

Elektroreologiset nesteet

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2025
Juho Hautala
Tarkastaja:
Dos. Matti Murto

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

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Hautala, Juho Elektroreologiset nesteet

LuK-tutkielma, 22 s.
Fysiikka
Helmikuu 2025

Elektroreologiset nesteet ovat älynesteitä, joiden viskositeetti muuttuu ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta. Tässä tutkielmassa tarkastellaan ER-nesteiden toimintaperiaatetta, ominaisuuksia ja niiden sovelluksia.

Tutkielmassa edetään ER-efektin fysikaalisen käytöksen kuvaamisesta materiaalivalintojen ja valmistusmenetelmien kautta käytännön sovelluksiin. Erityistä huomiota kiinnitetään eri partikkelimateriaaleihin, kuten oksideihin, polymeereihin sekä ydin-kuori-komposiittihiukkasiin. Eri ER-nesteiden sovelluksia käydään läpi esimerkiksi iskunvaimentimissa sekä robottikirurgiassa. Lopuksi vielä pohditaan ER-nesteiden käyttöön liittyviä haasteita.

Asiasanat: Sähkömagnetismi, Fluidit, Nesteet, Dielektrisyys, Älynesteet, Elektroreologiset nesteet, Sähkökenttä, Viskositeetti

Sisällys

Johdanto	1
1 Elektroreologiset nesteet	1
1.1 Määritelmä	1
1.2 Viskositeetti	2
1.3 ER-nesteiden toiminta ja ER-efekti	4
1.4 ER-nesteiden valmistus	8
2 Erilaiset ER-nesteet	9
3 ER-nesteissä käytetyt materiaalit	10
3.1 Materiaalien valinta	10
3.2 Alumiinisilikaatit	12
3.3 Polymeerit	12
3.4 Ydin-kuori-komposiittihiukkaset	14
4 ER-nesteiden sovellukset ja haasteet	16
5 Yhteenveto	19

Johdanto

Elektroreologiset nesteet ovat älynesteitä, joiden viskositeetti muuttuu siihen vaikuttavan sähkökentän funktiona. ER-efektin ensimmäinen maininta on Willis Winslow'n 1940-luvulla julkaisemassa patentissa, minkä ansiosta kyseistä efektiä kutsutaankin toisinaan Winslow-efektiksi. Patentin julkaisemisen jälkeen ER-nesteitä on tutkittu laajalti sekä teoreettisesti, että käytännön sovellusten näkökulmasta. [1]

ER-nesteiden materiaalien valinnalla on suuri merkitys ER-efektin tehokkuuteen ja tässä tutkielmassa paneudutaankin laajemmin siihen, minkälaiset materiaalit ovat osoittautuneet toimivimmiksi ER-efektin kannalta.

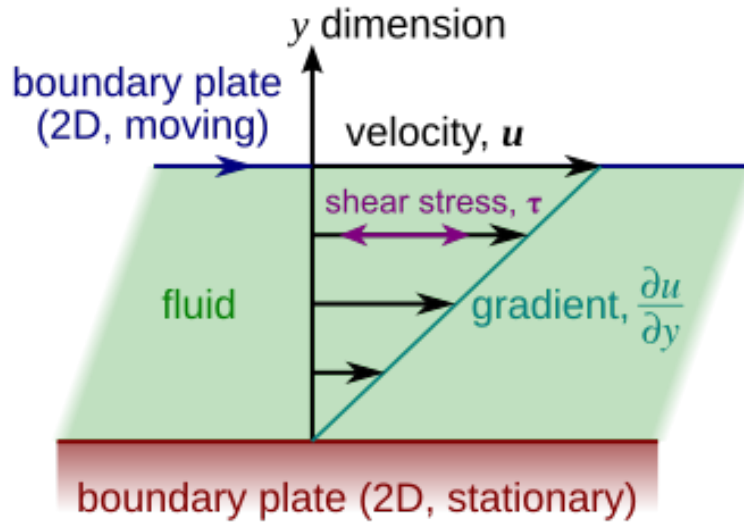
ER-nesteissä yhdistyy mielenkiintoisella tavalla virtausmekaniikka, sekä sähkömagnetismi, mistä syystä ER-nesteet ovatkin äärimmäisen mielenkiintoisia materiaaleja, niin niiden sovellusten kuin niiden fysikaalisen toiminnan kannalta. Tässä tutkielmassa paneudutaan tarkemmin ER-nesteiden fysikaaliseen toimintaan, soveluksiin sekä haasteisiin.

Tutkielmassa on hyödynnetty tekoälyä aineistojen läpikäyntiin sekä lauserakenteiden muokkaamiseen.

1 Elektroreologiset nesteet

1.1 Määritelmä

Elektroreologiset nesteet (ER-nesteet) ovat älynesteitä (engl. *smart fluids*) jotka pystyvät muuttamaan reversiibelisti viskositeettiaan niihin vaikuttavan sähkökentän funktiona. Viskositeetin muutos ER-nesteissä voi olla äärimmäisen nopea ja ER-nesteen siirtyminen nesteestä kiinteäksi voi tapahtua millisekunneissa [2]. Tätä ER-efektiä kutsutaan ajoittain myös Winslow-efektiksi ER-efektiä ensimmäisenä vuonna 1949 kuvailleen Willis Winslow'n mukaan [1]. Tässä luvussa käydään läpi tärkeimmät käsitteet ER-nesteiden ymmärtämisen kannalta, tarkastellaan ER-nesteiden fy-



Kuva 1. Virtaustasojen vuorovaikutus fluidissa [3]

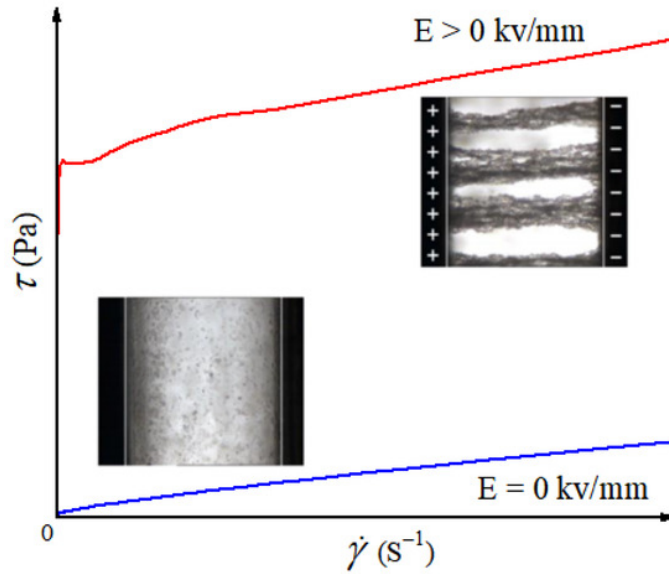
siikkaa, sekä sitä miten niitä valmistetaan.

1.2 Viskositeetti

Fluidin virtaamista voidaan kuvastaa päällekkäin olevien tasojen yhtenäisenä liikkumisena, missä virtaustasojen nopeus kasvaa sen mukaan, mitä kauempana kyseinen taso on pinnasta, jonka päällä virtaus tapahtuu. Virtaustasojen välillä vaikuttaa tasojen vastaan yhdensuuntainen virtausta vastustava leikkausvoima F_{shear} (engl. *shear stress*). Tämä on suoraan nesteen viskositeetista riippuva suure, joka kuvastaa fluidin kykyä vastustaa muodonmuutosta.

Newtonin viskositeettilain mukaiset laminaarisesti virtaavat nesteet noudattavat kaavaa $\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$, missä τ on nesteen pinnan suuntainen leikkausjännitys, η on aineen viskositeetti ja $\frac{\partial u}{\partial y}$ on virtaavan aineen kohtisuora nopeusgradientti pintaa vasten. Leikkausjännitys τ voidaan ajatella materiaalin kykyä vastustaa muodonmuutosta ja huomataan, että fluidin kyky vastustaa virtausta on suoraan verrannollinen fluidin viskositeettiin, sekä nesteen virtausnopeuteen. Kuvassa 1 on esitettyä virtaustasojen vuorovaikutus.

Viskositeetti on suure, joka kuvastaa nesteen kykyä vastustaa virtausta. Nesteen virtauskyky heikkenee viskositeetin kasvaessa ja voidaan sanoa, että nesteen viskositeetin lähestyessä ääretöntä, lähestyy sen käytös myös osaltaan kiinteää ainetta. Tästä esimerkkinä bitumi, jota käytetään asfaltissa kivimurskan kanssa sidosaineena ja on huoneenlämmössä erittäin kiinteää vaikka kyseessä onkin erittäin suuren viskositeetin omaava neste. Viskositeetti on aineen sisäinen ominaisuus, joka ei newtonin mallin mukaisessa virtaustilanteessa riipu muista tekijöistä. ER-nesteissä tilanne on kuitenkin toisin ja nesteessä havaittuun viskositeettiin on mahdollista vaikuttaa sähkökentän avulla.

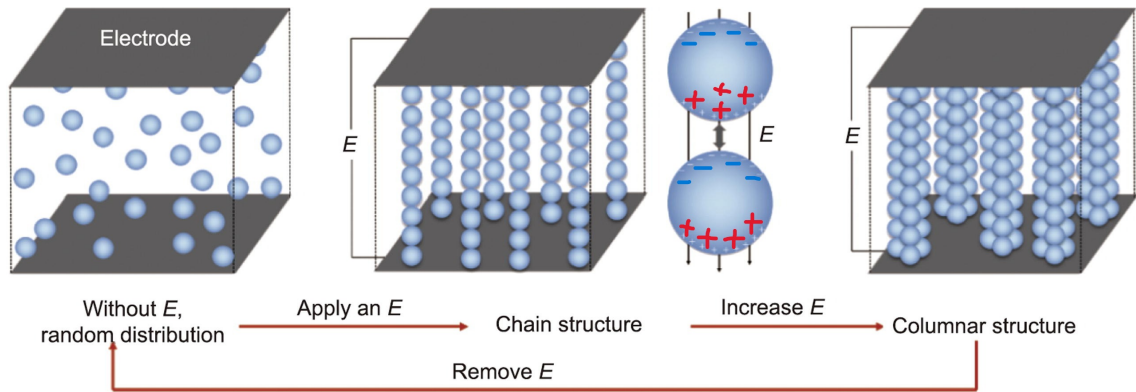


Kuva 2. ER-nesteessä havaitun leikkausjännityksen τ riippuvuus leikkausnopeudesta $\dot{\gamma}$ kun $\bar{E} = 0$ kV/mm (sin.) ja $\bar{E} > 0$ kV/mm (pun.). [4]

1.3 ER-nesteiden toiminta ja ER-efekti

Eristeit kutsutaan myö dielektriseksi aineiksi. Sähkökentän vaikuttaessa eristeeseen, polarisoituu se niin, että eristeessä olevien dipolien, kuten atomien, molekyylien ja muiden näitä vastaavien partikkelien negatiivisesti varautuneet osat pyrkivät shkkenttviivoja vastaan ja puolestaan positiivisesti varautuneet osat pyrkivät kenttäviivojen kanssa samaan suuntaan. Tätä kutsutaan dielektriseksi polarisaatioksi. Aineen dielektristä polarisaatiota kuvaa aineen suhteellinen permittiivisyys, joka on suurempi sellaisilla eristeillä, jotka polarisoituvat shkkenttss paremmin kuin ne, joiden suhteellinen permittiivisyys on pieni. Suhteellista permittiivisyyttä kutsutaankin vanhemmassa kirjallisuudessa ”dielektrisyysvakioksi”. Eristeessä olevien pienien sähködipolien polarisoituminen on keskeisessä osassa ER-efektin synnyn ja sitä kautta ER-nesteiden toiminnan kanssa.

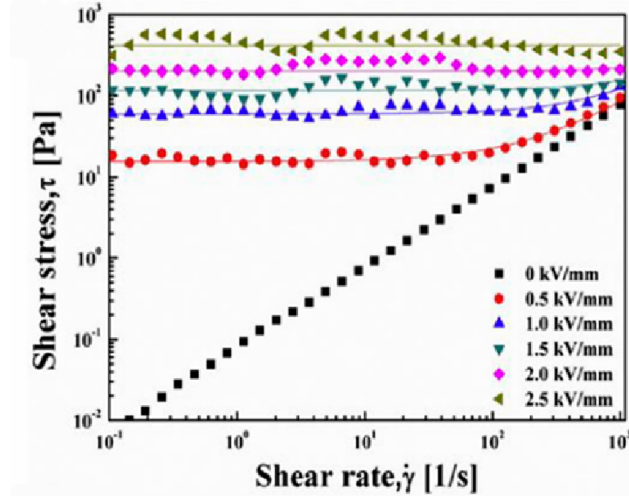
Kappaleessa 1.2 tarkasteltiin sitä, kuinka Newtonin mallin mukaiset nesteet noudattavat virratessaan kaavaa $\tau = \eta \frac{\partial u}{\partial y}$. Kuvassa 2 on esitettyä ER-nesteessä vaikuttava leikkausjännitys τ leikkausnopeuden $\dot{\gamma}$ funktiona kahdella eri shkkenttn



Kuva 3. Elektoreologisen efektin toiminta askelittain [5]

arvolla. Leikkausnopeus määritellään virtaavassa nesteessä olevien ”nestetasojen” ja niiden välisen etäisyyden suhteena v/h joka vastaa Newtonin fluidin kaavassa ”nestetasojen” nopeusgradienttia $\frac{\partial u}{\partial y}$. Kokeellisesti on huomattu kuvan 2 osoittamilla tuloksilla, että kasvattaessa ER-nesteeseen kohdistuvaa sähkökenttää, saamme aikaan huomattavasti suurempia leikkausjännityksiä samoilla leikkausnopeuksilla [4]. Tämä tulos viittaa siihen, että nesteen viskositeetti kasvaa sähkökentän vaikutuksesta.

ER-nesteissä esiintyvä ER-efekti havaitaan, kun ER-nestettä asetetaan kahden elektrodin väliin ja elektrodien välille luodaan sähkökenttä \bar{E} [Kuva 3.]. Tällöin nesteessä suspensiossa olevat partikkelit asettuvat dielektrisen polarisaation ansiosta ’ketjuiksi’ elektrodien välille [1]. Ketjurakenteen aiheuttaa se, kuinka kenttäviivojen mukaisesti peräkkäin olevat dipolit vetävät toisiaan puoleensa ja vierekkäin kenttäviivojen suhteen vaakatasossa olevat dipolit hylkivät toisiaan [6]. Ennen sähkökentän aktivointia ER-nesteet käyttäytyvät kuten newtonilaiset nesteet, jolloin niiden leikkausjännitys on suoraan verrannollinen nesteen leikkausnopeuteen [4]. Vesi on esimerkki tällaisesta nesteestä. Sähkökentän aktivoinnin jälkeen ER-neste muuttuu Bingham-plastiseksi nesteeksi, ei-newtonilaiseksi nesteeksi, joka vaatii tietyn leikkausjännitteen ennen kuin sähködipolien muodostamien ketjujen rakenne hajoaa ja neste pääsee virtaamaan. Tätä plastiseen muodonmuutokseen vaadittavaa leikkausjännitettä kutsutaan myös nimellä myötöraja τ_y (engl. *yield point*).



Kuva 4. Polystyreeni ja polyaniliini pohjaisten ER-nesteiden käyttäytyminen eri sähkökentillä [7]

Bingham-plastisen nesteen käyttäytymistä voidaan kuvata kaavoilla [7],

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_y + \eta\dot{\gamma}, & \tau &\geq \tau_y \\ \dot{\gamma} &= 0, & \tau &< \tau_y \end{aligned} \quad (1)$$

Kaavassa esitetään leikkausjännityksen τ riippuvuus myötörajasta τ_y , viskositeetista η ja leikkausnopeudesta $\dot{\gamma}$. Alempi kaava ilmaisee sen, että leikkausjännityksen ollessa myötörajaa pienempi, on leikkausnopeus nolla ja täten myöskään ER-neste ei koe plastista muodonmuutosta, jolloin se ei virtaa lainkaan. Kaava(t) (1) on yksinkertainen tapa kuvata tällaisten ER-nesteiden toimintaa, sillä niissä esiintyy muuttujan $\dot{\gamma}$ lisäksi ainastaan kaksi parametria τ_y ja η . [7] Tutkimuksessa Piao. et. al. havaittiin, että erityisesti polystyreeni-polyaliinipohjaiset (PS/PANI) ER-nesteet käyttäytyvät sähkökentässä Bingham-plastisen nesteen tavoin ja niitä voidaan mallintaa tarkasti kaavoilla (1). Kuvassa 4 on esitetty PS/PANI-pohjaisten nesteiden leikkausjännityksen riippuvuus leikkausnopeudesta eri sähkökentän arvoilla. [7, 8]

Kuvasta 4 havaitaan kuinka leikkausjännitys kasvaa portaittain sähkökentän kasvassa. Kuvajista voidaan havaita myös leikkausjännityksen tasannekäyttäytyminen (engl. *plateau-behaviour*) pienillä leikkausnopeuksilla. Tämän käyttäytymisen syy piilee ER-nesteisiin suuremmilla sähkökentillä syntyvissä pylväsrakenteissa, jo-

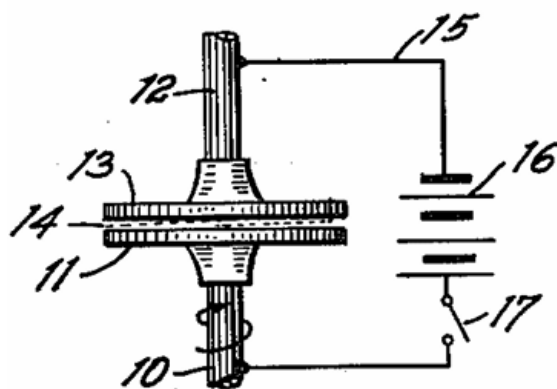
ka pitää nesteen rakennetta kasassa ketjuja paremmin [1, 7].

Kun ER-nesteeseen vaikuttaa sähkökenttä \overline{E} , nesteessä olevat partikkelit polarisoituvat ja ne muodostavat ketjuja sähkökentän synnyttävien elektrodien välille kuvan 3 mukaisella tavalla. Kuvassa 3 on esitettyä myös tilanne, jossa sähkökenttää kasvattamalla polarisoituu yhä useampi partikkeli ja näin ollen partikkelit muodostavat ketjurakennetta voimakkaamman ja stabiilimman pylväsrakenteen [5]. Jos sähkökentän ollessa päällä nesteeseen kohdistetaan sähkökenttää vasten kohtisuora voima, havaitaan huomattavasti suurempia leikkausjännityksiä. Suuremmat leikkausjännitykset aiheutuvat siitä, että nyt nesteessä ei vaikuta ainoastaan ”nestetasojen” välinen leikkausvoima, vaan myös ER-nesteessä olevien ketjuuntuneiden sähködipolien välinen voima, joka pyrkii pitämään ketjurakenteen kasassa. [9]

Ketjuuntuneiden partikkelien välistä voimaa monodispersoituneessa systeemissä, eli systeemissä, jossa dispersiossa olevat partikkelit ovat kooltaan ja muodoltaan lähes identtisiä palloja, voidaan kuvata kaavalla

$$F = -\frac{6p^2}{\sigma^4}\zeta(3) \quad (2)$$

Kaavassa esiintyvät termit p ja σ ovat vastaavasti dispersoituneiden partikkelien indusoitu dipolimomentti ja partikkelien halkaisija. Indusoitu dipolimomentti p voidaan esittää muodossa $p = \alpha E_{loc}$ jossa termi $E_{loc} = E_0 + E_{int}$ ilmaisee paikallisen sähkökentän partikkelin kohdalla. E_0 viittaa ulkoiseen sähkökenttään ja E_{int} polarisoituneiden dipolien muodostamaan sähkökenttään. Termi $\alpha = \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{\epsilon_p + 2\epsilon_f} \left(\frac{\sigma}{2}\right)^3$ on yksittäisten partikkelien polarisoituvuus ja termit ϵ_p ja ϵ_f merkkäavat partikkelien ja dispersionesteen permittiivisyyksiä. [9] Permittiivisyyksien vaikutusta ER-efektin voimakkuuteen käsitellään tarkemmin kappaleessa ”ER-nesteissä käytetyt materiaalit”. Kaavassa (2) esiintyy myös Riemannin zeeta-funktio $\zeta(3) = \sum_{i=1}^{\infty} 1/i^3 = 1.20205\dots$, tämä termi summaa yhteen kaikkien ketjuuntuneiden partikkelien aiheuttamat voimat tarkasteltavaan partikkeliin ja luku 3 viittaa sähködipolien väliseen vuorovaikutukseen, joka pienenee suhteessa dipolien etäisyyden kuutioon. [9]

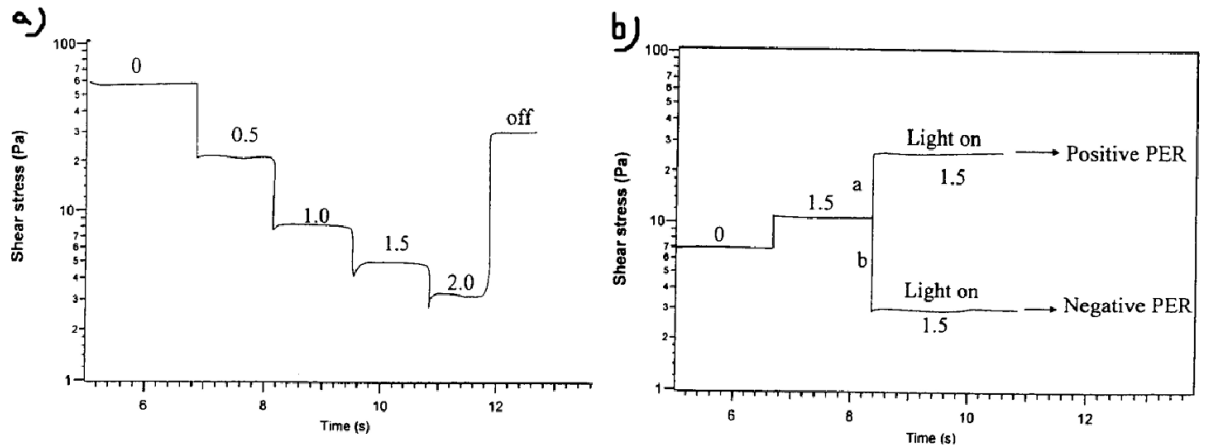


Kuva 5. Winslowin patentissa esitetty elektro-nestekytkin. Patentin kuvailema ER-nesteen paikka on merkitty kuvaan numerolla 14. Alalevyn (11.) pyöriessä on mahdollista välittää voima ylälevylle (13.) kun levyjen väliin luodaan sähkökenttä. [10]

1.4 ER-nesteiden valmistus

Winslow kuvaili vuonna 1947 julkaisemassaan patentissa eräänlaisen elektro-nestekytkimen toimintaan liittyvän elektoreologisen nesteen toimivan parhaiten suspensiolla, jossa eristävään, pienen viskositeetin omaavaan nesteeseen lisätään hyvin pieniä partikkeleja. Kuvassa 5 on edellä mainittu Winslowin patentissa esitetty ER-nestekytkin. Patentissa mainitaan, että nesteenä voidaan käyttää esimerkiksi muuntajaöljyä, mineraaliöljyä tai vaikkapa oliiviöljyä. Suspensiopartikkeleja Winslow luettelee laajasti, joista esimerkkejä ovat tärkkelys, kalkkikivi tai hiili. Eri materiaaleilla on patentin mukaan eriäviä tuloksia ER-efektin voimakkuudesta. Winslow mainitsee myös, että erityisen hyviä tuloksia havaittiin jauhetulla silikageelillä eli amorfisella piioksidilla, joka on suspensoitu petroliin eli raakaöljystä tislattuun polttoöljyyn, jossa yhden piioksidipartikkelin läpimitta on millimetrin luokkaa. [10] [11]

Myöhemmissä tutkimuksissa on havaittu, että voimakkain ER-efekti saadaan aikaan kun ER-neste suspensiossa olevien partikkelien johtavuus on pienempi kuin $10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{m}}$ ja joiden suhteellinen permittiivisyys on huomattavasti suurempi kuin partikkelien eristävällä kantajanesteellä (engl. *carrier fluid*). [1]



Kuva 6. Kuvaajien päällä olevat numerot viittaavat ER-nesteisiin vaikuttavan sähkökentän voimakkuuteen. Arvojen yksiköinä on [kV/mm]. Kuvassa a) on esitettyä tyypillinen NER-nesteen toiminta pyrogeenisen piidioksidi pohjaisella nesteellä. Kuvassa b) on esitetty PER-nesteen toiminta. Kuvaaja b) on mielivaltainen ja tehty PER-efektin havainnollistamiseksi, eikä vastaa aitoa tilannetta. [1]

2 Erilaiset ER-nesteet

Tässä tutkielmassa käsitellään tarkemmin ER-nesteitä, joiden leikkausjännitys kasvaa sähkökentän kasvaessa. Tätä efektiä kutsutaankin sen positiivisen riippuvuuden luonteen vuoksi positiiviseksi ER-efektiksi. ER-nesteistä on kuitenkin kehitetty ja tunnetaan kolmea eri päätyyppiä, joista juurikin positiiviset ER-nesteet ovat yleisin variantti. Tässä luvussa paneudutaan hieman kahteen muuhun päätyyppiin, negatiivisiin- sekä valollakontrolloitaviin foto-ER-nesteisiin.

Negatiiviset ER-nesteet (NER-nesteet) toimivat nimensä mukaisesti päinvastoin kuin positiiviset ER-nesteet. NER-nesteiden leikkausjännitys noudattaa käänteistä riippuvuutta siihen kohdistuvasta sähkökentästä, jolloin nolasta poikkeavan sähkökentän vaikuttaessa nesteen leikkausjännitys pienenee. Pyrogeenisen silikan on havaittu tuottavan negatiivisen ER-efektin ja tätä on havainnollistettu kuvassa 6 a). [1] Joidenkin materiaalien ER-efektiä voidaan kontrolloida valon avulla ja tällaisia materiaaleja kutsutaan foto-ER (PER) materiaaleiksi. Valon avulla pystytään

havaitusti muuttamaan TiO_2 pohjaisten ER-nesteiden toimintaa joko positiiviseksi tai negatiiviseksi. Tutkimuksessa havaittiin, että nesteen vesipitoisuudella oli vaikutusta siihen, käyttäytyikö TiO_2 pohjainen ER-neste positiivisesti vai negatiivisesti valon vaikutuksen alaisena. [1]

3 ER-nesteissä käytetyt materiaalit

ER-nesteissä käytettyjen materiaalien valinnassa on monia tekijöitä, jotka vaikuttavat ER-efektin voimakkuuteen ja ER-nesteen käyttäytymiseen. Tästä syystä ER-nesteiden valmistuksessa on sen tutkimisen historian aikana kokeiltu useita erilaisia variantteja sille, millä materiaaleilla saadaan aikaan voimakkain ja samaan aikaan vakaa ER-efekti. Tässä luvussa käydään läpi sitä, miten materiaalien permiitiivisyydet, koot ja muut fyysiset ominaisuudet vaikuttavat ER-efektiin ja tarkastellaan muutamaa ER-nesteissä yleisesti käytettyä materiaalia hieman tarkemmin.

3.1 Materiaalien valinta

ER-nesteiden tutkimuksessa on havaittu, että voimakas ER-efekti saadaan aikaan kun nesteeseen dispersoituneiden partikkelien suhteellinen permiitiivisyys on suuri, johtavuus tarpeeksi suuri mutta alle $10^{-6} \frac{\text{S}}{\text{m}}$ ja että ne ovat fysiokemiallisesti vakaita. [5] Johtavuuden vaikutusta ER-efektin voimakkuuteen on tutkittu ja lämpötilan mukaan säädettävän johtavuuden omaavien partikkelien avulla selvitetiin, että kyseisessä tutkimuksessa käytettyjen Molybdeenidisulfidi (MoS_2) ydin-kuorikomposiittipartikkelien ER-efektin voimakkuuden huippuarvo saatiin aikaan tietyllä johtavuuden arvolla. ER-efekti vaatii syntyäkseen dispersiopartikkeleja, joilla on riittävän – mutta ei liian – suuri johtavuus, sillä ER-efektin voimakkuuden on havaittu laskevan suurilla johtavuuden arvoilla. Suurilla johtavuuden arvoilla on myös vaara, että ER-nesteessä tapahtuu sähköinen läpilyönti. Johtavuus ei myöskään voi olla liian

pieni, sillä tällöin partikkeliketjujen syntyminen on niin hidasta, että varteenotettavan ER-efektin syntyminen ei ole havaittavissa. [1, 12] Partikkelien muodolla on myös suuri vaikutus ER-efektin voimakkuuteen ja tällä hetkellä suurta mielenkiintoa herättävät partikkelit, joiden geometria on sauvamainen, sillä näiden synnyttämä dipolimomentti on huomattavasti suurempi kuin pallon muotoisilla partikkeleilla ja täten myös partikkelien välinen voima on kaavan (2) mukaisesti suurempi, jolloin myös havaittu ER-efekti on pallogeometrisia partikkeleja voimakkaampi [5].

Kantajanesteen vaatimuksia varteenotettavan ER-efektin synnyn kannalta on, korkea kemiallinen vakaus, suuri kiehumispiste, matala jäätymispiste, pieni volatilitteetti eli haihtuvuus, pieni nollakentän viskositeetti sekä sopiva tiheys verrattuna dispersiopartikkeleihin. Täydellistä kaikki kriteerit täyttävää nestettä ei ole löydetty, mutta eniten käytössä oleva kantajaneeste on silikoniöljy sen vakaan käyttäytymisen ansiosta. [5]

Dispersiopartikkelien ja kantajanesteen suhteellisten permittiivisyyksien vaikutus ER-efektin voimakkuuteen on yksi merkittävimmistä yksittäisistä materiaalien ominaisuuksista ja kuten aiemmin luvussa 1.3 käsitellyssä termissä α ilmaantuu kerroin $\kappa = \frac{\epsilon_p - \epsilon_f}{\epsilon_p + 2\epsilon_f}$, josta julkaisussa Liang et al. [5] käytetään nimitystä dielektrinen epäsopivuus (engl. *dielectric mismatch*) ja tämä epäsopivuuskerroin partikkelien ja kantajanesteen välillä on löydettävä, jotta ER-efekti saadaan aikaan. Tämä tarkoittaa sitä, että partikkelien, sekä nesteen suhteellisen permittiivisyyden on erottava toisistaan. Tästä kertoimesta κ voidaan varmistaa myös aiemmin esitetty toteamus siitä, että voimakkaan ER-efektin syntyyn halutaan nimenomaan sellaiset aineet, joilla partikkelien suhteellinen permittiivisyys on huomattavasti suurempi kuin kantajaneesteellä. [5] Tarkastellaan nyt dielektristä epäsopivuutta κ ja valitaan partikkelimateriaaliksi titaanioksidi TiO_2 sekä kantajaneesteeksi polydimetyylisiloksaani (PDMS). ER-nesteissä usein käytetyn kantajanesteen PDMS:n suhteellinen permittiivisyys ϵ_f on 2.757 [13] ja titaanioksidin suhteellinen permittiivisyys lämpötilasta

riippuen 160 – 240 [14]. Käytetään arvoa 160, sillä se on lähellä huoneenlämmössä havaittua permittiivisyyttä [14]. Dielektrisen epäsopivuuden arvoksi näillä materiaaleilla saadaan $\kappa = \frac{160-2.757}{160+2.757} = 0.95$. Mitä suurempi tämä arvo on, sitä voimakkaampi polarisoituma saadaan partikkeleissa aikaan. Ja sitä voimakkaampi on havaittu ER-efekti [9]

3.2 Alumiinisilikaatit

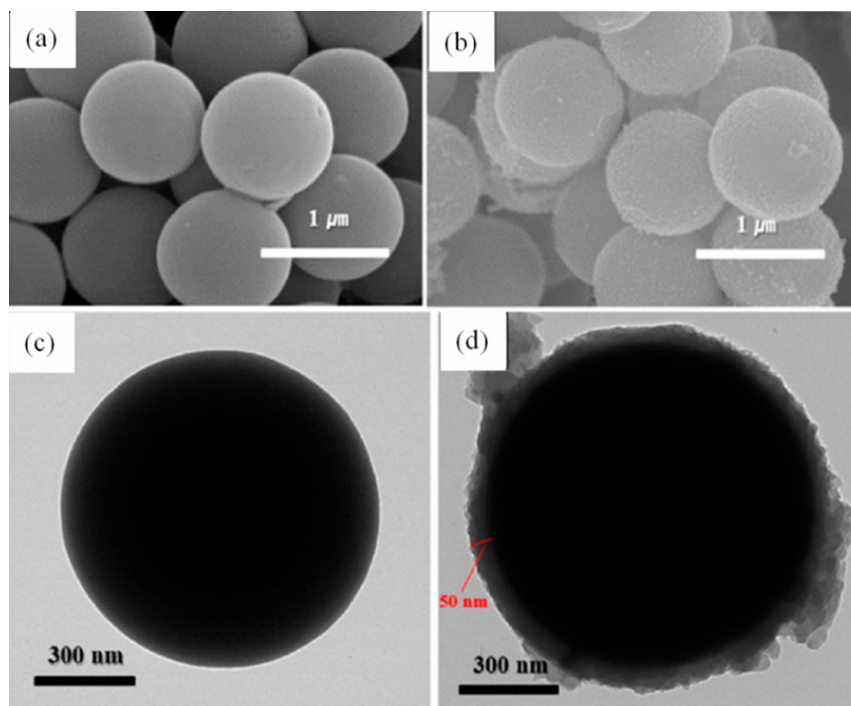
Alumiinisilikaatti on nimitys yhdisteille, joissa esiintyy alumiinioksidia (AlO_2) ja piioksidia (SiO_2) eli silikaa eri sekoitus-suhteilla. Alumiinisilikaateilla on paljon positiivisia ominaisuuksia ER-efektin kannalta ja siksi ne ovatkin olleet yleinen valinta ER-nesteiden valmistuksessa. Alumiinisilikaattien hankinta on helppoa ja halpaa, koska sekä alumiinioksidia, että piioksidia löytyy äärimmäisen paljon maaperästä. Alumiinisilikaattien suhteellinen permittiivisyys on suuri ja ne tuottavatkin siksi vahvan ER-efektin, jota voidaan kontrolloida ja hienosäätää siihen absorboituneen veden määrällä ja partikkelien muodon avulla. [1, 15] Hyvän ER-efektin varjopuolella alumiinisilikaattipohjaisilla ER-nesteillä on alumiinisilikaatin kovuus. Nämä ER-nesteet usein hiovat voimakkaasti laitteita, joissa niitä on käytetty. Tämä on yksi syistä sille, miksi alumiinisilikaattipohjaiset ER-nesteet eivät ole yleistyneet kaupallisessa käytössä. [1] Alumiinisilikaattien ja muiden oksidipohjaisten materiaalien vesipitoisuus ilmenee ongelmana, kun vesi pääsee haihtumaan, jolloin tämän tyyppisen ER-nesteen ominaisuuksia ei pystytä pitämään vakiona. [16]

3.3 Polymeerit

Oksidit ja oksidipohjaiset yhdisteet - joihin myös alumiinisilikaatit kuuluvat - ovat olleet elektreologisten nesteiden partikkelimateriaalien kohteena niiden edellä mainittujen ER-efektin kannalta edullisten ominaisuuksien ansiosta. Oksidit ovat kuitenkin monella tapaa huonoja materiaaleja ER-nesteisiin niiden kovuuden ja suuren

tiheyden takia. Suuren tiheyden takia oksidipartikkelit sedimentoituvat eli painuvat ER-nesteen pohjalle, jolloin myöskään ER-efektiä ei saada aikaan. Oksidipohjaiset nesteet vaativat myös yleisimmin toimiakseen vettä, jolloin ER-laitteet ovat alttiita korroosiolle. Näistä syistä ER-nesteiden valmistuksessa erilaiset polymeerit ovat herättäneet kiinnostusta. [7] Tällaisia oksidi- sekä vesivapaita ER-nesteitä kutsutaan kuiviksi ER-nesteiksi (engl. *dry-base ER-fluid*). [16] Johtavissa polymeereissä esiintyy konjugoituneita π -sidoksia, eli toistuvia kaksoissidoksia hiiliatomien välillä, mikä mahdollistaa elektronien vapaan liikkumisen polymeerimolekyylien rakenteissa. Tämä tekee näistä polymeereistä johtavia ja mahdollistavat polymeerin polarisoidumisen, mikä myöskin mahdollistaa ER-efektin synnyn sähkökentässä. [7, 16] Yksi yleisimmin ER-nesteissä käytetyistä polymeereistä on polyaniliini (PANI). Polyaniliinin positiivisia ominaisuuksia ER-efektin kannalta ovat sen halpa hinta, helppo valmistusprosessi sekä se kestää hyvin lämpöä ja on kemiallisesti vakaa. Lisäksi polyaniliinin johtavuutta on helppo säätää protonoimalla tai douppaamalla sitä esimerkiksi suolahapolla eli lisäämällä elektroninluovuttajia tai -vastaanottajia polymeerin rakenteeseen. [7]

Muidenkin polymeerien käyttöä ER-nesteissä on tutkittu ja PANI:n lisäksi mielenkiintoa herättäviä polymeerejä ovat polypyrroli (PPy) ja polyfenyleeni (PPP). Polypyrrolin hyviä puolia polyaniliiniin verrattuna on sen hyvä lämmönsietokyky sekä se on kemiallisesti erittäin vakaa. Polypyrroli omaa myös erinomaisen johtavuuden verrattuna polyaniliiniin. Douppaamattoman PANI:n johtavuus on $2.68 \cdot 10^{-9}$ S/m ja douppaamattoman PPy:n $2.55 \cdot 10^{-2}$ S/m. Douppaamalla polypyrrolia β -naftaleenisulfonihapolla saatiin parhaimmillaan aikaan jopa 3300 S/m johtavuus. [17, 18] Polypyrrolin huonoihin puoliin kuuluu sen heikko liukoisuus useimpiin orgaanisiin liuottimiin, mikä tekee sen jälkikäsitteystä haastavaa. Erityisesti ER-nesteissä käytettävät polymeerit, kuten PPy ja PANI, on ensin liuotettava, jotta niiden ominaisuuksia, kuten johtavuutta, pystytään muokkaamaan. [7, 16] Polymeeripohjaisten



Kuva 7. SEM (a,b) ja TEM (c,d) kuvat puhtaasta piioksidista SiO_2 , ja SiO_2/PANI ydin-kuori-komposiittihiukkasista. [19]

materiaalien saavuttama ER-efekti on myös huomattavasti heikompi kuin vastaavilla oksidipohjaisilla nesteillä. [1]

3.4 Ydin-kuori-komposiittihiukkaset

Aiemmin on todettu, että sekä oksidi- että polymeeripohjaisilla materiaaleilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa ER-efektin tuottamisessa. Näille materiaaleille tyypilliset vahvuudet ovat kuitenkin usein keskenään vastakkaisia: oksidipohjaisille nesteille ominaiset heikkoudet eivät yleensä ilmene polymeeripohjaisissa järjestelmissä – ja päinvastoin. Tästä syystä mielenkiintoa onkin herättänyt mahdollisuus materiaaleista, joilla saataisiin valjastettua molempien materiaalien - oksidien sekä polymeerien - hyvät puolet yhteen partikkeliin samalla minimoiden molempien materiaalien heikkoudet. Tällaisia materiaaleja onkin tutkittu ja kehitetty laajasti ja niitä kutsutaankin ydin-kuori-komposiittihiukkasiksi (engl. *core-shell composite particles* [1]).

Muodostamalla ydin-kuori-partikkeli, jossa toista materiaalia käytetään pinnoittamaan ydinkerros saadaan aikaan partikkeli, jossa yhdistyy molempien materiaalien vahvuudet ja saadaan aikaan kokonaisuus, joka on huomattavasti parempi kuin mitä kumpikaan materiaali olisi yksinään. Tällaisista partikkeleista esimerkkejä ovat esimerkiksi oksidi/polymeeri rakenteiset partikkelit kuten, SiO_2/PANI ja polymeeri/polymeeri rakenteiset partikkelit PS/PANI . [1, 7, 19] Nimenomaan SiO_2/PANI hiukkaset ovat mielenkiintoisia, sillä niillä aikaan saadut bingham-plastisen nesteen mukaiset myötörajat ovat huomattavan suuria muihin vastaavanlaisiin partikkeleihin verrattuna. [19] Nämä partikkelit valmistetaan niin, että eristävän piioksidihiuksien pinnalle polymerisoidaan polyaniliinikerros in situ-menetelmällä. Tämä siis tarkoittaa sitä, että polymeeriketjut muodostetaan suoraan piioksidin pinnalle sen sijaan, että se polymerisoitaisiin erikseen ja kiinnitettäisiin jälkeenpäin. Tämä menetelmä mahdollistaa tarkan kontrollin sille, kuinka paksu polymeerikerros halutaan muodostaa piioksidihiuksien pinnalle. Kuvassa 7 on esitettyä sekä SEM, että TEM kuvat SiO_2/PANI -hiukkasesta, josta havaitaan in situ-menetelmällä polymerisoidun polyaniliinikerroksen olevan hyvin ohut, noin 50 nm luokkaa. [19]

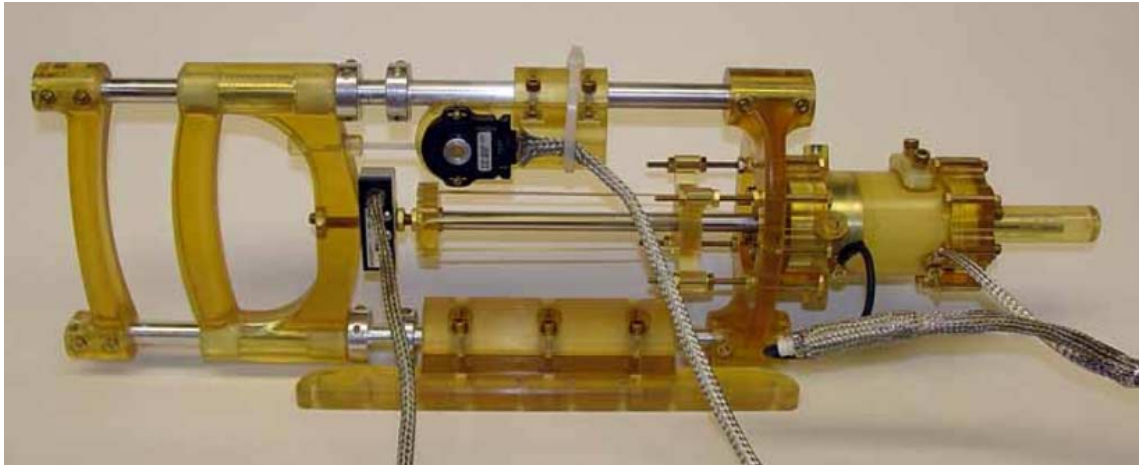
Yksi suurimmista eduista ydin-kuori-komposiittipartikkeleilla on niiden ominaisuuksien hienosäätäminen. Esimerkiksi SiO_2/PANI -hiukkasten tapauksessa eristävän piioksidiytimen pinnalle muodostetaan PANI-kuori, jonka johtavuutta voidaan helposti säätää douppaamalla. Tällöin voidaan asettaa ER-partikkeleille sellainen johtavuus, jolla saavutetaan voimakkaimman ER-efektin. [7, 19] Polymeerikuori myös vähentää ER-neste partikkelien sedimentoitumista, mikä on merkittävä ongelma oksidipohjaisissa nesteissä. [1]. Tutkimuksissa on havaittu, että ydin-kuori-komposiittihiuksien kuorimateriaalin suhteellisen permiivisyyden on oltava suurempi kuin 1000 [1]. Monikuoripartikkeleilla, eli sellaisilla partikkeleilla, jotka ovat pinnoitettu usealla eri materiaalilla, on tutkimuksissa havaittu tuottavan suuren leikkausjännityksen omaavia ER-nesteitä. [1].

Ydin-kuori-komposiittihiukkaset ovatkin mielenkiintoisia tutkimuksen kohteita, sillä mahdollisia yhdistelmiä eri ydin- ja kuorimateriaalien välillä on käytännössä loputtomasti. ER-nestehiukkasten sähköisiä ja muita fysikaalisia ominaisuuksia siis pystytään täten säätämään ER-efektin kannalta edulliseksi. Optimaalisilla yhdistelmillä voidaan saavuttaa partikkelien korkea polarisoituvuus, mekaaninen vakaus ja estää mahdollinen sähköinen läpilyönti muokkaamalla partikkelien johtavuus sopivaksi.

4 ER-nesteiden sovellukset ja haasteet

ER-nesteet ovat lupaava älymateriaali ja potentiaalisia käyttötarkoituksia niille on lukuisia. Erityisesti näiden nesteiden kyky muuttaa reversiibelisti viskositeettiaan sähkökentässä käytännössä silmänräpäyksessä on tehnyt niistä mielenkiintoa herättävän tutkimuskohteen materiaalitutkimuksessa. ER-nesteiden mahdollisuudet lääketieteessä, robotiikassa sekä teollisuudessa ovat valtavat ja tässä luvussa käydäänkin läpi niiden sovelluksia, sekä pohditaan hieman niiden tuomia haasteita.

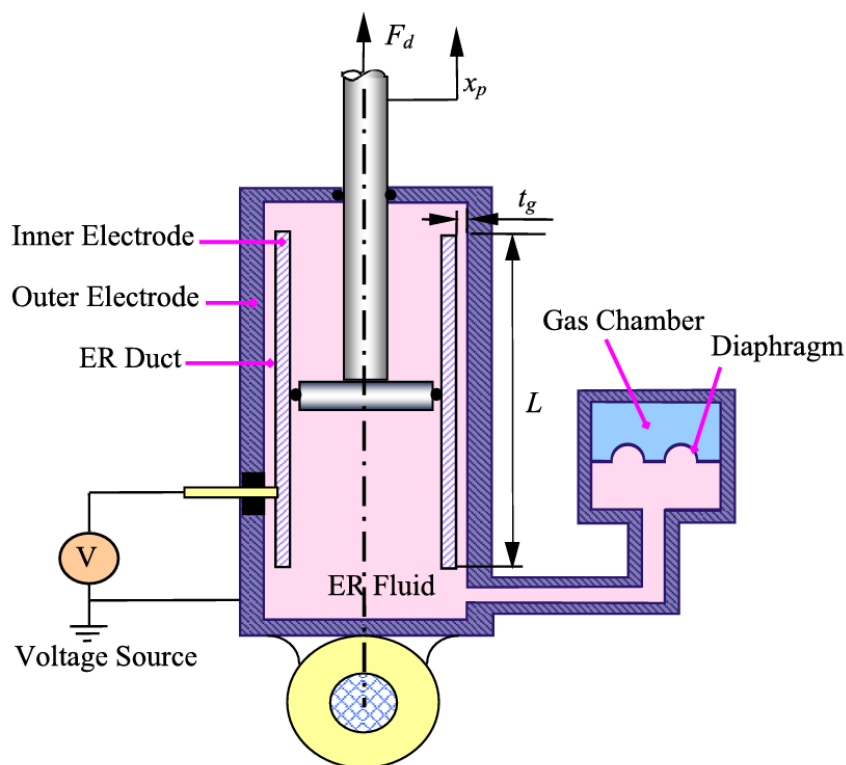
Aiemmin kappaleessa 1.4 käytiin läpi Willis Winslow'n patentti elektroreologisesta kytkimestä (kuva 5) , jolla pystytään sähkökentän voimakkuutta säätämällä välittämään levyn pyörimisvoima sitä vastakkain olevalle levyille. Winslow'n patentti oli ensimmäinen tieteellinen julkaisu, jossa ER-nesteet mainittiin ja nimenomaan ER-neste oli se materiaali, joka toimi kytkimessä voiman välittäjänä. [10] Muita vastaavanlaisia kytkimiä, sekä jarruja on tutkittu, ja kyky säätää ER-efektin voimakkuutta on ilmentynyt hyödylliseksi. ER-nestepohjaisia säädettäviä jarruja on kehitetty ja tutkittu MRI-laitteiden kanssa yhteensopivissa "kuntoutuskahvoissa" (kuva 8). Näissä kahvoissa ER-nesteellä toimivat jarrut antavat potilaan puristaessa käsiin lääkäreiden säädettävissä olevan vasteen. Tällaisen kahvan avulla pystytään MRI-laitteessa kuvaamaan potilaan kättä eri rasitusvoimilla. Erityisesti ER-nesteet ovat



Kuva 8. ER-nestekäyttöinen MRI-laitteen kanssa yhteensopiva kuntoutuskahva (MR CHIROD v.2) [2]

hyödyllisiä tässä käyttötarkoituksessa, sillä ER-nesteet ja sitä mukaan myöskin kahvat voidaan valmistaa MRI-laitteen kanssa yhteensopiviksi, koska ER-nesteet eivät reagoi MRI-laitteen suureen magneettikenttään, eikä kahvojen rakenteessa ole muita sellaisia osia, jotka synnyttäisivät MRI kuvauksen kannalta haitallisia pyörrevirtoja. [2]

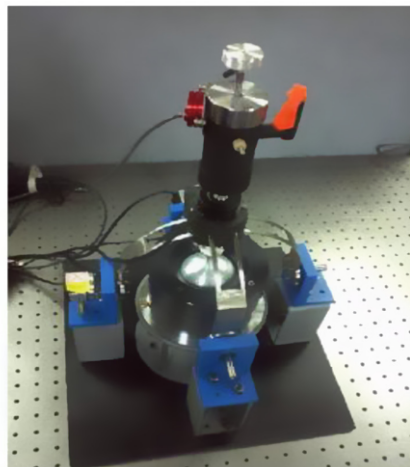
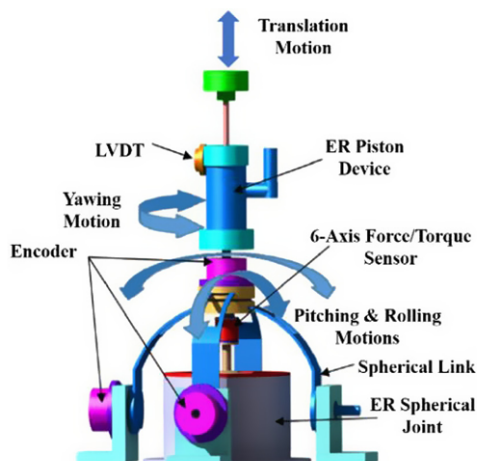
Yksi ER-nesteiden ensimmäisistä, sekä edelleen tutkimuksen alaisena olleista käyttökohteista ovat erilaiset iskunvaimentimet. ER-nestepohjaisia iskunvaimentimia voitaisiin teoriassa käyttää miltei missä tahansa, mutta lupaavampia ne ovat esimerkiksi ajoneuvoissa, teollisuudessa, ilmailussa tai suurten kerrostalojen pohjakerroksessa tai siltojen alla vaimentamassa mahdollisia maanjäristyksiä. [1, 20] Iskunvaimentimia on kahta päämallia, passiivisia (jouset), sekä aktiivisia. Eräs esimerkki aktiivisesta iskunvaimentimesta on autoihin Bosen kehittämä sähkömoottori avusteinen jousijärjestelmä, jossa sähkömoottorit kontrolloivat jokaisen renkaan etäisyyttä auton runkoon nähden tien pinnan muotoja mukaillen. [21] ER-nestepohjaiset vaimentimet valjastaisivat kuitenkin molempien vaimenninmallien parhaat puolet ja olisivat täten teoriassa paras vaihtoehto iskunvaimennukseen. ER-nestepohjaisten vaimentimien suorituskyky on tehokkaampi kuin passiivisilla vaimentimilla ollen samaan aikaan yksinkertaisempia ja energiatehokkaampia kuin aktiiviset. [20] Tällaisia



Kuva 9. ER-vaimentimen toimintaperiaate [20]

ER-vaimentimia voitaisiin käyttää esimerkiksi autojen jousituksessa, teollisuudessa vaimentamaan erinäisten laitteiden tärinää ja lentokone- sekä avaruusteknologiassa vaimentamaan herkkiin osiin kohdistuvia iskuja. [20] ER-nestepohjaisen vaimentimen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 9. ER-vaimentimen vaimennustehokkuutta voidaan säätää nestekanavaan kohdistetulla sähkökentällä. [20]

ER-nesteitä voidaan niiden tarjoamien suurien säätömahdollisuuksien ansiosta hyödyntää myös haptisissa kytkimissä niin videopeliteollisuudessa, kuin lääketieteessä robottiaivusteisessa kirurgiassa. Erityisesti robottiaivusteisessa kirurgiassa ER-nesteet tarjoavat mahdollisuuden luoda erilaisia ohjainjärjestelmiä, jotka antavat leikkausta suorittavalle kirurgille realistista tuntoaistimusta siitä kudoksesta johon leikkausta suoritetaan. ER-nesteet tuovat etuna juurikin mahdollisuuden paikallisen vasteen tarkkaan säätämiseen, sekä tarjoavat nopean vasteen sähkökenttään, jolloin kirurgi tunnistaa reaaliajassa eri kudokset toisistaan. [22] Kuvassa 10 on esitettyinä



Kuva 10. Haptinen ER-nestepohjainen joystick robottiaivusteiseen kirurgiaan [22]

edellä mainittu ohjain.

Suurista mahdollisuuksista ja lupaavista keksinnöistä huolimatta ER-nesteiden kaupallinen käyttö on hyvin vähäistä johtuen niiden tuomista haasteista. Yksi suurimmista ER-nesteiden haittapuolista on edellä mainittujen yleisesti käytössä olevien partikkelimateriaalien kovuus. ER-nesteet hankaavat ja tuhoavat laitteet, joissa niitä käytetään tehden niistä käyttökeltottomia aiheuttaen niiden toistuvan korjaamisen. [1] Nesteessä olevien partikkelien alttius sedimentoitumiselle on myös suuri ongelma laitteiden luotettavan toiminnan kannalta. [2] ER-efektin aikaan saamiseksi vaaditaan usein jopa tuhansien volttien jännitettä. Tämä luo laitteisiin riskin läpilyönnille sekä aiheuttaa ongelmia turvallisen laitteen kehittämisessä. [7, 22] ER-nesteiden leikkausjännitys ei myöskään todellisuudessa seuraa lineaarista bingham-plastisen nesteen yhtälöä tehden ER-nesteen kontrolloinnista haastavaa. ER-nesteiden tuottaminen suurissa määrissä on myös vaikeaa, sekä kallista. [7, 22]

5 Yhteenveto

ER-nesteet ovat erityisen lupaavia älymateriaaleja, jotka mahdollistavat nesteissä havaitun viskositeetin reversiibelin kontrolloimisen sähkökentän avulla. Tämä omi-

naisuus tekee ER-nesteistä omalaatuisia ja erityisen mielenkiintoisia materiaaleja tutkimuksen kannalta. Niiden käyttökohteita löytyy esimerkiksi kytkimissä, iskunvaimentimissa, jarruissa ja erilaisissa haptisissa ohjainjärjestelmissä.

Tutkielmassa käytiin läpi ER-nesteiden toiminnan taustalla oleva sähkökentässä polarisoituvien partikkelien ketjuuntuminen ja sen vaikutus ER-efektin voimakkuuteen. ER-nesteissä havaittu sähkökentästä riippuvainen kasvava leikkausjännitys aiheutuu juurikin ER-nesteessä ketjuuntuvista partikkeleista. Tutkielmassa tarkasteltiin myös sitä, miten partikkelien muoto, koko, permittiivisyys ja johtavuus vaikuttavat ER-efektin voimakkuuteen. Havaittiin, että ydin-kuori-komposiittihiukkaset tarjoavat laajat mahdollisuudet kehittää ER-nesteistä entistä tehokkaampia.

ER-nesteiden eduista huolimatta niiden laajempi kaupallinen käyttöönotto on toistaiseksi ollut rajallista. Suurimmat haasteet liittyvät partikkelien sedimentoitumiseen, korkeisiin jännitteisiin ja hyvän ER-efektin tarjoavien materiaalien kovuu-teen. Uusien ER-nestemateriaalien, kuten monikerroksisten ydin-kuorikomposiittihiukkasten kehityksellä voi olla suuri merkitys tulevaisuuden teollisuudessa ja lääketieteessä, mikäli kaupallisesti varteenotettava ER-neste onnistutaan kehittämään.

Viitteet

- [1] T. Hao, *Advanced Materials* **13**, 1847 (2001).
- [2] A. Khanicheh, D. Mintzopoulos, B. Weinberg, A. A. Tzika ja C. Mavroidis, *Ieee/Asme Transactions on Mechatronics* **13**, 286 (2008).
- [3] Duk at the English-language Wikipedia, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons, (2005).
- [4] Y. Wang, J. Yuan, X. Zhao ja J. Yin, *Materials* **15**, 311 (2022).
- [5] Y. Liang, D. Huang, X. Zhou, Z. Wang, Q. Shi, Y. Hong, H. Pu, M. Zhang, J. Wu ja W. Wen, *Engineering* **24**, 151 (2023).
- [6] T. C. Halsey, *Science* **258**, 761 (1992).
- [7] Q. Lu, W. J. Han ja H. J. Choi, *Molecules* **23**, 2854 (2018).
- [8] S. H. Piao, C. Y. Gao ja H. J. Choi, *Polymer* **127**, 174 (2017).
- [9] S. Mester, B. Horváth ja I. Szalai, *Journal of Molecular Liquids* **370**, 120939 (2023).
- [10] W. M. Winslow, Method and means for translating electrical impulses into mechanical force, (1947).
- [11] W. M. Winslow, *Journal of Applied Physics* **20**, 1137 (1949).
- [12] S. Lee, Y. K. Kim, J.-Y. Hong ja J. Jang, *ACS Applied Materials & Interfaces* **8**, (2016).
- [13] J. E. Mark, *Polymer Data Handbook*, 2nd edition ed. (Oxford University Press/Oxford New York, 2009).
- [14] J. Bonkerud, C. Zimmermann, P. M. Weiser, L. Vines ja E. V. Monakhov, *Scientific Reports* **11**, 12443 (2021).
- [15] T. Hao, Z. Xu ja Y. Xu, *Journal of Colloid and Interface Science* **190**, 334 (1997).
- [16] H. Jin Choi ja M. S. Jhon, *Soft Matter* **5**, 1562 (2009).
- [17] S. M. Hammo, *Tikrit Journal of Pure Science* **17**, 66 (2012).
- [18] A. L. Pang, A. Arsad ja M. Ahmadipour, *Polymers for Advanced Technologies* **32**, 1428 (2021).
- [19] Y. Dong, W. Han ja H. Choi, *Polymers* **10**, 299 (2018).
- [20] Q.-H. Nguyen ja S.-B. Choi, *Smart Materials and Structures* **18**, 055016 (2009).

- [21] M. Rakshith, Y. L. Kumar ja S. G. Vikas, International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) **3**, 13 (2014).
- [22] J.-S. Oh ja S.-B. Choi, Journal of King Saud University - Science **29**, 390 (2017).