämpötilan alapuolelle, minkä seurauksena pinta ei tuota haluttua värikuviota. Terminen eristäminen parantaa lämmön hallintaa hidastaen kuitenkin näytön toimintaa. Eristäminen myös lisää rakenteen paksuutta, jäykkyyttä ja painoa. Kustannustehokasta ja käyttökelpoista menetelmää pinnan aktiiviseen viilentämiseen ei ole, mikä osaltaan rajoittaa pinnan käytettävyyttä. Huomioitavaa on edelleen, että herätteen hallinta näkyvällä ja lämpöalueella on termokromi näyttöpinnalla samanaikaisesti haasteellista.

Hankkeessa tutkittiin lisäksi menetelmiä näyttöpinnan aktiiviseen viilentämiseen. Tähän tarkoitukseen parhaiten soveltuva rakenne olisi planaari, painoteknisesti suurille pinta-aloille valmistettava Peltier-elementti. Näitä ei ole kuitenkaan vielä kaupallisesti saatavilla. Comsol-mallinnuksen perusteella jäähdytykseen soveltuva optimaalinen rakenne on mahdollisimman lyhyt, paksu ja leveä yksijalkainen rakenne. Mallinnuksen tulosten mukaisia rakenteita valmistettiin erilaisilla puolijohdemateriaalilla ja jäähdyttämättömällä rakenteella saavutettiin peräti +10 °C lämpötilamuutos. Tavoiteltua viilennys-efektia ei kuitenkaan saavutettu rakenteiden osoittamaa lisäksi epästabiileiksi. Viilennys-efektin saavuttamiseksi planaarilla ja painetulla Peltier-elementillä tarvitaan uusia, huomattavasti korkeamman hyötysuhteen ja hyvyysluvun materiaaleja.