



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Ilpo Pirhonen

# Sekoittimen suunnittelu ja toteutus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

27.5.2020

Tekijä Otsikko	Ilpo Pirhonen Sekoittimen suunnittelu ja toteutus
Sivumäärä Aika	44 sivua 27.5.2020
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Yliopettaja Jyrki Kullaa Equip. Maint. Mgr. Juha Korpialho
<p>Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa Murata Electronics Oy:lle testikäyttöön uusi kemiallismekaanisen kiillotusnesteen sekoitin. Yrityksen toivomuksesta työssä oli määrä laatia myös tarpeelliset 3D-, mekaniikka- ja sähköpiirrokset, sekä laitteen käyttöohjeet.</p> <p>Työ toteutettiin käyttämällä esimerkkinä jo tuotannon käytössä olevaa kiillotusnesteen sekoitinta ja vanhaa sekoitusmoottoria. Sekoittimen rungoksi valittiin alumiiniprofili ja kemikaalien sekoituskammion materiaaliksi polypropeeni. Sekoittimen moottoria päätettiin ohjata taajuusmuuttajalla, koska sekoitusnopeutta oli tarve säätää kiillotusnestettä tutkiessa. Kiillotusnesteen hiukkasten herkkyyden takia pumpuksi valittiin levitoiva keskipakopumppu. Laitteen käytöstä ja huollosta kirjoitettiin lyhyt ohjekirja työntäjän toivomuksesta.</p> <p>Tuloksena oli valmis sekoitin Murata Electronics Oy:n käyttöä varten, jolla tutkitaan uusia kiillotusnestettä. Laitteeseen lisättiin insinööriyön jälkeen antureita, jolla voidaan seurata kiillotusnesteen käyttäytymistä.</p>	
Avainsanat	Kiillotusneste, sekoitus, CMP, pii

Author Title	Ilpo Pirhonen Slurry Mixer
Number of Pages Date	44 pages 27 May 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer Juha Korpiälho, Equip. Maint. Mgr.
<p>The aim of the Bachelor's thesis was to design and implement a test bench for a chemical mechanical slurry mixer for Murata Electronics Oy. Murata Electronics Oy also requested mandatory drawings for 3D modeling, mechanical and electrical drawings, and instructions how to use the test bench.</p> <p>This thesis was carried out by studying a full-scale slurry mixer, which is already in production, and the use of an old mixing motor. An aluminum profile was chosen for the body of the mixer and polypropylene was used for the chemical mixing chamber. The mechanical agitator was chosen to be controlled by a variable frequency drive to adjust the mixing speed if necessary. A levitating centrifugal pump was chosen for the pumping of slurry liquid because of the sensitivity of the slurry particles. A small manual for the equipment was written to support the use and maintenance. The equipment was assembled at the premises of Murata Electronics Oy.</p> <p>As a result, a production ready mixer was created for Murata Electronics Oy, which is used to study new slurry compounds. After writing the thesis, sensors were added to the new device to monitor the behavior of the slurry compounds.</p>	
Keywords	Slurry, mixing, CMP, silicon

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	CMP-teknologia ja hiontaneesteet	3
2.1	CMP-prosessin periaate	3
2.2	Kiillotusneesteet	5
3	Sekoituksen mekaniikka	6
4	Sekoittajan suunnittelu	15
4.1	Runko	16
4.2	Sekoituskammio	19
4.3	Mekaaninen sekoitin	24
4.4	Pumppu	31
5	Ohjaus	33
5.1	Korkean tason kuvaus	33
5.2	Sähköpiirustukset	35
6	Ohjekirja	39
7	Yhteenveto	42

### Lähteet

## Lyhenteet

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumiinioksidi
CeO <sub>2</sub>	Ceriumoksidi
CMP	Kemiallismekaaninen kiillotus <i>Chemical-mechanical polishing</i>
MEMS	Mikrosysteemit <i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
PEEK	Polyeetterieetteriketoni
PP	Polypropeeni
PTFE	Polytetrafluorieteeni
SEM	Skannaava elektronimikroskooppi <i>Scanning electron microscope</i>
SiO <sub>2</sub>	Piidioksidi

## 1 Johdanto

Murata Electronics Oy on Suomessa piiteollisuuden MEMS-tuotteita (Micro-Electro-Mechanical Systems) (kuva 1) valmistava yritys. Se valmistaa antureita pääasiassa autojen lukkiutumattomiin jarrujärjestelmiin, ajoneuvonvakautusjärjestelmiin, elektronisiin seisontajarrujärjestelmiin ja kasvavassa määrin terveydenhoidon piiriin.



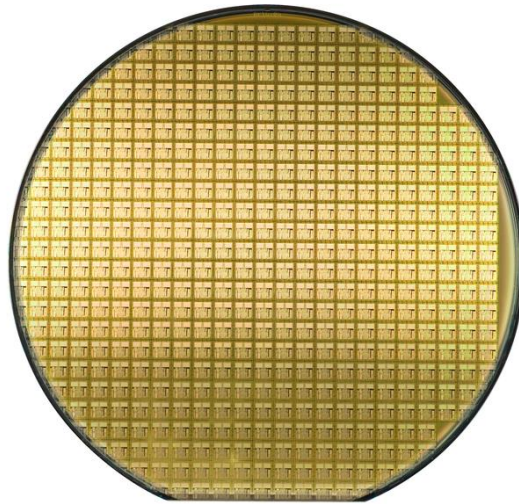
Kuva 1. Erilaisia Murata Electronics Oy:n valmistamia MEMS-antureita [1].

MEMS-antureiden toiminta perustuu siihen, että muutetaan fyysinen arvo, esimerkiksi taipuma, sähköiseen muotoon. Antureissa yleensä on liikkuva massa, jonka kapasitanssi voidaan muuttaa analogiseen tai digitaaliseen muotoon erillisellä mikropiirillä (kuva 2). Anturien komponentit ovat kooltaan hyvin pieniä, noin yhdestä sataan mikrometriä. MEMS-teknologian valmistus tapahtuu pääasiassa piikiekkojen käsittelyllä, kasvattamalla tai poistamalla materiaaleja kiekon pinnalta. Yleisiä käytettyjä materiaaleja ovat keraamit, metallit ja polymeerit. Antureita valmistetaan kuuden tuuman kiekkoista jopa kymmenen tuuman kiekkoihin, ja kiekolla voi olla antureita useita tuhansia (kuva 3). Lopuksi kokonaisuus ympäröidään kuorella.



Kuva 2. Murata Electronics Oy:n 3D-MEMS anturi [2].

Murata Electronics Oy:llä on syntynyt tarve tutkia uusia CMP-teknologian (Chemical-mechanical polishing) kiillotusyhdisteitä. Kiillotusyhdisteitä tutkimalla yritys tulee kehittämään tuotantolaitteidensa CMP-prosessia ja mahdollisesti vähentämään kiillotusnesteen käyttökustannuksia. Yrityksellä ei tällä hetkellä ollut testilaitetta CMP-prosessin kiillotusnesteiden sekoittamiselle ja tuotantolaitteiden käyttö testaukseen ei ollut suotavaa, joten tälle oli suunniteltava oma laitteensa.



Kuva 3. Kuva valmiista silikoniekosta [3].

Insinöörityön tavoitteena oli suunnitella ja valmistaa toimiva testilaitte Murata Electronics Oy:n käyttöön. Työssä oli selvitettävä sekoituksen teoriaa ja sekoituksen laskennasta oli annettava yksi esimerkki. Laitteen suunnittelussa vaadittiin 3D-piirustukset, materiaalien valinnat, mekaniikka- ja sähköpiirustukset, sekä ohjekirja käyttöä ja huoltoa varten. Testilaitteen tuli olla yksinkertainen käytettävyydeltään, jolloin sitä voitaisiin käyttää hätävaralaitteena tuotantoon tarkoitetun laitteen ollessa poissa käytöstä. Suunnittelussa pyrittiin myös käyttämään jo yrityksessä olevia materiaaleja ja osia.

## 2 CMP-teknologia ja hiontaneesteet

CMP-prosessi kehitettiin IBM:llä ja sitä käytettiin ensimmäisen kerran vuonna 1986. Tämän jälkeen prosessi on tullut maailman laajuiseksi piikiekkojen pinnan tasoitusmenetelmäksi.

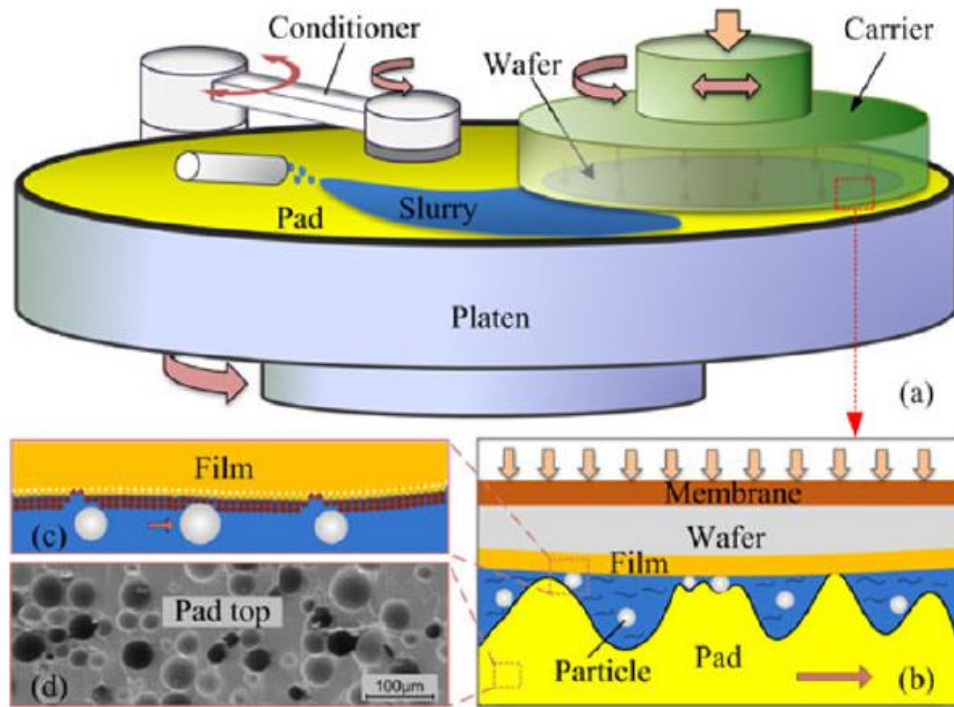
CMP-teknologiaa yleisesti käytetään piiteollisuudessa piikiekkojen pinnan tasoittamiseen esimerkiksi kiekon hionnan jälkeen. Piikiekkon hionnassa syntyvän epätasaisuuden takia CMP-prosessi on hyvin suositeltavaa paremman pinnan laadun saavuttamiseksi. CMP-prosessissa siis poistetaan kiekon pinnalta hyvin pieni määrä materiaalia (mikroista nanometreihin), jota voidaan tarvita esimerkiksi litografian prosesseissa.

Tietokone prosessorien kehittyessä vieläkin pienemmiksi ja valmistusmäärien kasvaessa kiekkojen koot suuremmiksi CMP-teknologia on tullut entistä tärkeämmäksi puolijohdeteollisuuden valmistuksessa.

### 2.1 CMP-prosessin periaate

Kuvasta 4 nähdään, että CMP-prosessissa on kaksi mekaanista pääosaa: kiillotuspää ja kiillotuspöytä. Kiillotuspöydän ja -pään välissä käytetään myös pehmeämpää kiillotusmattoa. Kiillotusmattoon on valmistettu lovia maton keskipisteestä maton reunaan asti. Näillä lovilla voidaan kuljettaa tarpeellinen määrä kiillotusnestettä kiekon alle maton pyöriessä. Kiillotuksessa kiillotuspään ja -pöydän pyörintäakselit ovat aina samansuuntaiset, mutta eivät samankeskkiset. Niiden pyörintäsuunnat voivat kuitenkin olla saman- tai erisuuntaiset. [4, s. 306-308] (Kuva 4.)

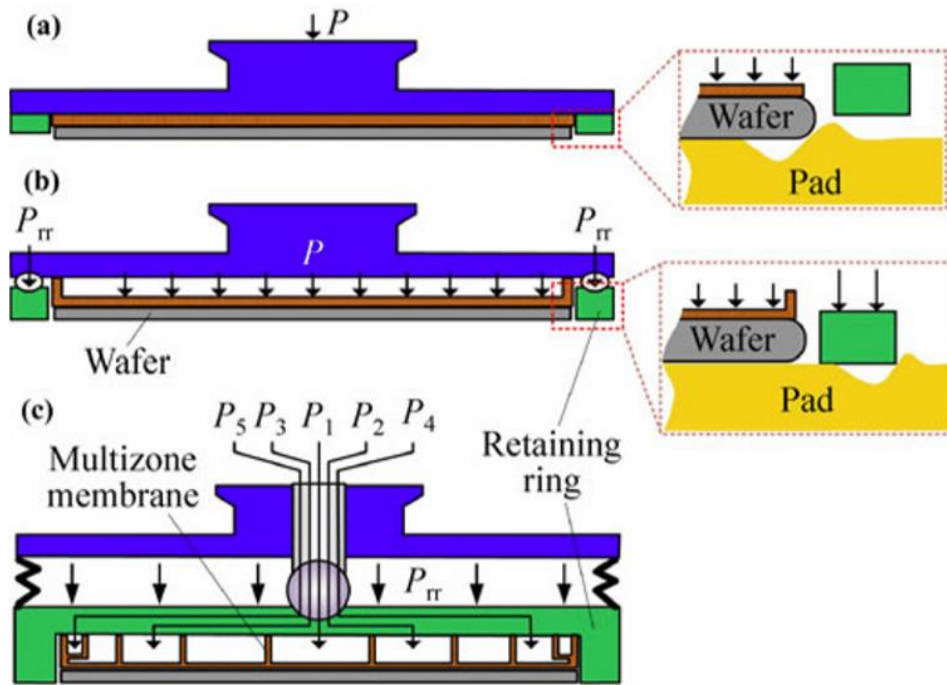




Kuva 4. Kuvaus CMP-laitteistosta sekä kiekon ja kiillotuspöydän toiminnasta: (a) CMP-laitteisto, (b) kiekon ja kiillotuspöydän vuorovaikutus, (c) yksityiskohtia kiillotusnesteen hiukkasten vaikutuksesta kiekkoon ja (d) SEM-kuvaus kiillotusmatosta [4, s. 308].

Kiillotuspäässä on kalvo, jossa piikiekkoa pidetään kiinni alipaineella ja painetaan kiillotuspöydän mattoa vasten, aiheuttaen mekaanista kulumista. Päässä on myös kiekon pidikerengas, mikä estää kiekon lipsahtamista pään ja maton välistä. Uudemmissa kiillotuspäissä on myös säädettäviä painealueita (kuva 5). Tällä voidaan parantaa kiekon prosessin laatua. Kiillotusmaton ja kiillotettavan kiekon väliin syötetään kiillotusnestettä, jolla samalla etsataan kiekon pintaa. Kiillotusmaton kuluessa sitä kunnostetaan, mikä pidentää maton käyttöikää. [4, s. 308-309]

Kiillotusta voidaan säädellä muutamalla prosessiparametrillä muuttamatta kiillotusnestettä. Esimerkiksi: kiillotusvoima (voima, jolla kiekkoa painetaan mattoa vasten), kinemaattiset parametrit (pöydän ja kiillotuspään pyörimisnopeudet), ja kuluvat osat (kiillotusmatto ja kiillotuspään kalvo, sekä kiekon pidikerengas). [4, s. 310]



Kuva 5. Piirustus erimallisista kiillotuspäistä [4, s. 309].

Kiekon pinnan tasoittamisen jälkeen kiekko edistetään pesuprosessiin, jossa poistetaan tasoittamisessa käytetyt syövyttävät kemikaalit ja hiukkaset. Tämän jälkeen kiekko on valmis seuraavaan prosessiin.

## 2.2 Kiillotusnesteet

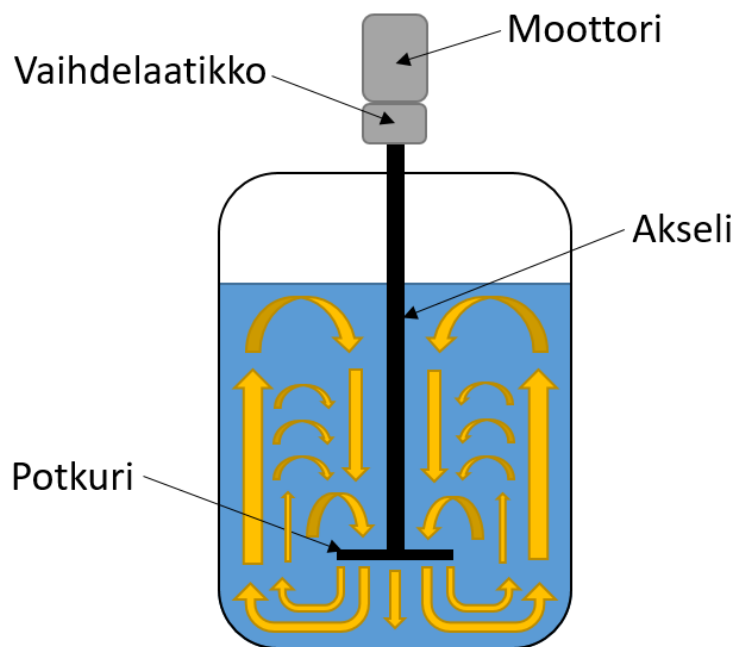
Kiillotusnesteet ovat CMP-prosessin monimutkaisin komponentti, ja niiden tarkoituksena on etsata kiekon pintaa samalla kun sitä mekaanisesti kulutetaan. Kiillotusneste on kemikaaliryhmittäisiä hiovia ja syövyttäviä kemikaaleja, sekä tislattua vettä. Tämän takia jokaiselle erityyppiselle materiaalille on valittava komponentit erikseen, sillä materiaalin etsausnopeuden täytyy olla tarkoin hallittavissa. [4, s. 309]

Hiovassa nesteessä käytetään esimerkiksi  $\text{SiO}_2$ -,  $\text{CeO}_2$ - tai  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -hiukkasia, ja syövyttävässä hapettavia tai emäksisiä kemikaaleja. Prosessissa käytetyt hiukkaskoot vaihtelevat 10 – 100 nanometrin välillä. Kiillotusnestettä käytettäessä on otettava huomioon hiukkasen koko ja muoto, kemialliset yhdisteet, konsentraatio ja pH-arvo, jotta saavutettaisiin haluttu lopputulos. [4, s. 309-310]

### 3 Sekoituksen mekaniikka

Tässä kappaleessa käsitellään insinööriyössä käytettyjä laskentamenetelmiä ja yhtälöitä. Laskennassa on käytetty enimmäkseen teoksia *Handbook of Industrial Mixing Science and Practice* [5] ja *Chemical Process Equipment: Selection and Design* [6].

Kuvasta 6 nähdään, kuinka perinteinen akselin suuntaista virtausta aiheuttava potkuri toimii sekoituksessa.



Kuva 6. Piirros perinteisestä sekoittimesta

Meidän tulee sekoituksessa tietää, mihin alueeseen se kuuluu, laminaariseen vai turbulentaariseen. Tämä voidaan ratkaista kirjan [5, s. 358] mukaan halutulle kierrosnopeudelle seuraavasti:

$$Re = \frac{\rho ND^2}{\mu} \quad (1)$$

$Re$  on Reynoldsin luku [dimensioton]  
 $\rho$  on nesteen tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $N$  on haluttu kierrosnopeus [ $1/\text{s}$ ]  
 $D$  on potkurin halkaisija [ $\text{m}$ ]  
 $\mu$  on nesteen viskositeetti [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ].

Kun nestettä sekoitetaan, potkuri tuottaa nesteeseen kiertokapasiteetin  $Q$  ja painekorkeuden  $H$ : [5, s. 358]

$$Q = N_Q ND^3 \quad (2)$$

$$H = N^2 D^2 \quad (3)$$

$Q$  on kiertokapasiteetti [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $N_Q$  pumppausluku [dimensioton]  
 $H$  on painekorkeus [ $\text{m}^2/\text{s}^2$ ]  
 $N$  on kierrosnopeus [ $1/\text{s}$ ]  
 $D$  on potkurin halkaisija [ $\text{m}$ ].

Pumppausluku  $N_Q$  on riippuvainen potkurin mallista,  $D/T$ -suhteesta ja potkurin Reynoldsin luvusta. Potkurin tehontarve voidaan laskea kertomalla pumppaus, kiertokapasiteetti ja painekorkeus, jolloin saadaan: [5, s. 360]

$$P = P_o N^3 D^5 \rho \quad (4)$$

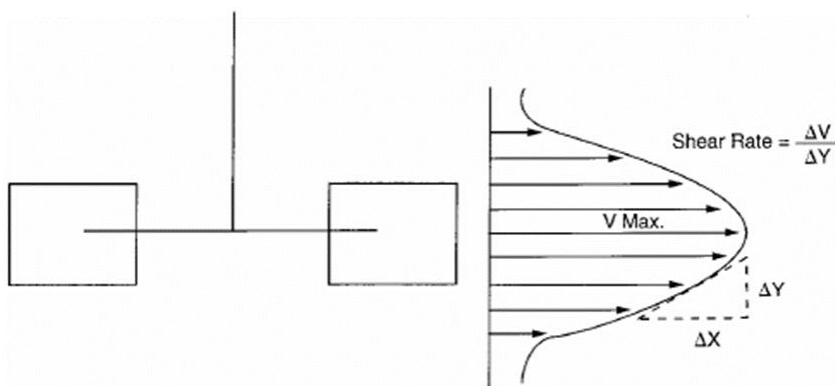
$P$  on potkurin tarvitsema teho [ $\text{W}$ ]  
 $P_o$  on tehokerroin [dimensioton]  
 $N$  on haluttu kierrosnopeus [ $1/\text{s}$ ]  
 $D$  on potkurin halkaisija [ $\text{m}$ ]  
 $\rho$  on nesteen tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ].

Potkurin tehokerroin  $Po$  on riippuvainen potkurin tyypistä ja sen Reynoldsin luvusta. Potkurin pyörintä aiheutuvaa leikkausnopeutta voidaan arvioida yhtälöllä: [5, s. 369]

$$\gamma = KN \quad (5)$$

$\gamma$  on nesteeseen kohdistuva leikkausnopeus [ $s^{-1}$ ]  
 $K$  on Metzner-Otto vakio [dimensioton]  
 $N$  on haluttu kierrosnopeus [ $1/s$ ].

Kuvasta 7 nähdään kuinka leikkausnopeus vaikuttaa nesteeseen. Partikkelin lavan pään kohdalla siis kokevat suurimman leikkausnopeuden.



Kuva 7. Piirustus nesteeseen aiheutuvasta leikkausnopeudesta [5, s. 369].

Kirjan [5, s. 516] mukaan sekoituksen alue voidaan myös ratkaista seuraavalla yhtälöllä:

$$\frac{1}{F_o} = \frac{\rho T^{1,5} H^{0,5}}{\mu \theta} \quad (6)$$

$F_o$  on Fourierin luku [dimensioton]  
 $\rho$  on nesteen tiheys [ $kg/m^3$ ]  
 $T$  on kammion halkaisija [m]  
 $H$  on nesteen korkeus [m]  
 $\mu$  on viskositeetti [ $Pa \cdot s$ ]  
 $\theta$  on haluttu sekoitusaika [s].

Turbulenttinen tila voidaan määrittellä alkamaan,

$$Po^{1/3} Re_{TT} = 6370 \quad \text{tai} \quad \frac{1}{Fo_{TT}} = 1225 \quad (7)$$

sillä tehokerroin on melkein vakio koko transienttitilan ajan. [5, s. 510]

Testien mukaan turbulenttiselle (8) ja transienttiselle tilalle (9) voidaan esittää: [5, s. 509-510]

$$Po^{1/3} Re = \frac{5.20}{Fo} \quad (8)$$

$$Po^{1/3} Re = \frac{183}{\sqrt{Fo}} \quad (9)$$

$Po$  on tehokerroin [dimensioton]  
 $Re$  on Reynoldsin luku [dimensioton]  
 $Fo$  on Fourierin luku [dimensioton].

Jotta voisimme arvioida sekoituksessa mahdollisia partikkeli kasaumia, voimme laskea kiillotuspartikkelin hydrodynaamisista ominaisuuksista sen vapaan asettumisnopeuden. Tämä nopeus määritetään partikkelin Reynoldsin luvun avulla laminaariselle ( $Re_p < 0.3$ ) alueelle (10) tai turbulenttiselle ( $1000 < Re_p < 35 \cdot 10^4$ ) alueelle (11) seuraavasti: [5, s. 551-552]

$$V_t = \frac{g_c d_p^2 (\rho_s - \rho_l)}{18\mu} \quad (10)$$

$$V_t = 1,73 \left[ \frac{g_c d_p (\rho_s - \rho_l)}{\rho_l} \right]^{1/2} \quad (11)$$

$V_t$  on partikkelin vapaa asettumisnopeus [m/s]  
 $g_c$  on putoamiskiihtyvyys [ $m/s^2$ ]  
 $d_p$  on partikkelin halkaisija [m]  
 $\rho_s$  on partikkelin tiheys [ $kg/m^3$ ]  
 $\rho_l$  on nesteen tiheys [ $kg/m^3$ ]  
 $\mu$  on nesteen viskositeetti [ $Pa \cdot s$ ].

Partikkelin Reynoldsin luvun määrittäminen: [5, s. 551]

$$Re_p = \frac{\rho_l V_t d_p}{\mu} \quad (12)$$

$Re_p$  on partikkelin Reynoldsin luku [dimensioton]

$V_t$  on partikkelin vapaa asettumisnopeus [m/s]

$d_p$  on partikkelin halkaisija [m]

$\rho_l$  on nesteen tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$  on nesteen viskositeetti [Pa\*s].

Kirjassa [5, s. 553-554] mainitaan, että suuri määrä partikkeleita muuttaa vapaata asettumisnopeutta. Nopeuden korjaamiseksi voimme käyttää ehdotettua yhtälöä:

$$V_{ts} = V_t(1 - X)^n \quad (13)$$

$V_{ts}$  on partikkelien estynyt laskeutumisnopeus [m/s]

$V_t$  on partikkelin vapaa asettumisnopeus [m/s]

$X$  on partikkelien tilavuusosa nesteessä [dimensioton]

$n$  on partikkelin Reynoldsin luvun funktio [dimensioton].

EkspONENTTI  $n$  RIIPPUU REYNOLDSIN LUVUSTA SEURAAVASTI:

Jos  $Re_p < 0,3$                       niin,                       $n = 4,65$

Jos  $0,3 < Re_p < 1000$               niin,                       $n = 4,375$

Jos  $Re_p > 1000$                       niin,                       $n = 2,33$

Nämä luvut on ensisijaisesti tarkoitettu partikkelikeskittymien arvioimiseksi laskeutumisnopeuden avulla. Kirjassa [5, s. 558] esitetään Zwieteringin (1958) julkaisema yhtälö potkurin pienimmälle nopeudelle, jolla estetään partikkelien kasautuminen:

$$N_{j_s} = S \nu^{0,1} \left[ \frac{g_c(\rho_s - \rho_l)}{\rho_l} \right]^{0,45} X^{0,13} d_p^{0,2} D^{-0,85} \quad (14)$$

$N_{j_s}$  on potkurin alin kierrosnopeus [1/s]  
 $S$  on Zwieteringin vakio [dimensioton]  
 $\nu$  on nesteen kinemaattinen viskositeetti [m<sup>2</sup>/s]  
 $g_c$  on putoamiskiihtyvyyden vakio [m/s<sup>2</sup>]  
 $\rho_s$  on partikkelin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\rho_l$  on nesteen tiheys [kg/m<sup>3</sup>]  
 $X$  on partikkelien tilavuusosa nesteessä [dimensioton]  
 $d_p$  on partikkelin halkaisija [m]  
 $D$  on potkurin halkaisija [m].

Zwieteringin vakio määritetään potkurille seuraavasti:

$$S = Re_{imp}^{0,1} Fr^{0,45} \left( \frac{D}{d_p} \right)^{0,2} X^{0,13} \quad (15)$$

$Re_{imp}$  on potkurin Reynoldsin luku [dimensioton]  
 $Fr$  on Frouden luku [dimensioton]  
 $D$  on potkurin halkaisija [m]  
 $d_p$  on partikkelin halkaisija [m]  
 $X$  on partikkelien tilavuusosa nesteessä [dimensioton].



Potkurin Reynoldsin luku ja Frouden luku voidaan laskea yhtälöillä:

$$Re_{imp} = \frac{N_{js} D^2}{\nu} \quad (15)$$

$$Fr = \frac{[\rho_l]}{(\rho_s - \rho_l)} N_{js}^2 \frac{D}{g_c} \quad (16)$$

$Re_{imp}$  on potkurin Reynoldsin luku [dimensioton]

$N_{js}$  on potkurin alin kierrosnopeus [1/s]

$D$  on potkurin halkaisija [m]

$\nu$  on nesteen kinemaattinen viskositeetti [m<sup>2</sup>/s],

$Fr$  on Frouden luku [dimensioton]

$\rho_s$  on partikkelin tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_l$  on nesteen tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$g_c$  on putoamiskiiktyvyys [m/s<sup>2</sup>].

Zwietering käyttää yhtälöissään parametria  $X$  partikkelien tilavuusosan osoittamiseen nesteessä. Kirjassa esitetään kolme tapaa ratkaista partikkelien tilavuusosa. [5, s. 559]

Käyttämällä tilavuusprosenttia,

$$X = 100 \frac{\rho_s \text{vol}\%}{\rho_l (100 - \text{vol}\%)} \quad (17)$$

partikkelien massaprocenttia,

$$X = 100 \frac{\text{wt}\%}{100 - \text{wt}\%} \quad (19)$$

tai käyttämällä lieteitiheyttä  $\rho_{av}$

$$X = 100 \frac{M_s}{\rho_{av} V - M_s} \quad (19)$$

missä  $V$  on koko lietteen tilavuus [m<sup>3</sup>]  
 $M_s$  on partikkelien massa [kg]  
 $\rho_{av}$  on koko lietteen tiheys [kg/m<sup>3</sup>].

Zwieteringin vakion laskenta voidaan kuitenkin suurimmalta osin välttää käyttämällä yleisiä potkuri malleja. Silloin voimme käyttää seuraavaa yhtälöä: [6, s. 290]

$$S = S_{Std}[f(C/T)f(D/T)] \quad (20)$$

$S$  on Zwieteringin vakio [dimensioton]

$S_{Std}$  on potkurin sijainnin standardi geometria [dimensioton]

$f(C/T)$  on potkurin C/T suhteen korjauskerroin [dimensioton]

$f(D/T)$  on potkurin D/T suhteen korjauskerroin [dimensioton].

Korjauskertoimessa  $C$  tarkoittaa potkurin pohjaväliä,  $D$  potkurin halkaisijaa ja  $T$  sekoituskammion halkaisijaa. Yhtälössä siis kerrotaan potkurin standardia sijaintia korjauskertoimilla, jolloin saadaan Zwieteringin vakio halutulle potkurin sijainnille.

Sekoitusaikaa voidaan kirjan [5, s. 509-510] mukaan arvioida Grenvillen (1992) testien perusteella yhtälöillä (2.21) turbulenttiselle ja (2.22) transienttiselle alueelle.

$$Po^{1/3}N\theta_{95} \frac{D^2}{T^{1,5}H^{0,5}} = 5,2 \quad (21)$$

$$N\theta_{95} = \frac{183^2}{Po^{2/3}Re} \left(\frac{T}{D}\right)^2 \quad (22)$$

$Po$  on potkurin tehokerroin [dimensioton]

$Re$  on nesteen Reynoldsin luku [dimensioton]

$N$  on haluttu kierrosnopeus [1/s]

$\theta_{95}$  on aika, jossa saavutetaan 95% sekoittuminen [s]

$D$  on potkurin halkaisija [m]

$T$  on kammion halkaisija [m]

$H$  on nesteen korkeus [m].

Yhtälön (21) vakiolla on  $\pm 10,0\%$  hajontaluku ja yhtälöllä (2.22) on  $\pm 17,4\%$ .

Jotta sekoitusaika voitaisiin laskea halutulle prosenttiasteelle, voidaan sille laskea korjauskerroin. [5, s. 514]

$$\theta_z = \theta_{95} \frac{\ln(100 - \%homogeenisyys)/100}{\ln(0,05)} \quad (23)$$

Tilavuusvirtausta voidaan arvioida seuraavalla yhtälöllä.

$$Q = \frac{1}{4} * \pi * d^2 * v \quad (24)$$

$Q$  on nesteen tilavuusvirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 $d$  on putken sisähalkaisija [ $\text{m}$ ]  
 $v$  on virtausnopeus [ $\text{m}/\text{s}$ ].

Tässä luvussa annetuilla yhtälöillä tullaan antamaan esimerkki ja perustelemaan sekoitusastian potkurin alin kierrosnopeus, sekoitusaika ja pumpun alin vaadittu kierrosnopeus.

#### 4 Sekoittajan suunnittelu

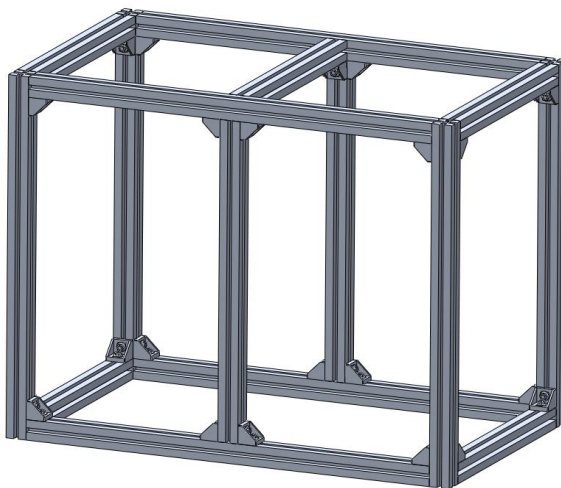
Sekoittajan suunnittelussa käytettiin hyväksi jo tuotannossa olevaa sekoitinta (kuva 8). Suunnittelutyössä mitoitettiin osat, valittiin materiaalit ja suunniteltiin laitteen ohjaus. Suunnittelun alussa päätettiin laitteen koostuvan kiillotusnesteen sekoituskammioista, mekaanisesta sekoittajasta ja nesteen kierrätyspumpusta, joka tuli sijoittaa kammion pohjaan. Kokonaisuutta tuli ympäröidä tukeva runko, johon tuli jättää tilaa mahdollisille muille myöhemmin lisättäville mittauslaitteille.



Kuva 8. Tuotannon käytössä oleva sekoitin

#### 4.1 Runko

Rungolta vaadittiin keveyttä ja liikuteltavuutta, lisäksi sen oli mahduttava kulkemaan tuotannon tiloissa. Rungon korkeuden sallittiin olevan noin yksi metri, mitoitettu noin käyttäjän vyötärön korkeudelle. Tällöin seisomatyö laitteen kanssa olisi ergonomista [7, s. 399]. Rungon pituus myös rajoitettiin noin yhteen metriin, tuotannossa olevan varastointitilan rajallisuuden vuoksi. Tarkoituksena oli luoda helposti liikuteltava ja pieneen tilaan mahduttava testilaitte. Runko haluttiin myös rakentaa niin, että se olisi helposti muutettavissa. (Kuva 9.)

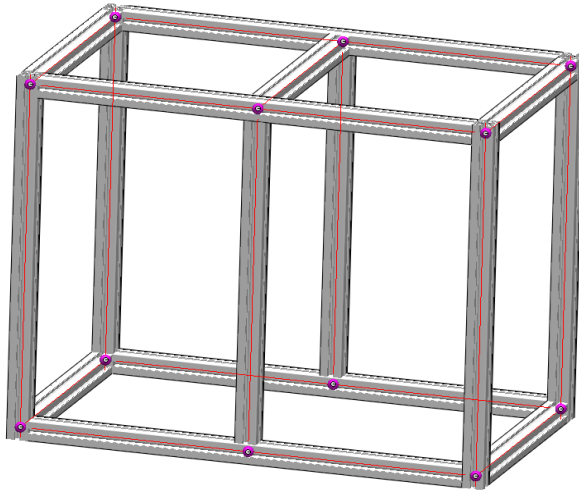


Kuva 9. 3D-mallinus laitteen rungosta.

Muodoksi valittiin suorakulmio ja mitoiksi 1000 x 850 x 1000 mm. Rungossa tuli olla tilaa noin 40 litran sekoituskammiolle ja sähkökaapille. Materiaaliksi valittiin Bosch Rexrothin alumiiniprofiili 45x45L ja kiinnikkeiksi valmistajan ruuvattavat kulmapalat, niiden hyvän saatavuuden ja helpon kokoonpanon vuoksi.

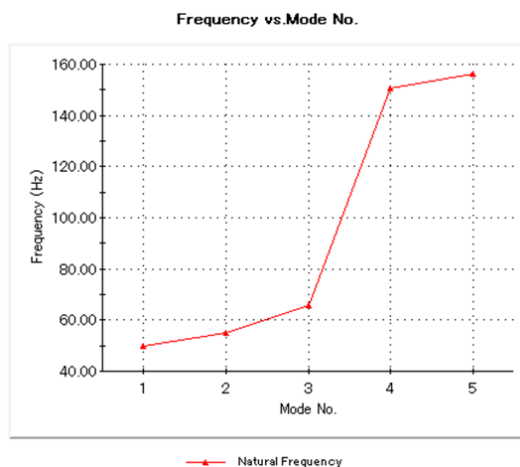
Suunnitellun rungon ominaistuuudet olivat aiheellista tarkistaa, jotteivät ne osuisivat lähellä ulkoisen sekoittimen pyörintänopeuksia. Laskennassa päätettiin käyttää Bosch Rexrothin antamia tietoja [8] ja puuttuva materiaalin tiheys lainattiin materiaalin valmistajan Alumnicon katalogista [9]. Laskentaa varten SolidWorksiin luotiin oma materiaali DIN EN 573, johon osoitettiin kimmokerroin 70 000 N/mm<sup>2</sup>, Poissonin vakio 0,34 ja materiaalin tiheys 2 700 kg/m<sup>3</sup>.

Rungon 3D-mallinnus muutettiin palkkimalliksi käyttämällä Solidworks Simulation -lisäosaa. Lisäosa muutti 3D-mallin profiilin automaattisesti palkkimalliksi ja muodosti rungosta 12 solmua ja 19 palkkia. Laskentaan valittiin taajuusanalyysin viisi ensimmäistä ratkaisua ja ratkaisijaksi SolidWorksin suosittelu Direct sparse solver, joka käyttää suoraa numeerista analyysiä ratkaisun löytämiseen iteratiivisen menetelmän sijasta. [10] Laskennan reunaehdoiksi tuettiin jäykästi pohjan neljä kulmaa. (Kuva 10.)



Kuva 10. SolidWorksin luomat palkit punaisina viivoina ja solmut vaaleanpunaisina palloina.

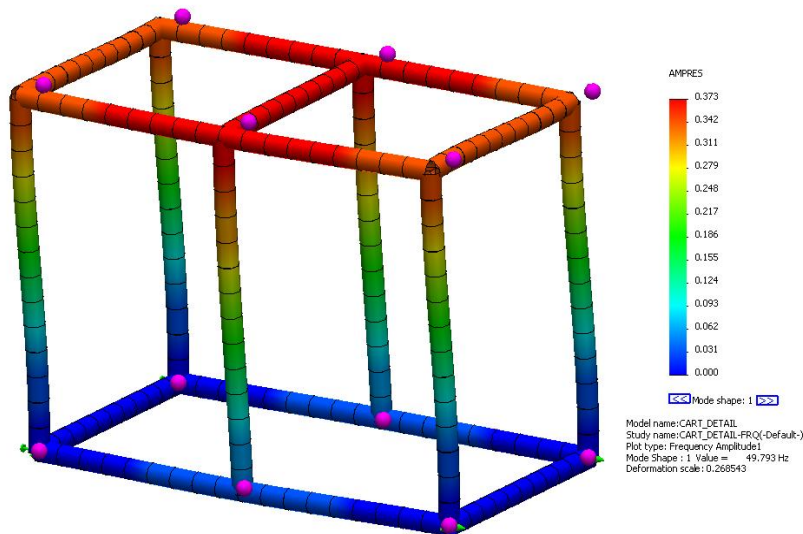
Katsotaan seuraavaksi ratkaisijan antamia tuloksia. Ratkaisijan antamat ominaistajuu-  
det ovat noin 49,8 Hz, 55,2 Hz, 65,8 Hz, 150,4 Hz ja 156,0 Hz (kuva 11).



Kuva 11. Ratkaisijan tulostus mallin viidestä ensimmäisestä ominaistajuudesta.

Jos taajuuksia verrataan mekaanisen sekoittimen laskennasta saatuun potkurin kierrosnopeuteen  $N_{js} = 2,416$  rps, nähdään että ensimmäinen ominaistaajuus on jo yli 20-kertainen potkurin kierrosnopeuteen verrattuna. Voimme siis huoletta käyttää sekoitinta suunnitellulla kierrosnopeudella. On kuitenkin perusteltua tarkistaa moottorin suurin nopeus. Moottorin kilven mukaan suurin kierrosnopeus 230 V käyttöjännitteellä on 1380 rpm = 23 rps, joka on hieman alle puolet ensimmäisestä ominaistaajuudesta. Voimme siis sanoa moottorin käytön olevan turvallista sen koko käyttöalueella.

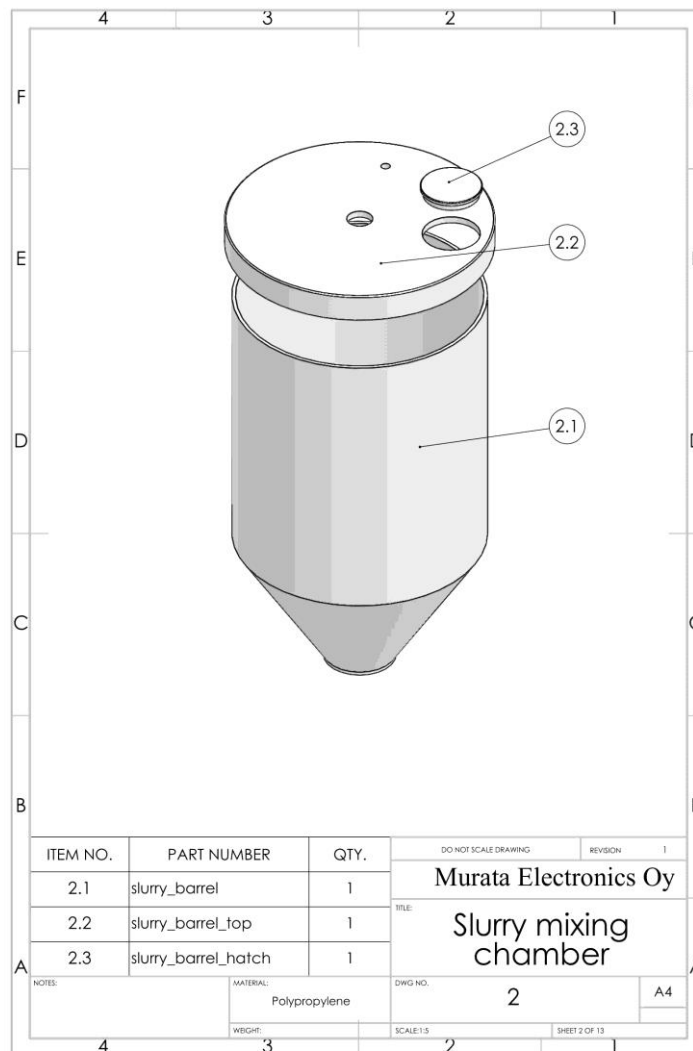
Tutkitaan kuitenkin ensimmäistä ominaismuotoa hieman tarkemmin. Kuva 12 esittää ensimmäisen ominaismuodon ja solmujen alkuperäiset paikat ovat piirrettynä vaaleanpunaisina palloina. Kuvasta voidaan nähdä, että ensimmäinen ominaismuoto muuttaa rungon muotoa sen pituussuunnassa.



Kuva 12. Ratkaisijan mallinnus ensimmäisestä ominaismuodosta.

## 4.2 Sekoituskammio

Sekoituskammion (kuva 13) materiaalin valinta aloitettiin siinä käytettävien kemikaalien tutkimisella. Kammion materiaaliksi harkittiin kolmea mahdollista emäksen ja hapettavan kestävää muovia: PEEK, PTFE ja PP. PEEK ja PTFE olisivat olleet mahdollisia, mutta valmistusaika ja -hinta olisivat olleet korkeammat. Täten materiaaliksi valittiin PP-muovi valmistajan toivomuksesta.

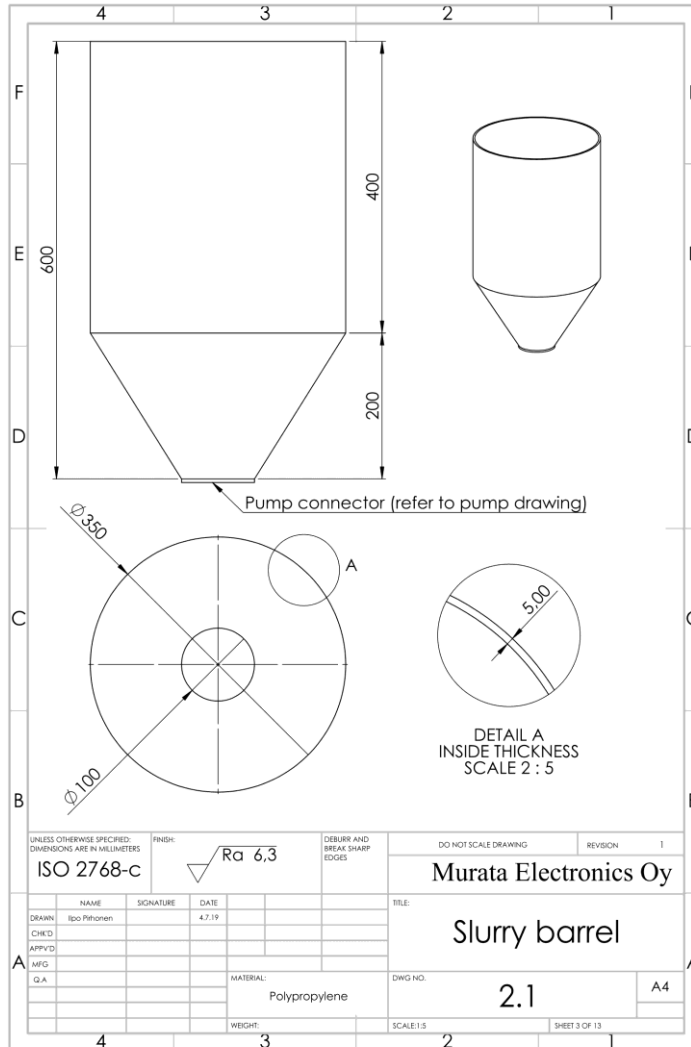


Kuva 13. Sekoituskammion kokoonpanopiirustus.



Sekoituskammion suunnittelussa otettiin mallia tuotannon käytössä olevasta sekoituskammioista, koska tämä oli havaittu toimivaksi ja helposti valmistettavissa. Kooksi haluttiin noin 40 litraa, jossa voisi suorittaa pienempiä ja suurempia testejä.

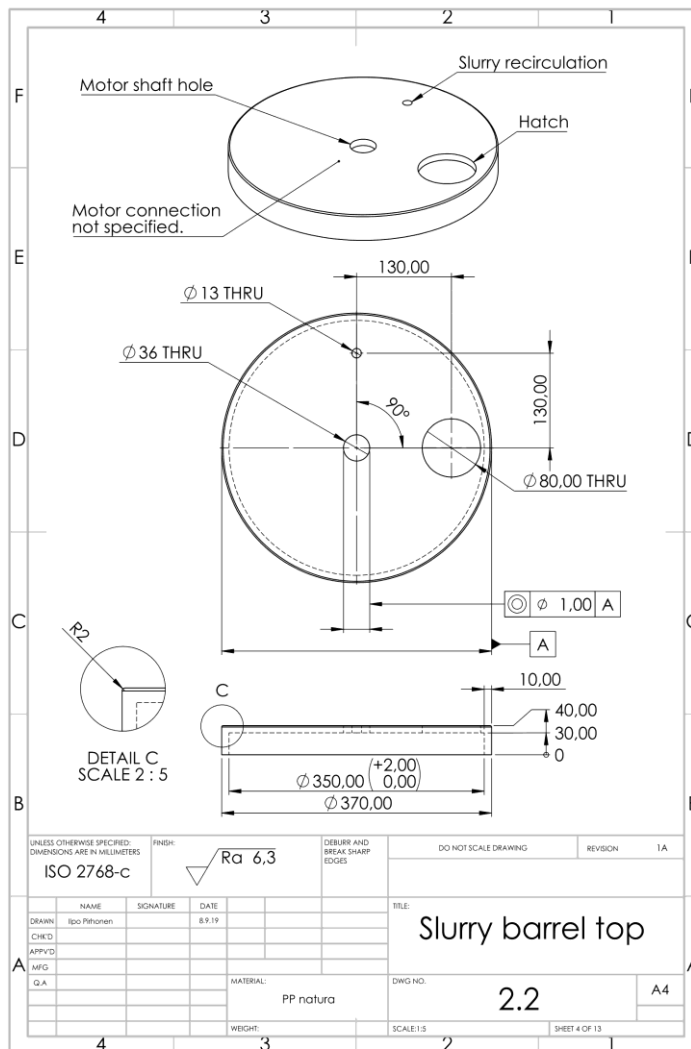
Sekoituskammion pohja on kartion muotoinen, kartion seinämät noin 50 asteen kulmassa pohjaan nähden (kuva 14). Tällä pyritään estämään kiillotusnesteen kasautuminen kammion pohjalle ja saumakohtiin.



Kuva 14. Sekoituskammion tynnyrin piirustus.

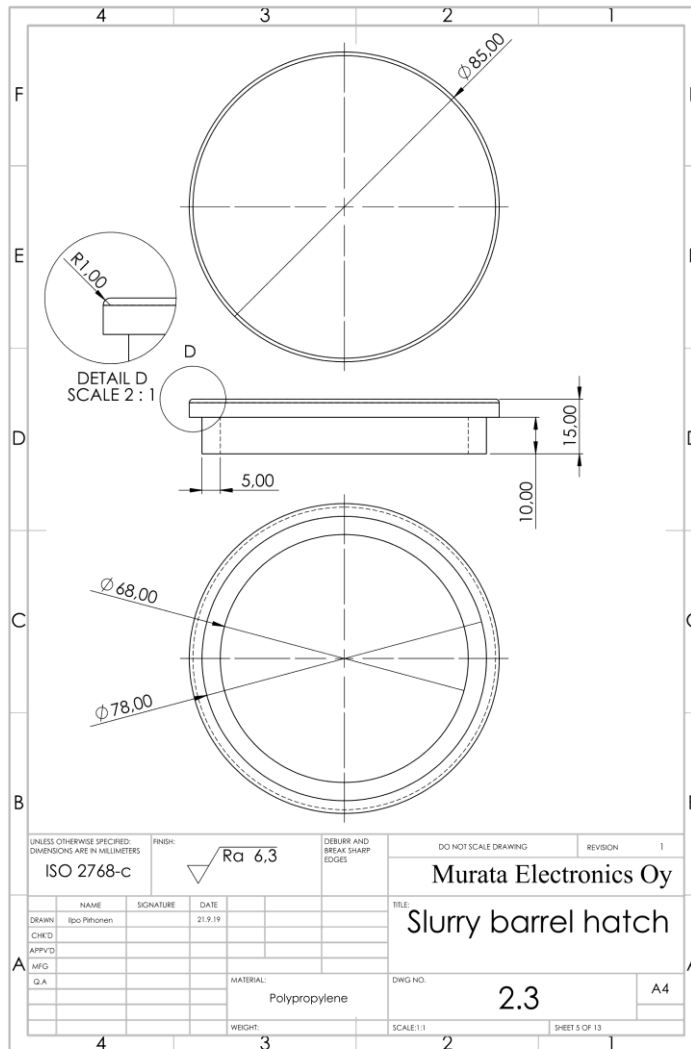
Laitteen rungon korkeus ja pumpun sijoitus kammion pohjaan rajoitti korkeuden noin 600 mm:iin, jolloin kammion halkaisijaksi määräytyi 350 mm. Kammion seinämävahvuudeksi valittiin 5 mm. Pumppu päätettiin kiinnittää suoraan kammion pohjaan, jolloin sille jouduttiin valmistamaan kiinnityslevy.

Sekoituskammioon suunniteltiin irrotettava kansi helpottamaan sen huoltamista. Kannessa on läpiviennit moottorin akselille, hiontanesteen kierrätyslinjalle, sekä tarkastusluukku. (Kuva 15.)



Kuva 15. Sekoituskammion kannen piirustus.

Moottorin akselin halkaisija oli 30 mm, joten läpivienniksi päätettiin 36 mm saatavilla olevien työkalujen mukaan. Moottorin tuli kiinnitettäväksi kanteen moottorissa jo olevalla kiinnityslevyllä. Kannen tarkistusreiälle suunniteltiin vielä oma kansi (kuva 16). Tämä voidaan nostaa täyttöä tai tarkastusta varten paikaltaan, ja laitteen käytön aikana se suojaa käyttäjää kemikaaliroiskeilta.



Kuva 16. Sekoituskammion kannen luukun piirustus.

Sekoistustynnyrin valmistus ulkoistettiin kokonaisuutena paikalliselle Muovikopla Oy:lle.

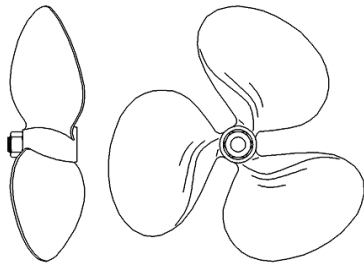
Kuvassa 17 nähdään koottu sekoituskammio. Kammion päällä on punaiseksi maalattu sekoitusmoottori ja sen vaihdelaatikko. Sekoituskammion pohjaan on kiinnitetty sekoituspumppu. Pumpusta lähtee T-liittimen kautta virtaus kuristusventtiiliin kautta takaisin sekoituskammioon. T-liittimen toinen haara kulkee sulkuventtiiliin kautta virtausmittarille, jonka jälkeen CMP:lle.



Kuva 17. Kuva valmiista sekoituskammiosta

### 4.3 Mekaaninen sekoitin

Yrityksellä oli tarkoituksena uusiokäyttää vanhaa mekaanista kiillotusnesteen sekoittajaa. Sekoittaja koostui SEW-EURODRIVE:n 230 V oikosulkumoottorista, alentavasta vaihteistosta, vaihteistoon jäykästi kiinnitetystä akselista ja akselin päähän ruuvattavasta potkurista. Potkuri oli meripotkuri -tyylinen kolmilapainen potkuri ja halkaisijaltaan noin 100 mm (kuva 18). Meripotkuri on hyvin tyypillinen sekoituksessa käytetty malli, mutta nykyään jo hylätty uusien parempien mallien vuoksi. Tässä potkurissa on etuna se, että pyöriessään se aiheuttaa akselinsa ja säteensä suuntaista virtausta.



Kuva 18. Piirustus meripotkurista. [11].

Suunnittelun alussa oli tarve selvittää, olisiko vanhaa sekoittajaa mahdollista käyttää hyväksi laitetta rakennettaessa. Jotta sekoitusta voitaisiin arvioida, laskettiin siihen liittyviä arvoja. Seuraavassa laskennassa ei ole käytetty yrityksen todellisia nesteiden arvoja luottamuksellisen tiedon vuoksi, vaan laskenta on tarkoitettu vain esimerkiksi. Laskennassa arvioimme ensin yhden ja monien partikkelien vapaata laskeutumismopeutta, minkä jälkeen voimme siirtyä potkurin alimman kierrosnopeuden laskemiseen. Viimeiseksi laskemme sekoitusajan.

Olkoon kiillotusnesteen sekoitus jokin tuntematon suhde tislattua vettä ja additiivia, sekä timantti partikkeleita. Kiillotusnesteen tiheydeksi saadaan  $1200 \text{ kg/m}^3$  ja viskositeetiksi  $2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , joka lainataan Hosokawa Powder Technology Foundation julkaisemasta artikkelista:

”It was found that at shear rates lower than  $1000 \text{ s}^{-1}$ , the slurries behaved as Newtonian fluids with nearly constant viscosities of  $2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ , –.” [12, s. 99]

Kiillotusnesteen partikkelien kooksi valitaan  $0,4 \mu\text{m}$  ja tiheydeksi  $3510 \text{ kg/m}^3$ . Partikkelin koon arvioinnissa on käytetty Yhdysvaltojen patenttia numerolta US 6,258,721 B1, jossa mainitaan:

"The multistage process for the chemical-mechanical planarization (CMP) of Cu commences with forming a primary aqueous or non-aqueous - - slurry from - - diamond particles having an average particle size not substantially above  $0.4 \mu$  - -."  
[13, s. 2]

Yritämme ensimmäiseksi arvioida yhden partikkelin vapaata asettumisnopeutta yhtälöllä (10) ja (11). Kokeilemme ensin yhtälöllä (10) laminaariselle alueelle ( $Re_p < 0,3$ ).

$$V_t = \frac{9,81 \text{ m/s}^2 (4 \cdot 10^{-7} \text{ m})^2 (3510 \text{ kg/m}^3 - 1200 \text{ kg/m}^3)}{18 \cdot 0,002 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 0,21255 \text{ m/s} \approx 0,21 \text{ m/s}$$

Vastaus  $V_t \approx 0,21 \text{ m/s}$  vaikuttaa olevan järkevä, varmistetaan partikkelin Reynoldsin luku yhtälöllä (12).

$$Re_p = \frac{1200 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,21255 \text{ m/s} \cdot 4 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{0,002 \text{ Pa} \cdot \text{s}} = 0,051012$$

Yhden vapaan partikkelin Reynoldsin luku  $Re_p$  osuu yhtälön laminaariselle alueelle ( $Re_p < 0.3$ ), joten hyväksymme lasketun nopeuden. Seuraavaksi arvioimme partikkelien yhteistä estynyttä laskeutumisenopeutta. Ratkaisemme ensin partikkelien tilavuusosan nestessä yhtälöllä (19). Lainaamme partikkelien massaprosentin Yhdysvaltojen patentista: US 6,258,721 B1, jossa mainitaan:

"The multistage process for the chemical-mechanical planarization (CMP) of Cu commences with forming a primary aqueous or non-aqueous - - slurry from - - between about 0.001 and 5 wt-% diamond particles - -." [13, s. 2]

Käytetään sekoituksen kannalta hankalinta mahdollisuutta eli 5 wt% massaprosenttia laskennassa.

$$X = 100 \frac{0,05}{100 - 0,05} \approx 0,05002$$

Parametriä  $X \approx 0,05002$ , käytämme partikkelien yhteisen estyneen laskeutumisenopeuden arvioimiseen.

Partikkelien yhteistä estynyttä laskeutumisnopeuden voimme ratkaista yhtälöllä (13). Yhtälöön tarvitaan eksponentti  $n = 4,65$ .

$$V_{ts} = 0,21255 \text{ m/s} (1 - 0,05002)^{4,65} = 0,16743 \text{ m/s} \approx 0,17 \text{ m/s}$$

Hiontapartikkelit siis laskeutuvat vapaasti nesteessä nopeudella  $V_{ts} \approx 0.17 \text{ m/s}$ .

Seuraavaksi haluamme arvioida potkurin alinta mahdollista nopeutta, jolla estetään partikkelien laskeutuminen. Käytetään yhtälön (20) Zwieteringin vakion  $S$  arvioimiseksi taulukkoa 1.

Taulukko 1. Muutamia valmiiksi laskettuja Zwieteringin standardiarvoja [6, s. 290].

IMPELLER	$(D/T)_{Std}$	$(C/T)_{Std}$	$S_{Std}$ Bottom Style	
			Flat	Dish
6BD	1/3	1/4	7	5.2
4BF	1/3	1/4	7.5	5.6
4BP	1/3	1/4	5	4.6
HE-3	1/3	1/4	9	8.2
MP	1/3	1/4	9	8.2
RCI	2/3	1/10	–	7
Anchor	0.96	0.02	7	7
H-Rib.	0.96	0.02	7	7

As an estimate, use the HE-3 correlation for **marine propellers**.

Valitaan taulukosta HE-3 potkuri, sillä tätä potkurimallia voimme käyttää MP-tyylisen potkurin arvioinnissa.  $S_{Std}$  -arvoon vaikuttaa myös pohjan muoto, valitaan Dish-tyylinen pohja.<sup>1</sup> Saamme  $S_{Std}$  arvoksi 8.2. Suunniteltu sekoitusastia ei ole kuitenkaan standardin mukainen, joten joudumme korjaamaan  $S_{Std}$  -arvoa.

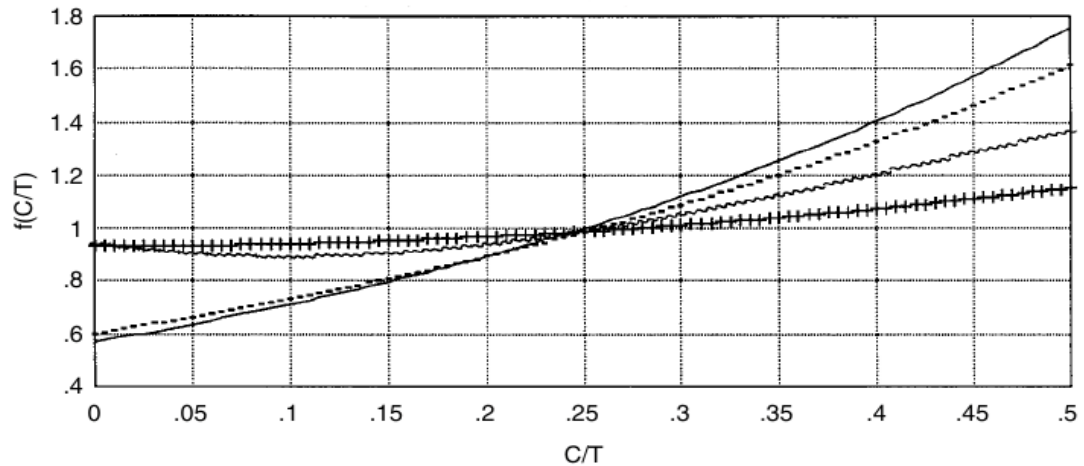
<sup>1</sup> Suunnitellun sekoituskammion pohjan muodosta ei teoksen tekohetkellä valitettavasti löydy vastaavaa tietoa, joten laskennassa on käytetty lähimpänä olevaa pohjan muotoa.

Lasketaan ensin yhtälön (20)  $C/T$  ja  $D/T$  suhteet, kun potkurin korkeus pohjasta  $C = 200$  mm, kammion halkaisija  $T = 350$  mm ja potkurin halkaisija  $D = 100$  mm.

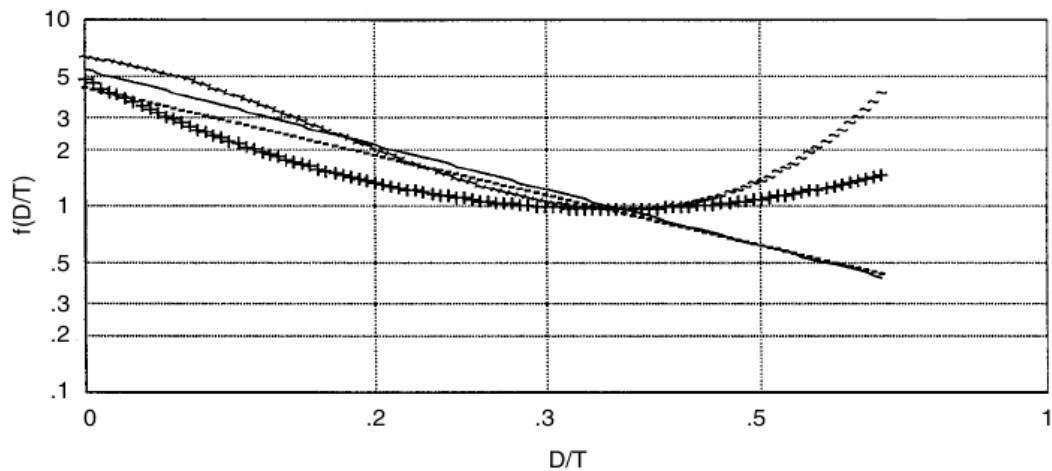
$$C/T = \frac{200\text{mm}}{350\text{mm}} = 0,5714$$

$$D/T = \frac{100\text{mm}}{350\text{mm}} = 0,2857$$

Jolloin kuvista 19 ja 20 saadaan  $f(C/T) = 1,18$  ja  $f(D/T) = 1$ .



Kuva 19.  $C/T$  korjauskertoimen neljälle erilaiselle potkurille. 6BD (viiva), 4BF (-), 4BP (-) ja HE-3 (+) [6, s. 291].



Kuva 20.  $D/T$  korjauskertoimen neljälle erilaiselle potkurille. 6BD (viiva), 4BF (-), 4BP (-) ja HE-3 (+) [6, s. 291].



Seuraavaksi sijoitetaan  $S_{std} = 8,2$ ,  $f(C/T) = 1,18$  ja  $f(D/T) = 1$  yhtälöön (20), ja lasketaan Zwieteringin korjattu arvo.

$$S = 8,2(1,18)(1) = 9,67$$

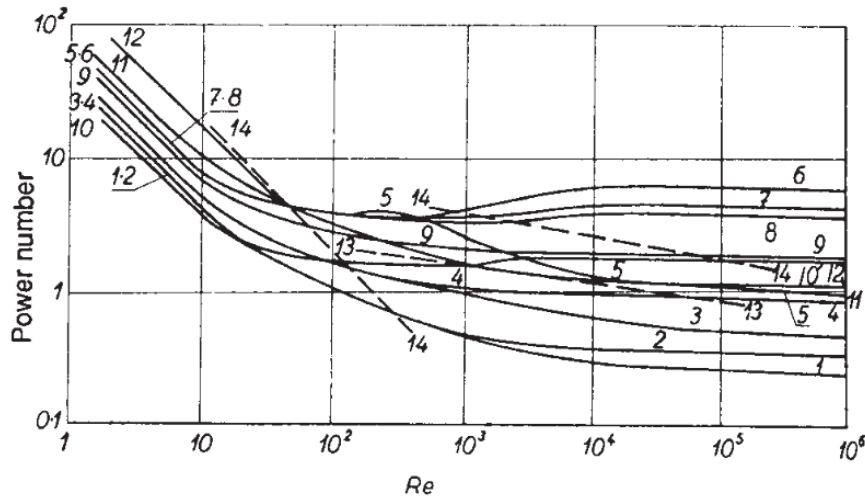
Arvioidaan laskettujen arvojen avulla potkurin pienintä nopeutta, jolla estetään partikkelien laskeutuminen sekoituskammion pohjalle yhtälöllä (14).

$$N_{js} = 9,67 \left( \frac{0,002 Pa \cdot s}{1200 kg/m^3} \right)^{0,1} \left[ \frac{9,81 m/s^2 (3510 kg/m^3 - 1200 kg/m^3)}{1200 kg/m^3} \right]^{0,45} 0,05002^{0,13} (4 \cdot 10^{-7} m)^{0,2} (0,1 m)^{-0,85} = 2,416 rps \approx 145 rpm$$

Noin 150 rpm pienelle sekoituskammionleikelle vaikuttaisi olevan järkevä nopeus, joten hyväksytään vastaus. Määritetään seuraavaksi muutamia nesteiden arvoja, jonka jälkeen voidaan arvioida sekoitusaikaa. Lasketaan ensimmäiseksi kiillotusnesteiden Reynoldsin luku lasketun nopeuden avulla käyttämällä yhtälöä (1).

$$Re = \frac{(1200 kg/m^3 \cdot 0,95 + 3510 kg/m^3 \cdot 0,05) 2,416 rps (0,1 m)^2}{0,002 Pa \cdot s} = 15891,24 \approx 16000$$

Korjataan seuraavaksi laskettu Reynoldsin luku  $Re = 16000$  potkurin tehokertoimella ku- vasta 21.



Kuva 21. Kuvaaja erilaisien potkurien tehokertoimista Reynoldsin luvun funktiona [6, s. 279].

- - several shapes: (1) propeller, pitch equalling diameter, without baffles; (2) propeller,  $s = d$ , four baffles; (3) propeller,  $s = 2d$ , without baffles; (4) propeller  $s = 2d$ , four baffles; (5) turbine impeller, six straight blades, without baffles; (6) turbine impeller, six blades, four baffles; (7) turbine impeller, six curved blades, four baffles; (8) arrowhead turbine, four baffles; (9) turbine impeller, inclined curved blades, four baffles; (10) two-blade paddle, four baffles; (11) turbine impeller, six blades, four baffles; (12) turbine impeller with stator ring; (13) paddle without baffles (data of Miller and Mann); (14) paddle without baffles (data of White and Summerford). [6, s. 278]

Valitaan lainauksen mukaan: (1) *propeller, pitch equalling diameter, without baffles*, sillä sekoituskammiossa ei ole sekoituslevyjä ja käytössä on perinteinen potkurimalli.

Laskettu kiillotusnesteen Reynoldsin luku osuu noin  $Re = 10^3$  alueelle, joten kuvaajasta saamme tehokertoimeksi  $Po = 0,7$ . Määritetään sekoituksen alue kertomalla Reynoldsin luku tehokertoimen kolmanneksella (7).

$$0,7^{1/3} \cdot 16000 \approx 14210$$

Raja turbulenttiselle tilalle on 6370, jolloin suunniteltu sekoitus on varsin turbulanttista. Hyväksymme vastauksen ja voimme seuraavaksi arvioida sekoitusaikaa yhtälöllä (21).

$$Po^{1/3} N \theta_{95} \frac{D^2}{T^{1,5} H^{0,5}} = 5,2 \rightarrow \theta_{95} = \frac{5,2 T^{1,5} H^{0,5}}{N D^2 Po^{1/3}}$$

$$\theta_{95} = \frac{5,2(0,35m)^{1,5}(0,5m)^{0,5}}{2,416rps(0,1m)^2 0,7^{1/3}} = 35,49s \approx 36s$$

Pienelle sekoitusastialle 95 prosentin sekoitus noin 36 sekunnissa vaikuttaisi olevan järkevä tulos. Haluamme tuloksen kuitenkin 99 prosentin sekoitukselle, joten lasketaan sekoitusajalle korjauskerroin yhtälöllä (23).

$$\theta_{99} = \theta_{95} \frac{\ln(100-99)/100}{\ln(0,05)} = 1,5370 \theta_{95} , \text{ jolloin}$$

$$1,5370 \cdot 35,49s = 54,55s \approx 55s$$

Vastaukseksi 99 prosentin sekoitukseen siis saamme noin 55 sekuntia. Turvalliseksi ohjeistukseksi ja sekoittimen käytön helpottamiseksi sekoitusajaksi voidaan antaa yksi minuutti.

Tarkistetaan vielä sekoituksen tehontarve ja potkurin pyörinnästä aiheutuva leikkausnopeus. Tehontarve ratkaistaan yhtälöllä (4).

$$P = 0,7(2,416rps)^3(0,1)^5(1200 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,95 + 3510 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,05) = 0,12986 \approx 0,13W$$

Vastaukseksi saadaan kiillotusnesteelle 145 rpm nopeudella noin 0,13 W. Tarkistetaan leikkausnopeus yhtälöllä (5). Haetaan yhtälöön tarvittava Metzner-Otto vakio taulukosta 2.

Taulukko 2. Metzner-Otto vakioita muutamalle erilaiselle potkurityypille [5, s. 370].

Impeller	Propeller	Rushton	Helical Ribbon	Anchor
K	10	12	30	25

Sijoitetaan taulukosta 2 malli *Propeller* = 10, sillä käytössämme on perinteinen potkuri-malli.

$$\gamma = 10 \cdot 2,416rps = 24,16 s^{-1}$$

Leikkausnopeus ei ylitä laskennan alussa Hosokawa Powder Technology Foundationin määrittämää  $1000 s^{-1}$  rajaa, jolloin nesteen viskositeetti ei muutu artikkelin antamasta 2 mPa.

#### 4.4 Pumppu

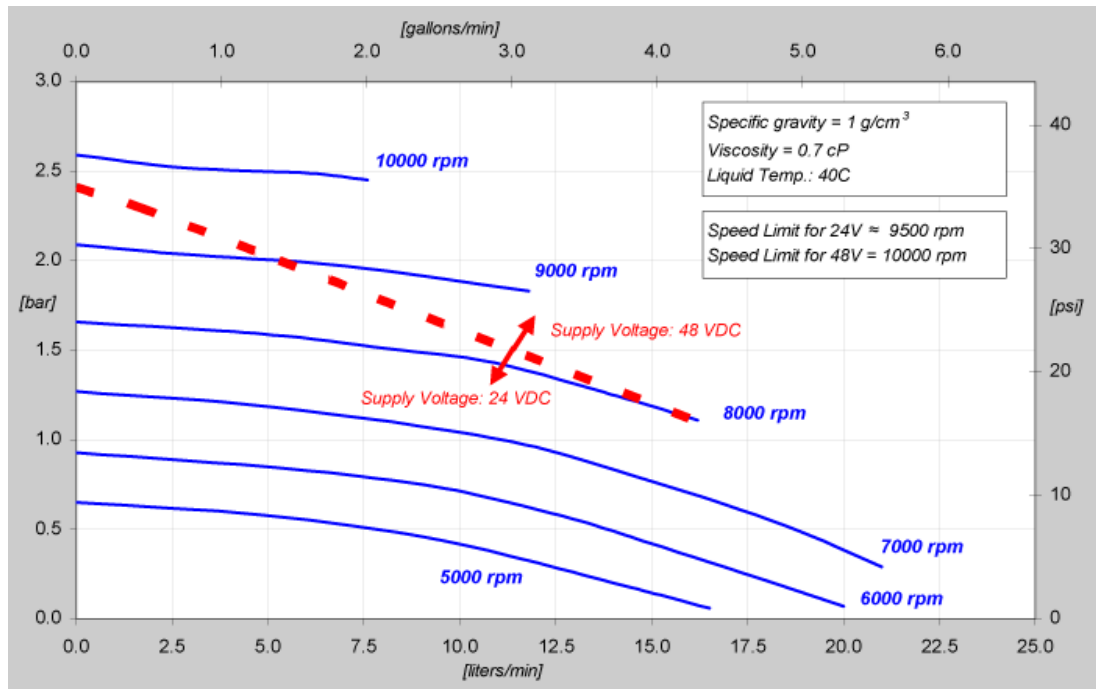
Sekoituskammion pumpulta vaadittiin emäksisten kemikaalien kestoa ja mekaanisen kulumisen sietoa, sillä hiontaneesteessä olevat hiukkaset voivat kuluttaa pumppua. Hyväksi mahdolliseksi toimittajaksi osoittautui Levitronix GmbH, sillä heidän tuotteistaan yrityk-sellä oli jo aikaisempaa kokemusta.

Rajaehtona pumpulta vaadittiin puolen tuuman putkessa yli 0.9 m/s virtausnopeutta ja noin yhden baarin syöttöpainetta. Levitronix GmbH tarjosi kahta levitoivaa keskipako-pumppua hiomanesteen 40 litran kammion sekoitukseen BPS-200 ja PTM-200. PTM pumpuissa olisi ollut etuna niihin sisällytetty kammion sekoitus, jolloin ulkoisesta sekoit-timesta olisi voinut luopua. Vaihtoehtoista käydyn kokouksen jälkeen yhtiö päätyi valit-semaan BPS-200 pumpun.

Rajaehtojen saavuttamiseksi pumpulle valittiin pienin mahdollinen kierrosnopeus halutun virtausnopeuden avulla käyttämällä yhtälöä (24).

$$Q = \frac{1}{4} \pi (0.00127m)^2 0.9 m/s \approx 1.14m^3/s \approx 6.8l/min$$

Pumpun valmistajan kuvasta (kuva 22) voidaan tarkistaa, millä nopeudella saavutetaan rajaehdot.



Kuva 22. Pumpun BPS-200 tilavuusvirtaus ja painekaavio. [14, s. 8]

Kuvasta voidaan päätellä, että pumpun pienin mahdollinen kierrosnopeus rajaehdot huomioon ottaen on 6000 ja 7000 rpm välissä. Turvalliseksi kierrosnopeudeksi voidaan siis ohjeistaa 7000 rpm.

## 5 Ohjaus

Kehitysosastolta toivottiin säädettävää sekoitusnopeutta, joten pumpulle ja moottorille oli suunniteltava säädettävä ohjaus. Moottorille päätettiin hankkia Omron Corporation MX2 -sarjan AB001 0.2 kW taajuusmuuttaja kierrosnopeuden säätämistä varten. Taajuusmuuttaja täyttää myös yhtiön toiveen mahdollisuudesta automatisoida sekoittaja, sillä taajuusmuuttajaa voidaan ohjata valmiiden I/O-pinnien avulla. Taajuusmuuttajan mukaan valittiin RJ45-liitännällä toimiva käsiohjain, jolla käyttäjä voi muuttaa moottorin pyörimisnopeutta. Pumpun ohjaukselle otettiin Levitronix GmbH:n valmistama pumppuohjain ja siihen liitettävä käsiohjain, jolla käyttäjä voi muuttaa pumpun pyörimisnopeutta.

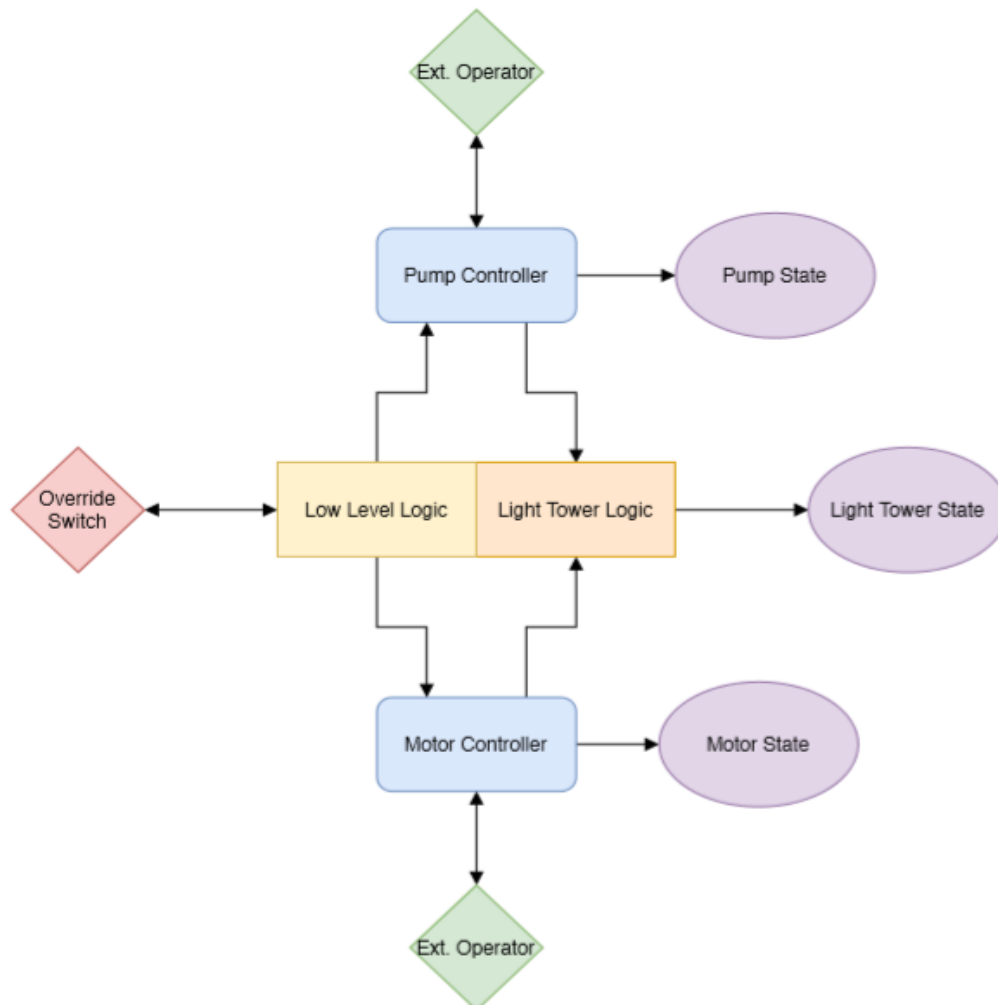
Kahden käsiohjaimen lisäksi oli laitteelle tarpeellista suunnitella kuivakäynnin estävä toiminto. Ratkaisuksi valittiin kapasitiivinen anturi valvomaan kammion nesteen alarajaa noin 100 mm korkeudelle kammion pohjasta.

### 5.1 Korkean tason kuvaus

Laitetta voidaan ohjata kahdella säätimellä, jotka on kytketty moottorin ja pumpun ohjaimiin. Säätimet on väritetty operoinnin lohkoaviossa vihreällä ja ohjaimet sinisellä taustalla. Laitteen nesteen alarajan valvonnan ohituskytkin on väritetty punaisella. Laatikoiden välissä olevat nuolet osoittavat tiedonsiirtosuunnan. (Kuva 23.)

Ohjaimet jakavat tietoa käyttäjälle säätimien kautta, esimerkiksi pumpun nopeuden tai virheilmoituksen moottorin toiminnasta. Nesteen alarajan valvonnan ohituskytkin antaa tiedon käyttäjälle nesteen pinnan laskusta punaisella varoitusvalolla, ja mikäli kytkin ei ole ohitustilassa pysäyttää koneen toiminnan.

## Operations Block Diagram



Kuva 23. Korkean tason kuvaus laitteen ohjauksesta.

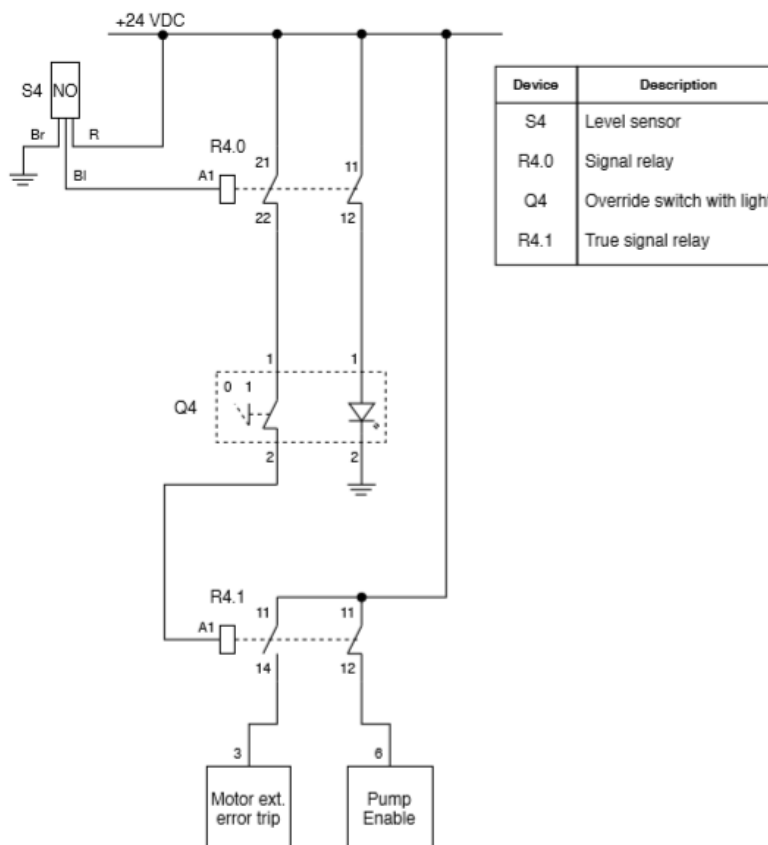
Laitteen merkkivalomajakkaa ohjaa majakan ohjauspiiri, joka valvoo pumpun sekä moottorin ohjainten tilaa (kuva 23). Ohjaimien tilojen yhdistelmällä piiri valitsee majakalle halutun tilan. Merkkivalomajakalle valittiin kolme mahdollista tilaa: tyhjäkäynti-, käynti- ja virhetila. Merkkivalomajakkan tilat päätettiin siten, että tyhjäkäyntitilassa vilkkuu vihreä, käyntitilassa vihreä palaa jatkuvasti ja virhetilassa palaa punainen.

## 5.2 Sähköpiirustukset

Ohjauksen avuksi lisättiin nesteen alaraja-anturi. Anturi asennettiin suunniteltuun ”Nesteen tason valvonta” -piiriin, joka pysäyttää pumpun ja moottorin ohjauksen nesteen las-  
kiessa asetetun rajan alle. Tällä toiminnolla estetään sekoituksen mahdollinen kuiva-  
käynti. Käyttäjällä on myös mahdollisuus eristää anturin signaali ohjauspiiristä, jolloin  
laitetta voidaan käyttää täysin manuaalisesti. (Kuva 24.)

### Electrical Drawing

#### Low Level Logic



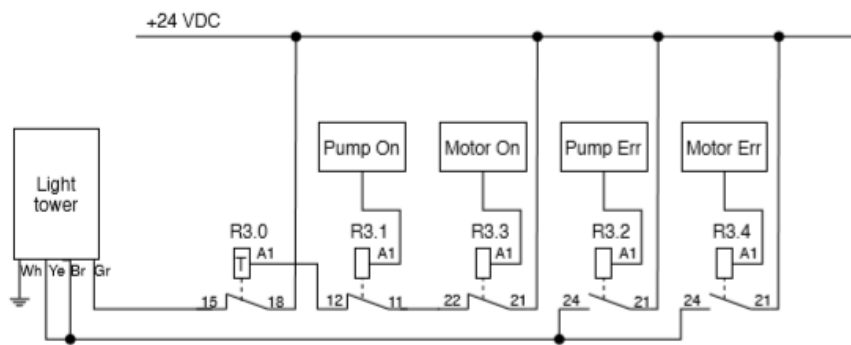
Kuva 24. Nesteen tason valvonta piirin sähköpiirustus.



Lisäksi laitteeseen suunniteltiin merkkivalomajakka näyttämään laitteen tilaa käyttäjälle. Merkkivalomajakalle suunniteltiin oma "Merkkivalomajakkan ohjaus" -piiri, joka valvoo pumpun ja moottorin ohjaimien tilaa ja ohjaa niiden perustella merkkivalomajakkan tilaa. Piirissä on yhteensä viisi relettä, joista neljä valvoo ohjaimien tilaa. Ensimmäinen on lepotilan vihreän valon ajastinrele. (Kuva 25.)

## Electrical Drawing

### Light Tower Logic

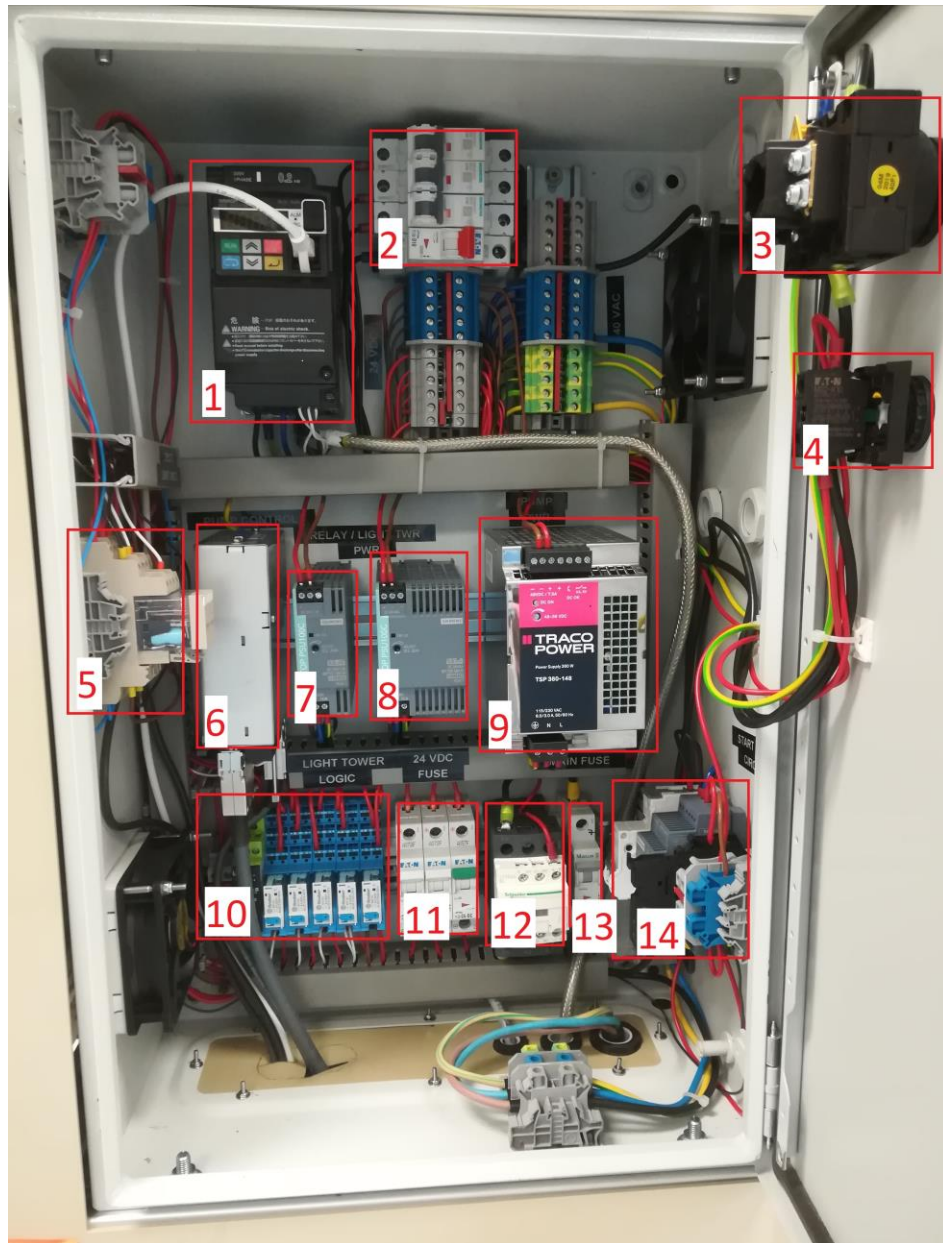


Device	Description
R3.0	Green light switching relay
R3.1	Pump on relay
R3.2	Pump error relay
R3.3	Motor running relay
R3.4	Motor external trip relay

Kuva 25. Merkkivalomajakkan ohjauksen sähköpiirustus.

Valomajakkan piiri muodostuu yhdestä AND-portista ja yhdestä OR-portista. Kun siis pumppu ja moottori ovat yhtä aikaa päällä, niin merkkivalomajakka palaa vihreänä, jos eivät, niin se vilkkuu vihreänä aikareleen mukaan. Jos taas pumppu tai moottori antavat yksin tai samaan aikaan virhesignaalin, niin OR-portin mukaan merkkivalomajakka palaa punaisena.

Laitteen sähkökaappi (kuva 26) johdotettiin ja koottiin työpaikalla.



Kuva 26. Sekoittajan valmis sähkökaappi

Kuvasta 26 nähdään numeroituna:

1. Moottorin taajuusmuuttaja
2. 240 VAC-sulakkeet

3. Päävirtakytkin
4. Käynnistyskytkin
5. Nesteen tason valvontapiiri
6. Pumpun ohjain
7. 24 VDC-virtalähde ylimääräisille mittalaitteille
8. 24 VDC-virtalähde
9. 48 VDC-virtalähde pumpulle
10. Merkkivalomajakan piiri
11. 24 VDC-sulakkeet
12. Päävirtakontaktori
13. Pääsulake
14. Käynnistys ja hätäseis -piiri

Valmis sähkökaappi tarkastettiin työpaikan alihankkijan toimesta.

## 6 Ohjekirja

Yritykselle kirjoitettiin ohjekirja, jonka tarkoituksena on antaa tukea laitteen käyttäjälle sitä käyttäessään tai huoltaessaan. Seuraavassa lista ohjekirjan sisällysluettelosta:

1. OPERATIONS
2. GENERAL SAFETY
3. MECHANICAL DRAWINGS
4. ELECTRICAL DRAWINGS
5. BILL OF MATERIALS.

"OPERATIONS" -luku sisältää laitteen esittelysivun, sekä laitteen käyttöä tukevia lohko-kaavioita. Lohkokaavioilla pyritään pääasiassa selvittämään laitteen logiikoiden toimintaa. Esimerkiksi, missä vaiheessa merkkivalomajakan täytyisi näyttää punaista tai vihreää. "GENERAL SAFETY" -luku on yhden sivun pituinen yleinen turvallisuustiedote laitteen käytöstä ja huollosta. Siinä esimerkiksi pyydetään käyttäjää aina käyttämään suojalaseja mahdollisten kemikaaliroiskeiden takia. "MECHANICAL DRAWINGS" ja "ELECTRICAL DRAWINGS" -luvut sisältävät piirrettyjen mekaanisten osien ja sähköisten logiikkojen kuvat. "BILL OF MATERIALS" -luku on koottu sähköisten osien ohjekirjoista vikatilanteiden varalle.

Kuvat 27 ja 28 ovat ohjekirjasta otettuja kopioita. Kokonainen ohjekirja on 187-sivuinen, joten sitä ei ole liitetty insinööriyöhön.

## **ABOUT THE SLURRY MIXER**

The Slurry Mixer is designed specifically for chemical slurry mixing and testing new types of slurries. Design emphasis has focused on maximizing potential mixing results while incorporating versatility, reliability, and simplicity of operation.

### **MECHANICAL COMPONENTS**

The machine consists of two major mechanical components, all enclosed within the machine's cabinet and a protective user enclosure to provide a sturdy, safe and clean mixing process:

- Mechanical agitator is comprised of the motor unit, gearbox and mixing shaft assembly.
- Chemical pump unit is fitted at the bottom of the mixing chamber and is comprised of the pump motor and pump head.

### **ELECTRICAL DISTRIBUTION**

The Slurry Mixer's electrical distribution and control systems are designed to provide all necessary control functions for polish process optimization while maintaining the reliability and ease of use necessary for the production environment.

The focus of the control system is the two remote control units, an OMRON 3G3AX-OP01 and LEVITRONIX LUI-B, supplying maximum reliability and functionality.

The Slurry Mixer has also been fitted with cavitation protection system for semi-auto operation.

Kuva 27. Laitteen esittelysivu

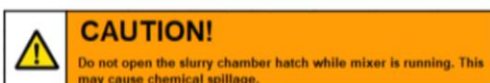
Esittelysivu on suunniteltu uuden käyttäjän avuksi hahmottamaan laitteen pääkomponentit ja niitä ohjaavat laitteet.

## GENERAL SAFETY INFORMATION

The Slurry Mixer has been designed for safe operation. However, caution should be exercised while operating this machine. Failure to adhere to the following safety instructions and to good safety practices may result in injury to personnel or damage to the machine.

It is the responsibility of the user to be sure that the machine is in safe operating condition at all times. The user is also responsible for insuring that the operators and maintenance personnel follow approved operating and maintenance procedures. The following is a list of safety instructions:

- **DO NOT** at any time put hands or objects inside the mixing chamber or near agitator mechanisms while the machine is in motion unless it is absolutely necessary.



- Keep all guards and covers in place and in good repair.
- Interlocks and other safety circuits or devices may not be overridden except by *trained maintenance personnel* using approved procedures. **Operators may not override interlocks or safety devices under any circumstances.**
- Keep all control and electrical cabinet doors closed and latched.
- Disconnect power and padlock the power disconnect switch when servicing or repairing the machine.



- Wear **SAFETY GLASSES** whenever working with mixing chamber or chemical pipes.
- Always consult with your supervisor if your task or procedure is unclear or you believe your assignment could result in unsafe conditions or equipment damage.

Kuva 28. Laitteen yleinen turvallisuusilmoitus

Ohjekirjan yleisessä turvallisuusilmoituksessa on otettu huomioon erityisesti sen huoltaminen ja käyttäminen.

## 7 Yhteenveto

Insinööriyössä suunniteltiin ja valmistettiin Murata Electronics Oy:n käyttöön valmis laite kiillotusnesteiden tutkimista varten. Laitteeseen suunniteltiin sekoituskammio, joka on ympäröity liikuteltavalla rungolla. Kammio valmistettiin emäksen ja hapon kestävästä polypropeenimuovista ja runko alumiiniprofiilista. Sekoitus toteutettiin mekaanisella sekoittimella ja kierrätyspumpulla.

Työssä myös selvitettiin sekoituksen teoriaa ja annettiin esimerkki sekoitusastian laskennasta. Laskennan tuloksena oli kuvitteelliselle kiillotusnesteelle 150 rpm mekaanisen moottorin alin mahdollinen kierrosnopeus, jolloin saavutettiin kiillotusnesteen täydellinen sekoittuminen noin minuutissa. Kierrätyspumpun nopeudeksi puolen tuuman putkelle laskettiin 7000 rpm.

Laitteen ohjaus toteutettiin osittain automaattiseksi. Käyttäjä voi hallita laitteen toimintaa kahdella käsiohjaimella, jolla hän voi vaihtaa pumpun ja mekaanisen sekoittimen nopeutta tarpeen mukaan. Ohjaukseen suunniteltiin kiertopumpun kuivakäynnin suojaus, eli nesteen pinnan laskiessa määrätyn rajan alle laite lopettaa toimintansa. Ohjaukseen lisättiin myös merkkivalomajakka, joka näyttää laitteen tilan sen käyttäjälle kauempaakin. Molemmat suunnitellut ohjaukset toteutettiin releohjauksella.

Insinööriyön viimeisenä osana kirjoitettiin ohjekirja käyttöä ja huoltoa varten. Ohjekirja sisältää yleisiä turvallisuusohjeita, ohjeita kuinka laite toimii, mekaniikka ja sähköpiirustuksia. Ohjekirjan viimeisenä liitteenä on laitteen kaikkien sähköisten osien ohjekirjat vikatilanteiden varalle.

Haluan kiittää insinööriyössäni avustaneita esimiehiäni ja työkollegoitani, sekä muita työssäni kannustaneita kollegoita. Suurimmat kiitokset haluan kuitenkin antaa opinnäytetyön ohjaajille Equip. Maint. Mgr. Juha Korpiälhölle ja yliopettaja Jyrki Kullaalle.

## Lähdeluettelo

1. Murata, Tsuneo. 2012. Murata Strengthens its On-board MEMS Sensor Business. Verkkoartikkeli. <<https://corporate.murata.com/en-global/about/newsroom/news/event/japan/2012/0517>>. 5.17.2012. Luettu 14.4.2020.
2. 3D MEMS. Verkkosivu. Murata Manufacturing Co., Ltd. <<https://www.murata.com/en-global/products/sensor/accel/techguide/3dmems>>. Luettu 14.4.2020.
3. Silicon Manufacturing | How to Grow a Single Crystal Silicon. 2019. Verkkosivu. Waferworld Inc.. <<https://www.waferworld.com/silicon-manufacturing-grow-single-crystal-silicon/>>. 25.3.2019. Luettu 14.4.2020.
4. Zhao, Dewen. Lu, Xinchun. 2013. Chemical mechanical polishing: Theory and experiment. Verkkoartikkeli. <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40544-013-0035-x>>. 1.3.2013. Luettu 14.9.2019.
5. Paul, Edward L. Atiemo-Obeng, Victor A. Kresta, Suzanne M. Handbook of Industrial Mixing Science and Practice. 2003. Yhdysvallat: John Wiley & Sons, Incorporated.
6. Couper, James R. Penney, W. Roy. Fair, James R. Walas, Stanley M. Chemical Process Equipment: Selection and Design. 2009. Yhdysvallat: Elsevier Science & Technology.
7. Ström, Hjalmar. Teknisiä taulukoita. 1978. Helsinki: Teknisten Jäsenpalvelu Oy.
8. Aluminum Structural Framing System 8.0. 2016. Verkkokatalogi. Bosch Rexroth AG. 2016. <[https://dc-us.resource.bosch.com/media/us/products\\_13/product\\_groups\\_1/assembly\\_technology\\_/pdfs/R999001283.pdf](https://dc-us.resource.bosch.com/media/us/products_13/product_groups_1/assembly_technology_/pdfs/R999001283.pdf)>. 3.2016. Luettu 15.1.2020.
9. Aluminium Alloy EN-AW 6063. Verkkoaineisto. Alumnico S.A. <[https://www.aluminco.com/media/155967/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6063\\_MATERIAL-DATA-SHEET\\_ALUMINCO.pdf](https://www.aluminco.com/media/155967/ALUMINIUM-ALLOY-EN-AW-6063_MATERIAL-DATA-SHEET_ALUMINCO.pdf)>. Luettu 15.1.2020
10. SOLIDWORKS Help – Analysis Solvers. 2020. Verkkosivu. Dassault Systèmes. <[http://help.solidworks.com/2020/english/SolidWorks/cworks/c\\_Analysis\\_Solvers.htm?verRedirect=1](http://help.solidworks.com/2020/english/SolidWorks/cworks/c_Analysis_Solvers.htm?verRedirect=1)>. Luettu 28.2.2020.
11. Drain, John. 2000. The Propeller. Verkkosivu. <<https://www.pt-boat.com/propeller/propeller.html>>. Luettu 30.2.2020.



12. Raghavan, Srimi. Keswani, Manish. Jia, Renhe. Particulate Science and Technology in the Engineering of Slurries for Chemical Mechanical Planarization. 2008. KONA Powder and Particle Journal No.26 s. 92-105: Hosokawa Powder Technology Foundation. Luettu 9.10.2019.
13. US 6,258,721 B1. 2001. United States Patent. Patentti. <<https://patents.google.com/patent/US6258721B1/en>>. 10.7.2001. Luettu 7.2.2020.
14. User Manual for BPS-200. 2017. Verkkomanuaali. Levitronix GmbH. <<https://www.levitronix.com/en/bps-200.html>>. 27.10.2017. Luettu 4.10.2019.