



Salla Niemonen

# Selvitys eroosikorroosiolaitteesta jatkuvatoimisilla sähkökemiallisilla mittauksilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

19.12.2022

# Tiivistelmä

Tekijä:	Salla Niemonen
Otsikko:	Selvitys eroosiokorroosiolaitteesta jatkuvatoimisilla sähkökemiallisilla mittauksilla
Sivumäärä:	41 sivua
Aika:	19.12.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine:	Kemiantekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Timo Laitinen Tiimipäällikkö Janne Pakarinen

---

Tässä insinööriyössä selvitettiin mahdollista eroosiokorroosiolaitetta työn toimeksiantaja Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n tarpeisiin. Laitteen kriittisimmät vaatimukset olivat jatkuvatoimisen sähkökemiallisen mittauksen mahdollisuus sekä laitteen sijoitus vetokaappiin rikkihapolla tehtäviä kokeita varten. Lisäksi laitteeseen haluttiin jäähdytys.

Työssä selvitettiin, minkälaisia eroosiokorroosiolaitteita muualla maailmalla tutkimuksissa käytetään ja voisiko malleja hyödyntää tulevan eroosiokorroosiolaitteen suunnittelussa. Työn aikana suunniteltiin myös oma eroosiokorroosiolaitte, joka otettiin mukaan vertailuun.

Työ oli kirjallisuuskatsaus aiheeseen. Alan kirjallisuuden lisäksi työssä hyödynnettiin VTT:n henkilökunnan ammattiosaamista. VTT:n henkilökunnan kanssa keskusteltiin mallien hyödyistä ja ongelmista sekä käytiin läpi omaa suunnitelmaa eroosiokorroosiolaitteesta. Työn johtopäätöksenä todettiin, ettei olemassa olevista laiteratkaisuista löytynyt suoraan VTT:n tarpeisiin soveltuvaa laitetta. Tämän johtopäätöksen pohjalta omaa suunnitelmaa eroosiokorroosiolaitteesta tullaan kehittämään. Nykyisessä laitesuunnitelmassa on otettu huomioon uudelta laitteelta vaaditut ominaisuudet, kuten pieni koko, jäähdytysvesikierto, käännettävät näytteet ja sähkökemialliset mittaukset.

Avainsanat: eroosiokorroosiolaitte, liete, korroosio, eroosiokorroosio, kuluminen, sähkökemiallinen mittaus

## Abstract

Author: Salla Niemonen  
Title: Study of Slurry Pot Apparatus with Continuing Electrochemical Measurements  
Number of Pages: 41 pages  
Date: 19 December 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Biotechnology and Chemical Engineering  
Professional Major: Chemical Engineering  
Supervisors: Timo Laitinen, Senior Lecturer  
Janne Pakarinen, Research Team Leader

---

The aim of this thesis project was to study a possible erosion-corrosion apparatus for VTT Technical Research Center of Finland Ltd. Two critical requirements had been identified for the new apparatus. First, the apparatus should allow for continuous electrochemical measurements. Second, the apparatus should be able to be placed inside a fume cupboard to allow tests to be done with sulphuric acid. Additionally, the design should allow for cooling of the apparatus.

The main purpose was to study different kinds of erosion-corrosion apparatuses used by the researchers around the world and to evaluate if some of the design choices could be incorporated in the design of the new apparatus. As a part of this thesis, a design for a new erosion-corrosion apparatus was drafted. This design was also included in the comparison between the types of apparatuses.

This thesis was a literature review. In addition to literature, interviews, and discussions with VTT personnel were used for this thesis. The advantages and disadvantages of different apparatus models were especially discussed with VTT personnel. The conclusion of this thesis was that no complete solution could be found from the literature that would meet the requirements of VTT. Therefore, the development of the new erosion-corrosion apparatus is to be continued. The requirements for the new erosion-corrosion apparatus, such as the size, cooling water cycle, rotatable samples, and electrochemical measurements, have been considered in the design draft prepared during this thesis project.

Keywords: slurry pot, slurry, corrosion, erosion corrosion, wear, electrochemical measurement

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähkökemiallinen	3
2.1	Sähkökemiallinen kenno	3
2.2	Kaksi- ja kolmielektrodinen kenno	4
2.3	Potentiostaatti ja potentiostaattiset mittaukset	5
2.4	Normaalipotentiali ja sähkökemiallinen jännitesarja	5
3	Korroosio ja kuluminen	8
3.1	Korroosio	8
3.2	Korroosion muodot	8
3.3	Eroosiokorroosio	10
3.4	Metallien korroosio	10
3.5	Kuluminen lieteolosuhteissa	12
4	VTT:llä käytössä oleva eroosiokorroosiolaitteisto	16
4.1	Osat ja materiaalit	17
4.2	Ongelmat	19
5	Uusi eroosiokorroosiolaitteisto	21
5.1	Uuden eroosiokorroosiolaitteiston vaatimukset	21
5.2	Erilaisia kulumis- ja korroosiolaitteistoja	21
5.3	Eroosiokorroosiotestilaitteistoja	23
5.3.1	Kirjallisuuden laitemallit ilman sähkökemiallisia mittauksia	24
5.3.2	Kirjallisuuden laitemallit sähkökemiallisin mittauksin	32
5.4	Ehdotus eroosiokorroosiotestilaitteistosta	36
6	Yhteenveto	40
	Lähteet	42

## Lyhenteet

ECN: *Electric current noise*. Sähkökemiallinen kohina.

PEEK: Polyeteerietteriketoni. Osakiteinen polymeeri.

PVC-U: *Unplasticized polyvinyl chloride*. Pehmittämätön polyvinyylikloridi.

SMV: Sähkömotorinen voima. Elektrodien välille syntyvä maksimijännite.

UHMWPE: *Ultra-high-molecular-weight polyethene*. Ultrasuurimolekyylinen polyeteeni.

# 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tehdä selvitys uudesta eroosiokorroosiotestilaitteesta (Slurry pot 2) Teknologian tutkimuslaitos VTT Oy:lle. Eroosiokorroosiolaitte (slurry pot) on laite, jolla tutkitaan metallinäytteiden korroosion ja kulumisen kestävyttä neste-kiinteäseoksessa eli lietteessä (slurry). Laitteessa on sekoitus, jonka avulla saadaan jatkuva rasitus näytekappaleille kiinteiden partikkelien pommittaessa näytteiden pintaa.

Korroosion ja kulumisen tutkiminen ja tunnistaminen on tärkeää, sillä niistä aiheutuneet laiteviat, tuotantolaitosten alasajot, onnettomuudet ym. aiheuttavat suuria taloudellisia kustannuksia [1, s. 6–7]. Korroosio muuttaa metallin ominaisuuksia, mikä heikentää metallin kestävyttä merkittävästi [2]. Kulumisesta ja korroosiosta aiheutuu muun muassa metallisen komponentin haurastuminen ja murtuminen. Kulumisen vaikuttaa metallin pintaan ja voi rikkoa metallia suojaavan oksidikerroksen, jolloin korroosio pääsee vaikuttamaan metallin ominaisuuksiin. [3.] Korroosion aiheuttamien kustannuksien maailmalla vuonna 2013 arvioitiin olevan 2,5 biljoonaa Yhdysvaltain dollaria. Se on 3,4 % vuoden 2013 maailman bruttokansantuotteesta. On arvioitu, että 15–35 % korroosion aiheuttamista kustannuksista voitaisiin estää käyttämällä korroosionestomenetelmiä. [4.]

Nykyinen VTT:llä käytettävä Slurry pot 1 -laite ei vastaa tutkimuksen tarpeita. Slurry pot 1 on suuri ja painava, joten sen käsittely on haastavaa sekä sen käyttö on työturvallisuuden kannalta riskialtista. Slurry pot 1 on kokonsa takia sijoitettu huoneeseen, jossa on puutteellinen ilmastointi, joten laitteella voidaan tehdä kokeita vain vesi-hiekkaseoksilla. Laitteen puutteellinen jäähdytys on tuonut omat haasteensa mittauksiin. Laitetta ympäröi suljettu vesiallas, mutta se ei riitä jäähdyttämään laitteen sisällä olevaa lietettä. Altaassa vesi lämpenee ja kerrostuu lämpötilan mukaan, jolloin veden jäähdyttävä vaikutus heikkenee.

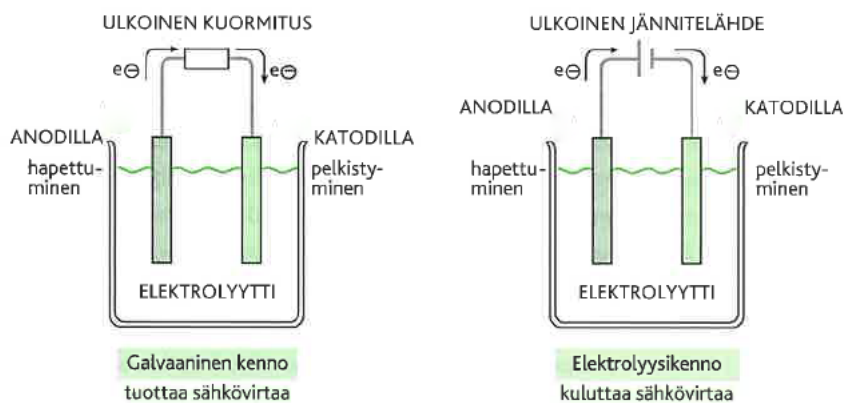
Tulevan Slurry pot 2 -laitteen tärkeimmät kriteerit ovat pieni koko, jatkuva sähkökemiallinen mittaus ja riittävä jäähdytys. Slurry pot 2:n on oltava tarpeeksi pieni, jotta se voidaan sijoittaa vetokaappiin. Siten voidaan tehdä mittauksia erilaisissa lieteolosuhteissa kuten rikkihapon ja hiekan seoksessa. Laitteen pienentyessä myös näytteiden koko ja kiinnitystapa näytetelineeseen on otettava huomioon. Näyttekoon on oltava pienempi kuin ennen, mutta tarpeeksi suuri, jotta tutkimuksista saadaan edelleen edustavaa tutkimustietoa teollisuuden sovelluksiin. Jatkuvatoimisiin sähkökemiallisiin mittauksiin elektrodien suojamateriaali on valittava tarkkaan, ja elektrodien kotelointia tulee pohtia, jotta ne kestävät vaativia lieteolosuhteita. Myös elektrodien johdotukset tulee miettiä tarkoin, jotta elektrodeja on helppo käsitellä.

Työssä selvitettiin Slurry pot 1:n hyvät ja huonot puolet sekä arvioitiin muualla maailmassa tutkimuksissa käytettyjä eroosiorroosiolaitemalleja. Näiden tietojen perusteella tehtiin alustava ehdotus tulevasta Slurry pot 2 -laitteesta. Suunnittelun apuna käytettiin kirjallisuutta ja VTT:n korroosio- ja sähkökemian yksikön henkilökunnan ammattiosaamista.

## 2 Sähkökemia

### 2.1 Sähkökemiallinen kenno

Sähkökemiallinen systeemi muodostaa suljetun virtapiirin. Sähkökemiallista systeemiä kutsutaan myös sähkökemialliseksi kennoksi. Sähkökemiallinen kenno koostuu elektrodeista, elektrolyyttiliuoksesta ja ulkoisesta virtapiiristä. Galvaaniset kennot ja elektrolyysikennot ovat sähkökemiallisten kennojen pääryhmät. Kuvassa 1 on esitetty galvaaninen kenno ja elektrolyysikenno. [5, s. 140–141.]



Kuva 1. Galvaanisen kennon ja elektrolyysikennon rakenteet [5, s. 148].

Yksinkertaisessa sähkökemiallisessa kennossa on kaksi elektrodia, jotka ovat usein metalleja. Elektrodiä kutsutaan katodiksi, jos sillä tapahtuu pelkistysreaktio, ja anodiksi, jos sillä tapahtuu hapetusreaktio. Elektrodien välille syntyy potentiaaliero eli jännite. Jännitteen suuruus riippuu elektrodien pinnalla tapahtuvista reaktioista ja siten myös vallitsevista olosuhteista, kuten lämpötilasta ja aineiden pitoisuuksista. Kennolla on lähdejännite eli sähkömotorinen voima (SMV), joka on elektrodien välille syntyvä maksimijännite. Maksimijännite syntyy, kun kenno on virrattomassa tilassa. [5, s. 148–149.]

Kennossa voi olla myös kolme elektrodia. Elektrodit jaotellaan työ- eli indikaattorielektrodiksi, vertailu- eli referenssielektrodiksi ja vastaelektrodiksi.



Käytännössä työelektrodi on usein tutkittava materiaali. Sähkökemiallisissa mittauksissa kennossa käytetään kahta tai kolmea elektrodia riippuen muun muassa mittaolosuhteista ja halutusta mittaustarkkuudesta. Kennossa käytetään kolmea elektrodia, kun halutaan tarkempi mittaustulos. [6, s. 46–48.]

## 2.2 Kaksi- ja kolmielektrodinen kenno

Kahden elektrodin kennossa käytetään työ- ja vastaelektrodeja. Kaksielektrodissa kennossa mitataan kennojännitettä ja kennon läpi kulkevaa virtaa, joiden avulla voidaan esimerkiksi seurata korroosion etenemistä. Kahden elektrodin mittaukset sopivat muun muassa kenttäkokeisiin, jolloin mittauksien tarkkuudesta joudutaan tinkimään. [6, s. 46–48.]

Kolmen elektrodin kennossa on työ-, vasta- ja referenssielektrodi. Tutkittavana elektrodina on työelektrodi. Kolmielektrodikennossa mitataan työelektrodin potentiaalia verrattuna referenssielektrodiin sekä työ- ja vastaelektrodien väliltä kennon läpi kulkevaa virtaa. Kolmielektrodikennossa vastaelektrodi on valmistettu usein reagoimattomasta materiaalista, esimerkiksi platinasta. Usein kennossa käytetään niin sanottua Luggin-kapillaaria ja suolasiltaa, jotta referenssielektrodi voidaan erottaa elektrolyyttiliuoksesta. Elektrolyyttiliuos saattaa tuhota referenssielektrodin, jos liuos on liian syövyttävää tai liuoksessa on vieraita ioneja. [6, s. 48.] Referenssielektrodi tai käytettävä Luggin-kapillaari tuodaan mahdollisimman lähelle työelektrodia, jotta jännitehäviö voidaan minimoida [7, s. 191–192].

Kolmen elektrodin kennolla saadaan tarkempia mittaustuloksia kuin kahden elektrodin kennolla, joten sitä käytetään useimmiten laboratorioissa. Kolmen elektrodin mittaustarkkuus perustuu referenssielektrodiin. Referenssielektrodin avulla voidaan mitata ja säätää tarkasti työelektrodin potentiaalia. [6, s. 48, 50.]

### 2.3 Potentiostaatti ja potentiostaattiset mittaukset

Potentiostaatti on laite, jota käytetään kemiallisen sähkökennon ulkoisena virtalähteenä. Potentiostaatti pitää työelektrodin potentiaalin haluttuna, kun kennon läpi kulkevaa virtaa mitataan ajan funktiona. Potentiostaattisissa mittauksissa käytetään kolmea elektrodia ja työelektrodi polarisoidaan potentiostaatilla. Mittauksilla voidaan tehdä materiaalien vertailuja, materiaalien testauksia ja tutkia reaktiokinetiikkaa ja reaktiomekanismeja. Potentiostaattiset mittaukset sopivat hyvin korroosionopeuden määrittämiseen. [6, s. 59, 68.]

### 2.4 Normaalipotentiaali ja sähkökemiallinen jännitesarja

Aineiden taipumusta luovuttaa ja vastaanottaa elektroni kuvataan normaalipotentiaalilla  $E^\circ$ . Vedyn reaktion  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$  normaalipotentiaaliksi on määritetty  $E^\circ=0,00\text{ V}$ . Muiden aineiden normaalipotentiaalia verrataan vedyn normaalipotentiaaliin. Aineilla on hapettunut ja pelkistynyt muoto, mitä kutsutaan hapettumis-pelkistymispariksi. Esimerkiksi sinkillä hapettumis-pelkistymispari on  $\text{Zn}^{2+}/\text{Zn}$ . Mitä suurempi parin normaalipotentiaali on, sitä helpommin parin hapettunut muoto pelkistyy. [5, s. 140, 142.]

Niin sanotun sähkökemiallisen jännitesarjan (kuva 2) avulla voidaan selvittää, onko hapettumis-pelkistymisreaktiot spontaaneja vai ei. Kokonaisreaktioon osallistuu anodireaktio ja katodireaktio. Näitä reaktioita kutsutaan erikseen puolireaktioiksi. Kokonaisreaktio on spontaani, jos puolireaktioiden normaalipotentiaaliarvojen erotus on suurempi kuin nolla. Erotus lasketaan aina vähentämällä katodisen parin normaalipotentiaalista anodisen parin normaalipotentiaali. Esimerkiksi sinkin ja magnesiumin osareaktiot  $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}$  ja  $\text{Mg} \rightleftharpoons \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$  muodostavat kokonaisreaktion  $\text{Zn}^{2+} + \text{Mg} \rightarrow \text{Zn} + \text{Mg}^{2+}$ . Tästä saadaan normaalipotentiaalien erotukseksi  $-0,76\text{ V} - (-2,37\text{ V}) = 1,61\text{ V}$ . Osareaktioiden normaalipotentiaaliarvojen erotuksen perusteella kokonaisreaktio on spontaani. [5, s. 142–145.]

Reaktio	Normaalipotentiali $E^{\circ}$ [V]
$\text{Li}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Li}$	-3,05
$\text{K}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{K}$	-2,93
$\text{Ca}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2,87
$\text{Na}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Na}$	-2,71
$\text{Mg}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2,37
$\text{Al}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1,66
$\text{Mn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mn}$	-1,18
$2 \text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightleftharpoons 2 \text{OH}^- + \text{H}_2$	-0,83
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0,76
$\text{Cr}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0,74
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0,44
$\text{Cd}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cd}$	-0,40
$\text{PbSO}_4 + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb} + \text{SO}_4^{2-}$	-0,35
$\text{Co}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Co}$	-0,28
$\text{Ni}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0,25
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0,14
$\text{Pb}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0,13
$2 \text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	-0,00
$\text{Sn}^{4+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Sn}^{2+}$	+0,15
$\text{Cu}^{2+} + e^- \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	+0,15
$\text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{H}_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	+0,20
$\text{AgCl} + e^- \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Cl}^-$	+0,22
$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2 \text{Hg} + 2 \text{Cl}^-$ (kyll. KCl)	+0,24
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0,34
$\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4e^- \rightleftharpoons 4 \text{OH}^-$	+0,40
$\text{Cu}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	+0,52
$\text{I}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2 \text{I}^-$	+0,53
$\text{Fe}^{3+} + e^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$	+0,77
$\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- \rightleftharpoons 2 \text{Hg}$	+0,79
$\text{Ag}^+ + e^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	+0,80
$\text{NO}_3^- + 4 \text{H}^+ + 3e^- \rightleftharpoons \text{NO} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+0,96
$\text{AuCl}_4^- + 3e^- \rightleftharpoons \text{Au} + 4 \text{Cl}^-$	+1,00
$\text{Br}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2 \text{Br}^-$	+1,07
$\text{O}_2 + 4 \text{H}^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{MnO}_2 + 4 \text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14 \text{H}^+ + 6e^- \rightleftharpoons 2 \text{Cr}^{3+} + 7 \text{H}_2\text{O}$	+1,23
$\text{Cl}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2 \text{Cl}^-$	+1,36
$\text{PbO}_2 + 4 \text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+} + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,46
$\text{ClO}_3^- + 6 \text{H}^+ + 5e^- \rightleftharpoons \frac{1}{2} \text{Cl}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$	+1,47
$\text{Au}^{3+} + 3e^- \rightleftharpoons \text{Au}$	+1,50
$\text{MnO}_4^- + 8 \text{H}^+ + 5e^- \rightleftharpoons \text{Mn}^{2+} + 4 \text{H}_2\text{O}$	+1,52
$\text{PbO}_2 + \text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons \text{PbSO}_4 + 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,68
$\text{H}_2\text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2e^- \rightleftharpoons 2 \text{H}_2\text{O}$	+1,77
$\text{Co}^{3+} + e^- \rightleftharpoons \text{Co}^{2+}$	+1,82
$\text{S}_2\text{O}_8^{2-} + 2e^- \rightleftharpoons 2 \text{SO}_4^{2-}$	+2,01
$\text{F}_2 + 2e^- \rightleftharpoons 2 \text{F}^-$	+2,87

Pelkistimen vahvuus kasvaa

Kuva 2. Sähkökemiallinen jännitesarja, joka on mitattu 25 °C:ssa normaalivety-elektrodiin nähden [5, s. 143].

Metalleille on oma jännitesarjansa, johon on merkitty metallit epäjaloimmasta jaloimpaan metalliin. Metallien jännitesarja on seuraava: Li, K, Ca, Na, Mg, Al, Mn, Zn, Cr, Fe, Cd, Co, Ni, Sn, Pb, H, Cu, Hg, Ag, Pd, Pt, Au. Litium (Li) on epäjaloin ja kulta (Au) on jaloin. Metallien jännitesarjan pareille reaktiot ovat  $M^{z+} + ze^{-} \rightleftharpoons M$  ja  $2H^{+} + 2e^{-} \rightleftharpoons H_2$ , joissa M tarkoittaa metallia ja z kokonaislukua. Epäjalommat metallit pyrkivät hapettumaan yhdisteiksi, kun taas jalot metallit voivat esiintyä metallimuodossa. Epäjalon ja jalon metallin ollessa kosketuksessa toistensa kanssa epäjalomman metallin ionit pelkistävät jalomman metallin ionit metallimuotoon. [5, s. 146.]

## 3 Korroosio ja kuluminen

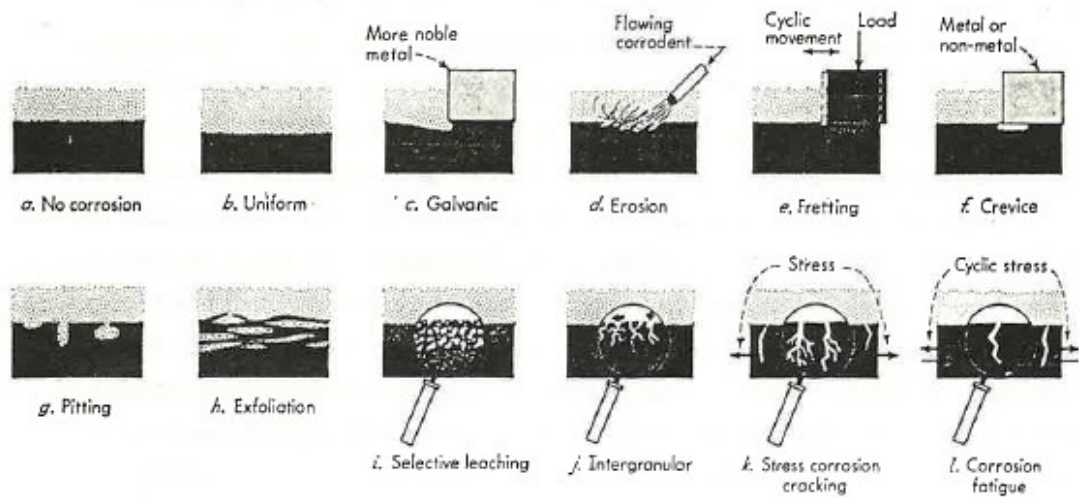
### 3.1 Korroosio

Korroosiossa materiaali reagoi ympäristönsä kanssa tai materiaalin eri osat reagoivat keskenään, minkä seurauksena materiaali alkaa tuhoutua [6, s. 1]. Korroosio syntyy joko sähkökemiallisesti, kemiallisesti tai niiden yhteisvaikutuksesta. Sitä voi esiintyä metalleissa, polymeereissä ja keraamissa, mutta metallit ovat näistä alttiimpia korroosion vaikutuksille. [8, s. 1, 4.]

Otollinen ympäristö korroosiolle voi olla kaasufaasi tai elektrolyyttiliuos eli liuos, jossa on ioneja. Joissain erikoisissa tapauksissa korroosiota voi ilmetä kiinteiden kappaleiden reaktioissa. Tavallisesti korroosiota tapahtuu veden läsnä ollessa, mutta sitä voi tapahtua myös vedettömissä olosuhteissa. [8, s. 4.] Korkeat lämpötilat ja paineet usein kiihdyttävät korroosiota, jolloin korroosioauriot ovat suuremmat. Lisäksi epäorgaaniset yhdisteet korrodoivat enemmän kuin orgaaniset yhdisteet. Korroosio voi tapahtua nopeasti, jopa tunneissa, tai hitaasti vuosien kuluessa. [1, s. 4–5.]

### 3.2 Korroosimuodot

Korroosio voidaan jakaa karkeasti eri tavoin riippuen korroosioympäristöstä tai korroosion esiintymistavan mukaan. Yleisimpiä jakoja ovat muun muassa matalan ja korkean lämpötilan korroosio, märkä- ja kuivakorroosio sekä paikallinen ja yleinen korroosio. Korroosimuotoja on useita, eikä kaikkien syntymekanismia tunneta tarkasti. Korroosimuotoja ovat muun muassa eroosiokorroosio, galvaninen korroosio, rakokorroosio, raerajakorroosio, valikoiva liukeneminen, jännityskorroosiomurtuma, pistekorroosio, kitkakorroosio, hilseily ja korroosioväsyminen. [6, s. 26, 33; 9, s. 9.] Kuvassa 3 on esitetty yleisiä korroosimuotoja.



Kuva 3. Korroosionmuotoja. a) ei korroosiota, b) yleinen korroosio, c) galvaaninen korroosio, d) eroosiokorroosio, e) kitkakorroosio, f) rakokorroosio, g) piste-korroosio, h) hilseily, i) valikoiva liukeneminen, j) raerajakorroosio, k) jännityskorroosio, l) korroosioväsyminen. [6, s. 27.]

Matalissa lämpötiloissa tapahtuu usein märkäkorroosiota ja korkeissa lämpötiloissa kuivakorroosiota, joten korroosion jaottelu näiden korroosiotyyppien kesken on lähes samanlainen. Esimerkiksi öljyteollisuudessa käytetään korkeita lämpötiloja, jolloin laitteissa ja putkistoissa tapahtuu kuivakorroosiota. [1 s. 7,9.] Kuitenkin joissakin olosuhteissa voi esiintyä poikkeuksia. Korkeissa lämpötiloissa voi esiintyä märkäkorroosiota, jos olosuhteet ovat oikeat, eli lämpötila ja paine ovat korkeat. Korkeassa lämpötilassa ( $T=374\text{ °C}$ ) ja paineessa (22,1 MPa) kehittyy esimerkiksi ylikriittistä vettä, joka aiheuttaa märkäkorroosiota. [10.]

Yleinen korroosio on maltillisempi kuin paikallinen korroosio ja siinä reaktiot tapahtuvat tasaisesti materiaalin pinnalla. Yleinen korroosio tapahtuu yleisesti suojaamattomilla metallipinnoilla ilmasto-olosuhteissa. Materiaalin pinta on jakautunut anodi- ja katodialueisiin, jotka vaihtelevat jatkuvasti paikkojaan. Tästä johtuen korroosio näyttää tasaiselta, vaikka ei sitä ole mikroskooppisesti tarkasteltuna. Yleisestä korroosiosta on helppo tutkia muun muassa todennäköisyyttä korroosion esiintymiselle ja mitata korroosionopeutta. Yleisestä korroosiosta saadaan selville metallin liukenemisnopeus yksinkertaisilla

painohäviömittauksilla. Paikallinen korroosio on ongelmallisempi kuin yleinen korroosio, sillä se keskittyy pienelle alueelle aiheuttaen usein odottamattomia vaurioita. [6, s. 26–28.]

### 3.3 Eroosiokorroosio

Eroosiokorroosio tapahtuu virtaavan liuoksen läsnä ollessa. Virtaus aiheuttaa mekaanista kulumista, joka yhdessä kemiallisen tai sähkökemiallisen syöpymisen kanssa aiheuttaa eroosiokorroosiota. Eroosiokorroosion esiintyvyyteen ja voimakkuuteen vaikuttaa muun muassa mekaaninen kuormitus, korroosioreaktiot, oksidikerroksen ominaisuudet ja materiaalin ominaisuudet. Mekaanista kuormitusta lisäävät esimerkiksi liuoksen kaasukuplat ja mahdolliset kiinteät partikkelit, liuoksen virtausnopeus, ja vesipisaroiden ja korroosiotuotteiden iskut. [6, s. 38–39.]

Aromaan mukaan eroosiokorroosion yhteydessä puhutaan usein myös kavitaatiosta. Kavitaatio on höyrykuplien luhistumista. Kavitaatiosta syntyy vaurioita, kun höyrykuplan luhistumisesta syntyy riittävän suuri mekaaninen voima, joka murtaa metallia suojaavan kalvon. Metallin pinnalle syntyy vaurioita myös silloin, kun mekaaninen voima on suurempi kuin suojakalvon sidosvoima metallin pinnalla. [6, s. 39.]

### 3.4 Metallien korroosio

Useat teollisuudessa käytettävät metallit eivät ole stabiileja normaaleissa ympäristöolosuhteissa, vaan ne pyrkivät hapettumaan ja siten muodostamaan yhdisteen hapen kanssa, jolloin tuloksena on oksidi. Metalleilla on myös taipumus muodostaa hydroksideja ja muita suoloja. Metallien muuttuminen yhdisteiksi on usein hyvin hidas prosessi. [9, s. 1.] Metallien korroosio voi tapahtua sähkökemiallisten reaktioiden kautta tai kemiallisesti. Toisinaan molemmat korroosioilmiöt voivat vaikuttaa yhdessä. [11, s. 201.]

Vesiliuoksessa metallien korroosio on sähkökemiallinen prosessi, jossa metallin ja nesteen kesken tapahtuu varauksen siirtoa. Tällöin materiaalin ominaisuudet heikkenevät. [6, s. 3.] Metallisessa muodossa oleva metalli on varaukseltaan neutraali, mutta yhdisteissä metalli on positiivisesti varautuneena [9, s. 1]. Metallin ikään kuin liikenee positiivisina varauksina eli kationeina, jolloin elektronit kulkeutuvat sinne missä katodinen reaktio tapahtuu. Sähkökemialliset reaktiot tapahtuvat materiaalin pinnalla olevilla anodi- ja katodialueilla. Anodialueella tapahtuu hapetusreaktioita ja katodialueella pelkistysreaktioita. Elektrolyyttiliuoksessa tapahtuvaa korroosiota voidaan mitata sähkökemiallisilla mittauksilla. [6, s. 3.]

Metallin pinnalle muodostuu toisinaan tiivis kerros, usein kalvo, liukenematonta tai hyvin hitaasti liukenevaa yhdistettä [9, s. 7]. Tällaisen kalvon muodostumista sanotaan metallin passivoitumiseksi. Usein metallin pinnalle kalvon muodostaa metallin ja hapen yhdisteet, oksidit. Oksidikerros muodostuu metallin pinnan atomien ja hapen välille. Suojaava oksidikerros voi kuluja mekaanisen rasituksen myötä, mutta pystyy uusiutumaan alla olevan metallin reagoidessa uudelleen. Tietyissä olosuhteissa oksidikerros ei pysty uusiutumaan, jolloin tapahtuu korroosiota. [3, s. 9.] Myös kloridi-ionien läsnäolo liuoksessa voi estää passivoitumisen kokonaan tai metallipintaan voi muodostua paikallisia syöpymiä [9, s. 7]. Muun muassa ruostumattomien terästen korroosionkestävyys perustuu pinnalle muodostuneeseen oksidikerrokseen [3, s. 9].

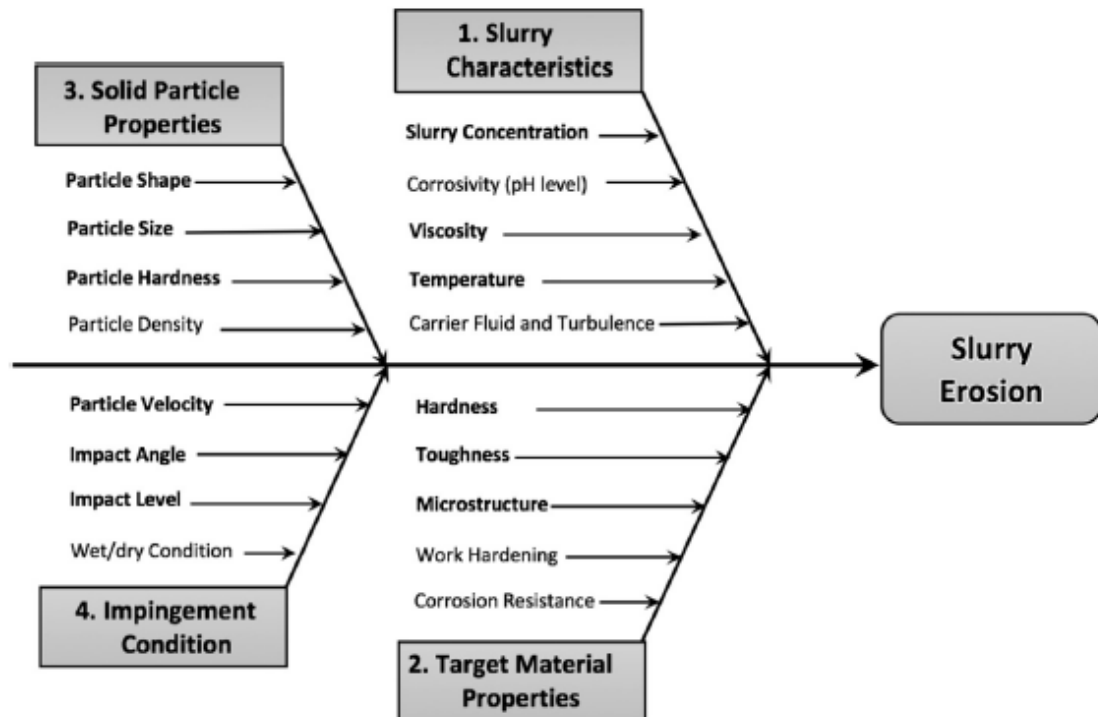
Metallien ja metalliseosten passivoituminen määritellään standardissa SFS-EN ISO 8044. Määritelmän mukaan passivoituminen on korroosionopeuden pienemistä, joka aiheutuu passiivikerroksesta. Standardissa määritellään myös passiivikerros. Se on metallin pinnalla oleva ohut ja kiinnipysyvä suojaava kerros, joka muodostuu ympäristön ja metallin reagoidessa keskenään. [11, s. 210.]



### 3.5 Kuluminen lieteolosuhteissa

Yleisesti kuluminen aiheutuu kappaleen pinnalle tapahtuvasta jatkuvasta mekaanisesta rasituksesta. Kulumisen voi tapahtua usealla eri tavalla, kuten abraasiivisesti, adhesiivisesti, pisaroiden aiheuttamana tai toistuvien iskujen avulla. [12, s. 5–6.] Kulumista voidaan estää lähtökohtaisesti oikeilla materiaalivalinnoilla tai materiaalien pinnoituksilla, kunhan kulumisen tyyppi on tiedossa, sillä eri kulumismekanismit vaativat toisinaan erilaisia ratkaisuja. Materiaalien muokkaaminen ja käsittely eri tavoin on hyödyllinen keino vaikuttaa kulumiseen. [12, s. 175.]

Eroosiokorroosiolaitteessa simuloidaan kulumista lieteolosuhteissa, jolloin kulumisen aiheutuu kiinteiden partikkelien törmätessä näytteen pintaan. Jotta partikkelit vaurioittaisivat näytteen pintaa, niiden nopeuden tulee olla riittävän suuri. Lisäksi näytteiden kulma suhteessa sekoittimen lapoihin vaikuttaa näytepinnan kulumiseen. Partikkelien törmäysnopeuteen vaikuttavat lietteen sekoitusnopeus ja näytteiden etäisyys sekoittimen lavoista. [13.] Kulumiseen vaikuttavat lisäksi lietteessä olevien partikkelien koko ja kiinteän aineen konsentraatio nesteessä [14]. Kuvassa 4 on esitelty tarkemmin, mitkä asiat vaikuttavat lieteolosuhteissa tapahtuvaan kulumiseen.

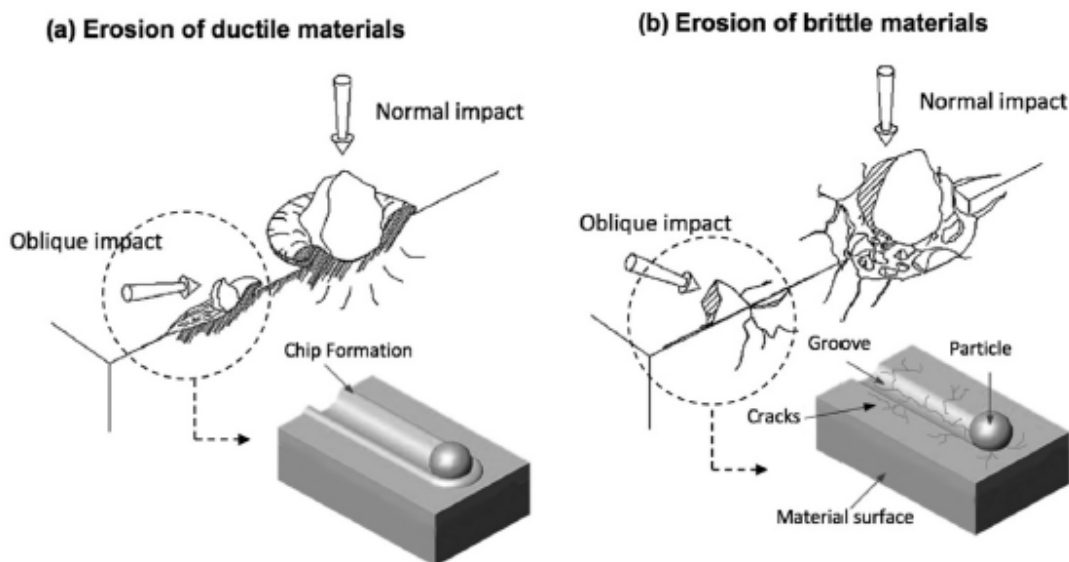


Kuva 4. Lieteolosuhteissa kulumiseen vaikuttavat tekijät [13].

Kuvan 4 mukaan kulumisen lieteolosuhteissa koostuu lietteen, kohdemateriaalin ja kiinteiden partikkeleiden ominaisuuksista sekä tapahtuvien iskujen luonteesta. Lietteen ominaisuuksissa vaikuttavat lietteen konsentraatio, syövyttävyys, viskositeetti, lämpötila, lietteen nesteen ominaisuudet ja turbulenssi lietteessä. Kohdemateriaalin kulumiseen vaikuttavat kovuus, sitkeys, mikrorakenne, työstölujittuminen ja korroosionkestävyys. Partikkelien muoto, koko, kovuus ja tiheys ovat partikkelien ominaisuuksia, jotka vaikuttavat näytteen kulumiseen. Näiden lisäksi kulumiseen vaikuttavat partikkelien nopeudet, iskukulma, iskujen määrä sekä se, tapahtuvatko iskut kuivissa vai märissä olosuhteissa.

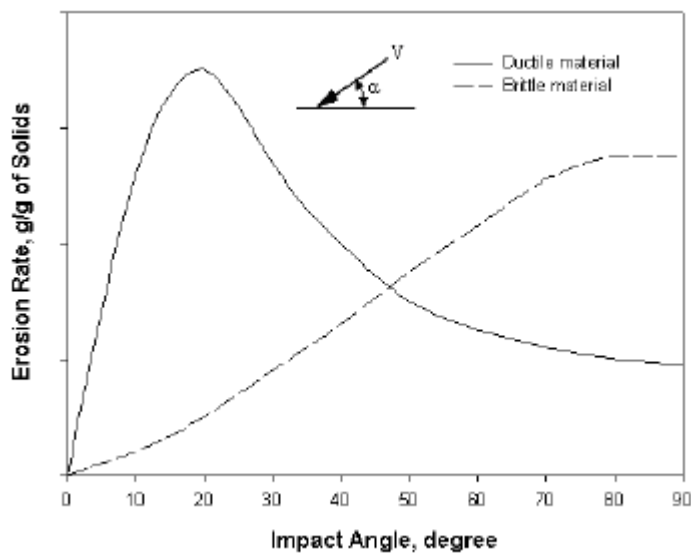
Kuvassa 5 on esitetty materiaalin pinnalle iskeytyneen partikkelin aiheuttama kulumisjälki Javaherin ym. [13] mukaan. Kulumisjälki riippuu materiaalin ja partikkelien ominaisuuksista. Plastisen metallin pinnalla partikkelin isku ikään kuin syrjäyttää materiaalia jättäen jälkeensä eräänlaisen kraatterin. Hauraan metallin pinnalla isku aiheuttaa metallin pinnan murtumisen. [13.] Kun hauraan metallin pintaan tulee isku, siitä irtoaa iskun seurauksena materiaalia. Plastisen metallin

pinta haurastuu iskusta, ja myöhemmin iskun aiheuttaman jännityksen takia pinnasta irtoaa paloja. [15.] Kuvassa on myös esitetty, miten suora isku ja viistosti tuleva isku vaikuttavat pinnan vaurioitumiseen.



Kuva 5. Epäsuoran ja suoran iskun aiheuttama kulumisjälki a) muovattavan ja b) hauraan materiaalin pinnalle [13].

Nandren ja Desalen [16] tutkimuksen mukaan muovattaville ja hauraille materiaaleille partikkelien iskukulma vaikuttaa kulumisnopeuteen eri tavalla. Muovattaville materiaaleille suurin kulumisnopeus on yleensä silloin, kun iskukulma on noin  $20\text{--}30^\circ$ . Hauraille materiaaleille vastaava kulma on noin  $90^\circ$ . [16.] Kuvassa 6 on esitelty Nandren ja Desalen yleinen tutkimustulos kulman vaikutuksesta kulumisnopeuteen muovattaville ja hauraille materiaaleille.

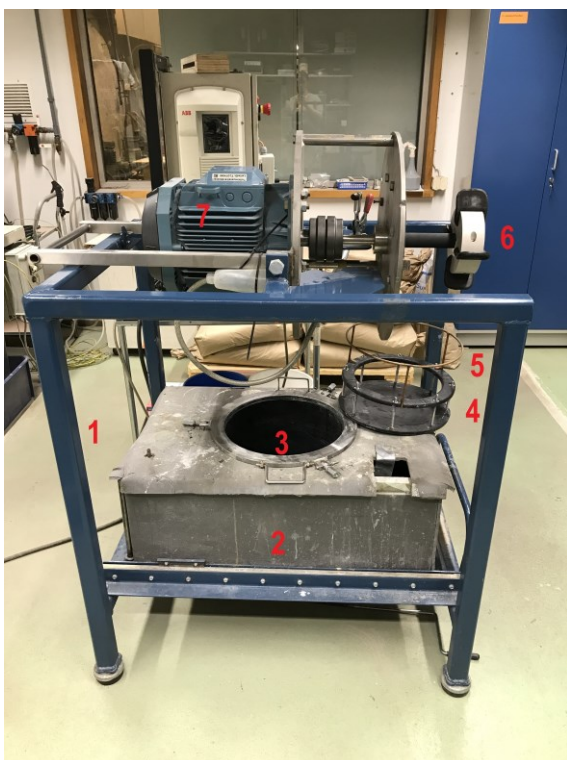


Kuva 6. Kulumisnopeuden ja iskukulman vaihtelu hauraalle ja muovattavalle materiaalille [16].

Nandren ja Desalen mukaan riippuen muovattavan materiaalin ominaisuuksista kulumisnopeuden ja iskukulman suhde voi poiketa hieman kuvassa 6 esitetystä suhteesta. Joillakin plastisilla materiaaleilla tulee kulumisnopeuteen toinenkin maksimi. Joillakin taas kulumisnopeus laskee huomattavasti loivemmin isoimmilla asteilla kuin kuvassa 6. [16.]

#### 4 VTT:llä käytössä oleva eroosiokorroosiolaite

Nykyinen eroosiokorroosiolaite (Slurry pot 1) on rakennettu vuonna 2009 vesihiekkaseoksilla tehtäviin eroosiokorroosiokokeisiin. Slurry pot 1 on toiminut hyvin sille tarkoitetuissa kokeissa, mutta siihen liittyy myös ongelmia, joita käydään läpi tarkemmin kappaleessa 4.2. Slurry pot 1:llä tehdyt ajot ovat kestäneet noin 5 tuntia, jotta ajot on voitu suorittaa työpäivän aikana. Laite on esitelty kuvassa 7.



Kuva 7. VTT:llä nykyisin käytössä oleva Slurry pot 1 -laite kokonaisuudessaan.

Kuvassa 7 näkyy sininen tukikehikko (1). Tukikehikon alaosan päällä on jäähdytysvesiallas (2), jonka keskellä on niin kutsuttu pesä (3). Näyteteline (4) näkyy kuvassa 7 vesialtaan päällä. Näyteteline lasketaan pesään ja varmistetaan metallituella (5). Tukikehikon yläosassa on sekoitin (6) ja sekoittimen moottori (7), jotka käännetään valmisteluiden jälkeen kohti pesää, minkä jälkeen pesän kansi suljetaan.

#### 4.1 Osat ja materiaalit

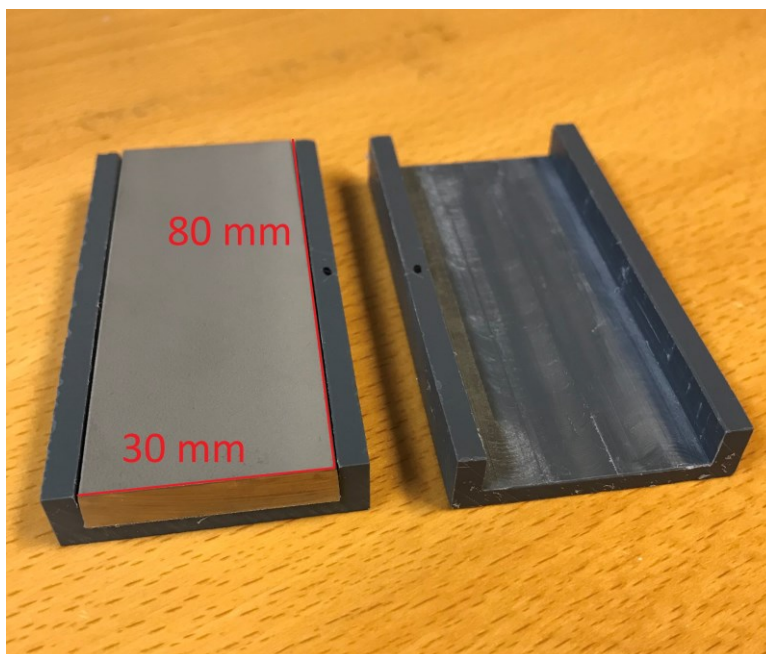
Laitteen pesä ja vesiallas on rakennettu ruostumattomasta teräksestä. Tyhjän pesän tilavuus on noin 24 litraa. Pesän halkaisija on 35 cm ja syvyys 24,5 cm. Pesä on pinnoitettu noin 4 mm paksuisella kumilla, jotta itse pesään ei muodostuisi korroosiota. Vesialtaan pituus on 80 cm, leveys on 50 cm, korkeus on 30 cm ja tilavuus on noin 120 litraa. Vesialtaan ja pesän saa vedettyä alustalta ulos, jotta pesän ja vesialtaan käsittely olisi helpompaa.

Pesään laitetaan näyteteline, johon on mahdollista kiinnittää kahdeksan näyttettä. Näyteteline on päällystetty kumilla, kuten kuvasta 8 voi havaita. Näyteteline on kiinnitetty pesän pohjalle metallituella, joka varmistaa, ettei näyteteline pääse liikkumaan pesässä. Näytetelineen yläosan ulkohalkaisija on 34 cm ja sisähalkaisija 26 cm.



Kuva 8. Vasemmalla puolella on Slurry pot 1:n näyteteline ja oikealla puolella laitteen näyteteline on kiinnitetty laitteen pesään metallituella.

Pinnoittamattomat näytteet kiinnitetään näytetelineen alaosan ja yläkehän väliin. Näytteitä voidaan asettaa pystysuunnassa eri kulmiin näytetelineeseen. Näyte-kappaleiden pituus on 80 mm ja leveys 40 mm. Näytteiden paksuus on hieman vaihdellut riippuen asiakkaiden lähettämistä näytepaloista. Pinnoitetut näytteen laitetaan näytealustoihin, jotta vain pinnoitettua aluetta saadaan kulutettua. Pinnoitettujen näytekappaleiden pituus on 80 mm ja leveys 30 mm. Osa näytteiden alustoista on tehty kovasta polyvinyylidikloridimuovista eli PVC-U-muovista ja osa PEEK-muovista (polyeetterieetteriketoni). Näyte ja näytealusta on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Nykyisessä Slurry pot 1:ssä käytetty pinnoitettu näytekappale ja näytealusta.

Laitteessa on sekoittaja (kuva 10), joka pyörittää lietettä kokeen aikana. Sekoittajan kumilla pinnoitetut lavat voidaan irrottaa sekoittajan keskiosasta, jotta ne voidaan pinnoittaa tarvittaessa uudestaan. Sekoittajan keskiosia on useampi kappale ja ne on valmistettu PVC-U- tai PEEK-muovista. Lavat on valmistettu ruostumattomasta teräksestä ja niitä on hieman käyristetty, jotta sekoitusprofiili

saadaan sopivaksi ja liete leviää pesässä paremmin näytteiden pinnoille. Sekoittajan moottorin teho on 3 kW:n taajuudella 50 Hz. Kokeissa laitteella on käytetty kierrosnopeutena 400–500 kierrosta/min.



Kuva 10. Nykyisen Slurry pot 1:n sekoittaja ja sekoittajan lavat.

Laitetta tukee metallinen hitsattu kehikko, jossa on ulosvedettävä taso vesialtaalle. Kehikon jaloissa on kumitassut lattiaa vasten, minkä tarkoituksena on vaimentaa laitteen tärinää. Kehikko on 110 cm korkea, 80 cm leveä ja 100 cm pitkä.

## 4.2 Ongelmat

Työturvallisuuden kannalta laite on haastava. Laite on liian suuri vetokaappiin ja raskas käyttää. Pesä, jossa on lietettä, on painava ja haastava käsitellä



tyhjennyksen yhteydessä. Tällöin tulee ongelmia työturvallisuuden kannalta varsinkin, jos pesässä on muuta nestettä lietteessä kuin vettä. Pesä on myös vaikea saada tyhjäksi ja puhdistaa johtuen nesteen seassa olevista kiinteistä partikkeleista. Tällä hetkellä työturvallisuuden ja puutteellisen ilmastoinnin takia laitetta ei saa käyttää muissa kokeissa kuin vesi-hiekkaseoksella tehtävissä kokeissa.

Slurry pot 1 on myös hyvin äänekäs johtuen laitteen tärinästä. Tämä johtuu ainakin osittain sekoittimen akselin laakereiden hiertymisestä ja kulumisesta. Laakerien kulumisen saa aikaan sen, että akseli pyörii epäkeskisesti, mikä aiheuttaa tärinää. Akselin laakerointia voitaisiin parantaa paremmalla suunnittelulla.

Laitteessa oleva vesiallas ei jäähdytä pesän lietettä tarpeeksi. Tämä johtuu siitä, ettei vesialtaassa ole vesikiertoa tai sekoitusta, vaan vesi seisoo altaassa. Alussa altaaseen laitettu kylmä jäähdytysvesi varastoi itseensä pesän tuottamaa lämpöä, jolloin altaassa olevan jäähdytysveden lämpötila nousee. Lisäksi altaassa seisova vesi kerrostuu siten, että lämmin vesi on ylhäällä ja kylmä vesi alhaalla. Jäähdytyksen toimimattomuuteen vaikuttaa myös pesän ja näytetelineen kumipinnoitteet. Siinä missä kumi suojaa osia kulumiselta, se estää tehokkaan lämmönsiirron. Varsinkin näytetelineen pohja on ongelmallinen. Telineen pohja on tehty metallilevystä ja se on pinnoitettu ylä- ja alapuolelta kumilla, joka on noin 4 mm:n paksuinen.

## 5 Uusi eroosiokorroosiolaite

### 5.1 Uuden eroosiokorroosiolaitteen vaatimukset

Merkittävimmät ominaisuudet, joita Slurry pot 2:een tarvitaan, ovat haponkestävyys, kulumisenkestävyys, jatkuvatoimisten sähkökemiallisten mittausten mahdollisuus, jäähdytys ja pieni koko. Laitteen on mahduttava vetokaappiin, jonka syvyys on 60 cm, leveys 120 cm ja korkeus 120 cm. Haasteena on vetokaapin syvyys, sillä se vaikuttaa laitteen halkaisijaan ja sitä kautta näytteiden kokoon ja määrään. Pesän tyhjennyksen pitäisi olla turvallista käyttäjälle ja liete tulisi saada ulos helposti.

Näytteiden lukumääräksi halutaan vähintään 8. Jotta näytteitä voitaisiin käyttää muissakin kokeissa, näytteiden koot halutaan yhtenäistää. Pituudeksi halutaan 50 mm, leveydeksi 25 mm ja paksuudeksi 5 mm. Näytteiden kulmaa sekoittimen lapojen suhteen on oltava mahdollista muuttaa, koska kuluminen ja korrosio on erilaista eri kulmissa. Näytteitä on voitava kääntää minimissään 30°:n välein, mutta mielellään 15°:n välein.

Elektrodien kohdalla on otettava huomioon niiden suojaus. Elektrodeille voidaan asettaa pieni muovisuojaus tai vastaava. Lisäksi elektrodien johtojen läpiviennit tulee suunnitella siten, että elektrodit on helppo asettaa ja poistaa. Johdot Slurry potin ulkopuolella on oltava järjestyksessä ja merkittyinä elektrodien mukaan, jotta ne eivät aiheuta ongelmia.

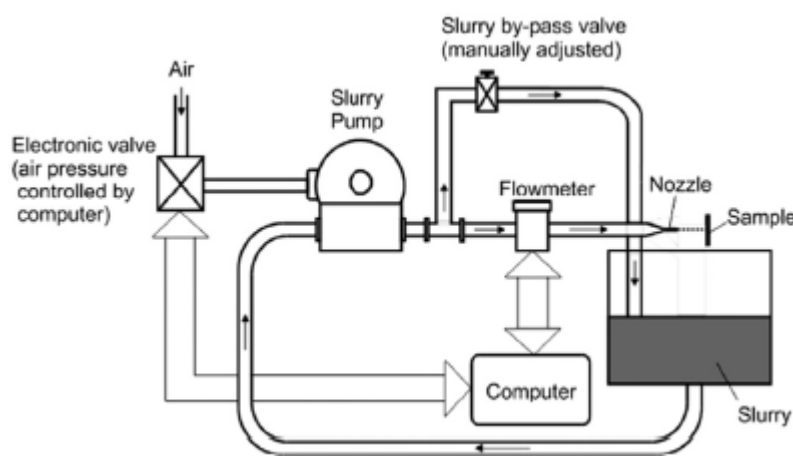
### 5.2 Erilaisia kulumis- ja korroosiolaitteita

Kirjallisuudessa kuvatuissa tutkimuksissa käytettyjä kulumiseen ja korroosioon tarkoitettuja testilaitteita on päätyypiltään kolmea tai neljää erilaista riippuen jaottelusta. Alla on lista testilaitteiden päätyypeistä:

- lietesuihkulaite (slurry jet apparatus)
- eroosiokorroosiolaite (slurry pot apparatus)

- suurinopeuksinen eroosiorroosiolaite (high energy slurry pot apparatus)
- Coriolis-voimakulumislaite (coriolis apparatus).

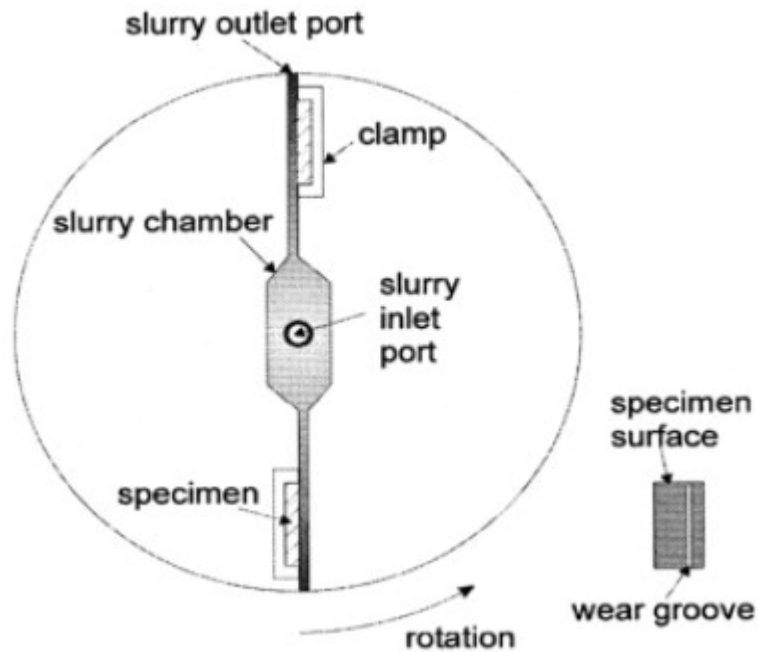
Käytetyin testilaitte on lietesuihkulaite (slurry jet apparatus), jolla suihkutetaan lietettä suoraan näytteen pinnalle. [17.] Kuvassa 11 on esitetty eräs lietesuihkulaite. Kuvan laitteessa lietettä pumpataan lietealtaasta lietteen pumppaamiseen tarkoitetulla pumpulla ja suihkutetaan näytteen pinnalle. Suihkutettu liete palaa lietesäiliöön, josta se saadaan uudelleen käyttöön.



Kuva 11. Lietesuihkulaite, jossa lietteen kierrätys on mahdollista [13].

Seuraavaksi suosituin on eroosiorroosiolaite, jolle on erilaisia muunnoksia [17]. Toisinaan eroosiorroosiolaiteesta ja suurinopeuksisesta eroosiorroosiolaitteesta puhutaan samassa yhteydessä, eikä niitä eroteta toisistaan. Eroosiorroosio laitteissa sekoitus tulee sekoittimesta, sekoittimesta ja näytteistä tai vain näytteistä eli näyteteline pyörii laitteen sisällä. Eroosiorroosiolaitteita esitellään tarkemmin luvussa 5.3.

Harvemmin käytetään laitetta, joka perustuu coriolis-voimaan (kuva 12). Tällaisessa laitteessa näytteet pyörivät akselin päissä ja liete johdetaan keskeltä akselissa olevaa putkea pitkin laitteen reunoille näytteiden luo.



Kuva 12. Coriolis-voimaan perustuva kulumistestilaitte [18].

Tässä työssä ei perehdytä enempää lietesuihkulaitteeseen tai coriolis-voimaan perustuvaan kulumistestilaitteeseen, sillä ne eivät sovellu jatkuvatoimisiin sähkökemiallisiin mittauksiin. Kyseisissä testilaitteissa elektrodit eivät saisi tarvittavaa jatkuvaa nestekontaktia eikä lietteen konsentraatio pysyisi vakiona.

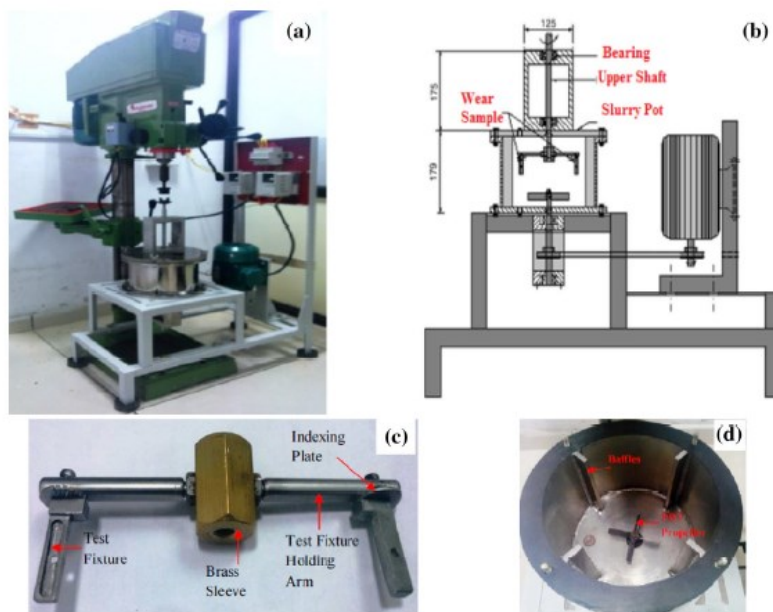
### 5.3 Eroosiokorroosiotestilaitteita

Erlaisia eroosiokorroosiotestilaitteita on lukuisia, mutta niiden perustoimintaperiaate on sama. Niiden toiminta perustuu lietteen sekoittamiseen laitteen pesässä, jotta kiinteät partikkelit iskeytyvät näytteiden pinnalle. Lisäksi lietteessä oleva neste aiheuttaa mahdollisen korroosion näytteiden pinnalle. Eroosiokorroosiotestilaitemallit on nimetty tässä työssä malli 1, malli 2 ja niin edelleen.

### 5.3.1 Kirjallisuuden laitemallit ilman sähkökemiallisia mittauksia

#### Malli 1

Kuvassa 13 on esitelty malli 1. Mallissa 1 käytetään kahta näytettä kerrallaan. Näytteet ovat sauvamaisia (30 mm x 5 mm x 2 mm) ja ne kiinnitetään näyte-  
muotteihin, jotka on kiinnitetty messinkiseen holkkiin (kuva 13, kohta b). Näytteiden kulma voidaan asettaa 0°:n ja 90°:n välille 15°:n välein. Näytedikey kokonaisuu-  
dessaan kiinnitetään ylhäällä olevaan akseliin, joka on kiinnitetty ikään kuin porakoneeseen, jota pyörittää moottori. Laitteen toinen moottori on kiinnitetty laitteen pesän pohjalla olevaan sekoittimeen. Laitteen pesä on tilavuudeltaan noin 7 litraa. Pesän reunoilla on neljä virtauksenestolevyä, jotta sekoituksesta aiheutunut lietteen pyörteily saadaan estettyä. Laitteessa käytetty materiaali on SS 304. [19.]



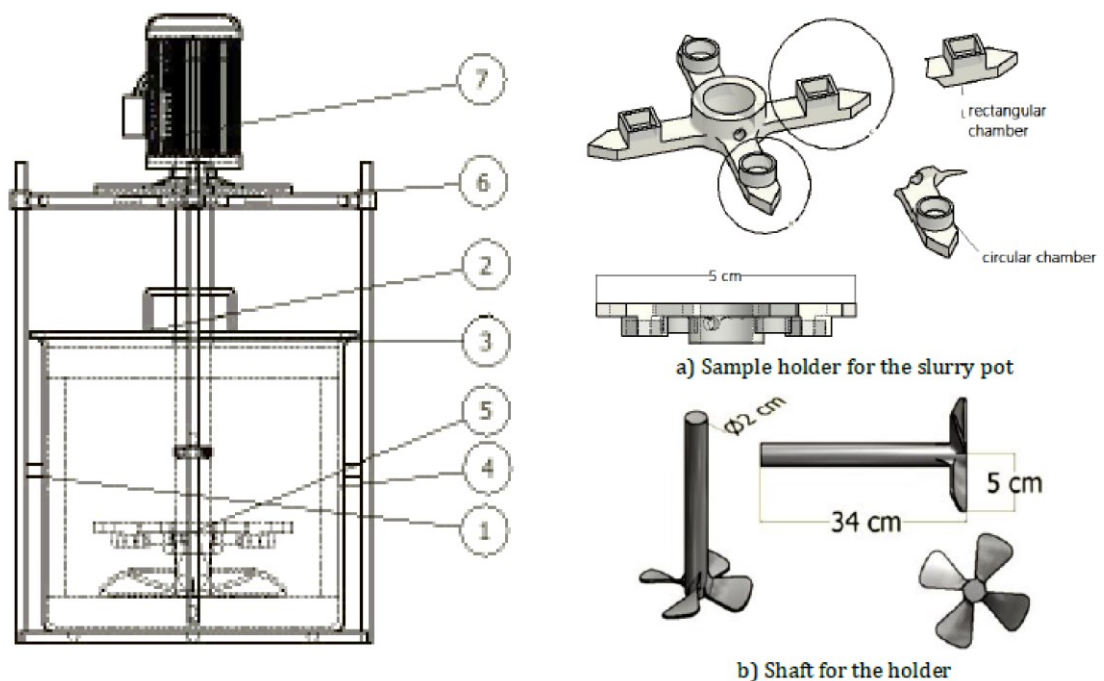
Kuva 13. Eroosiokorroosiolaitteen malli 1, jossa a) kokonaiskuva laitteistosta, b) laitteen kaaviokuva, c) näytedikey, d) laitteen pesä [19].

Moren ym. [19] tutkimuksessa eroosiokorroosiolaitteella (malli 1) tutkittiin alumiini A356-metalliseosta. Kokeet tehtiin seostamattomille näytteille ja näytteille, joihin oli lisätty strontiumia. Kokeen alussa näytteet sulatettiin ja niille tehtiin

joko sekoitus, lisättiin strontiumia tai ei tehty mitään ennen kuin sula seos kaadettiin näytemuotteihin. Vesi-hiekkaseoksen konsentraatio pysyi samana, mutta näytteiden kulmia muutettiin. Tuloksista selvisi, että sekoitetut ja strontiumilla vahvistetut näytteet kestivät kulumista paremmin kuin sekoittamattomat näytteet. [19.]

## Malli 2

Malli 2 on esitetty kuvassa 14. Mallin pesä on 35 cm korkea ja pesän sisähalkaisija on 29 cm. Pesä ulkokuori on terästä ja sisäpuoli on muovia. Pesän tilavuus on noin 23 litraa. Pesässä olevaan akryylimuovista valmistettuun näytetelineeseen mahtuu kaksi neliön muotoista ja kaksi ympyrän muotoista näytettä. Laitteen sekoittimen akseli on vedetty näytepidikkeen läpi. Näyteteline on kiinnitetty akseliin ruuvilla, jotta akseli olisi vakaampi. Akseli on valmistettu sinkkitystä teräsputkesta, joka on päällystetty muovilla. Laitteen sekoittimen moottorin teho on noin 1 hevosvoima eli noin 735 W. [20.]

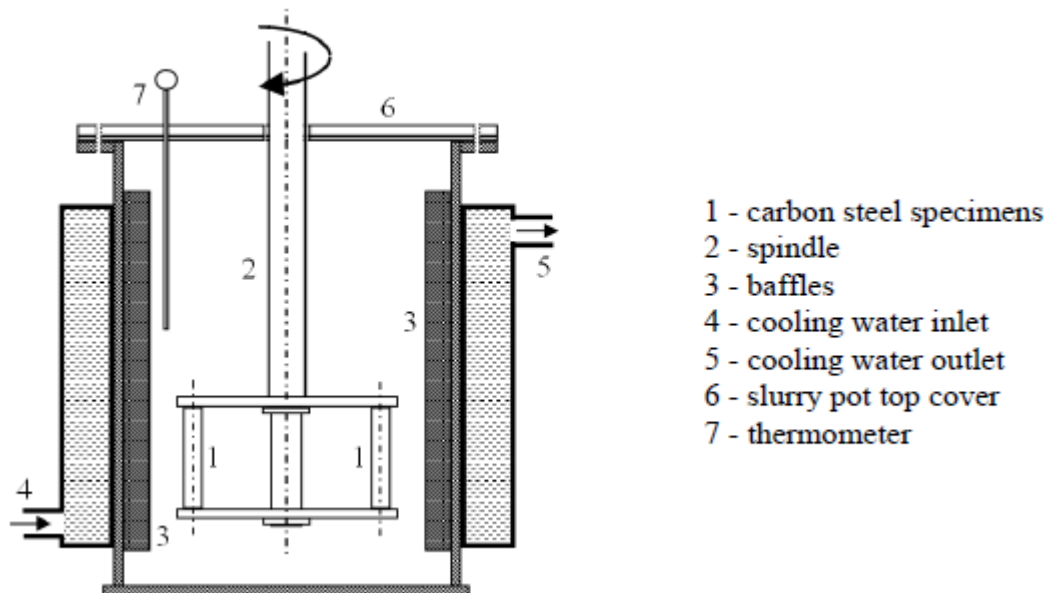


Kuva 14. Malli 2 ja sen näytepidike ja sekoittaja [20].

Aribo ym. [20] tutkivat kaksifaasisen hiiliteräksen eroosiorroosiokestävyyttä 3,5-massaprosenttisessa natriumkloridiliuoksessa. Kokeissa käytetyt hiiliteräsnäytteet kuumennettiin eri lämpötiloissa. Kokeissa sekoittimen kierrosnopeudeksi asetettiin joko 1 100 kierrosta/min tai 2 100 kierrosta/min. Eroosiorroosion kestävyys oli parempi niillä näytteillä, jotka oli kuumennettu korkeampaan lämpötilaan, jolloin metallin kovuus kasvoi. Suuremmalla kierrosnopeudella ajettujen näytteiden kuluminen oli suurempaa. [20.]

### Malli 3

Mallissa 3 (kuva 15) ei ole erikseen sekoitinta, vaan näyteteline toimii lietteen sekoittajana. Laitteen pesä on ruostumatonta terästä ja sen korkeus on 252 mm ja halkaisija 148 mm. Pesän tilavuus on noin 4,3 litraa ja pesän reunoilla on neljä virtauksenestolevyä. Pesää jäähdytetään kokeen aikana jatkuvalla vesikierrolla. Näytteet ovat pituudeltaan 50 mm, halkaisijaltaan 8,3 mm ja niiden etäisyys toisistaan on 100 mm. [21.]



Kuva 15. Mallissa 3 sekoitus on toteutettu näytetelineen pyörimisellä. [21.]

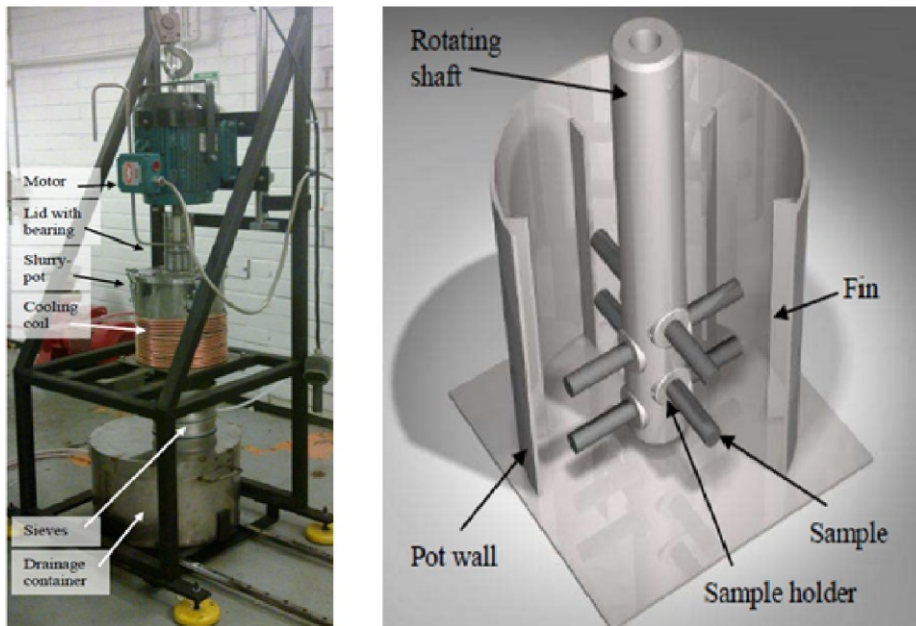
Razzaquen ym. [21] tutkimuksessa laitetta on käytetty hiiliteräsnäytteiden tutkimiseen. Heidän tekemissään kokeissa on käytetty vesi-hiekkaseosta kolmessa

eri konsentraatissa ja kolmessa eri partikkelikoossa. Kokeiden ajoajat olivat 60 minuuttia. Tutkimuksessa huomattiin, että partikkelikoon ja lietteen konsentraation kasvaessa näyttekappaleen kuluminen kasvaa. [21.]

#### Malli 4

Malli 4 (kuva 16) on eroosiokorroosiolaite suurille nopeuksille. Laitteessa voidaan käyttää kiintopartikkeleita, joiden halkaisijat ovat 10 mm. Maksiminopeus näytteiden päissä on jopa 20 m/s. Laitteen pesä on 300 mm korkea ja 273 mm halkaisijaltaan. Sen sisäpuolella on virtauksenestolevyjä pitämässä lietteen konsentraatiota ja sekoitusta tasaisena. Laitteessa ei ole varsinaista sekoitinta, vaan näytteet sekoittavat lietettä. Näytteet kiinnitetään akseliin, joka on kiinni yläpuolella olevassa 7,5 kW:n moottorissa. Akselissa näytteiden paikat ovat neljässä tasossa, ja kaksi näytettä on aina samalla tasolla, eli näytteitä saadaan laitteeseen maksimissaan kahdeksan kappaletta. Näytteet voivat olla joko pyöreitä tai suorakulmioita tankoja. Pyöreät näytteet ovat halkaisijaltaan 18,5 mm ja suorakulmioiden profiili on 15 mm x 15 mm. Pyöreille näytteille moottorin maksimikierrosnopeus on 2 000 kierrosta/min ja nelikulmaisille näytteille 1 750 kierrosta/min. Molempien näytteiden pituudet ovat 95 mm. [22.]





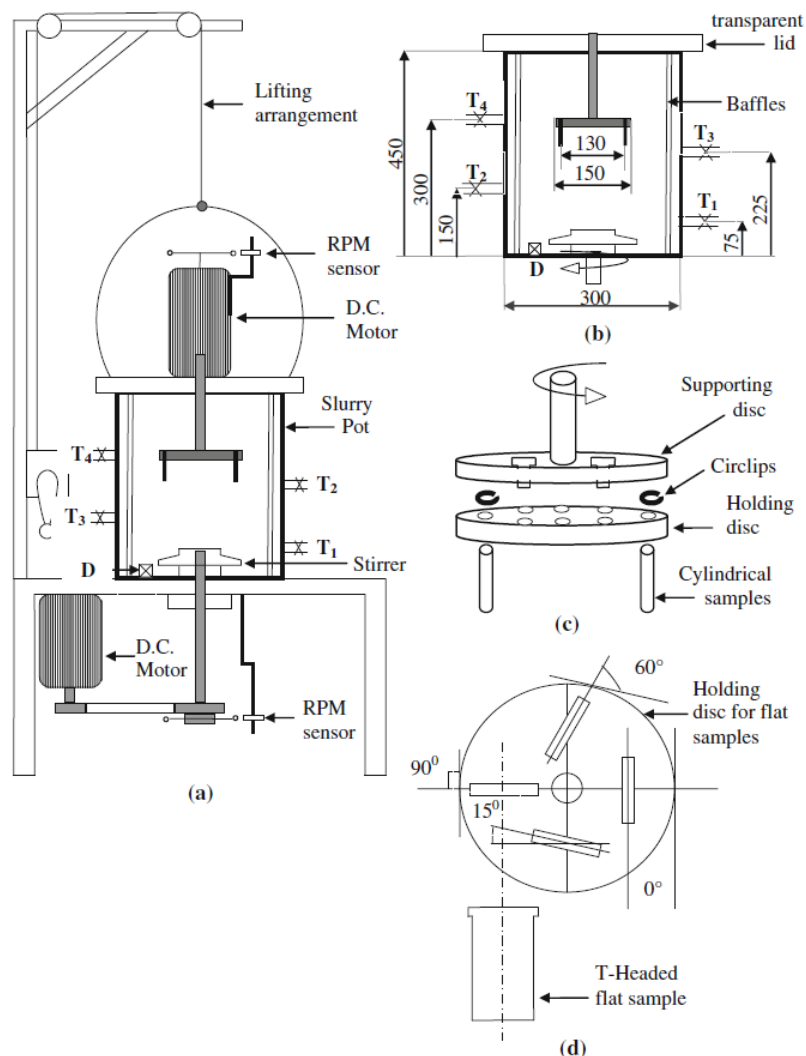
Kuva 16. Vasemmalla on malli 4 kuvattuna ulkopuolelta ja oikealla puolella on havainnekuva mallin 4 sisäpuolelta [22].

Ojala ym. [22] kehittivät laitteen tutkiakseen teollisuudessa käytettyjen materiaalien kulumiskestävyyttä. Eräs tutkimusryhmän tutkimuskohde oli lietepumppu. Tarkoituksena oli jäljitellä mahdollisimman hyvin lietepumppuun kohdistuvia olosuhteita eli suurta nopeutta isoilla partikkeliko'illa. [22.]

Kokeissa näyttemateriaaleina käytettiin haponkestävää terästä AISI 316. Lisäksi laitteen toimintaa ja koejärjestelyitä testattiin kulumisen kestävillä kuminäytteillä, jotka olivat styreenibutadieenikumia ja luonnonkumia. Kokeissa käytettiin graniittisoraa, jonka partikkelikoko oli 8–10 mm. Kokeissa näytteiden kehänopeudeksi saavutettiin 20 m/s tai 17,5 m/s riippuen moottorin kierrosnopeudesta. Näytteille tehdyt ajot kestivät 1 min, 2 min, 5 min, 10 min ja 20 min. Kokeessa huomattiin, että liete on vaihdettava säännöllisesti kiinteiden partikkeleiden kulumisen takia. Testeissä huomattiin näytetelineen alempien näytteiden kulumisen kumulatiivisesti enemmän kuin ylempien näytteiden. Näytteille tehtiin myös 20 min ajoja, joissa liete ja näytteiden paikat vaihdettiin 5 min välein. Näissä ajoissa näytteiden kumulatiivinen kulumisen oli lähes sama. [22.]

## Malli 5

Malli 5 on esitetty kuvassa 17. Laitteen pesä on valmistettu valuraudasta. Sen halkaisija on 300 mm ja sen korkeus on 450 mm. Pesässä on neljä täysipituista virtauksenestolevyä, jotka ovat 10 mm paksuja. Laitteen sekoittaja on pesä pohjalla ja sen moottori on laitteiston alapuolella. Moottorin teho on 0,75 kW ja sen maksimikiertoisuus on 1 400 kierrosta/min. Sekoittaja aiheuttaa lietteeseen imun alaspäin, jotta kiinteät partikkelit leviävät paremmin pesässä. [23.]



Kuva 17. Malli 5. Laitteistossa on sekoitus, mutta myös näyteteline pyörii. a) Koelaitteisto, b) laitteen mitat, c) näyteteline sylinterimäisille näytteille, d) levyäisten näytteiden näyteteline ja näytteiden kulmat. [23.]

Sekoittimen lisäksi näyteteline pyörii vastakkaiseen suuntaan kuin sekoittaja. Näytetelineestä lähtee ruostumattomasta teräksestä valmistettu akseli, joka on kiinni 0,75 kW:n moottorissa. Moottori on asennettu laitteiston yläosaan pesän kantana olevan akryylilevyn päälle. Näytetelineeseen mahtuu näytteitä neljä kappaletta. Näytteet ovat joko sylinterin muotoisia tai suorakaiteen muotoisia. Suorakaiteen muotoisissa näytteissä on T-muoto toisessa päässä. Sylinterin muotoisten näytteiden halkaisija on 10 mm. T-muotoisten näytteiden suorakaiteosan koko on 20 mm x 3 mm. [23.]

Pesän pohjassa on ulostulo, josta pesä on tarkoitus tyhjentää. Laitteen sivuilla on neljä muuta ulostuloja eri korkeuksilla. Näistä ulostuloista voidaan ottaa näyte ja tarkistaa lietteen oikea konsentraatio. [23.]

Gadhikar ym. [23] kehittivät eroosiokorroosiolaitteen (kuva 17), jolla on mahdollista tehdä kokeita sekä sylinterimäisillä näytteillä että laattamaisilla näytteillä. Tutkimuksessa tehdyissä kokeissa ajoja tehtiin eri konsentraatioilla, partikkeliko'illa ja sekoitusnopeuksilla. Tarkoituksena oli selvittää, miten lietteen kiinteät partikkelit saataisiin tasaisemmin leviämään lietteessä. Optimoinnissa käytettiin kiinteinä partikkeleina kvartsia ja vettä. Veden määrä oli 20 litraa ja lietteen konsentraatiot olivat 5, 10 ja 20 %. Kierrosnopeudet olivat 750, 850 ja 950 kierrosta/min. Keskimääräiset partikkelikoot olivat 300, 525 ja 750  $\mu\text{m}$ . Teräsnäytteiden kokeessa partikkelikoko oli 525  $\mu\text{m}$ , sekoittimen kierrosnopeus 950 kierrosta/min, näytteiden kierrosnopeus 120 kierrosta/min ja lietteen konsentraatio 15 %. [23.]

Tutkimuksessa huomattiin, että optimaalinen sekoitusnopeus riippuu lietteen konsentraatiosta, tilavuudesta ja kiinteiden partikkelien ko'oista. Tutkimuksessa saatiin selville, että 300  $\mu\text{m}$ :n kokoiset partikkelit jakautuivat tasaisimmin sekoittimen kierrosnopeudella 850 kierrosta/min ja lietteen 10 %:n konsentraatiolla. Korkeampi kierrosnopeus tuotti turbulenttista virtausta ja pyörteilyä lietteeseen, minkä takia partikkelit jakautuvat epätasaisesti lietteessä. Teräsnäytteille tehdyt kulumiskokeiden tulokset vastasivat tutkimuksen mukaan todellisia kulumisolosuhteita esimerkiksi teollisuusputkistoissa ja pumpuissa. [23.]



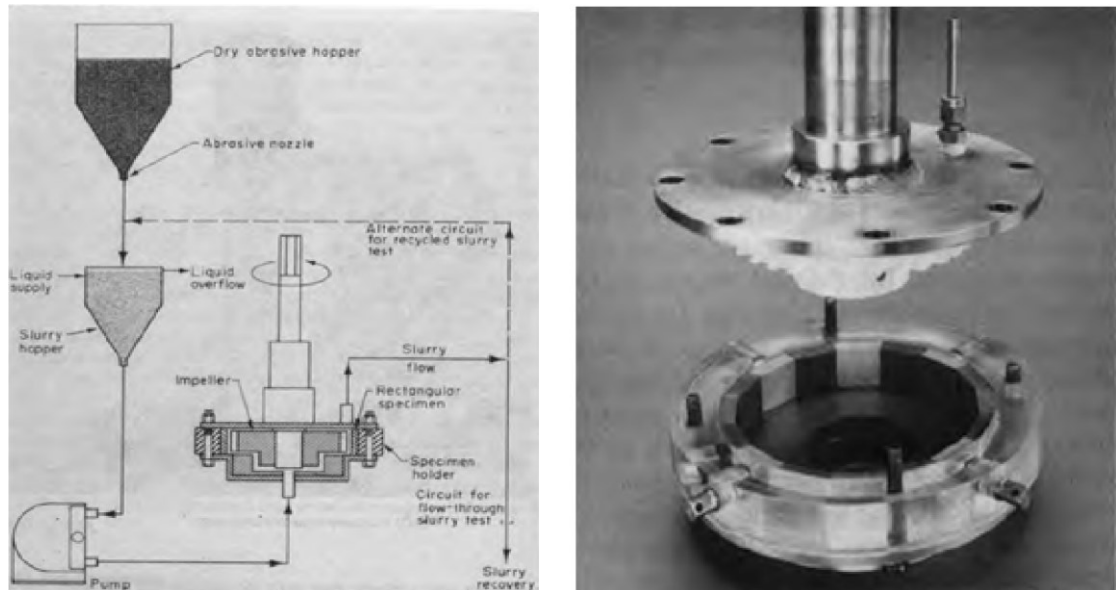
Tsai ym. [24] tutkivat hiilen nesteytyksessä tapahtuvaa kulumista. Kokeet tehtiin käyttämällä lietteessä kiinteänä partikkelina piikarbidia, jonka mukaan sekoitettiin hiiltä, ja nesteenä kerosiinia. Kokeita tehtiin erilaisilla yhdistelmillä vaihtamalla sekoituksen nopeutta, näytekappaleen materiaalia, partikkelikonsentraatiota ja -kokoa sekä hiilen vesipitoisuutta. Näytteinä käytettiin teräksiä 304SS, 316SS ja A-53. Kaikille kolmelle teräkselle tehtiin kokeita hiilipartikkeleilla ja teräksille A-53 ja 304 SS tehtiin kokeita piikarbidipartikkeleilla. [24.]

Kokeissa huomattiin, että piikarbidipartikkeleilla materiaalin kuluminen oli suurempaa kuin hiilipartikkeleilla. Tämä johtuu siitä, että piikarbidi on lujempaa ja tiheämpää kuin hiili, joten piikarbidipartikkelin kineettinen energia on suurempaa. Hiilellä tehdyissä kokeissa metallin kuluminen oli suurempaa suurilla pyörimisnopeuksilla, suuremmalla konsentraatiolla, kuivemmalla hiilellä ja pienemmällä lietteen lämpötilalla. [24.]

### 5.3.2 Kirjallisuuden laitemallit sähkökemiallisin mittauksin

#### Malli 7

Kuvassa 19 on esitetty malli 7. Laitteen pesä on tilavuudeltaan 150 ml ja se on valmistettu muovista. Pesän sisäosa muodostaa 16-kulmioisen näytetelineen, johon mahtuu 8 metallinäytettä. Näyteteline on sisähalkaisijaltaan 160 mm. Teline kiinnitetään laitteen kanteen ja pohjaan. Kiinnityskohdat tiivistetään o-renkailla. Metallisten näytteiden välissä on aina PE-UHMW-näyte (ultrasuurimolekyylinen polyeteeni), jotta galvaanista korroosiota ei tapahtuisi näytteiden kesken. Näytteiden koko on 24 mm x 32 mm x 10 mm. Laitteen kansi ja pohja on suojattu kulumiselta PE-UHMW-muovilla. Laitteen sekoittaja on kiinni akselissa, jota pyörittää porakone. Porassa on magneettisensori, joka viestittää elektroniselle laskurille sekoittimen kärjen pyörimisnopeuden pulssien avulla. Sekoitin on PE-UHMW-muovista valmistettu vinohampainen hammaspyörä. Ulkohalkaisija on 132 mm ja paksuus 19 mm. Hammaspyörässä on 30 hammasta ja ne ovat noin 5,5 mm pituudeltaan. [25.]



Kuva 19. Mallin 7 rakennekuva on esitetty vasemmalla ja oikealla on esitetty laitteen pesä, näytepidike ja sekoittaja [25].

Lietteen syöttö pesään tapahtuu pumpun kautta. Pumppu imee lietteen suppi-  
lost, jossa on alun perin vettä ja jonne lisätään lietesuppilon päällä olevasta  
hiekkasuppilosta hiekkaa. Liete pumpataan pesään sen alapuolelta. Lietettä voi-  
daan kierrättää takaisin lietesuppiloon tai se voidaan ohjata ylimenon kautta ke-  
räysastiaan. Kokeiden aikana voidaan tehdä sähkökemiallisia mittauksia. Metal-  
linäytteet toimivat elektrodeina, joiden lisäksi pesässä on yksi työelektrodi ja vä-  
hintään kaksi vastaelektrodia. [25.]

Madsen ja Blickensderfer [25] tutkivat yli 50 materiaalin kulumista lieteolosuh-  
teissa. Kokeissa liete joko kierrätettiin tai kerättiin talteen läpivirtauksen jälkeen.  
Kokeissa lietteen lämpötila mitattiin lämpöparilla ennen ja jälkeen laitteen. Li-  
säksi lietteestä mitattiin pH ja happipitoisuus 10 minuutin välein. Kun kokeen  
aloituksesta oli kulunut 30 minuuttia, näytteet otettiin pois laitteesta ja punnittiin.  
Tämän jälkeen koetta jatkettiin yhteensä 2 h toistaen edellä mainittuja mittauk-  
sia. Kokeissa käytettiin kiinteäpitoisuudeltaan 2-massaprosenttista liettä. Hie-  
kan virtausnopeus oli 89 g/min ja veden virtausnopeus oli 4,34 l/min. Lietteen  
retentioaika laitteen pesässä oli näin ollen 2 s. [25.]

Tuloksissa huomattiin, että kokeet, joissa liete virtasi pesän läpi, kulumisen oli selkeästi suurempaa kuin kierrätetyllä lietteellä. Kierrätetyn lietteen hiekkapartikkelit olivat sileitä ja siten eivät saaneet rajua kulumista aikaan. Läpivirranneessa lietteessä partikkelit olivat teräviä ja siten saaneet aikaan iskuja materiaalin pintaan ja aiheuttaneet kulumista. [25.]

#### Malli 8

Mallissa 8 (kuva 20) on samankaltainen rakenne kuin mallissa 3 pienin eroavaisuuksin. Suurin eroavaisuus on, että mallissa 8 on mahdollista suorittaa sähkökemiallisia mittauksia. Laitte on muokattu eroosiokorroosiolaitteesta, jota käytettiin Harvey ym. [26] tutkimuksessa siten, että siihen saatiin jatkuvatoiminen sähkökemiallinen mittaus.

Pesä itsessään on valmistettu PVC-U-muovista, ja muut osat, kuten akseli ja virtauksenestolevyt, on päällystetty joko muovilla tai nylonilla. Käytettävät näytteet ovat sylinterimäisiä ja niiden halkaisija on 5 mm ja pituus 70 mm. Näytteet on kiinnitetty akselista lähtevien varsien väliin. Näytteet toimivat työelektrodeina ja vastaelektrodeina grafiittipalat, jotka ovat kiinni akselissa. Pesän kannessa on paikka referenssielektrodille. Akselin yläosassa on messinkirenkaita, jotka ovat sähköisessä kontaktissa hopeoitujen grafiittiharjojen kautta potentiostaattiin. Laitetta ympäröi Faradayn häkki, jotta ulkoiset häiriöt eivät vaikuta sähkökemiallisiin mittauksiin. [27.] Akselia pyörittää 3,5 kW:n moottori. Laitteen ympärillä on kuparinen jäähdytysastia, jonka pohja on ontto, jotta astiassa vaihtuu jäähdytysvesi. [26.]

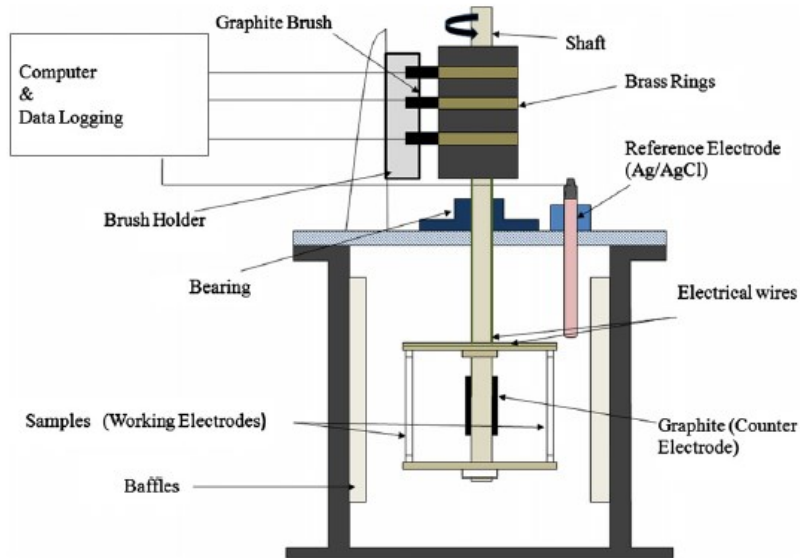


Fig. 2. Modified slurry pot erosion tester to perform *in-situ* electrochemical investigation.

Kuva 20. Malli 8, jolla on mahdollista tehdä sähkökemiallisia mittauksia [27].

Rajahram ym. [27] tavoitteena oli tutkimuksessaan tehdä sähkökemiallisia mittauksia samalla, kun tutkittiin partikkelien nopeuden, koon ja lietteen konsentraation yksittäisiä vaikutuksia ja yhteisvaikutusta sähkövirtaan passivoituneen metallin UNS S31603 pintaan. Kokeissa käytettiin lietettä, jossa oli 3,5-massaprosenttista NaCl-liuosta ja kvartsia. Kvartsin koot oli seulottu karkeaksi (300–600  $\mu\text{m}$ ), keskikarkeaksi (150–300  $\mu\text{m}$ ) ja hienoksi (90–150  $\mu\text{m}$ ). Lietteiden lämpötila oli (30  $\pm$  1) °C. Kokeissa tehtiin ECN-mittauksia (electric current noise) eli sähkökemiallisia kohinamittauksia, jotka perustuvat korrodoituvan pinnan muodostamaan sähkövirran tai jännitteen huojuntaan. Referenssielektrodina kokeissa käytettiin Ag/AgCl-elektrodiä ja potentiostaatti oli Gamryn PC4-750. Kokeissa käytettiin lietteitä, joiden kiinteäkonsentraatiot olivat 1, 3, ja 5 m-%. Nopeudet olivat 5, 7 ja 9 m/s. [27.]

Kokeissa huomattiin, että nopeuden kasvaessa metallin pinta rikkoutui enemmän. Konsentraation kasvaessa keskimääräinen kohinataso kasvoi, kun partikkelit rikkoivat metallin pinnan oksidikerroksen. Tutkimuksen mukaan partikkelien koolla ei ollut suurta merkitystä. [27.]



## 5.4 Ehdotus eroosiokorroosiotestilaitteesta

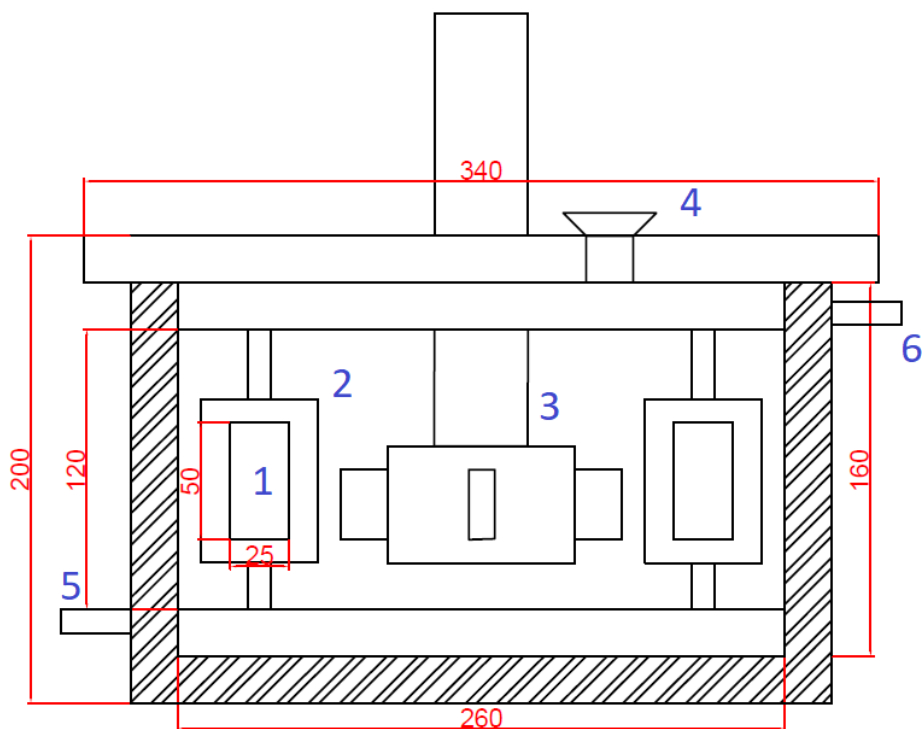
Kirjallisuudesta löytyi monia eroosiokorroosiolaitteita, mutta useat niistä eivät sovellu sähkökemiallisiin mittauksiin. Sähkökemiallisissa mittauksissa näytteiden tulisi pysyä paikallaan, jotta näytteiden ja referenssielektrodin etäisyys ei muuttuisi. Tällöin lietteen sekoitus tulisi vain sekoittimen avulla. Lisäksi tulevassa eroosiokorroosiolaitteessa näytteiden kulmaa tulee voida muuttaa. Taulukossa 1 on esitelty mallien hyvät ja huonot puolet uuden laitteen kannalta.

Taulukko 1. Kirjallisuuden laitemallien ominaisuudet verrattuna tarvittaviin uuden laitteen ominaisuuksiin.

Tarvittavat ominaisuudet uudelle laitteelle	Laitemallit							
	Malli 1	Malli 2	Malli 3	Malli 4	Malli 5	Malli 6	Malli 7	Malli 8
Näytteiden lukumäärä (8 kpl)	2	4	2	8	4	2	8 pieniä	2
Sähkökemialliset mittaukset	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Suorakulmaiset näytteet	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei
Näytteiden kulmasäätö	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Ei	Ei	Ei
Vesijäähdytys	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei	Kyllä
Pesän pieni koko (vetokaappi)	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Näyteteline pysyy paikallaan	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Ei
Pesän pinnoitus	Ei	Kyllä	Ei	Ei	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä

Malleilla 7 ja 8 voidaan tehdä sähkökemiallisia mittauksia. Malli 7 on kooltaan liian pieni tarvittavien näytteiden osalta. Lietteiden lisääminen mallin 7 tavalla

isomman laitteen pesään on haasteellista lietteen kulutuksen takia. Mallissa 8 mittaukset on toteutettu ECN-mittauksilla, jotka tehtiin potentiostaattisesti. Malli 8:n ongelmaksi tulee pyörivä näyteteline, joka aiheuttaa ongelmia mittausten kanssa. Voidaan todeta, että mallit 1–8 eivät sovellu suoraan vaaditun laitteen malleiksi. Kirjallisuuden ja keskustelujen pohjalta kuvan 21 suunniteltu malli on lähellä lopullista laitetta.



Kuva 21. Suuntaa antava piirros uuden eroosiokorroosiolaitteen pesästä mittoineen, jotka on ilmoitettu millimetreinä. Kuvassa on numeroitu tärkeimmät laitteen osat: 1) näyte, 2) näyteteline, 3) sekoitin, 4) lietteen lisäysaukko, 5) jäähdytysveden sisäänmeno, 6) jäähdytysveden ulostulo.

Suunnitellun eroosiokorroosiolaitteen ulkohalkaisija olisi noin 34 cm ja sisähalkaisija noin 26 cm, jotta laite ja kantta nostava hissi mahtuvat vetokaappiin.

Laitteen korkeus riippuu halutusta pesän tilavuudesta ja tarvittavasta korkeudesta laitteen kantta ja sisäosaa nostettaessa.

Näytteiden näytepidikkeissä on taustalevy ja etulevy, joiden väliin näyte asetetaan ja levyt ruuvataan toisiinsa kiinni. Taustalevyssä on pieni metallinen nasta sähkökontaktia varten. Näytepidikkeen etulevyssä on aukko, josta näkyy näytteen kulutettava pinta. Näytepidikkeiden ylä- ja alaosaan lähtee varret, joiden avulla näytepidikkeet puristetaan kahden rengaslevyn väliin. Ylhäällä oleva rengaslevy on kiinni laitteen kannessa ja alempi rengaslevy kiinnitetään näytepidikkeiden alaosaan varsiin. Alemmassa rengaslevyssä on myös kulmasäätö näytteille. Kulmasäätö toteutetaan tekemällä rengaslevyyn esimerkiksi kuusiokulmainen reikä ja näytepidikkeen alempaan varteeseen reikää vastaava muoto. Näytteitä on 8 kappaletta ja niiden koot ovat 50 mm x 25 mm x 5 mm.

Laitteen pesä ja potkurin lavat pinnoitetaan kumilla. Muiden pesän osien materiaalina käytetään erilaisia muoveja, kuten PEEK-muovia, jotka ovat koeympäristössä kemiallisesti kestäviä. Lisäksi materiaalien täytyy kestää hyvin mekaanista kulumista. Pesän pinnoitteeksi pohdittiin myös polytetrafluorieteeni-muovia eli teflonia, mutta sen kulumiskestävyys on huonompi kuin kumin.

Laitteen kannessa on aukko, josta liete lisätään laitteen sisään, kun laite on valmistettu käyttöön. Jäähdytysvesikierto voidaan toteuttaa jatkuvalla vesikierrolla siten, että vetokaapin hanasta juoksetaan vettä pesän ympärillä olevaa kupariputkea pitkin. Toinen mahdollisuus vesikierrolle on laittaa pesän ympärille vaippa, jonne vesi lasketaan. Pesän alaosaan vesikierto tulee sisään ja kupariputken ulostulo on pesän yläosassa. Näin saadaan tehokkaampi jäähdytys aikaan. Ulos tullut vesi lasketaan vetokaapin viemäriin. Lietteen poistaminen pesästä tapahtuu joko kaatamalla se pesästä käsin tai pesän pohjaan voidaan tehdä reikä. Pesä lietteineen ei saa olla liian painava, jos liete kaadetaan käsin pois. Toisaalta reikä laitteen pohjassa vaikeuttaa lietteen poistoa pesästä, sillä

kiinteät partikkelit todennäköisesti tukkivat ulosottoaukon. Jos jäähdytys toteutetaan myös pesän pohjalle, reiän tekeminen pesän pohjalle on haastavaa.

Laitteelle tulee suunnitella tukikehikko, jotta laite olisi vakaa. Laitteen sekoittimen moottori on laitteen yläpuolella ja kansi on kiinni sekoittimen akselissa. Laitteen kansi saadaan laskettua alas ja nostettua ylös työturvallisesti pienen hissillä avulla. Moottorin ja mahdollisesti hissillä hallittujen osien tulevat veto-kaapin ulkopuolelle turvallisuuden takia.

Referenssielektrodina laitteessa voitaisiin käyttää esimerkiksi elohopeasulfiittielektrodi ( $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{SO}_4$ -elektrodi) tai hopeakloridielektrodi ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ -elektrodi). Vastaelektrodina voisi hyödyntää jotain valmiiksi pesässä olevaa metallia, mutta ongelmana siinä on osien kuluminen ja korrodoituvuus. Lisäksi pesä pyritään valmistamaan siten, että näkyvissä ei ole metallia. Yksi vaihtoehto on laittaa esimerkiksi nikkelistä valmistettua peltiä pesän reunoille kokeiden ajaksi. Elektrodi johdoille voidaan tehdä reiät laitteen kanteen lähelle näytepidikkeiden varsiin, jolloin johdot ovat saataisiin siististi ja referenssielektrodit lähelle näytteitä. Miten referenssielektrodit tuodaan tarpeeksi lähelle näytteitä, täytyy pohtia jatkoselvityksissä.

## 6 Yhteenveto

Työn toimeksiantaja Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy tarvitsi uuden eroosiokorroosiolaitteen, jossa olisi toimivampia ratkaisuja tutkimustarpeisiin kuin nykyisin käytössä olevassa laitteessa. Laitteella tulnaisiin tekemään kokeita lietteellä, jossa nesteenä on esimerkiksi rikkihappoa. Käytettäessä rikkihappoa kokeissa laite tulisi sijoittaa ilmastoituun huoneeseen, joten helpoin laitteen sijoitukselle oli laboratorion vetokaappi. Laitteen tuli olla helppo käyttää, jotta työturvallisuus ei vaarantuisi. Laitteeseen piti saada jatkuvatoimiset sähkökemialliset mittaukset, jotta voitiin seurata korroosion vaikutusta näytteisiin reaaliaikaisesti.

Työssä selvitettiin, minkälaisia eroosiokorroosiolaitteita muualla maailmalla tutkimuksissa on käytetty ja voisiko malleja hyödyntää tulevan eroosiokorroosiolaitteen suunnittelussa.

Useissa laitemalleissa sekoitus oli varmistettu sekoittimella ja näytteiden pyörimisellä, mikä varmistaa lietteen tasaisen sekoittumisen. Osassa malleista sekoitus oli toteutettu ainoastaan näytteiden pyörimisellä. Eroosiokorroosiotestien kannalta kirjallisuudessa mainitut laitemallit ovat hyvinkin toimivia. Useimmat laitemallit eivät kuitenkaan sovellu eroosiokorroosiolaitteeksi, jossa on sähkökemialliset mittaukset. Kahdessa laitemallissa oli mahdollisuus sähkökemiallisiin mittauksiin, mutta toisessa laitteessa ne oli toteutettu eri mittaustekniikalla kuin tulevassa laitteessa on tarkoitus. Toisen laitteen koko oli liian pieni, eikä näytteiden kulmia saanut vaihdettua.

Työssä tultiin johtopäätökseen, ettei olemassa olevista kirjallisuudessa esiintyneistä laiteratkaisuista löytynyt suoraan VTT:n tarpeisiin soveltuvaa laitetta. Työn aikana suunniteltiin oma eroosiokorroosiolaitte, joka otettiin mukaan vertailuun. Nykyisessä laitesuunnitelmassa on otettu huomioon uudelta laitteelta vaaditut ominaisuudet, kuten pieni koko, jäähdytysvesikierto, käännettävät näytteet ja sähkökemialliset mittaukset. Laitesuunnitelman pesä on samankaltainen kuin vanhan laitteen, mutta pienempi. Suurimmat erot vanhaan laitteeseen ovat näytteiden kiinnitykset, näytepidikkeet ja jäähdytysvesikierto. Työn

johtopäätöksen pohjalta omaa suunnitelmaa eroosikorroosiolaitteesta tullaan kehittämään. Sopivan sekoittimen moottorin ja kannen nostavan hissien ominaisuudet tulee selvittää. Haastetta tuo se, miten elektrodit saadaan laitteen pesään siten, että niistä saa parhaan hyödyn ja ne eivät tuhoudu. Myös laitteen pesän tyhjennys tuo oman haasteensa, jotta siihen saa turvallisen ja toimivan ratkaisun.

## Lähteet

- 1 Fontana, Mars G. 1987. Corrosion Engineering. Third Edition. New York: McGraw-Hill.
- 2 SFS-EN ISO 8044. Metallien ja metalliseosten korroosio. 2020 Termit ja määritelmät. Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto.
- 3 Alfonsson, Elisabet. 1994. Corrosion of Stainless Steels, General Introduction. Teoksessa Avesta Sheffield AB. Corrosion Handbook for Stainless Steels, s.9–17. Sweden: Sandvikens Tryckeri.
- 4 Koch, Gerhardus. 2017. Cost of corrosion. Teoksessa El-Sherik, A.M. (toim.). Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies, s. 3–30. Woodhead Publishing.
- 5 Hänninen, Hanna; Karppinen, Maarit; Leskelä, Markku; Pohjakallio, Maija. 2018. Tekniikan kemia. Helsinki: Edita.
- 6 Aromaa, Jari. 1987. Sähkökemiallisten mittausten menetelmien käyttö korroosionestotekniikassa. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
- 7 Bagotsky, V.S. (toim.). 2005. Fundamentals of Electrochemistry. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- 8 Stansbury, E.E.; Buchanan R.A. 2000. Fundamentals of Electrochemical Corrosion. Ohio: ASM International.
- 9 Hakkarainen, Tero. Korroosion sähkökemiallinen luonne ja sähköisen suo-  
jauksen periaate. Oppimateriaali. Insinöörijärjestöjen koulutuskeskus,  
INSKO ry.
- 10 Kritzer, Peter. 2004. Corrosion in high-temperature and supercritical water  
and aqueous solutions: a review. Journal of Supercritical Fluids. Vol. 29,  
s.1–29.
- 11 Hannula, Simo-Pekka (toim.); Haimi, Eero (toim.); Lindroos, Veikko (toim.).  
2020. Uudistettu Miekk-Ojan Metallioppi. Osa I. Helsinki: Teknologiainfo  
Teknova Oy.
- 12 Budinski, Kenneth G. 2013. Friction, Wear, and Erosion Atlas. Boca Ra-  
ton: CRC Press.

- 13 Javaheri, Vahid; Porter, David; Kuokkala, Veli-Tapani. 2018. Slurry erosion of steel – Review of tests, mechanisms and materials. *Wear*. Vol. 408–409, s. 248–273.
- 14 More, S.R; Bhatt, D.V; Menghani, J.V. 2017. Study of the Parametric Performance of Solid Particle Erosion Wear under the Slurry Pot Test Rig. *Tribology in Industry*. Vol. 39, Nro. 4, s. 471–481.
- 15 Wensink, Henk; Elwenspoek, Miko C. 2002. A closer look at the ductile–brittle transition in solid particle erosion. *Wear*. Vol. 253, s. 1035–1043.
- 16 Nandre, Bhushan D.; Desale, Girish R. 2018. Study the Effect of Impact Angle on Slurry Erosion Wear of Four Different Ductile Materials. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 5, s. 7561–7570.
- 17 Vyas, Akash; Menghani, Jyoti. 2021. Recent advancement in slurry erosion test rigs and its parametric influences - A review. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2317, Nro. 1.
- 18 Buszko, M.H.; Krella, A.K. 2017. Slurry erosion – Design on test devices. *Advances in Materials Science*. Vol. 17, Nro. 2.
- 19 More, Satish R.; Bhatt, Dhananjay V.; Menghani, Jyoti V. 2019. Effect of Microstructure and Hardness on Slurry Erosion Behaviour of A356 Alloy Using Slurry Pot Test Rig. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. Vol. 72, s. 3191–3199.
- 20 Aribu, S.; Adedapo, I.; Nwogwugwu, C.; Olaniran, O.; Olaseinde, A.; Ige, O.; Olubambi, P.A. 2018. Erosion-corrosion Behaviour of Dual Phase Medium Carbon Steel using a Designed Slurry Pot. *Tribology in Industry*. Vol. 40, Nro. 2, s. 239–246.
- 21 Razzaque, M. Mahbubur; Alam, M. Khorshed; Khan, M. Ishak. 2015. Effect of Erodent Particles on the Erosion of Metal Specimens.
- 22 Ojala, Niko; Kuokkala, Veli-Tapani; Valtonen, Kati; Kivikytö-Reponen, Päivi; Vuorinen, Petri. 2012. High speed slurry-pot type erosion wear tester.
- 23 Gadhikar, Aniruddha A.; Sharma, Ashok; Goel, D.B.; Sharma, C.P. 2011. Fabrication and Testing of Slurry Pot Erosion Tester. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. Vol. 64, s. 493–500.
- 24 Tsai, W.; Humphrey, J.A.C; Cornet, I.; Levy, A. 1981. Experimental measurement of accelerated erosion in a slurry pot tester. *Wear*. Vol. 68, Nro. 3, s. 289–303.



- 25 Madsen, Brent W.; Blickensderfer, Robert. 1987. A New Flow-Through Slurry Erosion Wear Test. Teoksessa Miller, J.E. (toim.); Schmidt Jr, F.E. (toim.). *Slurry Erosion: Uses, Applications, and Test Methods*, s. 169–184. Philadelphia: American Society for Testing and Materials (ASTM).
- 26 Harvey, T.J.; Wharton, A.J.; Wood, R.J.K. 2007. Development of synergy model for erosion-corrosion of carbon steel in a slurry pot. *Tribology – Materials Surfaces & Interfaces*. Vol. 1, s. 33–47.
- 27 Rajahram, S.S.; Harvey, T.J.; Wood R.J.K. 2011. Electrochemical investigation of erosion-corrosion using a slurry pot erosion tester. *Tribology International*. Vol. 44, s. 232–240.