

# MUOVIENTEROTTELU HYDROSYKLONIMENETELMÄLLÄ

Case: Kiemura-hanke

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tekniikan ala  
Prosessi ja materiaalitekniikka  
Polymeeri- ja kuitutekniikka  
Opinnäytetyö  
Syksy 2019  
Samuli Sani

## Tiivistelmä

Tekijä(t) Sani, Samuli	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 35 sivua, 2 liitesivua	Valmistumisaika Syksy 2019
Työn nimi <b>Muovien erottelu hydrosykloni-menetelmällä</b> Case: Kiemura-hanke		
Tutkinto Polymeeri- ja kuitutekniikan insinööri (amk)		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin osana Lahden ammattikorkeakoulun syksyllä 2018 aloittamaa Kiemura-hanketta, jonka tarkoituksena on tehostaa muovien materiaalikierrätystä. Työn tarkoituksena oli tutkia hankkeen muovien erottelumenetelmäksi valittua hydrosykloni-menetelmää.</p> <p>Hydrosykloni on yleinen teollisesti käytetty erotus- ja luokittelulaite. Työn ensisijaisena päämääränä oli rakentaa pilot-tason prototyyppilaite ja koeajaa muovimateriaaleja, jotta voidaan todeta hydrosykloni-menetelmän sopivuus Kiemura-hankkeelle.</p> <p>Työn teoriaosassa käsitellään hydrosyklonin toimintaperiaatetta ja rakennetta. Lisäksi tutkitaan eri parametrien vaikutusta hydrosyklonin toimintaan ja toiminnan tarkasteluun käytettäviä menetelmiä.</p> <p>Työn käytännön osuudessa mitoitettiin ja valmistettiin prototyyppi hydrosykloni sekä mallinnettiin prototyypin toimintaa. Lisäksi käytännön osuudessa esitellään prototyypillä suoritettujen materiaalikokeiden tuloksia ja havaintoja eri materiaalien erottelutarkkuuden parantamiseksi.</p> <p>Lopuksi todetaan hydrosyklonin sopivuus kierrätysmuovi ratkaisu hankkeeseen ja esitetään hydrosyklonien sarjaan kytkeminen ratkaisuksi eri materiaalien erottelutarkkuuden parantamiseksi.</p>		
Asiasanat hydrosykloni, kierrätys, tiheyteen pohjautuva erottelu		

## Abstract

Author(s)	Type of publication	Published
Sani, Samuli	Bachelor's thesis	Autumn 2019
	Number of pages	
	35 pages, 2 appendices	
Title		
<b>Hydrocyclone separation of plastics</b> Case: Kiemura – a project for recycling plastics		
Name of Degree		
Bachelor's Thesis in polymer and fiber technology		
Abstract		
<p>This thesis was done as a part of a project on solutions for plastics recycling, which was started by Lahti University of Applied Sciences in the autumn of 2018. The aim of the thesis was to study the hydrocyclone classification method chosen for the program.</p> <p>Hydrocyclone is a common industrial tool for separation and classification of particles. This study focused on building a prototype hydrocyclone and doing test runs with different polymer types to determine if hydrocyclone separation is a suitable method for the project.</p> <p>The theoretical part of the thesis deals with operating principle and structure of a hydrocyclone. In addition, the effect of different parameters on the operation of a hydrocyclone and the ways to determine the effectiveness of a hydrocyclone are dealt with.</p> <p>In the practical part of the thesis, a prototype hydrocyclone was designed and built, and the operation of the prototype was modelled. The practical part also included test runs and a study on how to improve separation efficiency based on the test runs.</p> <p>Based on the test runs, the hydrocyclone was found to be a suitable solution for the program. Separation efficiency can be improved by using a cascading hydrocyclone setup.</p>		
Keywords		
hydrocyclone, recycling, density-based sorting		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	KIEMURA-HANKE.....	2
2.1	Kiemura-hankkeen toimintaprosessi.....	2
2.2	Muovien erottelu.....	2
2.3	Perustelu hydrosykloni-menetelmän valinnalle.....	3
3	HYDROSYKLONI-MENETELMÄ.....	4
3.1	Hydrosykloni.....	4
3.1.1	Hydrosyklonin rakenne.....	5
3.1.2	Hydrosyklonin toimintaperiaate.....	6
3.2	Nesteen virtaus hydrosyklonissa.....	7
3.2.1	Radiaalinopeus.....	7
3.2.2	Tangentiaalinen nopeus.....	7
3.2.3	Aksiaalinen nopeus.....	8
3.2.4	Ylimääräinen pyörrevirta ja oikosulkuvirta.....	9
3.2.5	Partikkelien liike hydrosyklonissa.....	10
3.3	Hydrosyklonin erotustehokkuus.....	11
3.3.1	Massatasapaino.....	11
3.3.2	Erotustehokkuuden määrittäminen.....	12
3.3.3	Virtaussuhde.....	12
3.3.4	Redusoitu erotustehokkuus.....	13
3.3.5	Hydrosyklonin luokitustehokkuus.....	13
3.3.6	Katkaisukoko ja redusoitu katkaisukoko.....	14
3.3.7	Luokituksen terävyys.....	14
3.4	Hydrosyklonin toimintaan vaikuttavat tekijät.....	14
3.4.1	Käyttömuuttujat.....	15
3.4.2	Geometriset muuttujat.....	16
3.5	Hydrosyklonien toiminnan mallintaminen.....	18
4	HYDROSYKLONI-TESTAUSJÄRJESTELMÄ.....	20
4.1	Testausjärjestelmän tavoite.....	20
4.2	Prototyypin mitat ja muotoilu.....	20
4.3	Vesijärjestelmä.....	21
4.4	Prototyypin toiminta-asetukset.....	22
4.5	Testauslaitteiston toiminnan mallintaminen.....	23

5	MATERIAALIEN TESTAUS .....	25
5.1	Materiaalivalinnat ja testiasetukset.....	25
5.2	Standardi partikkelikoon materiaalien testaus .....	26
5.2.1	Väliaineen tiheyttä kevyempien materiaalien testaus .....	26
5.2.2	Väliaineen tiheyttä raskaampien materiaalien testaus.....	27
5.2.3	Väliaineen tiheyttä lähellä olevien materiaalien testaus .....	28
5.3	Murskattujen materiaalien testaus.....	29
5.3.1	Väliaineen tiheyttä kevyempien murskattujen materiaalien testaus .....	30
5.3.2	Väliaineen tiheyttä raskaampien murskattujen materiaalien testaus .....	31
5.3.3	Väliaineen tiheyttä lähellä olevien murskattujen materiaalien testaus .....	32
6	YHTEENVETO .....	34
	LÄHTEET .....	36
	LIITTEET .....	38

## 1 JOHDANTO

Modernin kulutuskulttuurin jatkuvasti kasvava roskamuovien määrä on yksi aikamme akuutein globaali ympäristöongelma. Uudet mahdollisuudet ja tekniikat kierrätysmuovien keräämiseen ja hyödyntämiseen ovat jatkuvasti tärkeämpiä resursseja tuotteiden valmistajille tiukkenevien kierrätystavoitteiden vuoksi.

Lahden ammattikorkeakoulu (LAMK) aloitti syksyllä 2018 kierrätysmuovi ratkaisu hankkeen (Kiemura-hanke). Lahden ammattikorkeakoulun tavoite kyseiselle hankkeelle on rakentaa pilot-mittakaavan muovien pesu- ja lajittelulinjasto. Kyseinen linjasto sisältää muovin pesu-, erottelu- ja kuivauslaitteiston. (Euroopan aluekehitysrahasto 2018.)

Kiemura-hankkeen linjaston tavoite on olla helposti siirrettävissä, jotta sitä voidaan hyödyntää mahdollisimman monissa käyttökohteissa. Tämä siirrettävyys päätettiin saavuttaa mitoittamalla linjasto siten, että se mahtuu standardi kokoiseen merikonttiin. Lisäksi Kiemura-hankkeen linjaston tavoite on viedä mahdollisimman vähän resursseja toimiakseen. Linjaston on tarkoitus olla helposti monistettavissa ja yksinkertaisesti käytettävissä, jotta se voi toimia lähes kaikissa mahdollisissa toimintaympäristöissä.

Tämän työn tavoite on tutkia Kiemura hankkeelle valittua kierrätysmuovien hydrosykloni erottelumenetelmää sekä rakentaa prototyyppi laite ja suorittaa muovien erottelun koeajoja eri muovilaaduilla. Työn teoriaosuudessa toteutetaan yleiskatsaus hankkeeseen ja sen suunniteltuun toimintaprosessiin. Tämän jälkeen tutustutaan tarkemmin valitun erottelumenetelmän toimintaan ja toimintaan vaikuttaviin tekijöihin, sekä toiminnan tarkasteluun käytettäviin menetelmiin. Työn kokeellisessa osuudessa suunnitellaan prototyyppilaitteen toiminta ja mitoitus. Työssä testataan säädettävien parametrien kautta, miten saadaan taasisin toiminta aikaiseksi laitteelle ja koeajetaan prototyyppillä erilaisia yleisiä muovilaatuja, testaten kuinka tarkkaan muovilaatujen erotteluun hydrosyklonin menetelmällä voidaan päästä.

## 2 KIEMURA-HANKE

### 2.1 Kiemura-hankkeen toimintaprosessi

Kiemura-hankkeen päätavoitteena on tehostaa muovien materiaali kierrätystä. Lahden ammattikorkeakoulun tehtävä Kiemura-hankkeessa on rakentaa muovien pesu- ja kierrätyslinjasto. Tämän linjaston on tarkoitus testata erilaisia muovien sivuvirtoja ja tätä kautta mahdollistaa tutkimusta muovijakeiden erilliskeräyksen ja materiaali kierrätyksen tehostamiseksi. (LAMK, kiemura 2019.)

Kiemura-hankkeen linjaston suunniteltu toimintaprosessi sisältää seuraavat vaiheet materiaalien käsittelylle:

- Kierrätettävä muovi murskataan, kaksi murskainjärjestelmää: suurten kierroslukujen silppuri ja telamurskain.
- Kierrätettävä muovi ajetaan pesujärjestelmän läpi.
- Kierrätettävä muovi luokitellaan eri jakeisiin erotteluprosessissa.
- Kierrätettävä muovi kuivataan.
- Kierrätettävä muovi varastoidaan uudelleen ekstruusiota varten. (Roininen 2019.)

### 2.2 Muovien erottelu

Jätemuovin erottelu ja lajittelu ovat oleellinen osa muovien kierrätystä, koska muovityyppejä on käytössä useita erilaisia ja useimmat eri muovityypit eivät ole keskenään yhteen sopivia. Sekaisin olevien muovien markkina-arvo on alhainen, koska niistä tehdyillä tuotteilla on huonot tai vaihtelevat ominaisuudet. Muovien erottelun kierrätyksessä tulee olla hyvin tarkkaa, koska jo 1 % yhteen sopimatonta muovilaatua voi heikentää koko muovierän ominaisuuksia. Ollakseen kannattavaa toimintaa muovien erottelun tulee olla nopeaa, luotettavaa, ekonomista ja sen tulee pystyä selviytymään erilaisista kontaminaatioista ja sekalaisen värisistä muoveista. (Scheirs 1998, 2.)

#### **Kiemura-hankkeen vaatimukset erottelumenetelmälle**

Kiemura-hankkeen ensisijainen tavoite on polyolefiini muovien mahdollisimman tarkka erottelu toisista roskamuoveista alkuvaiheessa projektia. Prosessin suunnitellun toiminnan vuoksi eroteltava muovi on märkää, joten mahdolliset erottelumenetelmät rajattiin määrän muovin kanssa toimiviksi. Lisäksi hanke on määritellyt seuraavia ominaisuuksia käytettävälle muovien erottelutekniikalle:

- Erottelumenetelmän tulee tarvita mahdollisimman vähän tilaa, järjestelmältä tarvittavan siirreltävyyspohjalta.
- Erottelumenetelmän toivotaan olevan mahdollisimman automaattinen, vaatii mahdollisimman vähän valvontaa ja huoltoa.
- Linjastossa käytetään resursseina vettä ja sähköä, erottelumenetelmän on toimitettava linjastossa jo käytössä olevilla resursseilla.
- Erottelun toimintaperiaatteeksi on valittu muovityyppien väliset tiheyden erot.
- Energian kulutuksen tavoite linjastolle on alle 200 W kiloa kierrätettyä muovia kohden, jotta toiminta olisi kannattavaa. (Roininen 2019.)

### 2.3 Perustelu hydrosykloni-menetelmän valinnalle

Hydrosyklonit käyttävät keskipakovoimaa erotellakseen eri muovityypit tiheyden perusteella ja mahdolliset muoveissa olevat epäpuhtaudet. Jopa saastuneimmatkin erät muovia voidaan lajitella puhtaisiin jakeisiin käyttämällä sarjaan kytkettyjä hydrosykloneja. Hydrosyklonit pystyvät poistamaan epätoivotut muovit ja vieraan aineen huomattavasti muita tiheyteen perustuvia erottelumenetelmiä tehokkaammin. Hydrosyklonin suurimmat edut muovien erottelumenetelmänä ovat erottelun nopeus, keskipakovoima poistaa muovien pinnoilta ilmat kuplat lisäten erottelun tarkkuutta ja erottelu ei välitä partikkelin muodosta. (Scheirs 1998, 5-7.)

Hydrosykloni tekniikan sopii hankkeen tarpeisiin parhaiten pohjautuen hydrosyklonien yleisiin ominaisuuksiin, jotka kattavat hankkeen vaatimukset erottelumenetelmälle.

- hydrosyklonit ovat yksinkertaisia rakenteeltaan, niissä ei ole liikkuvia osia, joten niiden huollon tarve on vähäistä.
- hydrosyklonit toimivat niin kauan kuin niiden läpi virtaa neste, joten valvonnan tarve on vähäistä.
- hydrosyklonit vaativat toimiakseen vain vettä ja ulkoisen pumpun.
- hydrosyklonit tuottavat paljon kokoonsa suhteutettuina, joten ne soveltuvat erinomaisesti hankkeen liikuteltavaan ideologiaan. (Roininen 2019.)



### 3 HYDROSYKLONI-MENETELMÄ

#### 3.1 Hydrosykloni

Hydrosyklonit ovat suosittuja työkaluja useilla eri teollisuuden aloilla. Hydrosykloneita voidaan käyttää hyödyksi aina, kun halutaan erotella eri tiheyden omaavia komponentteja kahteen jakeeseen. Tämän erottelun mahdollistaa hydrosyklonin pyörrevirtaus, joka luo suuren keskipakovoiman pyörteessä oleville partikkeleille. Keskipakovoima nopeuttaa väliaineeseen suspendoituneiden partikkelien laskeutumista, se mahdollistaa syklonin asentamisen haluttuun asentoon. Hydrosyklonien suuri suosio perustuu niiden rakenteen ja käytön yksinkertaisuuteen, lisäksi niillä on kokonsa nähden suuri tuotantokapasiteetti. Hydrosykloneissa ei ole liikkuvia osia ja ne tarvitsevat vain ulkoisen pumpun toimiakseen. (Salimi 2015, 2.)

Hydrosykloneita käytetään laajasti hydraulisina luokitustyökaluina. Luokituksessa hienojakoinen materiaali lajitellaan kahdeksi tai useammaksi jakeeksi partikkelien vajoamisominaisuuksiin pohjautuen. Jakeet luokitellaan ylitteenä poistuvaan hienompaan jakeeseen ja alitteena poistuvaan karkeaan jakeeseen. Luokittamisessa käytetään väliaineena joko nestettä tai kaasua. (Pihkala 2011, 43.)

Hydraulisessa luokituksessa hyödynnetään Stokesin lakia (kaava 1) raekoon, laskeutumisenopeuden tai laskeutumismatkan selvittämiseen, silloin kun partikkelin materiaali tunnetaan. Stokesin lakia hyödynnetään hydrosykloneissa partikkeleihin kohdistuvan vetovoiman selvittämiseksi, kun määritellään partikkelien asettumista syklonin virtauksessa. (Pihkala 2011, 44.)

$$v = \frac{sl}{t_l} = (\rho_k^k - \rho_k)gx^2 / 18\mu \quad (1)$$

$v$  = kiintoainehiukkasen laskeutumisen loppunopeus (cm/s)

$sl$  = laskeutumismatka (cm)

$t_l$  = laskeutumisaika (s)

$\rho_k^k$  = kiintoainehiukkasen tiheys (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_k$  = väliaineen tiheys (g/cm<sup>3</sup>)

$g$  = maanvetovoiman aiheuttama kiihtyvyys 9,81 m/s<sup>2</sup>

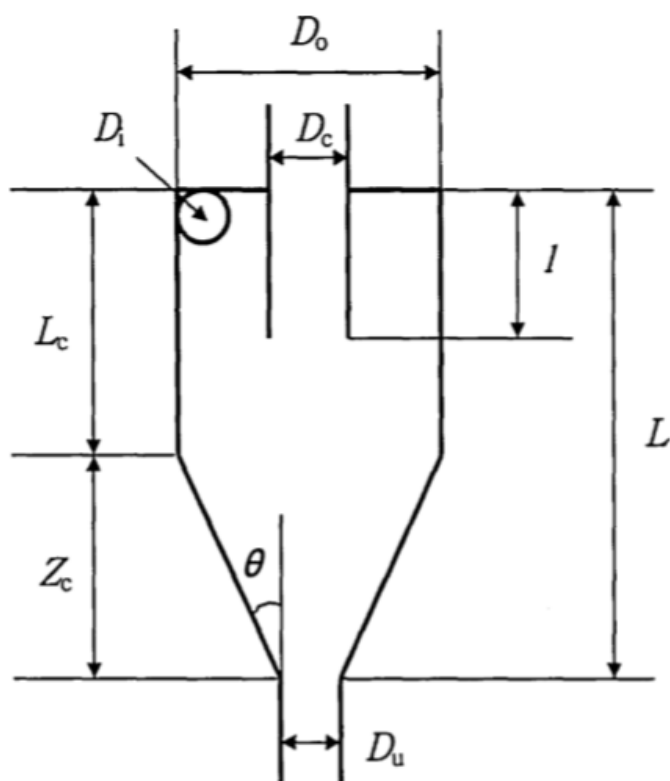
$x$  = rakeen läpimitta (cm)

$\mu$  = väliaineen dynaaminen viskositeetti (g/cm\*s, poise)

### 3.1.1 Hydrosyklonin rakenne

Syklonin rakenne koostuu sylinterimäisestä syöttökammioista ja kartiomaisesta alaosasta, jota kutsutaan erotuskammioiksi (kuva 1). Yleisimmissä moderneissa hydrosyklonityypeissä syöttövirta pumpataan sisään tangentialisesti syöttökammion yläreunassa sijaitsevasta syöttöputkesta. Syöttökammio on yläosastaan suljettu, mutta sen lävitse kulkee syklonin pysty akselin suuntainen yliteputki. Tämän yliteputken alareuna ulottuu syöttöputken alapuolelle. Yliteputken alareunan tulee olla riittävän paljon syöttöputken aukkoa alempana, jotta vältetään suora oikosulkuvirtaus yliteputkeen. Syklonin ylite poistuu yliteputkesta ja alite poistuu erottelukartion pohjassa olevasta aliteputkesta alite virtana. (Wills 2006, 212.)

Hydrosyklonin haluttu käyttötarkoitus vaikuttaa tarvittavan laitteen mittasuhteisiin. Luokitukseen käytettävän hydrosyklonin syöttökammio on pitkä suhteessa erottelukartioon, kun taas sakeutukseen suunniteltavan hydrosyklonin erottelukartio on suhteellisesti pidempi, kuin syöttökammio. (McCabe, Smith, Harriot 2005, 1063.)



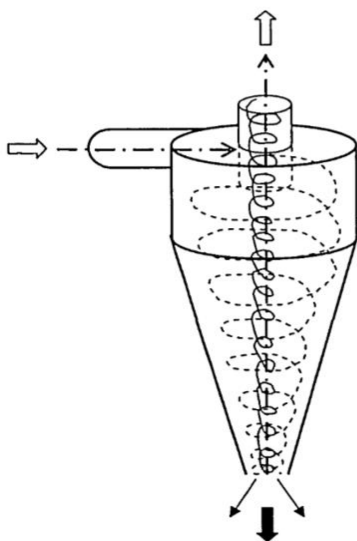
Kuva 1. Tyypillinen modernin hydrosyklonin rakenne (Park 2003, 7)

Kuvassa 1 nähdään tyypillinen rakennemalli modernille hydrosyklonille. Kuvassa L merkitsee koko syklonin rungon mittaa,  $L_c$  kuvastaa puolestaan syöttökammion mittaa.  $Z_c$  kuvastaa erottelukartion mittaa ja  $l$  kuvastaa yliteputken mittaa.  $D_c$  kuvastaa syöttökammion leveyttä,  $D_c$  ilmaisee syöttöaukon halkaisijan.  $D_o$  ilmaisee yliteputken halkaisijan ja  $D_u$  ilmaisee erottelukartion huipun halkaisijan.  $\Theta$  kertoo kartion supistuman kulman. (Park 2003, 7.)

### 3.1.2 Hydrosyklonin toimintaperiaate

Hydrosykloniin pumpataan paineenalaista nestettä tangentiaalisena syöttövirtauksena ja tämä synnyttää alaspäin suuntautuvan pyörrevirtauksen syklonin ulkoseinämää vasten (kuva 2). Neste liikkuu aksiaalisesti alaspäin syöttökammiossa tässä ulkoisessa pyörrevirtauksessa, kunnes se saavuttaa erotuskartion. Erotuskartion kapea huippu ja aliteputken rajallinen läpivirtaus pakottaa pyörrevirtauksen sisemmäksi ylöspäin suuntautuvaksi samaan suuntaan kiertäväksi pyörrevirtaukseksi. Stokesin lain mukaisesti karkeampi eroteltava materiaali asettuu ulkoseinille ja poistuu alitteena. Hienommat hydrosyklonin keskusta lähemmäksi asettuvat partikkelit ja suurin osa erottelunesteestä päätyy ylitteenä poistuvaan sisempään virtaukseen. Tämän takia hydrosyklonin luokitus perustuu partikkeleiden kokoon, muotoon ja ominaistiheyteen. (Salimi 2015, 11.)

Nesteen voimakas pyörrevirtaus hydrosyklonissa aiheuttaa sisemmän pyörteen keskelle matalan paineen alueen ja tämä muodostaa hydrosyklonin keskelle aksiaalisen suuntaisen ilmaytimen. Tämä ilmaydin yhteydessä ilmakehään aliteputken reiän kautta ja parhaassa tapauksessa ilmaydin on koko syklonin mittainen ja sen halkaisija pysyy stabiilina. Stabiili ilmasydän on merkki pyörrevirtauksen tasaisuudesta. (Salimi 2015, 12.)



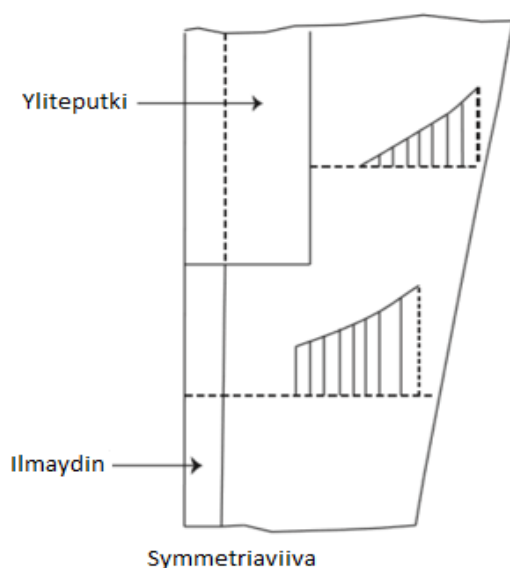
Kuva 2. Tangentiaalisessa syötössä toimivan hydrosyklonin pyörrevirrat (Park 2003, 8)

## 3.2 Nesteen virtaus hydrosyklonissa

Hydrosyklonin pyörrevirtaus on symmetrinen lukuun ottamatta syöttöputken aukon läheisyyttä. Hydrosyklonin sisäistä virtausta voidaan kuvata kolmen virtaussuunnan nopeuksien avulla radiaalinopeus  $V_r$ , tangentiaalinen nopeus  $V_t$  ja aksiaalinen nopeus  $V_a$ . (Svarovsky 2000, 193.)

### 3.2.1 Radiaalinopeus

Radiaalinopeuksia on vaikea mitata tarkasti, koska niiden voimat ovat paljon pienempiä kuin tangentiaalisen ja aksiaalisen virtauksen voimat. Radiaalinopeudet kohdistuvat sisäänpäin ja vähenevät säteen kutistuessa (kuva 3). Radiaalinopeudet määrittävät kiinteiden partikkelien kulkuajan ja mahdollistavat syklonisen erottelun. Radiaalinopeudet määräytyvät aksiaalisen nopeuden ja hydrosyklonin geometrian perusteella. Suurin sisäänpäin kohdistuva nopeus sijaitsee yliteputken alapuolella. (Svarovsky 2000, 195; Marthinussen 2011, 14.)



Kuva 3. Radiaalinopeuksien jakautuminen hydrosyklonissa (Svarovsky 2000, 195)

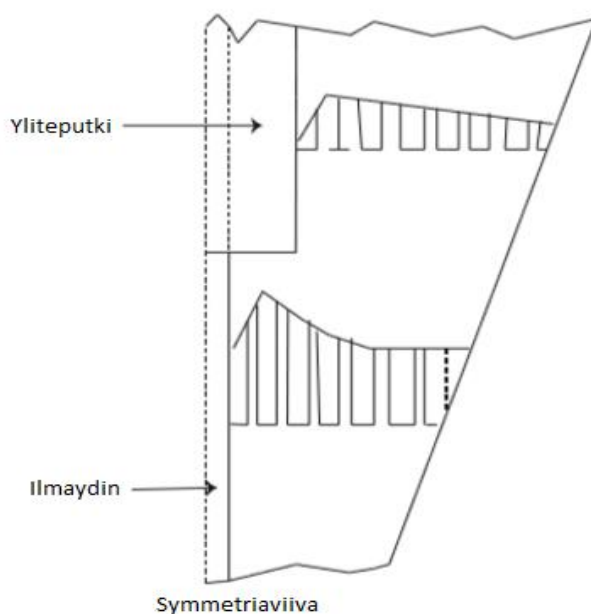
### 3.2.2 Tangentiaalinen nopeus

Tangentiaalinen voima on keskipakovoimaan perustuvan erottelun keskeisin voima, sen selvittämiseen keskitytään, kun halutaan mallintaa hydrosyklonin virtausta. Yliteputken alalaidan korkeudella tangentiaalinen nopeus ( $V_t$ ) kasvaa pyörrevirran kutistuvan säteen

ansiosta, nopeuden kasvaminen johtuu siitä, että pyörrevirran säde on suurempi, kuin yliteputken säde. Kyseistä säteen ja tangentialisen nopeuden suhdetta voidaan tarkastella kaavalla (2). (Svarovsky 2000, 193; Salimi 2015 s.13.)

$$V_{tr}^n = \text{vakio} \quad (0.6 \leq n \leq 0.9) \quad (2)$$

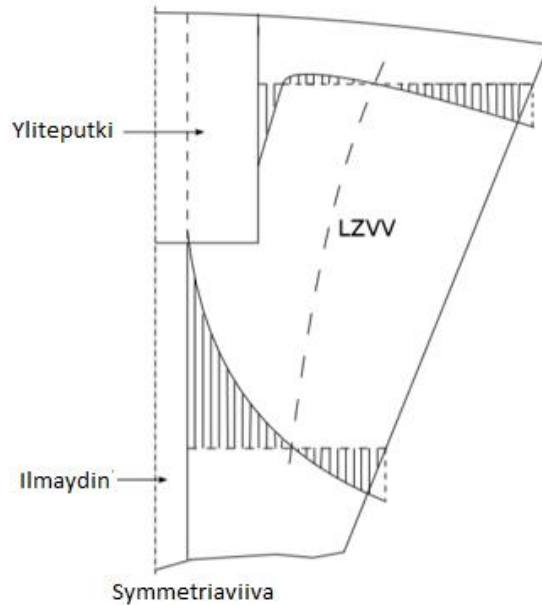
Kaavasta nähdään, että tangentialinen nopeus vähenee suhteessa säteen kasvuun. Tämä kaava pätee, kunnes virtaus saavuttaa hydro syklonin sisäiseen ilmaytimeen (kuva 4). Tangentialisen virtauksen nopeus syklonissa on vakio, lukuun ottamatta seinämien vaikutusta ja yllämainittua suhdetta. (Svarovsky 2000, 194; Park 2003, s.8.)



Kuva 4. Tangentialisen nopeuden jakauma hydro syklonissa (Svarovsky 2000, 194; Salimi 2015, 14)

### 3.2.3 Aksiaalinen nopeus

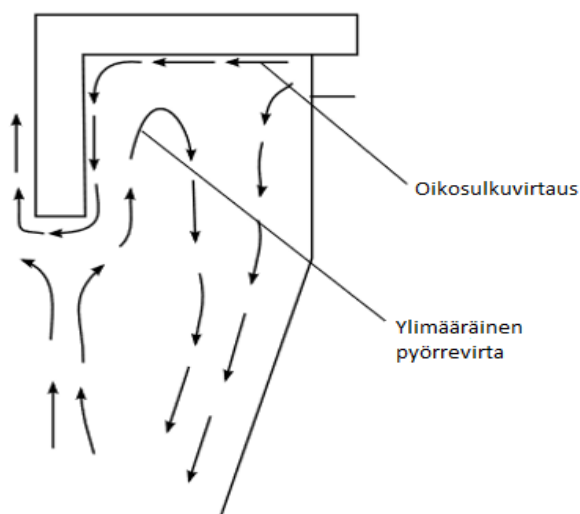
Tyypillisessä hydro syklonissa tapahtuu toiminnan aikana voimakas seinien myötäinen alaspäin suuntautuva virtaus ja keskustan mukainen ylöspäin suuntautuva virtaus. Tämä virtaus on välttämätön hydro syklonin toiminnalle, sillä se poistaa syklonista alitteen partikkelit. Alaspäin suuntautuva virtaus kumoutuu osin sisemmän pyörrevirran ylöspäin suuntautuvan virtauksen alueella lähellä ilmaydintä, tämä mahdollistaa kevyempien partikkelien siirtymisen sisemmän pyörrevirran kuljetettavaksi. Pyörrevirtojen toistensa kumoamisen ansiosta hydro syklonin aksiaalivirralla on selvästi havaittava ulkoseinän profiilia myötäilevä keskittymä, jossa aksiaalinen nopeus on nolla. Tämä keskittymä nähdään kuvassa 5 linjana LZVV. (Svarovsky 2000, 194; Marthinussen 2011, 13.)



Kuva 5. Aksiaalisen nopeuden jakautuminen hydrokyklonissa. (Svarovsky 2000, 195; Marthinussen 2011, 13)

### 3.2.4 Ylimääräinen pyörrevirta ja oikosulkuvirta

Ylimääräinen pyörrevirta syklonin keskellä ja oikosulkuvirtaus ovat vikatiloja hydrokyklonin sisäisessä virtauksessa (kuva 6). Yliteputken ulkoseinän ja syklonin ulkoseinän välille voi muodostua ylimääräinen pyörrevirta, silloin kuin yliteputki ei kykene poistamaan kaikkea sille ohjattua virtausta. Tällainen virtaus seuraa liian kovasta paineesta syklonissa. Oikosulkuvirtaus syntyy syöttökammion kannen tasolla syöttöputken ja yliteputken välille, jos yliteputken alalaita on liian lähellä syöttöputkea. (Marthinussen 2011, 14.)



Kuva 6. Ylimääräinen pyörrevirtaus hydrokyklonissa (Salimi 2015, 17)

### 3.2.5 Partikkelien liike hydrosyklonissa

Hydrosykloniin syötettävät partikkelit liikkuvat virtauksen mukana radiaalisesti rajanopeudellaan välitysnesteeseen nähden. Hydrosyklonin virtauksessa olevaan partikkeliin vaikuttaa kaksi toisiaan vastustavaa voimaa, ulospäin suuntautuva keskipakovoima ja sisäänpäin suuntautunut vastusvoima (kuva 7). Partikkelin massa, muoto ja tiheys määrittävät irtautuuko partikkeli radiaalivirrasta ja siirtyykö se ulkoseinää päin tangentiaalisen virtauksen mukana vai jatkaako se radiaalivirran mukana syklonin sisempään pyörrevirtaukseen. Radiaalisessa ja aksiaalisessa suunnassa partikkelien liike on sama kuin välitysnesteen. (Cilliers 2000)

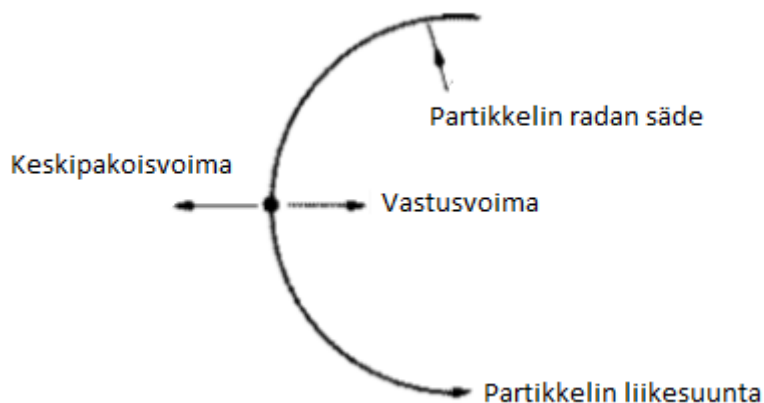
Partikkelien koko on hyvin ratkaisevassa asemassa, kun pyörrevirtauksen vaikutusta niihin kuvaillaan. Partikkeliin kohdistuva keskipakovoima on suoraan verrannollinen partikkelin massaan ja partikkelin halkaisijan kuutioon (kaava 3). Partikkeliin kohdistuva vastusvoima on suoraan verrannollinen sen halkaisijaan Stokesin lain mukaan (kaava 1). (Skorpen, 2012, 15.)

$$m = \rho p * \frac{\pi}{6} * x^3 \quad (3)$$

m = partikkelin massa (g)

x = partikkelin halkaisija (mm)

$\rho p$  = partikkelin tiheys (g/cm<sup>3</sup>)



Kuva 7. Pyörrevirtauksessa olevaan kappaleeseen kohdistuvat voimat (Wills, 2006, 212)

### 3.3 Hydrosyklonin erotustehokkuus

Hydrosyklonien erotustehokkuutta tarkastaessa kiinnitetään huomiota kahteen eri muuttu- jaan, jotka ovat järjestelmän läpivirtaus ja alite virtauksen suhde syöttövirtaukseen eli virtaussuhde  $R_f$ . Läpivirtausta lisäämällä kasvatetaan hydrosyklonin sisäistä painetta ja parannetaan erotustehoa pienempien partikkelien erottelussa. Virtaussuhde vaikuttaa erotustehokkuuteen seuraavasti: kun virtaussuhde on liian pieni ja syötteen kiintoainepitoisuus on liian suuri, aliteputken kyky poistaa kaikki materiaali on liian pieni ja tämä johtaa siihen, että karkeaa materiaalia päätyy ylittevirtaukseen.

Hydrosyklonin suurin erotustehokkuus on ulkoisessa pyörrevirtauksessa, jossa korkea keskipakoisvoima aiheuttaa karkeiden partikkelien asettumisen ulkoseinille ja näin poistumisen alitteena, mutta hienommat partikkelit asettuvat virtauksen vietäviksi sisemmän pyörrevirtauksen kuljetettaviksi. Sisemmän pyörrevirtauksen keskipakoisvoima on heikompi, kuin uloimman pyörrevirtauksen, joten erottelutehokkuus on pienempi. Partikkelit, jotka joutuvat sisempään pyörrevirtaukseen, eivät enää erotu vaan seuraavat vain virtausta poistuen ylitteenä. (Salimi 2015, 23.)

#### 3.3.1 Massatasapaino

Hydrosyklonin toimintaa tarkasteltaessa ollaan kiinnostuneita kolmesta eri partikkeli fraktiosta, jotka ovat syötön massavirta  $M$ , ylitteen massavirta  $M_f$  ja alitteen massavirta  $M_c$ , joten hydrosyklonin kokonaismassavirta voidaan johtaa kaavaksi (kaava 4) (Svarovsky 2000, 67.)

$$M = M_c + M_f \quad (4)$$

$M$  = syötön kiintoainevirta,  $m^3/s$

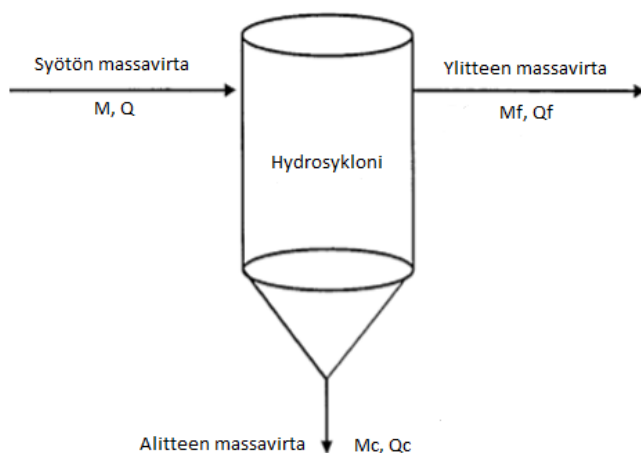
$M_f$  = ylitteen kiintoainevirta,  $m^3/s$

$M_c$  = alitteen kiintoainevirta,  $m^3/s$

Jos oletetaan, että kaikki hydrosykloniin syöttävä materiaalivirta poistuu kaavan 4 mukaan ja partikkelien koko säilyy, voidaan laskea massatasapaino kaiken kokoisille partikkeleille. Tästä voidaan johtaa kaava partikkelikoko  $x$ :lle (kaava 5) (Svarovsky 2000, 67.)

$$(M)_x = (M_c)_x + (M_f)_x \quad (5)$$





Kuva 8. Massatasapaino hydrosyklonissa, jossa  $Q$  on syötteen tilavuusvirta  $\text{dm}^3/\text{s}$ ,  $Q_u$  on alitteen tilavuusvirta  $\text{dm}^3/\text{s}$  ja  $Q_f$  on ylitteen tilavuusvirta  $\text{dm}^3/\text{s}$ . (Park 2003, 20)

### 3.3.2 Erotustehokkuuden määrittäminen

Hydrosyklonin erotustehokkuus  $E_T$  voidaan määrittää alitteen  $M_c$  ja syötteen  $M$  massavirtojen suhteena kaavalla (6), tämä voi saada arvoja 0:n ja 1:n väliltä.

$$E_T = \frac{M_c}{M} \quad (6)$$

Tai, jos massatasapainon kaava (4) pätee, voidaan erotustehokkuus ratkaista myös ylitteen massavirrasta kaava (7) (Svarovsky 2000, 68.)

$$E_T = 1 - \frac{M_f}{M} \quad (7)$$

### 3.3.3 Virtaussuhde

Virtaussuhde  $R_f$  kuvaa tilavuusvirtauksien suhdetta alitteen ja syötön välillä, tämä voidaan laskea kaavalla (8) (Svarovsky 2000, 70). Virtaussuhdetta hyödynnetään korrelaatioalueena silloin, kun halutaan selvittää hydrosyklonin käytännön toimintaa lähellä olevia erotustehokkuuden ja luokitustehokkuuden arvoja.

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_i} \quad (8)$$

$Q_i$  = Syötön tilavuusvirta  $\text{dm}^3/\text{s}$

$Q_u$  = Alitteen tilavuusvirta  $\text{dm}^3/\text{s}$

### 3.3.4 Redusoitu erotustehokkuus

Redusoitu erotustehokkuus on huomattavasti tarkempi ja yleisemmin käytetty, verrattuna kaavan (6) esittämään erotustehokkuuden määritelmään. Redusoitu erotustehokkuus ottaa huomioon hydrosykloneissa ilmenevän dead flux -ilmiön vaikutuksen erotustehokkuuteen. Dead flux -ilmiö aiheutuu, kun alitteen kiintoainepitoisuus on liian suuri tai pieni, jolloin alitteen sekaan päätyy partikkeleja, joiden tulisi kuulua ylittevirtaan. Redusoitu erotustehokkuus lasketaan kaavalla (9), jonka komponentteina käytetään kaavojen 6 - 8 ratkaisuja. (Svarovsky 2000, 89; Park 2003, s.22.)

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (9)$$

### 3.3.5 Hydrosyklonin luokitustehokkuus

Luokitustehokkuus kuvaa todennäköisyyttä, jolla tietyn kokoinen partikkeli erottuu hydrosyklonissa alitteeseen. Luokitustehokkuus määritellään periaatteessa samalla tavalla kuin erotustehokkuus kaavassa (6), mutta yksittäinen luokitustehokkuuden arvo vastaa vain yhtä partikkelikokoa kerrallaan (kaava 10). (Svarovsky 2000, 74; Park 2003, s.22.)

$$G(x) = (M_c)_x / (M)_x \quad (10)$$

$(M_c)_x$  = alitteen kiintoainevirta partikkelikoolle  $x \text{ m}^3/\text{s}$

$(M)_x$  = syötön kiintoainevirta partikkelikoolle  $x \text{ m}^3/\text{s}$

Ratkaistaessa hydrosyklonin luokitustehokkuutta useille eri partikkelikokoluokille, voidaan luokitustehokkuus esittää jatkuvana funktiona partikkelikoon muuttujana. Tätä funktiota kutsutaan luokituskäyräksi, tämä käyrä kuvaa todennäköisyyksiä, jolla partikkelit päätyvät ylitteeseen tai alitteeseen. Tästä todennäköisyyksiin pohjautuvasta toiminnasta johtuen luokituskäyriä ei voida vain puhtaasti luoda laskennallisesti vaan tarvitaan laitekohtainen korjauskerroin, joka voidaan selvittää kokeellisesti. (Svarovsky 2000, 90.)

Luokitustehokkuus voidaan esittää redusoituna dead flux -ilmiötä varten, kuten erotustehokkuuskin. Redusoidun luokitustehokkuuden kuvaaja leikkaa y-akselin origossa, kun taas luokitustehokkuuden kuvaajan pisteessä  $R_f$ . Redusoitu luokitustehokkuus voidaan laskea kaavalla (11), jonka komponentteina käytetään kaavojen 8 ja 10 ratkaisuja. (Park 2003, 23.)

$$G'(x) = \frac{G(x) - R_f}{1 - R_f} \quad (11)$$

### 3.3.6 Katkaisukoko ja redusoitu katkaisukoko

Katkaisukoolla  $d_{50}$  tarkoitetaan sitä luokituskäyrän partikkelikokoa, joka päättyy yhtä todennäköisesti, joko ylitteeseen tai alitteeseen, eli kaavan (10)  $G(x)=0.5$  arvo. Tätä katkaisukokoa suuremmat partikkelit päätyvät todennäköisimmin alitteeseen ja pienemmät ylitteeseen. Tästä partikkelikoosta käytetään nimitystä  $d_{50}$ -koko, kaavalla (11) redusoidusta  $d_{50}$ -koosta käytetään nimitystä  $d_{50(c)}$ , jota käytetään yleisimmin hydrosyklonien matemaattisissa malleissa. (Wills 2006, 214.)

### 3.3.7 Luokituksen terävyys

Hydrosyklonin luokituksen terävyys merkitsee luokituskäyrän keskikohdan jyrkkyyttä, eli luokituskäyrän tangentin kulmakerrointa. Mitä jyrkempi nousu, sitä terävämpi eli tehokkaampi on hydrosyklonin luokitus. Käyrän jyrkkyys voidaan laskea määrittelemällä käyrältä pisteet katkaisukoon  $d_{50}$  molemmiin puolin. Esimerkiksi yleisesti valitaan hydrosyklonin  $d_{75}$ - ja  $d_{25}$ -koot. Terävyysindeksi  $I$  saadaan ratkaistua kaavalla (12):

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \quad (12)$$

Mitä pienemmän arvon  $I$  saa, sitä terävämpi on hydrosyklonin luokitus ja sitä vähemmän materiaalia luokitellaan väärin (Svarovsky 2000, 73; Wills 2006, 214.)

## 3.4 Hydrosyklonin toimintaan vaikuttavat tekijät

Hydrosyklonien toimintaan vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin geometriisiin muuttujiin ja käyttömuuttujiin. Geometriset muuttujat pitävät sisällään sellaiset muuttujat, jotka ovat riippuvaisia hydrosyklonin koosta ja rakenteen mittasuhteista. Käyttömuuttujat, ovat riippuvaisia vain hydrosyklonin käyttöolosuhteista ja syötteen ominaisuuksista. (van Loggenberg 2016.)

Taulukossa 1 nähdään, kuinka eri parametrien kasvattaminen vaikuttaa hydrosyklonin toimintaan. Parametrien muutokset kasvattavat tai vähentävät hydrosyklonin materiaalivirtausta, katkaisukokoa ja luokituksen terävyyttä.

Taulukko 1. Muuttujien vaikutukset hydrosyklonin toimintaan (Cilliers 2000)

Kasvatetaan	syklonin materiaa- livia (Q)	Katkaisukoko (d50)	Luokituksen terä- vyys
Syklonin halkaisi- jaa, $D_c$	Kasvaa	Kasvaa	Kasvaa
Yliteputken halkai- sijaa, $D_o$	Kasvaa	Kasvaa	Kasvaa
Aliteputken halkai- sijaa, $D_u$	Kasvaa	Vähenee	Vähenee
Syöttöaukon hal- kaisijaa, $D_i$	Kasvaa	Vähenee	Vähenee
Syklonin korkeus, L	Kasvaa	Kasvaa	Kasvaa
Erottelukartion su- pistuma kulma	Ei vaikutusta	Kasvaa	Kasvaa
Paineen alennus, P	Kasvaa	Vähenee	Joko kasvaa tai vä- henee
Syöttövirran kiin- toainepitoisuus, $\Phi$	Kasvaa	Kasvaa	Vähenee

### 3.4.1 Käyttömuuttujat

#### Syöttöpaine

Syötön tilavuusvirtaa pystytään säätämään syöttöpaineella. Mitä korkeampi syöttöpaine, sitä pienempi katkaisukoko hydrosyklonilla on. Syöttöpaineen vaikutus katkaisukokoon on varsin pieni, joten tarvitaan suuri muutos syöttöpaineeseen, jotta saavutettaisiin huomattava muutos katkaisukoossa. (van Ommen 2011, 49.)

#### Nesteen ja kiintoaineen tiheys ero

Nesteen ja kiintoaineen tiheys eron täytyy olla riittävän suuri, että hydrosykloni menetelmää voidaan alkuunkaan käyttää hyväksi kiintoaineen erottelussa, koska hydrosykloninen

erottelu tarvitsee riittävän suuren partikkelien laskeutumisenopeuden ollakseen mahdollista. Nesteen ja kiintoaineen välinen tiheys ero hallitsee partikkelien laskeutumisenopeutta hydrosyklonissa: mitä suurempi tiheysero on, sitä tarkempaan erotteluun hydrosykloni pystyy ja sitä pienempi on hydrosyklonin katkaisukoko. (van Ommen 2011, 49.)

### **Syöttövirran viskositeetti**

Syöttövirran viskositeetillä on käytännössä suurin vaikutus hydrosyklonin katkaisukokoon. Syöttövirran viskositeetti perustuu prosessinesteen viskositeettiin, syöttövirran kiintoainepitoisuuteen ja syöttövirran partikkelikokojakaumaan. Syöttövirran kiintoainepitoisuus on suorin tapa vaikuttaa hydrosyklonin katkaisukokoon; jo pieni kiintoainepitoisuuden muutos aiheuttaa suuren muutoksen katkaisukokoon. (van Ommen 2011, 50.)

### 3.4.2 Geometriset muuttujat

#### **Syöttökammio**

Syöttökammion halkaisijalla on suora vaikutus keskipakoisvoiman suuruuteen, joka kohdistuu hydrosykloniin syötettäviin partikkeleihin, sillä halkaisijan nostaminen nostaa partikkelien kiertosädettä syklonissa, mutta tämän vaikutus on varsin pieni luokitustehokkuudelle. Syöttökammion halkaisijalla on kumminkin suuri merkitys hydrosyklonin muiden osien mitoituksessa, sillä kaikki hydrosyklonin mitat suhteutetaan syöttökammion halkaisijaan. (Wills 2006, 221.)

#### **Syöttöaukko**

Syöttöaukon poikkileikkauksen pinta-ala määrää syöttönopeuden, joten muuttamalla syöttöaukon pinta-alaa voidaan nostaa tai laskea syöttönopeutta. Syöttöputken poikkileikkauksen muodolla voidaan muuttaa virtauksen leviämistä syöttösylinterin seinämää. Poikkileikkaus on nykyisin useimmiten suorakaiteen muotoinen virtauksen mahdollisimman laajaksi levittämistä varten, mutta myös pyöreät syöttöaukot ovat yleisiä. Syöttöputket suunnitellaan nykyisin kaareviksi, jotta syöte on jo sisään tullessaan kaartuvassa liikkeessä. (Wills 2006, 220.)

## **Erotuskartio**

Erotuskartion tärkein ominaisuus on sen supistuskulma. Yleisimmin käytettävä kartioiden supisruskulma on 10 - 25°. Tällaista erotuskartion mallia kutsutaan kapean kulman mal-leiksi. Kartion kapea kärki hidastaa virtauksia lähellä kartion huippua ja lisää hydrosyklo-nin erottelutilaa. Tällaisen mallin etuna on se, että sen tarvitsema katkaisukoko on suh-teellisen pieni ja se kykenee erottelemaan pieniä partikkeleita tehokkaasti. (Salimi 2015, 27.)

## **Yliteputki**

Yliteputken halkaisija on hyvin tärkeä muuttuja hydrosyklonin toiminnan ohjauksessa, sillä ohjataan hydrosyklonin luokitusta ja ylitteen poistumista. Mitä suurempi halkaisija yliteput-kella on, sitä suurempi on hydrosyklonin kapasiteetti ja katkaisukoko. (Wills 2006, 220.)

## **Aliteputki**

Aliteputki hallitsee hydrosyklonin alitteen tiheyttä, joten sen halkaisija on hydrosyklonin toi-minnan kannalta erittäin tärkeää. Aliteputken halkaisijalla hallitaan hienon aineksien kul-keutumista alitteeseen, ilmaytimen muodostumista ja halkaisijaa. Liian pienen halkaisijan aliteputki tukahduttaa ilmaytimen ja aiheuttaa karkean materiaalin kulkeutumista ylittee-seen. Liian suuren halkaisijan aliteputki vähentää erotustehokkuutta ja luokittelunterä-vyyttä. Aliteputken halkaisijan oikeaa kokoa voidaan tarkkailla silmämääräisesti alitesuih-kun muodosta. Optimi alitesuihkun muoto on ontto kartio noin 20 - 30° kulmalla kärkikul-malla. (Wills 2006, 220.)

Taulukossa 2 esitellään yleisien hydrosykloni mallien geometrysten mittojen suhteita. Nämä mittasuhteet on havaittu toimiviksi aiempien tutkimuksien pohjalta ja niitä käytetään yleisesti mitoituksen lähtökohtina moderneille hydrosykloneille.

Taulukko 2. Hydrosyklonien tyypillisiä mitoitussuhteita (Park 2003, 15)

HYDROSYKLONI TYYPIT JA KOOT	MITTASUHTEET				
	$D_i / D_c$	$D_o / D_c$	$l / D_c$	$L / D_c$	Kartiokulma
<b>RIETEMA MALLI</b> <b><math>D_c = 0.075M</math></b>	0.28	0.34	0.4	5	20
<b>BRADLEY MALLI</b> <b><math>D_c = 0.038M</math></b>	0.133	0.2	0.33	6.85	9
<b>MOZLEY SYK- LONI <math>D_c = 0.022M</math></b>	0.154	0.214	0.57	7.43	6
<b>MOZLEY SYK- LONI <math>D_c = 0.044M</math></b>	0.160	0.25	0.57	7.71	6
<b>MOZLEY SYK- LONI <math>D_c = 0.044M</math></b>	0.197	0.32	0.57	7.71	6
<b>WARMAN 3'' MALLI R<sup>23</sup> <math>= 0.076M</math></b>	0.29	0.2	0.31	4	15

### 3.5 Hydrosyklonien toiminnan mallintaminen

Vaikka hydrosyklonien käytön hyödyt ovat huomattavasti suuremmat, kuin hydrosykloni tekniikan haasteet, on hydrosyklonien toiminnan mallintaminen ja täydellinen ohjaaminen haastavaa niiden sisäisten virtauksien johdosta. Vuosien varrella on rakennettu useita empiirismatemaattisia malleja, joilla on yritetty kuvata hydrosyklonin käyttömuuttujien ja geometristen muuttujien suhdetta. Nämä mallit eivät ole osoittautuneet täysin tarkoiksi, mutta ne ovat hyödyllisiä geometristen muuttujien ja käyttömuuttujien vaikutusten tarkkailussa hydrosyklonin toiminnassa. (Uahengo 2014, 4.)

#### Erottelutehokkuuden mallintaminen

Yleisesti erottelutehokkuuden mallintamiseen pohjana käytetään kahta eri teorianmallia:

- rata-tasapainomalli.
- kulku aika malli.

Rata-tasapainomalli perustuu tasapaino säteen käsitteeseen. Sen mukaan pyörrevirrassa oleva partikkeli saavuttaa säteittäisen tasapainollisen sijainnin radallaan syklonissa, jossa partikkelin rajanopeus on yhtä suuri, kuin nesteen säteisnopeus. Tämän vuoksi suuremmat partikkelit saavuttavat tasapainonsa seinien lähellä, siellä aksiaalinen nopeus on suuntautunut alaspäin ja partikkelit poistuvat alitteena. Pienemmät partikkelit saavuttavat tasapainonsa lähempänä syklonin keskustaa, jossa aksiaalinen virtaus on ylöspäin ja poistuvat ylitteenä. (Skorpen 2012, 16.)

Kulkuaika malli perustuu siihen, että kuinka kauan aikaa partikkelilta kuluu siirtyä syöttöaukolta syklonin seinään. Alkuperäiset kulkuaikamallit tutkivat ehtikö partikkeli saavuttaa syklonin seinän ennen kuin se saavutti erottelukartion huipun. Uudemmat kulkuaika mallit lisäävät myös rata-tasapainomallin itseensä. Molemmat näistä teoriamalleista antavat kohtuullisen hyvän arvion erottelutehokkuudesta. (Skorpen 2012, 16.)

Yleisin empiirismatemaattinen malli, jota hyödynnetään hydrosyklonien mitoittamiseen, on Plittin malli (1976). Kyseisellä mallilla voidaan ennustaa syklonin toimintaa ilman testausdataa useissa eri käyttöolosuhteissa. Malli perustuu syklonin eri parametrien (katkaisukoko, virtaussuhde, tuotanto, leikkauksen terävyys) toiminnalliseen yhteyteen sekä käyttömuuttujiin ja geometrisiinmuuttujiin. Plitt'in mallilla saadaan redusoitu katkaisukoko kaavalla (13) (Silva 2013, 13.):

$$d_{50c} = \frac{50,5D_c^{0,46}D_i^{0,6}D_o^{1,21}e^{0,063\Phi}}{D_u^{0,71}h^{0,38}Q^{0,45}(\rho_s-\rho_l)^{0,5}} \quad (13)$$

$D_c$  = syöttökammion halkaisija

$D_i$  = syöttöaukon halkaisija

$D_o$  = yliteputken halkaisija

$D_u$  = aliteputken halkaisija

$h$  = matka yliteputken alareunasta aliteputken poisto reikään, cm

$Q$  = massavirta hydrosyklonin lävitse, l/min

$\rho_s$  = kiinteän osuuden tiheys g/cm<sup>3</sup>

$\rho_l$  = nestemäisen osuuden tiheys g/cm<sup>3</sup>

$\Phi$  = kiinteän materiaalin prosentuaalinen määrä syötteenä %



## 4 HYDROSYKLONI-TESTAUSJÄRJESTELMÄ

### 4.1 Testausjärjestelmän tavoite

Lahden ammattikorkeakoulussa valmistettiin hydrosyklonin testausjärjestelmä. Tällä prototyypillä haluttiin selvittää, voidaanko hydrosykloni menetelmää hyödyntää Kiemura hankkeen kierrätysmuovien erottelumenetelmänä. Ensisijaisena tavoitteena prototyypillä oli standardi kokoluokan polymeeripartikkeleiden mahdollisimman tarkka erottelu, jotta voidaan todeta, toimiiko hydrosykloni-erottelu polymeereille edes mahdollisimman optimitilanteessa.



Kuva 9. Prototyyppi hydrosykloni

### 4.2 Prototyypin mitat ja muotoilu

Prototyyppi hydrosyklonin halutaan olevan tehokas partikkelien luokittelussa ja erottelussa, joten syöttökammioista tehtiin pitkä ja erottelukartion kärkikulmasta terävä. Hydrosyklonin mitoituksiksi päätettiin taulukon 3 mitat, pohjautuen yleisesti käytettyihin hydrosyklonien mittasuhteisiin, jotka on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 3. Prototyypin hydrosyklonin mitat

<b>Syöttökammion halkaisija</b>	$D_c$	<b>168 mm</b>
<b>Syöttöputken halkaisija</b>	$D_i$	38 mm
<b>Yliteputken halkaisija</b>	$D_o$	32 mm
<b>Aliteputken halkaisija</b>	$D_u$	18 mm
<b>Hydrosyklonin korkeus</b>	$L$	900 mm
<b>Syöttökammion korkeus</b>	$L_c$	500 mm
<b>Erotuskartion korkeus</b>	$Z_c$	400 mm
<b>Yliteputken pituus</b>	$l$	96 mm
$D_i/D_c$		0.23
$D_o/D_c$		0.19
$l/D_c$		0.57
$L/D_c$		5.35
<b>Kartion huippukulma</b>		6°

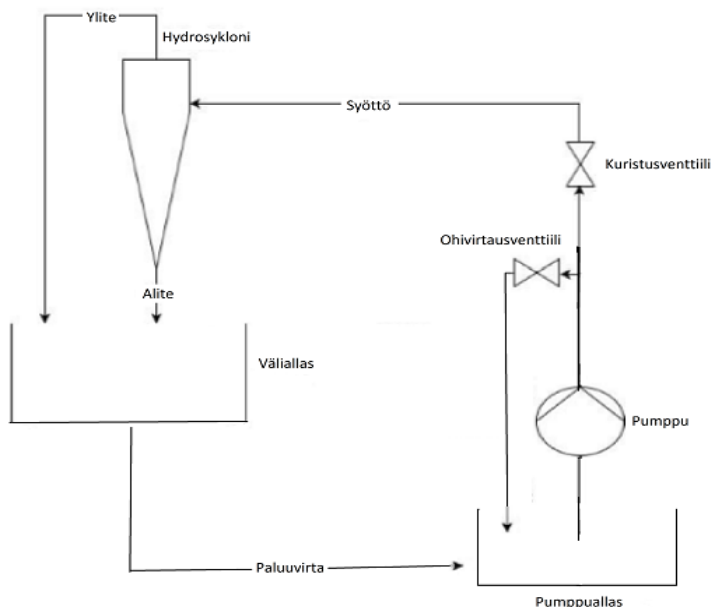
### Säädettävissä olevat geometriset muuttujat

Aliteputken halkaisija sekä yliteputken halkaisija ja syvyys ovat hyvin tärkeitä tekijöitä hydrosyklonin toiminnan kannalta, joten erottelukartion huippu ja syöttökammion kansi päätettiin 3d-tulostaa näiden osien vaihtamisen helpottamiseksi. Näin aliteputken halkaisijaa ja yliteputken halkaisijaa sekä syvyyttä voidaan muuttaa varsin vaivattomasti valmistamalla uudet osat. Osien helppo vaihdettavuus ja muokattavuus mahdollistavat eri halkaisijoiden ja muotojen vaikutusten nopean testauksen.

### 4.3 Vesijärjestelmä

Prototyypilaitteen vesijärjestelmä suunniteltiin suljetuksi kierroksi. Järjestelmän kierrossa materiaalivirta siirretään pumppualtaasta sykloniin, alite ja ylite virtaavat välialtaan päällä olevien keräysverkkojen läpi, jotta kiintoaine saadaan kerättyä talteen, erottelu neste palaa välialtaasta takaisin pumppausaltaaseen. Virtauksen tehoa ohjataan pumpun ja syklonin välissä olevilla ohivirtaus ja kuristusventtiileillä (kuva 10). Syöttöputki päätettiin

taivuttaa syöttökammion ulkoseinän mukaiselle säteelle, jotta aikaan saadaan nesteen pyörivä liike jo ennen syöttökammiota. Järjestelmän pumpuksi valittiin Prof-merkkinen 400 w uppopumppu. Tämä pumppu tuottaa materiaalivirran, jonka suuruus on  $9 \text{ m}^3/\text{h}$  eli  $2.5 \text{ dm}^3/\text{s}$  ja se kykenee käsittelemään kappaleita, joiden halkaisija on maksimissaan 35 mm.



Kuva 10. Prototyyppi hydrosyklonin virtauskaavio

#### 4.4 Prototyypin toiminta-asetukset

Hydrosyklonin toiminnan tasaisuutta voidaan tarkastella hydrosyklonin läpivirtauksesta, eli alitesuihkun muodosta ja ylitevirtauksen tasaisuudesta. Näihin virtauksiin voidaan vaikuttaa suoraan muuttamalla aliteputken ja yliteputken halkaisijaa sekä halkaisijoiden välistä suhdetta. Koeajojen perusteella (taulukko 4) havaittiin, että prototyypin toiminta oli tasaista silloin, kun yliteputken halkaisija oli 32 mm ja sen syvyys on 15 cm, aliteputken halkaisija oli välillä 12 - 15 mm ja pumpun täysi tuotto ohjattiin syötteenä hydrosykloniin. Kun aliteputken halkaisija oli yli 16 mm ylitevirtaa ei saatu aikaiseksi ja pienempi kuin 13 mm aliteputken halkaisija tuotti syklonissa ylimääräisen pyörrevirran. Kaikkein parhaaksi ylite ja alite putken suhteeksi prototyypin geometrialle havaittiin 32 mm yliteputken halkaisija ja 13 mm aliteputken halkaisija.

Taulukko 4. Testattujen parametrien vaikutus hydrosyklonin toimintaan

Aliteputken halkaisija	Yliteputken halkaisija	Ohivirtaus-venttiili	Alitesuihku	Ylitevirtaus
18 mm	32 mm	kiinni	epätasainen	ei alkanut
16 mm	32 mm	kiinni	epätasainen ja laajakulmainen	epätasainen virtaus
15 mm	32 mm	kiinni	tasainen ja laajakulmainen	tasainen
14 mm	32 mm	kiinni	tasainen	tasainen
13 mm	32 mm	kiinni	tasainen ja optimi muoto	tasainen
13 mm	26 mm	kiinni	epätasainen	epätasainen
13 mm	32 mm	auki	epätasainen	ei alkanut
12 mm	32 mm	kiinni	tasainen ja terävä kulma	epätasainen virtaus

#### 4.5 Testauslaitteiston toiminnan mallintaminen

Hydrosyklonin toimintaa tarkasteltiin matemaattisesti Plittin mallin mukaan, mallinnuksessa keskityttiin yliteputken syvyyden ja syötteen kiinteän aineen prosentuaalisen osuuden vaikutukseen testilaitteen redusoituun katkaisukokoon  $d_{50c}$ . Mallinnuksessa keskityttiin polyolefiinien erotteluun, sillä niiden erottelu oli laitteen ensisijainen päämäärä. Mallinnuksessa käytetyn polyeteenin tiheys on  $0,92 \text{ g/cm}^3$ .

$$\text{Plittin mallin kaavan (13) mukaan } d_{50c} = \frac{50,5 D_c^{0,46} D_i^{0,6} D_o^{1,21} e^{0,063\Phi}}{D_u^{0,71} h^{0,38} Q^{0,45} (\rho_s - \rho_l)^{0,5}}$$

Mallinnuksen pohjalta huomataan, että ennustettava redusoitu katkaisukoko polyeteenille on parametri muutosten mukaan 3 - 6  $\mu\text{m}$  välillä (taulukko 5). Katkaisukoko on tarpeeksi pieni, jotta prototyyppi hydrosykloni pystyy teoriassa täydelliseen polyolefiinien erotteluun standardi partikkelikoon näyttemateriaaleille, sillä niiden halkaisijat ovat millimetreissä.

Taulukko 5. Polyeteenin redusoidun katkaisukoon matemaattinen mallintaminen

<b>Syötteen kiintoaine pitoisuus %</b>	<b>d<sub>50c</sub> tällä pi- toisuudella µm</b>	<b>Ylite- ja Ali- teputken välinen etäisyys cm</b>	<b>d<sub>50c</sub> tällä etäisyy- dellä µm</b>	<b>Molemmat muuttujat yhdessä D<sub>50c</sub> µm</b>
<b>1 %</b>	3,589	85	3,648	3,647
<b>5 %</b>	3,598	80	3,876	3,885
<b>10 %</b>	3,609	75	4,134	4,157
<b>15 %</b>	3,621	70	4,430	4,468
<b>20 %</b>	3,632	65	4,770	4,827
<b>25 %</b>	3,644	60	5,168	5,246
<b>30 %</b>	3,655	55	5,638	5,741

## 5 MATERIAALIEN TESTAUS

### 5.1 Materiaalivalinnat ja testiasetukset

Prototyyppi hydrosyklonilla suoritettiin erottelutestejä eri polymeerityypeillä. Materiaaleiksi testeihin valittiin standardi partikkelikoon materiaaleja eli granulaatteja, sekä hankkeen käytössä olevalla laboratorio murskaimella tuotettua murskattua materiaalia. Materiaalityypeiksi valittiin väliaineena käytetyn veden tiheyttä selvästi pienempiä ja suurempia, sekä hyvin lähellä väliaineen tiheyttä olevia polymeerityyppejä. Taulukossa 6 esitellään valittujen polymeerityyppien tiheydet ja niiden partikkelikoko.

Taulukko 6. Koemateriaalit

Materiaali	Tiheys g/cm <sup>3</sup>	Partikkelikoko
<b>LDPE</b>	0,92	Granulaatti
<b>PP</b>	0,90	Granulaatti
<b>PC/ABS</b>	1,10	Granulaatti
<b>HIPS</b>	1,03	Granulaatti
<b>PA6</b>	1,14	Granulaatti
<b>ASA</b>	1,07	Granulaatti
<b>PET</b>	1,38	Murska
<b>HDPE</b>	0,95	Murska
<b>PP</b>	0,90	Murska

Koemateriaalit punnittiin ennen koeajoa kuivana, koeajon jälkeen punnittiin ylitteen ja alitteen kiintomateriaalit märkinä. Materiaaleja kuivattiin 80 C° uunissa 40 minuuttia ja kiintoainekset punnittiin kuivattuina. Koeajoissa mitattiin materiaaleille erotustehokkuus ja hydrosyklonin virtaussuhde. Seulojen ja mittauslaitteiston puutteiden vuoksi luokituskäyriä ei voitu mitata murskatulle materiaalille.

Oletus koeajo parametreinä käytettiin prototyypin testausvaiheessa hydrosyklonin toiminnan kannalta stabiileimmiksi osoittautuneita asetuksia. Silloin kun huomattiin ettei saavutettu täydellistä koemateriaalien luokitusta oletusasetuksilla, etsittiin materiaaliakohtaisesti toimivimmat asetukset. Kuvassa 10 esitetään onnistunut luokituskoee.



Kuva 10. LDPE- ja PC/ABS- luokituksen testaus

## 5.2 Standardi partikkelikoon materiaalien testaus

Standardi partikkelikoon materiaalit olivat muoviteollisuudessa yleisesti käytettyjä polymeeri granulaatteja. Granulaatit ovat muodoltaan joko pisaramaisia tai lieriömäisiä, joten partikkelien muodolla ei ole suurta vaikutusta niiden erottelutehokkuuteen. Granulaattien halkaisijat vaihtelevat muotonsa takia välillä 2 – 5 mm. Granulaattien partikkelikoko on standardi ja niiden materiaali on homogeeninen, joten granulaateilla pystytään testaamaan prototyypin toimintaa optimiolosuhteissa.

### 5.2.1 Väliaineen tiheyttä kevyempien materiaalien testaus

Valituilla väliaineen tiheyttä kevyemmällä polyolefiini granulaateilla saavutettiin oletus koeajo parametreillä täydellinen luokitus, joten prototyyppi sykloni kykenee erottelemaan polyolefiinejä täydellisissä olosuhteissa.

Taulukko 7. Väliaineen tiheyttä kevyempien materiaalien koeajo parametrit

Virtausnopeus	Yliteputken syvyys	Ohitusvirtaventtiili	Testiaika
2,5 dm <sup>3</sup> /s	15 cm	kiinni	30 sec

Koeajo asetuksilla (taulukko 7) ja materiaaleilla (taulukko 8), sekä yliteputken halkaisijalla 32mm ja aliteputken halkaisijalla 13 mm saatiin aikaseksi 2.5 dm<sup>3</sup>/s materiaalivirta, joka jakautui 0,3365 dm<sup>3</sup>/s alitevirraksi ja 2.1635 dm<sup>3</sup>/s ylitevirtaukseksi.

Kaavan (8)  $R_f = \frac{Q_u}{Q_i}$  pohjalta virtaussuhteeksi testilaitteelle saadaan  $R_f = 0,13459$ .

Taulukko 8. Väliaineen tiheyttä kevyempien materiaalien testit

<b>Materiaali</b>	<b>Massa kuivana g</b>	<b>Alite märkä g</b>	<b>Ylite märkä g</b>	<b>Alite kuiva g</b>	<b>Ylite kuiva g</b>
<b>LDPE</b>	197,6	0	216,7	0	197,6
<b>LDPE</b>	189,2	0	203,4	0	189,2
<b>LDPE</b>	127,6	0	143,3	0	127,6
<b>PP</b>	176,5	0	188,3	0	176,5
<b>PP</b>	175,8	0	183,2	0	175,8
<b>PP</b>	180,2	0	193,4	0	180,2

#### Erottelutehokkuus

Kaavan (7)  $E_T = 1 - \frac{M_f}{M}$  pohjalta syklonin erotustehokkuudeksi testimateriaaleille saadaan arvo 0 eli kaikki materiaali päätyi ylitteeseen.

#### 5.2.2 Väliaineen tiheyttä raskaampien materiaalien testaus

Valituilla väliaineen tiheyttä raskaammilla koemateriaaleilla saavutettiin myös koeajo parametreillä täydellinen luokitus. Havaittiin myös, että jos ylite ja alite putken välinen erottelu etäisyys on liian lyhyt, raskaiden materiaalien luokituksen terävyys laskee ja saadaan pieniä määriä raskasta materiaalia ylitteeseen.

Taulukko 9. Väliaineen tiheyttä raskaampien materiaalien koeajo parametrit

Virtausnopeus	Yliteputken syvyys	Ohitusvirtaventtiili	Testiaika
2,5 dm <sup>3</sup> /s	15 cm	kiinni	30 sec



Koeajo asetuksilla (taulukko 9) ja materiaaleilla (taulukko 10), sekä yliteputken halkaisijalla 32 mm ja aliteputken halkaisijalla 13 mm saatiin aikaseksi 2.5 dm<sup>3</sup>/s materiaalivirta, joka jakautui 0,3233 dm<sup>3</sup>/s alitevirraksi ja 2.1767 dm<sup>3</sup>/s ylitevirtaukseksi.

Kaavan (8)  $R_f = \frac{Q_u}{Q_i}$  pohjalta virtaussuhteeksi testilaitteelle saadaan  $R_f = 0,12932$ .

Taulukko 10. Väliaineen tiheyttä raskaampien materiaalien testit

<b>Materiaali</b>	<b>Massa kuivana g</b>	<b>Alite märkä g</b>	<b>Ylite märkä g</b>	<b>Alite kuiva g</b>	<b>Ylite kuiva g</b>
<b>PA6</b>	219,4	238,2	0	219,4	0
<b>PA6</b>	208	231,7	0	208	0
<b>PA6</b>	211,3	237,2	0	211,3	0
<b>PC/ABS</b>	209,6	219	0	209,6	0
<b>PC/ABS</b>	199,4	225,3	0	199,4	0
<b>PC/ABS</b>	192,7	208	0	192,7	0

Erottelutehokkuus

Kaavan (6)  $E_T = \frac{M_c}{M}$  pohjalta syklonin erotustehokkuudeksi testimateriaaleille saadaan arvo  $E_T = 1$  eli kaikki materiaali päätyi alitteeseen. Redusoitu erotustehokkuus kaavan (9) mukaan  $E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f}$  antaa näille materiaaleille tuloksen  $E'_T = 1$ .

### 5.2.3 Väliaineen tiheyttä lähellä olevien materiaalien testaus

Väliaineen tiheyttä lähellä olevien koemateriaalien testeissä huomattiin, että lyhentämällä ylite ja aliteputken välistä etäisyyttä eli siis erottelumatkaa, saatiin aikaiseksi huomattavasti parempi erottelutehokkuus. Väliaineen tiheyttä lähellä olevien materiaalien kanssa havaittiin myös, että tarvitaan ainakin 6 % ero tiheyksissä tarkan erottelun saavuttamiseen. Koemateriaalilla ASA saavutettiin 96 % erottelutehokkuus ja HIPS koemateriaalilla 84 % erottelutehokkuus.

Taulukko 11. Väliaineen tiheyttä lähellä olevien materiaalien koeajo parametrit

Virtausnopeus	Yliteputken syvyys	Ohitusvirtaventtiili	Testiaika
2,5 dm <sup>3</sup> /s	25 cm	kiinni	30 sec

Koeajo asetuksilla (taulukko 11) ja materiaaleilla (taulukko 12), sekä yliteputken halkaisijalla 32mm ja aliteputken halkaisijalla 13 mm saatiin aikaseksi 2.5 dm<sup>3</sup>/s materiaalivirta, joka jakautui 0,3275 dm<sup>3</sup>/s alitevirraksi ja 2.1725 dm<sup>3</sup>/s ylitevirtaukseksi.

Kaavan (8)  $R_f = \frac{Q_u}{Q_i}$  pohjalta virtaussuhteeksi testilaitteelle saadaan  $R_f=0,131$ .

Taulukko 12. Väliaineen tiheyttä lähellä olevien materiaalien testit

<b>Materiaali</b>	<b>Massa kuivana g</b>	<b>Alite märkä g</b>	<b>Ylite märkä g</b>	<b>Alite kuiva g</b>	<b>Ylite kuiva g</b>
<b>HIPS</b>	199,8	199,7	34,6	172,4	27,3
<b>HIPS</b>	186,6	179,9	28,8	162,4	24,2
<b>HIPS</b>	192,3	191,2	26,6	169,1	21,2
<b>ASA</b>	121,5	126,5	4,5	117,5	4
<b>ASA</b>	166,6	174,6	1,7	165,3	1,3
<b>ASA</b>	132,3	143,1	3,8	129,1	3,2

Erottelutehokkuus

Kaavan (6)  $E_T = \frac{M_c}{M}$  pohjalta HIPS koemateriaalille saadaan erottelutehokkuus

$E_T=0,8632$ . Redusoitu erotustehokkuus HIPS materiaalille kaavasta (9)  $E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f}$  antaa tuloksen  $E'_T=0,8417$ . Koemateriaali ASA erottelutehokkuus kaavan (6) pohjalta  $E_T=0,967$ . Redusoitu erottelutehokkuus kaavan (9) pohjalta  $E'_T=0,962$ .

### 5.3 Murskattujen materiaalien testaus

Murskattujen materiaalien kokeissa tärkeimmäksi luokitukseen vaikuttavaksi parametriksi muodostui partikkelikoko. Hankkeen käytössä olevan laboratorio murskaimen tuottama partikkelikoko hajonta oli varsin suuri, tämä johtui siitä murskaimen seulan koosta. Partikkelikoon vaihteluväli oli <1 mm – 35 mm, joten murskattujen materiaalien luokittelun terävyys kärsi suuresta partikkelikoon hajonnasta. Lisäksi seulojen ja mittauslaitteiston puute teki luokituskäyrien selvittämisestä mahdotonta. Kuvassa 11 esitellään testeissä murskaetuilla materiaaleilla saatua parasta erotustehokkuutta, joka oli noin 98 %.



Kuva 11. Polypropeeni murskan erottelun testaus

### 5.3.1 Väliaineen tiheyttä kevyempien murskattujen materiaalien testaus

Väliaineen tiheyttä huomattavasti kevyemmällä murskatuilla materiaaleilla päästiin hyvään luokitustehokkuuteen noin 98 %, väärin luokituneet kappaleet olivat partikkelikooltaan keskivertoa suurempia tai paksumpia. Tämä väärin luokittelu voi johtua myös dead flux -ilmiöstä.

Taulukko 13. Väliaineen tiheyttä kevyempien murskattujen materiaalien koeajo parametrit

Virtausnopeus	Yliteputken syvyys	Ohitusvirtaventtiili	Testiaika
2,5 dm <sup>3</sup> /s	15 cm	kiinni	30 sec

Koeajo asetuksilla (taulukko 13) ja materiaaleilla (taulukko 14), sekä yliteputken halkaisijalla 32 mm ja aliteputken halkaisijalla 13 mm saatiin aikaseksi 2.5 dm<sup>3</sup>/s materiaalivirta, joka jakautui 0,334 dm<sup>3</sup>/s alitevirraksi ja 2.166 dm<sup>3</sup>/s ylitevirtaukseksi.

Kaavan (8)  $R_f = \frac{Q_u}{Q_i}$  pohjalta virtaussuhteeksi testilaitteelle saadaan  $R_f = 0,1336$ .

Taulukko 14. Väliaineen tiheyttä kevyempien murskattujen materiaalien testaukset

Materiaali	Massa kuivana g	Alite märkä g	Ylite märkä g	Alite kuiva g	Ylite kuiva g
PP	59,7	3,5	90,5	1,1	58,6
PP	58,4	2,3	88,6	0,8	57,6
PP	61,7	2,5	92,3	0,9	60,8

Erottelutehokkuus

Kaavan (7)  $E_T = 1 - \frac{M_f}{M}$  pohjalta PP koemateriaalille saadaan erottelutehokkuus  $E_T=0,0184$ .

### 5.3.2 Väliaineen tiheyttä raskaampien murskattujen materiaalien testaus

Väliaineen tiheyttä raskaammilla murskatuilla materiaaleilla saavutettiin hyvä luokitustehokkuus noin 95 %, mutta ylitteeseen päätyi joitakin prosentteja materiaalivirrasta, nämä väärin luokitellut partikkelit olivat kooltaan keskimääräistä pienempiä. Tämä väärin luokittelu voi johtua myös aliteputken liian pienestä halkaisijasta kiintoainevirtaan nähden.

Taulukko 15. Väliaineen tiheyttä raskaampien murskattujen materiaalien koeajo parametrit

Virtausnopeus	Yliteputken syvyys	Ohitusvirtaventtiili	Testiaika
2,5 dm <sup>3</sup> /s	15cm	kiinni	30sec

Koeajo asetuksilla (taulukko 15) ja materiaaleilla (taulukko 16), sekä yliteputken halkaisijalla 32 mm ja aliteputken halkaisijalla 13 mm saatiin aikaseksi 2.5 dm<sup>3</sup>/s materiaalivirta, joka jakautui 0,295 dm<sup>3</sup>/s alitevirraksi ja 2.205 dm<sup>3</sup>/s ylitevirtaukseksi.

Kaavan (8)  $R_f = \frac{Q_u}{Q_i}$  pohjalta virtaussuhteeksi testilaitteelle saadaan  $R_f=0,118$ .

Taulukko 16. Väliaineen tiheyttä raskaampien murskattujen materiaalien testaukset

Materiaali	Massa kuivana g	Alite märkä g	Ylite märkä g	Alite kuiva g	Ylite kuiva g
PET	97,6	132,5	7	94,4	3,2
PET	91,7	109,2	5,4	89,6	2,1
PET	113,2	116,8	10,3	108	5,2

Erottelutehokkuus

Koemateriaali PET erottelutehokkuus kaavan (6)  $E_T = \frac{M_c}{M}$  pohjalta  $E_T=0,954$ . Redusoitu erottelutehokkuus kaavan (9)  $E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f}$  pohjalta koemateriaali PET  $E'_T=0,947$ .

### 5.3.3 Väliaineen tiheyttä lähellä olevien murskattujen materiaalien testaus

Väliaineen tiheyttä lähellä olevilla murskatuilla materiaaleilla ei saatu erityisen hyvää luokitustehokkuutta. Tämä ongelma johtui todennäköisimmin väliaineen ja materiaalin liian pienestä tiheyserosta ja partikkelien koosta. Väärin luokitellut partikkelit olivat keskimääräistä paksumpia ja suurempia. Myös dead flux -ilmiö on mahdollinen selitys väärin luokitellulle materiaalille ja redusoitu erotustehokkuus on laskennallisesti suhteellisen hyvä noin 95 %.

Taulukko 17. Väliaineen tiheyttä lähellä olevien murskattujen materiaalien koeajo parametrit

Virtausnopeus	Yliteputken syvyys	Ohitusvirtaventtiili	Testiaika
2,5 dm <sup>3</sup> /s	25 cm	kiinni	30 sec

Koeajo asetuksilla (taulukko 17) ja materiaaleilla (taulukko 18), sekä yliteputken halkaisijalla 32 mm ja aliteputken halkaisijalla 13 mm saatiin aikaseksi 2.5 dm<sup>3</sup>/s materiaalivirta, joka jakautui 0,325 dm<sup>3</sup>/s alitevirraksi ja 2.175 dm<sup>3</sup>/s ylitevirtaukseksi.

Kaavan (8)  $R_f = \frac{Q_u}{Q_i}$  pohjalta virtaussuhteeksi testilaitteelle saadaan  $R_f=0,13$ .

Taulukko 18. Väliaineen tiheyttä lähellä olevien murskattujen materiaalien testaukset

<b>Materiaali</b>	<b>Massa kuivana g</b>	<b>Alite märkä g</b>	<b>Ylite märkä g</b>	<b>Alite kuiva g</b>	<b>Ylite kuiva g</b>
<b>HDPE</b>	137,4	20,3	141	16,4	121
<b>HDPE</b>	141	31,1	135	24,1	116,9
<b>HDPE</b>	137,6	21,5	141,7	14,9	122,7

Erottelutehokkuus

Kaavan (7)  $E_T = 1 - \frac{M_f}{M}$  pohjalta HDPE koemateriaalille saadaan erottelutehokkuus

$E_T=0,171$ . Redusoitu erotustehokkuus HDPE materiaalille kaavasta (9)  $E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f}$  antaa

tuloksen  $E'_T=0,047$ .

## 6 YHTEENVETO

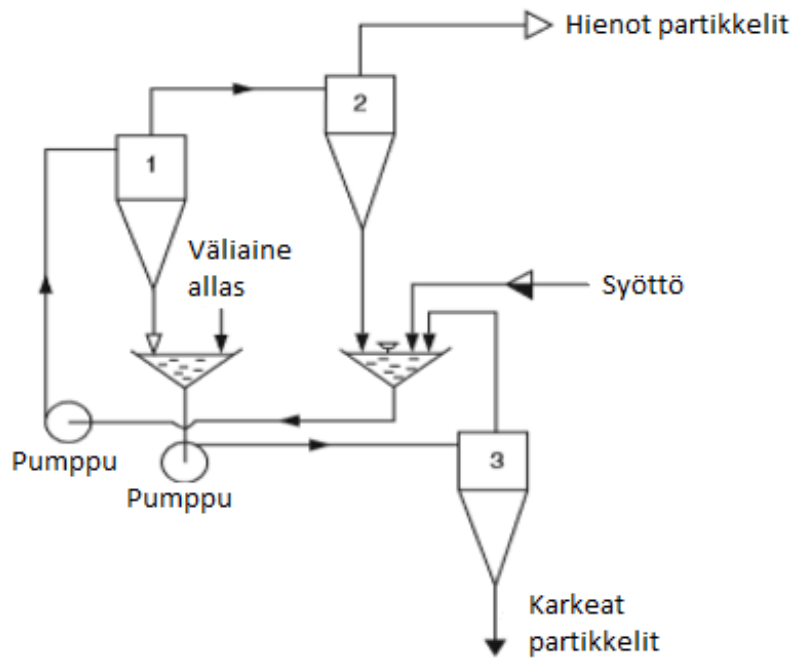
Työn päätavoitteena oli rakentaa prototyyppi hydrosykloni ja testata sen avulla voidaanko hydrosykloni erottelumenetelmää hyödyntää Kiemura-hankkeen muovien erottelumenetelmänä. Kiemura-hanke haluaa erottelumenetelmältä mahdollisimman tarkan erottelutehokkuuden, joten hankkeen erottelumenetelmän testauksessa keskityttiin erotustehokkuuteen.

Kirjallisuusosan tarkoituksena oli tutkia hydrosyklonien toimintaperiaatetta, toimintaan vaikuttavia parametrejä, sekä tutustua toiminnan laaduntarkkailuun ja mallintamiseen. Kirjallisuusosan pohjalta selvitettiin prototyyppiin soveltuvat mittasuhteet, sekä parametrien ja niiden muutosten vaikutukset toimintaan.

Kokeellisessa osuudessa mitoitettiin ja rakennettiin prototyyppilaitte, lisäksi esiteltiin prototyyppilaitteen vesijärjestelmä ja suoritettiin järjestelmän toiminnan matemaattinen mallintaminen Plittin mallin mukaan. Mallinnuksen pohjalta havaittiin, että laskennallisesti prototyyppi kykenee granulaatti kokoluokan partikkelien täydelliseen erotteluun.

Prototyyppilaitteella suoritettiin erottelutestejä sekä granulaateilla, että murskatuilla materiaaleilla. Erottelutestien tulosten pohjalta havaittiin, että eri materiaalit tarvitsevat eri ajoparametrit tarkalle erottelulle. Lisäksi murskattujen materiaalien kanssa huomattiin, että partikkelikoko on ratkaiseva tekijä tarkan erottelun aikaan saamiseksi.

Testien pohjalta voidaan kumminkin todeta, että hydrosykloni menetelmä soveltuu Kiemura hankkeen tarkoitukseen, mutta ilmenneiden ongelmien ratkaisemiseksi tarvitaan seula murskainvaiheen yhteyteen partikkelikoon hallitsemiseksi ja useampi hydrosykloni sarjaan kytkettynä (kuva 12), jos halutaan saada mahdollisimman tarkka luokitustulos kierrätettäville muoveille.



Kuva. 12 Luokituksen terävyyden lisäämiseen käytettävä sarjakytkenä (Svarovsky 2000, s.231)

Hankkeen erottelumenetelmän tehostamisen jatkotutkimuksen aiheena voisi selvittää tarkemmin, kuinka monta hydrosyklonia tarvitaan sarjaan kytkettyinä, jotta saadaan tarvittavan tarkka luokitus halutuille materiaaleille. Linjastossa tarvittavien seulojen kokoja ja tyyppisiä olisi myös hyvä selvittää tutkimuksen kautta. Lisäksi eri käyttömuuttujien vaikutusta erotteluun voisi selvittää tarkemmin, erityisesti syötteen viskositeetin vaikutusta.



## LÄHTEET

### Painetut lähteet

McCabe, W.L. Smith, J.C. Harriot, P. 2005. Unit operations of chemical engineering, 7th ed. New York, USA: McGraw-Hill.

Pihkala, J. 2011. Prosessitekniikka, Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit, 1.painos. Helsinki, Finland: Opetushallitus.

Scheirs, J. 1998. Polymer recycling, Chichester, UK: John wiley & sons.

Svarovsky, L. 2000, Solid-liquid separation 4th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann

Wills, B. A. Napier-Munn, T. 2006. Wills' Mineral processing technology, 7th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann

### Elektroniset lähteet

Cilliers, J.J. 2000. Hydrocyclones for particle size separation. Manchester, UK: Academic press [viitattu 3.6.2019]. Saatavissa: [https://www.thevespiary.org/library/Files\\_Uploaded\\_by\\_Users/Sedit/Chemical%20Analysis/Crystalization,%20Purification,%20Separation/Encyclopedia%20of%20Separation%20Science/Level%20II%20-%20Methods%20and%20Instrumentation/PARTICLE%20SIZE%20SEPARATION/Hydrocyclones%20for%20Particle%20Size%20Separation.pdf](https://www.thevespiary.org/library/Files_Uploaded_by_Users/Sedit/Chemical%20Analysis/Crystalization,%20Purification,%20Separation/Encyclopedia%20of%20Separation%20Science/Level%20II%20-%20Methods%20and%20Instrumentation/PARTICLE%20SIZE%20SEPARATION/Hydrocyclones%20for%20Particle%20Size%20Separation.pdf)

Euroopan aluekehitysrahasto 2019. Kierrätysmuovi ratkaisu hanke hakemus [viitattu 26.5.2019]. Saatavissa: <https://www.eura2014.fi/rrtiepa/projekti.php?projekti-koodi=A74135>

LAMK 2019. Kiemura-hanke [viitattu 23.5.2019]. Saatavissa: <https://www.lamk.fi/fi/kiemura>

Marthinussen, S.A. 2011. The effect of fluid viscosity on hydrocyclone performance [viitattu 25.5.2019]. Saatavissa: <http://bora.uib.no/handle/1956/5138>

Park, S.H 2003, Separation of polymer particles using a hydrocyclone [viitattu 26.5.2019]. Saatavissa: <https://preserve.lehigh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1865&context=etd>

Salimi, A. 2015. The Effect of Fluid Viscosity and Geometry on Hydrocyclone Performance [viitattu 25.5.2019]. Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/a018/6b660b4cc5f6c265babb8fcc6dbefa840245.pdf>

Silva, A.C. Silva, E.M. Matos, J. D. 2013. Hydrocyclones simulation using new modification in Plitt's equation [viitattu 8.6.2019]. Saatavissa:

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1474667016312770?to-ken=CF09059BBE2C80C656A6F42EFF10FB03BDB1C4E450A42CC36518D8256D251D7F469BFA679C8F4B66D2999B2B5859548C>

Skorpen, Å. 2012. Investigation of particle trajectories and flow patterns in a hydrocyclone by positron emission particle tracking (PEPT). University of Bergen [viitattu 7.6.2019]. Saatavissa: <http://bora.uib.no/handle/1956/6549>

Uahengo, F. D. L. 2014. Estimating particle size of hydrocyclone underflow discharge using image analysis. Stellenbosch University [viitattu 3.6.2019]. Saatavissa: <http://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/86365>

van Loggenberg, S., van Schoor, G., Uren, K.R., van der Merwe, A.F. 2016. Hydrocyclone cut-size estimation using artificial networks. School of electrical, electronic and computer engineering, North-West University, Potchefstroom [viitattu 5.6.2019]. Saatavissa: <http://folk.ntnu.no/skoge/prost/proceedings/dycops-cab-2016/proceedings/media/papers/0149.pdf>

van Ommen, R. 2011. Optimization of Classification Results by Controlling of Hydrocyclone Process Parameters [viitattu 25.5.2019] Saatavissa: <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/1844423/AC08596176n01vt.pdf>

Haastattelut

Roininen, T. P. 2019. Projektisuunnittelijan haastattelu Kiemura-hanke LAMK, Lahti.

## LIITTEET

Liite 1. Materiaalitestaus pöytäkirjat

## Liite 1. (1/2) Testaus pöytäkirja yliteputken syvyys 15cm

Testi pöytäkirja	Testi parametrit	Virtausnopeus	Yliteputken syvyys	Ohitusvirtaventtiili	Testiaika	Et
		2,5 dm <sup>3</sup> /s	15cm	kiinni	30sec	
Väliaine		Kevyet	Raskaat	Lähellä		
Vesi 20C°						
Materiaali	Massa kuivana g	Alite märkä g	Ylite märkä g	Alite kuiva g	Ylite kuiva g	
LDPE	197,6	0	216,7	0	197,6	0,0 %
LDPE	189,2	0	203,4	0	189,2	0,0 %
LDPE	127,6	0	143,3	0	127,6	0,0 %
PP	176,5	0	188,3	0	176,5	0,0 %
PP	175,8	0	183,2	0	175,8	0,0 %
PP	180,2	0	193,4	0	180,2	0,0 %
PA6	219,4	238,2	0	219,4	0	100,0 %
PA6	208	231,7	0	208	0	100,0 %
PA6	211,3	237,2	0	211,3	0	100,0 %
PC/ABS	209,6	219	0	209,6	0	100,0 %
PC/ABS	199,4	225,3	0	199,4	0	100,0 %
PC/ABS	192,7	208	0	192,7	0	100,0 %
HIPS	192,3	196,4	52,3	156,1	36,2	81,2 %
HIPS	182,6	179,9	41,2	151,5	31,1	83,0 %
HIPS	179,3	183,2	38,6	149,5	29,8	83,4 %
ASA	113,2	130,2	18,5	99,8	13,4	88,2 %
ASA	126,6	144,6	17,4	112,8	13,8	89,1 %
ASA	131,8	143,1	18,7	116,6	15,2	88,5 %
PP	59,7	3,5	90,5	1,1	58,6	1,8 %
PP	58,4	2,3	88,6	0,8	57,6	1,4 %
PP	61,7	2,5	92,3	0,9	60,8	1,5 %
PET	97,6	132,5	7	94,4	3,2	96,7 %
PET	91,7	109,2	5,4	89,6	2,1	97,7 %
PET	113,2	116,8	10,3	108	5,2	95,4 %
HDPE	132,6	26,3	138,2	21,3	111,3	16,1 %
HDPE	135,4	35,2	137,2	23,2	112,2	17,1 %
HDPE	131,3	27,5	135,8	20,7	110,6	15,8 %

## Liite 1. (2/2) Testauspöytäkirja yliteputken syvyys 25cm

Testi pöytäkirja	Testi parametrit	Virtausnopeus	Yliteputken syvyys	Ohitusvirta-venttiili	Testiaika	
Väliaine		2,5 dm <sup>3</sup> /s	25cm	kiinni	30sec	
Vesi 20C°		Kevyet	Raskaat	Lähellä		
Materiaali	Massa kuivana g	Alite märkä g	Ylite märkä g	Alite kuiva g	Ylite kuiva g	Et
LDPE	192,3	5,2	213,4	3,2	189,1	1,7 %
LDPE	188,3	4,2	196,4	2,1	186,2	1,1 %
LDPE	182,1	3,8	195,1	2,6	179,5	1,4 %
PP	173,4	2,8	186,4	1,9	171,5	1,1 %
PP	172,8	1,6	185,2	0,8	172	0,5 %
PP	182,2	2,4	196,4	1,6	180,6	0,9 %
PA6	215,4	228,2	5,3	211,6	3,8	98,2 %
PA6	206	221,7	4,7	202,4	3,6	98,3 %
PA6	208,4	223,1	4,2	205,3	3,1	98,5 %
PC/ABS	198,7	211,2	6,2	194,1	4,6	97,7 %
PC/ABS	196,2	213,7	5,8	192,6	3,9	98,2 %
PC/ABS	193,5	206,1	5,3	189,8	3,7	98,1 %
HIPS	199,8	199,7	34,6	172,4	27,3	86,3 %
HIPS	186,6	179,9	28,8	162,4	24,2	87,0 %
HIPS	192,3	191,2	26,6	169,1	21,2	87,9 %
ASA	121,5	126,5	4,5	117,5	4	96,7 %
ASA	166,6	174,6	1,7	165,3	1,3	99,2 %
ASA	132,3	143,1	3,8	129,1	3,2	97,6 %
PP	61,2	6,2	88,2	4,2	57	6,9 %
PP	60,2	5,6	76,5	3,6	56,6	6,0 %
PP	59,6	4,2	78,2	2,4	57,2	4,0 %
PET	93,6	112,5	8,2	89,2	4,4	95,3 %
PET	90,8	108,4	6,2	87,2	3,6	96,0 %
PET	105,2	118,4	9,8	99,8	5,4	94,9 %
HDPE	137,4	20,3	141	16,4	121	11,9 %
HDPE	141	31,1	135	24,1	116,9	17,1 %
HDPE	137,6	21,5	141,7	14,9	122,7	10,8 %