

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

TP1 Teknologiakartoitus

Työpakettiraportti 4.6.2025

Vastuullinen johtaja

Lasse Pulkkinen

Tutkimusapulainen

Joonas Pyykkö

NextGenMix

1.6.2023–31.8.2025

Hanke on Euroopan unionin osarahoittama Etelä-Savon maakuntaliiton kautta.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



Sisällys

1 Esipuhe	3
2 Mikrosekoittuminen	3
3 Wetend materiaalit	6
3.1 TrumpJet®	6
4 Teknologiakarttoitus	8
4.1 Atomisoiminen laserilla	8
4.2 Polttoainesuuttimet	10
4.3 Solids/Liquid Injection Manifold	12
4.4 Ultraäänisekoitus	13
4.5 Avaruusteknologiat	16
4.5.1 Iskuinjektio	17
4.5.2 Pintle injektorit	20
4.5.3 Koaksiaaliset injektorit	21
4.5.4 Painepyörresuutin	23
4.6 Piettosähköiset mekanismit	24
4.7 Suutinratkaisut	26
4.8 Elektrostaattiset atomisaattorit	27
4.9 Vastavirtaus atomisaattorit	28
5 Loppukaneetit	29
Lähdeluettelo	30

NextGenMix-hanke saa rahoitusta Etelä-Savon maakuntaliitolta. Hanketta toteuttavat Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Wetend Technologies ja Valmet ajalla 1.6.2023 – 31.5.2025. Hankkeen kokonaisbudjetti on 361 000 euroa, josta Euroopan unionin rahoitusosuus oli 270 750 (75 %).



**Euroopan unionin
osarahoittama**



stordenso



1 Esipuhe

Työpaketin idea on tuottaa, sellu- ja paperiteollisuuden ulkopuolelta, sekoitustekniikka ratkaisuja biotuotteiden valmistuksen alalle. Ratkaisut valitaan sovellettavuuteen ja innovaatiopotentiaaliin perustuen.

Vertailukohtana voivat olla lääketieteellisuuden, autoteollisuuden (injektioruiskutusteknologia) tai jopa avaruusteknologian (rakettien suihkutusteknologiat) sovellukset. Käytettyjen teknologiaratkaisujen soveltuvuutta arvioidaan uusien tuote- ja designratkaisujen pohjaksi.

Muilta toimialoilta voi löytyä uusia mittaus-, kuvantamis- ja havainnointiteknologioita, erittäin nopeiden sekoitusilmiöiden (1–2 s) ja suorituskyvyn ymmärtämiseen.

Tärkeintä työpaketissa on mahdollisen tuotekehityksellisen sisällön tuominen hankkeeseen.

Työpaketin tuottamat ideat voi toimia lähestymissuuntana jatkokehitykselle.

2 Mikrosekoittuminen

Mikrosekoittuvuus on tärkeä osa hanketta ja siksi Kolmogorovin teoria inertiaalisesta turbulenssista, toimii pohjana sille.

Mikro- ja makrosekoittuvuus tapahtuvat tämän teorian pienimmässä pyörreluokassa. Tämän tyyppinen sekoittuvuus tapahtuu pyörreluokassa, jossa viskositeetti hallitsee.

Turbulenttiset pyörteet koostuvat kolmesta pituus skaalasta, integraalinen pituus skaala, Taylorin mikroskaala ja Kolmogorovin skaala (Turbulence Scales and Energy Cascade, 2022).

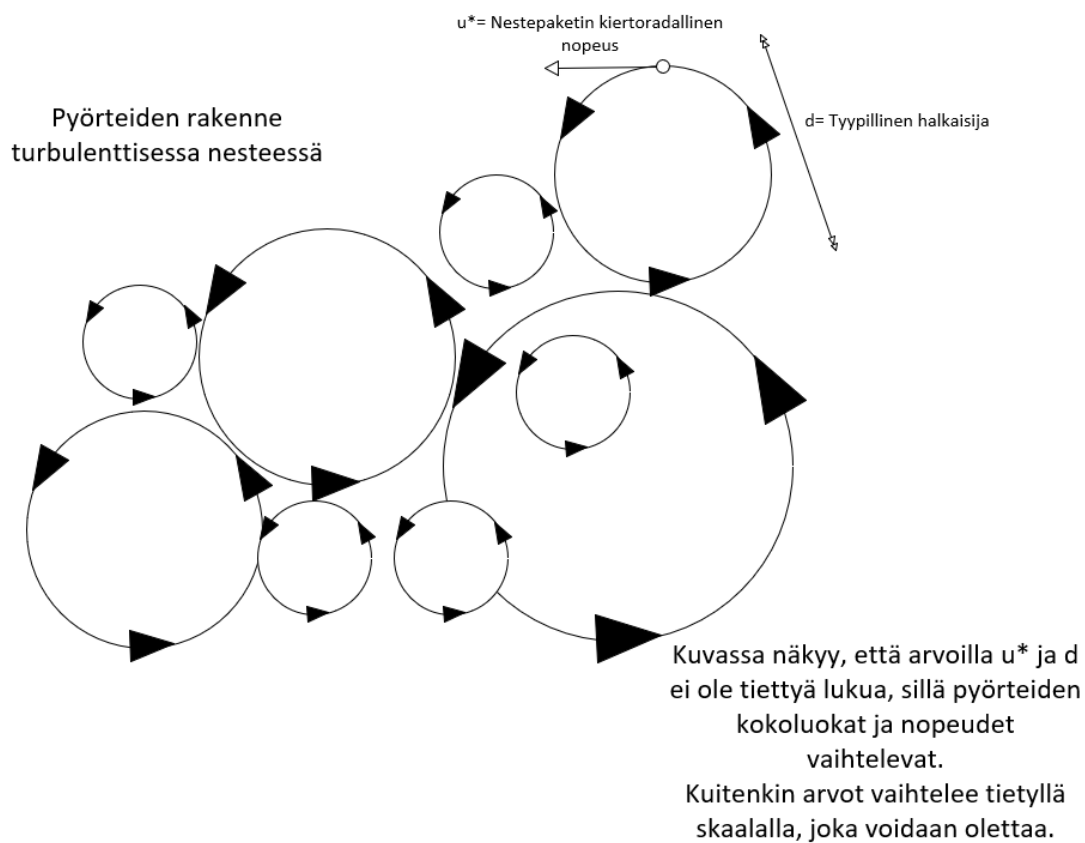
Jos katsotaan Kolmogorovin teoriaa inertiaalisesta turbulenssista, huomataan, että tärkeimmät kaksi perusilmiötä turbulenttisissä nesteissä ovat:

1. Tietyn nestepaketin (fluid parcel) tyypillinen kiertoradallinen nopeus turbulenttisissä pyörteissä (u^*)
2. Näille pyörteille tyypillinen halkaisija (d)



**Euroopan unionin
osarahoittama**





Kuva 1. Pyörteiden rakenne turbulenttisessa ympäristössä.



Euroopan unionin
osarahoittama





Kuva 2. Kuvituskuvaaja pyörteiden käyttäytymiselle stationäärisessä, homogeenisessä ja isotrooppisessa turbulenssissa.

Perustuen A.N. Kolmogorovin teoriaan, kuvaajassa pisteessä $u^*_{\max}/d_{\max}$, pyörre saa energiansa ulkopuolisesta lähteestä. Energia järjestelmässä virtaa suurimmasta skaalasta pienimpään.

Kun mennään pienimpään skaalaan, viskositeettiset skaalat ottavat hallinnan ja energia u^* eli kiertonopeus pysähtyy, johtaen pyörteen kuolemaan ja muuttumiseen lämpöenergiaksi (Turbulence in Fluids, s.a.). Mikrosekoittuminen alkaa tapahtumaan lähellä Kolmogorovin skaalaa.

Energia kulkeutuu, pyörteiden vuorovaikutuksen myötä suurista pieniin ja tätä kutsutaan turbulentsiksi energia kaskadiksi. Tämä syntyy korkeissa reynoldsin luvuissa. Mekanismi perustuu siihen, että kun tietty halkaisija ja kiertonopeus ylittyy, syntyy pienempiä pyörteitä (Turbulence Scales and Energy Cascade, 2022).



Euroopan unionin
osarahoittama



WETEND
Technologies

SOLENIS



Etelä-Savon
maakuntaliitto

ACA
SYSTEMS

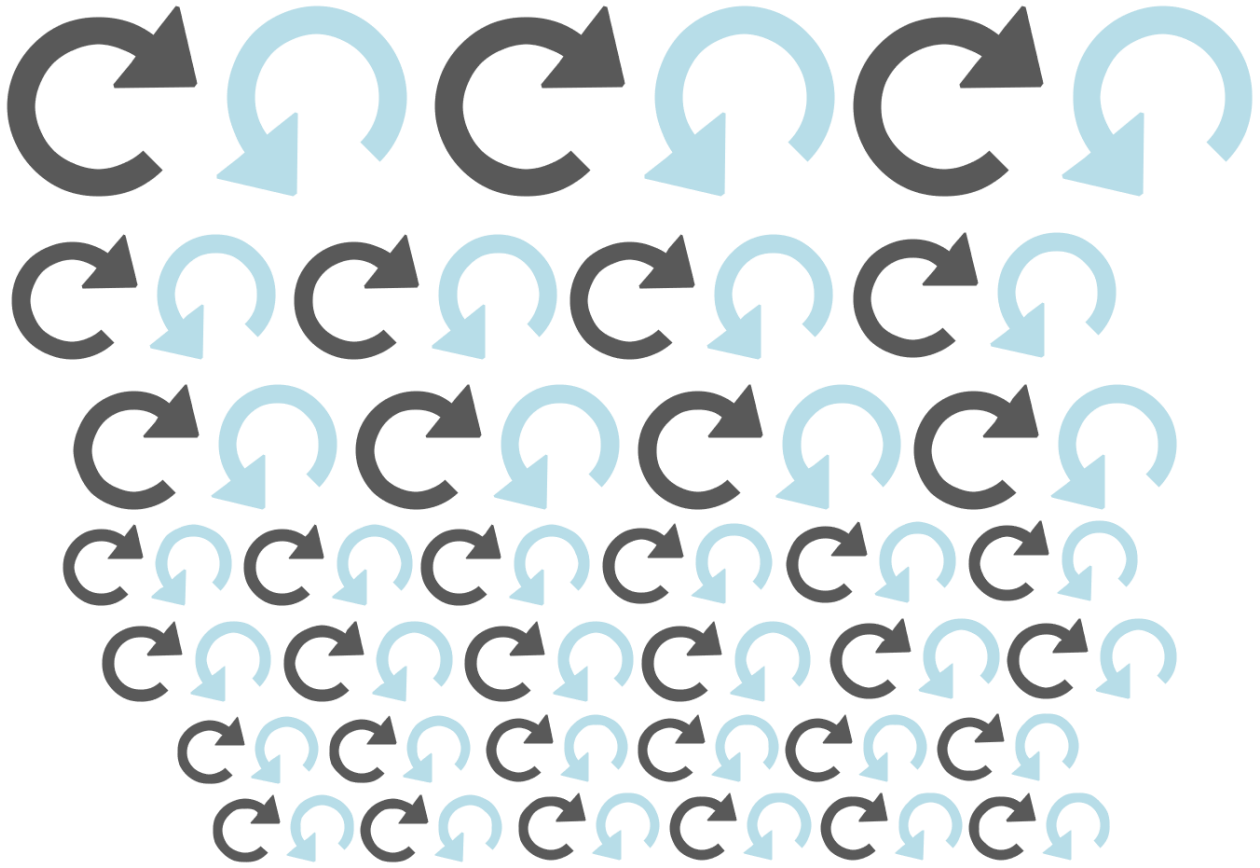
Valmet
FORWARD



stordenso



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Kuva 3. Esimerkki miltä Turbulenttinen energia kaskadi näyttää, siinä isot pyörteet jakavat energiaa pienemmille.

Flash mixing laitteisto tuottaa suuret turbulenttiset voimat, jossa mikrosekoittuminen tapahtuu, tiettyyn pisteeseen asti. Laskennallisesti voisi selvittää, mikä on pienin pyörrekoko tietyssä ympäristössä ja kuinka paljon mikrosekoittuvuutta tapahtuu.

3 Wetend materiaalit

Flash Mixing kehityshanke 2022–2023 toimi yhtenä materiaalina. Siinä esiin tuleva ajatus siitä, että mikropartikkelien käyttäytyminen vedessä on kuin ihminen uimassa siirapissa. Tämä toimii yhtenä ideana TP1 ideoiden suunnittelussa.

3.1 TrumpJet®



Euroopan unionin
osarahoittama



WETEND
Technologies



SOLENIS



Etelä-Savon
maakuntaliitto

ACA
SYSTEMS

Valmet
FORWARD



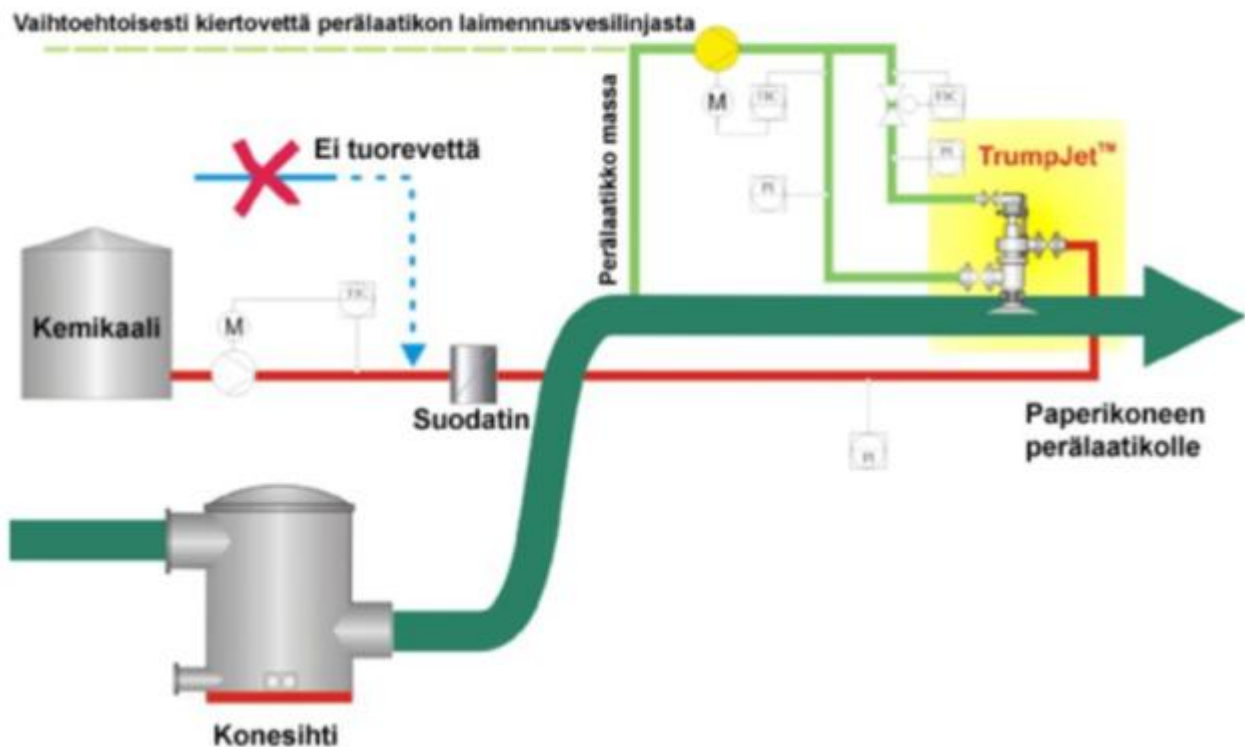
stordenso



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

TrumpJet® on suihkusekoitusteknologia, jonka Wetend- on kehittänyt parantamaan nesteiden sekoitustehokkuutta ja prosessien hallintaa monilla teollisuudenaloilla, mukaan lukien paperi- ja selluteollisuudessa ja sekä kemianteollisuudessa sekä vesi- ja jätevedenkäsittelyssä. TrumpJet® vähentää mekaanisen sekoituksen tarvetta ja säästää täten energiaa sekä vettä, koska sekoitus tapahtuu ennen perälaatikkoa. Lisäksi erittäin nopea sekoitusilmiö useasta suunnasta syöttäen luo homogeenisen sekoituksen n. 20–60 % vähemmällä kemikaalien kulutuksella.

TrumpJet™ järjestelmä retentioaineelle



Kuva 4. TrumpJet® sekoitus lyhyessä kierrossa paperikoneella.

Laitteistosta löytyy todella paljon yksityiskohtaisia huippulaadun innovatiivisia suunnitteluteknillisiä päätöksiä.

Toimintaperiaate voidaan tiivistää erilaisten virtauksien yhdistämiseksi laitteiston sisällä virtausnopeuksilla, jotka tuottavat tässä huippusuunnittelussa ympäristössä tarpeelliset pyörteet sekoituksellisten voimien tuottamiselle.



Euroopan unionin
osarahoittama



WETEND
Technologies



SOLENIS



Etelä-Savon
maakuntaliitto

ACA
SYSTEMS

Valmet
FORWARD



stordenso



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

4 Teknologiakartoitus

Tässä kappaleessa käydään läpi teknologioita eri teollisuuden aloilta, joilla voi olla mahdollisesti potentiaalisia sovelluksia sellu- ja paperiteollisuudessa. Teknologiakartoitus on toteutettu useiden hakukonehakujen ja tieteellisten raporttien avulla. Kartoitus kohdistuu sekä auto- ja lääketieteellisiin, että avaruusteknologiaihin. Myös muita teknologian aloja sovelletaan.

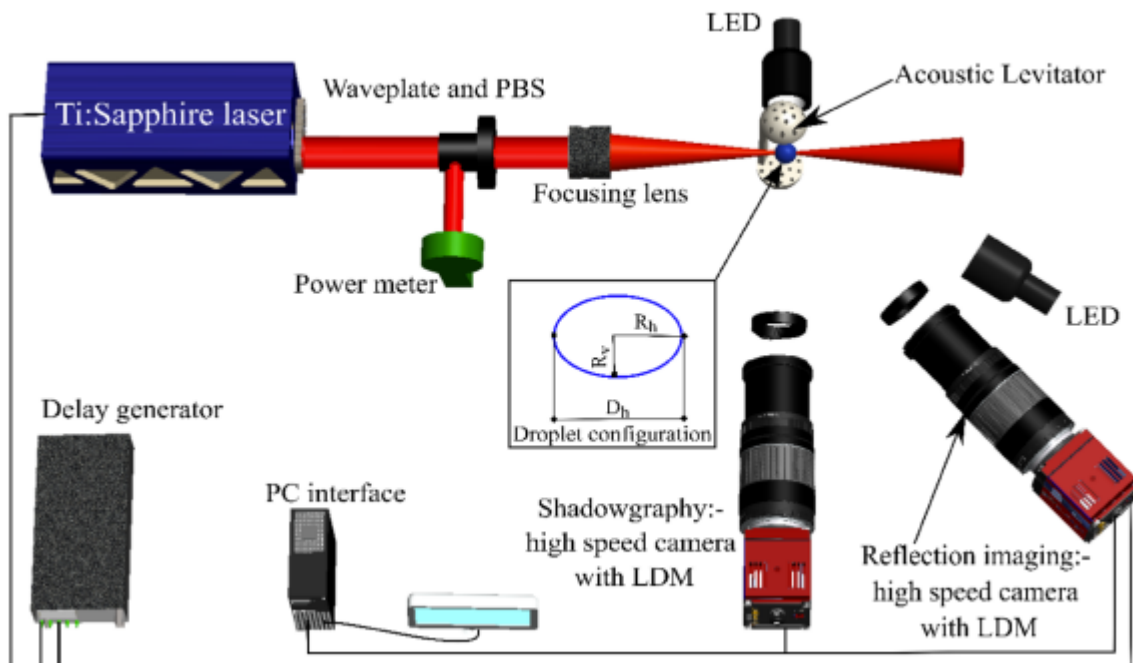
4.1 Atomisoiminen laserilla

Biodieseliä on onnistuttu atomisoimaan/sumuttamaan laserilla (Vishal S. Jagadale, Ym. 2024).

Tutkimus on tehty siten, että biodieselkupla on eristetty levitoimaan ilmassa ääniaaltoja käyttäen. Sitten sitä on pommitettu femtosekuntisella laserpulsilla. Tutkimuksessa laseri tuottaa mikroskooppisen plasmakuplan, dieselkuplan sisälle ja dieselkupla pilkkoutuu pienemmäksi tämän myötä. Femtosekuntisen laserin pulsseja sääten voidaan atomisaatiota muokata kuplan sisällä.

Prosessissa korkean voimakkuuden lasersäteily keskittyy fokaalipisteeseen, minkä toimesta pilkkoutumispiste ylittyy ($> 10^{12} \text{ W/cm}^2$). Tämä johtaa purkautumis- ja palautumisprosessiin, jossa plasma korvautuu vaporisoidulla nesteellä, minkä myötä syntyy mikrokuplia (Vishal S. Jagadale, Ym. 2024).

Kuplan muodostus on moninaista (Vishal S. Jagadale, Ym. 2024).

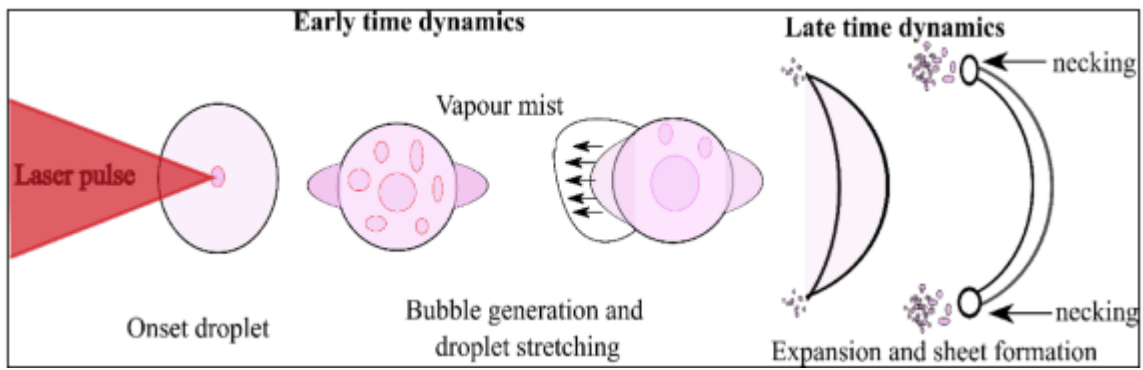


Kuva 5. Artikkelin tutkimuksen koe järjestely (Vishal S. Jagadale, Ym. 2024).

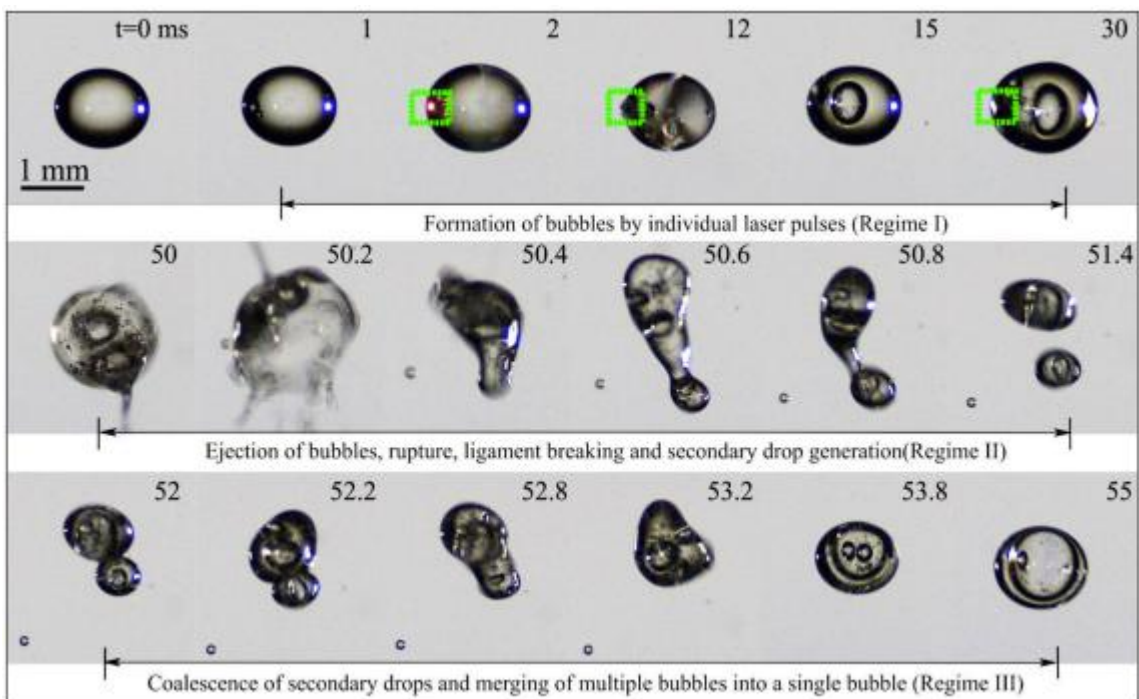


Euroopan unionin
osarahoittama





Kuva 6. Artikkelin tutkimuksen kupladynamiikka (Vishal S. Jagadale, Ym. 2024).



Kuva 7. Artikkelin tutkimuksen kuplan sumuttumisen kuvaaminen millisekuntien tarkkuudella (Vishal S. Jagadale, Ym. 2024).

Tämä artikkelin prosessi voitaisiin mahdollisesti integroida kemikaalien ja virtauksen sekoittumispisteeseen sekoitusprosessissa.



Euroopan unionin
osarahoittama



WETEND
Technologies

SOLENIS



Etelä-Savon
maakuntaliitto

ACA
SYSTEMS

Valmet
FORWARD



stordenso

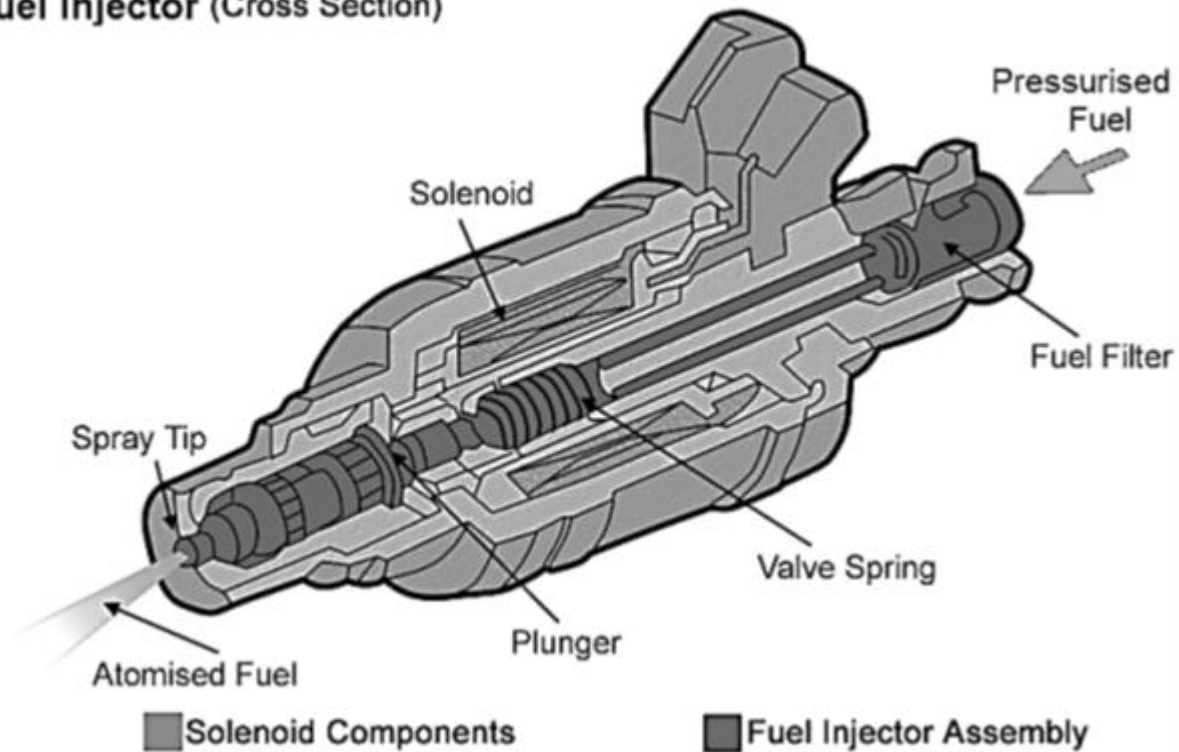


Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu

4.2 Polttoainesuuttimet

Gasoline Direct Injection (GDI), eli suoraruiskutus, on polttomoottoreissa käytetty teknologia, missä polttoainetta syötetään kovalla paineella, erilaisten suutinpääratkaisujen kautta. Kun paine, suuttimen koko ja muoto on optimaaliset, polttoaine sumuuntuu/atomisoituu. Pinta-alan kasvamisen myötä ilman kanssa sekoittuminen paranee ja palaminen tapahtuu puhtaammin. Diesel vaatii täydelliseen palamiseen todella hyvän sumuuntumisen.

Fuel Injector (Cross Section)



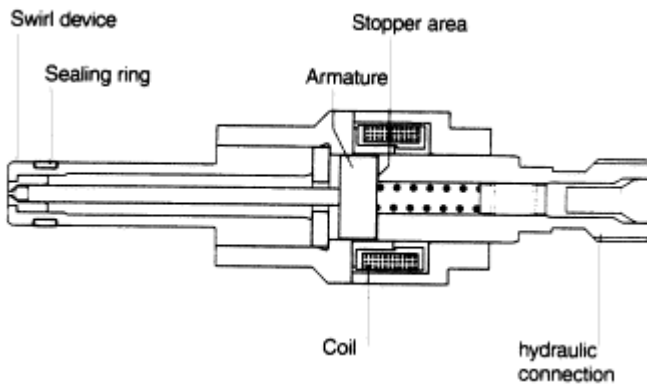
Kuva 8. Poikkileikkauskuva tyypillisestä polttoainesuuttimesta (Yogeshwar).

Tyypillisen polttoaineinjektorin toiminta perustuu säännölliseen tilapäiseen suihkutukseen, jossa tietyin väliajoin suihkutetaan polttoainetta polttokammioon.



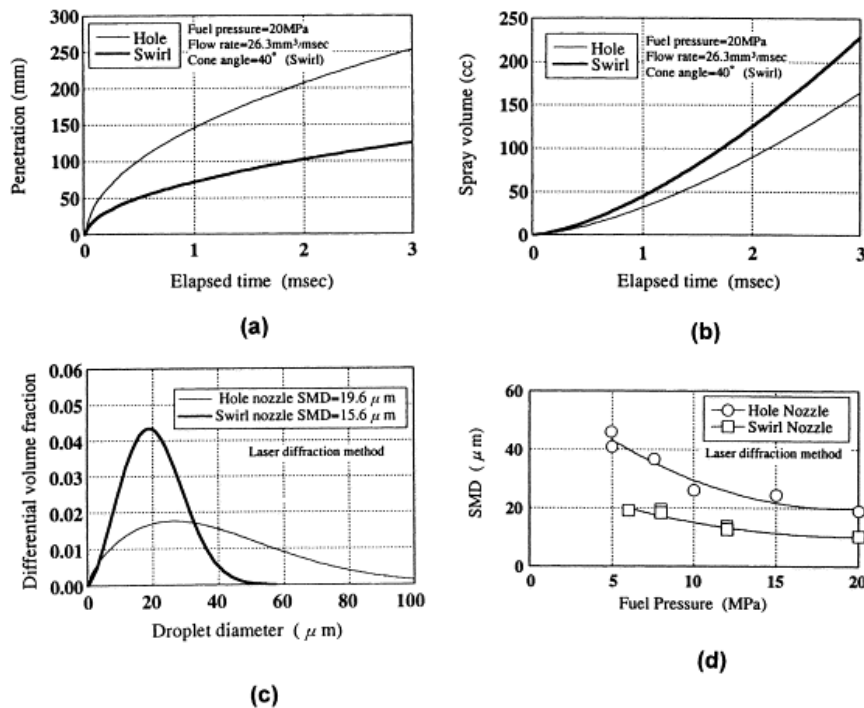
**Euroopan unionin
osarahoittama**





Kuva 9. Poikkileikkauskuva tyypillisestä polttoainesuuttimesta (Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines, 1999).

Erityyppisillä suutinpäillä saadaan erityyppisiä penetraatioita polttoainesuutintekniikassa. Esimerkiksi reiällinen polttoainesuutin 20MPa paineella ja virtausnopeudella 26.3 mm³/millisekunnissa, läpäisykyky ilmassa on 150 mm/millisekunnissa (Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines, 1999).



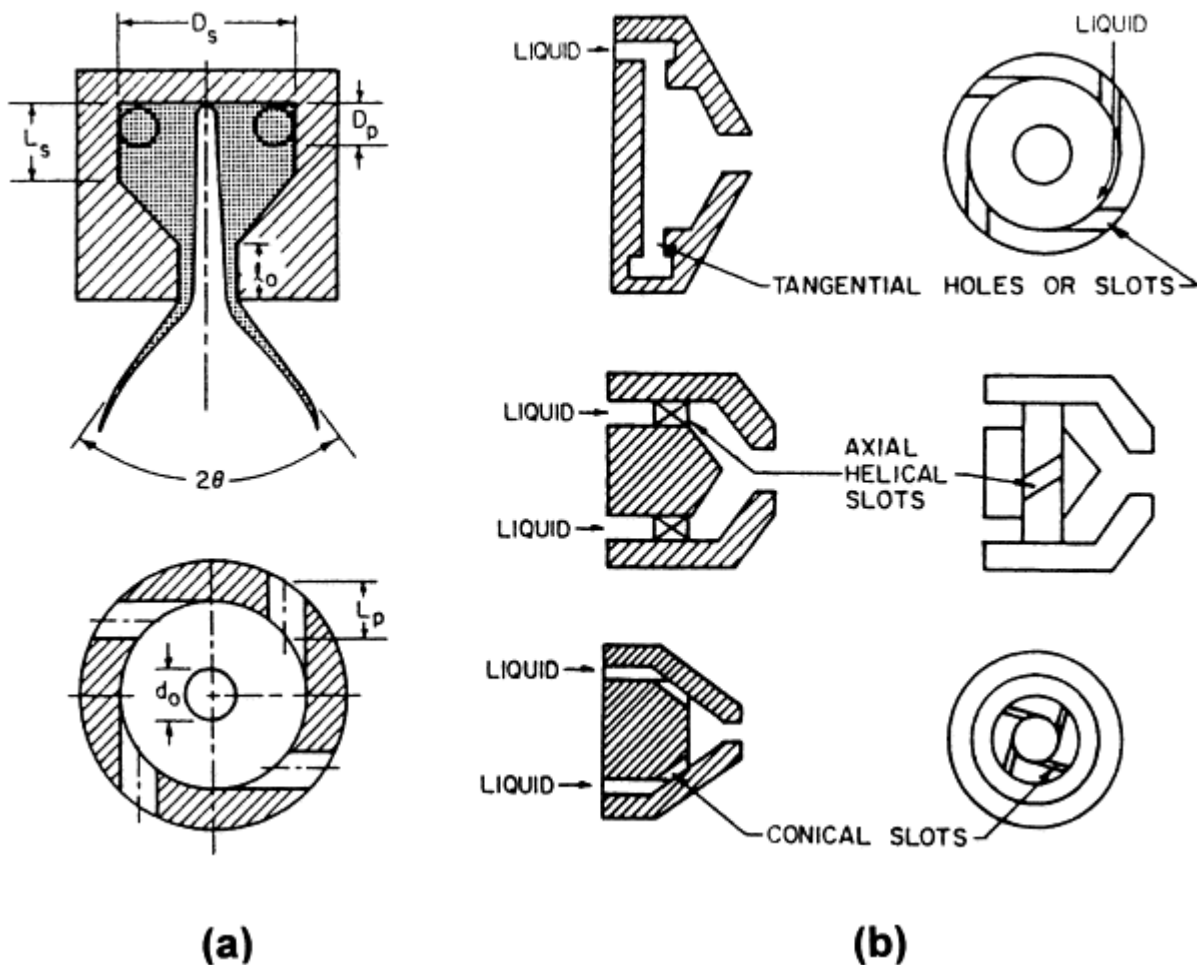
Kuva 10. Dataa erilaisten suutinpäiden toiminnalle polttoaineinjektoreissa (Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines, 1999).

Erilaiset suutinpäarakenteet polttoaineinjektoreissa on mahdollinen kehityssuuntaus kemikaalisekoituksessa.



Euroopan unionin
osarahoittama





Kuva 11. Polttoaineinjektorien suutinpäämalleja (Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines, 1999).

Veden viskositeetti on 55-kertainen verrattuna ilmaan ja 700-kertainen tiheämpää. Tämä tuo haasteen, että injektoripään pitää tehdä viskositeettiin perustuen, 55-kertainen suurempi työpenetraation kannalta veteen. Eli jos käytettäisiin injektoritekniikkaa, täytyy käyttää suutinpäämallia, joka kykenee penetroimaan vettä (Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines, 1999).

4.3 Solids/Liquid Injection Manifold

Solids/Liquid Injection Manifold, eli SLIM, on teknologia, jossa modifioitu roottorikokoonpano on suunniteltu luomaan alipaineella tyhjiö roottorin taakse, jota voidaan käyttää jauhe- tai nestemäisten ainesosien ruiskuttamiseksi suoraan korkean leikkausvoiman alueelle.



Euroopan unionin
osarahoittama



WETEND
Technologies



SOLENIS



Etelä-Savon
maakuntaliitto

ACA
SYSTEMS

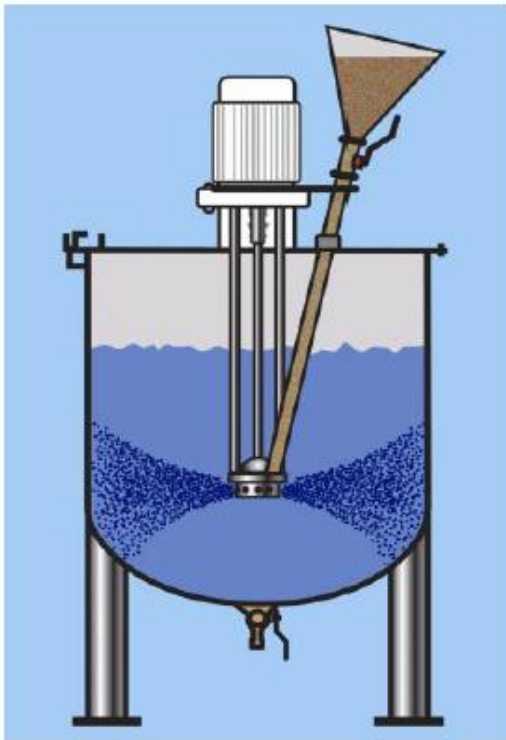
Valmet
FORWARD



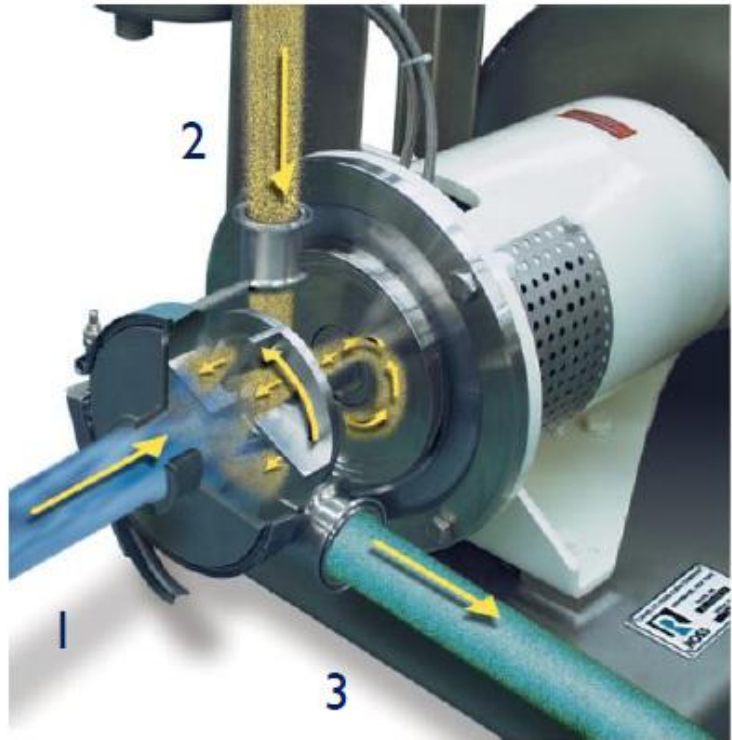
stordenso



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Batch SLIM. As the rotor reaches operating speed, the SLIM valve is opened and powders are quickly drawn into the batch by virtue of the powerful vacuum generated by the ported rotor.



Inline SLIM. The liquid stream (1) enters the mixer and immediately encounters the powder injection (2) at the high shear zone of the rotor/stator assembly. The resulting dispersion (3) is expelled centrifugally through the stator openings at high velocity.

Kuva 12. Erä ja linjasto SLIM sekoitin (Ross Recommended mixing equipment, sa.).

On mahdollista, että inline SLIM sekoittimen voisi rakentaa pienenä mallina, joka voitaisiin integroida paperi- ja kartonkiteknologian sekoitusmenetelmiin (Ross Recommended mixing equipment, sa.).

4.4 Ultraäänisekoitus

Ultraäänisekoitus on mielenkiintoinen, mutta jo pitkään tutkittu aihe paperiteollisuudessa.

Useasti, jos kemiallinen reaktio on pienempi tai yhtä suuri kuin molekyyllisen sekoitusprosessin kesto, reagoitokyky laskee. Tämä piirre nähdään paperi- ja kartonkikoneiden korkeiden nopeuksien ja retentioaineiden reaktiokyvyn optimoimisen ongelmana.



Euroopan unionin
osarahoittama



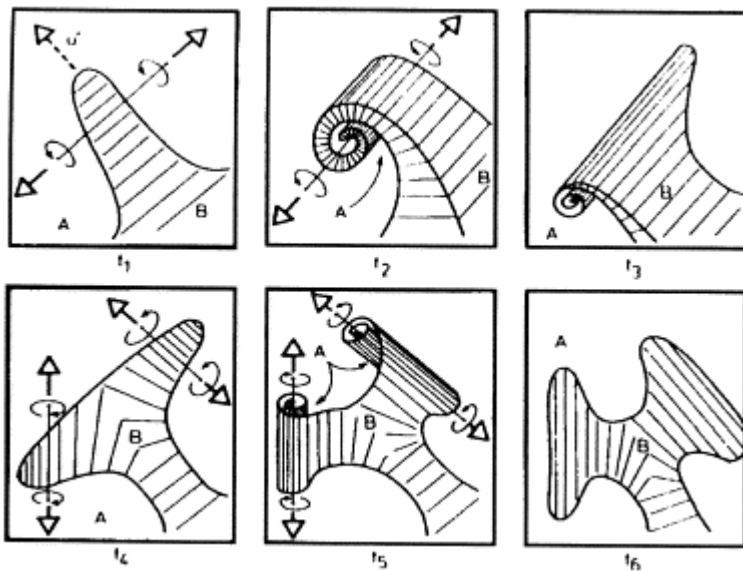
Jos syötetään kemikaaleja liikaa, suurin osa ei ehdi reagoimaan. Jos syöttöä lähdetään optimoimaan, reaktiomäärä heikkenee mitä vähemmän reagoivia kemikaaleja on. Siksi ylisyöttö on varmempaa laadunhallinnassa.

Kolmogorovin teorian mukaan pyörteen, hydrodynaamiset ilmiöt perustuvat nesteen kinemaattiseen viskositeettiin ja energian menetyksnopeuteen.

Kuvasarjassa selittää mikrosekoittumisen periaatteen, kun B injektoidaan mediaaniin A.

Lisää aineen A nielaisua voi tapahtua niin usein, kun energiaa pyörteiden ja kielten luomiselle on.

Näiden deformaatio ajanjaksojen aikana, molekyylillisiä diffuusioreaktioita voi tapahtua A ja B aineiden välillä (H Monnier, Ym. 1999).



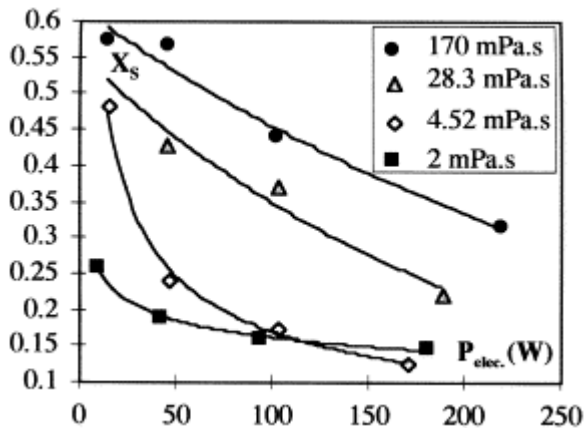
Kuva 13. Mikrosekoittuvuuden ilmiö selitettynä kuvalla, jossa aineeseen A lisätään aine B (H Monnier, Ym. 1999).

Tämä kaikki liittyy sekoituksen teoriaan ja tässä tulee akustinen sekoittaminen kuvioihin. Ultraäänisekoitus voi tuoda tarpeeksi jatkuvaa liikettä mikrosekoittuvuuden toteutumiselle. Ultraäänisekoitus luo kavitaatiokuplia, mitkä luhistuessaan synnyttää liikettä aineessa.



**Euroopan unionin
osarahoittama**





Kuva 14. Akustinen voima (vaaka) vs. Segregaatio (pysty), neljälle eri viskositeetille (H Monnier, Ym. 1999).

Kuvassa 18 nähdään, että kun akustinen voima kasvaa segregaation määrä laskee. Viskositeetti vaikuttaa kuinka paljon pieniä pyörteitä voi syntyä ja kuinka paljon energiaa voi isommista pyörteistä kulkeutua pienempiin. Mikrosekoittuvuus perustui näihin pyörretiloihin. Kun pyörre menee lähemmäksi Kolmogorovin skaalaa, viskoottiset voimat ottaa hallinnan ja pyörrevoimat häviävät.

Miten ultraääntä voidaan käyttää

Ultraääniaaltojen tiedetään vähentävän viskositeettiä nesteissä. Tämä perustuu kolmeen tekijään:

1. Kavitaatio

Kavitaatio tuottaa voimakkaita paine ja lämpötilamuutoksia kavitaatiokuplien myötä, jotka häiritsevät nesteen kykyä pitää itsensä kasassa.

2. Lämpö

Paikallinen lämpötilan nousu johtaa useimmissa nesteissä viskositeetin laskuun.

3. Mekaaninen rasite

Aaltojen synnyttämä oskillaatio johtaa mekaaniseen värinään nesteen sisällä, joka vaikuttaa sen kykyyn pitää itsensä kasassa.

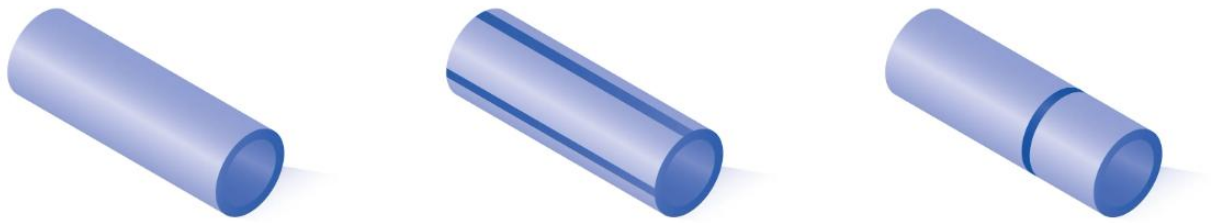
Kun sekoittumisen loppumista pidennetään vähentämällä viskositeettiä, kynnys mikrosekoittumisen pysähtymiselle saadaan ohitettua.

Miten ultraääntä voisi testata? Rakenne, jossa keskenään sekoitettavat aineet, pumpataan PTZ keramiikkaputken läpi.



Euroopan unionin
osarahoittama



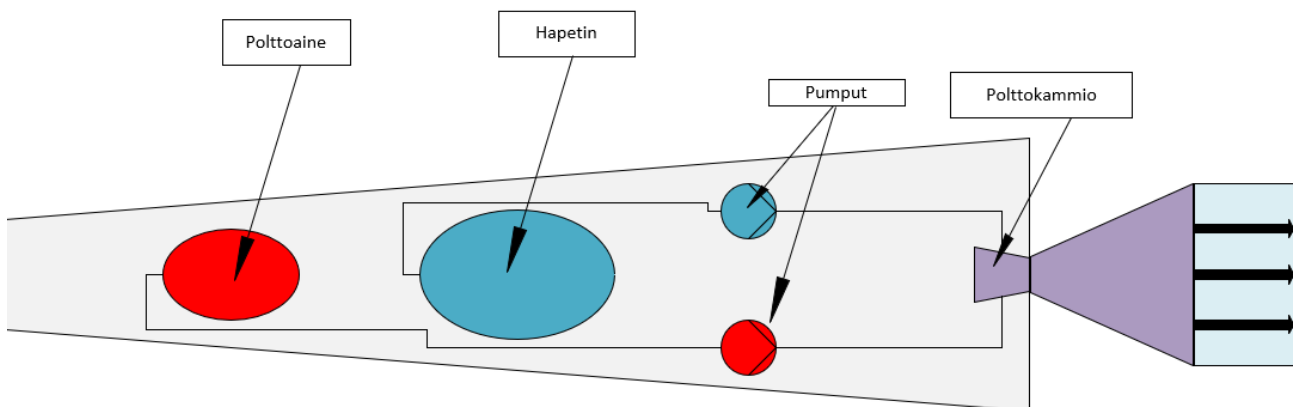


Kuva 15. Putkimallisia PTZ keramiikkaputkia.

4.5 Avaruusteknologiat

Avaruusteknologioiden oleellisin osa-alue ovat rakettimoottorit, tässä raportissa keskitytään ensisijaisesti nesterakettimoottoreihin.

Nesterakettimoottoreissa käytetään hapetinta ja polttoainetta. Molemmat pumpataan polttokammioon, missä hankkeen osalta mielenkiintoisin prosessi, eli sekoittuminen tapahtuu (Topic 6: Injector Design, 2022).



Kuva 16. Nesterakettimoottorin toimintaperiaate.

Teknologiamielessä polttoaineinjektio ei eroa autojen polttoaineinjektoriteknikasta paljoa. Molemmissa käytetään hyödyksi pyörrevoimia, mitkä suihkuttavat polttoaineen ulos polttokammioon, jossa se poltetaan mekaaniseksi energiaksi tai työntövoimaksi.

Rakettitekologiassa ei ole tietenkään yhdenlaisia injektioteknologioita. Esimerkkinä Helios mallin injektorijärjestelmä tai koaksiaaliset mallit. Helios on iskuinjektio malli (Topic 6: Injector Design, 2022).



**Euroopan unionin
osarahoittama**



Ydinideat ovat:

Sekoitus

- Hyvä sekoittuvuus, pyörrevoimien, kulmien ja paineiden myötä.

Atomisaatio

- Edesauttaa vaporisaatiota, koska pisara on helpompi vaporisoida, kuin lasillinen.
- Mitattava ja säädettävä ”keskimääräisen partikkelikoon” avulla

Vaporisaatio

- Palamisvaihe vaatii tämän osion toimiakseen tehokkaasti.
- Lisäksi kulmat ja syöttönopeuden vaikuttaa vaporisaation sijaintiin polttokammiossa, liian lähellä poistumisaukkoa aiheuttaa epästabiilin palamisen.

4.5.1 Iskuinjektio

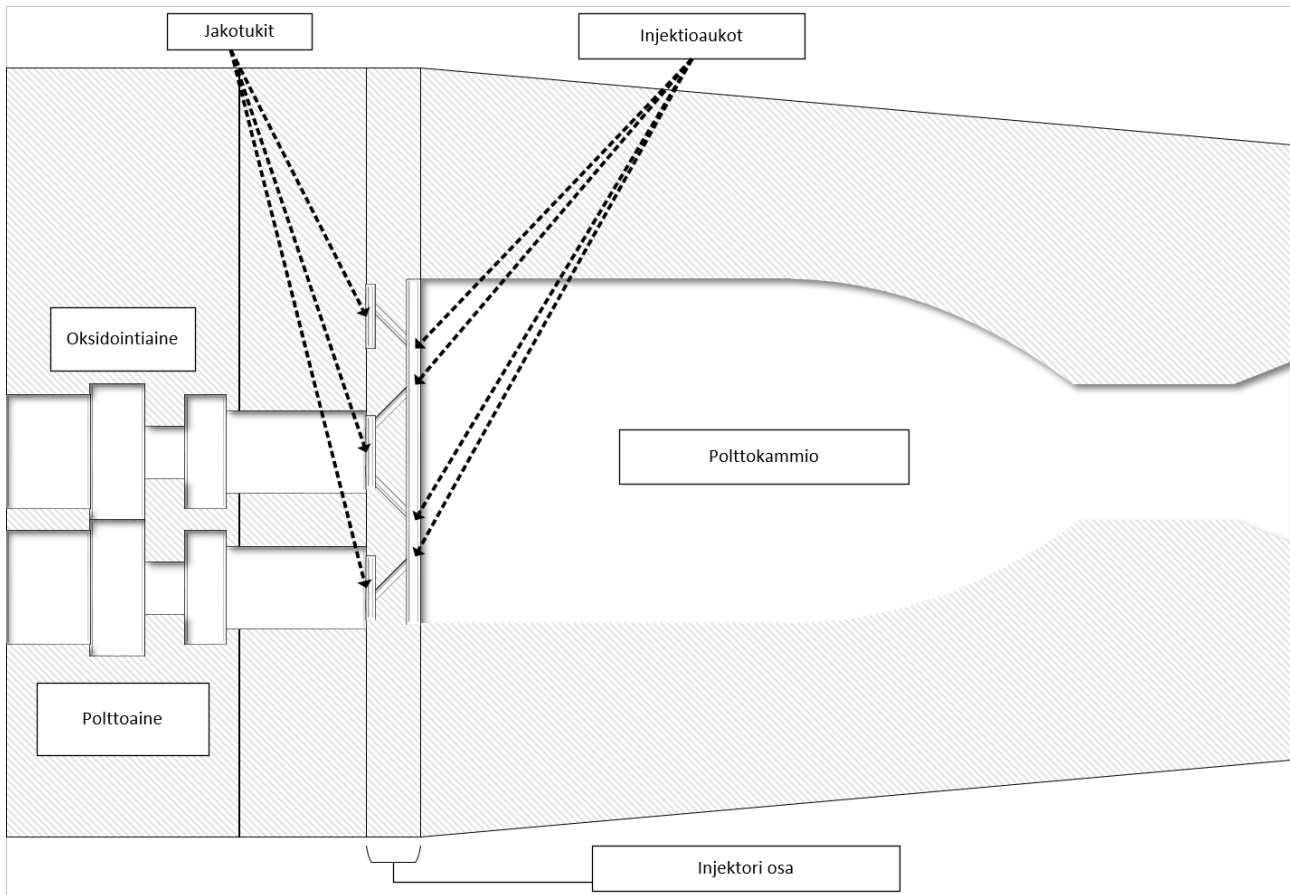
Kuvassa on Helios mallin injektorijärjestelmä. Kuten kuvasta näkee keskiosasta, suihkutetaan oksidointiainetta jakotukin läpi vinosti porattujen injektioaukkojen avulla suoraan polttoaine virtaukseen (Topic 6: Injector Design, 2022).

Yksinkertaisuudessaan polttoaine ja oksidointiaine eli hapetin törmäävät toisiinsa ja sekoittuvat suurien pyörrevoimien kanssa (Topic 6: Injector Design, 2022).



**Euroopan unionin
osarahoittama**





Kuva 17. Leikkauskuva Helios mallin injektiotekniikasta.



Euroopan unionin
osarahoittama



WETEND
Technologies



SOLENIS



Etelä-Savon
maakuntaliitto

ACA
SYSTEMS

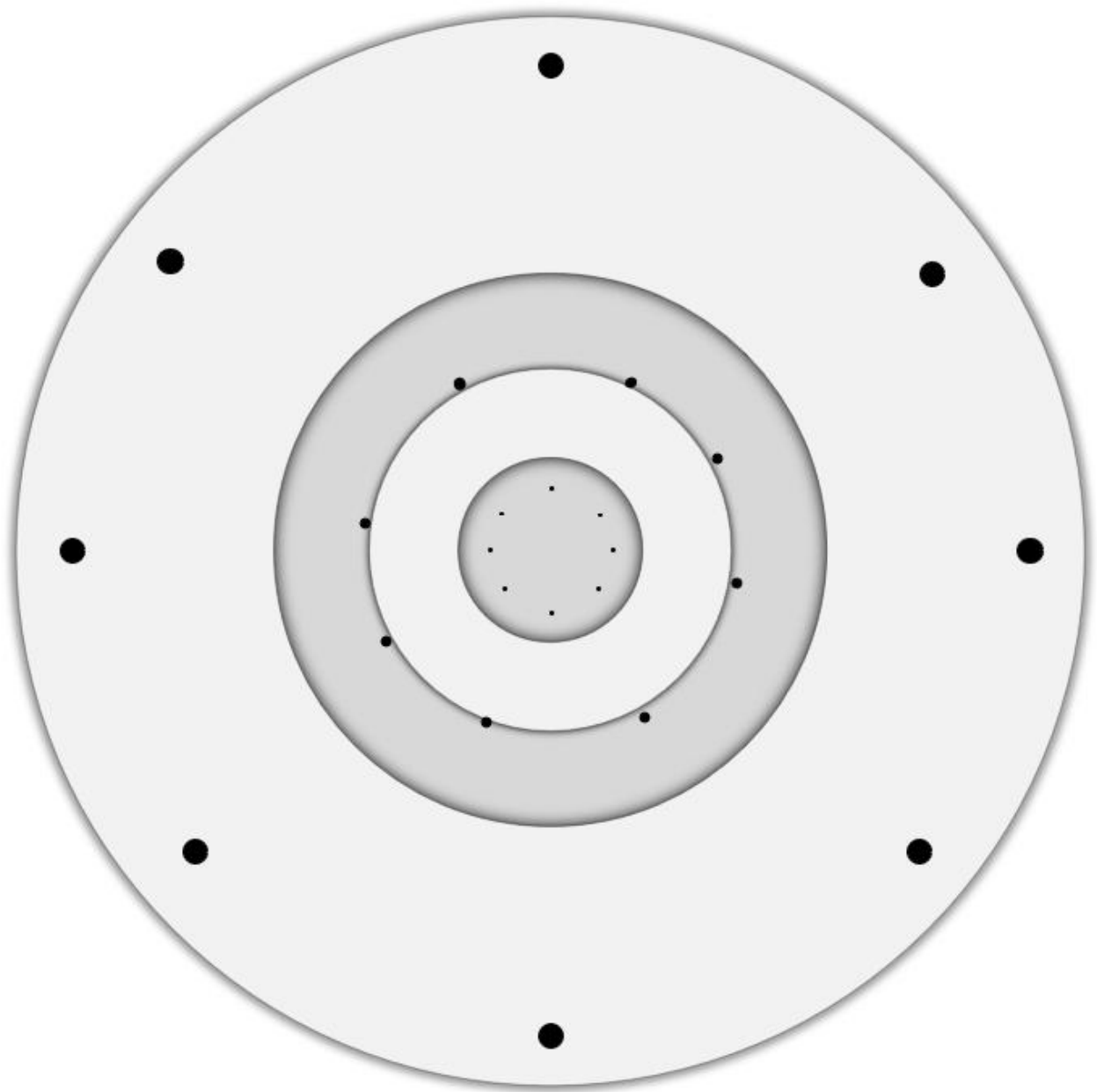
Valmet
FORWARD



stordenso



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Kuva 18. Helios mallin injektorirakenne, Ulkoreunan aukot pulteille ja kaksi sisempää aukkoriviä polttoaineelle (ulompi) sekä oksidointiaineelle (sisempi).



**Euroopan unionin
osarahoittama**



WETEND
Technologies



SOLENIS



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**

ACA
SYSTEMS

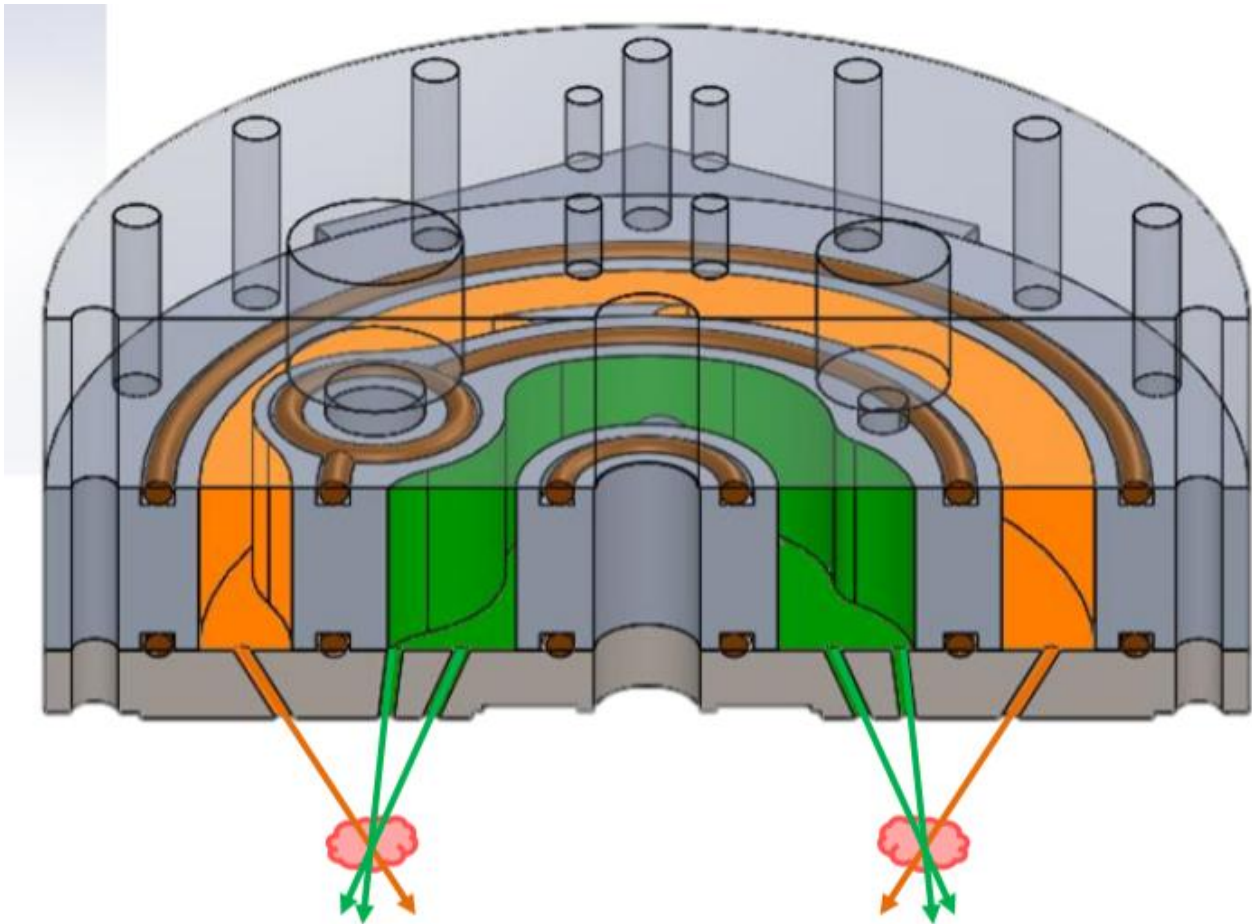
Valmet
FORWARD



stordenso



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**



Kuva 19. Jakotukki Pyralis injektoriin, oranssi polttoaineelle ja vihreä hapettimelle (Topic 6: Injector Design, 2022).

Jakotukki on missä kaikki onnistuvaan injektioon vaadittava tapahtuu. Virtauskanavat sekä muut suunnitellaan suutinpäitä varten, jos esimerkiksi tarvitaan virtausnopeuden kasvatus.

Tarkat kulmat, reikähalkaisijat ja pituudet tekee taikojä Helios malleissa, että optimaalinen polttoainevirtaus sytytykselle saadaan toteutumaan. Ydinidea on, että saadaan polttoaine ja oksidointiaine kohtaamaan sellaiselta etäisyydeltä, missä molemmat ovat tarpeeksi atomisoituneita pisaroiksi (Topic 6: Injector Design, 2022).

4.5.2 Pintle injektorit

Pintle injektorit. Siinä yhdistetään ulkoinen aksiaalinen (suora) virtaus, radiaalisen (säteittäisen) virtauksen kanssa, jossa virtaukset yhdistyvät ja sekoittuvat (Topic 6: Injector Design, 2022).



Euroopan unionin
osarahoittama



WETEND
Technologies

SOLENIS



Etelä-Savon
maakuntaliitto

ACA
SYSTEMS

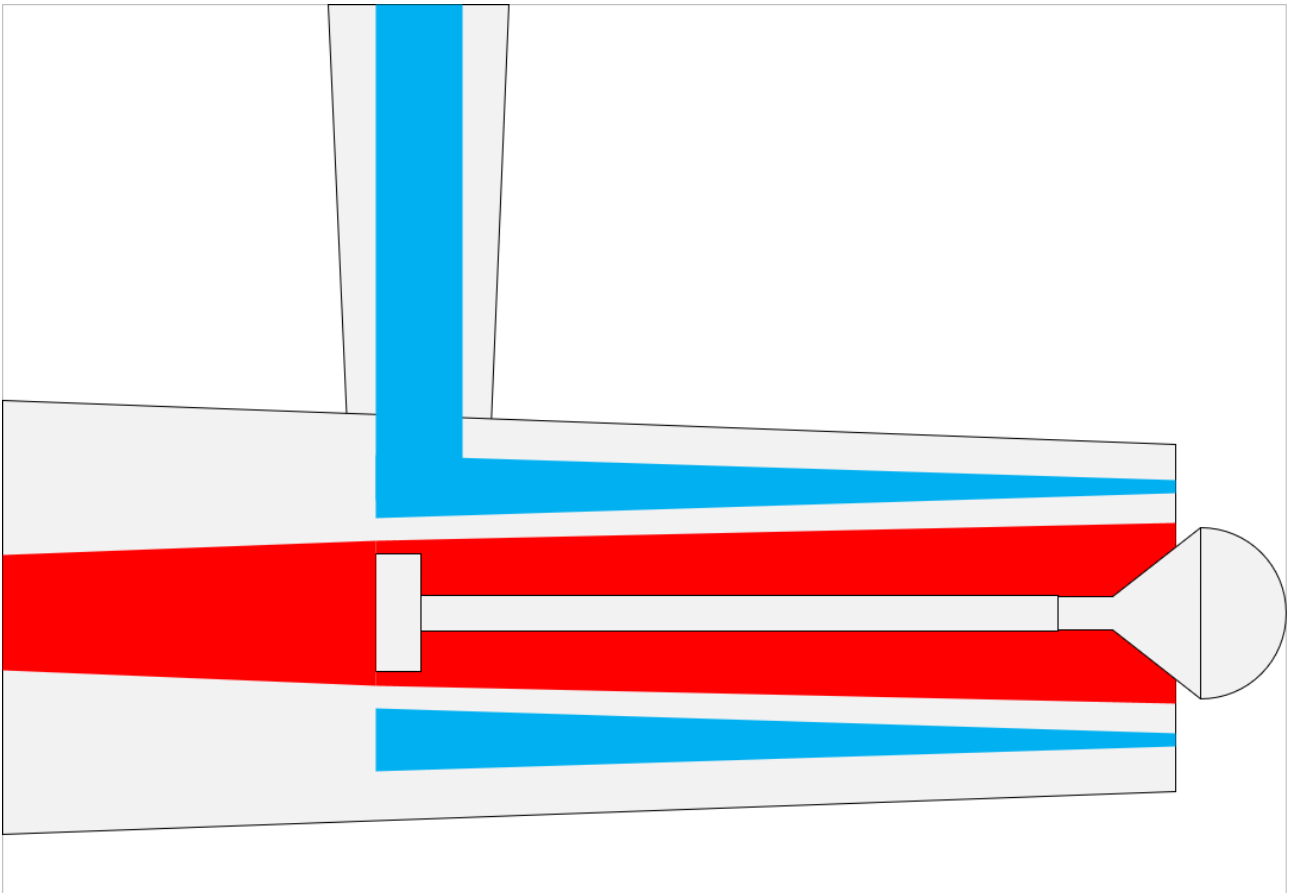
Valmet
FORWARD



stordenso



Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Kuva 20. Pintle mallin injektorit. Punainen on radiaalinen virtaus ja sininen on aksiaalinen.

Nopealla vilkaisulla Pintle injektorit muistuttaa flash mixing laitteiston sisälmyksiä.

4.5.3 Koaksiaaliset injektorit

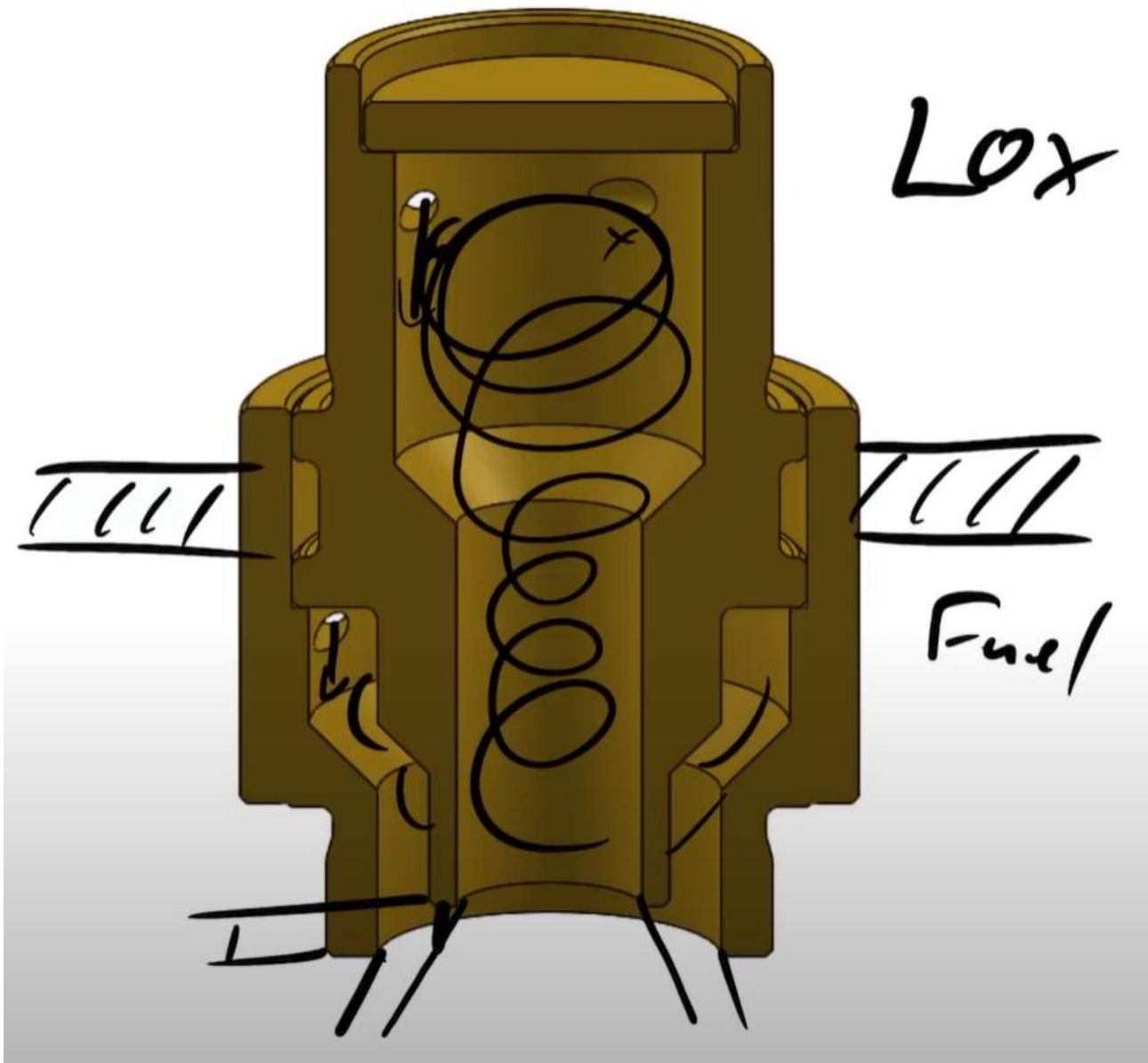
Koaksiaalinen injektorit käyttää nimensä mukaisesti koaksiaalisia putkia, joiden kautta syötetyt polttoaineet saa pyörreliikkeen. Jommankumman polttoaineen poistuessa suuttimesta, se saa radiaalisen suppilomaisen muodon, joka on nestemäisenä kalvona. Tämä on eduksi sillä suunnittelu antaa mahdollisuuden suurien massavirtojen syötölle.

Rakenne tuottaa aksiaalisen momentin lisäksi radiaalista momenttia tarkoittaen tehokkaampaa sekoittumista (Topic 6: Injector Design, 2022).



Euroopan unionin
osarahoittama





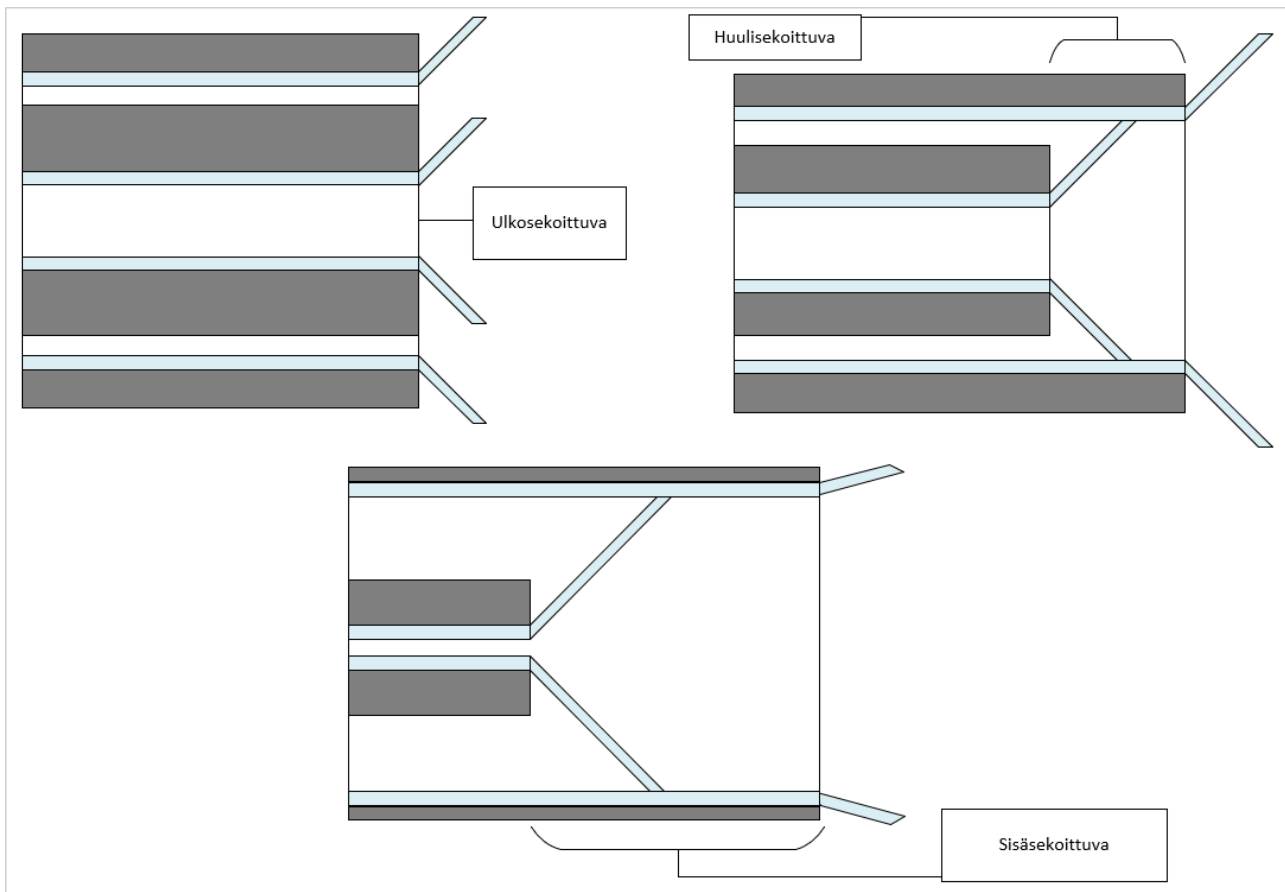
Kuva 21. Sisempään onteloon syötetään reikien myötä hapetinta, sivuilta syötetään polttoaine. Suutinpää yhdistää sisemmän virran ulkokehän virtaan (Copenhagen Suborbitals, 2019).

Suuttimen huulen rakennetta voidaan säätää sen perusteella, kuinka ”sisäistä” sekoittamisen halutaan olevan (Topic 6: Injector Design, 2022).



Euroopan unionin
osarahoittama





Kuva 22. Kolme erilaista koaksiaalista suutinmenetelmää. Sisemmän ontelon huulen pituus määrittelee, kuinka pitkä aika sekoituksella on. Lisäksi ulostulo kulma voi vaihdella sisähuulen myötä Skobelkin efektin myötä.

4.5.4 Painepyörresuutin

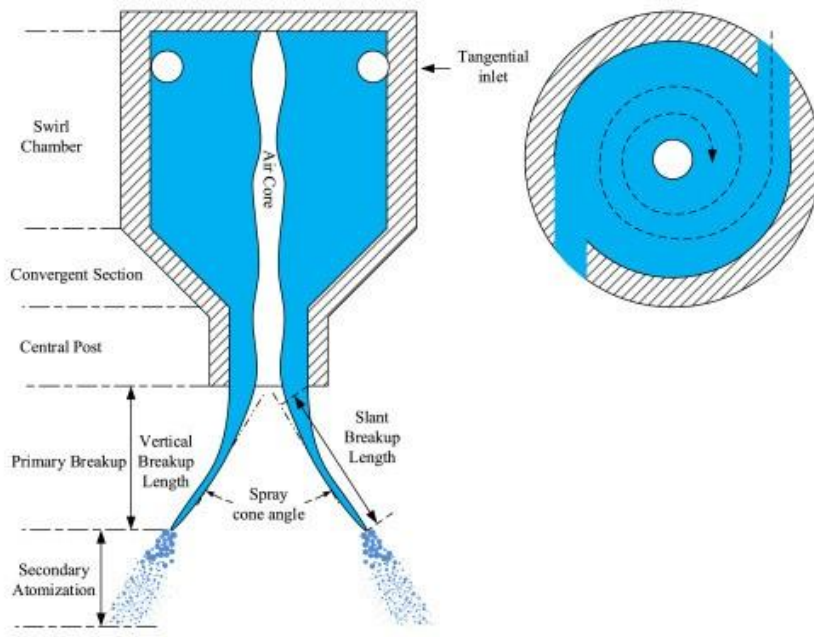
Painepyörresuutin on polttomoottoreissa käytetty tekniikka ja sitä on myös sovellettu rakettimoottoreihin. Toimintaperiaatteellisesti ei olla kaukana koaksiaalisesta suutinrakenteesta. Painepyörresuutin voidaan jakaa onkalo injektoriin, kiinteä suppilo injektoriin ja spill-return injektoriin. Pyörre tuotetaan joko tangentialisilla syöttöaukoilla tai pyörittäjällä. Syöttöaukolliset mallit ovat kuitenkin suosituimpia yksinkertaisuuden ja varmuuden vuoksi (Acta Astronautica, 2018).

Rakenne koostuu pyörresäiliöstä, tangentialisista syöttöaukoista ja poistoaukosta. Koska neste syötetään tangentialisesti nesteen keskelle, syntyy ontto ilmaydin. Liikkeen toimesta poistuessa huulelta neste muuttuu filmiksi ja sitten pilkkoutuu pisaroiksi (Acta Astronautica, 2018).



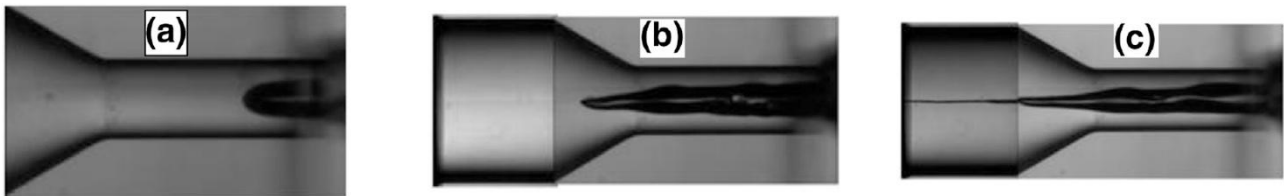
Euroopan unionin
osarahoittama





Kuva 23. Pyörresuuttimen toimintaperiaate (Acta Astronautica, 2018).

Ajoneuvojen käyttämissä laitteistoissa suurin eroavaisuus on, autojen tapa käyttää pulssimaista syöttöä. Rakettimoottoreissa virtaus on stabiili (Acta Astronautica, 2018).



Kuva 31. Reynoldsin lukeman vaikutus ilmaytimeen. a) $Re = 101$ b) $Re = 144$ c) $Re = 186$ (Acta Astronautica, 2018).

4.6 Pietzosähköiset mekanismit

Pietzosähköisiä pumppuja käytetään tulostimien Inkjet-suuttimissa, mutta on teorisoitu sen soveltuvuutta pienten rakettimoottorien toiminnassa (Peter Glyenne-Jones, Ym. 2010).



Euroopan unionin
osarahoittama



WETEND
Technologies

SOLENIS



Etelä-Savon
maakuntaliitto

ACA
SYSTEMS

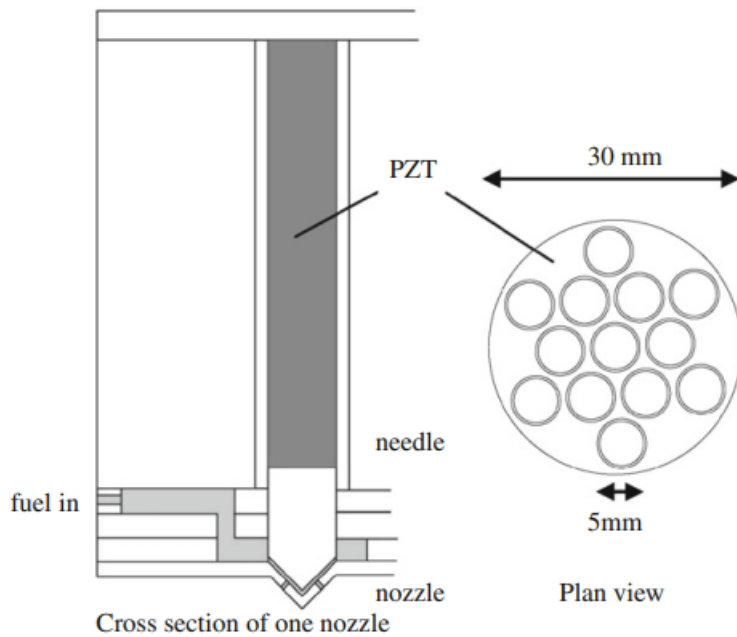
Valmet
FORWARD



stordenso

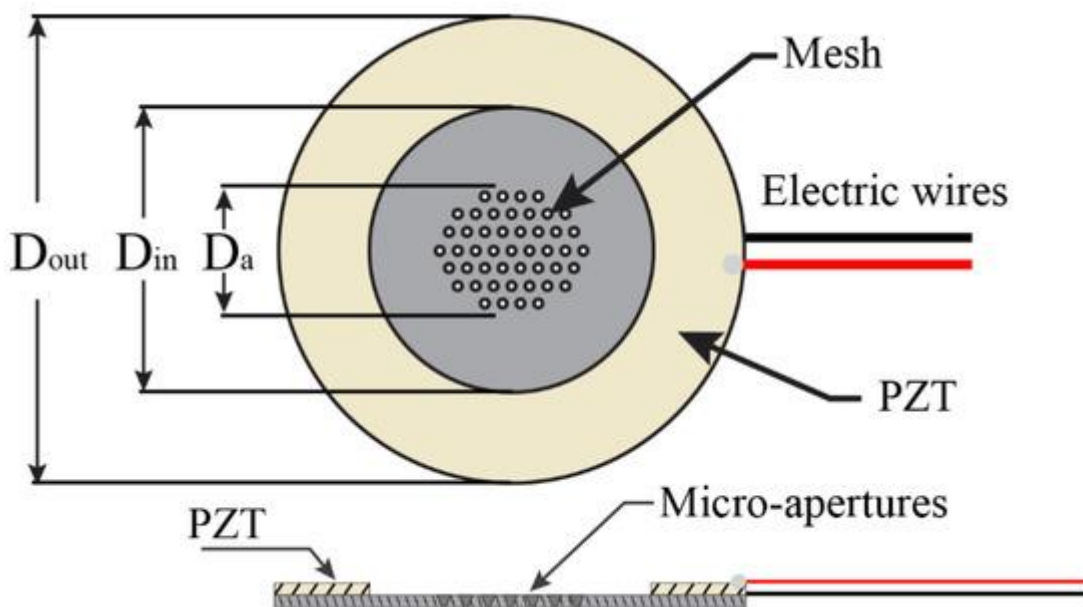


Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu



Kuva 24. Inkjet tekniikkaan perustuvan rakettimoottori suuttimen teoreettinen rakenne (Peter Glyenne-Jones, Ym. 2010).

Pietsosähköisen tekniikan siivittämänä on olemassa ilmankostuttimia, mitkä pumppaavat pietsosähköisellä prosessilla vettä vesihöyryksi. Sähkövirtauksellisen pulssin aiheuttaman metalliläpän liikkeellä, laite puskee nesteen laaserilla porattuja mikroskooppisia reikiä vasten, joiden myötä neste atomisoituu pisaroiksi ilman lämpöä tai suuria paineita (Esteban GB, Ym. 2021).



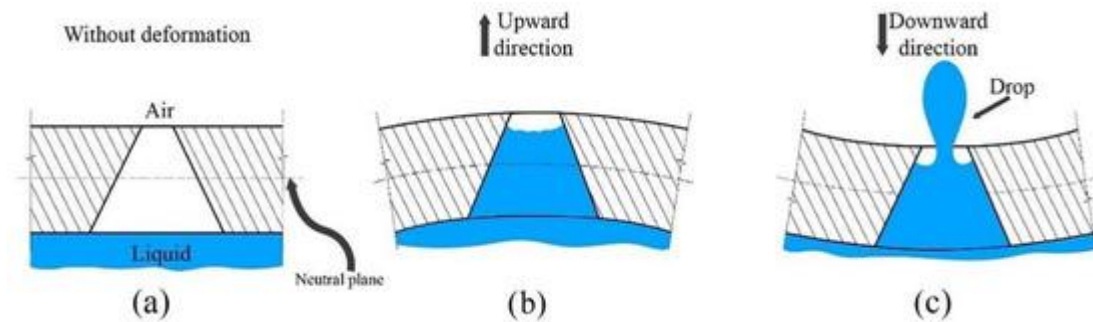
Kuva 25. Pietsosähköisen atomisaattorin rakenne.



**Euroopan unionin
osarahoittama**

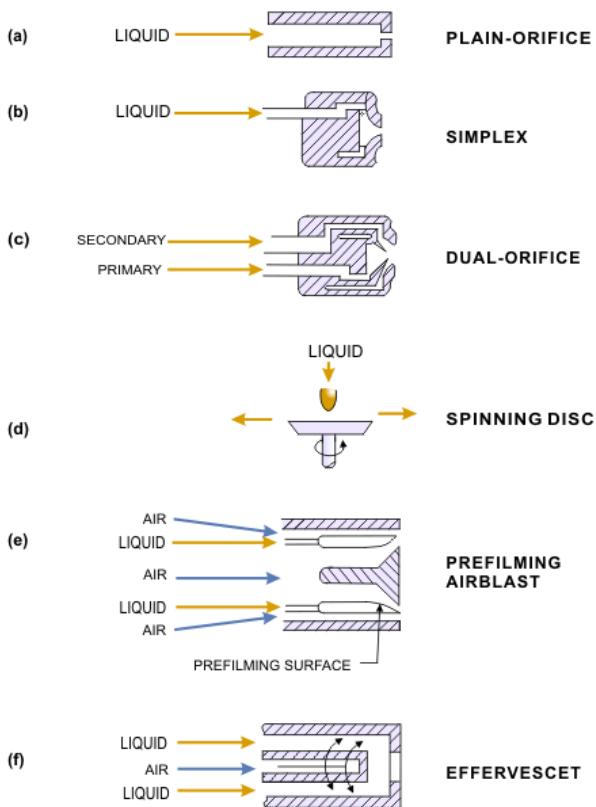


Kuvassa oleva levyrakenne värähtelee sähkövirtauksen toimesta. Mikroapertuurit tämän värinän myötä taipuu ja luo alipaineen, mikä johtaa siihen, että tila täyttyy vedellä. Kun värinä aaltona siirtyy, mikroapertuurit puskevat tilassa olleen veden ulos aukosta. Vesi atomisoituu poistuessaan aukosta (Esteban GB, Ym. 2021).



Kuva 26. Mikroapertuurin toiminta värinän myötä.

4.7 Suutinratkaisut



Kuva 27. Suutinpäävaihtoehtoja.

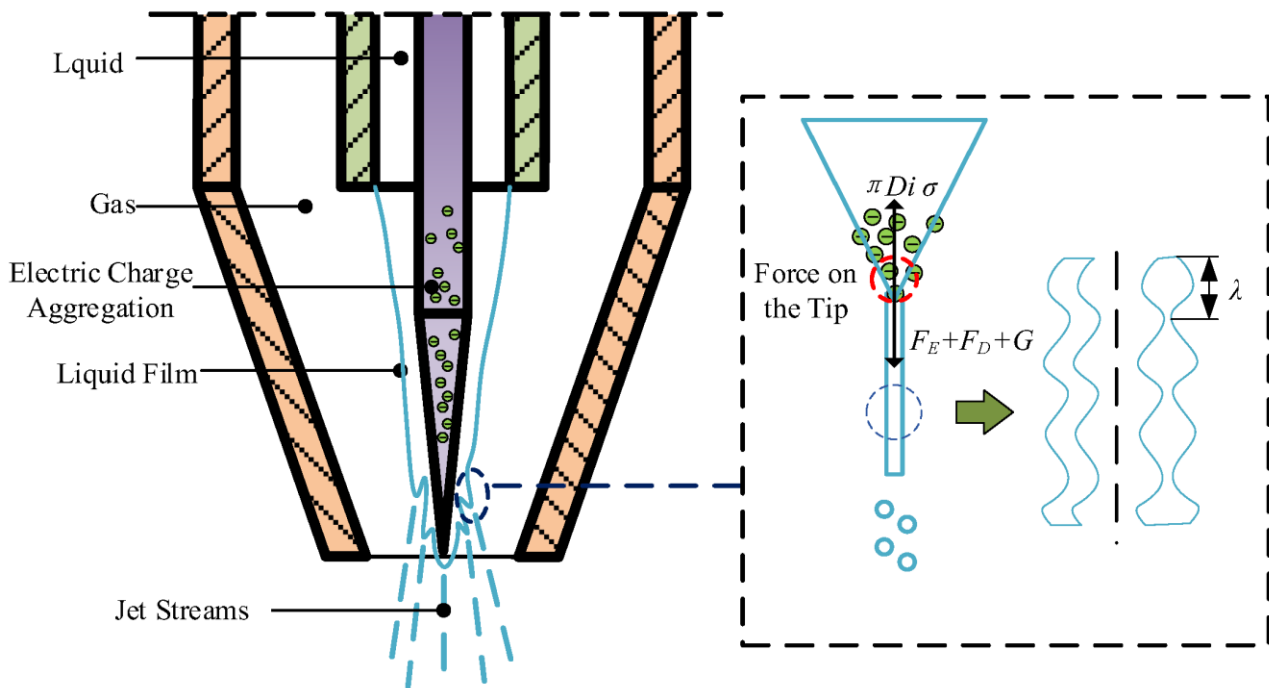


Euroopan unionin
osarahoittama



4.8 Elektrostaattiset atomisaattorit

Elektrostaattiset atomisaattorit voivat mahdollisesti myös toimia. Maaleja levittäessä käytetään elektrostaattisia voimia. Rakenne tällaisessa atomisaattorissa perustuu kahteen kanavaan. Kaasu ja nestekanavaan. Lisäksi kanavien vierestä kulkee neulan muotoinen elektrodi. Neste aggregoituu neulan pintaan ja kaasu puhalttaa sen atomisoituna.



Kuva 28. Elektrostaattisen atomisaattorin toimintaperiaate kuvattuna (Hao Ma, Min Yang 2023).

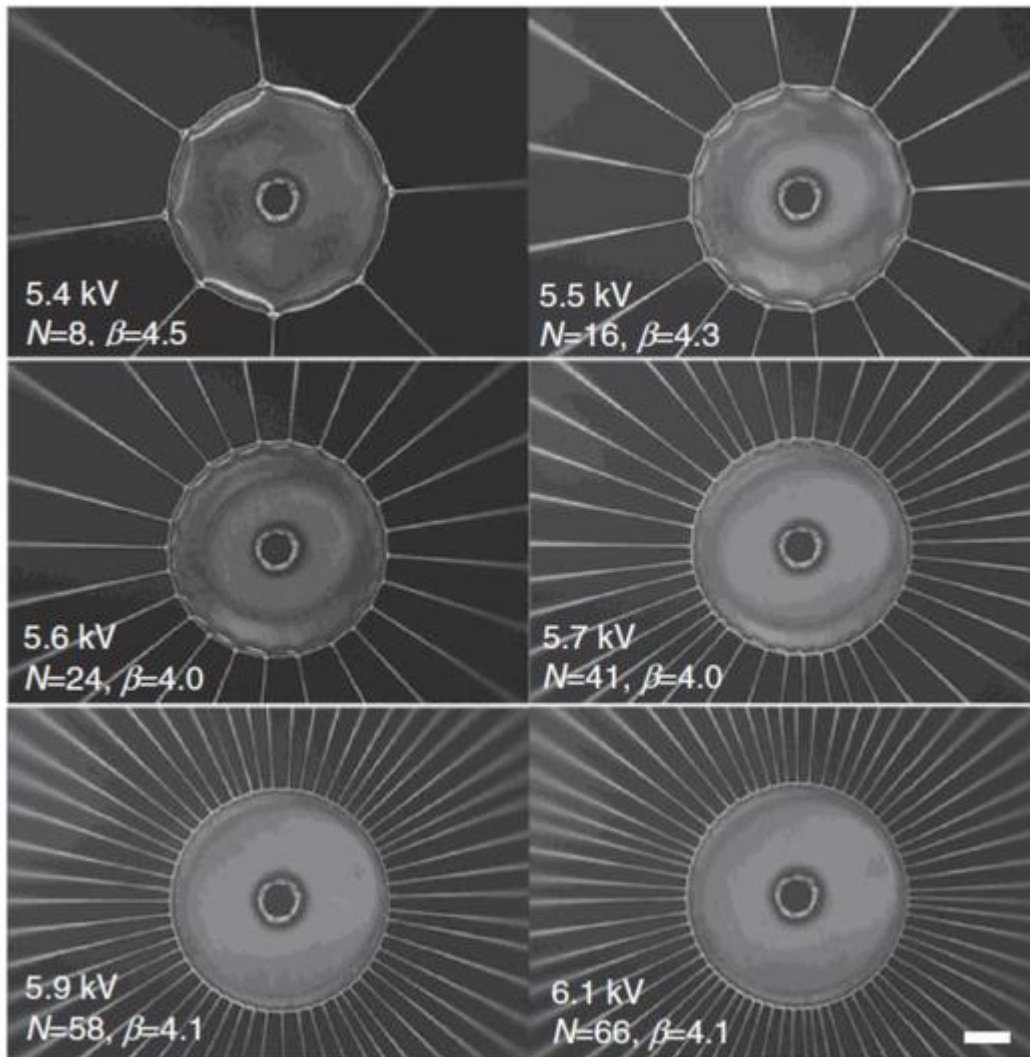
Kuvitellaan, että jokin prosessikemikaali olisi reagoivaa neulan mallisen elektrodin kanssa ja pesisimme sen pieninä hiukkasina suuttimen läpi prosessiin.

Elektrostaattisilla atomisaattoreilla voidaan säätää, kuinka paljon neulaan reagoivaa kemikaalia poistuu suuttimesta, säätämällä jännitettä (Hao Ma, Min Yang 2023).



Euroopan unionin
osarahoittama





Kuva 29. Kemikaalisuihkujen määrän muutos, jännityksen muutoksen myötä (Hao Ma, Min Yang 2023).

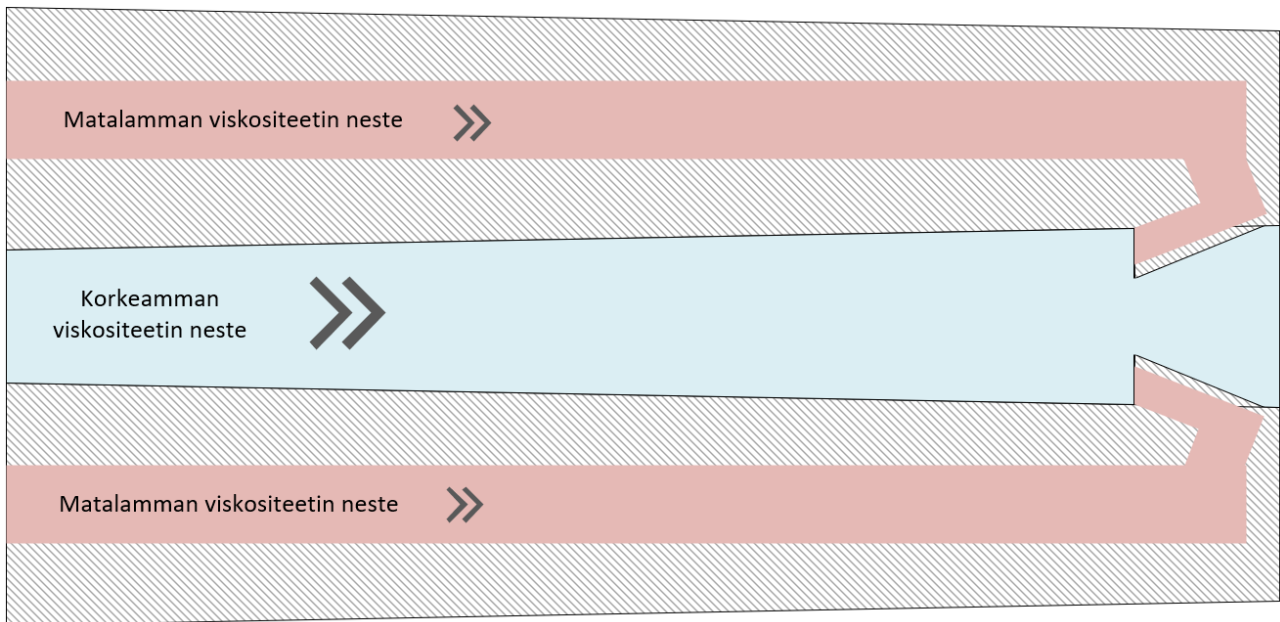
4.9 Vastavirtaus atomisaattorit

Tässä ratkaisussa useasti käytetään kaasua, minkä syöttäessä vastavirtaan nestevirtaukseen, syntyy nestevirtauksessa atomisaatiota (University of Minnesota 2021.). On mahdollista, että vastaavanlaista voisi kokeilla siten, että korkeamman viskositeetin nesteeseen pusketaan vastavirtauksena matalamman viskositeetin nestettä. Mahdollisesti voi tapahtua tässäkin korkeamman viskositeetin nesteelle atomisaatiota.



**Euroopan unionin
osarahoittama**





Kuva 30. Esimerkkikuva mahdollisesta vastavirtaus atomisaattorista.

5 Loppukaneetit

Tämän version kirjoittamisen aikana, hanke on loppusuoralla.

Potentiaalia on monessa aihepiirissä.

Olisi kiinnostavaa tutkia, kuinka saadaan esimerkiksi ultraäänellä tehostettua sekoittumista flash mixing laitteiston sisällä. Tai pommittaa nestevirtausta laserilla ja nähdä sitä myöten sekoittuvuuden paranemista.

Pietsosähköisten atomisaattorien soveltamista korkeisiin virtauksiin tai uudenlaisten rakettitekniikkaan perustuvien suutinpäiden kokeilemista flash mixing laitteistossa.

Voi olla, että pietsosähköinen PZT keramiikkalevy tai putki, voidaan suunnitella toimimaan flash mixing laitteistossa kemikaalivirtauksen sisällä sekoittumispisteessä.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



WETEND
Technologies



SOLENIS



**Etelä-Savon
maakuntaliitto**

ACA
SYSTEMS

Valmet
FORWARD



stordenso



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Lähdeluettelo

Vishal S. Jagadale, Devendra D, Dag H & Yogeshwar Nath Mishra. Bubble dynamics and atomization of acoustically levitated diesel and biodiesel droplets using femtosecond laser pulses. Scientific Reports. PDF-dokumentti. Päivitetty 9.4.2024. Saatavissa: <https://www.nature.com/articles/s41598-024-57802-8> [viitattu 4.6.2025]

F Zhao, M.-C Lai, D.L Harrington. Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines. WWW-dokumentti. Päivitetty 10.1999. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128599000040> [viitattu 4.6.2025]

Recommended Mixing Equipment for Catalytic Slurries. Ross. WWW-dokumentti. Päivitetty sa. Saatavissa: <https://www.mixers.com/resources/mixing-technology-reports/recommended-mixing-equipment-for-catalytic-slurries/> [viitattu 4.6.2025]

H Monnier, A.-M Wilhelm, H Delmas. Influence of ultrasound on mixing on the molecular scale for water and viscous liquids. Ultrasonics Sonochemistry Volume 6, Issues 1–2. WWW-dokumentti. Päivitetty 3.1999. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417798000340> [viitattu 4.6.2025]

Topic 6: Injector Design. MIT Rocket Team. WWW-dokumentti. Päivitetty 7.7.2022. Saatavissa: <https://wikis.mit.edu/confluence/display/RocketTeam/Topic+6%3A+Injector+Design> [viitattu 5.6.2025]

How Rocket Engine Fuel Injectors Work: Coaxial swirlers. Copenhagen Suborbitals. Youtube-video. Päivitetty 2019. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=0qvbyl7KuNw> [viitattu 5.6.2025]

Acta Astronautica. Review on pressure swirl injector in liquid rocket engine. WWW-dokumentti. Päivitetty 4.2018. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576517316831> [viitattu 5.6.2025]

Peter Glynn-Jones, M. Coletti, N.M. White, S.B. Gabriel, C. Bramanti. A feasibility study on using inkjet technology, micropumps, and MEMs as fuel injectors for bipropellant rocket engines. WWW-dokumentti. Päivitetty 8.2010. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576510000512> [viitattu 5.6.2025]

Esteban Guerra-Bravo, Han-Joo Lee, Arturo Baltazar & Kenneth J. Loh. Vibration Analysis of a Piezoelectric Ultrasonic Atomizer to Control Atomization Rate. WWW-dokumentti. Päivitetty 9.9.2025. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/18/8350> [viitattu 5.6.2025]

Hao Ma & Min Yang. Mechanism and Experimental Study on Electrostatic Atomization Using Needle-Shaped Electrodes. WWW-dokumentti. Päivitetty 26.3.2023. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2075-4442/11/6/235> [viitattu 5.6.2025]



**Euroopan unionin
osarahoittama**



University of Minnesota. Shear Flow Control Laboratory. Atomization. PDF-dokumentti. Päivitetty 5.2021. Saatavissa: <https://conservancy.umn.edu/items/9273f4cf-b109-4812-887f-dfdb3b82fe03> [viitattu 5.6.2025]

Turbulence in fluids. Kolmogorov's theory of inertial turbulence. PDF-dokumentti. Päivitetty s.a. Saatavissa: <https://cushman.host.dartmouth.edu/courses/engs250/Kolmogorov.pdf> [viitattu 1.7.2025]

Turbulence Scales and Energy Cascade. Altair Acusolve. WWW-dokumentti. Päivitetty s.a. Saatavissa: https://2022.help.altair.com/2022.1/hwcfdsolvers/acusolve/topics/acusolve/training_manual/turb_scales_energy_cascade_r.htm [viitattu 1.7.2025]



**Euroopan unionin
osarahoittama**

