

Veeti Luttinen

# E-TEKSTIILIT JA NIIDEN VALMISTAMINEN

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Katja Laine  
Heinäkuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Veeti Luttinen: E-tekstiilit ja niiden valmistaminen  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma  
Heinäkuu 2024

---

Tässä työssä annetaan e-tekstiilin määritelmä ja käsitellään e-tekstiilien kehitystä siihen, mitä ne ovat tänä päivänä. Lisäksi työssä käsitellään, mistä ja miten e-tekstiilejä valmistetaan. Työ on kirjallisuuskatsaus, joten lähteet ovat aikaisemmin julkaistuja tiedeartikkeleita, joiden tietoja täydennetään ja tarkennetaan paikoin internetistä löydettävällä tiedolla.

E-tekstiilit ovat tekstiileitä, joihin on jollain tapaa sijoitettu tai sulautettu elektroniikkaa. Ensimmäiset e-tekstiilien edustajat olivat tavallisia vaatteita, joihin oli kiinnitetty perinteistä elektroniikkaa. E-tekstiilit ovat kehittyneet vuosien saatossa siihen, että ne pystytään toteuttamaan täysin ilman perinteistä elektroniikkaa, ja niissä piirit ja komponentit ovat toteutettu kokonaan tekstiiliin alusrakenteisiin, kuten lankoihin.

Nykypäivän e-tekstiilit voidaan valmistaa pääosin käyttämällä kahta eri materiaalia: sähköisesti johtavia lankoja ja ohutkalvoja. Lankoja ja kalvoja voidaan valmistaa metalleista, polymeereistä sekä hiilen allotroopeista. Sähköisesti johtavia lankoja voidaan valmistaa sijoittamalla johtavaa materiaalia eristelangan sisään, päällystämällä eristelankoja tai valmistamalla luonnollisesti johtavia lankoja. Lankoja voidaan lisätä tekstiiliin valmistuksen alkuvaiheissa muun muassa kutomalla ja neulomalla tai loppuvaiheessa kirjonnalla. Ohutkalvoja valmistetaan käyttämällä eri painomenetelmiä. Ohutkalvot lisätään tekstiiliin sen valmistuksen loppuvaiheessa.

Työssä käsitellään myös taipuisien komponenttien valmistusta sähköisesti johtavista langoista ja ohutkalvoista. Monimutkaisempia komponentteja kuten antureita, generaattoreita, akkuja ja superkondensaattoreita voidaan valmistaa langoista ja kalvoista. Näitä komponentteja voidaan soveltaa lääketieteellisiin ja vapaa-ajan tarkoituksiin, kuten urheiluun.

E-tekstiilien valmistuksen suurin haaste on tuottaa materiaaleja, jotka ovat hyviä johtamaan sähköä sekä mekaanisesti kestäviä ja joustavia. E-tekstiileille on myös tärkeää olla pestäviä sekä hengittäviä. Näiden ominaisuuksien säilyttäminen on myös haasteena e-tekstiilien valmistuksessa.

Avainsanat: E-tekstiilit, langat, ohutkalvot, anturit, nanogeneraattorit, superkondensaattorit

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. E-TEKSTIILIT VUOSIEN SAATOSSA .....	2
3. MATERIAALIT JA VALMISTUSMENETELMÄT .....	5
3.1 Sähköisesti johtavat langat .....	6
3.1.1 Luontaisesti johtavien lankojen valmistus .....	7
3.1.2 Lankojen ja kuitujen päällystäminen sähköisesti johtavalla materiaalilla .....	10
3.2 Sähköisesti johtavat kalvot .....	11
3.3 Polymeerit .....	16
3.4 Hiilen allotroopit .....	16
4. E-TEKSTIILIEN KOMPONENTIT .....	18
4.1 Anturit .....	18
4.1.1 Paine- ja rasitusanturit .....	18
4.1.2 Lämpöanturit .....	20
4.2 Energian keräys .....	21
4.2.1 Liikepohjaiset nanogeneraattorit .....	22
4.2.2 Lämpösähköiset nanogeneraattorit .....	23
4.2.3 Valosähköiset nanogeneraattorit .....	23
4.3 Energian varastointi .....	23
5. YHTEENVETO .....	26
LÄHTEET .....	28

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

DOD	drop-on-demand
EDLC	electrostatic double layer capacitor
GO	graphene oxide
LED	light emitting diode
oCVD	oxidative chemical vapor deposition
UHMWPE	ultra-high molecular weight polyethylene
VOC	volatile organic chemical

# 1. JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tuottaa kirjallisuuskatsaus e-tekstiileistä yleisellä tasolla. Opinnäytetyössä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mitä e-tekstiilit ovat?
- Miten e-tekstiilit ovat kehittyneet vuosien varrella?
- Miten ja mistä materiaaleista e-tekstiilejä valmistetaan?
- Minkälaisia komponentteja näistä materiaaleista saadaan e-tekstiileihin?

E-tekstiileillä tarkoitetaan tekstiilejä, johon on jollain tavalla integroitu tai sulautettu elektroniikkaa [1]. Opinnäytetyön aihe on rajattu yksinomaan e-tekstiileihin. Työssä ei käsitellä niin kutsuttuja älytekstiilejä (eng. smart textile). Älytekstiiliä käytetään joskus e-tekstiilin synonyymina, mutta ne erotetaan tässä työssä määrittelytasolla. Älytekstiili on tekstiili, joka pystyy reagoimaan johonkin ulkoiseen ärsykkeeseen, kuten lämpötilan tai paineen vaihteluun, halutulla ja toistettavalla tavalla [2]. Älytekstiileissä ei siis välttämättä ole elektroniikkaa.

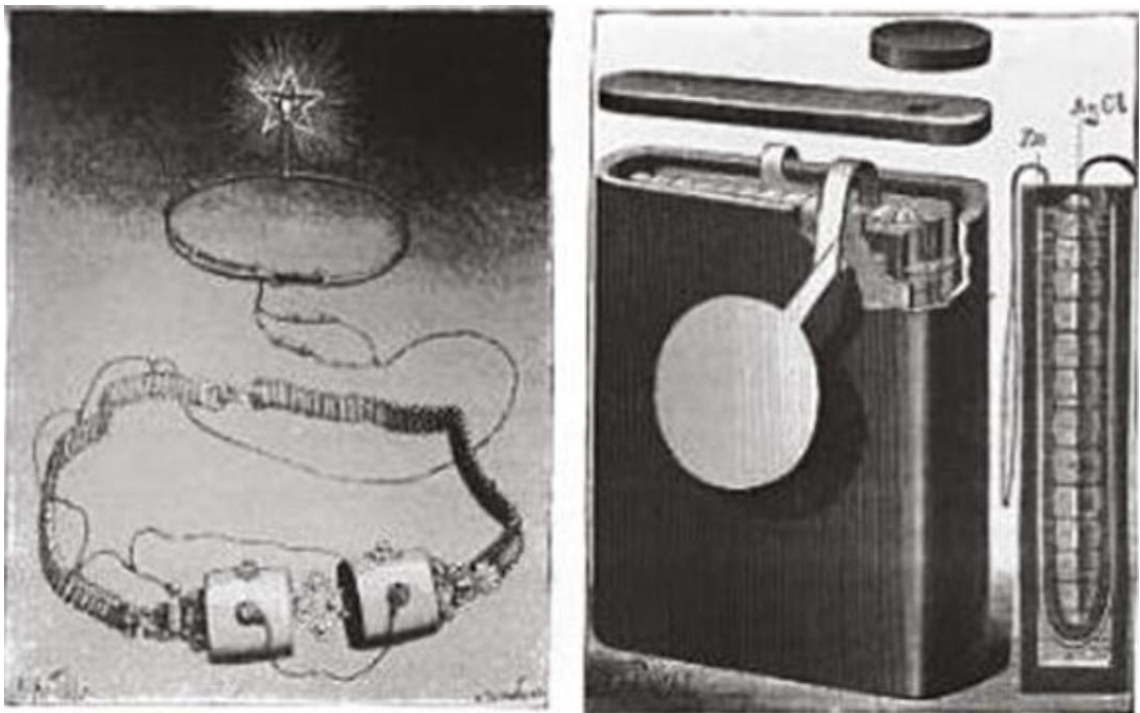
E-tekstiileitä käytetään muun muassa lääketieteessä potilaan jatkuvaan tarkkailuun. Huippu-urheilijat voivat tarkastella urheilu suorituksiaan ja saada reaaliaikaista dataa ilman ylimääräistä elektroniikkaa, kuten kelloja, vöitä tai irrallisia elektrodeja. E-tekstiilit tarjoavat myös ratkaisuja energian keräämiseen liikkeestä, ruumiinlämmöstä ja ympäristöllisistä tekijöistä, kuten valosta. E-tekstiileillä voisi siis kerätä uusiutuvaa, käytännössä loputonta energiaa pelkästään olemisesta.

Työssä esitellään e-tekstiilien yleisimmät valmistusmenetelmät ja käyttökohteet. Työssä ei mennä kovin pitkälle fysikaalisten ilmiöiden selityksiin, vaan ne käsitellään pintapuolisesti kuitenkin siten, että niiden toimintaperiaatteista saa tarpeeksi hyvän kuvan.

Luvussa kaksi tutustutaan e-tekstiilien historiaan ja siihen, miten ne ovat kehittyneet vuosien varrella. Luvussa kolme perehdytään e-tekstiilien valmistuksessa käytettäviin materiaaleihin ja varsinaisiin valmistusmenetelmiin. Luvussa neljä käsitellään e-tekstiilien käyttökohteita ja sovelluksia nykypäivänä.

## 2. E-TEKSTIILIT VUOSIEN SAATOSSA

Yhtenä ensimmäisenä esimerkkinä elektroniikan integroimisesta vaatteisiin voidaan pitää Theodore Dubois'n balettia La Frandolea, jonka ensiesitys oli vuonna 1883. Esityksen aikana tanssijat pitivät otsallaan valoja, joiden tarvitsemat paristot oli kätketty vaatteisiin piiloon. Valoja ohjattiin vyöhön asetetun näppäimen avulla. [3] Kuvassa 1 näkyy baletissa käytetyt varusteet. Kyseinen esimerkki edustaa e-tekstiilien ensimmäistä ja primitiivisintä toteutustapaa, jossa standardielektroniikkaa tai piirejä kiinnitetään tekstiileihin, eikä niitä integroida tekstiiliin mitenkään. [1]



**Kuva 1.** Dubois'n baletissa käytetyt välineet. Vasemmalla vyö ja valot. Oikealla paristopakkaus. Kuva muokattu lähteestä [3].

Matemaatikot Edward O. Thorpe ja Claude Shannon alkoivat kehittämään vuonna 1995 kenkää, joka pystyisi ennustamaan lopputuloksen ruletissa siihen upotetun pienen tietokoneen avulla. Kenkä saavutti viimeisen kehitysvaiheensa vuonna 1961, ja siinä esiintyvistä laitteisto-ongelmista huolimatta kengän avulla matemaatikot saavuttivat 44 %:n nousun voittojen todennäköisyydessä. [3], [4] Vaikka kyseinen kenkä edustaakin e-tekstiilien ensimmäistä sukupolvea, on se silti merkittävä kehitys, sillä se oli ensimmäinen

e-tekstiili, jossa sovellettiin tietokonelogiikkaa. Kyseinen esimerkki on myös hyvä huomautus yhdestä e-tekstiilien haasteista. Kengistä lähtevät johdotukset menivät rikki useassa tapauksessa ja niitä jouduttiin korjailemaan. [4] Ihmisen yllä elektroniikkaan kohdistuva mekaaninen rasitus on otettava huomioon e-tekstiilejä kehittäessä. Muutkin ensimmäisen sukupolven e-tekstiilit, kuten 2001 ilmestyneet VivoMetricsin ”Life Shirt” sekä Levi’s- ja Philips-yhtiöiden ”ICD+”-takki jakoivat keskenään samoja haasteita. [5] Nämä alkeelliset e-tekstiilit ovat halpoja valmistaa, eikä niiden tekemiseen tarvita erikoismenetelmiä. Niiden haasteena on saada aikaan tai pitää yllä riittävän hyvä hengittävyys, pestävyys, kestävyys, joustavuus sekä hyvä ulkonäkö.

Kyseisten haasteiden takia alettiin kehittää ratkaisuja, joiden avulla e-tekstiileistä saataisiin perinteisten tekstiilien kaltaisia. Tämä saavutettiin valmistamalla itse tekstiilistä funktionaalisia osia, kuten antureita ja elektrodeja, perinteisten tekstiilivalmistusmenetelmien, kuten kutomisen ja kirjonnin, avulla. [1] [6] Vuonna 1997 amerikkalainen artisti ja teknologian asiantuntija Maggie Orth kehitti mekon, joka toimi ainoastaan mekon itse generoimalla energialla. Mekoon asennettujen LED-valojen päihin oli asetettu harjamaisia sähköä johtavia anturoita. Nämä anturat harjatessaan mekon sisällä olevia johtavia tekstiilipintoja antoivat virtaa LED-valoille. [7] Kuvassa 2 näkyy Maggie Orthin suunnittelema LED-mekko ja siihen kuuluva vilkkuva kaulakoru. Mekon helmassa näkyvät pienet himmeät LED-valot.



**Kuva 2.** Maggie Orthin kehittämä LED-mekko. Kuva lähteestä [7].

Mekon virransaanti ja jakelu oli siis hoidettu ilman minkäänlaista perinteistä ”kovaa” elektroniikkaa. Tämä mahdollisti mekon luonnollisen ja vapaan liikkuvuuden. Käytännössä osa mekosta oli toteutettu mukaillen varhaisten e-tekstiilien valmistustapaa, jossa LED-valot yksinkertaisesti kiinnitettiin mekon pintaan. Toisaalta mekko oli merkittävä kehitysaskel e-tekstiileihin, joissa on funktionaalisia osia, kuten tässä tapauksessa virransaantia, integroituna tekstiilin alusrakenteisiin.

Verrattuna varhaisimpiin e-tekstiileihin, uusimpien e-tekstiilien hengittävyys, pestävyys, kestävyys, joustavuus sekä hyvä ulkonäkö ovat helpommin saavutettavissa ja ominaisuuksia on helpompi säilyttää. Kuitenkin tänä päivänä esimerkiksi kestävyys sekä sähkönjohtavuus ovat e-tekstiilien merkittävimpiä kehityskohteita.

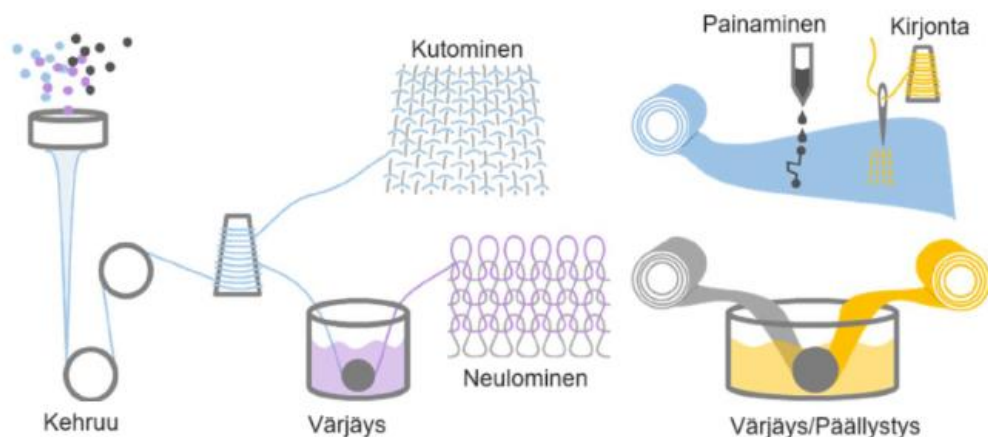


### 3. MATERIAALIT JA VALMISTUSMENETELMÄT

Yksinkertaisimmat e-tekstiilit voidaan valmistaa perinteisistä komponenteista sekä johtimista. Tämä kuitenkin tarkoittaa sitä, että elektroniikka ei ole integroitu osaksi kangasta, joten asusteen ulkonäkö, pidettävyys, pestävyys ja kestävyys kärsivät. Uusimmissa e-tekstiileissä elektroniikka, kuten anturit, akut, vastukset, transistorit ja johtimet, on sulautettu suoraan tekstiilin alusrakenteisiin. Tämän mahdollistamiseksi on kehitettävä johtavia materiaaleja, joita pystytään käyttämään perinteisissä tekstiilivalmistusmenetelmissä.

Komolafe et al. [5] mukaan e-tekstiilien valmistukseen käytetään yleisesti kolmea sähköisesti johtavaa materiaalia: sähköisesti johtavat langat, sähköisesti johtavat kalvot ja ohuet sähköisesti johtavat säikeet. Yhä tänä päivänä langat ja kalvot ovat tärkeitä e-tekstiilien valmistuksessa. Nykypäivänä säikeistä voidaan valmistaa sähköä johtavia lankoja tai niitä voi käyttää lankojen tapaisesti, joten niitä ei käsitellä tässä työssä kolmantena erillisenä kokonaisuutena.

Sähköä johtavia elementtejä voidaan lisätä tekstiiliin jokaisessa valmistusvaiheessa. Sähköisesti johtavia lankoja voidaan valmistaa suoraan eri materiaaleista, kuten polymeereistä, tai perinteisistä langoista voidaan tehdä sähköä johtavia lisäämällä niihin sähköä johtavaa materiaalia. Sähköä johtavista langoista voidaan valmistaa tekstiilejä perinteisillä tekstiilivalmistusmenetelmillä. Jo valmiiseen tekstiiliin voidaan lisätä sähköä johtavia osia painamalla tai kirjonnalla. Kuva 3 havainnollistaa e-tekstiilien valmistusprosessia, jossa sähkönjohtavuus voidaan lisätä missä valmistusvaiheessa tahansa.



**Kuva 3.** Tekstiili voidaan tehdä johtavaksi jokaisessa valmistusvaiheessa. Kuva muokattu lähteestä [8]

Seuraavaksi tässä luvussa kerrotaan sähköisesti johtavien lankojen ja kalvojen valmistusmenetelmistä sekä niiden valmistuksessa käytettävistä materiaaleista. Luvussa kerrotaan myös hieman erikoisemmista materiaaleista, polymeereistä ja hiilen allotroopeista, joita voidaan käyttää e-tekstiilien valmistuksessa.

### 3.1 Sähköisesti johtavat langat

Sähköisesti johtavat langat mahdollistavat e-tekstiilien valmistamisen perinteisillä tekstiilivalmistusmenetelmillä, kuten kutomisella, neulonnalla, kirjonnalla, laminoinnilla ja ompelulla. [6] Lankaan halutut sähköiset ominaisuudet riippuvat käyttökohteesta. Varsinkin valaistukseen tarvitaan mahdollisimman suuri sähkönjohtavuus. Toisaalta esimerkiksi lämmityksessä käytettävään lankaan tarvitaan matalaa sähkönjohtavuutta. Lankojen ominaisuuksia voidaan kehittää lisäämällä niihin eristekerros sähköä johtavan langan ympärille. Käytännössä eristekerros tehdään joko lisäämällä polymeerikerros langan päälle tai sijoittamalla sähköä johtava lanka sähköä eristävän polyesterilangan sisään. [6]

Sähköä johtavista langoista saadaan valmistettua e-tekstiileitä joko tuotannon alkuvaiheissa esimerkiksi kutomalla sekä neulomalla tai lopussa vaikkapa kirjonnalla. Kutomisessa sähköä johtavista langoista saadaan muodostettua eräänlainen sähköä johtava matriisi, jonka risteäviin kohtiin voidaan sijoittaa komponentteja. [9] Näin valmistettu tekstiili on kestävä, sillä langat eivät pääse vääntymään kovin paljoa. Tämä tekee kyseisestä tekstiilistä kuitenkin jäykän verrattuna vaikkapa neulottuun e-tekstiiliin, jossa langat pääsevät vääntymään ja kääntymään vapaammin. Neulotuissa tekstiileissä on kuitenkin otettava tämä huomioon ja käytettävä hyvin mekaanista rasitusta kestäviä lankoja.

Sähköä johtavien lankojen suurimpana haasteena onkin niihin kohdistuva mekaaninen rasitus. Korkeakonduktiivisissa langoissa käytetyt matalan resistiivisyyden omaavat metallit ovat varsin herkkiä vetämiselle ja kiertämiselle. Jo tekstiilin alkupään valmistusasteissa, kuten kutomisessa ja neulomisessa on riski, että sähköä johtavaan, varsinkin yksisäikeiseen, lankaan tulee vaurioita. Monisäikeisten lankojen ongelmana on taas oikosulut liian läheisten lankojen kanssa. [6] Edellä mainittu eristemateriaalien lisääminen häivyttää näitä ongelmia, mutta lisää työvaiheita muiden komponenttien kiinnittämiseen, sillä eristemateriaali tulee irrottaa liitoskohdista. Lankojen käyttökohteet huomioiden on yleensä tehtävä myös kompromisseja joko langan johtavuudesta tai sen taipuvuudesta. [9] Yleisesti ottaen jäykemmät langat johtavat paremmin, mutta soveltuvat huonosti e-tekstiilien valmistukseen, varsinkin jos kyseisen tekstiilin taipuvuus ja vapaa liikkuvuus ovat tärkeitä. Esimerkiksi pidettäville tekstiileille, kuten paitojen ja housujen, on tärkeää

olla taipuisia. Taipuisimmat sähköä johtavat langat soveltuvat paremmin pidettäviin tekstiileihin, mutta ne johtavat huonosti sähköä verrattuna jäykempiin lankoihin.

Sähköisesti johtavia lankoja on käytetty e-tekstiileissä yleisesti sähkönsiirtoon eri komponenttien välillä. Näissä e-tekstiileissä on yleensä irrotettavia sähkölaitteita, jotka saadaan pesun ajaksi irti. Sähköisesti johtavat ja pesunkestävät langat ovat kuitenkin sulautettu suoraan tekstiiliin. Sähköisesti johtavista langoista voi myös tehdä monimutkaisempia piirejä, joita voidaan käyttää muun muassa elektrodeina, anturoina, transistoreina ja antennina. [5] E-tekstiilit ovat kehittymässä suuntaan, jossa monimutkaisempiakin piirejä ja komponentteja voidaan valmistaa lankojen avulla.

Sähköisesti johtavia lankoja voidaan valmistaa sijoittamalla johdinlankaa perinteisen langan sisään. Johdinlanka voi olla joko yksi- tai monisäikeinen. Toinen tapa valmistaa sähköisesti johtavia lankoja on päällystää lankaydin johtavalla materiaalilla, kuten hopealla tai kullalla. [6] Myös polymeerit ja hiilen allotroopit soveltuvat päällystysmateriaaliksi. Kolmas tapa on valmistaa luontaisesti johtavia kuituja, joista saadaan lopuksi sähköä johtavia lankoja.

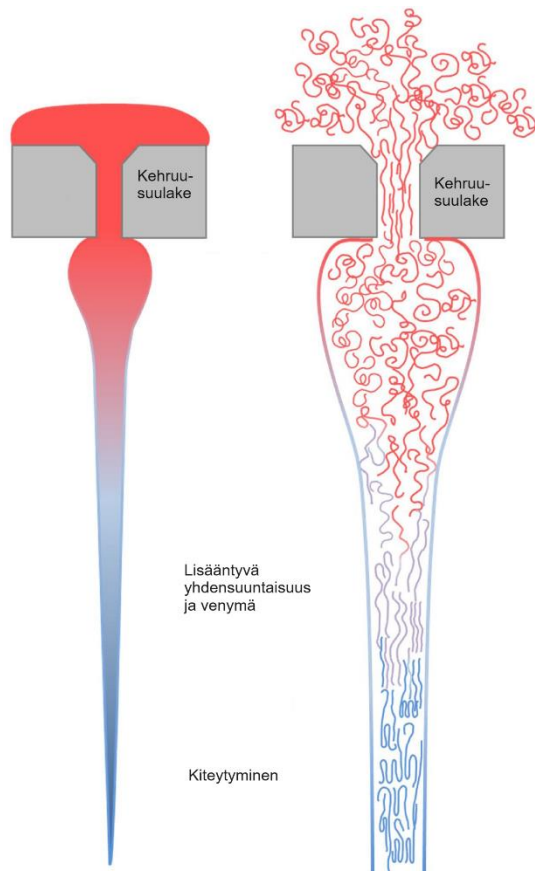
### **3.1.1 Luontaisesti johtavien lankojen valmistus**

Nykyisin voidaan valmistaa sähköisesti johtavia kuituja nanomateriaalien avulla ja valmistaa niistä lankoja kehruulla. Näin lanka on itsessään johtava, eikä siihen tarvitse lisätä ylimääräistä johtavaa komponenttia. Tämä kuitenkin tarkoittaa sitä, että langan sähköjohtavuus sekä mekaaniset ominaisuudet ovat täysin yhden materiaalin varassa. Kuten luvussa 3.1 mainittiin, johtaa tämä siihen, että joudutaan valitsemaan joko hyvä johtavuus tai taipuisuus.

Kuituja, joista luontaisesti johtava lankaa valmistetaan, on kahdenlaisia: filamenttikuituja ja katkokuituja. Filamenttikuidut ovat pitkiä ja jatkuvia kuituja, joita voidaan käyttää sellaisenaan yksisäikeisenä lankana tai niistä voidaan muodostaa johtavia lankoja punomalla. Katkokuidut ovat ohuita ja lyhyitä kuituja, joilla on diskreetti pituus. Niitä ei voi käyttää sellaisenaan, vaan ne täytyy kerätä ja punoa jatkuvaksi rakenteeksi, jotta niitä voidaan käyttää lankana. [10]

Kehruumenetelmiä, joilla kuituja valmistetaan, on useita, mutta niissä kaikissa on samat kolme perusvaihetta: kehrättävän nesteen valmistus, nesteen puristaminen suihkun muodostamiseksi ja suihkun kovettaminen. Kehruumenetelmissä käytettävä neste voi olla joko sulatetta tai liuos pohjaista. [10]

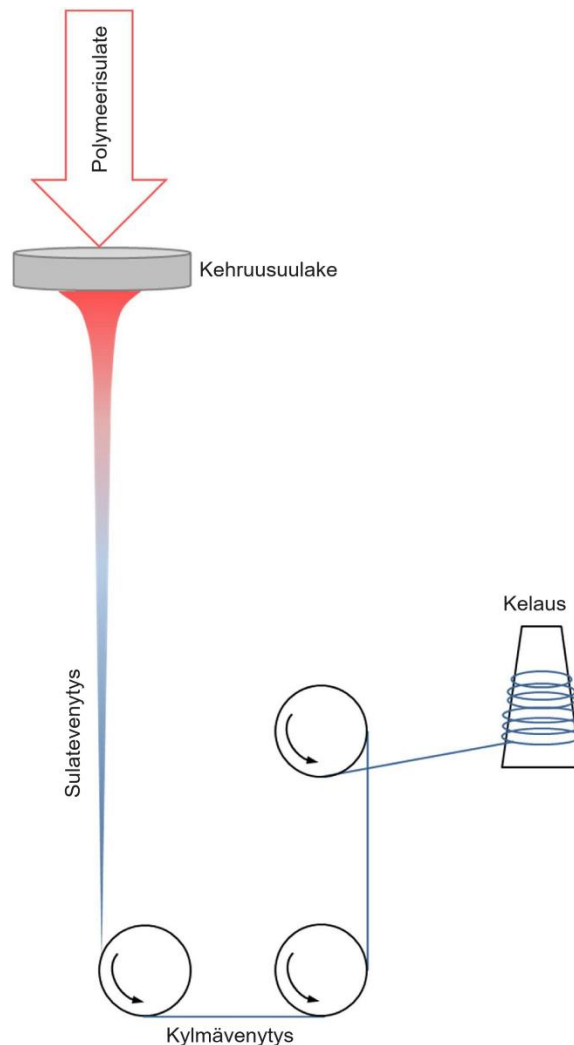
Sulakehruu on kuitujen valmistusmenetelmä, jossa käytetään sulatetta. Se on yleisin menetelmä, jossa joustavaketjuisista polymeereistä valmistetaan kuituja. Siinä sulatetta pursotetaan yksi- tai useareikäisen kehrusuulakkeen läpi. Seuraavaksi suulakkeen läpi puristettu filamentti tai filamentit venytetään ja jäähdytetään. Ensimmäinen venyttämisen vaihe suoritetaan ennen kuin sulate on jäähtynyt ja sitä kutsutaan sulatevenytykseksi (eng. melt drawing). Sulatteen venyttämisen ansiosta polymeerisulate kiteytyy liuskamaisesti tai pitkiin ketjukiteisiin muodostaen virtauksen mukaisia polymeeriketjuja. [10] Kuvassa 4 näkyy, miten venyttämisen ansiosta polymeeriketjujen suuntautuminen sulassa muuttuu.



**Kuva 4.** Venyttämisen vaikutus polymeeriketjujen orientaatioon. Kuva muokattu lähteestä [10].

Toinen venyttämisen vaihe suoritetaan, kun sula on jäähtynyt. Tämä kylmävenytysvaihe tulee suorittaa aineen lasittumislämpötilan ja sulamislämpötilan välillä. [10] Lasittumislämpötila tarkoittaa lämpötilaa, jossa amorfinen aine muuttuu sitkeästä ja venyvästä aineesta takaisin kovaksi ja hauraaksi [11]. Amorfinen aine tarkoittaa kiinteää ainetta, jonka atomirakenne kuitenkin muistuttaa enemmän nestettä eikä se ole jaksottainen. [12] Kylmävenytysvaiheessa polymeeriketjut suuntautuvat entisestään yhteen suuntaan,

joka lisää kuidun kestävyttä, joustavuutta ja vetolujuutta. Lopuksi kuitu tai kuidut kerätään kelalle. [10] Kuvassa 5 näkyy sulakehruun eri vaiheet yksinkertaistetussa muodossa.



**Kuva 5.** Koko sulakehruuprosessi ja sen eri vaiheet. Kuva muokattu lähteestä [10].

Liuoskehruussa polymeeri liuotetaan kehruliuokseen noin 10–45 % pitoisuuteen. Kehruuliuosta pumpataan useareikäisen kehrusuulakkeen lävitse, jossa on yleensä satoja hyvin pieniä reikiä. Erilaisia liuoskehruumenetelmiä ovat kuivakehruu (eng. dry spinning), märkäkehruu (eng. wet spinning), ilmarakomärkäkehruu (eng. air-gap wet spinning), kuivasuihkumärkäkehruu (eng. dry-jet wet spinning) sekä geelikehruu (eng. gel spinning). [10]

Kuivakehruussa kehrusuulakkeen läpi pumpattu liuossumuokse päätyy heti kuumaan ilmaan. Kuuma ilma höyrystää helposti reagoivan liuotteen ja jättää jälkeensä kiinteitä filamenttikuituja. Märkäkehruussa kehrusuulake on upotettuna hyydytysnesteeseen. Hyydytysneste yhdistyy liuottimen kanssa, mutta ei reagoi polymeerin kanssa. Tämän

seurauksena puristettu suihku hyytyy filamenteiksi. Hyytyneet filamentit kylmävenytetään useassa eri vaiheessa, jotta niiden kestävyys, joustavuus ja vetolujuus lisääntyisivät. Näiden liuoskehrumenetelmien haasteena on se, että liuoksessa olevat polymeeriketjut pääsevät liikkumaan vapaasti johtaen huonosti suuntautuneisiin polymeeriketjuihin. Tätä voidaan kompensoida edellä mainitulla kylmävenytyksellä. [10]

Ilmarakomärkäkehrussa sekä kuivasuihkumärkäkehrussa liuossuihku päättyy ensin kuumaan ilmaan, jonka jälkeen se päättyy hyydytysnesteeseen. Tämä mahdollistaa suuret lämpötilaerot kehruliuoksen ja hyydytyskylvyn välillä. Suuret lämpötilat ennen hyydyttämistä mahdollistavat tiettyjen polymeeriliuosten sisältävien polymeeriketjujen orientoitumisen jo ennen kylmävenytystä. [10]

Geelikehruu on yksi ilmarakomärkäkehrun muoto, jossa polymeerigeeliä on liuotettu liuotteeseen. Siinä geeliliuos puristetaan kehrusuulakkeen läpi, josta kuidut joutuvat ensiksi ilmaan, jonka jälkeen ne päätyvät hyydytysnesteeseen. Siitä kuidut viedään uuniin, jossa niitä venytetään ja ne kuivuvat hitaasti. Kuidut päätyvät vielä kylmävenytysvaiheeseen ja lopuksi ne kelataan. [10] Geelikehrun avulla saadaan valmistettua todella lujia, kevyitä ja kemiallisesti kestäviä kuituja ultrasuurimolekyylisestä polyeteenistä eli UHMWPE:stä (eng. ultra-high molecular weight polyethylene). UHMWPE-kuidut eivät ole sähköä johtavia, vaan ovat oikeastaan todella hyviä eristämään sähköä. [13] Kuidut ovat kuitenkin mekaanisilta ominaisuuksiltaan niin käytännöllisiä, että niitä käytetään e-tekstiilien valmistuksessa. UHMWPE-kuidut saadaan sähköä johtaviksi päällystämällä ne sähköä johtavalla materiaalilla. Päällystämistä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

### **3.1.2 Lankojen ja kuitujen päällystäminen sähköisesti johtavalla materiaalilla**

Luontaisesti johtavien lankojen ongelmana on se, että niiden sähkönjohtavuus sekä mekaaniset ominaisuudet tulevat yhdeltä materiaalilta. Sähköä johtamattoman langan tai kuidun päällystäminen sähköä johtavalla materiaalilla antaa mahdollisuuden siihen, että mekaaniset ominaisuudet kuten lujuus ja taipuvuus saadaan säilytettyä hyvän sähkönjohtavuuden lisäksi. Päällystysmateriaaleina voidaan käyttää metalleja, hiilinanomateriaaleja sekä polymeerejä.

Kaikista yksinkertaisin menetelmä on kastopäällystys (eng. dip coating). Siinä ideana on liottaa kuidut, langat tai koko kangas liuokseen, johon on liuotettu jotakin sähköä johtavaa materiaalia, kuten polymeeria. Luontaisiin kuituihin polymeerit tarttuvat hyvin luon-

nostaan, mutta synteettiset kuidut tulee käsitellä ennen liottamista. Grafeenioksidi soveltuu myös hyvin päällystysmateriaaliksi. [10] Kastopäällystys sekä muut liuos pohjaiset menetelmät vaativat, että polymeeri tai muu johtava materiaali on liuotettavissa. Niin kutsuttujen vaikeasti käsiteltävien polymeerien kanssa on käytettävä hieman kehittyneempiä menetelmiä.

Vaikeasti käsiteltävilläkin polymeereillä voidaan päällystää eristäviä kuituja niin sanotulla in situ -polymeroinnilla, jossa polymerointi tapahtuu suoraan kuidun pinnassa. [10] In situ tulee latinasta ja tarkoittaa paikan päällä tapahtuvaa tai itse kohteessa tapahtuvaa [14]. Tässäkin menetelmässä haasteellisempaa on päällystää synteettisiä kuituja. Kuidun sähkönjohtavuutta voi myös parantaa sijoittamalla sähköä johtavia nanopartikkeleita kuituun ennen in situ -polymerointia. [10]

Eräs in situ -polymerointimenetelmä on kemiallinen oksidatiivinen polymerointi (eng. chemical oxidative polymerization), jossa kuitua tai kangasta uitetaan liuoksessa, joka sisältää monomeerin lisäksi seostusaineen sekä hapettimen. Tämä menetelmä kuitenkin saattaa jättää kuidun pinnalle kerrostumia. Ylimääräiseksi muodostuneet polymeerikerrostumat saadaan pois hankaamalla tai pesemällä. Tämä jättää jälkeensä hyvin sähköä johtavan, yhtenäisen sekä ohuen pinnan. [10]

Toinen in situ -polymerointimenetelmä on oCVD eli hapettava kemiallinen kaasufaasipinnoitus (eng. oxidative chemical vapor deposition). Siinä monomeeri, joka on kaasufaasissa, reagoi hapettavan höyryn kanssa muodostaen polymeeriä suoraan kuidun tai muun perusmateriaalin pintaan [15]. Yksi oCVD:n eduista on, että se muodostaa hyvin tasalaatuisen pinnan, joka myötäilee perusmateriaalin muotoja sekä kestää hyvin venytystä, hankausta ja pesua. Toiseksi oCVD:llä voidaan käsitellä helposti sekä synteettisiä että luonnonkuituja. [10]

## 3.2 Sähköisesti johtavat kalvot

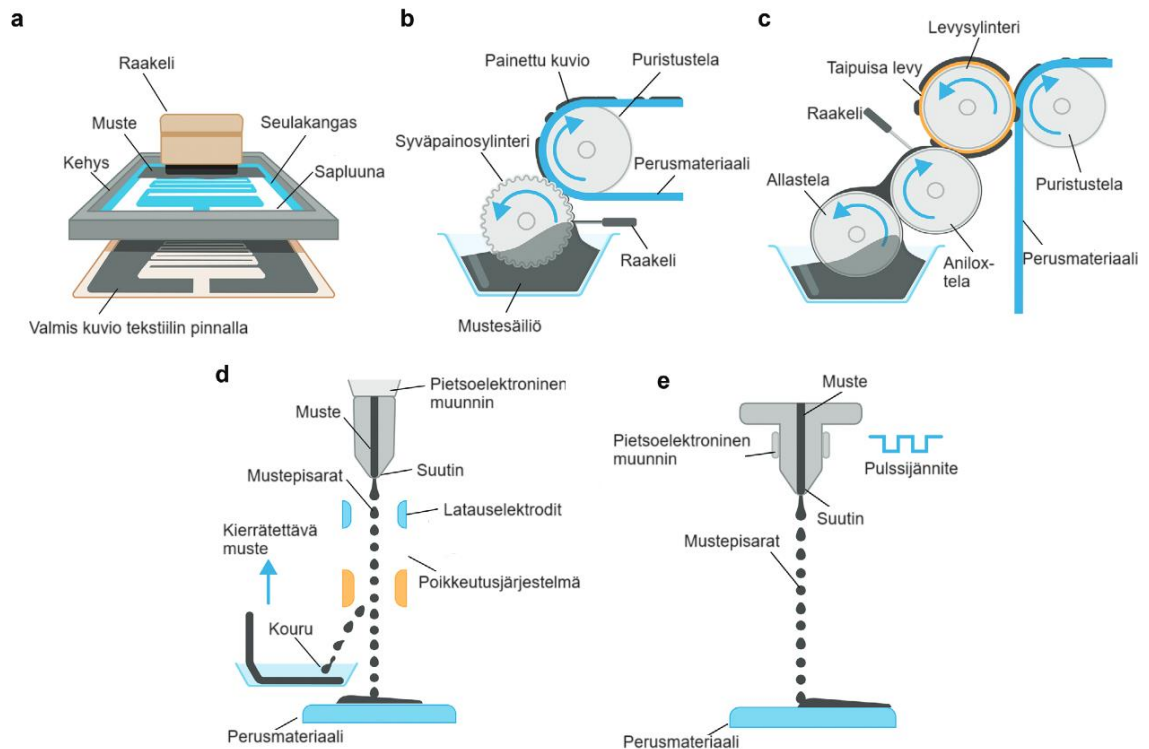
Sähköisesti johtavat kalvot ovat hyödyllisiä e-tekstiilien valmistuksessa niiden taipuvuuden, sähkönjohtavuuden sekä kestävyuden vuoksi. Sähköisesti johtavia kalvoja, varsinkin metallisia, käytetään jo laajasti arkipäivän elektroniikassa, kuten puhelimissa ja muissa pienikokoisissa elektroniikkalaitteissa. Tieteellisesti puhutaan niin sanotuista ohutkalvoista. Ohutkalvojen vahvuus vaihtelee muutamasta atomista tai molekyylistä muutamaankin mikrometriin. Ohutkalvoteknologia-termiä käytettäessä tarkoitetaan yleensä alle mikrometrin vahvuisia kalvoja. [16] E-tekstiilien kontekstissa ohutkalvo ei ole niinkään erillinen yksittäinen kalvo, vaan ohut kerros materiaalia, jolla päällystetään tekstiiliä.

Perinteisesti ohutkalvoja valmistetaan kerrostamalla haluttua materiaalia alusmateriaalin päälle erilaisin menetelmin. Ohutkalvojen lisäys tekstiilin pintaan ei onnistu tai ei ole kannattavaa perinteisillä mikroelektronikan menetelmillä. Mikroelektronikassa käytettävät fysikaaliset höyrypinnoitusmenetelmät toimivat periaatteella, jossa tasaiseen pintaan kerrostetaan metallia. Tekstiilien huokoisuuden vuoksi nämä perinteiset menetelmät eivät pysty muodostamaan tasaista johtavaa pintaa. [8] Tekstiiliin pystytään lisäämään ohutkalvoja myös perinteisillä menetelmillä, mutta se vaatii niin sanotun planarisaatiomateriaalin tekstiilin pintaan. Planarisaation tarkoituksena on täyttää tekstiilissä ilmenevät aukot usein polymeeripohjaisella materiaalilla, kuten polyuretaanilla, jonka jälkeen metallia tai muita sähköä johtavia materiaaleja pystytään kerrostamaan mikroelektronikassa käytettävillä päällystysmenetelmillä. [8] Tämä tekee kuitenkin planarisoidun kohdan tekstiilistä jäykemmäksi ja heikommin venyväksi, jotka ovat epätoivottuja ominaisuuksia tietyille e-tekstiileille.

Vaihtoehtoisesti ohutkalvojen lisäämiseksi tekstiilin pintaan voidaan käyttää niin sanottuja liuos pohjaisia menetelmiä, joissa tekstiiliin painatetaan metalli- tai muunlaisia nanopartikkeleita sisältävää mustetta. Musteen käytön ideana on, että se tunkeutuu tekstiilin pinnan aukkoihin niiden muodostavan kapillaarivoiman ansiosta ja siten pinnoittaa yksittäiset tekstiilikuidut tai langat. [8]

Islam et al. [17] käyvät tieteellisessä artikkelissaan läpi eri painomenetelmiä, jotka käsitellään lyhyesti seuraavaksi. Erilaisia painomenetelmiä ovat: silkkipaino (eng. screen printing), syväpaino (eng. gravure printing), fleksopaino (eng. flexographic printing) ja mustesuihkupaino (eng. inkjet printing). Kuvassa 6 näkyy eri painomenetelmät yksinkertaistetussa muodossa. Taulukkoon 1 on koottu käsiteltyjen painomenetelmien hyviä ja huonoja puolia.





**Kuva 6.** Eri painomenetelmät yksinkertaistettuna. a) Silkkipaino b) Syväpaino c) Fleksopaino d) Jatkuva mustesuihku e) DOD-mustesuihku. Kuva muokattu lähteestä [17].

Silkkipaino on edellä mainituista yleisin e-tekstiilien valmistuksessa käytettävä painomenetelmä. Silkkipainossa kehykseen pingotetun seulakankaan päälle asetetaan sapluuna halutusta kuvioista. Muste lisätään tekstiilin pintaan painamalla se seulakankaan lävitse käyttämällä yleensä kumista tai polyuretaanista valmistettua lastaa eli raakeliä. [17]

Syväpaino toimii telan avulla, johon on kaiverrettu syvennyksiä. Tela kerää syvennettyihin kohtiin mustetta altaasta ja painaa sen suoraan alus- tai perusmateriaaliin, joka on kaiverretun telan ja puristustelan välissä. Telan pinnasta ylimääräinen muste poistetaan raakelin avulla, jotta saataisiin mahdollisimman tarkka painokuvio. Syväpainon jäljen kuivumisnopeuteen vaikuttaa musteessa oleva liuotinaine. Liuotinpohjaisten musteiden käyttö vapauttaa haitallisia VOC-yhdisteitä (eng. volatile organic chemical), jotka täytyy kerätä talteen. Vesipohjaisia musteita on saatavilla, mutta ne vaativat jopa viisinkertaisen määrän energiaa kuivuakseen. Syväpaino voisi soveltua parhaiten e-tekstiilien massatuotantoa varten, jos se saataisiin kaupallistettua. [17]

Fleksograafisessa painossa, fleksopainossa tai pelkässä fleksossa mustetta annostellaan anilox-telalla. Anilox-telan pinnassa on kaiverrettuja säännöllisiä kuvioita, joiden syvyys, leveys ja muoto määrittelevät siirtyvän musteen määrän, joka tasataan vielä raakelilla. Anilox-telaa voidaan käyttää siirtämään mustetta suoraan mustealtaasta tai se voidaan kytkeä allastelaan, jolla nostetaan mustetta anilox-telalle. Anilox-telalta muste

siirtyy levysylinterille. Levysylinterin pinnalla olevat taipuisat levyt keräävät mustetta anilox-telalta ja painavat kuvion perusmateriaaliin, joka on puristuksissa painotelan välissä. Fleksopaino eroaa syväpainosta siten, että muste siirtyy siinä telan harjanteista eikä syvennyksistä. [17]

Mustesuihkupainossa pieniä mustepisaroita suihkutetaan perusmateriaaliin. Mustesuihkupaino on kosketukseton painomenetelmä. Näin pystytään valmistamaan myös 3D-rakenteita erikoismusteiden avulla. Mustesuihkupainolla saadaan aikaan todella korkearesoluutioista jälkeä, mutta sen haasteina ovat hitaat painonopeudet, kustannustehottomuus ja epäyhtenäinen jälki. Mustesuihkupainotapoja on kahdenlaisia: jatkuva mustesuihkupaino ja DOD-mustesuihkupaino (eng. drop-on-demand inkjet printing). [17]

Jatkuvassa mustesuihkupainossa mustesuihku kuljetetaan suuttimen sisällä olevan piezoelementin lävitse, jonka värähtely saa aikaan mustepisaroita. Nimensä mukaisesti jatkuvassa mustesuihkupainossa pisaroita tulee koko ajan tasaisesti suuttimesta. Musteen päätymistä perusmateriaaliin hallitaan niin sanotulla poikkeutusjärjestelmällä. Suuttimesta poistuessaan halutut pisarat varataan sähköisesti, jotta ne voidaan myöhemmin syrjäyttää poikkeutusjärjestelmän avulla kohdissa, joihin mustetta ei haluta. Syrjäytetyt pisarat joutuvat kourujärjestelmää pitkin uudelleenkäytettäväksi. On myös olemassa mustesuihkupainoja, joissa poikkeutetut pisarat ovat niitä, jotka joutuvat perusmateriaaliin. Koska mustesuihku on jatkuva, tukkeutumisriskit ja muut väliaikaiset virhetilat minimoituvat. Täten jatkuva mustesuihku sopii kosketuksettomista painomenetelmistä paremmin massatuotantoon kuin DOD. [17]

**Taulukko 1. Eri painomenetelmien hyvät ja huonot puolet.**

Painomenetelmä	Edut	Haitat
Silkipaino	Matalat kustannukset Nopeat käsittelynopeudet	Musteen viskositeetin vaihtelut voivat johtaa kuvan vääristymiseen
Syväpaino	Erinomainen painolaatu Suuri tuotantokyky Matalat kustannukset isoilla määrillä Pystyy käsittelemään vemyviäkin kankaita	Korkeat aloituskustannukset Tuottaa haitallisia VOC-yhdisteitä
Fleksopaino	Verrattain matalat kustannukset Suuri tuotantokyky Hyvä painolaatu Jäljen mahdollinen paksaus ja siten todella hyvä johtavuus	Ei yhtä tarkka, kuin syväpaino Ei yhtä korkea tuotantokyky kuin syväpainolla
Jatkuva mustesuihku	Soveltuu teollismittakaavaisiin projekteihin Hyvä painolaatu	Sotkuinen ja ympäristölle haitallinen Pieni painoresoluutio
DOD-mustesuihku	Todella suuri resoluutio Kustannustehokas	Tukkeutumisongelmat Pieni tuotantokyky

DOD-mustesuihkupainossa mustepisaroiita luodaan vain silloin, kun niitä tarvitaan. Painon suuttimen sisällä luodaan paineaalto, jonka vaikutuksesta pisaroita alkaa suihkuta suuttimen päästä. DOD-mustesuihkupainot voidaan jakaa neljään eri tyyppiin niiden paineaallon muodostamismenetelmän mukaan: terminen, pietsosähköinen, elektrostaattinen ja akustinen. DOD-painoilla saadaan aikaan todella korkearesoluutioista jälkeä, ne ovat monipuolisia ja niitä on helppo muokata eri käyttökohteisiin, mutta ne ovat hitaita. Tämän takia DOD-painot soveltuvat paremmin prototyyppeihin ja pienen kokoluokan projekteihin kuin massatuotantoon. [17]

### 3.3 Polymeerit

Polymeerit ovat hyvin suurimolekyylisiä aineita, jotka koostuvat useasta samanlaisesta tai samankaltaisesta molekyylistä, joita kutsutaan monomeereiksi. Monomeerien yhdistymistä polymeeriksi kutsutaan polymeroitumiseksi. Polymeereissä monomeerit ovat asettuneet joko ketjumaiseksi tai verkkomaiseksi rakenteeksi. Polymeerit voidaan luokitella synteettisiin ja orgaanisiin polymeereihin. [18] Polymeerit ovat hyvin monipuolisia, sillä niiden suuri atomimäärä mahdollistaa useita konformaatioita eli rakenteita. Useimmat polymeerit ovat sähköä eristäviä, mutta niin sanotut konjugoidut polymeerit voidaan saada sähköä johtaviksi. [19] Konjugoitunut tarkoittaa sitä, että jonkin aineen molekyyli-rakenteessa on vuorotellen yksinkertainen  $\sigma$ -sidos ja kaksois- tai kolmoissidos. Kaksois- ja kolmoissidokset johtavat siihen, että molekyyliin muodostuu niin sanottuja  $\pi$ -sidoksia.  $\pi$ -sidoksissa elektronit pääsevät liikkumaan vapaammin kuin  $\sigma$ -sidoksissa. Vapaa liikkuvuus johtaa konjugoitujen polymeerien sähköisiin ominaisuuksiin. Konjugoidut polymeerit eivät ole luonnollisessa tilassaan kuitenkaan sähköä johtavia tai johtavat sähköä huonosti. Niistä saadaan joko puolijohteita tai täysin johtavia seostamisella (eng. doping). Seostamisessa aineeseen lisätään joko positiivisia tai negatiivisia varauksenkantajia. [19]

### 3.4 Hiilen allotroopit

Hiilen allotroopit ovat mielenkiintoisia nanomateriaaleja e-tekstiilien valmistuksessa niiden monimuotoisuuden ansiosta. Grafeeni on hiilen yksi kaksiulotteinen hunajakennomainen allotrooppinen muoto. Grafeenilla on huomattavan hyvä mekaaninen kestävyys, bioyhteensopivuus sekä sähkön- ja lämmönjohtavuus, mikä tekee siitä hyvän materiaalin e-tekstiilien valmistukseen. Grafeenia valmistetaan niin kutsutuilla Hummersin menetelmän muunnelmilla. Pääperiaate kaikissa näissä menetelmissä on erottaa jostain grafiitin

lähteestä, kuten grafiittijauheesta, grafeenikerroksia käyttämällä voimakkaita hapettavia aineita sekä happoja. Muitakin grafeenin valmistusmenetelmiä on olemassa, mutta ne eivät ole yhtä käytettyjä. [20] Grafeenia voidaan käyttää sellaisenaan vaikkapa painomusteissa grafeeniohukalvojen valmistukseen tai siitä voidaan valmistaa muita hiilipohjaisia johtavia nanomateriaaleja.

Hiilinanoputket ovat toinen hyvin käytetty nanomateriaali e-tekstiilien valmistuksessa. Niitä voi ajatella grafeenina kierrettynä onttoon sylinterimäiseen muotoon. Hiilinanoputkien pituus on noin muutaman mikrometrin luokkaa ja halkaisija noin 100 nanometriä. Hiilinanoputket luokitellaan kahteen eri luokkaan niiden seinämäkerrosten lukumäärän mukaan: yksi- ja monikerroksisiin. Hiilinanoputkien kolme yleisintä valmistusmenetelmää ovat: kaaripurkausmenetelmä (eng. arc discharge), kemiallinen kaasukasvatusmenetelmä (eng. chemical vapor deposition / CVD) ja laserablaatiomenetelmä (eng. laser ablation). Hiilinanoputkia voidaan käyttää sähköisesti johtavien lankojen ja musteiden valmistamiseen niiden hyvän sähkönjohtavuuden, kestävyuden sekä biosopivuuden ansiosta. [21]

Grafeenioksidi tai GO (eng. graphene oxide) on grafiitista valmistettua materiaalia. Sitä valmistetaan käsittelemällä grafiittia vahvoilla hapettavilla aineilla. Grafiittia voi ajatella päällekkäisinä kerroksina grafeenia. Hapetusprosessi vaikuttaa yhteen grafeenikerrokseen ja lisää siihen uusia funktionaalisia ryhmiä, kuten epoksiryhmiä, hydroksyyliiryhmiä ja karboksyyliiryhmän. Prosessi saa aikaan grafeenioksidia, joka on muun muassa veden liukeneva. [22] Tämä mahdollistaa grafeenioksidin käytön liuos pohjaisissa soveluksissa, kuten kastopäällystyksessä.

Grafeenioksidia voidaan jalostaa vielä pidemmälle ja poistaa siitä osa happea sisältävistä funktionaalisista ryhmistä. Tämä tuottaa redusoitua grafeenioksidia tai rGO:ta (eng. reduced graphene oxide). Redusoitu grafeenioksidi on yhä liuotettavissa moniin liuotusaineisiin ja lisäksi siinä on parempi sähkönjohtavuus verrattuna grafeenioksidiin. [22]

## 4. E-TEKSTIILIEN KOMPONENTIT

E-tekstiilit mahdollistavat monen eri kehon toiminnon tarkkailun samaan aikaan, sillä mitattavaa pinta-alaa, eli ihoa, on runsaasti. Tämä mahdollistaa monipuolisia mittauskohteita muun muassa lääketieteessä, sotilaskäytössä sekä vapaa-ajan käyttökohteissa, kuten urheilussa. Eri toimintojen mittaamista varten on kuitenkin oltava yhteensopivat anturit, joilla niitä voidaan mitata. Jotta anturit saisivat virtaa, on myös kehitettävä energiaa kerääviä sekä varastoivia komponentteja, jotka eivät haittaa tekstiilin pidettävyyttä, pestävyyttä, kestävyyttä tai joustavuutta. Tässä työssä ei käsitellä kaikkia mahdollisia käyttökohteita, vaan tarkastellaan muutamia e-tekstiilien sovelluksia ja toteutuksia hieman tarkemmin. Seuraavissa aliluvuissa käsitellään e-tekstiileissä käytettäviä ohutkalvoista sekä langoista valmistettuja antureita, energiaa kerääviä ja energiaa varastoivia komponentteja.

### 4.1 Anturit

Anturit ovat laitteita, jotka pystyvät reagoimaan johonkin fysikaaliseen ilmiöön ja muodostamaan siitä kuvaavan sähköisen signaalin [23]. E-tekstiileissä käytettävät anturit mitaavat yleensä joko painetta, räsitusta, lämpöä tai muita kehon toimintoja, kuten aineenvaihduntaa. Seuraavaksi tässä työssä perehdytään tarkemmin e-tekstiileissä käytettyihin paine- ja räsitusantureihin sekä lämpöantureihin.

#### 4.1.1 Paine- ja räsitusanturit

Paineantureitten tehtävänä on aistia ja muuttaa fyysinen paine sähköiseksi signaaliksi. Paineantureita voidaan käyttää e-tekstiileissä mittaamaan fysiologista painetta, kuten verenpainetta. Räsitusanturit havaitsevat niihin kohdistuvaa räsitusta ja kuormitusta sekä havaitsevat niistä johtuvia rakenteellisia muutoksia. Räsitusantureita voidaan käyttää ihmisen liikkeen tarkasteluun ja herkimmillä antureilla voidaan havaita myös hengitystiloja ja pulssia. [17] Paine- ja räsitusanturit luovat täten uusia mahdollisuuksia käyttäjien terveydentilan jatkuvaan tarkasteluun.

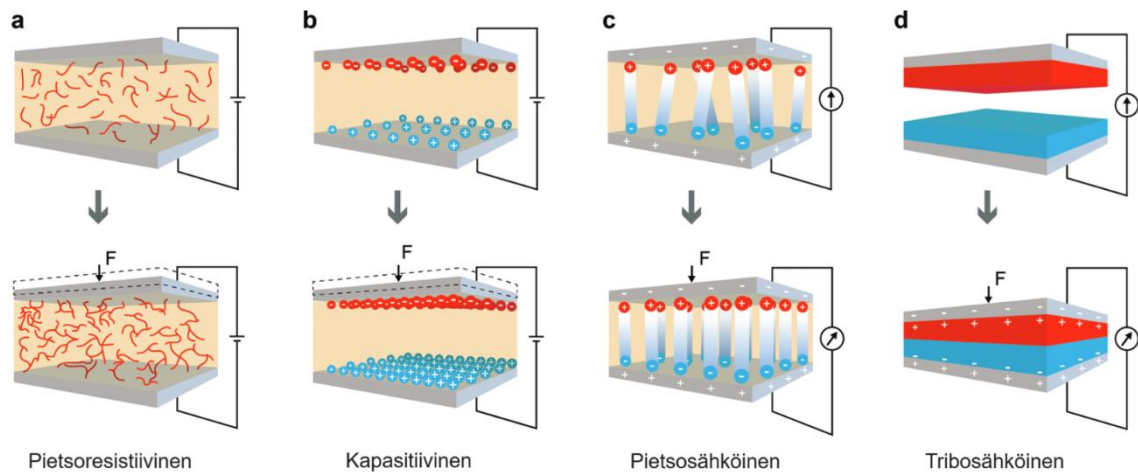
Paine- ja räsitusantureita voidaan toteuttaa eri menetelmillä, jotka perustuvat eri fysikaalisiin ilmiöihin. Neljä yleisintä paine- ja räsitusanturityyppiä ovat: pietsoresistiivinen (eng. piezoresistive), kapasitiivinen (eng. capacitive), pietsosähköinen (eng. piezoelectric) ja tribosähköinen (eng. triboelectric). Muita anturityyppejä ovat muun muassa induktio-, elektromagneetti- ja valosähköanturit. [17]

Pietsyoresistiivisyys tarkoittaa materiaalissa tapahtuvaa resistanssin vaihtelua, joka johuu ulkoisen paineen tai rasituksen aiheuttamista muodonmuutoksista. Pietsyoresistiiviset anturit toimivat mittaamalla juuri tätä resistanssin vaihtelua. Pietsyoresistiiviset anturit ovat helppoja ja edullisia valmistaa niiden yksinkertaisen rakenteen ja toimintaperiaatteen takia. Ne eivät ole myöskään kovin alttiita kohinalle. Nämä ominaisuudet tekevät pietsyoresistiivisestä anturista yhden käytetyimmän anturityypin e-tekstiileissä. [17] Pietsyoresistiivisiä antureita voidaan valmistaa käyttämällä ohutkalvoja [17] sekä sähköisesti johtavia lankoja [24].

Kapasitiiviset anturit mittaavat ulkoisesta paineesta johtuvaa kapasitanssin muutosta. Anturit valmistetaan rinnakkaislevykondensaattoreiden tapaan, jossa sähköä eristävää materiaalia sijoitetaan kahden sähköä johtavan materiaalin väliin. Ulkoinen paine tai rasitus muuttavat sähköä johtavien materiaalien etäisyyttä toisistaan, joka havaitaan kapasitiivisyyden muutoksena. Kapasitiiviset anturit ovat hyvin herkkiä ja niillä on suuri mittausalue. [17] Kapasitiivisiä antureita voidaan valmistaa ohutkalvoista [17] sekä sähköä johtavista langoista [25].

Pietsyosähköiset anturit perustuvat pietsyosähköiseen ilmiöön, joka tarkoittaa tiettyjen materiaalien ominaisuutta polarisoitua mekaanisen rasituksen vaikutuksesta. Materiaaliin kohdistuva mekaaninen voima ja sen aiheuttama muodonmuutos johtavat positiivisten ja negatiivisten varausten jakautumiseen. Tämä johtaa potentiaalieroon materiaalin reunojen välillä, jota tarkkailemalla saadaan tietoa materiaaliin kohdistuvasta paineesta tai rasituksesta. Pietsyosähköiset anturi eivät tarvitse ulkoista virtalähdettä, kuten pietsyoresistiiviset ja kapasitiiviset anturit. Ne ovat myös hyvin herkkiä eivätkä reagoi voimakkaasti lämpötilaeroihin. Ne eivät kuitenkaan pysty mittaamaan reaaliajassa, vaan näytteistävät tietynpituista mittaussikkunaa. [17] Pietsyosähköisiä antureita voidaan valmistaa ohutkalvoista [17] sekä sähköisesti johtavista langoista [26].

Tribosähköiset anturit perustuvat tribosähköiseen ilmiöön sekä sähköstaattiseen induktioon. Käytännössä kaksi eri dielektristä eli eristävää materiaalia, joista toinen luovuttaa elektroneja ja toinen vastaanottaa niitä, hankaavat tai tulevat muuten kosketuksiin toisensa kanssa. Tämän seurauksena materiaaleihin muodostuu vastakkaiset varaukset, joiden väliltä voidaan havaita potentiaaliero. Anturin toiminta perustuu potentiaalieron jaksottaiseen tarkasteluun. Tribosähköiset anturit ovat todella herkkiä eivätkä tarvitse ulkoista virtalähdettä. [17] Tribosähköisiä antureita voidaan valmistaa ohutlevyistä [17] sekä sähköisesti johtavista langoista. [27] Kuvassa 7 näkyy havainnollistava kuva eri antureiden toimintaperiaatteista.



**Kuva 7.** Paino- ja rasitusantureiden toimintaperiaatteet. a) pietsoresistiivinen, b) kapasitiivinen, c) pietsosähköinen, d) tribosähköinen. Kuva muokattu lähteestä [17].

#### 4.1.2 Lämpöanturit

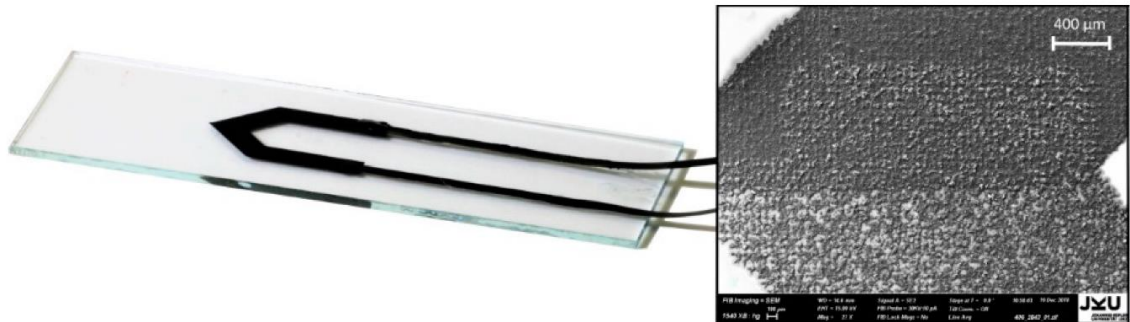
Lämmön mittaaminen ja sen tulkinta on todella tärkeää muun muassa lääketieteessä ja huippu-urheiluosuorituksissa. E-tekstiileihin sijoitettavien lämpöantureiden avulla voidaan seurata potilaan tai urheilijan lämpötilaa reaaliajassa ilman erillistä mittausta. Yksinkertaisin menetelmä luoda lämpöanturi e-tekstiiliin on käyttää luonnostaan termoresistiivistä lankamateriaalia ja tarkastella sen resistanssin vaihtelua. Termoresistiivisyydellä tarkoitetaan sitä, että materiaalin resistiivisyys nousee tai laskee lämpötilan noustessa tai lasiessa. Yleensä tällaiset anturit valmistetaan metallilangoista, joiden resistanssi nousee lähes lineaarisesti lämpötilan noustessa. Ongelmana metallilangoissa kuitenkin on, että niiden integroiminen tekstiiliin tekee tekstiilistä jäykän sekä metallilangoista tehdyt lämpötila-anturit ovat hyvin rajoitettuja mitta-alueiltaan. [28]

Nykypäivän elektroniikka on niin pientä, että vaikkapa termistorin voi sijoittaa myös langan sisään. Termistori on laite, jonka sisäinen vastus riippuu sen lämpötilasta. Se siis toimii hyvin samalla periaatteella kuin termoresistiivisyys. Hughes-Riley et al. [29] tutkivat lankaa, jonka sisälle oli sijoitettu termistori. Termistori oli kiinnitetty monisäikeiseen kuparilankaan. Kuparilanka ja termistori oli kääritty useampaan eristävään ja tukevaan kerrokseen. Vaikka kyseinen lanka toimi, sen haasteina oli riittävä kontakti ihon kanssa ja kestävyysongelmat. [29]

Sähköä johtavista langoista saadaan myös rakennettua niin sanottu termopari. Termopari toimii siten, että kaksi eri materiaalista valmistettua johdinta liitetään päistään yhteen. Kun liitoskohtaa lämmitetään, se aiheuttaa lämpötilasta riippuvan jännitteen, jota voidaan tulkita lämpötilan selvittämiseksi. [30] Rasheed et al. [31] valmistivat ja tutkivat



tekstiileihin sopivia lankapohjaisia lämpöantureita termopareista. Tutkimuksessa onnistuttiin valmistamaan lämpöantureita, jotka saatiin toimimaan varmasti 20–45 °C alueella. Toiminnallisen lämpötila-alueen vuoksi näitä antureita voitaisiin käyttää juuri ihmisen kehonlämpötilan tarkkailuun. Tutkimuksessa todettiin vielä, etteivät anturit haitanneet tekstiilin joustavuutta niissä käytettyjen materiaalien vuoksi. Toisaalta tutkimuksessa mainittiin, että anturit tarvitsevat vielä jatkotutkimuksia muun muassa rasituksen aiheuttamien ongelmien kanssa. [31]



**Kuva 8.** Silkkipainettu termoparianturi. Vasemmalla kuva koko anturista. Oikealla mikroskooppikuva kahden materiaalin yhtymäkohdasta. Kuva lähteestä [32].

Ohutkalvoistakin voidaan valmistaa lämpöantureita. Ohutkalvoista valmistetut lämpöanturit toimivat joko painettavat aineen termoresistiivisyyden tai termoparin avulla. Hiilina-putkista ja polymeereistä on valmistettu toimivia ja taipuvia ohutkalvolämpöantureita muun muassa silkki- ja mustesuihkupainolla. Painetut ohutkalvoanturit kestävät paremmin venytystä, niillä saadaan yleensä parempi kontakti ihoon ja niitä on halpa valmistaa verrattuna lankapohjaisiin lämpöantureihin. [17] Kuvassa 8 näkyy silkkipainettu lämpöanturi.

## 4.2 Energian keräys

Sähkölaitteet tarvitsevat toimiakseen virtaa. E-tekstiileissä käytettyjä energiankeruulaitteita kutsutaan nanogeneraattoreiksi. Nanogeneraattoreilla voidaan kerätä sähköenergiaa ihmiskehosta ja sen ympäristöstä, kuten liikkeestä, lämmöstä ja valosta. [28] Nanogeneraattoreiden tuottoteho on vain mikrowattien luokkaa. Toisaalta uusimpien mikrokontrollereiden ja signaalinkäsittelypiirien kulutusteho on vain muutamien mikrowattien tasolla, joten nanogeneraattorit sopivat hyvin monimutkaisempienkin piirien sähköntuottoon. Yleisimmät e-tekstiileissä käytetyt nanogeneraattorit perustuvat liikkeeseen, sillä kehosta sitä voidaan kerätä monesta eri kohdasta ja se tuottaa enemmän sähköä verrattuna muihin generaattorityyppeihin. [33] Liikepohjaisia nanogeneraattoreita ovat: piet-

sosähköiset, tribosähköiset ja elektromagneettiset nanogeneraattorit. Elektromagneettisia nanogeneraattoreita ei kuitenkaan käytetä juuri e-tekstiileissä niiden sisältämien käämien ja magneettien painojen vuoksi. Muita yleisiä nanogeneraattoryyppejä ovat lämpösähköiset ja valosähköiset nanogeneraattorit. [28] Tässä työssä ei käsitellä niin kutsuttuja hybridinanogeneraattoreita, jotka pohjautuvat tulevissa aliluvuissa käsiteltäviin nanogeneraattoreiden yhdistelmiin. Yleisimmät hybridinanogeneraattorit ovat yhdistelmiä tribosähköisestä ja jostain toisesta nanogeneraattorista. [33]

#### 4.2.1 Liikepohjaiset nanogeneraattorit

Pietsosähköisyyttä käsiteltiin aikaisemmin luvussa 4.1.1. Siellä viitattiin jo pietsosähköisen anturin kykyyn toimia ilman ulkoista virtalähdettä. Pietsosähköisyyttä voidaan käyttää myös luomaan muiden laitteiden tarvitsema sähkövirta kytkemällä kuorma pietsosähköiseen materiaaliin. Pietsosähköinen generaattori on käytännössä kaksi elektrodia, joiden välissä on pietsosähköistä materiaalia. Kun generaattoria painetaan, elektrodien välille syntyy potentiaaliero ja sähkö alkaa virrata. Generaattorin ollessa painettuna pohjaan sähkövirta lakkaa hetkeksi. Kun paine lakkaa, generaattori alkaa palautumaan alkutilaan, joka johtaa vastakkaissuuntaiseen sähkövirtaan. Pietsosähköisen nanogeneraattorin tuottama virta on siis vaihtuvataajuista vaihtovirtaa ja se tarvitsee tasasuuntauspiirin, jotta siitä saataisiin tasavirtaa. [33]

Tribosähköisyyttäkin käsiteltiin aikaisemmin luvussa 4.1.1. Tribosähköinen nanogeneraattori koostuu kahdesta eri materiaalista, joihin on kytketty elektrodit. Materiaalien tullessa kosketuksiin toistensa kanssa toinen luovuttaa ja toinen saa vastaan elektroneja, mikä johtaa erinäpääisiin varauksiin eristemateriaaleissa. Sähkövirtaa ei kuitenkaan havaita vielä, sillä varaukset ovat miltei samassa tasossa keskenään. Kun eristemateriaaleja aletaan irrottaa toisistaan, vastakkaiset varaukset indusoituvat elektrodeille. Vastakkaiset varaukset johtavat sähkövirtaan, jos elektrodeihin on kytketty kuorma. Kun materiaalit ovat täysin irrotettuina toisistaan, ei elektrodeihin enää indusoidu varausta, joten sähkövirtaa ei havaita kuormassa. Eristemateriaalit säilyttävät kuitenkin varauksensa ja eristemateriaalien lähestyessä taas toisiaan voidaan havaita vastakkaissuuntainen sähkövirta kuormassa. Tribosähköiset nanogeneraattorit pystyvät toimimaan sekä vastakkaissuuntaisella että sivuttaisella liikkeellä. [33] Tribosähköinen nanogeneraattori tarvitsee tasasuuntauspiirin, jos halutaan tuottaa tasavirtaa.

## 4.2.2 Lämpösähköiset nanogeneraattorit

Lämpösähköiset nanogeneraattorit ovat valmistettu yhdestä n-tyypin ja yhdestä p-tyypin puolijohdeesta, jotka ovat sähköisesti kytkettynä sarjaan ja kytketty termisesti siten, että niihin virtaa sama lämpöenergia. Kun lämpötila alkaa vaihtumaan nanogeneraattorissa, molempien puolijohdetyyppien varauksenkantajat alkavat siirtyä generaattorin kylmempää puolta kohti. Tämä johtaa siihen, että sähköä alkaa virtaamaan, jos nanogeneraattoriin on kytketty kuorma. Tätä kutsutaan myös Seebeck-ilmiöksi. Lämpösähköisten nanogeneraattoreiden tuottama sähkövoima on hyvin pieni, joten niitä liitetään yleensä sarjaan. Vaikka lämpösähköiset nanogeneraattorit tuottavat vähän sähköä verrattuna muihin menetelmiin, ne tuottavat tasavirtaa, joten ylimääräistä elektroniikkaa ei tarvita kyseiseen tarkoitukseen. Kyseinen nanogeneraattori tuottaa sähköä myös pienellä vaivalla, sillä se ei vaadi edes liikettä. Sähköä syntyy jo pienestä lämpötilaerosta kehon ja ympäristön välillä. [33]

## 4.2.3 Valosähköiset nanogeneraattorit

Valosähköiset nanogeneraattorit perustuvat aurinkokennoihin ja niissä tapahtuvaan valosähköiseen ilmiöön. Aurinkokennot ovat laitteita, jotka pystyvät muuttamaan auringon säteilyn sähköksi valosähköisen ilmiön ansiosta. Yleisimmät aurinkokennot ovat valmistettu p- ja n-tyypin puolijohdemateriaaleista, joiden välille muodostuu tyhjennysalue. Auringonvalon osuessa kennon pintaan se absorptoituu molempiin puolijohdealueisiin, mikä saa aikaan elektroni-aukkopareja molempiin puolijohdemateriaaleihin. Tämä johtaa siihen, että sähkö virtaa kennon läpi, jos puolijohdemateriaalit ovat kytketty yhteen ulkoisella piirillä. Nykypäivänä suurin osa aurinkokennoista ovat jäykkiä, mutta niistä saadaan myös joustavia käyttämällä tiettyjä materiaaleja, kuten amorfista piitä ja käyttämällä ohutkalvoteknologiaa. [34] Valosähköisiä nanogeneraattoreita voidaan valmistaa yksittäisistä sähköisesti johtavista langoista, kutomalla sähköisesti johtavia lankoja tai kerrostamalla ohutkalvoja [35].

## 4.3 Energian varastointi

Nanogeneraattorit eivät pysty koko ajan tuottamaan riittävän suurta tasaista virtaa. Mekaaninen liike, joilla moni nanogeneraattori tuottaa virtaa, voi loppua. Ihminen voi mennä pimeään tilaan ilman auringonvaloa, jolloin valosähköinen generaattori ei tuota virtaa. Lämpösähköinen nanogeneraattori tuottaa virtaa koko ajan, mutta sen energiantuotto on kovin pientä. Hybridinanogeneraattorit lievittävät ongelmaa, sillä virran tuotto ei riipu vain

yhdestä tavasta, mutta nekään eivät välttämättä pysty tuottamaan tarpeeksi virtaa. Vaihtelevaa sähköntarvetta varten on kehiteltävä e-tekstiileihin sopivia virransäilytysmenetelmiä, jotta virtaa voidaan varastoida, kun sitä on yltäkyläisesti. E-tekstiileissä käytettyjä virransäilytysmenetelmiä on kahta erilaista: superkondensaattoreita ja akkuja.

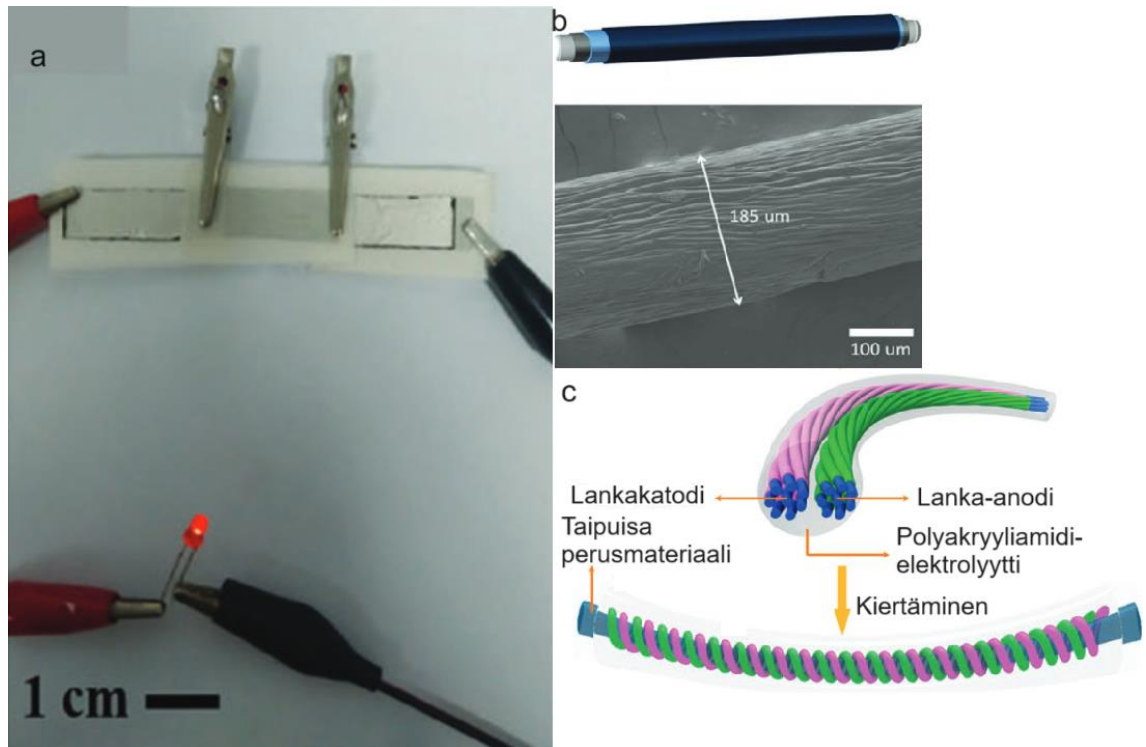
Akut ovat suurikapasiteettisia, eli niihin voidaan varastoida paljon energiaa, ne toimivat korkealla jännitteellä eivätkä ole niin alttiita itsepurkautumiselle kuin superkondensaattorit. Ne ovat kuitenkin hitaampia vastaanottamaan sekä purkamaan varausta. Akut toimivat varastoimalla sähköistä energiaa kemialliseen muotoon. E-tekstiileissä käytettyjä akkutyyppejä ovat muun muassa litiumioni, litium-ilma, litium-rikki, sinkki-ilma ja nikkeli-sinkki.

Superkondensaattorit ovat todella tehokkaita, eli niihin voidaan varastoida ja niistä voidaan ottaa energiaa hyvin nopeasti. Superkondensaattorit säilyttävät myös todella hyvin kapasitanssinsa. Vaikka superkondensaattoreissa onkin suurempi energiatiheys kuin normaaleissa kondensaattoreissa, ei niihin voida varastoida yhtä paljon energiaa kuin akkuihin. Superkondensaattoreita on pääasiassa kahdenlaisia: sähköstaattisia kaksikerroksisia kondensaattoreita (eng. electrostatic double layer capacitor / EDLC) ja pseudokondensaattoreita. [28]

EDLC:n toiminta perustuu sähköiseen kaksikerroksiseen kapasitanssiin. EDLC:issä on kaksi mekaanisesti erotettua elektrodia, joiden välissä on elektrolyytti. Elektrolyytissä on liuenneena positiivisesti varattuja kationeja ja negatiivisesti varattuja anioneja. Nestemäisen elektrolyytin ja molempien elektrodien välillä tapahtuu niin kutsuttu kaksoiskerrosefekti. Kaksoiskerrosefektin seurauksena, kun kondensaattoriin kytketään jännite, elektrodien pinnalle muodostuu yhden molekyylikerroksen vahvuinen kerros liuotinmolekyylejä, joka erottaa elektrodin ja varautuneet ionit. Tämä kerros toimii kuten eristekerros perinteisessä kondensaattorissa. EDLC:issä elektrodien välimatka on hyvin pieni ja niiden elektrodit valmistetaan yleensä hiilen eri allotroopeista, joista saadaan suuripinta-alaisia. Kondensaattoreiden kapasitanssit saadaan mahdollisimman suuriksi minimoimalla elektrodien etäisyys sekä kasvattamalla niiden pinta-alaa. Siksi EDLC:illä on suuremmat kapasitanssit verrattuna perinteisiin kondensaattoreihin. [36]

Pseudokondensaattoreiden toiminta perustuu palautuviin faradisiin redoksireaktioihin. Pseudokondensaattoreissa hyödynnetään myös kaksoiskerrosefektia, mutta niissä käytetään tiettyjä elektrodimateriaaleja, jotka mahdollistavat hapetus-pelkistysreaktion elektrolyytin ja elektrodin välillä. Kyseinen hapetus-pelkistysreaktio varastoi pseudokon-

densaattoreissa energiaa kaksoiskerrosefektin lisäksi. Tämän vuoksi pseudokondensaattoreissa on yleensä suurempi kapasitanssi kuin pelkissä EDLC:issä. [36] Pseudokondensaattoreita voidaan valmistaa muun muassa sähköä johtavista polymeereistä [28].



**Kuva 9.** E-tekstiileissä käytetyt energianvarastointimenetelmät. a) Kolme sarjaan kytkettyä superkondensaattoria antamassa virtaa LED-valolle. b) Lankamallinen superkondensaattori. c) Lankamallinen Zn-ioni-akku. Kuva a) lähteestä [17]. Kuvat b) ja c) muokattu lähteestä [28].

Akkuja sekä superkondensaattoreita voidaan integroida e-tekstiileihin sähköä johtavilla langoilla, kuiduilla ja ohutkalvoilla. Aikaisemmin mainituista UHMWPE-kuiduista, hopeasta ja sähköä johtavasta polymeeristä on valmistettu lankamainen superkondensaattori. Kyseinen superkondensaattori näkyy kuvan 9 kohdassa b. Kuvassa 9 on myös esimerkki lankamallisesta sinkki-ioni-akusta kohdassa c ja kolmesta sarjaan kytketystä superkondensaattorista antamassa virtaa LED-valolle kohdassa a.

## 5. YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli tarjota yleiskatsaus e-tekstiileistä. Työssä kerrottiin e-tekstiilien kehityksestä, niiden valmistuksessa käytettävistä materiaaleista sekä valmistusmenetelmistä. Lisäksi kerrottiin, mitä sovelluksia ja komponentteja näistä materiaaleista saadaan e-tekstiileihin.

E-tekstiili on tekstiili, johon on jollain tavalla integroitu tai sulautettu elektroniikkaa. Alkukantaisimmat e-tekstiilit sisältävät perinteisiä komponentteja, jotka kiinnitetään tekstiilin pintaan. Kehittyneimmät e-tekstiilit sisältävät monimutkaisempia piirejä ja sähköä johtavia elementtejä sulautettuina tekstiilin alusrakenteisiin, kuten lankoihin ja kuituihin. Tekstiiliin lisättävä elektroniikka voidaan lisätä siihen missä tahansa valmistusvaiheessa. Tekstiilin valmistusvaiheiden alkupäässä siihen voidaan lisätä sähköä johtavia lankoja eri menetelmillä, kuten kutomisella ja neulomisella. Tekstiilin valmistuksen loppupäässä siihen voidaan lisätä elektroniikkaa kirjonnalla sekä erilaisilla painomenetelmillä.

Nykypäivänä e-tekstiileiden valmistuksessa käytetään usein kahta eri materiaalia: sähköisesti johtavia lankoja sekä sähköisesti johtavia ohutkalvoja. E-tekstiileissä käytettäviä sähköä johtavia lankoja sekä ohutkalvoja voidaan valmistaa metalleista, polymeereistä sekä hiilen allotroopeista. Sähköisesti johtavia kuituja voidaan valmistaa luontaisesti johtavista materiaaleista ja niitä voi käyttää sellaisenaan tai niistä voidaan tehdä lankoja kehruun avulla. Langat tai kuidut voidaan myös tehdä sähköä johtaviksi eri päällystysmenetelmillä. Ohutkalvoja lisätään tekstiilin pintaan eri painomenetelmillä, kuten silkkipainolla, fleksopainolla ja mustesuihkupainolla.

E-tekstiilit tarjoavat lupaavia sovelluksia muun muassa lääketieteeseen ja vapaa-ajan harrastuksiin, kuten urheiluun. Sähköisesti johtaviin ohutkalvoihin sekä lankoihin ja kuituihin perustuvilla antureilla pystytään seuraamaan esimerkiksi vakavasti loukkaantuneen potilaan terveydentilaa. E-tekstiilit tarvitsevat perinteisen elektroniikan tavoin sähköä toimiakseen. Ohutkalvoista ja langoista saadaan valmistettua myös energiaa kerääviä ja varastoivia laitteita.

E-tekstiilien kehityksessä on muistettava pitää mielessä riittävä joustavuus, kestävyys, pestävyys, ulkonäkö sekä pidettävyys. E-tekstiileiden valmistuksessa haasteena on ollut ja tulee varmasti pitkään olemaan näiden ominaisuuksien toteuttaminen sekä säilyttäminen pitkässä käytössä. Sähköisesti johtavien lankojen ja ohutkalvojen haasteena on

saada sekä sähköisesti hyvin johtavia, että mekaanisesti kestäviä ja joustavia toteutuksia.

## LÄHTEET

- [1] T. Hughes-Riley, T. Dias, ja C. Cork, "A Historical Review of the Development of Electronic Textiles", *Fibers*, vsk. 6, nro 2, s. 34, touko 2018, doi: 10.3390/fib6020034.
- [2] C. R. S. de Oliveira, A. H. da Silva Júnior, A. P. S. Immich, ja J. Fiates, "Use of advanced materials in smart textile manufacturing", *Materials Letters*, vsk. 316, s. 132047, kesä 2022, doi: 10.1016/j.matlet.2022.132047.
- [3] *1. A Brief History of Wearables*. Viitattu: 19. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: [https://learning.oreilly.com/library/view/crafting-wearables-blending/9781484218082/A370783\\_1\\_En\\_1\\_Chapter.html](https://learning.oreilly.com/library/view/crafting-wearables-blending/9781484218082/A370783_1_En_1_Chapter.html)
- [4] "Wayback Machine". Viitattu: 22. helmikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://web.archive.org/web/20080528182202/http://www1.cs.columbia.edu/graphics/courses/mobwear/resources/thorp-iswc98.pdf>
- [5] A. Komolafe ym., "E-Textile Technology Review-From Materials to Application", *IEEE access*, vsk. 9, ss. 97152–97179, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3094303.
- [6] K. Cherenack ja L. Van Pieteron, "Smart textiles: Challenges and opportunities", *Journal of Applied Physics*, vsk. 112, nro 9, s. 091301, marras 2012, doi: 10.1063/1.4742728.
- [7] "Maggie Orth: Firefly Dress and Necklace – ACM SIGGRAPH ART SHOW ARCHIVES". Viitattu: 11. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://digitalartarchive.siggraph.org/artwork/maggie-orth-firefly-dress-and-necklace/>
- [8] A. Lund, Y. Wu, B. Fenech-Salerno, F. Torrisi, T. B. Carmichael, ja C. Müller, "Conducting materials as building blocks for electronic textiles", *MRS Bulletin*, vsk. 46, nro 6, ss. 491–501, kesä 2021, doi: 10.1557/s43577-021-00117-0.
- [9] C. Müller, L. Ouyang, A. Lund, K. Moth-Poulsen, ja M. M. Hamedi, "From Single Molecules to Thin Film Electronics, Nanofibers, e-Textiles and Power Cables: Bridging Length Scales with Organic Semiconductors", *Advanced Materials*, vsk. 31, nro 22, s. 1807286, 2019, doi: 10.1002/adma.201807286.
- [10] A. Lund, N. M. van der Velden, N.-K. Persson, M. M. Hamedi, ja C. Müller, "Electrically conducting fibres for e-textiles: An open playground for conjugated polymers and carbon nanomaterials", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vsk. 126, ss. 1–29, huhti 2018, doi: 10.1016/j.mser.2018.03.001.
- [11] "lasittuminen | TEPA-termipankki (erikoisalojen sanasto- ja sanakirjakokoelma)". Viitattu: 11. kesäkuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/lasittuminen>
- [12] Z.-Q. Hu, A.-M. Wang, ja H.-F. Zhang, "Chapter 22 - Amorphous Materials", teoksessa *Modern Inorganic Synthetic Chemistry (Second Edition)*, R. Xu ja Y. Xu, Toim., Amsterdam: Elsevier, 2017, ss. 641–667. doi: 10.1016/B978-0-444-63591-4.00022-7.
- [13] Z. Wang, L. Sangroniz, J. Xu, C. Zhu, ja A. Müller, "Polymer Physics behind the Gel-Spinning of UHMWPE Fibers", *Macromolecular Rapid Communications*, vsk. n/a, nro n/a, s. 2400124, doi: 10.1002/marc.202400124.
- [14] "in situ | TEPA-termipankki (erikoisalojen sanasto- ja sanakirjakokoelma)". Viitattu: 20. kesäkuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/in%20situ>
- [15] M. Heydari Gharahcheshmeh ja K. K. Gleason, "Device Fabrication Based on Oxidative Chemical Vapor Deposition (oCVD) Synthesis of Conducting Polymers and Related Conjugated Organic Materials", *Advanced Materials Interfaces*, vsk. 6, nro 1, s. 1801564, 2019, doi: 10.1002/admi.201801564.
- [16] "IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 523-05-02: 'thin film technology'". Viitattu: 19. huhtikuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=523-05-02>



- [17] M. R. Islam, S. Afroj, J. Yin, K. S. Novoselov, J. Chen, ja N. Karim, "Advances in Printed Electronic Textiles", *Advanced Science*, vsk. 11, nro 6, s. 2304140, 2024, doi: 10.1002/advs.202304140.
- [18] "polymeeri | TEPA-termipankki (erikoisalojen sanasto- ja sanakirjakokoelma)". Viitattu: 25. kesäkuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/polymeeri>
- [19] J. V. Yakhmi, V. Saxena, ja D. K. Aswal, "2 - Conducting Polymer Sensors, Actuators and Field-Effect Transistors", teoksessa *Functional Materials*, S. Banerjee ja A. K. Tyagi, Toim., London: Elsevier, 2012, ss. 61–110. doi: 10.1016/B978-0-12-385142-0.00002-7.
- [20] E. P. Randviir, D. A. C. Brownson, ja C. E. Banks, "A decade of graphene research: production, applications and outlook", *Materials Today*, vsk. 17, nro 9, ss. 426–432, marras 2014, doi: 10.1016/j.mattod.2014.06.001.
- [21] N. Anzar, R. Hasan, M. Tyagi, N. Yadav, ja J. Narang, "Carbon nanotube - A review on Synthesis, Properties and plethora of applications in the field of biomedical science", *Sensors International*, vsk. 1, s. 100003, tammi 2020, doi: 10.1016/j.sintl.2020.100003.
- [22] A. Razaq, F. Bibi, X. Zheng, R. Papadakis, S. H. M. Jafri, ja H. Li, "Review on Graphene-, Graphene Oxide-, Reduced Graphene Oxide-Based Flexible Composites: From Fabrication to Applications", *Materials*, vsk. 15, nro 3, s. 1012, tammi 2022, doi: 10.3390/ma15031012.
- [23] "IEC 60050 - International Electrotechnical Vocabulary - Details for IEC number 151-13-48: '(electric) sensor'". Viitattu: 27. kesäkuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=151-13-48>
- [24] A. Kapoor *ym.*, "Toward Fully Manufacturable, Fiber Assembly-Based Concurrent Multimodal and Multifunctional Sensors for e-Textiles", *Advanced Materials Technologies*, vsk. 4, nro 1, s. 1800281, 2019, doi: 10.1002/admt.201800281.
- [25] V. Kaushik *ym.*, "Textile-Based Electronic Components for Energy Applications: Principles, Problems, and Perspective", *Nanomaterials*, vsk. 5, nro 3, ss. 1493–1531, 2015, doi: 10.3390/nano5031493.
- [26] C. Zhi, S. Shi, Y. Si, B. Fei, H. Huang, ja J. Hu, "Recent Progress of Wearable Piezoelectric Pressure Sensors Based on Nanofibers, Yarns, and Their Fabrics via Electrospinning", *Advanced Materials Technologies*, vsk. 8, nro 5, s. 2201161, 2023, doi: 10.1002/admt.202201161.
- [27] Y. Wang *ym.*, "Scalable and Ultra-Sensitive Nanofibers Coaxial Yarn-Woven Triboelectric Nanogenerator Textile Sensors for Real-Time Gait Analysis", *Advanced Science*, vsk. n/a, nro n/a, s. 2401436, doi: 10.1002/advs.202401436.
- [28] J. Shi *ym.*, "Smart Textile-Integrated Microelectronic Systems for Wearable Applications", *Advanced Materials*, vsk. 32, nro 5, s. 1901958, 2020, doi: 10.1002/adma.201901958.
- [29] T. Hughes-Riley, P. Jobling, T. Dias, ja S. H. Faulkner, "An investigation of temperature-sensing textiles for temperature monitoring during sub-maximal cycling trials", *Textile Research Journal*, vsk. 91, nro 5–6, ss. 624–645, maaliskuu 2021, doi: 10.1177/0040517520938144.
- [30] "Thermocouple Guide: Everything You Need To Know", <https://www.omega.com/en-us/>. Viitattu: 8. heinäkuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.omega.com/en-us/resources/thermocouple-hub>
- [31] A. Rasheed, A. Imran, A. Abrar, ja S. U. Zaman, "Design and integration of textile-based temperature sensors for smart textile applications", *Smart Mater. Struct.*, vsk. 33, nro 2, s. 025012, helmikuu 2024, doi: 10.1088/1361-665X/ad1c52.
- [32] C. Offenzeller, M. Knoll, B. Jakoby, ja W. Hilber, "Screen-Printed, Pure Carbon-Black Thermocouple Fabrication and Seebeck Coefficients", *Sensors*, vsk. 19, nro 2, Art. nro 2, tammi 2019, doi: 10.3390/s19020403.

- [33] S. Harimurti *ym.*, "Review—Human-Body Powered Biosensing Textiles: Body-Power Generating Wearables Based on Textiles for Human Biomonitoring", *J. Electrochem. Soc.*, vsk. 169, nro 6, s. 067502, kesä 2022, doi: 10.1149/1945-7111/ac72c3.
- [34] R. Sivasubramanian, C. Aravind Vaithilingam, S. S. Indira, S. Paiman, N. Misron, ja S. Abubakar, "A review on photovoltaic and nanogenerator hybrid system", *Materials Today Energy*, vsk. 20, s. 100772, kesä 2021, doi: 10.1016/j.mtener.2021.100772.
- [35] I. Ali *ym.*, "Advances in Smart Photovoltaic Textiles", *ACS Nano*, vsk. 18, nro 5, ss. 3871–3915, helmi 2024, doi: 10.1021/acsnano.3c10033.
- [36] "Supercapacitor", *Wikipedia*. 6. heinäkuuta 2024. Viitattu: 11. heinäkuuta 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Supercapacitor&oldid=1232867222>