



**TURUN
YLIOPISTO**

Elektrodynaamiset kalvot

LuK-tutkielma

Turun Yliopisto

Fysiikka

2026

Julius Lehtiö

Tarkastaja:

Dos. Matti Murtomaa

24.4.2026

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu
Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Lehtiö, Julius

Elektrodynaamiset kalvot

LuK-tutkielma, 18 s.

Fysiikka

Huhtikuu 2026

Tutkielman tarkoituksena on tarkastella elektrodynaamisten kalvojen toimintaperiaatteita ja niiden erilaisia sovelluskohteita. Elektrodynaamiset kalvot mahdollistavat hiukkasten liikuttamisen ilman mekaanista työtä tai kuluvia materiaaleja, joka tekee siitä houkuttelevan vaihtoehdon erityisesti vaativissa olosuhteissa.

Elektrodynaamiset kalvot ovat ohuita eristepintoja, joiden sisälle on asetettu elektrodeja siten, että niiden avulla voidaan luoda liikkuva sähkökenttä. Tämä sähkökenttä kohdistaa sähköstaattisia voimia kalvon päällä oleviin hiukkasiin, mikä saa hiukkaset liikkeelle. Hiukkasten liikettä voidaan hyödyntää useissa käyttökohteissa, kuten pintojen puhdistuksessa, hiukkasten kuljetuksessa sekä hiukkasten erottelussa.

Tutkielmassa tarkastellaan elektrodynaamisten kalvojen rakennetta ja toimintaperiaatetta. Käsitellään myös yleisimpiä erilaisia geometrioita. Eri geometriat puolestaan mahdollistavat elektrodynaamisen kalvon erilaiset käyttökohteet.

Käsitellään myös teoreettista perustaa, joka sisältää erityisesti Coulombin voiman, dielektriforeettisen voiman ja hankausvarautumisen. Näiden ilmiöiden avulla voidaan selittää hiukkasten erilaisia liikeratoja kalvon päällä. Tutustutaan myös käytännön sovelluksiin, kuten pintojen puhdistamiseen, hiukkasten erotteluun ja hiukkasten kuljettamiseen.

Tutkielmassa käsiteltävät hiukkaset tarkoittavat mikrometriä suuruusluokkaa olevia hiukkasia eli esimerkiksi niin sanottuja pölyhiukkasia.

Avainsanat: Elektrodynaaminen kalvo, dielektriforeettinen voima, hiukkasten kuljetus, pintojen puhdistus

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Rakenne	3
2.1	Eri geometrioita	5
3	Elektrodynaamisten kalvojen teoreettinen perusta	8
3.1	Coulombin voima	8
3.2	Dielektrforeettinen voima	8
3.3	Hankausvarautuminen	9
4	Hiukkasten liikeradat	11
5	Sovelluskohteita	13
5.1	Pölynpoisto aurinkopaneeleista	13
5.2	Hiukkasten erottelu	14
5.3	Hiukkasten kuljettaminen	14
6	Yhteenveto	16
	Lähteet	18

1 Johdanto

Kontrolloitu hiukkasten kuljetus ilman mekaanista työtä on tärkeää useille käyttökohteille, kuten aurinkopaneelien tai muiden laitteiden puhdistamiselle pölystä, hiukkasten erottelulle ja hiukkasten kuljetukselle. Tärkeää pölyn puhdistamiselle on etenkin toimivuus kuivissa ja pölyisissä olosuhteissa, kuten aavikoilla, Kuussa tai Marsissa. Mekaaniset puhdistusvälineet, kuten harjaus, kuluttavat esineen pintaa ajan kuluessa. Erityisesti optisissa laitteissa tämä vähitellen heikentää laitteen toimintakykyä, joten se ei ole niille ideaali puhdistustapa. Vesipesussa puolestaan ongelmana on se, että vettä ei ole saatavilla tai sitä ei ole käytännössä mahdollista hyödyntää esimerkiksi kuivilla aavikoilla tai avaruudessa. [1]

Elektrodynaamiset kalvot (engl. Electrodynamic screen lyhennettynä EDS) muodostuvat yleensä ohuesta eristepinnasta, jonka sisällä on rinnakkain asetettuja elektrodeja. Niiden avulla voidaan luoda liikkuva sähkökenttä, joka aiheuttaa voimia EDS:n päällä oleviin hiukkasiin. Voimat puolestaan saavat hiukkaset liikkumaan. Tätä liikettä voidaan hyödyntää monissa eri käyttötarkoituksissa. [1]

Elektrodynaamisille kalvoille on useita käyttökohteita, joista yksi tärkeimmistä on pintojen puhdistus. [1] Aurinkopaneelien tehokkuudelle parhaat olosuhteet ovat usein aavikoilla tai muilla kuivilla alueilla, joissa ne saavat paljon auringonvaloa ja joissa ei havaita suurta määrää sadetta tai pilviä. Tällaisilla alueilla on tyypillistä usein tapahtuvat hiekkamyrskyt ja tuuli, joka kuljettaa hiekkaa. Hiekan kulkeutuminen puolestaan haittaa aurinkopaneelien toimintaa, sillä sitä kerääntyy paneelien päälle ja se osittain estää auringonvalon pääsyn paneelille. Tästä syystä yhdessä vuodessa aurinkopaneelin tehokkuus laskee jopa melkein 40 prosentilla. Päivittäin tehokkuus laskee noin 0,2 prosentilla, ja kuukausittain yhden ja viiden prosentin väliltä. [2]

Tehokkuuden palauttamiseksi pinta täytyy puhdistaa. Tyypillisiä puhdistustapoja ovat joko mekaaninen puhdistus harjaamalla tai vesipesu korkeapaineisilla vesisuihkuilla ja pesuaineella. Harjauksessa ongelmana on se, että pinnan harjaaminen kuluttaa pintaa ja toisaalta siihen tarvitaan koulutettua henkilöstöä. Vesipesussa ongelmaksi tulee se, että on hyvin kallista kuljettaa vettä sinne, missä aurinkopaneelit sijaitsevat. Maan päällä aurinkopaneelit toimivat tehokkaimmillaan aavikoilla. Muita käyttökohteita voi olla muun muassa Kuun pinnalla tai Marsissa, joten vettä ei ole siis helppoa hyödyntää näillä alueilla. Tämän lisäksi vesipesuunkin tarvitaan koulutettua henkilöstöä. [2]

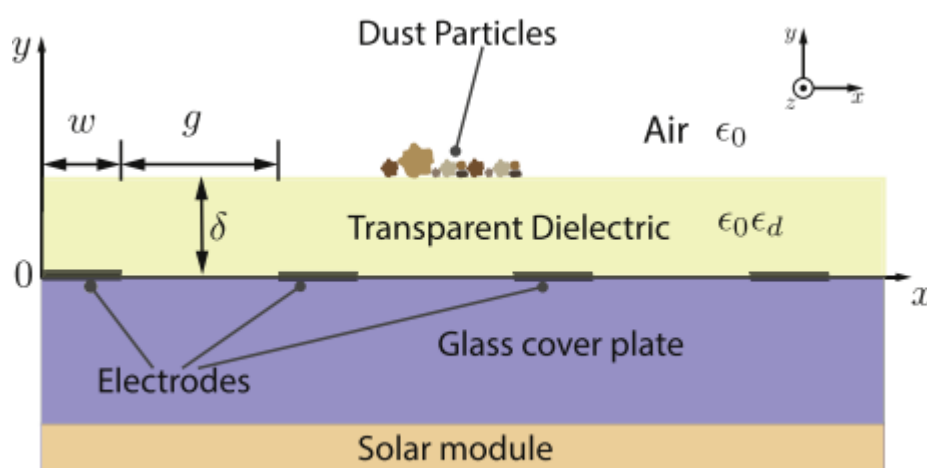
Elektrodynaamiset kalvot ovat hyvä vaihtoehto pintojen puhdistamiselle. EDS puhdistaa jopa yli 90 % pinnalla olevasta pölystä alle kahdessa minuutissa. Niiden käytöstä ei myöskään aiheudu suuria kuluja, sillä niiden energiankulutus on hyvin pieni (alle 1 Wh/m²/puhdistuskerta). Tämä energiankulutus vastaa alle 0,1% osuutta aurinkopaneelien tuottamasta energiasta. Tarvittava energia saadaan siis helposti aurinkopaneeleista saadulla energialla. Niiden käyttöön ei liity myöskään suuria huoltokuluja, sillä siinä ei ole liikkuvia osia eikä sen käyttöön tarvita henkilöstöä tai mitään kuluvia

materiaaleja. EDS:ille on myös monia muita käyttökohteita, joista kerrotaan tutkielmassa myöhemmin. [2], [3]

2 Rakenne

Tässä kappaleessa käsitellään tasomaista EDS:n rakennetta, mutta ne voidaan muodostaa myös erilaisilla geometrioilla ja niitä tarkastellaan tutkielmassa myöhemmin. Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen rakenne elektrodynaamiselle kalvolle. EDS muodostuu rinnakkain asetetuista elektrodeista, jotka ovat päällystetty eristepinnalla.

Pinnan täytyy olla eriste, sillä muuten elektrodit olisivat kiinni toisissaan johteella ja sillä myös estetään sähköisten läpilyöntien mahdollisuus. Toisaalta eristepinnalla mahdollistetaan myös se, että sähkökenttä kulkee kalvon pinnan yläpuolelle. Kuten kuvassa 1 näkyy, eristepinta on usein läpinäkyvä, sillä EDS:iä käytetään yleisimmin optisissa sovelluksissa. [1], [4]

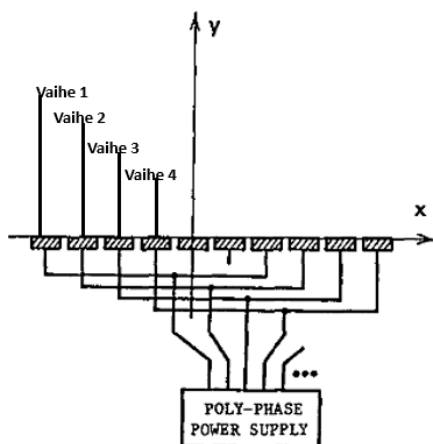


Kuva 1: Elektrodynaamisen kalvon poikkileikkauskuvaa, josta näkyy sen rakenne. Kalvon päällä on yksi eristekerros ja ”Solar module” tarkoittaa tässä, jonkin aurinkopaneelin pintaa. Kuvan EDS jatkuu z-akselilla eli paperin normaalin suuntaisesti loputtomasti. Kuvassa δ merkitsee eristekerroksen paksuutta, w on elektrodin paksuus ja g on kahden elektrodin välin pituus. [5]

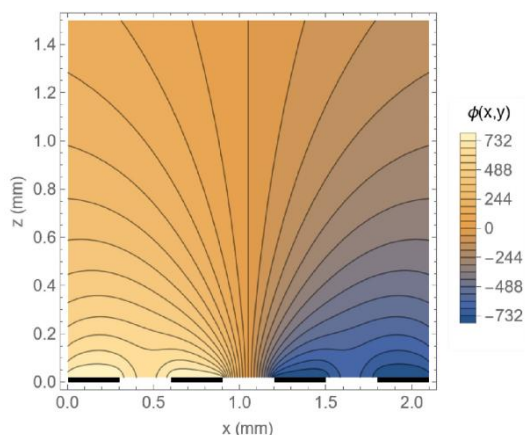
EDS:n elektrodeihin tuodaan monivaiheinen vaihtovirralla toimiva korkeajännitelähde, kuten kuvassa 2 on esitetty. Tällaisella jännitelähteellä saadaan luotua askelittain etenevä ajan funktiona muuttuva potentiaali EDS:n elektrodeihin. EDS:issä käytetyt jännitteet ovat tyypillisesti 5–10 kV, mutta ne voivat vaihdella laajalti riippuen EDS:stä. Elektrodi kokee kuvan 2 tapaan ensin esimerkiksi potentiaalin, jota on kuvattu *Vaihe 1*. Ajan kulkiessa eteenpäin se kokee järjestyksessä kaikki muut vaiheet ja vastaavasti tapahtuu myös muille elektrodeille. Kuvassa 3 on esitetty EDS:n yläpuolella havaittu potentiaali tietyllä ajanhetkellä. Siinä myös havaitaan elektrodien eri vaiheet, sillä elektrodit ovat eri potentiaaleissa. Ajan kulkiessa eteenpäin elektrodit siis kokevat järjestyksessä eri potentiaalit ja tämä luo liikkuvan sähkökentän EDS:n yläpuolelle. [1], [2], [4]

Jännitelähteiden vaihtovirran taajuus voi vaihdella hyvinkin paljon. Joissain EDS:issä käytetään 1–10 Hz taajuuksia, mutta toisissa voidaan käyttää jopa 10–600 kHz korkeataajuuksia. Käytetty taajuus riippuu siitä, mihin EDS:ää käytetään sekä siitä millaisissa olosuhteissa se sijaitsee ja minkälaisia hiukkasia sen halutaan liikuttavan. [1], [2], [4]

EDS:ään voidaan tuoda monivaiheisella jännitelähteellä erivaiheisia jännitteitä. Vaiheiden määrä puolestaan vaikuttaa hiukkasten liikkeeseen EDS:n päällä. Käytettyjen vaiheiden määrä riippuu käyttökohteesta, mutta tyypillisesti käytetään 3-, 4- tai 6-vaiheisia jännitteitä. [3], [6]



Kuva 2: Elektrodynaamisen kalvon elektrodeihin (kuvattu suorakulmioin) tuotu monivaiheinen jännitelähde. Joihinkin elektrodeihin on merkitty myös sen vaihe kuvan ajanhetkellä. [7]



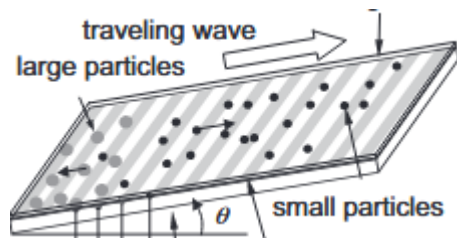
Kuva 3: EDS:n elektrodien yläpuolella esiintyvä potentiaali rajaviivoin esitettynä tietyllä ajanhetkellä. Mustat laatikot kuvaavat EDS:n elektrodeja. [1]

Elektrodikonfiguraatiolla voi olla merkittävä vaikutus EDS:n tehokkuuteen. Kuvan 1 EDS:ssä elektrodit jatkuvat paperin normaalin suuntaisesti loputtomasti. Tehokkuuteen vaikuttaa silloin elektrodikonfiguraation osalta elektrodien leveys (kuvassa 1 merkintä w), sekä niiden välinen etäisyys toisistaan (kuvassa 1 merkintä g). C. E. Johnson et al. (2005) tutkivat elektrodien välisten etäisyyksien merkitystä pölynpoistotehokkuudelle. Tutkimuksessa käsiteltiin 1,27 mm ja 2,54 mm elektrodietäisyyksiä alkutilanteessa neutraaleille sekä -varautuneille hiukkasille. Kokeessa havaittiin, että lyhyemmällä elektrodietäisyydellä saavutettiin parempi pölynpoistotehokkuus jokaisessa

tilanteessa. Pienemmän elektrodietäisyyden tilanteissa pölynpoistotehokkuus myös parani suuresti, kun hiukkaset tehtiin etukäteen varautuneiksi. Suuremmalla elektrodietäisyydellä vastaavassa tilanteessa pölynpoistotehokkuus kuitenkin hieman pieni. Tämän selittää se, että hiukkasten ollessa varautuneita, ne kokevat voimakkaamman vetovoiman toisia hiukkasia kohtaan. Silloin joitain hiukkasia ei saada sähkökentän aiheuttamien voimien avulla ollenkaan liikkeelle. [1], [8]

2.1 Eri geometrioita

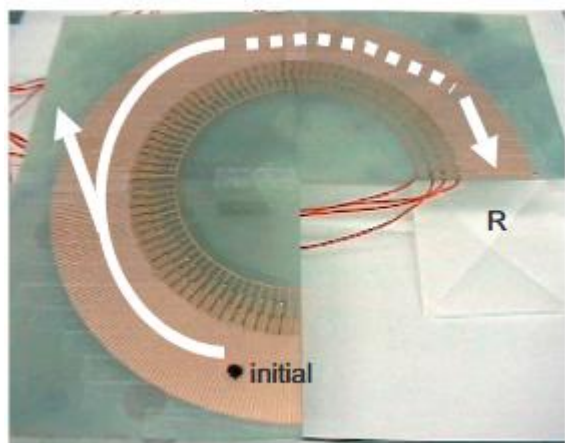
Elektrodynaamisissa kalvoissa voidaan hyödyntää monenlaisia geometrioita. Eri geometriat puolestaan mahdollistavat erilaisia käyttökohteita EDS:ille. Aiemmin tutkielmassa on käsitelty tasomaista geometriaa ja sitä voidaankin hyödyntää monissa eri tilanteissa. Tasomaista geometriaa voidaan muokata siten, että se on kallellaan niin kuin kuvassa 4 on esitetty. Tämä mahdollistaa sen, että hiukkasia voidaan erotella hiukkaskoon perusteella. Kulma θ määritellään sellaiseksi, jolla pienet ja kevyet hiukkaset kulkevat ylöspäin, kun taas isommat ja painavimmat hiukkaset pyörivät alas pois EDS:n pinnalta. Tämä saavutetaan asettamalla sähkökentän ominaisuudet ja kulma θ sellaisiksi, että gravitaatiovoima on suurempimassaisille hiukkasille voimakkaampi kuin sähkökentän aiheuttamat voimat, jolloin ne vierivät pintaa pitkin alaspäin. Samaan aikaan pienempimassaisten hiukkasten pitää kuitenkin kokea suurempi voima liikkuvasta sähkökentästä, kuin gravitaatiovoima, jotta ne kulkevat tasoa ylöspäin. Lopputuloksena hiukkaset saadaan eroteltua niiden koon perusteella. [9]



Kuva 4: Kulman θ verran kallellaan oleva elektrodynaaminen kalvo. [9]

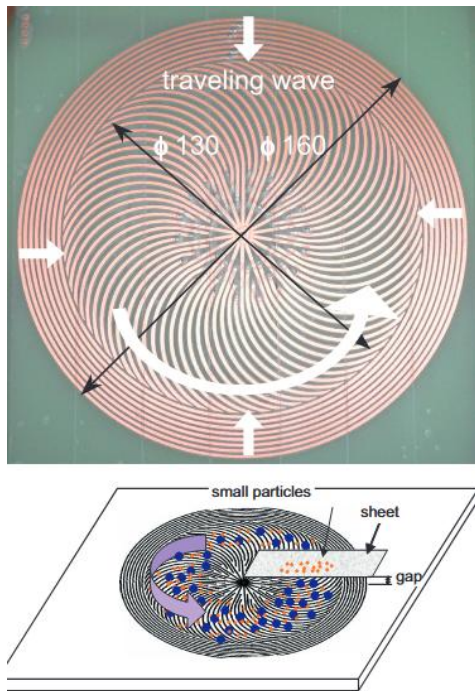
H. Kawamoto (2008) käytti kokeessaan kuvan 5 mukaista koejärjestelyä. Elektrodynaaminen kalvo muodostui kolmesta ympyrän neljännesosan palasesta sekä hiukkasten keräysalustasta. Tätä geometriaa EDS:lle voidaan nimittää ympyrägeometriaksi. Hiukkaset asetettiin ympyrässä pyörivän kulkevan aallon kenttään, jonka tarkoituksena on erotella ne hiukkaskoon perusteella. Hiukkasten sijainti saatiin riippumaan massasta, sillä keskipakovoiman aiheuttaman ympyräliikkeen säde riippuu suoraan verrannollisesti massasta. Täten isompien hiukkasten ympyräliikkeen säde on suurempi kuin pienten hiukkasten. EDS:n ominaisuudet voidaan siten asettaa sellaisiksi, että suurten hiukkasten liikerata saa ne putoamaan pois EDS:n pinnalta, kun taas pienet pysyvät sen päällä. Oletettu lopputulos on siis se, että keräysalustalle saadaan kerättyä pienet hiukkaset. Kokeessa havaittiin, että

keräysalustalle kertyikin oletuksen vastaisesti suuret hiukkaset. Tämä johtuu siitä, että pienet hiukkaset leijuivat korkeammalla EDS:n yläpuolella, jossa sähkökentän voimakkuus on pienempi. Silloin keskipakovoima kohdisti suhteessa voimakkaamman voiman, kuin sähkökenttä, joka sai hiukkaset lentämään pois EDS:ltä. Suuret hiukkaset olivat lähempänä EDS:n pintaa, jolloin sähkökenttä kohdisti niihin suuremman voiman ja piti ne EDS:n päällä. Tämän geometrian käytännön sovelluksia pitäisi siis vielä kehittää, jotta sitä voidaan hyödyntää halutulla tavalla. [9]



Kuva 5: Ympyrägeometria elektrodynaamiselle kalvolle. Kuvaan merkitty *initial* tarkoittaa hiukkasten paikan sijaintia aluksi. *R* tarkoittaa kuvassa alustaa, jolle osa hiukkasista päätyvät kokeen lopuksi. [9]

H. Kawamoto (2008) kokeili seuraavaksi spiraaligeometriaa hyödyntäen havaintoa, että leijumiskorkeus riippuu hiukkasten säteen pituudesta. Tämän kokeen EDS on esitetty kuvan 6 yläosassa ja alemmassa kuvassa on havainnollistettu koejärjestelyä. EDS muodostui sisempänä olevista spiraalielektrodeista ja ulompana olevista ympyräelektrodeista. Tämän lisäksi EDS:n yläpuolelle asetettiin keräysalusta, jolle halutut hiukkaset yritettiin kerätä. Hiukkaset kulkivat siis spiraalin muodossa liikkuvassa sähkökentässä. Ympyrän muotoisissa elektrodeissa kulkeva liikkuva sähkökenttä kulki ympyrän ulkoa sisäänpäin, jotta hiukkaset eivät lennä pois EDS:n pinnalta. Silloin pienemmät hiukkaset lentävät korkeammalla kuin suuremmat, mutta ne kulkevat muuten samaa polkua. Keräysalusta asetettiin siten, että pienet hiukkaset lensivät sen yli ja tippuivat sen päälle, kun taas suuret hiukkaset lensivät sen ali. Lopputuloksena hiukkaset saatiin jälleen eroteltua hiukkaskoon perusteella. [9]



Kuva 6: Ylemmässä kuvassa näkyy kokeessa käytetty spiraaligeometrian omaava EDS ja alemmassa on havainnollistava kuva koejärjestelystä. [9]

3 Elektrodynaamisten kalvojen teoreettinen perusta

3.1 Coulombin voima

Coulombin voima voidaan esittää kaavalla

$$F_C = qE, \quad (1)$$

jossa q on hiukkasen varaus ja E on sähkökenttä hiukkasen kohdalla. Coulombin voima on tärkein voima EDS:ssä, jolla saadaan hiukkaset liikkumaan. Sähkökentän ominaisuuksien myötä Coulombin voima on voimakkaimmillaan lähellä elektrodeja. Sen täytyykin olla huomattavasti voimakkaampi kuin vetovoimien hiukkasten ja pinnan välillä, jotta hiukkaset saadaan liikkumaan. Voiman suuruus voidaan laskea, jos sähkökentän ja hiukkasen varauksen suuruudet tiedetään. Käytännön sovelluksissa hiukkasten varauksia ei voida kuitenkaan tietää, jolloin tämän voiman suuruutta ei voida tarkalleen laskea. [10]

3.2 Dielektroforeettinen voima

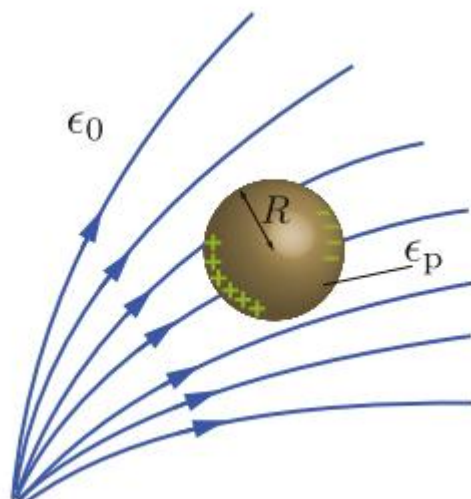
Neutraalin tai hyvin vähäisesti varautuneen hiukkasen liike EDS:ssä syntyy dielektroforeettisen voiman seurauksena (engl. Dielectrophoretic force lyhennettynä DEP) [10]. Tämä voima syntyy, koska EDS:n yläpuolelle muodostuva sähkökenttä on epähomogeeninen. Kun EDS:n päällä on neutraali tai varattu hiukkanen, siihen kohdistuu tämä sähkökenttä, joka puolestaan saa hiukkasen sähköiset varaukset kulkeutumaan sen vastakkaisille puolille. Tätä on havainnollistettu kuvassa 7, jossa näkyy kuinka plusmerkillä ja miinusmerkillä merkityt positiiviset ja negatiiviset varaukset kulkeutuvat hiukkasen eri puolille. Hiukkanen tulee dipoliseksi, jolloin epähomogeeninen sähkökenttä kohdistaa erisuuruiset voimat eri puolille dipolia. Nämä voimat saavat hiukkasen liikkeelle ja tätä voimaa kutsutaan dielektroforeettiseksi- tai DEP-voimaksi. [2] Toisin kuin Coulombin voiman kohdalla, hiukkasen varaus ei vaikuta dielektroforeettisen voiman suuruuteen, eli neutraaleille hiukkasille DEP-voima on ainut voima, joka saa hiukkasen alun alkujaan liikkeelle ja täten käynnistää hankaussähköistymisen (engl. tribocharging process). Toisaalta, koska DEP-voima ei riipu hiukkasen varauksesta, suuresti varautuneelle hiukkaselle DEP-voima on paljon pienempi kuin Coulombin voima, jolloin sen vaikutus hiukkasen liikkeelle ei ole kovin merkittävä. DEP-voima voidaan esittää kaavalla,

$$F_{DEP} = P\nabla E \quad (2)$$

jossa P on hiukkasen dipolimomentti ja se kerrotaan sähkökentän gradientilla. Jos pallomainen hiukkanen on väliaineen päällä, jota ympäröi sähkökentän gradientti, siihen kohdistuu DEP-voima, joka saadaan kaavalla:

$$\mathbf{F}_{DEP} = 2\pi r^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \nabla |\mathbf{E}|^2 \quad (3)$$

Kaavassa hiukkasen säde on r ja sen eristevakio (engl. dielectric constant) on ϵ_2 . Väliaineen eristevakio on ϵ_1 . [10]



Kuva 7: Pölyhiukkasen ja sen sisällä olevat varaukset epähomogeenisessä kentässä. Pölyhiukkasen säde on R ja permittiivisyys ϵ_p . Kuvassa näkyy kuinka epähomogeeninen sähkökenttä saa pölyhiukkasen sisällä olevat varaukset kulkeutumaan eri puolille hiukkasta. [5]

3.3 Hankausvarautuminen

Hiukkasten liike EDS:n päällä saa ne hankautumaan toisia hiukkasia ja EDS:n pintaa vasten. Eri materiaalien ollessa kontaktissa, ja erityisesti hankautuessa, niiden välillä siirtyy varausta. Tämän varauksen suuruutta ja suuntaa on kuitenkin hankala ennustaa. Kokeellisissa tutkimuksissa on havaittu, että jotkin aineet varautuvat erimerkkisesti ja erisuuruisesti, kun ne tuodaan kontaktiin, jonkin tietyn toisen aineen kanssa. Aineet voidaan listata tämän siirtyneen varauksen mukaan ja sitä kutsutaan triboelektroniseksi sarjaksi. Eräs sellainen on esitetty taulukossa 1. Taulukossa ylempänä esitetyt materiaalit varautuvat positiivisesti, kun ne hankautuvat toisen taulukossa alempana olevan materiaalin kanssa. Triboelektronisia sarjoja on kuitenkin useita ja aineiden järjestys voi vaihdella eri sarjoissa. Tämä johtuu siitä, että kokeita on vaikea toistaa täydellisesti ja materiaalien pinnoissa voi olla eroavaisuuksia, joka vaikuttaa lopputulokseen. Tämän lisäksi siirtyneen varauksen määrään vaikuttaa ainakin kontaktin luonne, ympäristölliset tekijät, kuten kosteus sekä lämpötila ja mikä tahansa aiempi pinnan prosessointi. [1], [11]

EDS:n soveltamisessa on tärkeää ymmärtää hankausvarautumisesta, sillä se voi vaikuttaa suuresti sen käytön tehokkuuteen. Kuten aiemmin jo mainittiin, neutraalit hiukkaset saadaan liikkeelle DEP-voiman ansiosta. Tämä liike saa hiukkaset hankausvarautumaan, jolloin myös Coulombin voima alkaa vaikuttamaan hiukkasiin. Yleensä Coulombin voima onkin paljon voimakkaampi, joten on tärkeää ymmärtää siirtyneen varauksen määrästä ja merkistä, jotta hiukkasten liikeratoja voidaan hallita. Toisaalta myös jo entuudestaan varautuneet hiukkaset kokevat hankasvarautumista EDS:ssä. [11]

Se, että EDS:n pinta on eriste, on merkittävää hankausvarautumiselle. Hankausvarautumisen aikana siirtynyt varaus säilyy vain, kun vähintään toinen hankauksessa olevista materiaaleista on eriste. Kun EDS:n pinta itsessään on eriste, kaikki sen päällä olevat hiukkaset kokevat hankausvarautumisen, vaikka ne olisivatkin johteita. Tällöin kaikkia hiukkasia EDS:n päällä voidaan liikuttaa Coulombin voiman ansiosta. [11]

Taulukko 1: Eräs triboelektroninen sarja, jossa alhaalla olevat materiaalit varautuvat negatiivisesti ja ylhäällä olevat positiivisesti. [11]

+ Asetaatti
Lasi
Nailon
Villa
Paperi
Puuvilla
Kupari
Polyesteri
PVC
- Teflon

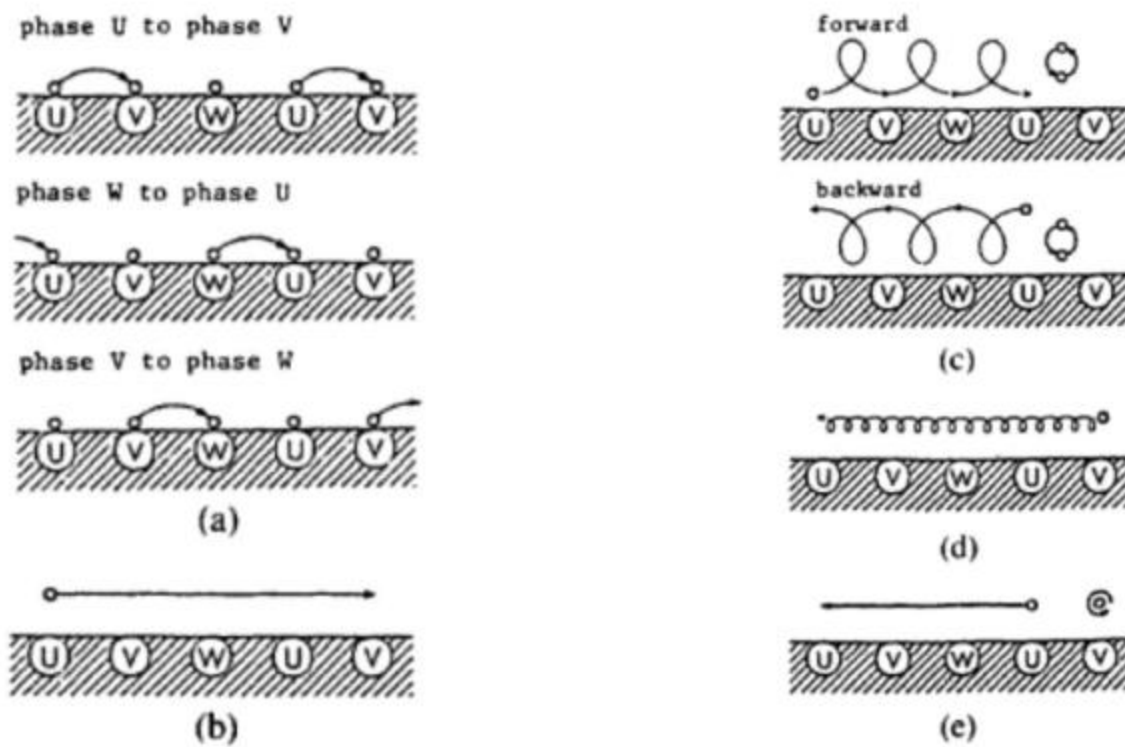
4 Hiukkasten liikeradat

Kuvassa 8 on esitetty hiukkasten erilaisia liikeratoja EDS:n pinnalla. Kuvassa 8 havaitut liikeradat on saavutettu pitämällä vaihtojännitteen amplitudia vakiona, mutta kasvattamalla sen taajuutta 10^{-1} Hz:stä 10 Hz:iin. Kokeessa hiukkaset ovat nestemäisessä väliaineessa. Hiukkasen liikeradat voidaan siten luokitella seuraaviin luokkiin:

- a) Askelittain etenevä liike
- b) Vakionopeudella tapahtuva etenevä liike
- c) Pyörivä liike eteen- tai taaksepäin
- d) Ajelehtiva sykloidinen liike
- e) Pyörivä liike hitaalla etenemisnopeudella

Kuvan tilanteessa ”forward” eli eteenpäin tarkoittaa etenevän aallon suuntaa ja vastaavasti ”backward” eli taaksepäin on sille vastakkainen suunta. Alhaisimmalla taajuudella havaittiin liike a) eli askelittain etenevä liike. Liikeradassa a) hiukkasten keskimääräinen nopeus on sama kuin liikkuvan aallon nopeus, sillä hiukkaset kulkeutuvat aallon potentiaalikuopassa. Liikerata johtuu siitä, että taajuus on pieni. Silloin jaksonaika $T = \frac{1}{f}$ on suuri, jolloin hiukkanen pystyy kulkemaan elektrodilta toiselle yhden jakson aikana. Muut liikeradat saavutetaan järjestyksessä, kun taajuutta kasvatetaan.

Liikeradalla b) hiukkanen liikkuu vakionopeudella eteenpäin. Kun hiukkanen etenee samalla nopeudella kuin liikkuva sähkökenttä, pysyy sähkökenttä hiukkasen kohdalla vakiona, jolloin hiukkanen liikkuu kuin se olisi jatkuvassa homogeenisessä sähkökentässä. Kun taajuutta kasvatetaan, havaitaan seuraavaksi liikerata c), jossa hiukkasen liikerata muuttuu pyöriväksi. Hiukkanen ei liiku yhtä nopeasti kuin sähkökenttä, jolloin se kokee pyörivän sähkökentän, joka etenee eteen- tai taaksepäin. Vieläkin suuremmilla taajuuden arvoilla hiukkasen liikerata pyörii vielä tiheämmin ja hitaasti ajautuu eteen- tai taaksepäin. Täten taajuutta kasvattamalla saavutetaan ensin liikerata d) ja sitten liikerata e). Liikeradassa e) hiukkanen pyörii nopeasti oman akselinsa ympäri ja vain hitaasti ajautuu eteenpäin. [4]



Kuva 8: Hiukkasen erilaisia liikeratoja EDS:n päällä. Kuvassa U, V ja W esittävät elektrodeja ja sen päällä oleva piste esittää hiukkasta. [4]

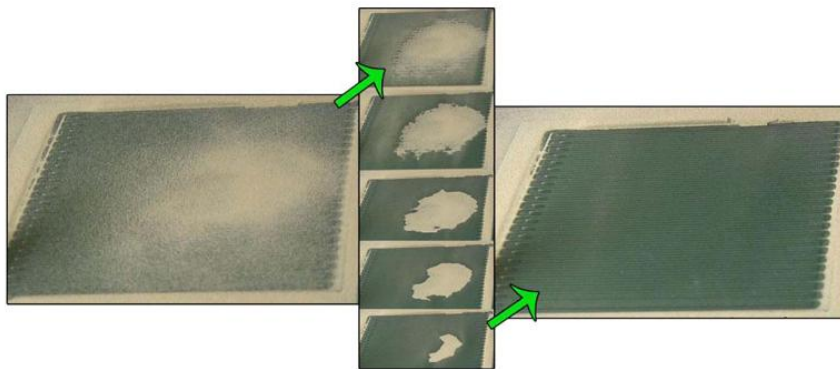
5 Sovelluskohteita

5.1 Pölynpoisto aurinkopaneeleista

Vuonna 2008 ihmiskunta kulutti energiaa noin 15 TW teholla. Maapallon pinnalle kuitenkin saapuu arviolta jopa 120000 TW teholla energiaa auringonsäteilystä. Ihanteellisessa tilanteessa voitaisiin koko ihmiskunnan energiatarpeet kattaa helposti auringonsäteilyä hyödyntämällä. [3] Tämän potentiaalın kautta muodostunut tarve onkin mahdollistanut aurinkoenergian kokeman suuren kasvun kysynnässä. Vuosien 2008 ja 2018 välillä aurinkoenergian kysyntä oli kasvanut vuosittain 68 prosentilla. [2] Aurinkopaneeleja tarvittaisiin korkean auringonsäteilyn alueilta arviolta $3,5 \times 10^5 \text{ km}^2$, jotta niiden avulla saataisiin ihmiskunnan energiantarve katettua. Ihmiskunnan halutessa hyödyntää aurinkoenergiaa enemmän täytyy ne puhdistaa tehokkaasti. [3] Tutkielman johdannossa jo tarkasteltiin puhdistuksen tarpeellisuutta ja muiden puhdistusmenetelmien heikkouksia, joten siitä ei tässä mainita enempää.

M. Mazumder et al. (2013) kartoittivat EDS:n tehokkuutta pölynpoistossa erityisesti aurinkopaneeleista. Aurinkopaneeleissa käytettävien EDS:ien elektrodit ovat tyypillisesti 50–100 μm leveitä. Niiden välinen etäisyys on noin 700–1000 μm . Nämä koot ja etäisyydet kuitenkin vaihtelevat riippuen EDS:n käyttöympäristöstä ja valmistusmateriaaleista. Elektrodit ovat suorakaiteen muotoisia, sillä niiden yleisimmät valmistusmenetelmät vaativat sen. Käytetyn vaihtojännitteen amplitudi on yleensä 700–1000 V. Monivaiheinen jännitelähde on näissä tapauksessa kolmivaiheinen. Elektrodien päällä oleva läpinäkyvä eristekerros on usein 50–100 μm paksuudeltaan ja se valmistetaan tyypillisesti polyesteriuretaanista tai etyleenitetrafluoroetyleenistä.[3]

Eri aavikoilla havaitaan erilaisia pölyyntymismääriä. Lähi-Idän alueilla pölyyntymismäärä on noin 0,36 $\text{g/m}^2/\text{päivä}$, Negevin aavikolla vastaavasti havaitaan 0,5 $\text{g/m}^2/\text{päivä}$ ja Mojaven aavikolla vain 0,17 $\text{g/m}^2/\text{päivä}$. Pölyyntymismäärä vaihtelee myös muun muassa vuodenajan mukaan. EDS:n päällä olevat hiukkaset, joiden halkaisija on alle 40 μm , heikentävät aurinkopaneelin tehokkuutta 40%, kun pölyä on 4 g/m^2 . Tämän pölymäärän (4 g) puhdistamiseen EDS:n avulla tarvitaan vain 1 $\text{Wh/m}^2/\text{puhdistuskerta}$, joka vastaa alle 0,1 % aurinkopaneelin tuottamasta energiasta, kun paneelin pinta-ala on 1 m^2 . Pölynpoistotehokkuudeksi havaitaan 95,8 % hankausvarautuneille hiukkasille ja 96,2 % neutraaleille hiukkasille. Kuvassa 9 näkyy 20 sekunnin ajanjakso, josta on otettu kuvia 3,3 sekunnin välein. Myös kuvista voidaan huomata EDS:n pölynpoistotehokkuus selkeästi. Huomioitavaa on myös se, että aurinkopaneelit ovat usein kallistuneena, jolloin gravitaatiovoima voi edesauttaa puhdistamista. Aurinkopaneelit sijaitsevat useimmiten auringontasaajan läheisyydessä, jossa kallistuskulma ei kuitenkaan ole yleensä kovin suuri. [3]



Kuva 9: 3,3 s välein otettuja kuvia aluksi pölyn peittämästä EDS:stä. Kokonaisuudessa kulunut aika on 20 s. Kuvista näkyy, kuinka pölyn määrä vähitellen vähenee EDS:n päällä. Pölynäyte on otettu aavikolta. [3]

5.2 Hiukkasten erottelu

S. Masuda et al. (1988) tutkivat tutkimuksessaan biologisten solujen liikettä vesipitoisessa väliaineessa, kun niihin kohdistettiin EDS:n muodostama liikkuva aalto. EDS:ää voidaan hyödyntää solujen erottelussa, joka puolestaan mahdollistaa monia sovelluskohteita biologian tutkimuksessa. Näitä ovat muun muassa solukromatografia, jota voidaan hyödyntää tautien toteamiseen, ja jonkin tietyn komponentin erotus esimerkiksi verisolukannasta. Aiemmin mainitussa EDS:ää voidaan hyödyntää solujen määrittämisessä ja karakterisoinnissa. Verisolujen tapauksessa EDS:n avulla voidaan muodostaa homogeeninen populaatio jotain tiettyä verisolun komponenttia, jota voidaan hyödyntää seuraavissa tutkimusvaiheissa. [7]

M. Adachi et al. (2017) esittivät tavan erotella Kuun regoliittihiukkasia EDS:n avulla. Hiukkasten erottelu Kuun pinnalla mahdollistaisi resurssien keräämisen Kuusta sen sijaan, että niitä kuljetetaan Maasta. Tämä tekisi Kuun tutkimuksesta halvempaa, tehokkaampaa ja riskittömämpää. Se myös mahdollistaisi pitkäaikaisen Kuun tutkimuksen tekemisen. Tutkimuksessa havaittiin, että noin 20 μm halkaisijan omaavat hiukkaset voitiin tehokkaasti erotella tyhjiössä. Numeeristen laskujen perusteella esitetty erottelujärjestelmä toimii Kuussa hiukkasille, joiden halkaisija on alle 10 μm . Näiden päätelmien perusteella tällä erottelujärjestelmällä voi olla merkittävä rooli tulevaisuuden Kuun tutkimuksessa. [12]

5.3 Hiukkasten kuljettaminen

Aoyama et al. (1993) tutkivat kaasukuplien liikkeen kontrollointia eristyneessä EDS:n avulla. Kehittyvän avaruusteknologian myötä on tärkeää, että kaasukuplien liikettä voitaisiin kontrolloida.

Kupliin vaikuttavan nostevoiman pienentämisellä usealla kertaluokalla tai kuplien liikkeen hallinnalla tulee luultavasti olemaan useita käyttökohteita mikrogravitaatioympäristöissä, mutta myös maanpäällisessä ympäristössä. Aoyama et al. havaitsivat kokeessaan, että kuplien liikkeen hallinta tällä tavalla on mahdollista. [13] Tätä sovellusta EDS:lle ei ole tutkittu paljon, joten ei osata sanoa sen sovellusten merkittävydestä.

H. Kawamoto et al. (2006) esittivät tavan liikuttaa nestepisaraa EDS:n avulla. Tutkimuksen tulos oli se, että eristävää sekä johtavaa nestepisaraa voitiin liikuttaa EDS:n avulla, kun se on eristävässä nestemäisessä väliaineessa. Eristävä nestepisara voitiin kuitenkin kuljettaa tehokkaammin kuin johtava pisara. Pisanan täytyi kuitenkin olla pienempi kuin kolmen vierekkäisen elektrodin välinen etäisyys, jotta sitä voitiin liikuttaa. [14]

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) suunnittelee etsivänsä jätää Kuusta pitkän poran avulla. H. Kawamoto et al. (2021) esittivät tavan liikuttaa mahdollisia löydettyjä ja murskattuja jääpaloja Kuussa EDS:n avulla. Kuljetustapa perustuu rinkiäisiin elektrodeihin, jotka ovat asetettu rinnakkain putken ympärille. Elektrodeihin tuodaan nelivaiheinen jännitelähde, joka luo elektrodeihin muuttuvan potentiaalisen siten, että sähkökenttä liikkuu putkea ylöspäin. Täten murskatut jääpalat voidaan nostaa putkea pitkin EDS:n avulla. Tutkimus osoitti, että myös Kuun regoliittihiukkasia voidaan kuljettaa tällä tavalla. [15]

6 Yhteenveto

Elektrodynaamiset kalvot tarjoavat hyvän tavan liikuttaa hiukkasia halvasti, tehokkaasti ja nopeasti ilman, että tarvitaan mitään mekaanisia osia tai kuluvia materiaaleja. Tämä onnistuu liikkuvan sähkökentän avulla. Tutkielmassa tarkasteltiin EDS:ien tyypillisiä rakenteita ja eri geometrioita. Käsiteltiin myös tärkeimpiä fysikaalisia ilmiöitä, kuten Coulombin voimaa, dielektriforeettista voimaa sekä hankausvarautumista. Näiden voimien avulla selitetään hiukkasten liikettä kalvon pinnalla. Tutkielman lopussa kerrotaan vielä eri sovelluskohteista, joista tärkein on aurinkopaneelien puhdistus. Tämän lisäksi EDS:iä voidaan hyödyntää yleisesti hiukkasten kuljettamisessa ja –erottelussa. Näitä käyttökohteita voidaan soveltaa erityisesti avaruusteknologiassa, mutta myös monissa muissa sovelluksissa.

Tulosten perusteella voidaan sanoa, että EDS tulee olemaan merkittävä useissa sovelluskohteissa. Merkittävyys korostuu erityisesti haastavissa olosuhteissa. EDS on todennäköisesti tärkeä erityisesti kehittyvässä avaruusteknologiassa ja aurinkovoiman hyödyntämisessä. Joidenkin sovelluskohteiden osalla pitää suorittaa vielä jatkotutkimusta, jotta EDS:n hyötyjä voidaan hyödyntää.

Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tutkielmassa on käytetty ChatGPT-tekoälyä tiedonhaun apuvälineenä.

Lähteet

- [1] Y. Yu, J. Cilliers, K. Hadler, S. Starr, ja Y. Wang, ”A review of particle transport and separation by electrostatic traveling wave methods”, *J. Electrostat.*, vol. 119, s. 103735, syys 2022, doi: 10.1016/j.elstat.2022.103735.
- [2] A. R. Bernard, R. Eriksen, M. N. Horenstein, ja M. K. Mazumder, ”Dust settles, we don’t: The electrodynamic screen—A self-cleaning technology for concentrated solar power mirrors and photovoltaic panels”, *MRS Energy Sustain.*, vol. 5, nro 1, s. 11, touko 2018, doi: 10.1557/mre.2018.12.
- [3] M. Mazumder *ym.*, ”Characterization of Electrodynamic Screen Performance for Dust Removal from Solar Panels and Solar Hydrogen Generators”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, nro 4, s. 1793–1800, heinä 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2258391.
- [4] S. Masuda, M. Washizu, ja M. Iwadare, ”Separation of Small Particles Suspended in Liquid by Nonuniform Traveling Field”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-23, nro 3, s. 474–480, touko 1987, doi: 10.1109/TIA.1987.4504934.
- [5] A. Sayyah, M. N. Horenstein, M. K. Mazumder, ja G. Ahmadi, ”Electrostatic force distribution on an electrodynamic screen”, *J. Electrostat.*, vol. 81, s. 24–36, kesä 2016, doi: 10.1016/j.elstat.2016.02.004.
- [6] P. Jukantupa, ”Kuivajauheen siirtämisestä etenevän sähköstaattisen aallon avulla”, Turun yliopisto, 2009.
- [7] S. Masuda, M. Washizu, ja I. Kawabata, ”Movement of blood cells in liquid by nonuniform traveling field”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 24, nro 2, s. 217–222, huhti 1988, doi: 10.1109/28.2859.
- [8] C. E. Johnson, P. K. Srirama, R. Sharma, K. Pruessner, J. Zhang, ja M. K. Mazumder, ”Effect of particle size distribution on the performance of electrodynamic screens”, teoksessa *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, Hong Kong, China: IEEE, 2005, s. 341–345. doi: 10.1109/IAS.2005.1518330.
- [9] H. Kawamoto, ”Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field”, *J. Electrostat.*, vol. 66, nro 3–4, s. 220–228, maaliskuu 2008, doi: 10.1016/j.elstat.2008.01.002.
- [10] M. Mazumder *ym.*, ”Development of Self-Cleaning Solar Collectors for Minimizing Energy Yield Loss Caused by Dust Deposition”, esitetty tilaisuudessa PROCEEDINGS OF THE ASME 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SUSTAINABILITY, 2013, 2014.
- [11] M. Murtomaa, ”Sähköstatiikan luentomoniste”, teoksessa *Sähköstatiikan luentomoniste*, Turun Yliopisto, 2020.
- [12] M. Adachi, H. Moroka, H. Kawamoto, S. Wakabayashi, ja T. Hoshino, ”Particle-size sorting system of lunar regolith using electrostatic traveling wave”, *J. Electrostat.*, vol. 89, s. 69–76, loka 2017, doi: 10.1016/j.elstat.2017.08.002.
- [13] M. Aoyama, T. Oda, ja M. Ogihara, ”Electrodynamical control of bubbles in dielectric liquid using a non-uniform travelling field”, *J. Electrostat.*, s. 247–258, 1993.
- [14] H. Kawamoto ja S. Hayashi, ”Fundamental investigation on electrostatic travelling-wave transport of a liquid drop”, *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 39, nro 2, s. 418–423, tammi 2006, doi: 10.1088/0022-3727/39/2/026.
- [15] H. Kawamoto, K. Hata, ja T. Shibata, ”Vertical Transport of Lunar Regolith and Ice Particles Using Electrodynamic Traveling Wave”, *ASCE*, 03 2021.