

Ei-newtoninen dilatantti fluidi

Kandidaatintutkielma, 29.5.2024

Tekijä:

ELLI JAAKKOLA

Ohjaaja:

KIMMO NISKANEN



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO
FYSIKAN LAITOS

© 2024 Elli Jaakkola

Julkaisu on tekijänoikeussäännösten alainen. Teosta voi lukea ja tulostaa henkilökohtaista käyttöä varten. Käyttö kaupallisiin tarkoituksiin on kielletty. This publication is copyrighted. You may download, display and print it for Your own personal use. Commercial use is prohibited.

Tiivistelmä

Jaakkola, Elli

Ei-newtoninen dilatantti fluidi

Kandidaatintutkielma

Fysiikan laitos, Jyväskylän yliopisto, 2024, 29 sivua

Tutkielmassa tutustutaan ei-newtoniseen dilatanttiin fluidiin niin sen teorian kuin sovellustenkin näkökulmasta. Ei-newtonisen dilatantin fluidin viskositeetti kasvaa, kun siihen kohdistuva leikkausnopeus ylittää kriittisen arvon. Tällöin fluidi käyttäytyy leikkaispaksunevasti, eli siinä tapahtuu dilataatio, joka voi esiintyä jatkuvana tai epäjatkuvana. Dilataatioon vaikuttavat monet fluidin ominaisuudet, kuten hiukkasten tilavuusosuus ja lämpötila. Yhtenäistä teoriaa dilataatiolle ei ole vielä löytynyt, mutta tutkielmassa tutustutaan muutamiin dilataation selittämiseksi käytettyihin malleihin. Dilatantilla fluidilla on sovelluskohteita erityisesti tärinän vaimentimissa sekä puettavissa suojarusteissa, joissa se tarjoaa erityisen hyvää suojaa erilaisilta iskuilta. Huolimatta lupaavista tutkimustuloksista erityisesti suojarusteiden kohdalla, liittyy sovelluksiin vielä ratkaisemattomia kysymyksiä esimerkiksi lämpötilan vaikutuksen huomioimisesta.

Avainsanat: Ei-newtoninen fluidi, dilatantti fluidi, dilataatio, viskositeetti

Abstract

Jaakkola, Elli

Non-Newtonian dilatant fluid

Bachelor's thesis

Department of Physics, University of Jyväskylä, 2024, 29 pages.

In this thesis a theory and some applications of non-Newtonian dilatant fluid are discussed. Viscosity of non-Newtonian dilatant fluid increases when applied shear rate exceeds the critical value. Dilatancy or shear thickening can be continuous or discontinuous. Many fluid properties, such as particle volume fraction and temperature, influence shear thickening. A unified theory for dilatation has not yet been found, but this thesis explores a few models which are used to explain shear thickening. Dilatant fluid has applications especially in dampers and body armors, where it offers particularly good protection against stabs. Despite promising research results, especially in protective equipment, there are still unresolved issues related to applications, such as considering the effect of temperature.

Keywords: Non-Newtonian fluid, dilatant fluid, shear thickening, viscosity

Sisällys

| | |
|--|-----------|
| Tiivistelmä | 3 |
| Abstract | 5 |
| 1 Johdanto | 9 |
| 2 Fluidit | 11 |
| 2.1 Leikkausjännitys (shear stress) | 11 |
| 2.2 Leikkausnopeus (shear rate) | 12 |
| 2.3 Viskositeetti | 12 |
| 2.3.1 Dynaaminen viskositeetti | 13 |
| 2.3.2 Kinemaattinen viskositeetti | 13 |
| 2.4 Newtoninen fluidi | 13 |
| 2.5 Ei-newtoninen fluidi | 13 |
| 3 Dilatantin fluidin teoria | 15 |
| 3.1 Dilataatio (shear thickening) | 15 |
| 3.2 Dilataatioon vaikuttavat tekijät | 16 |
| 3.2.1 Yksittäinen hiukkanen | 16 |
| 3.2.2 Hiukkaset | 17 |
| 3.2.3 Olosuhteet | 17 |
| 3.3 Dilataation teorit | 17 |
| 3.3.1 Järjestys-epäjärjestys siirtymä (order-disorder transition, ODT) teoria | 18 |
| 3.3.2 Hydrorykelmä (hydrocluster) teoria | 18 |
| 3.3.3 Hiukkashäirintä (particle jamming) teoria | 19 |
| 3.3.4 Kosketus-reologia malli (contact rheology model, CRM) | 19 |
| 4 Dilatantin fluidin sovellukset | 21 |
| 4.1 Suojavarusteet (body armor) | 21 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2 | Mukautuva rakenne (adaptive structure) | 22 |
| 4.3 | Älykäs materiaali (smart structure) | 23 |
| 5 | Päätäntö | 25 |
| | Lähteet | 26 |

1 Johdanto

Törmäämme jokapäiväisessä elämässä useisiin erilaisiin fluideihin ja hyödynnämme niiden toisistaan poikkeavia ominaisuuksia tiedostamattomasti. Tyypillisin esimerkki newtonisesta fluidista on vesi, jonka viskositeetti pysyy vakiona riippumatta sekoitusnopeudesta. Lisäksi on olemassa kirjava joukko erilaisia ei-newtonisia fluideja, joiden viskositeetti riippuu niihin kohdistuvasta leikkausjännityksestä. Esimerkiksi viili ja kerma reagoivat hyvin eri tavoin jatkuvaan sekoitukseen, viilistä tulee juoksevaa nestettä ja kermasta saadaan aikaan jäykkää vaahtoa.

Ei-newtonisia fluideja luokitellaan kolmeen pääryhmään: ajasta riippuviin, ajasta riippumattomiin ja viskoelastisiin. Näiden pääryhmien sisällä fluidit luokitellaan vielä viskositeetin muutoksen suhteen erilaisiin ryhmiin. Esimerkiksi ajasta riippumattomat ei-newtoniset fluidit voidaan jakaa pseudoplastisiin, dilatantteihin tai viskoplastisiin fluideihin. Näistä viskoplastiset fluidit muuttuvat nestemäisiksi, kun tietty myötöjännitys ylittyy. Pseudoplastiset fluidit muuttuvat juoksevimmiksi ja dilatantit kiinteämmiksi, kun leikkausnopeus kasvaa. [1, 2]

Tämän tutkielman tarkoituksena on tutustuttaa lukija ei-newtonisiin dilatantteihin fluideihin ja samalla lisätä aiheesta olevan suomenkielisen tiedon saatavuutta. Tutkielman alussa määritellään tärkeimpiä käsitteitä, jonka jälkeen perehdytään dilataatioon, siihen vaikuttaviin tekijöihin ja teorioihin sen selittämiseksi. Sen jälkeen tutustutaan myös muutamiin dilatantin fluidin käyttökohteisiin, kuten puettaviin suojarusteisiin. Lopuksi tarkastellaan tämänhetkisen tutkimustiedon puutteita ja pohditaan mahdollisia jatkotutkimuksia.

2 Fluidit

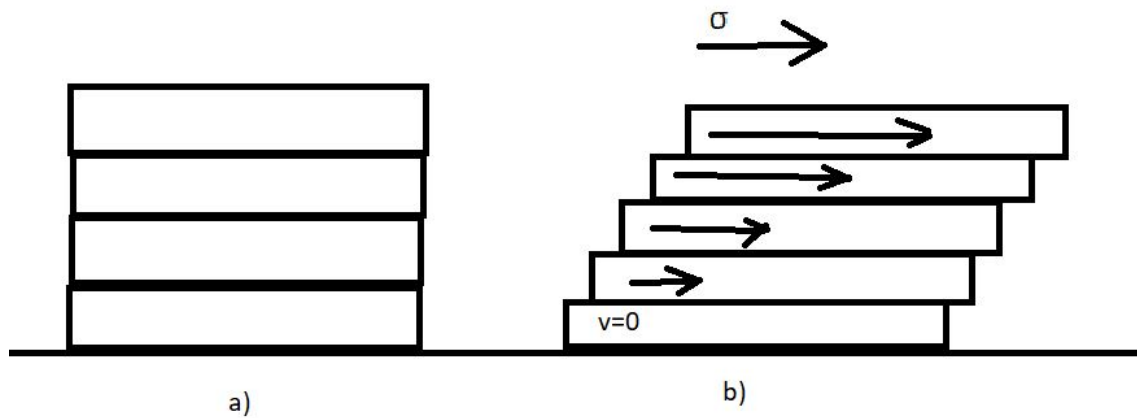
Tässä luvussa määritellään muutamia tärkeimpiä käsitteitä ja luodaan yleiskuva ei-newtonilaisista fluideista.

Erilaiset aineet voidaan jakaa olomuotonsa perusteella kiinteisiin aineisiin ja fluideihin [3, s. 4]. Ne voidaan luokitella eri ryhmiksi sen mukaan, miten ne reagoivat niihin kohdistuvaan leikkausjännitykseen. Kiinteä aine kykenee vastustamaan leikkausjännitystä taipumalla, mutta pienikin leikkausjännitys aiheuttaa fluidin rakenneosiin liikettä [3, s. 4], joten esimerkiksi nesteet, kaasut ja plasma luokitellaan fluideiksi. Tässä tutkielmassa fluideilla tarkoitetaan pääasiassa nesteitä ja nestemäisiä aineita, eikä kaasua tai plasmaa.

2.1 Leikkausjännitys (shear stress)

Fluidien tapauksessa leikkaaminen tarkoittaa sitä jännitystä, joka aineeseen syntyy, kun nesteen eri kerrokset liikkuvat toisiinsa nähden nesteeseen kohdistuvan ulkopuolisen paineen vuoksi [4], katso kuvio 1.

Leikkausjännitys (tunnus σ , yksikkö Pa) on jännityksen komponentti, joka on samansuuntainen kuin materiaalin pinta, johon voima kohdistuu [5, s. 77].



Kuvio 1. a) Havainnekuva fluidin kerroksista, kun siihen ei kohdistu leikkausjännitystä. b) Havainnekuva fluidin kerroksien liikkeestä, kun fluidiin kohdistuu leikkausjännitys σ .

2.2 Leikkausnopeus (shear rate)

Leikkausnopeus (tunnus $\dot{\gamma}$, yksikkö $\frac{1}{s}$) puolestaan kertoo leikkaamisen nopeuden, eli kuinka nopeasti nesteen eri kerrokset siirtyvät viereisten kerrosten ohi. Leikkausnopeus riippuu virtauksen geometriasta ja nopeudesta. [4]

2.3 Viskositeetti

Viskositeetti on mitattavissa oleva suure, joka kuvaa fluidin kykyä vastustaa virtaamista. Se määrittää nopeuden, jolla fluidia voidaan leikata, kun siihen kohdistuu leikkausjännitys. [3, s. 21] Viskositeetti on virtaavuuden käänteisarvo ja kertoo aineen virtauksen vastustuskyvystä [4], sekä sen voidaan ajatella olevan fluidin sisäisen kitkan mitta [6, s. 1], siis mitä pienempi viskositeetti, sitä juoksevampaa fluidi on.

Viskositeetti riippuu fluidin lämpötilasta ja paineesta, mutta vaikutukset ovat erilaisia kaasuille ja nesteille [6, s. 1]. Esimerkiksi lämpötilan kasvu kasvattaa kaasujen viskositeettiä ja pienentää nesteiden viskositeettiä. Yleisesti tarkasteltuna paineen kasvu kasvattaa fluidien viskositeettiä. [3, s. 22] Fluidin viskositeetti voi myös muuttua leikkausjännityksen funktiona [1].

Viskositeetti voidaan ilmaista kahdessa eri muodossa [6, s. 1]:

- absoluuttinen/dynaaminen viskositeetti
- kinemaattinen viskositeetti.

2.3.1 Dynaaminen viskositeetti

Dynaaminen viskositeetti (tunnus μ tai η) määritellään leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden välisenä suhteena [6, s. 2]

$$\mu = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}}. \quad (1)$$

Sen yksikkönä voidaan käyttää SI-yksiköissä $\text{Pa} \cdot \text{s}$, $\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$ tai $\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$.

2.3.2 Kinemaattinen viskositeetti

Kinemaattinen viskositeetti (tunnus ν) määritellään dynaamisen viskositeetin ja fluidin tiheyden suhteena tietyssä lämpötilassa ja paineessa [6, s. 1].

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2)$$

ja sen yksikkönä on $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$.

2.4 Newtoninen fluidi

Fluideja, joiden dynaaminen viskositeetti pysyy muuttumattomana vakio­lämpötilassa ja paineessa, kutsutaan newtonisiksi fluideiksi [1]. Toisin sanoen niiden leikkausjännitys ja leikkausnopeus ovat suoraan verrannollisia toisiinsa, ja niihin kohdistetun voiman suuruudella ei ole vaikutusta viskositeetin suuruuteen. Esimerkiksi vesi, etanoli ja öljy ovat newtonilaisia fluideja.

2.5 Ei-newtoninen fluidi

On olemassa myös fluideja, joiden viskositeetti on riippuvainen fluidiin kohdistuvas­ta voimasta, vaikka olosuhteet pysyisivätkin muuttumattomina. Tällaisten fluidien leikkausjännityksen ja leikkausnopeuden välinen suhde ei ole lineaarinen, joten visko­siteetinkin arvo vaihtelee [1]. Ei-newtonilaiset fluidit jaetaan kolmeen pääryhmään, ajasta riippuviin ja riippumattomiin, sekä viskoelastisiin [2]. Näiden ryhmien sisällä voidaan fluideja jakaa myös erilaisiin alaryhmiin, jotka on koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Ei-newtonisia fluidi tyyppinä luokiteltuna ajasta riippuviin, ajasta riippumattomiin ja viskoelastisiin.

| Ajasta riippuvat: | Leikkausjännityksen käytös ajan suhteen |
|--|--|
| Tiksotrooppinen, <i>thixotropic</i> Reopektinen, <i>rheopectic</i> | Leikkausnopeuden pysyessä vakiona, viskositeetti pienenee ajan kuluessa, esim. geelit [1]. Leikkausnopeuden pysyessä vakiona, viskositeetti kasvaa ajan kuluessa, esim. voiteluaine [1]. |
| Ajasta riippumattomat: | Leikkausjännityksen käytös leikkausnopeuden suhteen |
| Pseudoplastinen, <i>pseudoplastic</i> Dilatanttinen, <i>dilatant</i> Viskoplastinen, <i>viscoplastic</i> | Leikkausnopeuden kasvaessa viskositeetti pienenee, esim. veri [1, 2]. Leikkausnopeuden kasvaessa viskositeetti kasvaa, esim. märkä hiekka [1, 2]. Tietyn myötöjännityksen ylittyessä, materiaali muuttuu kiinteästä nestemäiseksi, jolla on vakio viskositeetti [2]. |
| Viskoelastinen, <i>viscoelastic</i>: | Kun leikkausjännitys poistuu, neste osittain palautuu sen elastisten ominaisuuksien takia. Tällaisilla materiaaleilla on sekä nesteiden että elastisten kiinteiden aineiden ominaisuuksia [1]. |

3 Dilatantin fluidin teoria

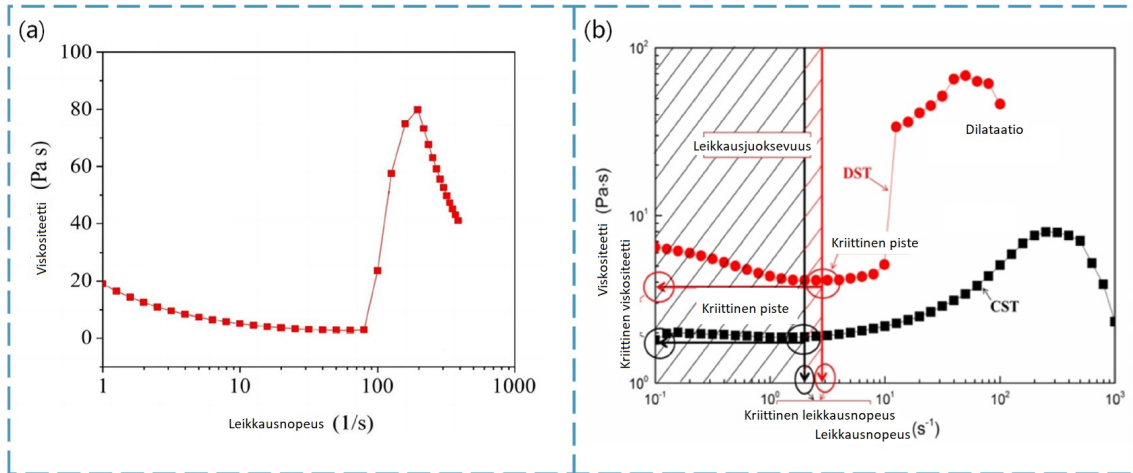
Tässä luvussa tutustutaan dilatanttien fluidien teoriaan, sekä niiden ominaisuuksiin.

Dilatantti fluidi tarkoittaa fluidia, joka käyttäytyy leikkauspaksunevasti (shear thickening), kun siihen kohdistettu leikkausnopeus tai leikkausjännitys ylittää kriittisen arvon. Pienillä leikkausnopeuksilla aineella on alhainen viskositeetti ja se käyttäytyy voiteluaineen tavoin, mutta leikkausnopeuden kasvaessa fluidi muuttuu kiinteän kaltaiseksi, kun viskositeetti kasvaa äkillisesti. [7] Kyseessä on reversiibeli prosessi, joten leikkausnopeuden pienentyessä, myös viskositeetti pienenee, ja fluidi palautuu takaisin alkutilaansa nestemäiseen muotoon [8].

3.1 Dilataatio (shear thickening)

Leikkauspaksunemista eli dilataatiota (shear thickening) havaitaan tiheissä kolloidisissa suspensioissa, jotka muodostuvat kiinteistä hiukkasista (esimerkiksi pii, kalsiumkarbonaatti) sekä reagoimattomasta kantonesteestä (kuten vesi, etyleeniglykoli). Pelkiltään tutkittuina kantonesteet ovat newtonisia fluideja, mutta kiinteiden hiukkasten sekoittuminen joukkoon muuttaa fluidin reagointia leikkausjännitykseen. [9].

Leikkauspaksunevasti käyttäytyvä fluidi voidaan jakaa kahteen luokkaan sen reologisten ominaisuuksien perusteella. Dilataatio voi olla jatkuvaa (continuous shear thickening, CST) tai epäjatkovaa (discontinuous shear thickening, DST) [10]. Kiinteiden hiukkasten tilavuusosuuden ollessa riittävän pieni, fluidin leikkauspaksunevuus on jatkuvaa, ja hiukkasten tilavuusosuuden ylittäessä kriittisen arvon, ilmenee fluidin leikkauspaksuuntuvuus epäjatkovana [8, 11]. Dilataation erot tulevat esiin, kun leikkausnopeus ylittää kriittisen arvon, jonka jälkeen fluidi alkaa paksuuntua. CST:lle on ominaista nopea, mutta suhteellisen merkityksetön viskositeetin kasvu. Puolestaan DST:llä viskositeetti kasvaa merkittävästi, kun kriittinen leikkausnopeus ylitetään. [10] Jatkuvan ja epäjatkuvan dilataation eroja havainnollistetaan kuviossa 2.



Kuvio 2. a) Viskositeetin muutos leikkausnopeuden funktiona dilataation aikana. b) Viskositeetin muutos jatkuvan ja epäjatkuvan dilataation tapauksessa leikkausjännityksen funktiona. [10] (ks. [12]). Alkuperäistä kuvaa on muokattu suomentamalla sen tekstit.

3.2 Dilataatioon vaikuttavat tekijät

Fluidin dilataatioon vaikuttavat useat eri tekijät, kuten lämpötila, hiukkasten koko ja hiukkasten tilavuusosuus [9]. Seuraavissa alaluvuissa on esiteltynä erilaisia leikkauspaksuuteen vaikuttavia tekijöitä sen mukaan, ovatko ne seurausta yksittäisen hiukkasen, hiukkasten vai olosuhteiden ominaisuuksista.

3.2.1 Yksittäinen hiukkanen

Kun hiukkaskoko kasvaa, kriittinen leikkausjännitys pienenee, mikä johtuu Brownin liikkeen aiheuttaman jännityksen käänteisestä riippuvuudesta hiukkaskokoon [9, 13].

Hiukkasen muodolla ja osien kokosuhteella on merkitystä fluidissa esiintyvän dilataation kannalta, pitkät ja kapeat hiukkaset vuorovaikuttavat helpommin vieressä olevien hiukkasten kanssa fluidin virratessa, jolloin myös dilataatiota tapahtuu herkemmin [9].

3.2.2 Hiukkaset

Hiukkasten kokojakaumalla on merkitystä fluidin viskositeettiin riippumatta fluidin tyypistä. Suspensiot, jotka sisältävät pienempiä hiukkasia, omaavat suuremman viskositeetin, mikä on seurausta hiukkasten suuremmasta tilavuusosuudesta. [9]

Kriittinen hiukkasten tilavuusosuus vaihtelee fluidin materiaalien mukaan, mutta hiukkasten tilavuusosuuden kasvaessa, kriittinen leikkausnopeus pienenee [9].

Hiukkasten välisellä vuorovaikutuksella on iso merkitys fluidin leikkauspaksunemisen kannalta. Jotta fluidissa voisi esiintyä dilataatiota, fluidin hiukkaset eivät voi olla helposti saostuvia ja hiukkasten välisen nettovetovoiman tulee olla nolla [7].

3.2.3 Olosuhteet

Dilatanteilla fluideilla, joiden muodostamisessa on käytetty molekyylipainoltaan suurempia nesteitä, on havaittu myös isompia viskositeetteja. Tämä johtuu hiukkasten muodostamista pidemmistä molekyyliketjuista, jotka estävät vierekkäisten neste-kerrosten liikettä toisiinsa nähden. Lisäksi molekyylipainoltaan suuremman nesteen käyttäminen laskee kriittisen leikkausnopeuden rajaa, jolloin dilataatiota havaitaan helpommin. [9]

Lämpötilan kasvaessa kolloidisten hiukkasten ja nestemäisen väliaineen välille muodostuneiden vetysidosten lujuus heikkenee, sekä Brownin liike voimistuu, jonka seurauksena viskositeetti pienenee [9, 14].

Myös ulkoisilla magneetti- ja sähkökentillä voi olla vaikutusta dilataatioon, riippuen dilatantin fluidin muodostuksessa käytetyistä hiukkasten ja kantonesteen ominaisuuksista [10].

3.3 Dilataation teoriat

Ei ole olemassa yhtenäistä teoriaa, joka kuvaisi kaikkien dilatanttien fluidien käyttäytymistä yksiselitteisesti. Erilaisten dilatanttien fluidien ominaisuudet riippuvat niiden muodostamisessa käytetyistä materiaaleista, dilataation tyypistä sekä kokeellisista olosuhteista [8, 10], joten yhtenäisen teoreettisen mallin löytäminen voi olla mahdotonta. Dilatantteja fluideja on kuitenkin tutkittu jo vuosisadan verran, mutta useimmat ensimmäisistä tutkimuksista olivat puhtaasti laadullisia ja eivät ottaneet huomioon mikrorakenteiden mahdollista uudelleenjärjestäytymistä [7, 8],

joka toimii nykyisten teorioiden pohjana. Seuraavissa alaluvuissa on esitelty joitakin merkittävämpiä teorioita dilataation selittämiseksi.

3.3.1 Järjestys-epäjärjestys siirtymä (order-disorder transition, ODT) teoria

Kriittisen leikkausnopeuden alapuolella fluidissa ei esiinny dilataatiota, koska hiukkaset ovat muodostaneet kerroksia järjestyksessä. Kun leikkausnopeus ylittää kriittisen arvon, hiukkasten lamellirakenne hajoaa ja hydrodynaamiset voimat vahvistuvat, jonka seurauksena järjestäytynyt rakenne häiriintyy. Tästä seuraa viskositeetin raju nousu, kun järjestäytyneet rakenteet siirtyvät epäjärjestykseen. [9, 15] Useat kokeet ovat osoittaneet järjestäytyneiden rakenteiden olemassaolon pallomaisille hiukkasille ennen dilataatiota ja sen jälkeen [15]. Kokeissa on myös havaittu, että epäjatkovaa dilataatiota havaitaan fluideilla, joissa ei esiinny teorian vaatimia rakenteita, joten kerrosten ajautuminen epäjärjestykseen on mahdollinen tapa dilataation syntymiselle, mutta ei kuitenkaan välttämätön [8].

3.3.2 Hydrorykelmä (hydrocluster) teoria

Leikkausnopeuden ollessa alhainen häiritty hiukkasjärjestelmä kykenee nopeasti palautumaan alkuperäiseen tilaansa Brownin liikkeen ja molekyylien välisten voimien ansiosta [15]. Leikkausnopeuden kasvaessa, muodostunut jännitys kasvaa suuremmaksi kuin hiukkasten väliset voimat, jonka seurauksena hiukkasjärjestelmä ei kykene vastustamaan ulkopuolisen voiman aiheuttamaa rakenteen muutosta, jolloin muodostuu epävakaita hydrorykelmiä (hydrocluster) [9, 15]. Rykelmien muodostumisen seurauksena fluidin virtaus heikkenee ja viskositeetti kasvaa merkittävästi [9]. Koska kyseessä on kuitenkin epävakaa rakenne, hajoavat rykelmät nopeasti, kun fluidiin kohdistettu ulkopuolinen voima menee nolnaan [15]. Hydrorykelmä teoriaa voidaan hyödyntää, kun kyseessä on fluidi, jonka dilataatio on jatkuvaa (CST) [10].

3.3.3 Hiukkashäirintä (particle jamming) teoria

Hiukkaskoon kasvaessa suuremmaksi kuin $4 \mu\text{m}$, hiukkasten välinen vuorovaikutus lisääntyy ja Brownin voima heikkenee [15]. Kun tällaiseen suspensioon kohdistuu leikkausjännitys, hiukkaset joutuvat kosketuksiin ja kokoontuvat ryhmiksi suljetussa tilassa, josta seuraa paikallinen tukos, jolloin fluidin virtaus estyy ja viskositeetti kasvaa [10]. Fluidin viskositeetti kasvaa nopeasti useita kertaluokkia, joten suspensiossa esiintyy epäjatkovaa dilataatiota (DST), jonka kuvaamiseen teoriaa hyödynnetään [15].

3.3.4 Kosketus-reologia malli (contact rheology model, CRM)

CRM kytkee siirtymisen jatkuvasta dilataatiosta epäjatkuvaan dilataatioon [16]. Hiukkasten välisen kosketusvoiman ollessa pieni, fluidin voiteluvoimalla on merkitystä. Sen sijaan leikkausjännityksen kasvaessa myös hiukkasten välinen kosketusvoima kasvaa, jonka seurauksena hiukkasten välillä oleva nestekalvo tuhoutuu. Tämän vuoksi hiukkasten väliset kontaktit lisääntyvät ja niiden välillä olevan kosketusvoiman ja kitkan merkitys kasvaa. [10]

Kriittisen leikkausjännityksen alapuolella, fluidilla on alhainen viskositeetti, jossa ei ilmene kosketusta tai kitkaa hiukkasten välillä. Kun leikkausjännitys kasvaa ohi kriittisen arvon, fluidin viskositeetti kasvaa ja syntyy tukos, jonka seurauksena fluidi jähmettyy [10].

4 Dilatantin fluidin sovellukset

Tässä luvussa esitellään muutamia dilatantin fluidin käyttökohteita ja tutustutaan hieman tarkemmin sen hyödyntämiseen puettavissa suojarusteissa.

Dilataatio aiheuttaa haasteita esimerkiksi erilaisissa fluidien kuljetusjärjestelmissä, ja kyseistä ominaisuutta ei ole aina tarkasteltu mahdollisuuksien kannalta [4]. 1990-luvun puolivälin jälkeen nanoteknologian kehittymisen myötä dilataation tuomat mahdolliset tunnistetaan paremmin ja sitä osataan soveltaa monenlaisiin käyttötarkoituksiin, ja siitä on tullut merkittävä tutkimuskohde erityisesti erilaisiin turvallisuutta parantaviin materiaaleihin ja laitteisiin [4, 15].

Dilatanttityypistä fluidia hyödyntäviä patenteja on rekisteröity useisiin erilaisiin käyttökohteisiin. Esimerkiksi urheilun saralla on rekisteröity patentit hammassuojille, hanskoille sekä kengille. Dilatanteja fluideja voidaan hyödyntää myös niskatuissa ja istuimien pehmusteissa parantamassa turvallisuutta onnettomuuksien sattuessa. [7]

4.1 Suojarusteet (body armor)

Dilatantin fluidin tärkein ja tutkituin sovelluskohde on puettavat suojarusteet, sillä ne mahdollistavat samaan aikaan hyvän liikkuvuuden ja suojan erilaisilta iskuilta [7]. Jotta dilatanttia fluidia voidaan hyödyntää puettavissa suojarusteissa, tulee sen olla myrkytön, kevyt sekä stabiili ulkoisen lämpötilan vaihtelun suhteen. Samoin sen suorituskyvyn tulee olla vakaa. [15]

Dilatantilla fluidilla vahvistettuja suojarusteita on tutkittu kvasistaattisissa, matalan ja suuren nopeuden olosuhteissa, sekä neulojen, piikkien, ammusten ja veitsien avulla [9]. Tutkimuksissa on havaittu, että dilatantin fluidin yhdistäminen kankaaseen lisää erityisesti sen iskunkestävyyttä ja jonkin verran leikkauskestävyyttä [17]. Esimerkiksi puukotuksessa vahvistamattoman kankaan kuidut pääsevät helposti liikkumaan terän tieltä, jolloin terä lävistää kankaan helposti. Sen sijaan dilatantilla fluidilla vahvistetussa kankaassa dilataatio estää lankojen liikkumista tehokkaasti, joten kankaan pistokestävyys paranee. Puolestaan leikkaamisen kohdalla kyse on kuitujen murtumisesta, joten kuidun vahvuudella on enemmän merkitystä kuin

kuitujen liikkumattomuudella. [15]

Puettavissa suojarusteissa dilatantti fluidi yhdistetään kankaan kuitumateriaaliin. Suosituimpia kankaita ovat esimerkiksi Kevlar ja nylon. [15, 17] Dilatantilla fluidilla vahvistetun kankaan valmistus on monivaiheinen prosessi. Ensin muodostetaan homogeeninen suspensio kiinteistä hiukkasista ja kantonesteestä sekoittamalla niitä, hyödyntäen joko magneettisia, mekaanisia tai ultraäänilaitteita. Koska dilatantit fluidit ovat hyvin paksuja nesteitä, niitä laimennetaan runsaalla alkoholilla määrällä, jotta kankaiden kyllästys olisi helpompaa. Kankaat lisätään laimennettuun seokseen, jolloin fluidi kulkeutuu kuitujen väliin. Fluidissa uittamisen jälkeen ylimääräinen neste poistetaan mankeloimalla ja lopuksi kankaat kuivataan ilmastavasti kuumassa tilassa, jotta alkoholi saadaan haihdutetuksi kankaista. [9]

Lupaavista tuloksista huolimatta nestemäisten suojarusteiden kehityksessä on kohdattu myös ongelmia, kuten kantonesteiden vuotaminen ja haihtuminen, kosteusherkkyys sekä kankaan heikentynyt hengittävyys. [7]

Dilatanttia fluidia hyödynnetään myös rakenteiden ja erilaisten laitteiden suojauksessa, niistä lisää seuraavissa alaluvuissa.

4.2 Mukautuva rakenne (adaptive structure)

Dilatantilla fluidilla vahvistetut voileipäarakenteet (sandwich) kykenevät reagoimaan ulkoiseen kuormitukseen, ilman että ne tarvitsevat ulkoista energiaa, kuten esimerkiksi sähköä, toimiakseen. Viskositeetin kasvun seurauksena ne vaimentavat tehokkaasti värinää ja imevät hukkaenergiaa. [10] Dilatanttia fluidia hyödynnetään voileipäarakenteessa kahdella tavalla, joko täyttämällä suoraan rakenteen ydin tai sitten kuoret dilatantilla fluidilla. Voileipärakennetta hyödynnetään laajasti ilmakehän-, avaruuden- sekä laivanrakennusteollisuudessa, sen keveyden ja vahvuuden vuoksi. [15]

Samoin dilatantin fluidin ominaisuuksia voidaan hyödyntää komposiittirakenteissa, joilta halutaan mahdollisuutta säädellä niiden jäykkyyttä ja vaimennuskykyä. [7, 10]

4.3 Älykäs materiaali (smart structure)

Dilatanttia fluidia voidaan hyödyntää älykkäänä materiaalina, joka havaitsee ja reagoi ympäristön muutoksiin. Sen avulla voidaan esimerkiksi minimoida laitteiston vaurioita, kun suoritetaan alaspäin suunnattuja porauksia [7, 18]. Tällöin dilatantti fluidi toimii tiivisteenä kontrolloiduissa pulssinmurtamisissa, jolloin fluidin dilataatio hidastaa ja jopa pysäyttää laitteiston ylöspäin suuntautuvan liikkeen, joka on seurausta sytytetyn ajoaineen aiheuttamasta voimasta nesteeseen [7, 18].

Dilatanttia fluidia voidaan hyödyntää myös räjähdysenestoaineena (anti-explosion), jolloin fluidi absorboi ulkoisen iskuenergian ja mahdollistaa samalla elektrolyytin säilymisen vakaana akun sisällä [15].

Myös vaimentimissa voidaan soveltaa dilatantin fluidin tuomia mahdollisuuksia värinän vähentämisessä. Tällaisen vaimentimen toiminta pohjautuu männän liikkumiseen kammion sisällä, jolloin dilatanttia fluidia työnnetään männän ja sylinterin välisen aukon läpi. Tämän seurauksena fluidissa tapahtuu dilataatio, ja viskositeetin kasvu absorboi energiaa, joten värinä vaimenee. [10]

5 Päätäntö

Ei-newtonisen dilatantin fluidin erottaa muista ei-newtonisista fluideista sen ajasta riippumaton käytös leikkausjännityksen kasvun suhteen. Dilatantti fluidi kokee dilataation, eli leikkauspaksuuntuu, kun leikkausnopeus ylittää kriittisen arvon. Koska dilataatioon vaikuttavat monet tekijät, kuten hiukkaskoko, hiukkasten tilavuusosuus ja lämpötila, on luultavasti mahdotonta kehittää yhtä yhtenäistä teoriaa dilataation taustalle. Myös dilataation mahdollisuus olla jatkuvaa tai epäjatkovaa aiheuttaa omat haasteensa teorioiden kehittämiseksi. Jatkuvan dilataation selittämiseksi voidaan hyödyntää esimerkiksi hydrorykelmä teoriaa ja epäjatkuvan dilataation tapauksessa ODT tai hiukkashäirintä teoriaa. CRM malli puolestaan pyrkii selittämään molemmat dilataation muodot samassa teoriassa.

Nanoteknologian kehittymisen myötä dilatanttien fluidien hyödyntäminen erilaisissa sovelluksissa on yleistynyt. Dilataation aiheuttamaa viskositeetin kasvua hyödynnetään esimerkiksi vähentämään tärinää, jolla pyritään suojautumaan laitevaurioilta. Kuitenkin tärkein ja tutkituin dilatantin fluidin sovelluskohde ovat erilaiset puettavat suojarusteet, niin urheiluun, vapaa-aikaan kuin armeijan käyttöön. Dilatantin fluidin yhdistäminen kankaan kuituihin mahdollistaa hyvän suojan erityisesti erilaisia kovia iskuja vastaan, mutta mahdollistaa samalla paremman liikkuvuuden kuin vastaavan suojan antava vahvistamaton kangas.

Vaikka dilatanttien fluidien tutkimus on edistynyt huomasti viimeisten vuosikymmenten aikana, on alalla vielä runsaasti tarvetta uusille tutkimuksille. Tällä hetkellä tutkimus tapahtuu pääosin tietynlaisissa olosuhteissa laboratorioissa, joten esimerkiksi erilaisten suojarusteiden reagointia muuttuviin ympäristöolosuhteisiin ei vielä tunneta. Kuitenkin tiedetään, että lämpötilan nousu nostaa myös kriittistä leikkausjännitystä, joten suojauksen varmistamiseksi lämpötilan vaikutusta pitäisi pystyä vähentämään. Samoin yksittäisten iskujen aiheuttamat vahingot ovat hyvin erilaisia kuin käytössä varusteeseen kohdistuvat kaikki väännöt ja puristukset. Myös dilatantin fluidin valmistuksen teollistumiseen ja varastointiin liittyy haasteita. [10, 15]

Dilatantille fluidille on kehitelty erilaisia numeerisia malleja [19–21], mutta yhdeksi

tulevaisuuden tutkimuskohteista sopisi tekniseen laskentaan sopivan numeerisen mallin kehittäminen [15].

Koska kyseessä olevan tutkielman tarkoitus oli tutustuttaa lukija dilatantteihin fluideihin kokonaisuudessaan, voisi tutkielmaa laajentaa perehtymällä syvällisemmin esimerkiksi johonkin yksittäiseen teoriaan tai käyttökohteeseen.

Lähteet

- [1] P. C. Barman ym. ”An Overview of Non-Newtonian Fluid”. *International Journal of Applied Science and Engineering* 4.2 (joulukuu 2016). Num Pages: 5 Place: New Delhi, India Publisher: New Delhi Publishers, s. 97–101. ISSN: 23210745. DOI: 10.5958/2322-0465.2016.00011.3. URL: <https://www.proquest.com/docview/1879180387/abstract/1A459B8A87ED4C74PQ/1>.
- [2] L. Yang ja K. Du. ”A comprehensive review on the natural, forced, and mixed convection of non-Newtonian fluids (nanofluids) inside different cavities”. *J Therm Anal Calorim* 140.5 (kesäkuu 2020), s. 2033–2054. ISSN: 1388-6150, 1588-2926. DOI: 10.1007/s10973-019-08987-y. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s10973-019-08987-y>.
- [3] F. M. White ja R. Y. Chul. *Fluid mechanics*. Eight edition, in SI units. New York: McGraw-Hill, 2016. 773 s. ISBN: 978-981-4720-17-5.
- [4] K. N. Cossa. ”Basic concepts on rheology and application of shear-thickening fluids in protective gear”. *SN Applied Sciences* 1.10 (lokakuu 2019). Num Pages: 1284 Place: London, Netherlands Publisher: Springer Nature B.V., s. 1284. ISSN: 25233963. DOI: 10.1007/s42452-019-1315-5. URL: <https://www.proquest.com/docview/2788420598?sourcetype=Scholarly%20Journals>.
- [5] M. C. Bourne. *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. San Diego, UNITED STATES: Elsevier Science & Technology, 2002. ISBN: 978-0-08-049133-2. URL: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/jyvaskyla-ebooks/detail.action?docID=294600>.
- [6] D. S. Vivwanath ym. *Viscosity of Liquids*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. 660 s. ISBN: 978-1-4020-5481-5. DOI: 10.1007/978-1-4020-5482-2. URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-5482-2>.
- [7] J. Ding ym. ”Review on shear thickening fluids and applications”. *Textiles and Light Industrial Science and Technology* 2.4 (2013).

- [8] E. Brown ja H. M. Jaeger. "Shear thickening in concentrated suspensions: phenomenology, mechanisms and relations to jamming". *Rep. Prog. Phys.* 77.4 (1. huhtikuuta 2014), s. 046602. ISSN: 0034-4885, 1361-6633. DOI: 10.1088/0034-4885/77/4/046602. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/77/4/046602>.
- [9] S. Gürgen, M. C. Kuşhan ja W. Li. "Shear thickening fluids in protective applications: A review". *Progress in Polymer Science* 75 (joulukuu 2017), s. 48–72. ISSN: 00796700. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2017.07.003. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670017300035>.
- [10] Y. Yan, M. Wei ja Z. Huang. "Review on shear thickening fluid and its applications in vibration reduction". *Mater. Res. Express* 11.1 (1. tammikuuta 2024), s. 012001. ISSN: 2053-1591. DOI: 10.1088/2053-1591/ad18ee. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2053-1591/ad18ee>.
- [11] M. Wyart ja M. E. Cates. "Discontinuous Shear Thickening without Inertia in Dense Non-Brownian Suspensions". *Phys. Rev. Lett.* 112.9 (6. maaliskuuta 2014). Publisher: American Physical Society, s. 098302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.098302. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.112.098302>.
- [12] "Shear thickening fluid and its composite materials". *Materials Review* 31.7 (2018), s. 59–64. ISSN: 1005-023X. URL: http://www.mat-rev.com/cldb/ch/reader/view_abstract.aspx?doi=10.11896/j.issn.1005-023X.2017.07.009.
- [13] B. Maranzano ja N. Wagner. "The effect of particle size on reversible shear thickening of concentrated colloidal dispersions". *The Journal of Chemical Physics* 114 (15. kesäkuuta 2001). DOI: 10.1063/1.1373687.
- [14] X.-Q. Liu ym. "Temperature induced gelation transition of a fumed silica/PEG shear thickening fluid". *RSC Adv.* 5.24 (11. helmikuuta 2015). Publisher: The Royal Society of Chemistry, s. 18367–18374. ISSN: 2046-2069. DOI: 10.1039/C4RA16261G. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2015/ra/c4ra16261g>.
- [15] M. Wei, K. Lin ja L. Sun. "Shear thickening fluids and their applications". *Materials & Design* 216 (1. huhtikuuta 2022), s. 110570. ISSN: 0264-1275. DOI:

- 10.1016/j.matdes.2022.110570. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127522001915>.
- [16] N. Fernandez ym. "Microscopic Mechanism for Shear Thickening of Non-Brownian Suspensions". *Phys. Rev. Lett.* 111.10 (3. syyskuuta 2013), s. 108301. ISSN: 0031-9007, 1079-7114. DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.108301. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.111.108301>.
- [17] M. J. Decker ym. "Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-treated fabrics". *Composites Science and Technology* 67.3 (1. maaliskuuta 2007), s. 565–578. ISSN: 0266-3538. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.08.007. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353806002983>.
- [18] *US Patent for Method to reduce movement of a CPF device via a shear-thickening fluid Patent (Patent # 4,982,792 issued January 8, 1991) - Justia Patents Search*. URL: <https://patents.justia.com/patent/4982792> (viitattu 22.05.2024).
- [19] H. Nakanishi, S.-I. Nagahiro ja N. Mitarai. "Fluid dynamics of dilatant fluids". *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 85.1 (2012). ISSN: 1550-2376. DOI: 10.1103/PhysRevE.85.011401.
- [20] W. H. Boersma, J. Laven ja H. N. Stein. "Computer simulations of shear thickening of concentrated dispersions". *Journal of Rheology* 39.5 (syyskuu 1995), s. 841–860. ISSN: 0148-6055, 1520-8516. DOI: 10.1122/1.550621. URL: <https://pubs.aip.org/sor/jor/article/39/5/841-860/239087>.
- [21] L. Fusi. "Shear Flows of Dilatant Fluids with Limited Shear Rates: Analytical Results and Linear Stability Analysis". *Fluids* 8.1 (2023). ISSN: 2311-5521. DOI: 10.3390/fluids8010025.