

Elektrostaattinen atomisointi

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Teemu Koponen
Tarkastaja:
FT Matti Murtomaa

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

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Koponen, Teemu Elektrostaattinen atomisointi

LuK-tutkielma, 17 s., 0 liites.

Fysiikka

Helmikuu 2025

Nano- ja mikroteknologian yleistyminen ja uudet sovellukset vaativat tuekseen menetelmiä, joilla voidaan tuottaa hyvin pieniä ja keskenään samankaltaisia hiukkasia. Elektrostaattisella atomisoinnilla on useita merkittäviä hyötyjä perinteiseen atomisointiin verrattuna ja sille on kehitetty lukuisia sovelluksia eri teollisuuden ja tutkimuksen osa-alueilla.

Elektrostaattinen atomisointi on monipuolinen menetelmä, jossa tuotetaan pieniä nestepisaroita tai kiinteitä hiukkasia voimakkaiden sähkökenttien avulla. Syntyvillä pisaroilla tai hiukkasilla on kapea kokojakauma ja niillä on suuri varaus, jonka ansiosta niitä voidaan hallita sähkökentillä.

Menetelmää on tutkittu paljon ja sille on kehitetty paljon erilaisia sovelluksia. Näistä syistä tutkielmassa pystytään esittämään vain pintaraapaisu menetelmän fyysisestä taustasta, sen eri toimintatavoista ja sovelluksista. Tutkielmassa esitetään myös menetelmään liittyvää matemaattista taustaa, vaikka sen matemaattinen käsittely on osoittanut vaikeaksi.

Asiasanat: elektrostaattinen atomisointi, EHDA, pisarointi, kartio-suihku

Sisällys

| | |
|---|-----------|
| Johdanto | 1 |
| 1 Elektrostaattinen atomisointi ilmiönä | 2 |
| 1.1 Toimintaperiaate | 2 |
| 1.2 Erilaiset suihkutustavat | 3 |
| 1.2.1 Pisarointi (engl. dripping) | 4 |
| 1.2.2 Mikropisarointi (engl. microdripping) | 4 |
| 1.2.3 Kartio-suihku (engl. cone-jet) | 5 |
| 1.2.4 Monisuihku-moodi (engl. multi-jet) | 5 |
| 1.3 Vertailu perinteiseen atomisointiin | 6 |
| 1.4 Haasteet | 7 |
| 2 Matemaattinen tarkastelu | 7 |
| 2.1 Käytetyn nesteen ominaisuuksien ja käytetyn laitteiston parametrien vaikutus atomisointiin | 9 |
| 3 Sovellukset | 11 |
| 4 Yhteenveto | 14 |

Johdanto

Elektrostaattinen atomisointi on menetelmä, jolla saadaan tuotettua hyvin pieniä nestepisaroita, jotka voivat olla halkaisijaltaan vain nanometrejä [1]. Nestettä johdetaan ohutta putkea pitkin johtavalle kapillaarille, missä on voimakas sähkökenttä. Kapillaarin päässä oleva neste muodostaa sähkökentän vaikutuksesta pisaroita tai ohuen suihkun, joka hajoaa pisaroiksi [2]. Tuotettujen pisaroiden kokoa, nopeutta ja varausta voidaan säädellä käytetyn nesteen, sen fysikaalisten ominaisuuksien ja käytetyn laitteen ominaisuuksien avulla [3]. Elektrostaattisen atomisoinnin avulla tuotetuilla pisaroilla on muutamia etuja perinteisiin atomisointimenetelmiin verrattuna, kuten kapea kokojakauma ja suuri varaus, minkä takia pisaroita voidaan hallita sähkökenttien avulla [4]. Näiden ominaisuuksien ansiosta menetelmälle on kehitetty monia sovelluksia mm. lääketieteellisyydessä [5, 6] ja nanoteknologian saralla [2, 7].

Tämän tutkielman tarkoituksena on perehdyttää lukija elektrostaattiseen atomisointiin ilmiönä ja sen sovelluksiin. Aluksi esitellään, mistä menetelmässä on kyse ja sen toimintaperiaate. Tämän jälkeen seuraa matemaattinen tarkastelu. Lopuksi esitellään kehitettyjä sovelluksia, joita on kehitetty niin suuri määrä, ettei kaikkia voida tässä työssä esitellä.

Tätä opinnäytettä kirjoitessa ei ole hyödynnetty tekoälyä millään tavalla.

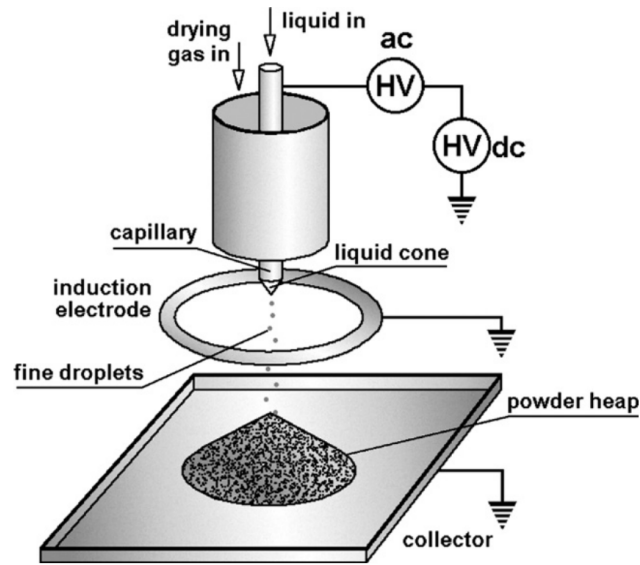
1 Elektrostaattinen atomisointi ilmiönä

1.1 Toimintaperiaate

Elektrostaattista atomisointia kutsutaan myös nimityksillä elektrohydrodynaaminen atomisointi (EHDA, engl. electrohydrodynamic atomization) [3], elektrohydrodynaaminen suihkutus (EHD, engl. electrohydrodynamic spraying) [1] tai elektrosuihkutus (engl. electrospraying) [8]. Ensimmäisenä ilmiötä tutki englantilainen fyysikko lordi Rayleigh 1800-luvulla. Hän tutki varattujen nestepisaroiden epävakautta ja havaitsi niiden hajoavan pienemmiksi pisaroiksi sähköisten voimien vaikutuksesta. Nestepisaran pintavaraustiheyden maksimiarvoa kuvaava Rayleighin raja (engl. Rayleigh limit) on nimetty lordi Rayleighin mukaan. [9, 10]

EHDA:ssa nestettä johdetaan pumpun avulla ohutta putkea pitkin johtavalle kapillaarille, jota pidetään korkeassa potentiaalissa. Kapillaarin on oltava terävä ja riittävän pieni halkaisijaltaan, jotta nestepisara voi muodostua sen päähän. [3] EHDA:ssa muodostuvat pisarat varautuvat atomisoinnin aikana mekaanisten voimien ja sähkökentän vaikutuksesta. Varausta kertyy nesteen pinnalle sähkökentän vaikutuksesta ja tämä varaus jää irtoavaan pisaraan. [4] Muodostuneet pisarat kerätään maadoitetulle kollektorille, joka voi olla esimerkiksi messinkiä [1] tai alumiinia [7]. Maadoitetun kollektorin ja korkeassa potentiaalissa olevan kapillaarin välille muodostuu voimakas sähkökenttä. Sähkökenttä voidaan muodostaa myös kapillaarin ja maadoitetun pyöreän elektrodin välille [11]. Suurnopeuskameraa voidaan käyttää, jos halutaan tarkkoja kuvia muodostuneista pisaroista [3, 8]. Kuvassa 1 on esitetty esimerkki EHDA:an käytetystä laitteistosta.

Kapillaarin materiaali on yleensä terästä, mutta myös lasia voidaan käyttää. Käytetyn kapillaarin muoto voi vaihdella käytetyn nesteen tai suihkutustavan mukaan. Kapillaarissa voidaan käyttää esimerkiksi eristekuitua vakauttamaan muodostuvaa suihkua. Kapillaareja voi myös olla kaksi tai kolme vierekkäin tai kaksi sisäkkäin.



Kuva 1: Esimerkki elektrostaattiseen atomisointiin käytetystä laitteesta [4]

Sisäkkäisiä kapillaareja eli koaksiaalikapillaareja voidaan käyttää esimerkiksi mikrokapselien valmistuksessa. [12]

1.2 Erilaiset suihkutustavat

EHDA:lla voidaan tuottaa pisaroita monella eri tavalla. Jaworek ja Krupa [1] jakavat suihkutustavat kahteen eri ryhmään. Ensimmäiseen ryhmään kuuluvat ne tavat, joissa kapillaarin päähän muodostuneesta nestemeniskistä irtoaa nestepisaroita. Toiseen ryhmään kuuluvat ne suihkutustavat, joissa nestemeniski muuttaa muotoaan suihkumaiseksi ja nestepisarot eivät irtoa meniskistä välittömästi kapillaarin läheisyydessä. Erilaisten suihkutustapojen karakterisointiin käytettiin kriteereinä nesteen geometristä muotoa kapillaarilla ja suihkun käyttäytymistä sen hajotessa pisaroiksi.

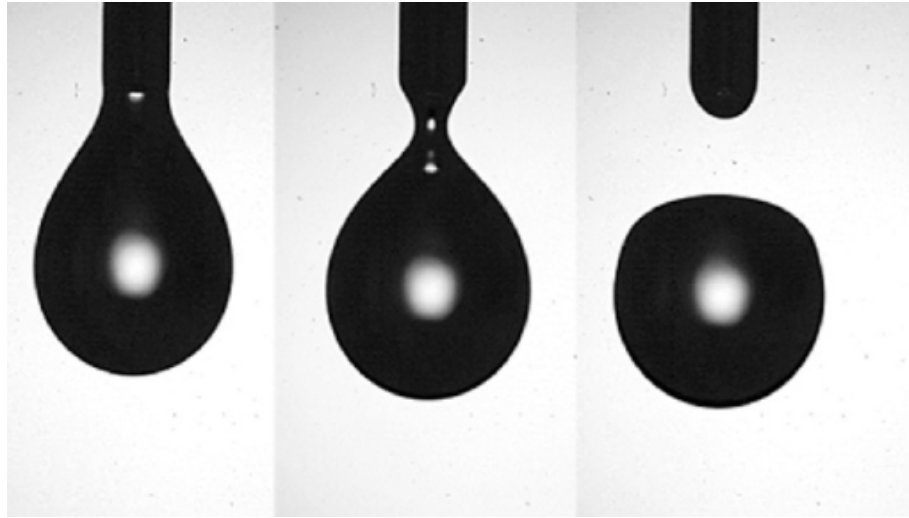
[1]

1.2.1 Pisarointi (engl. dripping)

Pisarointi-moodi muistuttaa paljon ilman sähköisiä voimia tapahtuvaa atomisointia. Neste muodostaa kapillaarille puolipallon muotoisen meniskin, joka kasvaa nesteen virtauksen vaikutuksesta pallomaiseksi pisaraksi, jonka halkaisija on suurempi kuin kapillaarin. [8] Pisara irtoaa kapillaarilta painovoiman ja sähköisten voimien voittaessa nestettä koossa pitävät pintajännitysvoimat. Muodostuvat pisarat ovat muoltaan pallomaisia. Pisaran irtoamisen jälkeen meniski palaa alkuperäiseen muotoonsa. Kun sähkökentän voimakkuutta kasvatetaan, meniski venyy ja muodostuvien pallomaisten pisaroiden koko pienenee. [1] Varsinaisen pisaran lisäksi saattaa muodostua satelliittipisara. Tässä moodissa pisaroiden kokoon vaikuttaa enimmäkseen sähkökentän voimakkuus. [8] Kuvassa 2 on esitetty pisaran muodostuminen pisaroinnissa.

1.2.2 Mikropisarointi (engl. microdripping)

Kun sähkökenttää edelleen kasvatetaan, muodostuvan pisaran halkaisija pienenee ja lähestyy kapillaarin halkaisijaa, jolloin puhutaan mikropisaroinnista. [8] Meniski on muoltaan puolipallomainen tai ellipsoidinen. Muodostuvien pisaroiden koko pienenee huomattavasti ja niiden halkaisija on muutamista mikrometreistä noin saatan mikrometriin. Meniski ei palaa alkuperäiseen muotoonsa pisaran irtoamisen jälkeen. [1] Sähkökenttää kasvatettaessa voidaan havaita meniskin heiluminen puolelta toiselle, jolloin muodostuvat pisarat irtoavat meniskistä eri suuntiin. Wangin ym. mukaan heiluminen johtuu positiivisten ionien ja kaasumolekyylien välisistä törmäyksistä. Mikropisarointi-moodissa pisaroiden koko kasvaa nesteen virtausnopeuden kasvaessa. Sähkökentän voimakkuudella ei ole suurta vaikutusta pisaroiden kokoon. [8]



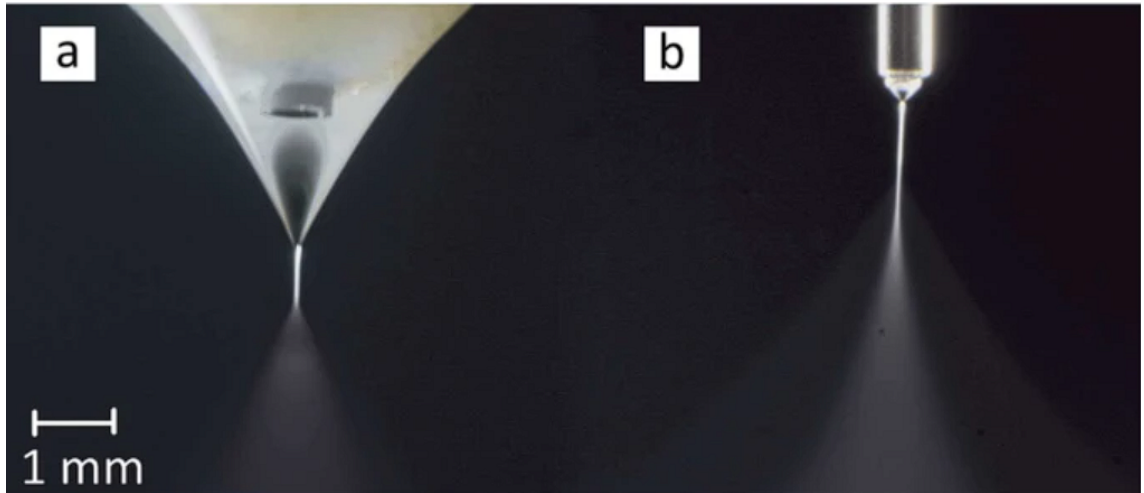
Kuva 2: Pisarointi-moodi [3]

1.2.3 Kartio-suihku (engl. cone-jet)

Kartio-suihku -moodissa neste muodostaa kapillaarin päähän muodoltaan säännöllisen kartion, jonka kärjestä lähtee kapea suihku kapillaarin akselin suuntaisesti. Tätä kartiota kutsutaan Taylorin kartioksi (engl. Taylor cone). Suihku pysyy vaakana muutaman millimetrin matkan, jonka jälkeen se hajoaa hyvin symmetrisiksi pisaroiksi, joiden koko- ja varausjakauma on kapea. Suihku hajoaa aaltomaisten tai vääntävien epävakauksien vuoksi. Näiden epävakauksien vuoksi muodostuvat pisarat liikkuvat hieman eri suuntiin ja muodostavat sumunkaltaisen rakenteen. [1] Pisaroitten varaus on yleensä suuri [3]. Suurilla sähkökentillä tässä moodissa muodostuva suihku voi olla epävaka. Tällöin nesteen muodostaman kartion muoto voi muuttua ja suihkusta voi tulla esimerkiksi oskilloiva tai pulsoiva tai suihku voi haarautua. [3, 8] Kuvassa 3 on esitetty kartio-suihku -moodi kahdella eri sähkökentän arvolla.

1.2.4 Monisuihku-moodi (engl. multi-jet)

Kun nesteen virtausnopeutta ja sähkökenttää kasvatetaan, Taylorin kartio vääntyy muodostaen yksittäisen suihkun kartion reunalle. Tämän jälkeen muodostuu uusia

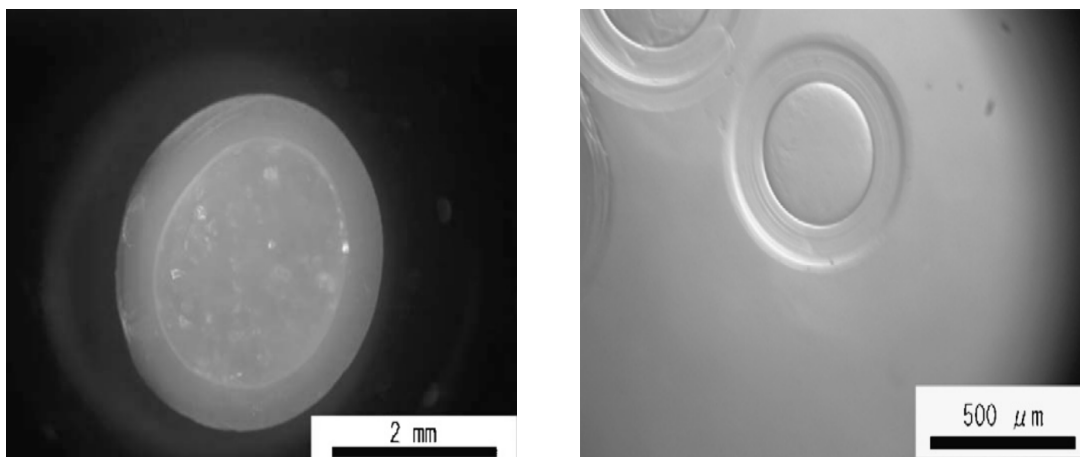


Kuva 3: Kartio-suihku -moodi, kuvassa (a) suurempi sähkökenttä ja virtausnopeus kuin kuvassa (b) [13]

suihkuja symmetrisesti kartion reunalle. Nestemeniski muuttuu miltei litteäksi, pois lukien suihkujen kohdalta, joihin muodostuu hyvin pieni kartio. Yleensä muodostuu 2-8 suihkua, jotka hajoavat pieniksi pisaroiksi vääntöepävakauksien takia. Suihkujen määrä kasvaa sähkökentän ja virtausnopeuden kasvaessa. [1]

1.3 Vertailu perinteiseen atomisointiin

Perinteisesti atomisointi on suoritettu mekaanisesti. Atomisointiin on voitu käyttää paineilmaa tai pyörimisliikettä hyödyntäviä laitteita. [1] Myös esimerkiksi ultraääntä on voitu hyödyntää atomisoinnissa. Mekaanisen atomisoinnin haittapuolina on kuitenkin pidetty mm. melko suuria pisaroiden kokoja, suuria vaihteluja pisaroiden kokojakaumassa, matalaa varausta [14] ja yhteen kerääntymistä [7]. EHDA:n etuja ovat pienemmät pisaroiden koot ja pisaroiden homogeenisuus varauksen ja koon suhteen. EHDA:lla tuotettuja pisaroita on myös helpompi ohjailta sähkökenttien avulla niiden korkean varauksen vuoksi. Varauksen ansiosta hiukkaset hylkivät toisiaan eivätkä keräydy yhteen niin helposti. [4, 15] Kuvassa 4 on esitetty perinteisellä atomisoinnilla ja EHDA:lla tuotettujen mikrokapselien kokoeroja.



(a) Tavallinen atomisointi

(b) Elektrostaattinen atomisointi

Kuva 4: Tavallisen atomisoinnin ja EHDA:n vertailu mikrokapselien valmistuksessa [11]

1.4 Haasteet

EHDA:a on tutkittu paljon sen hyötyjen vuoksi [15]. Eniten on tutkittu kartio-suihku -moodia. Sillä on kuitenkin omat rajoitteensa ja esimerkiksi hyvin viskoosit ja johtavat nesteet eivät muodosta Taylorin kartiota ollenkaan. Käytetyn nesteen ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi EHDA:an ja käytettävissä oleviin suihkustapoihin. [16] Käytetyn nesteen ominaisuuksien ja laitteiston parametrien vaikutuksia atomisointiin on esitetty myöhemmin kappaleessa 2.1.

2 Matemaattinen tarkastelu

EHDA:n matemaattinen mallintaminen ja käsittely on osoittautunut hankalaksi [4]. Pisanan muodostumista määrittävät yhtälöt ovat massan ja liikemäärän säilymlait, joissa tulee ottaa huomioon sekä mekaaniset että sähköiset voimat. Niistä saadaan johdettua joukko yhtälöitä, jotka määräävät suihkun käyttäytymisen. Tämän yhtälöjoukon ratkaiseminen on kuitenkin usein mahdotonta, koska systeemin reunaehtojen määrääminen on vaikeaa. [1]

Usein on kiinnostuttu syntyvien pisaroiden halkaisijasta tai säteestä. Kokeellisesti ja teoreettisesti määritettyjen mallien välillä on paljon vaihtelua ja usein pisaroiden halkaisijan on todettu riippuvan jostakin kokeellisesti määritetystä vakiosta. Yhteistä monelle määritetylle yhtälölle pisaran halkaisijalle on, että halkaisija on verrannollinen nesteen virtausnopeuteen ja kääntäen verrannollinen nesteen johtavuuteen. [4] Esimerkiksi Gañán-Calvo [17] määrittä pisaran halkaisijaksi teoreettisesti

$$d = \alpha \left(\frac{Q^3 \varepsilon_0 \rho_1}{\pi^4 \sigma_1 \gamma_1} \right)^{1/6}, \quad (1)$$

missä d on halkaisija, Q on nesteen virtausnopeus, ε_0 on tyhjiön permittiivisyys, ρ_1 on nesteen tiheys, σ_1 on nesteen johtavuus, γ_1 on pintajännitys ja $\alpha = 2,9$ on vakio.

Speranza ja Ghadiri [16] tutkivat korkean viskositeetin ja johtavuuden omaavien nesteiden elektrostaattista atomisointia ja määrittivät pisaran säteen voimatasapainoyhtälön avulla. Yhtälössä huomioitiin sähköiset ja mekaaniset voimat sekä pintajännitys pisaran irtoamishetkellä, jolloin yhtälö oli muotoa

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g - 2r\pi\gamma f + \frac{1}{2}S\varepsilon_0 E_0 = 0, \quad (2)$$

missä ensimmäinen termi vastaa painovoimaa, toinen termi pintajännitystä ja kolmas sähköisiä voimia. Yhtälössä r on pisaran säde, ρ nesteen tiheys, g putoamiskiihtyvyys, γ nesteen pintajännitys, f Hawkinsin kerroin, S pisaran pinta-ala, ε_0 tyhjiön permittiivisyys ja E_0 sähkökenttä. Kokeelliset tulokset olivat mallin kanssa hyvässä sopusoinnussa lukuunottamatta hyvin suurilla sähkökentillä tehtyjä mittauksia. [16]

Myös pisaroiden ratoja on pyritty määrittämään. Ondimu ym. [18] mallinsivat teoreettisesti pisaroiden ratoja kahdessa ulottuvuudessa ja vertailivat niitä kokeellisiin tuloksiin. Mallinnus tehtiin voimatasapainoyhtälön avulla, joka oli muotoa:

$$\mathbf{F}_{Ri} = q_i \mathbf{E} + q_i \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{q_j \mathbf{r}_{ij}}{4\pi\varepsilon_0 r_{ij}^3} + C_D \frac{\pi}{8} \rho_{air} d_i^2 (\mathbf{v}_{air} - \mathbf{v}_i) |\mathbf{v}_{air} - \mathbf{v}_i| + \frac{\pi}{6} \rho_i d_i^3 \mathbf{g}, \quad (3)$$

missä \mathbf{F}_{Ri} on pisaraan i vaikuttava kokonaisvoima, q varaus, \mathbf{E} sähkökenttä, \mathbf{r}_{ij} pisaroiden välinen vektori, ε_0 tyhjiön permittiivisyys, r_{ij} pisaroiden etäisyys, C_D

ilmanvastuskerroin, ρ_{air} ilman tiheys, ρ_i pisaran tiheys, d_i pisaran halkaisija, \mathbf{v}_{air} ilman nopeus, \mathbf{v}_i pisaran nopeus ja g putoamiskiihtyvyys. Alaindeksit i ja j kuvaavat erillisiä pisaroita. Mallinnus tehtiin COMSOL Multiphysics -ohjelmistolla ja mallinnuksen tulosten havaittiin täsmäävän hyvin kokeellisiin tuloksiin. [18]

EHDA:lla tuotettujen pisaroiden varauksella on yläraja, jota kutsutaan Rayleighin rajaksi. Jos pisaran varaus ylittää Rayleighin rajan, se hajoaa sähköisten voimien vaikutuksesta. Rayleighin raja saadaan kaavasta

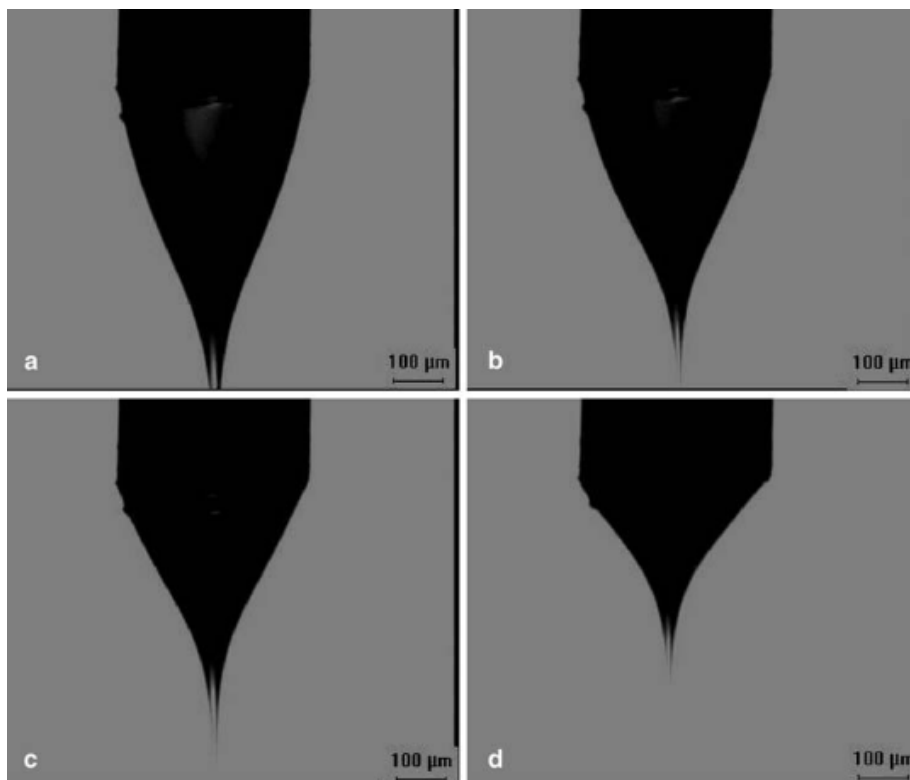
$$Q_R = \pi (8\varepsilon_0\gamma d^3)^{1/2}, \quad (4)$$

missä Q_R on Rayleighin raja, ε_0 tyhjiön permittiivisyys, γ nesteen pintajännitys ja d pisaran halkaisija. [18]

2.1 Käytetyn nesteen ominaisuuksien ja käytetyn laitteiston parametrien vaikutus atomisointiin

EHDA:ssa nesteen muodostaman suihkun käyttäytyminen riippuu tietyistä käytetyn nesteen fysikaalisista ominaisuuksista ja laitteiston säädettävistä parametreista. Keskeisimpiä laitteiston parametreja ovat nesteen virtausnopeus ja sähkökentän voimakkuus. Käytetyn nesteen fysikaalisista ominaisuuksista merkittävimmät ovat viskositeetti, pintajännitys, johtavuus, tiheys ja dielektrinen vakio. [3]

EHDA:ssa käytetyn sähkökentän voimakkuus on yleensä suuruusluokkaa kV/cm [7, 18]. Pienillä sähkökentillä EHDA ei eroa suuresti perinteisestä atomisoinnista. Kun sähkökentän voimakkuus kasvaa, muodostuvien pisaroiden koko pienenee. [1] Kun sähkökentän voimakkuus ylittää tietyn kriittisen arvon, muodostuvien pisaroiden koko putoaa voimakkaasti, minkä jälkeen sähkökentän voimakkuuden vaikutus pisaroiden kokoon vähenee. [15] Pisaroiden muodostumisnopeus myös kasvaa sähkökentän voimakkuuden kasvaessa, jos nesteen virtausnopeus pidetään vakiona [3]. Kartio-suihku -moodissa sähkökentän voimakkuuden kasvattaminen pienentää Taylorin kartion kokoa, kuten kuvassa 5 esitetään [19].



Kuva 5: Sähkökentän voimakkuuden vaikutus Taylorin kartion muotoon, sähkökentän voimakkuus kasvaa a -> d [19]

Pisaroiden koko kasvaa nesteen virtausnopeutta kasvatettaessa [1, 15]. Virtausnopeus vaikuttaa myös muodostuvan suihkun muotoon ja pituuteen [3]. Virtausnopeuden kasvattamisen on havaittu laskevan keskimääräistä varausta nestemassayksikköä kohden [9]. Käytetyt virtausnopeudet ovat usein pieniä, esimerkiksi Watanaben ym. [15] tutkimuksessa virtausnopeudet vaihtelivat 0,8-13,8 ml/h välillä ja Ibilin ym. [7] tutkimuksessa 2-20 ml/min välillä. Suurilla sähkökentän voimakkuuden ja virtausnopeuden arvoilla muodostuvat suihkut ovat usein epävakaita ja muodoiltaan hyvin erilaisia [3].

Nesteen fysikaalisista ominaisuuksista johtavuus vaikuttaa pisaroiden kokoon pienentävästi [7]. Tämä voidaan nähdä myös yhtälöstä (1), missä pisaran halkaisija on kääntäen verrannollinen johtavuuteen. Suurempi johtavuus nostaa keskimääräisen varauksen määrää nestemassayksikköä kohden [9]. Jaworekin [4] mukaan EH-

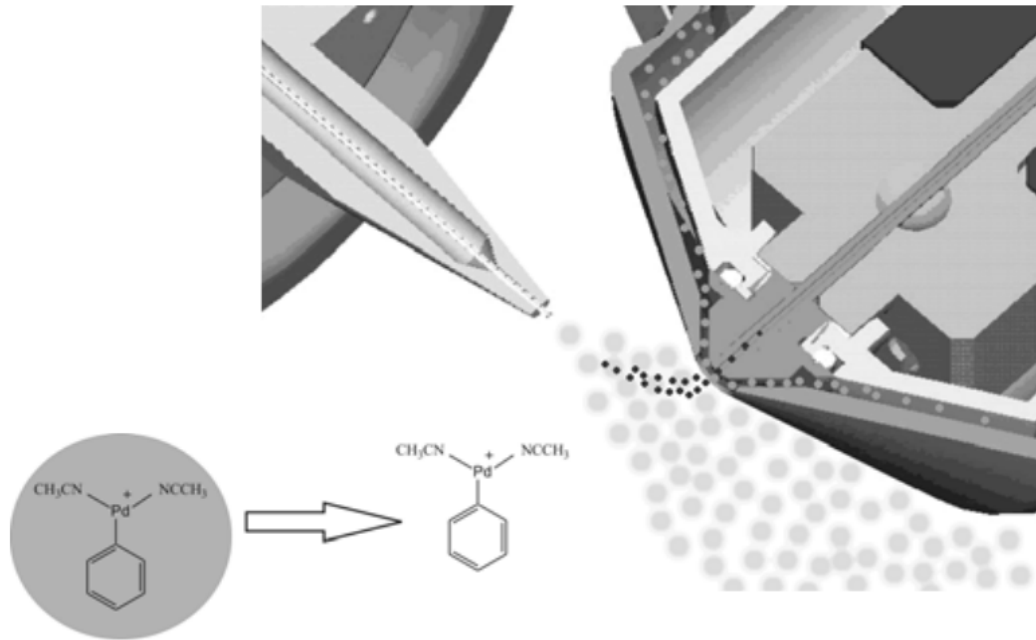
DA:an käytettävien nesteiden johtavuus vaihtelee noin 10^{-4} - 10^{-8} S/m välillä. Toisaalta esimerkiksi Watanabe ym. [15] eivät havainneet johtavuudella olevan vaikutusta pisaroiden halkaisijaan tutkiessaan suuren viskositeetin nesteitä.

Matalan viskositeetin omaavat nesteet sopivat EHDA:an paremmin kuin korkean viskositeetin nesteet. Viskositeetti vaikuttaa suihkun hajoamiseen pisaroiksi. [7] Kartio-suihku -moodissa suurempi viskositeetti pienentää muodostuvan suihkun halkaisijaa ja lisää kartion korkeutta. Suurilla viskositeetin arvoilla myös pisaroiden kokojakauma on suurempi. [20]

Pintäjännitys vastustaa osaltaan nesteen pinnan muodon muuttumista, mikä vuoksi atomisoinnissa on eduksi, että käytetyn nesteen pintäjännitys on mahdollisimman pieni [21]. EHDA:ssa pintäjännitys vastustaa pisaran muodostumista sähköisiä voimia ja painovoimaa vastaan [1]. Käytettävän nesteen pintäjännityksen maksimiarvona on pidetty 50 mN/m [7].

3 Sovellukset

EHDA:lla on useita sovelluksia eri teollisuuden osa-aloilla sen hyödyllisten ominaisuuksien ansiosta [22]. Eräs merkittävä EHDA:ta hyödyntävä menetelmä on massaspektrometria [23–25]. Massaspektrometri on laite, jolla voidaan määrittää tutkittavan aineen ionien massavaraussuhteita, molekyylipainoja ja eri ionien suhteellisia määriä. EHDA:ta hyödynnetään massaspektrometrissa tutkittavan analyytin ionisoinnissa. Ionisoinnin onnistumisella ja siten haluttujen ionien valmistamisella on merkittävä rooli tulosten analysoinnin kannalta. [24] Kuvassa 6 on esitelty EHDA:n hyödyntäminen massaspektrometriassa. Tutkittavaa analyyttiä sisältävä liuos atomisoidaan EHDA:lla, jonka jälkeen syntyneet varautuneet pisarat haihtuvat jättäen jälkeensä kaasumaisessa olomuodossa olevan analyytin, joka ohjataan massaspektrometriin analysoitavaksi. [23] Elektrostaattista atomisointia hyödyntävään massaspektrometriin viitataan usein lyhenteellä ESI-MS (engl. electrospray ioniza-



Kuva 6: EHTA:n hyödyntäminen massaspektrometriassa [23]

tion mass spectrometry). Sen ansiosta massaspektrometriassa on pystytty määrittämään aiempaa suurempien molekyylien ominaisuuksia ja tutkimaan paremmin yksittäisiä molekyyliä. ESI-MS:n etuja ovat myös pieni analyytin kulutus, yhteisemmät vastetekijät ja suurempi toleranssi suoloille ja puskuriaineille. ESI-MS:a käytetään erityisesti biomolekyylien analysoinnissa. [25]

EHTA:ta on hyödynnetty paljon erilaisten mikrokapselien valmistuksessa. Mikrokapselleilla tarkoitetaan ytimestä ja kuoresta muodostunutta rakennetta, jossa kuori koostuu funktionaalisista materiaaleista ja esimerkiksi lääkkeiden tapauksessa varsinainen lääkeaine on kapselin ytimestä. Mikrokapselointi suoritetaan yleensä koaservoimalla eli muodostamalla pieniä molekyylikasaumia veteen, emulsoimalla tai erilaisilla suihkutustekniikoilla. Näiden menetelmien haittapuolina on muodostuvien mikrokapselien ominaisuuksien vaihtelevuus. Elektrostaattisen atomisoinnin avulla voidaan valmistaa mikrokapselleita, joissa variaatiot kokojakaumassa, kuoren muodossa ja kuoren paksuudessa ovat pieniä. [11] Näillä ominaisuuksilla on suuri mer-

kitys esimerkiksi lääketieteellisyydessä, kun halutaan kontrolloida lääkeaineiden pitoisuuksia ja vaikutusaikoja. Esimerkiksi Shams ym. [6] valmistivat tutkimuksessaan EHDA:n avulla mikrokapseloimalla yhdistelmä-lääkekepeleitä, jotka sisälsivät parasetamolia ja indometasiinia. Parasetamoli on hyvin vesiliukoinen kipulääke ja indometasiini puolestaan huonosti veteen liukeneva tulehduskipulääke. Kapseloinnilla saatiin nopeutettua indometasiinin vapautumista ja puolestaan hidastettua parasetamolien vapautumista. [6]

EHDA:lla voidaan tuottaa hienojakoisia pulvereita käyttämällä nesteenä suspensiota, johon on liuotettu haluttuja kiinteitä hiukkasia. EHDA:n etuna pulvereiden tuottamisessa on tuotettujen hiukkasten pieni koko, kapea kokojakauma ja samanmuotoisuus. Näihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa pisarointiparametreja muuttamalla. Kiinteitä hiukkasia saadaan tuotettua kuivattamalla syntyneet nestepisarot, joihin on liennut haluttuja hiukkasia. [26] EHDA:lla voidaan tuottaa esimerkiksi erilaisia metalli- tai metalliyhdistehiukkasia [26, 27], keraamisia hiukkasia [28] tai biomateriaalihiukkasia [29]. Tuotetut hiukkaset voivat olla pienimmillään halkaisijaltaan jopa vain 2-5 nm [26]. Tuotettuja hiukkasia voidaan käyttää esimerkiksi litiumioniakuissa [26, 27], kiinteäoksidipolttookennoissa [28] tai kosmetiikassa [29].

Tuotettuja hiukkasia voidaan hyödyntää esimerkiksi erilaisissa tulostimissa. Hyödyntämällä EHDA:ta ja tietokoneohjattua kollektoria, voidaan tulostaa tarkasti määriteltäviä rakenteita. Esimerkiksi Jayasinghe ym. [19] kirjoittivat tällä tavalla sanan "CERAMIC" asetaattilevylle hyödyntäen alumiinioksidisuspensiota. Kuvassa 7 on esitetty esimerkki tutkimuksessa kirjoitetusta tulosteesta.



Kuva 7: Esimerkki tulostamisesta [19]

4 Yhteenveto

Elektrostaattinen atomisointi on laajalti tutkittu menetelmä hyvin pienten pisaroiden ja hiukkasten tuottamiseen. Sen etuina perinteiseen atomisointiin verrattuna ovat mm. tuotettujen pisaroiden kapea koko- ja varausjakauma, pienemmät pisara- ja hiukkaskoot, suuri varaus ja pisaroiden hallittavuus sähkökentillä. Käytetyn laitteen parametreilla ja valitsemalla käytettävä neste käyttötarkoituksen ja sen fysikaalisten ominaisuuksien mukaan voidaan säädellä tuotettujen hiukkasten kokoa ja varausta.

Laitteisto koostuu ohuesta putkesta, jolla johdetaan nestettä terävälle kapillaarille. Kapillaari pidetään korkeassa potentiaalissa ja voimakas sähkökenttä syntyy kapillaarin ja maadoitetun kollektorin välille. Neste muodostaa kapillaarin päähän pisaran tai suihkun, joka hajoaa pisaroiksi. Pisan irtoaminen kapillaarilta tai suihkun hajoaminen pisaroiksi tapahtuu sähköisten ja mekaanisten voimien voittaessa nesteen pintajännitysvoimat. Pisaroihin muodostuu suuri varaus sähkökentän vaikutuksesta.

Elektrostaattista atomisointia voidaan toteuttaa usealla eri suihkutustavalla käytetyistä parametreista riippuen. Suihkutustavoista tutkituin on kartio-suihku -moodi. Sille on myös kehitetty eniten sovelluksia. Käytettävä moodi riippuu useista laitteis-

ton ja nesteen ominaisuuksista, joista tärkeimpiä ovat sähkökentän voimakkuus, nesteen virtausnopeus, viskositeetti, johtavuus ja pintajännitys.

EHDA:n matemaattinen käsittely on osoittautunut hankalaksi, koska systeemin reunaehtojen määrääminen on vaikeaa. Useimmiten on kiinnostettu syntyvien pisaroiden halkaisijasta, mille on johdettu useita kokeellisia ja teoreettisia malleja, joiden välillä voi olla suuriakin eroavaisuuksia. Mallien välillä on joitain yhtäläisyyksiä, joten halkaisijan verrannollisuus nesteen virtausnopeuteen.

EHDA:lla on sen hyödyllisten ominaisuuksien takia useita sovelluksia eri teollisuuden osa-alueilla ja tutkimuksessa. EHDA:ta hyödynnetään massaspektrometriassa sen parempien atomisointiominaisuuksien vuoksi. Lääketeollisuuden saralla sen sovelluksia ovat mm. erilaiset mikrokapselointiin ja yhdistelmä lääkkeiden valmistamiseen liittyvät tekniikat. EHDA:n avulla voidaan valmistaa pienistä hiukkasista hienojakoisia pulvereita esimerkiksi elektroniikan sovelluksiin.

Viitteet

- [1] A. Jaworek ja A. Krupa, *Journal of Aerosol Science* **30**, 873 (1999).
- [2] D. Fam ja A. Tok, *Journal of Colloid and Interface Science* **338**, 266 (2009).
- [3] Q. Kong, S. Yang, Q. Wang, Z. Wang, Q. Dong ja J. Wang, *CASE STUDIES IN THERMAL ENGINEERING* **29**, (2022).
- [4] A. Jaworek, *Powder Technology* **176**, 18 (2007).
- [5] L. Sun, J. Zhou, Y. Chen, D.-G. Yu ja P. Liu, *FRONTIERS IN BIOENGINEERING AND BIOTECHNOLOGY* **11**, (2023).
- [6] T. Shams, M. Parhizkar, U. E. Illangakoon, M. Orlu ja M. Edirisinghe, *MATERIALS & DESIGN* **136**, 204 (2017).
- [7] H. Ibili ja M. Dasdemir, *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* **54**, 14609 (2019).
- [8] Q. Wang, Z. Wang, Y. Jiang ja S. Yang, *Experimental and Computational Multiphase Flow* **3**, 38 (2021).
- [9] Y. Zhao ja J. Yao, *POWDER TECHNOLOGY* **314**, 589 (2017).
- [10] Y. Wu ja R. L. Clark, *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition* **19**, 573 (2008).
- [11] E. Sasaki, F. Kurayama, J.-i. Ida, T. Matsuyama ja H. Yamamoto, *Journal of Electrostatics* **66**, 312 (2008).
- [12] A. Jaworek, A. Sobczyk ja A. Krupa, *Journal of Aerosol Science* **125**, 57 (2018).
- [13] M. R. Morad, A. Rajabi, M. Razavi ja S. R. P. Sereshkeh, *Scientific Reports* **6**, 38509 (2016).
- [14] W. Xu, C. Li, Y. Zhang, H. M. Ali, S. Sharma, R. Li, M. Yang, T. Gao, M. Liu, X. Wang, Z. Said, X. Liu ja Z. Zhou, *INTERNATIONAL JOURNAL OF EXTREME MANUFACTURING* **4**, 042003 (2022).
- [15] H. Watanabe, T. Matsuyama ja H. Yamamoto, *Journal of Electrostatics* **57**, 183 (2003).
- [16] A. Speranza ja M. Ghadiri, *Powder Technology* **135-136**, 361 (2003).
- [17] A. M. Gañán-Calvo, *Journal of Aerosol Science* **30**, 863 (1999).
- [18] O. M. Ondimu, V. A. Ganesan, M. J. Gatari, J. C. M. Marijnissen ja L. L. F. Agostinho, *JOURNAL OF ELECTROSTATIC* **89**, 77 (2017).
- [19] S. N. Jayasinghe, M. J. Edirisinghe ja T. De Wilde, *Materials Research Innovations* **6**, 92 (2002).

- [20] S. Jayasinghe ja M. Edirisinghe, JOURNAL OF AEROSOL SCIENCE **33**, 1379 (2002).
- [21] D. Jia, C. Li, J. Liu, Y. Zhang, M. Yang, T. Gao, Z. Said ja S. Sharma, Friction **11**, 2107 (2023).
- [22] L. Xue, L. Mao, Q. Cai, X. Yang ja R. Jin, POLYMERS FOR ADVANCED TECHNOLOGIES **22**, 2009 (2011).
- [23] M. N. Eberlin, European Journal of Mass Spectrometry **13**, 19 (2007).
- [24] G. J. Van Berkel, European Journal of Mass Spectrometry **9**, 539 (2003).
- [25] A. C. Leney ja A. J. R. Heck, Journal of the American Society for Mass Spectrometry **28**, 5 (2017).
- [26] M. Valvo, U. Lafont, L. Simonin ja E. Kelder, Journal of Power Sources **174**, 428 (2007).
- [27] R. Li, R. Zhang, Z. Lou, T. Huang, K. Jiang, D. Chen ja G. Shen, Nanoscale **11**, 12116 (2019).
- [28] J. Im, I. Park ja D. Shin, Ceramics International **38**, 2051 (2012).
- [29] A. Gholami, H. Tavanai ja A. R. Moradi, Journal of Nanoparticle Research **13**, 2089 (2011).