



SAKKAKIRJASTO

Korroosiokokeet

Tapani Latvala

Opinnäytetyö
Tammikuu 2011
Kemiantekniikka
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Tampereen ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
 Kemiantekniikan koulutusohjelma
 Kemiantekniikan suuntautumisvaihtoehto
 LATVALA, TAPANI: Sakkakirjasto: korroosiokokeet
 Opinnäytetyö 99 s. liitteet 10 s.
 Tammikuu 2011

Opinnäytetyö tehtiin Suomen KL-Lämpö Oy:lle, jonka yksi osaamisalue on lämmönvaihtimien huolto ja puhdistus. Lämmönvaihtimia puhdistettaessa käytetään erilaisia peittauskemikaaleja. Nämä kemikaalit liuottavat kukin tietynlaista sakkaa ja likaa sekä aiheuttavat korroosiota eri materiaaleille. Koska peittauskemikaaleja on useita, kuten myös lämmönvaihtimien materiaaleja ja niihin kertyvää sakkaa ja likaa, on tärkeää käyttää oikeanlaista yhdistelmää, jotta paras puhdistustulos saavutetaan. Tämä työ on toinen osa kahden työn kokonaisuudesta, joiden tarkoitus on luoda pohja niin sanotulle sakkakirjastolle, jonka tarkoitus on helpottaa oikean peittauskemikaalin valintaa kulloistakin tilannetta varten. Toinen opinnäytetyö on nimeltään Sakkakirjasto: liuotuskokeet ja alkuaineanalyysit, eli sakkojen liuotuskokeet ja niiden alkuaineanalyysit. Toinen osa eli tämä työ käsittää korroosiokokeet ja sakkakirjaston kokoamisen.

Teoriatietoa kerättiin korroosiosta ja korroosion muodostumisesta eri olosuhteissa erilaisille materiaalipinnoille. Tätä teoriatietoa käytettiin korroosiokokeiden tulosten tulkitsemisen tukena. Korroosiokokeet suoritettiin massanmuutosmenetelmällä korroosiokuponkeja käyttäen. Korroosiokupongit valittiin lämmönvaihtimissa yleisimmin käytettyjen materiaalien perusteella. Kullekin käytetylle peittauskemikaalille ja valituille materiaaleille suoritettiin korroosiokoe kahdella eri reaktioajalla. Korroosion vaikutus todettiin massan muutoksella punnitsemalla korroosiokuponki. Näistä punnitustuloksista muodostettiin kaaviot, joista kykenee näkemään, miten ja kuinka nopeasti peittauskemikaali vaikuttaa erilaisiin materiaaleihin. Korroosiokupongit myös valokuvattiin ennen ja jälkeen korroosiokokeiden visuaalisten muutosten havaitsemiseksi. Näihin korroosiokokeiden tuloksiin otettiin mukaan toisen osan liuotuskokeiden tulokset ja luotiin pohja sakkakirjastolle.

Korroosiokokeet antoivat tuloksia, jotka olivat suurimmaksi osaksi ennustettavia teoriatiedon avulla. Eri materiaali- ja peittauskemikaaliyhdistelmien suureet laskettiin massan muutoksena aikayksikköä kohden. Vaikka kutakin yhdistelmää varten ei tehty rinnakkaiskokeita, mikä olisi vaikuttanut tulosten toistettavuuteen, saatiin tulokset 156:lle eri yhdistelmälle. Peittauskemikaalin, materiaalin ja reaktioajan yhdistelmillä laadittiin kattava tietokanta sakkakirjastoa varten.

Asiasanat: korrosio, korroosiokoe, peittauskemikaali, lämmönvaihtimien puhdistus, korroosiokuponki.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	5
2 YRITYSESITTELY, SUOMEN KL-LÄMPÖ OY	6
3 LÄMPÖ JA LÄMMÖNVAIHTIMET	8
3.1 Lämmön siirtyminen	8
3.2 Eri lämmönvaihtolaitteita.....	10
3.3 Lämmönvaihtimien likaantuminen	13
4 PEITTAUSKEMIKAALIT JA TEHOAINEET	14
4.1 Hapot.....	14
4.2 Emäkset.....	14
4.3 Tensidit	15
4.4 Inhibiitit.....	15
4.5 Vaahdonestoaineet	16
5 KORROOSION TEORIA.....	17
5.1 Yleistä korroosiosta	17
5.2 Metallien korroosio.....	19
5.2.1 Ruostumaton teräs.....	20
5.2.2 Haponkestävä teräs	24
5.2.3 Sinkitty teräs	27
5.2.5 Kupari	30
5.2.6. Messinki.....	32
5.2.7 Alumiini	33
5.3 Vesi	34
5.4 Korroosiokupongit ja painohäviömittaus.....	37
6 LABORATORIOKOKKEET	40
6.1 Kokeiden valmistelu ja suunnittelu.....	40
6.1.1 Aikataulutus	40
6.1.2 Korroosiokokeiden suunnittelu.....	41
6.1.3 Laboratoriotilan valmistelu	42
6.2 Korroosiokokeiden toteutus	44
6.2.1 Korroosiokuponkien alkuperä, esikäsittely ja merkitseminen	44
6.2.2 Peittauskemikaalien laimennokset ja happamuusasteikko.....	48
6.2.3 Korroosiokokeet.....	49
6.2.4 Korroosiokuponkien loppukäsittely	55
6.2.5 Korroosiokuponkien punnitus.....	55

7 KORROOSIOKOKOKEIDEN TULOKSET	57
7.1 Tulokset.....	57
8 KOETULOSTEN KÄSITTELY JA TULKINTA	60
8.1 Peittauskemikaalilähtökohtaiset kaaviot	61
8.1.1 Peittauskemikaali 1	61
8.1.2 Peittauskemikaali 2	63
8.1.3 Peittauskemikaali 3	64
8.1.4 Peittauskemikaali 4	66
8.1.5 Peittauskemikaali 5	67
8.1.6 Peittauskemikaali 6	69
8.1.7 Peittauskemikaali 7	70
8.1.8 Peittauskemikaali 8	71
8.1.9 Peittauskemikaali 9	73
8.1.10 Peittauskemikaali 10	74
8.1.11 Peittauskemikaali 11	76
8.1.12 Peittauskemikaali 12	77
8.2 Korroosion suure.....	78
8.3 Materiaalien visuaalinen tulkinta	79
8.3.1 Ruostumaton teräs.....	80
8.3.2 Haponkestävä teräs	81
8.2.3 Sinkitty teräs	82
8.2.4 Mustarauta.....	85
8.2.5 Kupari	88
8.2.6 Messinki	90
8.2.7 Alumiini	92
9 SAKKAKIRJASTO	94
10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTAA	97
LÄHTEET	99
LIITTEET	100

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö on toinen osa kahden työn kokonaisuudesta. Toisen osan tekijä on Piia Kyllönen, jonka työn nimi on Sakkakirjasto: alkuaineanalyysit ja liuotuskokeet. Yhdessä näiden kahden työn tuloksista on tarkoitus luoda sakkakirjasto töiden teettäjälle, Suomen KL-Lämpö Oy:lle.

Suomen KL-Lämpö Oy:n yksi toiminta-alue on asiakasyritysten lämmönvaihtimien huoltaminen ja puhdistus. Lämmönvaihtimen puhdistukseen käytetään yhtiön omia peittauskemikaaleja, joita on useita erilaisia eri käyttötarkoitusta varten. Käytettävän peittauskemikaalin valintaan vaikuttavat lämmönvaihtimen valmistusmateriaali ja lämmönvaihtimessa oleva poistettava lika tai kertymät, eli sakka. Sakat voivat olla esimerkiksi kalkki- tai rautapitoisia. Sakkamateriaalille on valittava tietty peittauskemikaali, joka liuottaa sakkaa. Peittauskemikaalit aiheuttavat myös korroosiota lämmönvaihtimille, minkä vuoksi on otettava huomioon myös lämmönvaihtimen materiaali. Peittauskemikaalin on liuotettava sakkaa mahdollisimman tehokkaasti aiheuttaen mahdollisimman vähän korroosiota lämmönvaihtimelle.

Tämän työn tarkoituksena on suorittaa teoretietoon perustuvat korroosiokokeet yleisimmille peittauskemikaaleille ja lämmönvaihtimen rakennemateriaaleille. Korroosiokokeet tehdään massanmuutosmenetelmällä eli korroosiokuponkeja apuna käyttäen. Korroosiokuponnit ovat eri materiaalisia metallikappaleita, jotka upotetaan peittauskemikaaleihin kokeiden ajaksi. Kokeissa käytetään kahta eri reaktioaikaa. Korroosiokokeiden lisäksi korroosiokuponnit valokuvataan ennen ja jälkeen kokeiden visuaalisten muutosten havainnoimiseksi. Korroosiokokeiden tulosten ja opinnäytetyön toisen osan liuotuskokeiden ja alkuaineanalyysien tulosten avulla luodaan sakkakirjasto. Töissä saatujen tulosten avulla on tarkoitus löytää kullekin peittauskemikaalille parhaiten soveltuva lämmönvaihtimen materiaali ja liuotettava sakka.

2 YRITYSESITTELY, SUOMEN KL-LÄMPÖ OY

Opinnäytetyön tilaajaa ja teettäjä on pirkkalalainen vuonna 1993 perustettu kotimainen kemianteollisuusalan perheyritys Suomen KL-Lämpö Oy (kuvio 1). Suomen KL-Lämpö Oy:n liikeidea on tarjota asiakasyrityksille erilaisia vedenkäsittelyratkaisuja. Yrityksen tuotteisiin kuuluu erikoiskemikaaleja ja laitteita, ja sen asiantuntemuspalvelut liittyvät vedenkäsittelyyn ja energian siirtoon. Yrityksen toiminnoissa, kuten tutkimuksissa, tuotekehityksessä sekä valmistuksessa on lähtökohtana ympäristömyönteisyys. (Suomen KL-Lämpö Oy)



KUVIO 1. Suomen KL-Lämpö Oy:n logo (www.edgren.fi)

Yrityksen pääasiakasryhmiä ovat eri teollisuusalan yritykset, kuten paperi- ja metsäteollisuus, pienteollisuus, höyryvoimalaitokset ja muut energiaa tuottavat laitokset sekä asuin-, liike- ja teollisuuskiinteistöt ja LVI-alan tuottajat. Vedenkäsittelyssä Suomen KL-Lämpö Oy:n perustavoitteena on hallita korroosiota erilaisissa vesijärjestelmissä ja estää laitteistoissa syntyviä kerrostumia, jotka haittaavat energian siirtymistä nesteen mukana, ja tuottaa tiettyihin käyttötarkoituksiin soveltuvaa vettä.

Yrityksen tuottamien erikoiskemikaalien ja palveluiden tarkoituksena on taata sen asiakasyrityksille mahdollisimman häiriötön energiantuotanto sekä energian siirto teollisuudessa ja talotekniikassa. Yritys pystyy tarjoamaan asiakkailleen räätälöityjä tuotteita, tarkasti asiakkaan vaatimukset ja olosuhteet huomioon ottaen.

Esimerkkejä Suomen KL-Lämpö Oy:n tuotteista:

- korroosionestokemikaalit
- höyrykemikaalit
- jäähdytysjärjestelmäkemikaalit
- kaukolämpökemikaalit
- puhdistus- ja peittauskemikaalit
- flokkulantit
- pehmenysmassat
- glykolit
- kiinteistöhoitokemikaalit.

Tässä opinnäytetyössä paneudutaan veden ja lämmönvaihtimien puhdistuskemikaaleihin sekä peittauskemikaaleihin. Näistä kemikaaleista kuitenkin kerrotaan tarkemmin tuonnempana opinnäytetyössä. Suomen KL-Kämpö Oy toimittaa asiakkailleen paitsi kemikaaleja, myös erilaisia energian tuotantoon ja siirtoon soveltuvia laitteita sekä palveluita. Laitteet ovat muun muassa annostelulaitteet, suodattimet, vedenkäsittelylaitteet ja liuosten pumppausasemat. Yrityksen myymiin palveluihin kuuluu muun muassa järjestelmien kuntotarkastuksia sekä teknisiä palveluita, kuten erilaisten laitteistojen puhdistamisia.

Suomen KL-Lämpö Oy kehittää jatkuvasti muun muassa lämmönvaihtimien puhdistusmenetelmiä ja puhdistukseen liittyviä kemikaaleja. Peittauskemikaalien kehitystyöhön liittyy tarve löytää oikeat kemikaalit ja niiden suhteet lämmönvaihtimiin kertyvien sakkujen liuottamiseen ja puhdistukseen, siten että puhdistus aiheuttaa mahdollisimman vähän vahinkoa lämmönvaihtimille eli pidentää lämmönvaihtimien käyttöikää. Yrityksen tarkoitus on kehittää Piia Kyllösen ja minun opinnäytetöiden avulla tuotekartta valmistamistaan tuotteista, jotta oikeiden tuotteiden valinta, käyttö ja annostelu olisivat mahdollisimman helppoa ja yksinkertaista, koska ratkaisut tehtäisiin puhdistettavien kohteiden, lian (sakan) ja ympäristön perusteella. (Suomen KL-Lämpö Oy)

3 LÄMPÖ JA LÄMMÖNVAIHTIMET

Lähestulkoon kaikissa teollisuuden prosesseissa tarvitaan lämpö jonka kuljettamiseen, joko prosessiin tai siitä pois, tarvitaan lämmönvaihtimia. Suomen KL-Lämpö Oy:n yksi osaamisalue on asiakkaiden käyttämien lämmönvaihtimien huolto. Teollisuudessa kemiallisissa reaktioissa sitoutuu tai vapautuu suuria lämpömääriä, joita on pystyttävä siirtämään pois (eksoterminen) reaktiosta tai tuomaan reaktioon (endoterminen), ennen kuin reaktio on mahdollinen. Teollisuudessa on myös paljon prosesseja, jotka vaativat tietyn lämpötilan toimiakseen ja tuottaakseen oikeanlaatuista tuotetta. Prosessista kannattavan tekee myös se, että syntyvää ja/tai käytettyä lämpöä on mahdollista siirtää muualle prosessiin tai käyttää muualla hyödyksi. Esimerkiksi teollisuuden runsas jätelämpö tarjoaa energiaa laajojen yhdyskuntien lämmittämiseen.

Paitsi teollisuudessa, myös arkipäivässä ja talotekniikassa tarvitaan toimivia ja luotettavia lämmönvaihtimia. Tunnetuin, ja ehkä arkielämässä tärkein, lämmönvaihdin on jokaisessa suomalaisessa taloudessa oleva lämpöpatteri. Lämpölaitosten tuottama lämpö siirretään kaukolämpöverkkoa pitkin rakennuksiin, jossa rakennuskohtaiset lämmönvaihtimet jakavat lämmön tasaisesti ympäri rakennusta. (Kivioja 2003, 126; Mansukoksi 1975, 1.)

3.1 Lämmön siirtyminen

Lämpö siirtyy kolmella eri perusilmiöllä: johtumalla, konvektion avulla ja säteilemällä. Lämmön johtumisessa lämpö siirtyy saman kappaleen eri kohtien tai kahden eri kappaleen välillä näissä vallitsevien lämpötilaerojen vuoksi. Lämmön johtuminen on kullekin aineelle ominainen suure, eli eri materiaaleissa lämpö siirtyy eri nopeuksilla. Aineen molekyylit liikkuvat lämpimänä nopeammin kuin kylmänä, joten molekyylit törmätessä ne samalla siirtävät energiaansa eteenpäin kylmempiin, hitaammin liikkuviin

molekyyleihin. Tällöin kylmä materiaalin molekyylinen nopeus kasvaa, joten niiden lämpötilakin nousee. Mitä lähempänä aineen molekyylit ovat toisiaan, sitä nopeammin lämpö johtuu. Kiinteässä materiaalissa johtuminen on nopeampaa kuin nesteissä ja kaasuissa. Täten lämpötilaerot vähitellen pyrkivät tasaantumaan.

Konvektiossa lämpö siirtyy jonkin liikkuvan materiaalin välityksellä. Vanha esimerkki tästä on muinainen keitinkivi, joka kuumennetaan nuotiossa ja sen jälkeen siirretään soppakulhoon, jossa keitinkivestä siirtyy lämpö soppaan. Nykypäiväisempi esimerkki konvektiosta on virtaavan nesteen mukana siirtyvä lämpö. Ainevirtaus kuljettaa mukanaan lämpöä lämpimältä alueelta ja luovuttaa sitä kylmemmällä alueella, tai toisinpäin. Siten nesteessä syntyy kiertokulku. Suurin osa nykypäivän lämmönvaihtimista toimii virtaavan nesteen avulla, esimerkiksi asuinrakennuksen lämpöpatteri. Konvektiossa puhutaan myös pakotetusta ja vapaasta konvektiosta. Pakotetussa konvektiossa ainevirta saadaan aikaan jollain ulkoisella menetelmällä, esimerkiksi paine-erolla, muun muassa pumput ja puhaltimet. Lämmönvaihtimissa yleensä on kyseessä pakotettu konvektio. Vapaasta konvektiosta esimerkkinä on kiertoilmataikka, jossa lämmin ilmavirta nousee ylöspäin ilman ulkoista voimanlähdettä.

Kaikki lämmön siirtyminen perustuu säteilyyn. Tämä tarkoittaa sitä, että energia pyrkii minimiin. Lämmön johtumisessa ja konvektiossa lämmön siirrosta ilmenee myös lämpösäteilyä, jota ilman lämpö ei siirry. Vaikka lämmin kappale eristettäisiin täysin, esimerkiksi tyhjiöön, kappaleen lämpötila laskee, vaikkei läsnä ole väliaineita. Tätä energiansiirtoa kutsutaan myös lämpöhäviöksi. Kun kappaleeseen tuodaan energiaa, sen atomit menevät viritettyyn tilaan ja pyrkivät olemaan mahdollisimman alhaisessa energiatilassa, koska ne luovuttavat energiaa ympäristöön.

Koska tämän työn tarkoitus on tutkia lämmönvaihtimien puhdistuskemikaalien vaikutusta, tehoa ja ominaisuuksia, on tärkeä tuntea lämmön siirtymisen peruseriaatteet. Lämmönvaihtimissa vaikuttavat kaikki kolme lämmönsiirtymistapaa: johtuminen, konvektio ja säteily. Lian, levän ja sakan kertyminen lämmönvaihtimien pinnoille heikentää vaihtimien tehoa. Jokaisella aineella on oma lämmönjohtumiskerroin, niin myös lämmönvaihtimen pinnalle kertyneellä sakalla. Näin ollen energian

on kuljettava usean eri materiaalin läpi, myös likakerroksen läpi, jolla on heikompi lämmönjohtumiskerroin kuin puhtaalla, metallisella pinnalla. Tämä vähentää lämmönvaihtimen tehoa huomattavasti.

Myös putkistoihin ja eri pinnoille kertynyt sakka heikentää nestevirtausta lämmönvaihtimissa, mikä vaikuttaa negatiivisesti konvektioon. Pakotettu konvektio ei ole niin tehokasta ja sujuvaa kuin vapailla, puhtailla pinnoilla. Virtaus hidastuu ja voi aiheuttaa lämmönvaihtimen tehon heikkenemisen lisäksi turhaa painetta ja stressiä pumpuille, putkistoille ja liitoskohtiin. Puhdistus pidentää ja tehostaa lämmönvaihtimia. (Kivioja 2003, 126–143; Mansukoksi 1975, 1–52.)

3.2 Eri lämmönvaihtolaitteita

Lämmönvaihtimia on luonnollisesti kehitetty lukuisia eri sovelluksia kunkin prosessin ja käyttötarkoituksen mukaan. Ehkä yleisintä on jakaa lämmönvaihtimet epäsuoriin ja suoriin lämmönvaihtimiin. Näistä kahdesta käytetään talotekniikassa ja teollisuudessa eniten epäsuoria lämmönvaihtimia. Ne ovat sellaisia, joissa on erottava seinämä kahden eri materiaalin välissä, joiden kesken lämpö vaihtuu. Lämpöenergia siis kulkee erottavan seinämän lävitse. Suorassa lämmönsiirrossa lämmitettävä tai jäähdytettävä materiaali on välittömässä kosketuksessa lämmönsiirto-väliaineen kanssa.

Epäsuorissa lämmönvaihtimissa voidaan pitää luokitusperusteena sitä, miten virtaukset lämmönvaihtimissa järjestyvät. Neljä yleisintä virtausjärjestelyä ovat myötävirtaus, vastavirtaus, ristivirtaus ja moninkertainen ristivirtaus. Tämä tarkoittaa sitä, missä suhteessa laitteessa virtaukset kulkevat. Myötävirtauksessa virtaukset tulevat sisään samasta päästä ja kulkevat samansuuntaisesti. Vastavirtauksessa virtaukset kulkevat toisiaan vasten. Ristivirtauksessa taas toinen virtaus kulkee 90 asteen kulmassa toiseen nähden ja moninkertaisessa ristivirtauksessa toinen virtaus kulkee edestakaisesti toisen virtauksen poikki useita kertoja. Ero näiden perustyyppien välillä on tietyn lämpötilan muutoksen aikaansaamiseksi vaadittavan lämmönsiirtopinta-alan suuruus.

Koska lämpö siirtyy sitä tehokkaammin mitä suurempi yhteispinta-ala on, on nämä perustyytit luokiteltu vielä useampaan eri luokkaan muun muassa ympäröivän tilan ja tarvittavan tehokkuuden mukaan. Eri lämmönsiirintyyppinä ovat kaksoisputkilämmönvaihdin, vaippaputkilämmönvaihdin, spiraali- ja levylämmönvaihdin ja ripaputkilämmönvaihdin. Kaksoisputkilämmönvaihdin lienee konstruktioltaan yksinkertaisin lämmönvaihdin. Se koostuu kahdesta sisäkkäin olevasta samankeskeisestä putkesta. Niissä toinen väliaine virtaa sisemmässä putkessa ja toinen putkien välisessä tilassa. Kaksoisputkilämmönvaihdin soveltuu kaikkiin eri aineen olomuotojen yhdistelmien lämpöenergian siirtoihin. Tämän menetelmän etuna on myös vaivaton puhdistettavuus sen yksinkertaisen konstruktion vuoksi, mutta lämmönvaihtimen pinta-ala asettaa tälle tyyppille kuitenkin rajoituksia.

Lämmönvaihtopinta-alan tarpeen ollessa suuri, on vaippaputkilämmönsiirrin oiva valinta. Tämän tyyppistä siirrintä voidaan käyttää niin jäähdytykseen kuin lämmitykseen. Suuri pinta-ala saadaan käytännöllisesti ja taloudellisesti sijoittamalla putket nippuun sylinterimäisen vaipan sisään. Vaipan ja putkien välitilassa virtaa toinen väliaine. Mikäli tarvitaan erittäin suuria lämmönsiirtonopeuksia, vaippaputkilämmönvaihtimissa käytetään yleensä sellaista konstruktiota, jossa putkissa virtaavalla aineella on useampia läpivirtauksia siirtimen läpi. Tämä tarkoittaa sitä, että putkissa tapahtuva virtaus kääntyy siirtimen päässä ja kulkee siirtimen läpi monta kertaa, mutta vaippaväliaine vain yhden kerran. Myös vaippapuolella siirtimessä tila on jaettu levyillä, niin sanotuilla virtausohjaimilla ja virtauslaitolla, jotka aiheuttavat mutkia virtaukseen. Täten konstruktiosta tulee hyvin monimutkainen. Haittapuolena tässä on se, että useamman ja siten myös pidemmän matkan vaikutus näkyy painehäviönä. Tämä vaatii pumpuille lisätehoa.

Spiraali- ja levylämmönvaihtimet ovat myös yleisiä vaippaputkivaihtimien ohella. Näissä lämmönvaihtimissa lämpöpinnat on valmistettu levyistä putkien sijaan. Spiraalilämmönvaihtimissa lämpöpinnat on valmistettu kahdesta levystä, jotka on taivutettu toistensa ympärille siten, että toisessa raossa kiertää kylmä ja toisessa raossa kylmä virtausaine. Näiden rakojen leveyttä voidaan muuttaa, mikä vaikuttaa virtausnopeuteen. Täten on mahdollista päästä putkisiirtimiä suurempiin lämmönvaihtumiskertoimiin. Vaihtimen painehäviö on melko suuri, mutta etuna on sen pieni koko verrattuna

lämmönvaihtopinta-alaan. Levylämmönvaihtimissa on lämpöpintana vierekkäisiä samansuuntaisia levyjä. Levyjen reunoissa olevat tiivisteet muodostavat levyjen välille virtaustiloja, joissa joka toisella puolella virtaa kylmä ja joka toisella kuuma virtausaine. Yksittäisissä levyissä on usein muotoiltuja uria, jotka vahvistavat levyä paine-erojen vuoksi sekä tuovat sille lisää pinta-alaa. Lisäksi urat aiheuttavat turbulenssia virtausaineeseen, mikä puolestaan lisää lämmönvaihtimen lämmön-vaihtumiskertoimen arvoja. Levyt on mahdollista irrottaa toisistaan, mikä helpottaa niiden puhdistusprosessia. Tämä tosin lisää puhdistusaikaa ja työtä. Levyjä voidaan myös lisätä ja vähentää tarpeen mukaan, mikäli vaihtimen lämmönvaihtoarvoja on syytä muuttaa.

Muita yleisiä luokittelutapoja on luokitella lämmönvaihtimet virtausaineiden mukaan seuraavasti: neste–neste, kaasu–kaasu ja neste–kaasu. Neste–neste-lämmönvaihtimista suurin osa on vaippaputkilämmönvaihtimia, jotka ovat hyvin soveliaita tilanteisiin, joissa kummankin puolen väliaineen lämmönvaihtokerroin on suurin piirtein samaa suuruusluokkaa, korkeintaan 2–3-kertainen toiseen verrattuna. Kaasu–kaasu-lämmönvaihtimissa vaatimukset poikkeavat suuresti neste–neste-lämmönvaihtimien vaatimuksesta. Monesti lämmönsiirtokertoimet ovat suhteessa 1/10 – 1/100. Tämä johtaa siihen, että vaadittava lämmönvaihtopinta-ala täytyy olla huomattavan suuri. Toisaalta kaasu–kaasu-vaihtimien rakenteen ei tarvitse olla niin vahva kuin neste–neste-vaihtimien rakenne on. Näissä vaihtimissa kaasu kulkee useimmiten putkissa, joissa on ripoja, eli niin sanottuja ulokkeita niin sisä- kuin ulkopinnoillakin. Tavallisin tällaisten lämmönvaihtimien sovellusalue on kaasuturbiinilaitoksissa. Näistä on olemassa myös sekoitettu versio, neste–kaasu-lämmönvaihdin, jossa lämpöä vaihdetaan nesteen ja kaasun välillä (tavallisesti veden ja ilman). Yleisimmin tällaisia jäähdyttimiä on erilaisissa moottoreissa, esimerkiksi auton moottoreissa. Kuitenkin tämän työn kannalta tärkeimmät tyypit ovat neste–neste-vaihtimet sekä vaippaputkivaihtimet ja levylämmönvaihtimet. (Kivioja 2003, 126–143; Mansukoksi 1975, 1–52.)

3.3 Lämmönvaihtimien likaantuminen

Ehdottomasti yleisin lämmönvaihtimien käyttöhäiriö on likaantuminen. Likaantuminen aiheuttaa vaihtimen virtausvastusta, mikä johtaa painehäviöön. Myös lian ja sakkojen lämmönvaihtokerroin on suurempi kuin lämmönvaihdinvirtausten erottava seinämä, mikä edelleen heikentää tehoa. Vesi on yleisimpiä lämmönvaihtoväliaineita helpon saatavuutensa vuoksi. Lisäksi sen ominaislämpökapasiteetti on korkea. Mutta vedellä on huomattava korroosiovaikutus erityisesti teräkseen, varsinkin jos veteen on liuennut happea. Tämä tietenkin asettaa tiettyjä vaatimuksia lämmönvaihtimien materiaaleille. Myös kiintoaineita sisältävät nesteet likaavat lämmönvaihtimia nopeasti.

Lika kertyy kuumille lämmönvaihtopinnoille. Liian hitaasti virtaava neste aiheuttaa likaantumista, sillä nesteessä olevat kiintoaineet kerääntyvät pinnoille ja erityisesti mutkiin ja käännöskohtiin. Likaantumista voidaan estää asettamalla vaihtimien virtausnopeus riittävän suureksi, että kiintoaine ja lika pysyvät virtauksessa mukana, eli suspensiona. Veden ollessa kiintoaineena yleinen nyrkkisääntö on pitää virtausnopeus vähintään 1 m/s, jotta kiintoaineet eivät jää likaamaan lämmönvaihtimia. Koska lämmönvaihtimien vaipassa oleva virtaus on yleensä hitaampaa kuin putkissa, on kiintoainetta sisältävä neste sijoitettava virtaamaan lämmönvaihtimien putkiin.

Ongelmana likaantumisessa on myös pinnoille kertyvä mineraalikerros, toisin sanoen sakka, esimerkiksi rautapitoinen sakka ja silikaatit sekä kalkkikerrostumat. Tästä tyypillinen esimerkki on kattilakivi höyrykattiloissa. Mikäli veden lämpötila on yli 50 °C, sakkojen muodostuminen on hyvin voimakasta. Tätä pyritään ehkäisemään pitämällä lämpötila alle 50 asteen, mutta se ei läheskään aina ole mahdollista suuren lämmönvaihtokapasiteetin vuoksi. Mineraalikerrostumien lisäksi lämmönvaihtimien pinnoille kertyy orgaanista kerrostumaa, esimerkiksi levää ja limaa. Muita likaantumiseen vaikuttavia tekijöitä on öljylaitteistoissa kuumissa oloissa kiinni palava öljy. Myös lämmönvaihtimen valmistusvaiheessa varastorasvojen ja öljyjen jäämät ovat likaa, joka on puhdistettava ennen lämmönvaihtimen käyttöönottoa. (Mansukoksi 1975, 1–52.)

4 PEITTAUSKEMIKAALIT JA TEHOAINEET

Peittauskemikaalit ovat puhdistuskemikaaleja, joiden tehtävänä on poistaa hapettumakerrokset, sakkakerrokset ja fouling-ilmiöstä kerääntynyt biologinen likakerros. Toisin sanoen lämmönvaihtimissa käytettävät peittauskemikaalit puhdistavat pinnoille kerääntyneen likakerroksen huollon yhteydessä sekä ennen lämmönvaihtimien käyttöönottoa. Peittauskemikaalit poistavat rasvan, kerrostumat ja muut mahdolliset jäänteet. Samalla peittauskemikaalit voivat passivoida metallipintoja. Peittauksella saadaan lisättyä metallipintojen käyttöikää ja se parantaa korroosion-kestoa, ulkonäköä ja fysikaalisia ominaisuuksia, kuten lämmönjohtavuutta. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 568)

Tehoaineina käytetään yleisimmin happoja ja emäksiä. Tensidit, inhibiitit ja vaahdonestoaineet ovat myös merkittävässä asemassa peittauksen tehoaineina.

4.1 Hapot

Happoliuospeittauksessa liuos valitaan metallin vaatimusten mukaan. Liuoksen pitäisi poistaa hapettumakerrokset aiheuttamatta vauriota itse metallipinnalle. Kemikaaleihin lisätään myös suoja-aineita, jotka ”suojelevat” perusmetallia. Esimerkiksi teräksen peittaukseen käytetään rikki-, suola- tai fosforihappoliuoksia. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 572)

4.2 Emäkset

Emäspeittaukseen käytetään useimmiten natriumhydroksidiliuosta, jonka väkevyys on 50–80 prosenttia. Sakkojen ja ruosteen poisto on hitaampaa kuin happamilla liuoksilla,

mutta emäspeittäus poistaa vielä lisäksi orgaanisia epäpuhtauksia. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 572)

4.3 Tensidit

Tensidit ovat aineita, jotka ovat orientoitu siten, että molekyylin toinen pää on hydrofiilinen, eli vesihakuinen ja toinen pää on hydrofobinen eli vettä hylkivä. Kun näiden molekyylien määrä vedessä ylittää tietyn rajan, niin veden pintajännitys alenee. Tämä edesauttaa nestettä kulkeutumaan pintamateriaalin pienimpiinkin rakoihin. Tasainen kosketus nesteen ja materiaalin välillä vähentää korroosiota. (Napari 2001, 264)

4.4 Inhibiitit

Inhibiitit pienentävät hyvin pieninäkin pitoisuuksina metallien korroosionopeutta. Inhibiitti-tyyppisiä ovat hapettavat inhibiitit, kalvon muodostajat sekä adsorptioinhibiitit. Inhibiitit ovat hyvin valikoivia, ja siksi niiden käyttö jakaantuu hyvin laajalle alueelle ja metallikohtaisesti. Taulukosta 1 näky eri inhibiittien soveltuvuus tietyille metalleille.

Taulukko 1. Inhibiittien tehokkuus neutraalilla pH-alueella							
Inhibiitti							
Metalli	kromaatit	nitriitit	bentsoaatit	boraatit	fosfaatit	silikaatit	tanniinit
hiiliteräs	tehokas	tehokas	tehokas	tehokas	tehokas	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas
valurauta	tehokas	tehokas	tehoton	vaihteleva	tehokas	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas
sinkki ja sinkkiseokset	tehokas	tehoton	tehoton	tehokas	---	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas
kupari ja kupariseokset	tehokas	osittain tehokas	osittain tehokas	tehokas	tehokas	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas
alumiini ja alumiiniseokset	tehokas	osittain tehokas	osittain tehokas	vaihteleva	vaihteleva	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas
lyijy-tina juotokset	---	agressiiviner	tehokas	---	---	kohtalaisen tehokas	kohtalaisen tehokas

(Suomen Korroosioyhdistys 1988, 788)

4.5 Vaahdonestoaineet

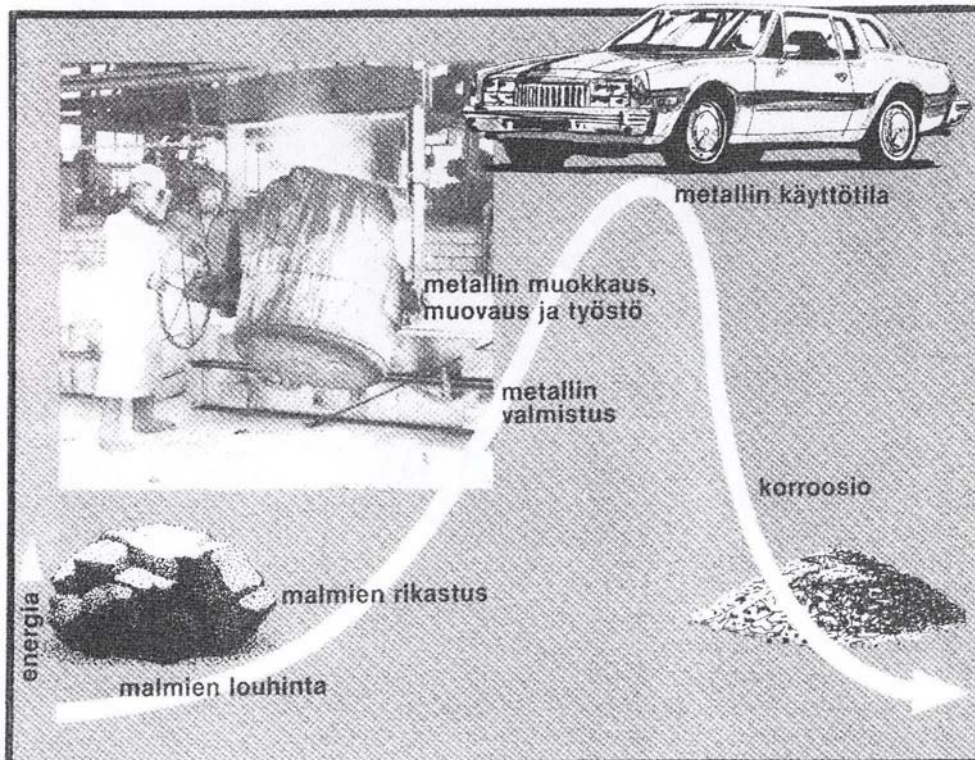
Joillain tehoaineilla on tapana vaahtoutua ja siten aiheuttaa ilmakuplia peittäuskemikaaleihin ja estää nesteen tasainen kosketuspinta metalliin. Esimerkiksi tensidit vaahtottavat liuosta tehokkaasti, mutta vaahtoutumisesta huolimatta tensideitä on käytettävä hyvän lopputuloksen aikaansaamiseksi, joten myös vaahdonestoaineille on tarvetta. Eri tehoaineiden oikeanlaiset suhteet oikeille metallipinnoille oikeanlaisessa ympäristössä takaavat parhaimman lopputuloksen peittäuksessa ja siten tietysti myös suojauksessa ja puhdistuksessa.

5 KORROOSION TEORIA

Tässä kappaleessa tarkastellaan korroosiota yleisesti kirjallisuutta apuna käyttäen. Tarkastelun kohteeksi on valittu ne materiaalit, jota ovat oleellisia tähän työhön ja olennaisia myös Suomen KL-Lämmön kannalta. Samoja metalleja on käytetty myös työhön liittyvissä korroosiokokeissa jotka on suoritettu koulun laboratoriossa.

5.1 Yleistä korroosiosta

Korroosiossa eli syöpymisessä materiaali ja rakenne pyrkivät alkuperäisiin rakennesiinsa ja olomuotoonsa. Esimerkiksi metallien korroosiossa monimutkaisten ja vaativien sekä paljon energiaa vievien valmistusprosesseiden tuote muuttuu ajan kuluessa lähes alkuperäiseen olomuotoonsa. Itse korroosio-sanaa käytetään nykyään kuvaamaan kaikenlaisten rakennemateriaalien tuhoutumista kemiallisesti ja sähkö-kemiallisesti ympäristön vaikutuksesta. Korroosiosta voidaan myös käyttää nimitystä ”käänteinen metallurgia”. Kenties tunnetuin korroosioreaktio on raudan hapettuminen, eli raudan ruostuminen. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 17)



KUVIO 2. Metallin elinkaari. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 18)

Teknisen kehityksen myötä korroosion tunteminen on korostunut jatkuvasti. Teollisuuden ja muun teknisen toiminnan jatkuva tehokkuuden kasvava tarve on asettanut eri materiaalien vaatimustasot yhä korkeammalle eli kestävämpään paremmin ja pidempään. Eri metallit ja materiaalit joutuvat kestävämpään enemmän mekaanista ja kemiallista rasitusta sekä suuria lämpötiloja ja niiden vaihtelua. Korroosio vaikuttaa myös ympäristöön, kustannuksiin ja turvallisuuteen. Eräs arvio on, että 25–30 prosenttia maailmassa vuosittain tuotetusta teräksestä tuhoutuu korroosion vaikutuksesta.

Korroosio voidaan jakaa eri tavoin ulkonäön ja erilaisten vaikuttavien tekijöiden perusteella. Tasainen, kaikkialla kappaleessa tapahtuva korroosio on harvinainen, sillä useimmiten korroosiota tapahtuu hyvin paikallisesti. Esimerkkejä paikallisesta korroosiosta on piilokorroosio likapinnan alla ja rakokorroosio metallisilla tiiviste-pinnoilla. Pistekorroosio on taas tyypillinen hyvin passivoituneille metalleille, eli metalleille jotka pystyvät torjumaan korroosion vaikutusta. Jännityskorroosion ja korroosioväsymisen yhteydessä korroosiotuotteiden määrä on erittäin vähäinen.

Erilaisissa virtauksissa tapahtuu eroosiokorroosiota ja eri pintojen välisessä kitkassa tapahtuu hankauskorroosiota. Nämä molemmat ovat myös hyvin paikallisia. Erityisen voimakas ja tuhoissa kavitaatiokorroosio syntyy virtauksien, paineenvaihteluiden, lämpötilojen ja eri korroosioympäristöjen yhteisvaikutuksesta. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 18-24)

5.2 Metallien korroosio

Metalleilla on erilainen syöpymistäipumus. Tätä kuvaa hyvin saksalaisen fyysikon Walther Ernstin esittämä sähkökemiallinen jännitesarja. Sarjan positiivisessa päässä sijaitsevat jalot metallit, kuten hopea ja kulta, kestävät äärimmäisen hyvin erilaisissa korroosioympäristöissä. Tästä syystä jaloja metalleja on myös mahdollista löytää luonnosta puhtaina. Sarjan toisessa päässä sijaitsevat epäjalot metallit, kuten kalsium ja magnesium, reagoivat hyvin helposti ympäristönsä kanssa. Tästä syystä näitä epäjaloja metalleja tuskin löytyy puhtaina luonnosta. Ensiksi on löydetty jalot metallit, muun muassa kulta, jota on käytetty ja pidetty arvossa hyvin kauan. Sitten on otettu käyttöön helposti valmistettavat metallit, kuten kupari. Alkali- ja maa-alkalimetallien käyttö on uudempaa historiaa.

Atomit ovat metallisessa tilassa hyvin järjestäytyneitä metallin kolmiulotteisen hilarakenteen vuoksi. Metallin pinnassa olevan atomin taipumus reaktioon ympäristönsä kanssa on suurempi kuin metallin sisässä olevien atomien. Pinnassa olevien atomien sidokset ovat vapaina korroosioympäristöön ja energiatila on täten suurempi, kun taas sisällä olevia atomeja ympäröivät naapuriatomit. Tästä syystä täysin puhdasta metallipintaa ei olekaan, vaan pintaan on aina adsorboitunut ioneja tai molekyyliä. Metalleissa on myös jäämiä epäpuhtauksista ja vieraista molekyyleistä, jotka ovat peräisin valmistusprosessista ja malmista. Nämä vaikuttavat usein voimakkaasti korroosioreaktion syntyyn.

Metallien korroosio voidaan jakaa karkeasti myös kemiallisiin korroosioreaktioihin sekä sähkökemiallisiin korroosioreaktioihin. Tässä työssä tarkastellaan vain kemiallisia korroosioreaktioita, sillä sähkökemialliseen korroosioon liittyy aina sähkövarausten siirtoa eri rajapintojen läpi. Sähkökemiallinen korroosio perustuu kahden eri metallipinnan tai metallikappaleen välille, joilla on eri potentiaali. Potentiaali tarkoittaa tässä taipumusta joko hapettumiseen tai liukenemiseen. Myös saman metallin eri pinnat voivat muodostaa korroosioparin. Tämä määräytyy metallin rakenteellisten erojen tai liuoksen väkevyyden mukaan. Kemiallisessa korroosiossa metallipinta reagoi ympäristönsä kanssa suoraan. Näin ollen reaktioon ei liity sähkövarausta eikä metallin pinnalle ei synny korroosiotuotekerrosta.

Seuraavaksi tarkastellaan tässä työssä testattujen metallien korroosiokestävyyttä sekä korroosioreaktioita.

5.2.1 Ruostumaton teräs

Ruostumaton teräs on historiallisesti melko uusi, alle sata vuotta vanha keksintö. Rautaseos, mikä sisältää vähintään 12 prosenttia kromia, kestää todella hyvin ruostumista, mistä syystä tämänkaltaiset teräkset ovat saaneet yleisnimen ruostumaton teräs. Ruostumattoman teräksen tärkeimmät alkuaineet ovat raudan lisäksi kromi ja nikkeli. Kromin ja nikkelin suhde vaikuttaa ruostumattoman teräksen laatuun. Rakenteensa vuoksi teräkset luokitellaan karkeasti kolmeen eri ryhmään: austeniittisiin teräksiin, ferriittisiin teräksiin ja martensiittisiin teräksiin. Lisäksi on sekoitus, ferriittis-austeniittiset teräslaadut. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 455)

Austeniittiset teräslaadut ovat kaikkein eniten käytettyjä ruostumattomia teräksiä. Tätä teräslaatua on tarjolla hyvin monenlaisia sekoitussuhteita tarpeista ja käyttökohteista riippuen.

Austeniittisten terästen etuja ja haittoja korroosio-olosuhteissa ovat:

- hyvä korroosion kesto hapettavissa olosuhteissa
- molybdeeniseostettuina myös pelkistävässä olosuhteissa hyvä korroosionkesto
- taipumus pistekorroosion ja rakokorroosioon kloridiliuoksissa
- herkistyminen raejakokorroosioon happoliuoksissa (voidaan kuitenkin välttää esimerkiksi käyttämällä niukkahiilistä terästä, <0,03 %)
- usein huono kestävyys suolahapossa ja rikkihapossa (pH:sta ja lämpötilasta riippuen)

(Suomen Korroosioyhdistys 1988, 456)

Ferriittisiä teräksiä käytetään vielä melko vähän, mutta ne ovat yleistymässä kehityksen myötä. Ferriittisten ruostumattomien terästen etuja ja heikkouksia korroosion kestossa on muun muassa:

- hyvä kesto hapettavissa olosuhteissa
- jännityskorroosion kesto
- pelkistävässä olosuhteissa parempi kuin martensiittisillä laaduilla, mutta huonompi kuin austeniittisillä laaduilla

Martensiittisillä ruostumattomilla teräksillä on ominaisuutena kyky lujittua lämpökäsittelyssä, eli karkaisussa. Teräksen edut ja haitat korroosion suhteen ovat:

- hyvä korroosion kestävyys neutraaleissa sekä emäksisissä ympäristöissä
- hyvä jännityskorroosion kesto
- heikohko korroosionkestävyys happamissa ympäristöissä, verrattuna muihin ruostumattomiin teräslaatuihin

(Suomen Korroosioyhdistys 1988, 458)

Ruostumattomien terästen korroosionkestävyys perustuu teräksen pinnan passivoitumiseen. Erityisesti happamissa liuoksissa passivoitumispotentiali on erityisen hyvä. Passivoitumien tarkoittaa metallin pintaan korroosioreaktion tai elektrolyytin liuottaneiden korroosiotuotteiden reaktion kautta muodostuvaa kerrosta tai kalvoa. Kalvo tai kerros syntyy myös hapen läsnä ollessa. Se myös vaikeuttaa korroosioreaktion

nopeutta säätelevää osaprosessia. Passivoitumien saattaa pysäyttää korroosion täysin. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 90)

Happoliuokset

Sitruunahapossa ferriittiset teräkset kestävät melko huonosti. Austeniittiset teräkset kestävät tyydyttävästi sitruunahapossa aina 40–50 prosentin väkevyyteen asti. Parhaiten kestävät, ja väkevimmissä pitoisuuksissa, runsaimmin saostetut teräkset, kuten Alloy 20. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 395)

Suolahapossa eivät austeniittiset teräkset kestä missään väkevyydessä. Suolahappopesu ei ole suositeltavaa tavanomaisille ruostumattomille teräksille. Jäännöskloridi voi aiheuttaa jännityskorroosiota korkeissa lämpötiloissa. Kloridit myös rikkovat passivoituneen pintakerroksen, mikä aiheuttaa pistekorroosiota. Myöskään ferriittiset ruostumattomat teräkset eivät kestä suolahappoa. Austeniittiset teräkset kestävät vain alle viisi prosenttista suolahappoliuosta. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 366)

Oksaalihappoa kestävät austeniittinen, SFS 720, ruostumaton teräs kestää noin kymmenen prosentin pitoisuuksissa 40 asteen lämpötilaan asti ja SFS 752 hieman paremmin, 25 prosenttista liuosta aina 60 asteen lämpötilaan asti. Runsaasti saostetut teräkset kestävät parhaiten oksaalihappoa.

Fosforihappo taas on korroosion suhteen melko vaaraton happo. Ruostumattomien terästen korroosiokestävyys fosforihapossa on hyvä. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 359)

Rikkihapossa ruostumattomat teräkset kattavat koko väkevyyden korroosiokestävyysvaatimukset. Kestävyys kuitenkin vaihtelee laajasti väkevyyden, lämpötilan ja virtausnopeuden muuttuessa. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 331)

Typpihapossa kromipitoiset ruostumattomat teräkset kestävät hyvin, sillä typpihappo on voimakas hapetin, eli teräksen passivoituminen on voimakasta. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 343)

Fluorivetyhapossa eivät ruostumattomat teräkset kestä. Käyttöalue tietyille austeniittisille ruostumattomille teräksille fluorivetyhapossa on alle kymmenen prosenttia. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 380)

Muurahaishapossa eivät ferriittiset ruostumattomat teräkset kestä. Austeniittinen (AISI 304L 18cr 8Ni) teräs kestää huoneenlämmössä muurahaishappoa, mutta korkeammassa lämpötilassa se ei enää kestä. Hyvin laimea, noin 1–2 prosenttinen muurahaishappo kuitenkin soveltuu ruostumattomien terästen kanssa jopa kiehumispisteeseen asti. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 386)

Etikkahappo aiheuttaa kromiteräksiin pistekorrosiota. Myös pelkästään kromia sisältävät teräkset eivät kestä etikkahapossa. Etikkahapossa yleisimmin käytettyjä teräksiä ovat standardin mukaiset SFS 757 ja SFS 752. Vedetön etikkahappo aiheuttaa kuitenkin korrosiota suurimmalle osalle ruostumattomille teräksille. Austeniittiset, runsaasti saostetut teräkset ovat kestävimpiä etikkahapossa kuin muut teräslaadut. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 393)

Yhteenvedona voidaan todeta, että runsaasti saostetut, austeniittiset ruostumattomat teräkset kestävät kaikkia happoja melko hyvin, poislukien suolahapon, fluorivetyhapon ja muurahaishapon väkevät liuokset (yli 5–10 prosenttiset). Parhaiten ruostumattomien terästen kanssa sopivat fosforihappo, rikkihappo ja typpihappo.

Emäsluokset

Emäksisten liuosten korroosiosta ei ole läheskään yhtä paljon tietoa kuin happojen aiheuttamasta korroosiosta. Terästen ja emästen korroosiovaikutuksesta on Korroosioikäkirjassa käsitelty ainoastaan esimerkein keittolaitoksista. Hapon kestävä

teräs ei välttämättä olekaan alkalinen kestävä teräs. Kuumissa alkalisissa liuoksissa on todettu ilmenevän huomattavasti jännityskorroosiota. Erityisen alttiita tälle ilmiölle on austeniittiset teräkset. On myös todettu, että korrosio, joka on alkanut austeniittisen teräksen pinnalla, onkin pysähtynyt osuessaan ferriittiseen teräspintaan. Ferriittinen ruostumaton teräs kestänee kuumia alkalisia liuoksia. (Suomen Korrosio-yhdistys 1988, 398)

5.2.2 Haponkestävä teräs

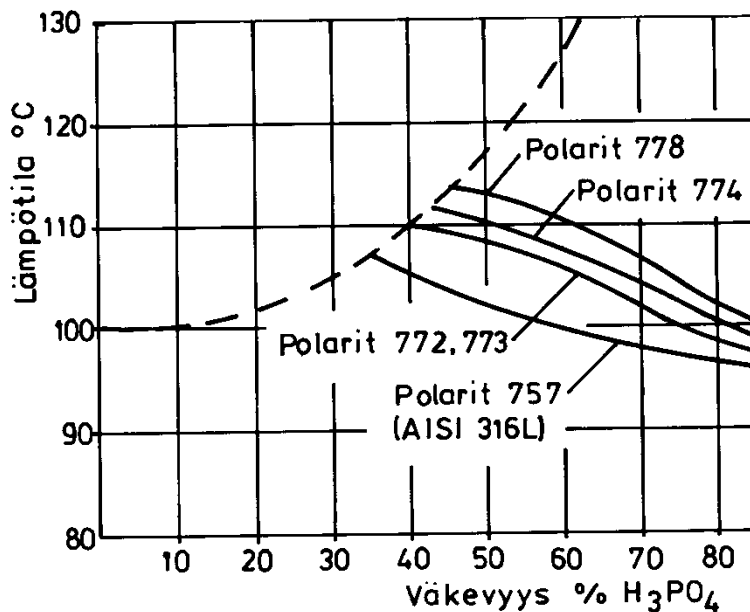
Haponkestävä teräs tunnetaan kansankielessä paremmin nimellä kirkas teräs. Usein haponkestävää terästä kutsutaan ruostumattomaksi teräkseksi, mutta on vain eräs ruostumattomien terästen laaduista. Haponkestävä teräs koostuu kromista, nikkelistä ja molybdeenista, CrNiMo-teräkset. Molybdeeni lisää ruostumattomien terästen korroosion kestävyyttä lievästi happamissa oloissa sekä pelkistävässä oloissa. Yleisin haponkestävä teräs on tuotenimeltään AISI 316 ja 316L (amerikkalaisen standardin mukaan), ja SS 2343, stainless steel. SFS-standardin mukainen haponkestävä teräs on SFS757. Tästä syystä haponkestävällä teräksellä on käytännössä hyvin samat ominaisuudet kuin edellisessä kappaleessa käsitellyllä ruostumattomalla teräksellä.

Happoliuokset

Haponkestävä teräs, eli molybdeeniä sisältävä teräs kestänee 10 %:n **rikkihappoa** 25 °C:een lämpötilassa ja 90–98 %:sta rikkihappoa alle 40 °C:een lämpötilassa. Epäpuhtaudet rikkihapossa kohottavat myös haponkestävien terästen kestävyyttä alle 60 % :n liuoksessa.

Typpihapon 65 %:n ja sitä laimeammissa liuoksissa vain hieman molybdeeniä sisältävät haponkestävät teräkset kestänee parhaiten. Väkevässä ja kuumassa typpihapossa eivät haponkestävät teräkset oikein kestä molybdeenipitoisuuden vuoksi. (Suomen Korrosioyhdistys 1988, 343)

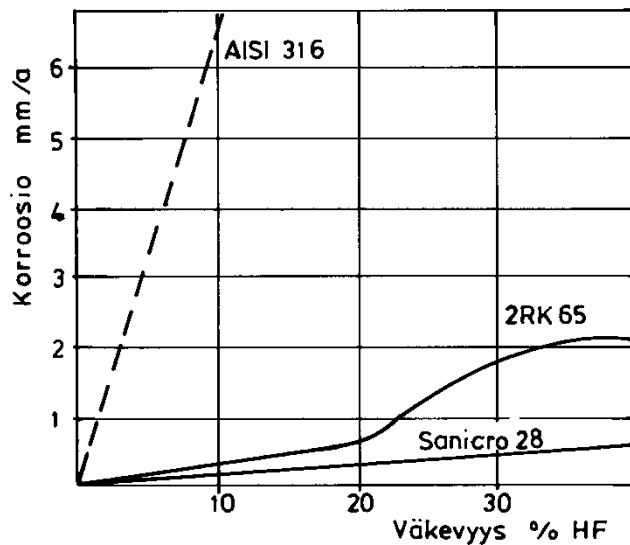
Fosforihapoissa yleisimmin käytetty metalli on nimenomaan AISI 316L, eli haponkestävä teräs. Fosforihapon lämpötila tässä tapauksessa tulee kuitenkin olla alle 50 °C. Haponkestävä teräs kestää erittäin hyvin alle 30 %:ssa puhtaassa fosforihapossa sekä hyvin myös alle 50 %:ssa puhtaassa hapossa. Teollisuusfosforihapossa, alle 30 %:ssa liuoksessa haponkestävä teräs kestää hyvin, mutta 50 %:ssa teollisuushapossa kestävyys häviää. Kuviossa 3 esitetään yleisimmin käytetyn teräksen kestävyys fosforihapossa. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 360)



KUVIO 3. Fosforihapon vaikutus teräksen lämpötilan ja väkevyyden funktiona (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 359)

Suolahapossa haponkestävät teräkset kestävät hyvin. Mutta tämä pätee vain hyvin laimeissa suolahappopitoisuuksissa, alle viiden prosentin väkevyyksissä. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 366)

Haponkestävä teräs, AISI 316, eivät kestä kovin väkevää **fluorihappoa**. Käyttöalue on alle 10 m-% ja noin 20 °C. Alla olevassa kuvaajassa on kolmen eri teräslaadun syöpymisnopeus fluorivetyhapossa. Kuviossa 4 on esitettyä korroosio hapon pitoisuuden funktiona. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 380)



KUVIO 4. Erilaisten terästen kestävyys fluorivetyhapossa (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 381)

Haponkestävät teräkset kestävä **muurahaishapossa** hieman paremmin kuin muut ruostumattomat teräkset. Mutta haponkestävä teräs ei kestä kovin hyvin yli kymmenen prosentin pitoisuuksissa. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 386)

Etikkahapossa haponkestävät teräkset kestävä hyvin sekä korkeita pitoisuuksia että lämpö-tiloja. Haponkestävä SFS757 on yleisimmin käytetty teräs etikkahapossa. Mutta epä-puhtautena esiintyvä kloridi aiheuttaa pistekorroosiota ja jännityskorroosiota teräksiin. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 393)

Sitruunahapossa haponkestävä teräs kestävä hyvin, aina 50 m-% väkevyyteen asti kiehumislämpötilassa (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 395).

Oksaalihapon kiinteän suolan käsittelyyn soveltuu erinomaisesti haponkestävä teräs, SFS 757. Haponkestävä teräs kestävä 60 °C:ssa 25 m-%:ta nestemäistä oksaali-happoa.

Yhteenvetona edellä mainituista hapoista todettakoon, että haponkestävä teräs kestää rikkihappoa (paremmin väkevää kuin laimeaa), fosforihappoa (alle 50 °C), laimeaa suolahappoa, laimeaa fluorihappoa, etikkahappoa, sitruunahappoa ja oksaalihappoa. Poikkeuksen tekee typpihappo, missä teräs ei kestä kovin hyvin.

Emäsluokset ja haponkestävä teräs

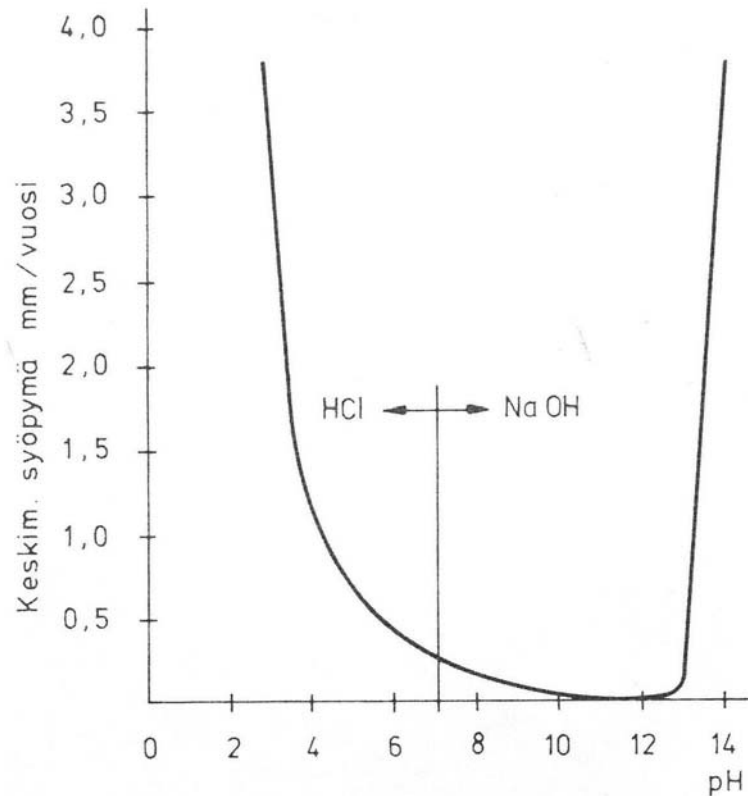
Haponkestävä teräs, eli teräs joka sisältää molybdeeniä, kestää emäksisiä liuoksia paremmin kuin ruostumaton teräs, joka ei sisällä molybdeeniä. Tästä on esimerkki Korroosiokäsikirja –kirjassa. Esimerkki on sivulla 401. Siinä kerrotaan, että eräässä tehtaassa laajennettiin keittämiä, mutta keittimet, jotka olivat tehty molybdeeniä sisältämättömästä teräksestä, eivät kestäneet. Kunnes keittimet vaihdettiin 75 %:a ferriittiä sisältävään aineeseen, joka sisälsi myös molybdeeniä, ongelma ratkesi. Korroosio käsikirjan taulukon mukaan haponkestävä teräs kestää 78 m-%:sta NaOH-luosta aina 100 °C:een asti. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 398)

5.2.3 Sinkitty teräs

Sinkitty pinnoite teräksessä suojaa korroosiolta kahdella eri tavalla. Sinkkipinnoite muodostaa sulkukerroksen, mikä estää kosteuden ja hapen tunkeutumisen teräksen pinnalle. Se myös antaa katodisen suojan naarmujen, kolhiintumisien, leikkausreunojen sekä muiden vastaavien kohdalla. Sinkillä on taipumus syöpymiseen, sillä se on epäjalometalli. Syöpymistuotteet muodostavat pinnalle korroosion jatkumista estävän suoja-kalvon.

Happoliuokset ja emäsluokset

Erityisen merkittävää sinkityn teräksen korroosiossa on nesteliuoksen pH. Happamissa liuksissa, pH alle 6, sinkin korroosio on nopeaa, mutta neutraalilla alueella korroosionopeus stabiloituu.



KUVIO 5. Sinkin syöpyminen eri pH-arvoihin laimennetuissa HCl- ja NaOH-luoksissa (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 597)

Kuvassa on esitetty myös sinkityn pinnoitteen kestävyys emäksisissä olosuhteissa. Sinkitty teräs kestää emäksisyyttä melko pitkälle, aina 12,5 pH:n asti. Tämän jälkeen syöpyminen on erittäin voimakasta. Kuvassa happona on suolahappo ja emäksenä natriumhydroksidi. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 597)

Sinkitty teräs ja vesi.

Sinkkipinnoite syöpyy erilaisissa vesissä eri tavoin. Kovissa vesissä, joissa on magnesiumia ja kalkkia sinkkipinnoite syöpyy hitaasti. Kalkki ja hiilihappo synnyttävät sinkityn teräksen pinnalle niukkaliukoisia karbonaatteja. Karbonaatit suojaavat pintaa jatkuvalta korroosiolta. Pehmeässä vedessä sinkitty teräs syöpyy nopeammin, koska pehmeissä vesissä ei ole suoloja, eikä täten suojaavaa kerrosta voi syntyä. Myös virtausnopeuden vaikutus on suuri. Jos virtausnopeus on suurempi kuin 0,5 m/s, neste vie syntyvän suojakerroksen mennessään ja täten jatkuva korroosio kiihtyy. Myös lämpötila vaikuttaa korroosioon. Mikäli veden lämpötila kohoaa 55 °C:n yläpuolelle,

korroosio kiihtyy, koska korroosiotuotteiden kiinnittyvyys sinkkipinnoitteeseen heikkenee. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 598)

5.2.4 Mustarauta

Mustarautana käsitetään arkikielessä kaikki yleiset raudat sekä ruostuvat teräkset. Näihin voidaan lukea valuraudat, hiiliteräkset sekä niukkaseosteiset teräkset. Raudan ja teräksen suuri suosio perustuu hintaan ja suureen vaihtoehtojen määrään. Raudan korroosionkestävyys on kuitenkin suhteellisen huono. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 444)

Mustarauta hapoissa.

Raudan korroosio hapoissa on suhteellisen heikkoa alhaisilla pH-lukemilla. Inhibiittejä käyttämällä korroosion nopeutta voidaan kuitenkin säädellä hyvin pitkälti. Hiiliteräksellä on melko hyvä korroosionkesto väkevissä epäorgaanisissa hapoissa, kuten **fluorivetyhapossa** ja **rikkihapoissa**, kun niiden väkevyydet ylittävät 60 m-%. Piiraudalla on hyvät kestävyudet **suolahapossa** sekä **rikkihapossa** kaikissa väkevyyksissä. Valurauta käyttäytyy kuten hiiliteräs. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 450)

Hiiliteräs on putkistojen ja säiliöiden yleisin raaka-aine **rikkihapolle**. Se kestää hyvin väkevää rikkihappoa alle 30 °C:n lämpötilassa. Virtausnopeuden on kuitenkin oltava alhainen, alle 0,8 m/s. Hiiliteräs syöpyy aktiivitisissa, joten alle 50 %:n väkevyydessä syöpyminen on voimakasta. Seostamaton valurauta käyttäytyy rikkihapossa samoin kuin hiiliteräs, mutta kestää kuitenkin hieman paremmin. Piivalurauta kestää parhaiten rikkihappoa, myös matalissa pitoisuuksissa. Piivalurauta kestää parhaiten myös **typpihapossa**, 50 %:n väkevyydessä ja ylikin. Hiiliteräs ja valurauta eivät kestä **fosforihapossa**. 10 m-% **suolahappoa** voidaan käyttää hiiliteräksille puhdistuksessa aina 150 °C:n lämpötilaan asti, mikäli liuoksessa käytetään inhibiittejä. Piivalurauta

kestää alle 40 %:n suolahappoa 30 °C:een lämpötilaan asti. Hiiliteräkset eivät kestä **muurahaishappoa** missään väkevyyksissä. Piivalurauta sen sijaan kestä kaikissa väkevyyksissä. **Etikkahappo** on haitallista, mutta **sitruunahappoa** piivalurauta kestä suhteellisen hyvin. Hiiliteräs ja valurauta eivät kestä **oksaalihappoa**, mutta piivalurauta taas kestä suhteellisen hyvin jopa sadassa asteessa. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 323-397)

Mustarauta alkaleissa.

Raudan passivoitumiselle on paljon paremmat olosuhteet alkalisissa liuoksissa kuin neutraaleissa tai happamissa. Tämän vuoksi hiiliterästä käytetään paljon alkalisissa liuoksissa, kun pH on välillä 12–13. Suuret kloridipitoisuudet ovat kuitenkin haitallisia aiheuttaen pistekorroosiota. Hiiliteräs soveltuu myös väkeviin lipeäliuoksiin. Nikkelillä varustettu valurauta kestä natriumhydroksidia aina kiehumispisteeseen asti.

Korkeissa lämpötiloissa sekä alkalipitoisuuksissa rautaseokset kuitenkin alkavat kärsiä hauraudesta, lipeähauraudesta, jota kutsutaan myös jännityskorroosioksi. Korkeat lämpötilat tarkoittavat yli sataa astetta laimennetuissa ja pH:n ollessa 12–13 ja 50 celsiusastetta väkevissä laimentamattomissa liuoksissa.

5.2.5 Kupari

Kuparimetalleihin vaikuttavat kaikkien tavallisimpien metallien korroosiomuodot. Mutta yleisesti ottaen kuparien korroosionkestävyys on hyvä. Kupari on jokseenkin jalo metalli, eli sen taipumus reagoida ympäristönsä kanssa on vähäinen. Tämä saa aikaan hyvän korroosion keston. Merkittävää korroosiota alkaa esiintyä vasta, kun kupari on sellaisessa ympäristössä, jossa on hapettavaa ainetta. Tämä tarkoittaa happipitoista vettä tai hapettavaa happoa. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 497)

Kupari ja hapot.

Kuparimetalleja voidaan käyttää ei-hapettavien happojen hapettomissa ja vähähappisissa liuoksissa. **Etikkahappo**, **riikkihappo** ja **fosforihappo** kuuluvat näihin happoihin. Kuparimetallit syöpyvät kuitenkin voimakkaasti hapettavissa hapossa. Korroosionopeus kasvaa voimakkaasti kuumissa ja väkevissä liuoksissa. Orgaanisten happojen vaikutus on vähäisempää kuin epäorgaanisten happojen vaikutus.

Rikkihappo, mikäli mukana on hapettavia epäpuhtauksia, ei sovellu kuparin kanssa yhteen. Korroosionopeus on täten erittäin suuri. On todettu, että kupari kestää 30 %:sta rikkihappoa 70 °C:n lämpötilaan asti, jos mukana on titaani-sulfaattia ja muita epäpuhtauksia. **Typpihapossa** kupari kestää huonosti. Kupari ei myöskään kestä fosforihappoa. **Suolahappoa** ei suositella, sillä korroosionopeus kasvaa suureksi jos hapossa on vähänkin hapettavia epäpuhtauksia. Puhtaassa **muurahaishapossa** kupari kestää hyvin. Myös puhtaassa **etikkahapossa** kupari kestää hyvin kaikissa väkevyyksissä aina kiehumislämpötilaan asti, mutta hapettavat epäpuhtaudet aiheuttaa syöpymistä. Kuparimetallit kestävät **oksaalihappoa** suhteellisen hyvin.

Kupari ja emäsluokset.

Kuparia voidaan käyttää natriumhydroksidiliuoksessa sekä kaliumhydroksidiliuoksessa huoneen lämmössä. Kuparimetallit kestävät laimeita alkaliliuoksia hyvin. Ammoniakki vedettömänä ei sanottavasti syövytä kuparia, mutta kosteana kylläkin. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 500)

Kupari on kuitenkin alkalisissa ympäristöissä melko epävarma materiaali, mutta on tilanteita joissa kuparia on käytettävä sen lämmönjohtokyvyn ansiosta. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 401)

Kupari ja vesi.

Kuparia käytetään hyvin paljon vesijärjestelmien rakenneaineena, sillä veden suhteen sillä on hyvä korroosionkestävyys. Vesijärjestelmissä kuparin korroosiossa puolet tapauksista johtuu itse laitteiston virheistä, ei veden syövyttävistä ominaisuuksista. Lämmitysvesissä kuparin syöpyminen on erittäin vähäistä. Tämä johtunee siitä, että lämmitysvedet ovat lähes hapettomia. Myös kovuudella ja happamuudella on osuutta asiaan. pH:n tulisi olla kahdeksan ja yhdeksän välissä ja kovuuden 4–8 °dH. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 498)

5.2.6. Messinki

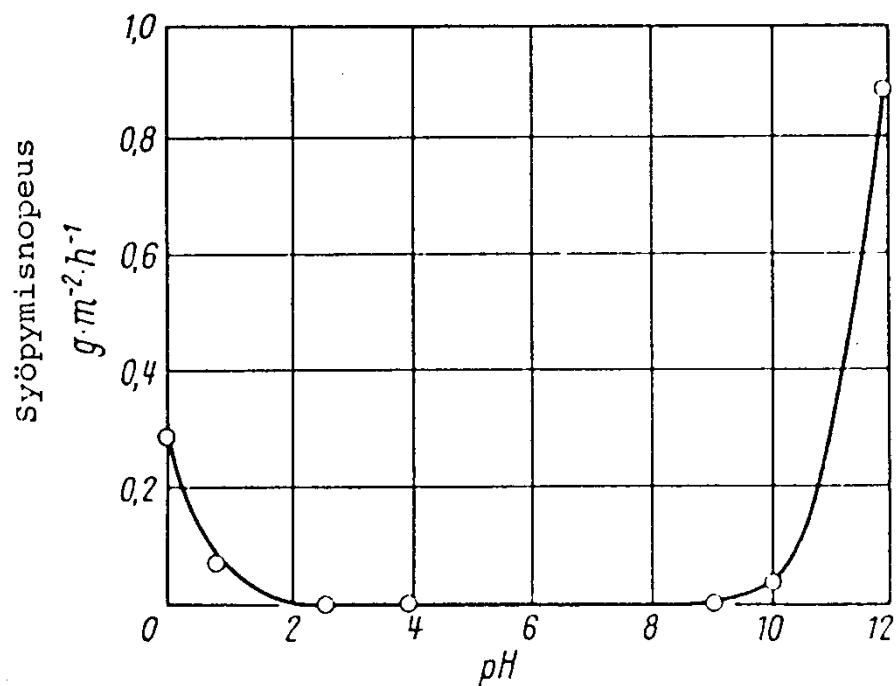
Messingit jaetaan korroosioikäyttyymisen perusteella kahteen ryhmään; yli 20 m-% sinkkiä sisältäviin messinkeihin, (erikoismessinkejä ja puna-metalleja) ja alle 15 m-% sinkkiä sisältäviin messinkeihin. Kummatkin ryhmät kuitenkin käyttäytyvät jokseenkin samalla tavalla, joten tässä työssä tarkastellaan messinkiä yhtenä ryhmänä. Lisäksi messingit ovat kupariseoksia, joten suurta poikkeavuutta kuparin korroosioon ei juuri ole. Merkittävin ero on sinkkikato.

Sinkkikato on niin kutsuttu valikoivan korroosion muoto. Sinkkikato tarkoittaa, että messingissä oleva epäjalompi sinkki liukenee ja huokoisempi kupari jää jäljelle. Eniten korroosiota tapahtuu happipitoisessa vedessä ja sen vaikutus kasvaa lämpötilan noustessa. Myös veden laatu vaikuttaa sinkkikatoon, esimerkiksi merivesi aiheuttaa korroosiota enemmän kuin makea vesi. Sinkkikadon vaara vähenee olemattomiin, mikäli kuparia on messingissä vähintään 85 m-%. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 492)

Messingin ja kuparin samankaltaisuuden vuoksi on messingin korroosio lähes identtinen kuparin korroosioikäyttyymisen kanssa. Sinkkikadossa on otettava huomioon sinkin kesto eri pH alueilla. Sinkin syöpyminen on vähäistä pH alueella 6–12,5.

5.2.7 Alumiini

Alumiini on yllättävän kestävä metalli korroosion kannalta. Alumiinin pintaa suojaa siihen muodostuva oksidikalvo. Tämä kalvo aiheuttaa alumiinin passivoitumisen ja siten muuttaa sen potentiaalin jalommaksi. Korroosion kannalta kestävin alumiini on mahdollisimman puhdas ja saostamaton, mutta puhtaassa alumiinissa vastaan tulee hinta ja lujuusominaisuudet. Alumiinin syöpyminen on pH-alueella 4,5–8,5 hyvin vähäistä, kuten kuviosta 6 nähdään.



Kuva. 10.8.2. Alumiinin syöpyminen eri pH-arvoilla.

KUVIO 6. Alumiinin syöpyminen eri pH-arvoilla (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 532)

Alumiinia käytetään kemian teollisuudessa hyvin paljon sen ominaisuuksien vuoksi. Metallissa esiintyvät korroosiotuotteet ovat vaarattomia eivätkä ne pilaa tuotteen ulkonäkää.

Happoliuokset.

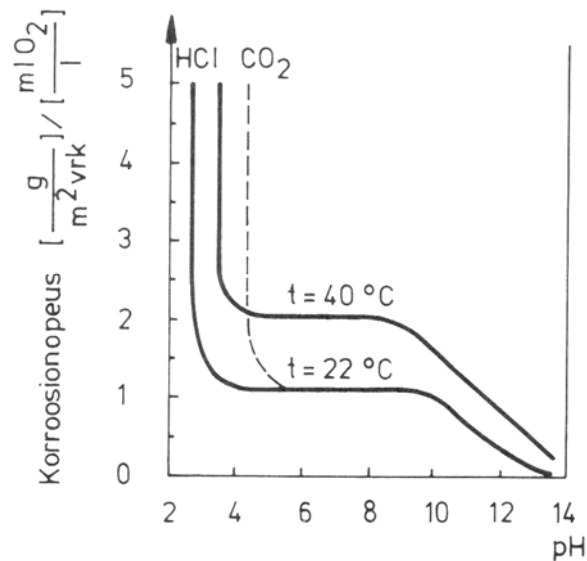
Alumiini kestää hyvin yli 95 m-% **typpihapossa**. Puhtauden täytyy alumiinilla kuitenkin olla hyvin korkea, yli 99,6 m-% alumiinia. **Fosforihapossa** alumiinin ei sanota kestävän. Alumiinin kesto on välttävää puhtaassa muurahaishapossa kaikissa väkevyyksissä, kunhan lämpötila on alle 20 °C. Sama pätee **etikkahappoon**, eli alumiini kestää kaikissa väkevyyksissä alle 25 °C:n lämpötilassa. **Sitruunahapossa** taas alumiini kestää huonosti kaikissa väkevyyksissä. Sama pätee oksaalihappoon, missä alumiini ei myöskään kestä sitä.

Emäsluokset.

Alumiini kestää ammoniakkin vesiliuoksia hyvin. Natriumhydroksidia alumiinin kanssa ei suositella. Tässä tapauksessa vaikuttaa paljon liuoksen väkevyyks ja lämpötila. Sama pätee moniin muihinkin emäksisiin materiaaleihin ja näiden kontaktia tulisi välttää. Mikäli alkalisuus ylittää pH-arvon 8,5, syöpyminen nopeutuu merkittävästi. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 531)

5.3 Vesi

Veden korroosiota edistäviin ominaisuuksiin vaikuttavat eniten veden pH, kovuus, kiintoaineet ja mikrobit. Lisäksi vaikuttavat liuenneet kaasut kuten happi ja hiilidioksidi. Veteen liuennut happi ei kiihdytä korroosio-reaktiota, vaan se vaikuttaa hidastavasti, sillä vedessä oleva happi edesauttaa ruostumattoman teräksen passivoitumisessa. Tämä kuitenkin vaatii sen, että vedessä on happea oikea määrä.



KUVIO 7. Veden happamuuden vaikutus teräksen korroosionopeuteen.

KUVIO 7. Veden happamuuden vaikutus teräksen korroosionopeuteen (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 249)

Veden pH-arvo vaikuttaa oleellisesti materiaalien korroosionkestävyyteen ja siten myös oleellisesti lämmönvaihtimiin. Kullekin metallille on oma optimaalinen pH-alue. Kriittisempiä tilanteita on sellaiset tapaukset joiden pH sijoittuu välille 5–8 ja veden mukana kulkee happea. Tämä pH-alue on yleisin vesijohtovesissä ja mukana kulkee myös happea. Vesijohtovettä käytetään useimmissa lämmönvaihtimissa.

Eri materiaalien, esimerkiksi teräksen syöpymisessä voidaan tarkastella kolmea pH-alueita, hapanta, neutraalia ja emäksistä. Happamalla alueella, eli pH on alle 5, syöpyminen on hyvin voimakasta. Tähän vaikuttaa tietysti materiaalin pinnan laatu, nesteen virtausnopeus sekä lämpötila. Neutraalialue on pH 5–10. Tällä alueella korroosionopeutta säätelee ainoastaan hapen siirtyminen metallin pinnalle. Muuten pH arvolla ei ole suurempaa merkitystä. Metallin passivoitumien suojaa korroosiolta. Alkalialueella, jolloin pH on yli 10, teräksen korroosionopeus pienenee ja passivoitumisen aiheuttava suojakalvo paksunee. Mutta pH:n ylittäessä arvon 13 korrosio taas alkaa kasvaa. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 250)

Veden kovuus vaikuttaa metallin passivoitumiseen, eli materiaalia suojaavan kalvon muodostumiseen. Veden kovuus määräytyy kalsiumsuoloista sekä magnesiumsuoloista. Korroosiota ajatellen kalsiumsuolat ovat merkittävimmät. Nämä kalsiumsuolat vaikuttavat veden kokonaishiilidioksidiin ja sitä kautta suojakalvon muodostumiseen. Suojakalvon muodostumisen edellytys on, että veden karbonaattikovuus on yli 0,36 mmol (Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺)/kg. 0,36 mmol/l luokitellaan vielä pehmeäksi vedeksi. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 251)

Karbonaattikovuus (KH) on liuoksen ominaisuus, joka kertoo, paljonko siinä on karbonaatti-(CO₃²⁻) ja bikarbonaatti- (HCO³⁻) ioneita. Karbonaattikovuus ilmaistaan joko milligrammoina litrassa tai "saksalaisina kovuusasteina" (dH). Yksi kovuusaste vastaa noin pitoisuutta 17,8575 mg/litra. Taulukossa 2 on esitetty veden kovuusasteikko.

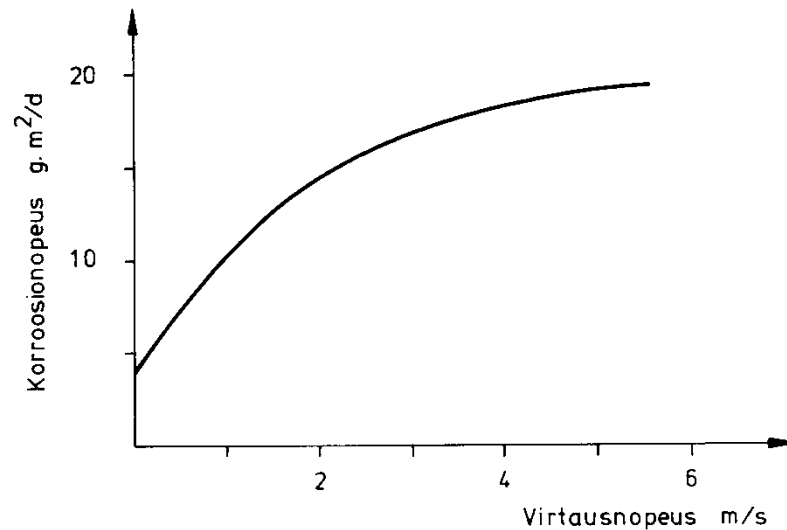
Taulukko 2. Veden kovuus

Kovuus	mg/l	dH
Erittäin pehmeää	0 - 55	0 - 3
Pehmeää	55 - 110	3-6
Keskikovaa	110 - 160	6-9
Kovahkoa	160 - 215	9-12
Kovaa	215 - 320	12-18
Erittäin kovaa	320+	18+

Lämpötilan nousulla on merkittävä vaikutus materiaalin korroosioon. Lämpötilan noustua korroosion nopeus kasvaa ja suojakalvon muodostuminen muuttuu. Suljetussa systeemissä jossa on hapen määrä vakio, korroosion nopeus kasvaa lineaarisesti. Avoimessa systeemissä taas korroosion nopeus kasvaa noin 80 celsiusasteeseen saakka, jonka jälkeen nopeus laskee. Tämän lämpötilan säätelee hapen liukoisuus. Myös metallien jalous muuttuu lämpötilan mukaan ja vaihtelee.

Nesteen virtausnopeus vaikuttaa monella tavalla materiaalien korroosioon. Esimerkiksi suuret turbulenttiset nopeudet aiheuttavat kavitaatiota sekä eroosikorroosiota.

Kuparilaitteistolla virtauksen kasvaessa eroosioroosio kasvaa merkittävästi. Kuviosta 8 näkyy miten nopeuden kasvaessa myös passivoitumisesta syntynyt suojaava kerros irtoaa metallin pinnasta herkemmin ja syövyttävien ja inhiboivien aineiden kulku metallin pinnalle kasvaa.



KUVIO 8. Virtausnopeuden vaikutus korroosionopeuteen (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 256)

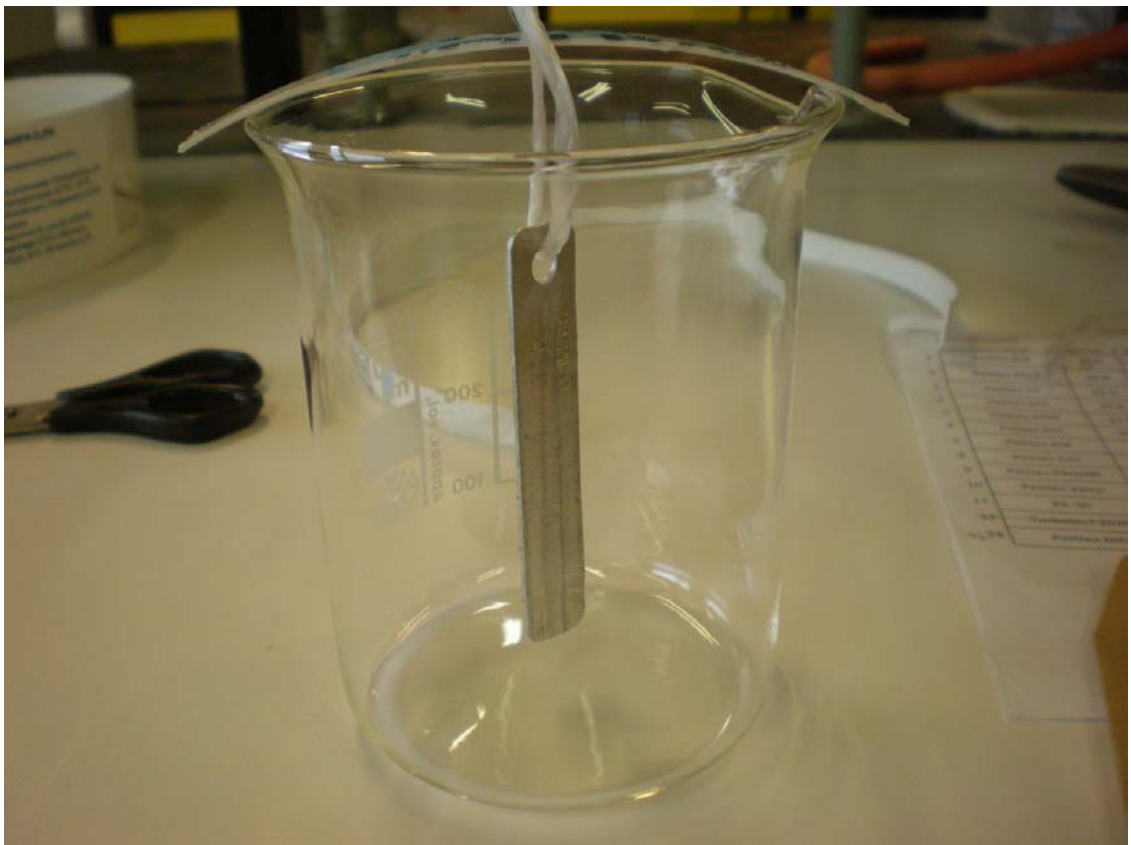
Myös virtaamaton vesi aiheuttaa syöpymiä, esimerkiksi ruostumaton teräs on herkkä pistekorroosiolle. Pistekorroosion aiheuttaa konsentraatioparien parien syntyminen, mitä puolestaan edistää seisova vesi.

5.4 Korroosiokupongit ja painohäviömittaus

Korroosion seuranta ja tutkiminen tuo tärkeää tietoa materiaalien käyttäytymisestä tietyissä ympäristöissä. Seurantamenetelmiä on olemassa monenlaisia ja niitä voidaan myös toteuttaa melko pienin kustannuksin ja yksinkertaisin menetelmin. Laboratorioissa tehtävät korroosiokokeet ja mittaukset ovat melko nopeita sekä edullisia, mutta laboratorio-olosuhteet eivät läheskään aina vastaa todellisia käyttöolosuhteita.

Luotettavimmat korroosiotulokset saadaan todellisissa käyttöympäristöissä, tosin tämä ei läheskään aina ole mahdollista tai kohtuullisessa ajassa suoritettavaa. (Suomen Korroosioyhdistys 1988, 164)

Testaustapoja on useita, mutta tässä tarkastellaan korroosiokupongeilla tehtäviä kokeita. Korroosiokupongit perustuvat painohäviömittaukseen. Painohäviömittaus on ehkä laajin käytetty mittaamuoto korroosion nopeutta tarkastellessa. Tässä testissä koekappale, eli korroosiokupongi asetetaan koeliuokseen tietyksi ajaksi. Kappale on punnittava sekä ennen, että jälkeen kokeen ja tämä painohäviö kertoo korroosion nopeuden. Kappaleina voidaan käyttää valmiita, valmiiksi punnittuja ja erityisesti tätä varten suunniteltuja korroosiokuponkeja, tai sitten yksinkertaisia metallikappaleita. Imotron-kuponkeja ja KL-Lämmön kuponkeja. Etuja tällaisessa menetelmässä on muun muassa se, että kokeesta jää konkreettinen jälki ja korroosiota voidaan tarkastella silmämääräisesti jälkeinpäin sekä kokeen aikana. Kappaleen kerrostumat voidaan havaita ja analysoida. Lisäksi painohäviökoe on edullinen, mutta melko työläs menetelmä. Kuviossa 9 on valmis Imotron-korroosiokupongi. (Suomen Korroosio-yhdistys 1988, 838)



KUVIO 9. Korroosiokupongi (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Käytössä on tapana ilmoittaa korroosion nopeus vuodessa. Yksikkönä käytetään mikrometriä vuodessa, $\mu m/a$. Tämän yksikön mittaaminen vaati hyvin tarkkoja mittausvälineitä, jotta saadaan luotettavasti todettua korroosio pituus-yksikköinä. Korroosiokokeet kestävät yleensä tunneista vuorokausiin tai viikkoihin, mikä on huomattavasti lyhyempi aika kuin yksi vuosi. Tämän vuoksi monesti tämä suure lasketaan painohäviön, materiaalin ominaismassan ja kappaleen pinta-alan avulla.

6 LABORATORIOKOKKEET

Tämän työn laboratoriossa tehtävät kokeet käsittävät korroosiokokeet 12:ssa eri peittäus-kemikaalissa kahdella eri väkevyydellä. Korroosiokokeet tehdään painohäviömenetelmällä, jossa metallikappaleet punnitaan ennen ja jälkeen liuotusajan. Korrosio todetaan massan muutoksesta.

6.1 Kokeiden valmistelu ja suunnittelu

Korroosiokokeet sovittiin tehtäväksi Tampereen ammattikorkeakoulun laboratoriossa käytössä olevan tilan ja välineiden vuoksi. Suomen KL-Lämpö Oy toimitti kemikaalit ja järjesti kemikaalien loppukäsittelyn sekä tarvittavat korroosiokupongit. Laboratorioskokeista tehtiin erillinen suunnitelmaraportti, joka on liitteenä (Liite 1).

6.1.1 Aikataulut

Laboratoriokokeiden alustava aikataulu suunniteltiin siten, että kokeet alkaisivat toukokuussa ja kestäisivät noin kuukauden ajan. Kokeita tehtäisiin laboratoriossa virkaajan sisällä. TAMKIn laboratorioissa on oltava henkilökunta paikalla, kun kokeita suoritetaan.

Laboratoriokokeisiin tehtiin uusi aikataulu. Kokeita tehtiin toukokuussa 2010 noin kaksi viikkoa. Korroosiokokeita jatkettiin syyskuussa ja ne kestivät kuukauden verran. Loppusyyskuu oli varattu teoriaosuuden ja tulosten käsittelyyn ja tulkitsemiseen.

6.1.2 Korroosiokokeiden suunnittelu

Opinnäytetyössä tehtävät laboratoriokokeet ovat korroosiokokeet. Näitä kokeita tehdään 12 liuoksella ja kahdella reaktioajalla. Korroosiokokeisiin käytetään seitsemän eri materiaalin korroosiokupunkia. Kokeita tulee siis useita eri variaatioita. Tuloksia voidaan arvioida etukäteen kirjallisuudesta saatavan teoretiedon avulla.

Korroosiokuponkeja on seitsemän eri materiaalia: ruostumaton teräs, haponkestävä teräs, sinkitty teräs, mustarauta, kupari, messinki ja alumiini. Näistä on laskettu yhteensä korroosiokokeiden määrä:

$$\begin{array}{ccccccc} \text{Peittauskemikaalit} & & \text{Reaktioaika} & & \text{Kupongit} & & \text{Yhteensä} \\ 12 & \cdot & 2 & \cdot & 7 & = & 168 \end{array}$$

Kaiken kaikkiaan korroosiokokeita suoritetaan 168 kappaletta. Mahdollinen korrosio todetaan punnitsemalla kuponki analyysivaa'alla, ennen ja jälkeen kylpyjen. Korroosiokupongit myös valokuvataan ennen ja jälkeen kokeita. Lisäksi kupongit säilytetään ja arkistoidaan myöhempiä mahdollisia mikroskooppitarkasteluja varten.

Alun perin suunnitelmissa oli tehdä kokeet kahdella eri liuosväkevyydellä, mutta tässä tapauksessa kokeiden määrä olisi noussut 336 kappaleeseen. Tämä olisi kaksinkertaistanut kokeiden määrän ja siten myös kaksinkertaistanut ajan. Kahden eri väkevyyden kokeet päätettiin jättää pois.

Korroosiokuponkien esikäsitteily ja jälkikäsitteily tehdään KL-Lämmön erillisen ohjeen mukaan. Tärkeää on, että jokainen kuponki käsitellään samalla metodilla. Lisäksi tarkastettiin, että merkinnät kupongeissa säilyvät käsittelyiden ja kylpyjen jälkeenkin. Mikäli merkinnät katoavat, on suuri vaara kuponkien sekaantumisessa.

Korroosiokokeet suoritettiin dekanterilaseissa. Tarvittaessa leikataan muovisista kanistereista kammot, jotka pitävät kuponkeja pystyssä liuoksessa. Suunniteltiin myös, että kylpyjä voidaan sekoittaa tasosekoittajassa koko reaktioajan. Tämä ei kuitenkaan ole pakollista, mutta suositeltavaa. Tämän jälkeen kupongit tarvittaessa puhdistetaan korroosiotuotteesta huuhtelemalla tislattulla vedellä. Kupongit kuivataan lämpökaapissa (50 °C) tunnin ajan. Kuponkien annetaan jäähtyä huoneen-lämmössä eksikaattorissa vuorokauden, jotta kupongit ovat kaikki saman lämpöisiä. Kupongit punnitaan analyysivaa'alla ja korroosion voimakkuus todetaan massan muutoksella.

Tavoitteena on löytää sopivin peittäuskemikaali ja reaktioaika mikä aiheuttaa mahdollisimman vähän korroosiota kupongissa. Tulokset kirjataan paperille ja myöhemmin siirretään Excel-taulukkoon.

6.1.3 Laboratoriotilan valmistelu

Laboratoriona käytettiin TAMKIn kemian laboratoriota, jossa ei ole enää opetusta. Kokeiden suunnittelun yhteydessä listattiin tarvittavat välineet, sekä oppilaitokselta löytyvät välineet että KL-Lämmön toimittavat välineet ja kemikaalit.

Lista tarvittavista välineistä ja kemikaaleista:

Koululta

- vetokaappi
- analyysivaaka
- mittalasi, 50 ml, 100 ml, 250 ml
- dekantterilasit, 400 ml
- kammot, muovista leikatut jotka pitävät kupongit pystyssä
- lämpökaappi
- kertakäyttöpipettejä
- punnitusastia, muovinen lääkekippo
- spaatteleita/lusikoita
- parafilmiä
- sekoittaja, pystyy sekoittamaan yhtäjaksoisesti useampaa astiaa, 1–2 kpl
- 1500 ml mittapullo, 2 kpl
- tislattua vettä ja suihkupullo
- eksikaattoreita

Suomen KL-Lämmöltä

- suolahappoa
- NaHCO_3
- laimennus- ja jätekanisterit
- peittauskemikaalit
- korroosiokupongit

Korroosiokupongeista toimitettiin kuparikupongit ensimmäisinä kemikaalien mukana. Tavaroiden keräämisen jälkeen kuponkien esikäsittely ja kokeiden käynnistys käytännössä oli mahdollista aloittaa. Syyskuussa saapuivat loput kupongit. Kaikkea tarvittavaa ei voida suunnitella etukäteen ja kokeiden jatkuessa tulee eteen uusia vaihtoehtoja ja ideoita sekä tarvittavia välineitä, joista oli myöhemmin sovittava laboratorio-päällikön kanssa. Kaikkea ei kyseiseltä välinelistalta löydy, toisaalta kaikkea listattua ei tarvinnut. Kyseessä on siis alustava lista.

6.2 Korroosiokokeiden toteutus

Tarvittavien alkuvalmisteluiden jälkeen kokeet aloitettiin niin pian kuin mahdollista. Laboratoriokokeista otettiin valokuvia koejärjestyksessä sekä niiden avulla havainnollistetaan eri vaiheita. Kaikki valokuvat ovat itse otettuja työn eri vaiheista. Valokuvaamista käytettiin eri vaiheiden havainnollistamisen lisäksi päiväkirjan tavoin dokumentoinnin ja muistin apuna.

6.2.1 Korroosiokuponkien alkuperä, esikäsittely ja merkitseminen

On olemassa kaupallisia korroosiokuponkeja, jotka ovat valmiiksi esikäsitelty sekä punnittu. Kaupallisia kuponkeja voidaan käyttää korroosiokokeissa siten, että tilaa kupongit, suorittaa kokeet itse ja lähettää kupongit edelleen analysoitavaksi tai analysoida ne itse. On myös mahdollista tilata koko palvelu yhtenä valmiina pakettina.

Näissä kokeissa käytettiin sekä kaupallisia kuponkeja että KL-Lämmön toimittamia, valmiiksi leikattuja kuponkeja metallikappaleista. Kuvassa on kaupallinen korroosio-kuponki sekä itse leikattu kuponki vierekkäin. Mustarautakupongissa on tunniste tehty mustalla tussilla. Kuviossa 10 näkyvä alumiininen, kaupallinen kuponki ja siinä on erikseen kaiverrettuna teksti sekä tunnistetiedot, esimerkiksi sarjanumero.



KUVIO 10. Mustarautakuponki ja alumiinikuponki ovat kuvattuna vierekkäin (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Kokeissa käytetyt kaupalliset kupongit ovat Imotron Instruments B.V. nimisen yhtiön valmistamia. Laboratoriokokeissa käytetyt kaupalliset ja itse tehdyt kupongit ovat jaoteltu näin.

Imotron korroosiokupongit	Suomen KL-Lämpö Oy
alumiini	ruostumaton teräs
messinki	haponkestävä teräs
sinkitty teräs	mustarauta
	kupari

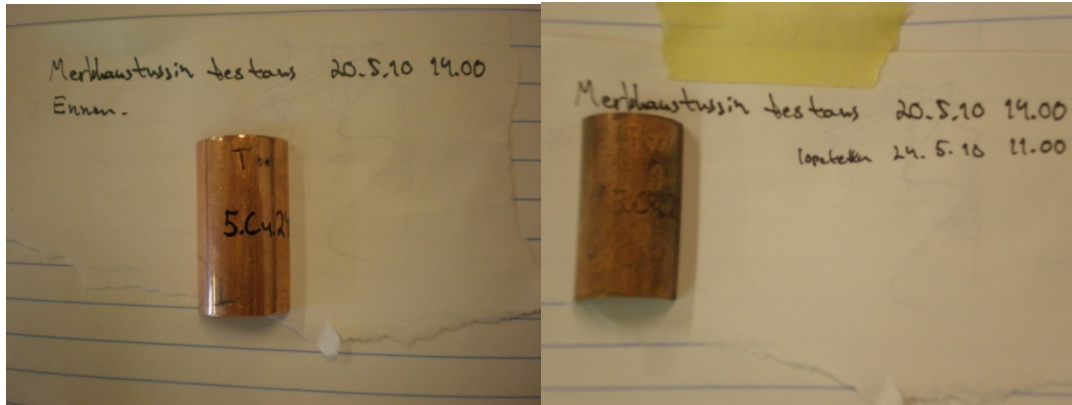
Korroosiokuponkien esikäsittely tapahtui seuraavanlaisesti. Korroosiokupongit pestiin ennen koeliuokseen upottamista. Kupongit pestiin siten että ne laitettiin 30 minuutiksi 15 %:en suolahappoliuokseen, jonka jälkeen kupongit pestiin tislattulla vedellä ja laitettiin vielä 10 minuutiksi 5 %:en NaHCO_3 -liuokseen. Tämän jälkeen ne vielä huuhdeltiin NaHCO_3 -liuoksella ja tislattulla vedellä ja annettiin kuivua lämpökaapissa. Lämpökaappi oli asetettu $50\text{ }^\circ\text{C}$ ja kuivausaika yksi tunti. Kupongit siirrettiin jäähtymään eksikaattoriin vähintään yhdeksi vuorokaudeksi. Sen jälkeen kupongit numeroitiin pysyvällä permanenttitussilla. Kupongit valokuvattiin ja punnittiin. Työvaiheista pidettiin laboratoriopäiväkirjaa, johon kirjattiin ylös työvaiheet,

käsiteltävät kohteet sekä päivänmäärät ja kellonajat. Kuviossa 11 näkyy kuparikuponkien esikäsitelyä suolahappopesussa.



KUVIO 11. Kuparikuponnit peseytymässä suolahapossa (Kuva: Tapani Latvala 2010)

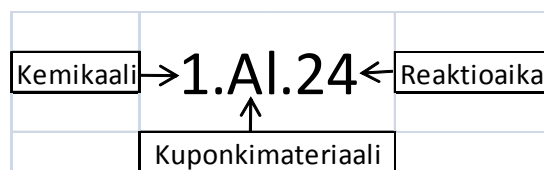
Ennen kokeiden aloittamista, tuli suorittaa niin sanottu permanenttitussitesti. Tässä varmistettiin, että merkintä pysyi kupongissa kylvyn ajan. Tämä koe tehtiin kuparikupongille peittauskemikaali numero 5:ssä, 25 prosentin väkevyydessä. Kuva osoittaa miten kemikaali on vaikuttanut permanenttitussimerkintään.



KUVIO 12. Permanenttitussin kestävyys testaus, kuvassa näkyy ennen liuosta sekä jälkeen liuoksen (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Testaus kesti yhteensä neljä päivää, eli runsaasti yli kokeiden maksimireaktioajan. Kupari on selkeästi tummentunut ja merkintä haalistunut. Kuitenkin luonnossa merkintä näkyi hieman selvemmin kuin kuvassa, joten todettiin, että permanenttitussi kestää koeliuokset.

Kupongit siis merkittiin siten, että niistä selvisi materiaali, liuos ja reaktioaika. Alla olevassa on merkitty, mitä kuponkien merkintä tarkoittaa.



Ensimmäinen numero tarkoittaa peittäuskemikaalia, joten kutakin peittäuskemikaalia symboloi numero ja tästä on tieto ainoastaan Suomen KL-Lämpö Oy:llä. Keskimäinen kirjainosa tarkoittaa materiaalia ja viimeinen numero-osa, joko 24 tai 6, tarkoittaa reaktioaikaa. Taulukko 3 osoittaa kunkin kuponkimateriaalin lyhenteen.

Taulukko 3. Kuponkien lyhenteet

Rt	Ruostumaton teräs
Ht	Haponkestävä teräs
St	Sinkitty teräs
Mr	Mustarauta
Cu	Kupari
Ms	Messinki
Al	Alumiini

Täten voidaan päätellä, että 6.ST.6 tarkoittaa peittauskemikaali nro 6:ssa reagoimutta sinkittyä terästä, jonka reaktioaika on ollut kuusi tuntia.

6.2.2 Peittauskemikaalien laimennokset ja happamuusasteikko

Peittauskemikaalit toimitettiin laimentamattomina kanistereissa. Laimennokset oli erikseen sovittu KL-Lämmön kanssa pidetyissä palavereissa, kuten taulukko 4 selventää. Alun perin oli suunniteltu, että kemikaalit laimennetaan tislattuun veteen, mutta päädyttiin ratkaisuun käyttää vesijohtovettä, jotta olosuhteet vastaisivat mahdollisimman paljon normaaleja käyttöolosuhteita. Kemikaaleja laimennettiin erillisiin kanistereihin mittalasi tarkkuudella.

Taulukko 4. Väkevyysprosentti

Peittauskemikaali nro	Liuosväkevyys %
1	35/25
2	25
3	35/25
4	25
5	25
6	10
7	3
8	2
9	20
10	5
11	25
12	1

Peittauskemikaalit 1 ja 3 oli alun perin määrä laimentaa 25 prosenttisesti, mutta kokeiden väkevyys muutettiin 35 prosenttiin. Kuparin korroosiokokeet tehtiin 25 prosenttisilla liuoksilla. Peittauskemikaaleista tullaan käyttämään nimitystä Peittauskemikaali nro 1, Peittauskemikaali nro 2 ja niin edelleen.

Lisäksi happamuusaste luokitellaan väkevyyden mukaan voimakkaaksi emäkseksi, emäkseksi, neutraaliksi, happamaksi ja voimakkaasti happamaksi. Happamuusaste mainitaan tulosten käsittelyssä taulukossa 5.

Taulukko 5. Happamuusaste

pH-asteikko	
Voim.emäksinen	>10
Emäksinen	8-10
Neutraali	6-8
Happamat	2-6
Voim.happamat	<2

6.2.3 Korroosiokokeet

Ensimmäiset laboratoriokokeet tehtiin toukokuussa. Ensimmäisenä tehtiin 24 tunnin kuparikokeet liuoksille 1–6. Myöhemmin tehtiin kaikki kemikaalit yhtä aikaa jokaiselle kuponkimateriaalille, tämä ensimmäinen kerta oli myös niin sanottu testaus siihen, miten itse kokeet käytännössä tapahtuvat ja kuinka kauan valmisteluun sekä lopetukseen kuluu aikaa.

Kupongit punnittiin koulun vaakahuoneessa analyysivaa’alla neljän desimaalin tarkkuudella. Analyysivaakaa, jota käytettiin, oli merkiltään Precisa XT 220. Mittaus-tarkkuus tällä vaa’alla on 0,2 milligrammaa.

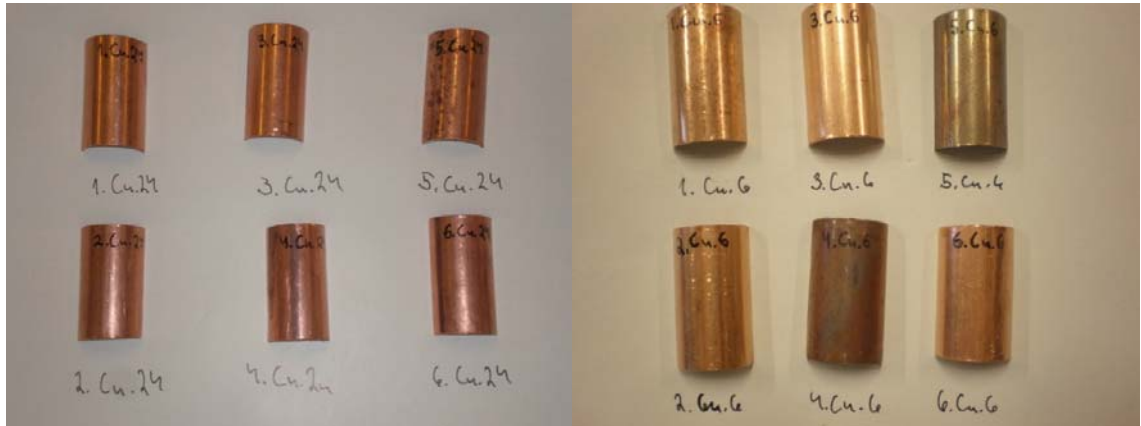
Kuparikupongit on leikattu pyöreästä, kuparisesta putkesta noin 3–4 senttimetrin pituisiksi ja halkaistu pituussuunnassa. Kuparisten korroosiokupongien kokeissa ei tarvinnut käyttää niin sanottua muovista kappaa, jotta kuponki pysyisi pystyssä dekanterilasien pohjalla. Kaarevan muotonsa ansiosta kosketuspinta nesteeseen pysyi suurena. Kuvassa 13 näkyy kuparikupongien korroosiontestaus liuoksissa.



KUVIO 13. Kupariset korroosiokupongit peittauskemikaaleissa vuorokauden reaktioajalla (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Myös kylvyt merkattiin tunnuksin siltä varalta, että permanenttitussi olisi lähtenyt pois kylpyjen aikana. Suunnitelmissa oli myös asettaa kylvyt tasosekoittajaan, jotta saataisiin aikaan jatkuva nesteen liikkuminen, jotta ympäristö vastaisi mahdollisimman paljon todellista tilannetta. Tasosekoittajan kapasiteetti oli kuitenkin melko pieni, ja pidikkeet olivat tarkoitettu pienen tilavuuden omaaville erlenmeyereille. 400 millilitran dekanterilasit olivat liian suuria. Tästä syystä päädyttiin ratkaisuun pitää kylvyt koko reaktioajan vetokaapissa, välillä dekkvoja huljuttaen, mikäli mahdollista. Kylvyt peitettiin parafilmillä.

Jokaisesta korroosiokupongista otettiin myös ennen ja jälkeen kuvat korroosion havainnollistamiseksi, sekä ulkonäköseikkojen ja dokumentoimisen vuoksi. Kuviossa 14 näkyy esimerkki ennen ja jälkeen-kuvasta.



KUVIO 14. Kuparikuponkien 1–6.Cu.24 ennen ja jälkeen –kuvat (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Vasemmalla on kuva ennen peittauskemikaalikylyjä ja oikealla on kuva kylpyjen jälkeen. Kuvista voidaan tulkita, että peittauskemikaali numero 4 on aiheuttanut selvää tummentumaa kuparille. Muutoin kupongeissa ei ole havaittavaa eroa. Kuvien käsittelystä kerrotaan enemmäkappaleessa Koetulosten tulkinta ja käsittelykappaleessa.

Korroosiokokeita jatkettiin syyskuussa. Esikäsittely suoritettiin ruostumattomalle teräkselle, haponkestävälle teräkselle ja mustaraudalle. Esikäsittely tapahtui samoin kuin aikaisemmin on kerrottu, HCl pesu, NaHCO_3 huuhtelu, lämpökaappi 50 celsiusastetta ja vuorokausi eksikaattorissa. Imotronilta tulleet valmiit, kaupalliset korroosiokupongit eivät tarvitse esikäsittelyä. Merkitseminen suoritettiin KL-Lämmön toimittamille kupongeille ja Imotron-kuponkien sarjanumero kirjattiin ylös ja niille annettiin vastaavat merkinnät, esimerkiksi 4.St.6. Punnitus suoritettiin kaikille kupongeille ja tulos merkittiin taulukoihin.

Imotron-kuponkeja oli vain 20 kappaletta jokaista materiaalia kohden. 12 kemikaaliin ja kahteen reaktioaikaan tarvitaan 24 kuponkia. Oli siis ratkaistava, mitkä variaatiot kokeista jätetään tekemättä. Päätettiin jättää pois kuuden tunnin reaktioajan kokeita. Kirjallisuuden pohjalta ja korroosioon vaikuttavan pH-arvon avulla tehtiin valinnat liuoksista. Kuuden tunnin kokeista jätettiin pois vähiten korroosiota aiheuttavat kemikaalit. Toisin sanoen, jos materiaali kestää happoja, mutta ei emäksiä, jätetään joitain happoliuoksia pois. Laimennetuista liuoksista mitattiin pH-paperilla pH-arvot, joita käytettiin valintojen tukena.

Sinkitetystä teräksestä päätettiin jättää pois peittauskemikaalit 9–12, sillä happo syövyttää voimakkaammin sinkittyä terästä ja aiheuttaa sinkkikatoa kuin emäksiset aineet. Messingistä jätettiin pois kemikaalit numero 3, 9, 11 ja 12, sillä messinki kestää neutraalilla alueella paremmin kuin pH-alueen päissä. Alumiinin kokeista jätettiin pois 7, 8, 11 ja 12.

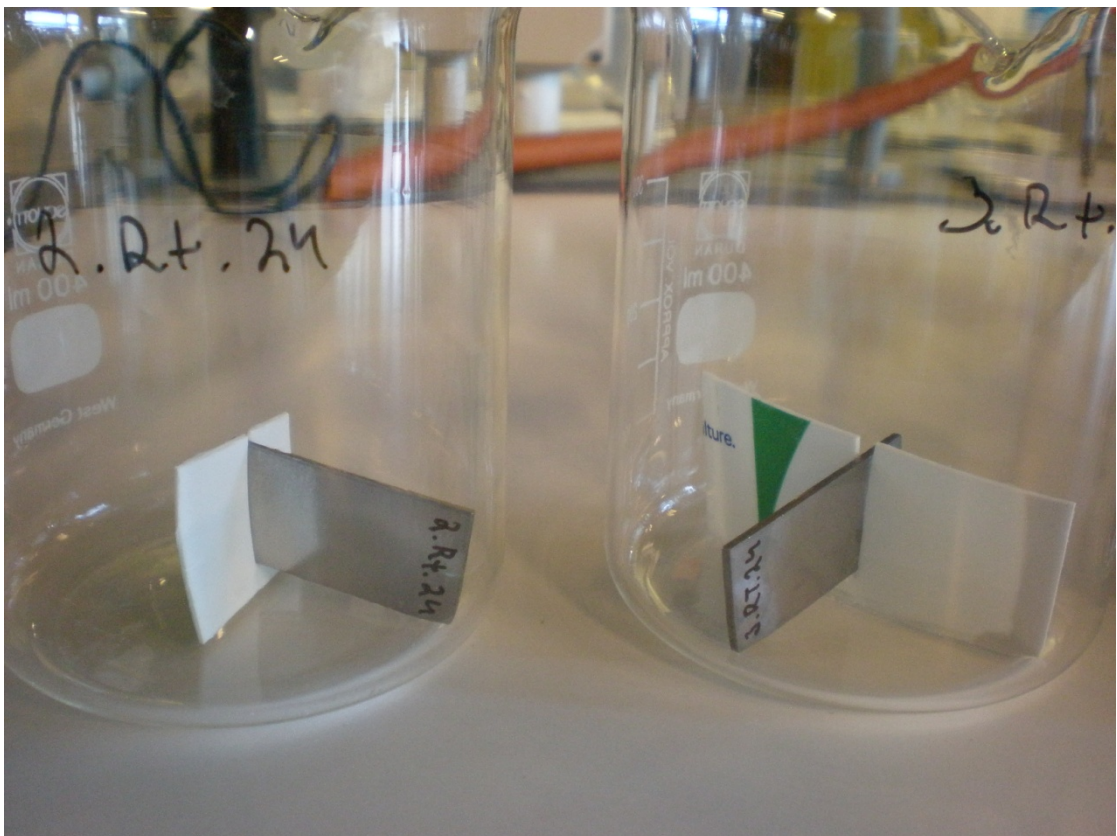
Korroosiokokeet tapahtuivat seuraavassa järjestyksessä:

- ruostumaton teräs, 24 tuntia
- ruostumaton teräs, 6 tuntia
- haponkestävä teräs, 24 tuntia
- mustarauta, 24 tuntia
- haponkestävä teräs, 6 tuntia
- mustarauta, 6 tuntia
- sinkitty teräs, 24 tuntia
- sinkitty teräs, 6 tuntia
- alumiini, 6 tuntia
- messinki, 6 tuntia
- alumiini, 24 tuntia
- messinki, 24 tuntia

Kokeiden aikana pidettiin päiväkirjaa, johon kirjattiin kaikki koevaiheet ja toteutumishetki, päivänmäärä, kellonaika. Lisäksi päiväkirjaan kirjoitettiin kokeiden aikana havainnoidut tapahtumat, esimerkiksi vaahtoutuminen. Alun perin oli suunnitelma tehdä kokeet 13 eri peittauskemikaalilla, mutta tehtyjen kokeiden jälkeen päätettiin jättää

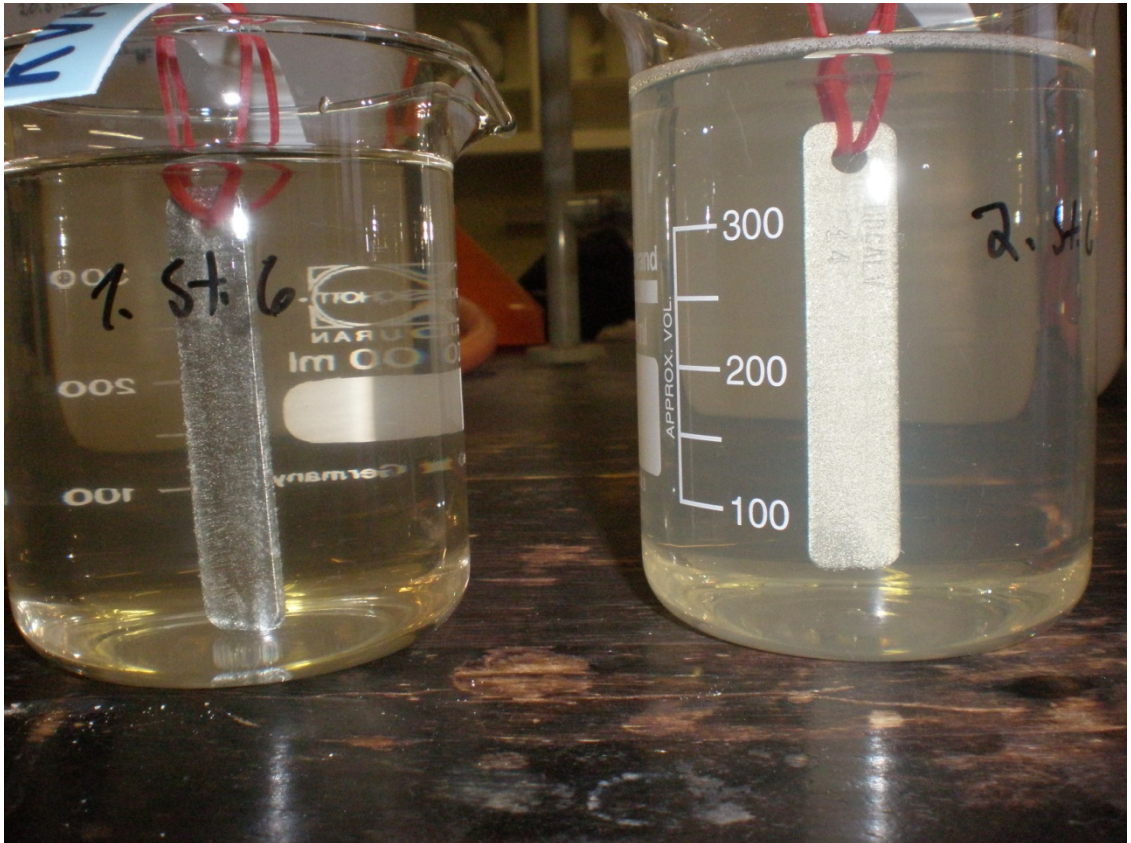
numero 12 pois ja muuttaa numero 13 kemikaaliksi numero 12. Lisäksi kemikaalien 1 ja 3 liuosväkevyyttä tarkennettiin ja muutettiin 25 prosentista 35 prosenttiin.

Muita kokeiden aikana tehtyjä suunnitelmia oli, miten saadaan tietyn muotoiset korroosiokupongit pysymään peittauskemikaaleissa siten, että mahdollisimman suuri pinta-ala olisi nesteen kanssa kosketuksissa. Kuparikupongit olivat puolikkaan putken muotoisia, joten kuparikupongit eivät tarvitse erikoista asetinta. Sen sijaan teräskupongit ja rautakupongit ovat yksinkertaisia levyjä, joten ilman telinettä ne vain makaisivat toinen puoli dekanterilas pohjaa vasten ja siten kupongista olisi vain puolet pinta-alasta nesteen kanssa kosketuksissa. Tällaisille kupongeille suunniteltiin muoviset pidikkeet, jotka pitävät kuponkeja pystyssä kylvyn aikana. Kuviossa 15 on esillä muovisista kanistereista leikatut kammot.



KUVIO 15. Ruostumattomat teräskupongit dekkalasin pohjalla pystyssä kampojen avulla (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Toisen suunnittelutarpeen kuponkien asentoon kylpyjen aikana aynnytti Imotron-kuponkien muoto. Imotron-kupongit ovat muodoltaan kapeita ja pitkulaisia, ja niiden toisessa päässä on reikä. Tähän muotoon suunniteltiin dekanterilasın päälle muovinen silta, josta kuponki roikkuu kuminauhan varassa. Kuviossa 16 näkyy Imotron-kuponki kylvyssä.



KUVIO 16. Imotronin toimittamia kuponkeja kylvyssä (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Ripustusasento on kaikkein ihanteellisin asento korroosiokylpyjen ajaksi, sillä mikään osa kuponista ei ole kosketuksissa pohjan kanssa.

6.2.4 Korroosiokuponkien loppukäsittely

Loppukäsittely kupongeille korroosiokylpyjen jälkeen tapahtui siten, että kupongit huuhdeltiin juoksevan veden alla dekantterilasissa muutaman kerran, jonka jälkeen huuhteltiin vielä kerran tislattulla vedellä. Tämän huuhtelu-käsittelyn jälkeen kupongit aseteltiin käsipaperin päälle lämpökaapin hyllylle. Käsipaperiin oli tussilla kirjoitettu kunkin kupongin tunnus, siltä varalta että merkintä olisi lähtenyt kylpyjen aikana kupongista pois.

Lämpökaappi oli kuten esikäsittelyssä, 50 °C sekä kuivumisaikana käytettiin yhtä tuntia. Tämän jälkeen kupongit siirrettiin uunista suoraan eksikaattoriin jäähtymään. Samoin kuin esikäsittelyssä, kuponkien eksikaattori-aika oli vähintään vuorokausi. Vuorokauden jälkeen kupongit punnittiin samalla vaa'alla ja tulokset merkittiin ylös. Punnituksen jälkeen korroosiokupongit valokuvattiin ennen ja jälkeen kuvia varten ja ne laitettiin yksittäin minigrip-pusseihin. Myös pusseihin merkittiin tussilla kupongin tunnus sekä massat ennen ja jälkeen. Imotoronin kaupallisissa kupongeissa oli valmiiksi mukana pahviset kirjekuoret.

6.2.5 Korroosiokuponkien punnitus

Korroosiokuponkien punnitus tapahtui TAMKIn laboratoriossa olevalla analyysivaa'alla. Kupongit punnittiin ennen ja jälkeen korroosiokylpyjen. Punnitukseen käytettiin mittaus-tarkkuudeltaan $\pm 0,2$ milligrammaa olevaa Precisa XT 220 – mallista vaakaa. Punnituksessa käytettiin kaikille kupongeille pientä, muovista lääkeastiaa, missä kupongit ”seisoivat” punnituksen ajan. Kupongit punnittiin esikäsittelyn ja eksikaattorin jälkeen ja lopuksi lämpökaapin ja eksikaattorin jälkeen.

Punnituksia syntyi kaiken kaikkiaan 336 kappaletta. Punnitusten määrän vuoksi oli tärkeää, että punnitustulos kirjautuu oikein ja selkeästi oikeaan kohtaan. Tuloksia varten

tehtiin kuvion 17 mukainen taulukko. Kuvio 17 on kuva taulukosta. Taulukko on A4-kokoa ja se on myös tämän työn liitteenä (Liite 2).

Korroosiokokeessa, missä käytettiin peittauskemikaalia nro 11 kuuden tunnin reaktioajalla sinkitylle teräkselle, merkitään punnitustulokset niille tarkoitetuille soluille.

Peittaus- kemikaali	Väkevyys	Kesto	Ruostumaton teräs			Haponkestävä teräs			Sinkitty teräs			Mustarauta		
			Ennen	Jälkeen	Erotus	Ennen	Jälkeen	Erotus	Ennen	Jälkeen	Erotus	Ennen	Jälkeen	Erotus
1	25 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
2	25 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
3	25 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
4	25 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
5	25 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
6	10 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
7	3 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
8	2 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
9	20 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
10	5 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
11	25 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
12	20 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
13	1 %	6 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
		24 h	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g

KUVIO 17. Punnitustulosten taulukko.

Taulukosta on pyritty tekemään selkeä ja sellainen, että siitä näkyy hyvin, mikä yhdistelmä on kyseessä. Taulukossa on mukana peittauskemikaali nro 12, joka jätettiin pois kuparikokeiden jälkeen. Lisäksi kuvassa olevassa taulukossa näkyy ainoastaan ruostumaton teräs, haponkestävä teräs, sinkitty teräs ja musta rauta. Loput materiaalit näkyvät toisessa taulukossa.

Tulokset kirjoitettiin käsin tällaiselle kaavakkeelle, josta ne myöhemmin siirrettiin tietokoneelle helpompaa ja yksinkertaisempaa käsittelyä varten.

7 KORROOSIOKOKEIDEN TULOKSET

Korroosiokeiden ensisijaiset tulokset ovat kuponkien massan muutos, joka on todettu punnitsemalla kupongit ennen ja jälkeen korroosiokeita. Näiden tulosten pohjalta lähdetään myöhemmin tekemään johtopäätöksiä tämän työn varsinaiseen tarkoitukseen, eli sopivimman peittauskemikaalien valintaan eri materiaaleille ja sakoille.

7.1 Tulokset

Punnitustulokset syötettiin tietokoneelle niitä varten tehtyihin taulukoihin, jotka on esitelty edellisessä luvussa. Taulukot ovat myös tämän työn liitteenä. Kuvioissa 18 ja 19 on esitettyä punnitustaulukot kuvina tuloksineen. Taulukot ovat myös liitteenä (Liite 3).

Peittauskemikaali		Kupari			Messinki			Alumiini			
ja väkevyyds	Kesto	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	
1	35% *	6 h	10,1598	10,1584	-0,0014	12,0439	12,0433	-0,0006	3,9443	3,9422	-0,0021
		24 h	10,8456	10,8445	-0,0011	12,1131	12,1117	-0,0014	3,9443	3,9402	-0,0041
2	25 %	6 h	10,8490	10,8475	-0,0015	12,0711	12,0702	-0,0009	3,9480	3,9424	-0,0056
		24 h	10,3211	10,3193	-0,0018	12,0455	12,0431	-0,0024	3,9471	3,928	-0,0191
3	35% *	6 h	10,3417	10,3410	-0,0007	g	g	g	3,9448	3,9428	-0,0020
		24 h	10,9847	10,9834	-0,0013	12,0991	12,098	-0,0011	3,9464	3,9385	-0,0079
4	25 %	6 h	10,3477	10,4363	0,0886	12,0653	12,065	-0,0003	3,9472	3,9006	-0,0466
		24 h	10,7679	10,7647	-0,0032	12,1262	12,1249	-0,0013	3,9460	3,8499	-0,0961
5	25 %	6 h	10,1031	10,1014	-0,0017	12,1395	12,1395	0,0000	3,9455	3,9039	-0,0416
		24 h	10,2979	10,2943	-0,0036	12,1433	12,1418	-0,0015	3,9459	3,8634	-0,0825
6	10 %	6 h	9,8788	9,8773	-0,0015	12,0447	12,0427	-0,0020	3,9445	3,8794	-0,0651
		24 h	10,6641	10,6615	-0,0026	12,0621	12,0574	-0,0047	3,9462	3,6883	-0,2579
7	3 %	6 h	10,1299	10,1293	-0,0006	11,9591	11,9598	0,0007	- g	g	g
		24 h	10,2414	10,2410	-0,0004	12,1989	12,1995	0,0006	3,9529	3,9528	-0,0001
8	2 %	6 h	10,5833	10,5822	-0,0011	12,1765	12,1778	0,0013	- g	g	g
		24 h	10,6705	10,6689	-0,0016	12,1855	12,1854	-0,0001	3,9485	3,9486	0,0001
9	20 %	6 h	11,1460	11,1444	-0,0016	g	g	g	3,9500	3,7729	-0,1771
		24 h	10,6662	10,6640	-0,0022	12,0920	12,0902	-0,0018	3,9483	3,4787	-0,4696
10	5 %	6 h	10,4071	10,4050	-0,0021	12,1074	12,1074	0,0000	3,9490	3,7634	-0,1856
		24 h	10,8063	10,8027	-0,0036	12,1569	12,1547	-0,0022	3,9451	3,2154	-0,7297
11	25 %	6 h	9,4134	9,4127	-0,0007	g	g	g	- g	g	g
		24 h	10,5572	10,5564	-0,0008	12,1833	12,182	-0,0013	3,9410	3,9407	-0,0003
12	20 %	6 h	10,4725	10,4714	-0,0011	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
		24 h	10,2025	10,2016	-0,0009	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
13	1 %	6 h	10,0413	10,0405	-0,0008	g	g	g	- g	g	g
		24 h	10,5128	10,5123	-0,0005	12,0560	12,0524	-0,0036	3,9562	3,9558	-0,0004

KUVIO 18. Kuparin, messingin ja alumiinin massanmuutos

Peittauskemikaali ja väkevyyys		Ruostumaton teräs			Haponkestävä teräs			Sinkitty teräs			Mustarauta			
		Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	
1	35 %	6 h	9,3489	9,3495	0,0006	9,5293	9,5298	0,0005	12,5723	12,5354	-0,0369	9,1889	9,1845	-0,0044
		24 h	9,2732	9,2732	0,0000	9,8508	9,8519	0,0011	12,5492	11,9864	-0,5628	9,2869	9,2800	-0,0069
2	25 %	6 h	9,2366	9,2371	0,0005	9,5314	9,5331	0,0017	12,7314	12,7068	-0,0246	9,1711	9,1688	-0,0023
		24 h	9,3032	9,3016	-0,0016	10,1066	10,1048	-0,0018	12,7487	12,1028	-0,6459	9,2244	9,2204	-0,0040
3	35 %	6 h	9,3591	9,3516	-0,0075	10,0433	10,0442	0,0009	12,6522	12,6616	0,0094	9,3133	9,3125	-0,0008
		24 h	9,2335	9,2329	-0,0006	10,0229	10,0226	-0,0003	12,7093	12,7236	0,0143	9,2310	9,2311	0,0001
4	25 %	6 h	9,2962	9,2973	0,0011	9,5000	9,5017	0,0017	12,5992	12,0527	-0,5465	9,2884	9,2880	-0,0004
		24 h	9,2459	9,2458	-0,0001	9,9010	9,9012	0,0002	12,6395	12,1125	-0,5270	9,1599	9,1582	-0,0017
5	25 %	6 h	9,1821	9,1827	0,0006	10,0274	10,0317	0,0043	12,6117	12,0719	-0,5398	9,1542	9,1529	-0,0013
		24 h	9,3365	9,3366	0,0001	10,0639	10,0649	0,0010	12,5691	12,0309	-0,5382	9,2121	9,2077	-0,0044
6	10 %	6 h	9,3019	9,3002	-0,0017	9,9806	9,9795	-0,0011	12,6389	12,1198	-0,5191	9,0832	9,0808	-0,0024
		24 h	9,2692	9,2633	-0,0059	9,9940	9,9888	-0,0052	12,6089	12,0676	-0,5413	9,2526	9,2440	-0,0086
7	3 %	6 h	9,2412	9,2420	0,0008	9,9740	9,9750	0,0010	12,5983	12,5941	-0,0042	9,3166	9,3161	-0,0005
		24 h	9,3122	9,3120	-0,0002	9,9732	9,9745	0,0013	12,7190	12,7137	-0,0053	9,2302	9,2281	-0,0021
8	2 %	6 h	9,2819	9,2844	0,0025	10,0748	10,0757	0,0009	12,4475	12,4475	0,0000	9,2469	9,2474	0,0005
		24 h	9,3276	9,3277	0,0001	9,9851	9,9870	0,0019	12,6513	12,6490	-0,0023	9,1709	9,1699	-0,0010
9	20 %	6 h	9,2832	9,2842	0,0010	9,4968	9,4975	0,0007	g	g	g	9,1828	9,1826	-0,0002
		24 h	9,3176	9,3182	0,0006	9,8824	9,8816	-0,0008	12,7183	12,7018	-0,0165	9,1668	9,1657	-0,0011
10	5 %	6 h	9,3089	9,3099	0,0010	9,5020	9,5036	0,0016	g	g	g	9,0951	9,0957	0,0006
		24 h	9,2515	9,2519	0,0004	9,8841	9,8862	0,0021	12,6768	12,6668	-0,0100	9,2890	9,2878	-0,0012
11	25 %	6 h	9,3246	9,3255	0,0009	9,9880	9,9894	0,0014	g	g	g	9,2535	9,2536	0,0001
		24 h	9,2718	9,2728	0,0010	9,5587	9,5607	0,0020	12,5603	12,5729	0,0126	9,2013	9,2003	-0,0010
12	1 %	6 h	9,3059	9,3066	0,0007	9,9784	9,9795	0,0011	g	g	g	9,1882	9,1866	-0,0016
		24 h	9,2039	9,2051	0,0012	10,0754	10,0769	0,0015	12,6708	12,6630	-0,0078	9,2754	9,2692	-0,0062

KUVIO 19. Ruostumattoman teräksen, haponkestävän teräksen, sinkityn teräksen ja mustaraudan massan muutos

Taulukoissa on värikoodein tulkintaa helpottamaan merkitty peittauskemikaalin happamuus, emäksisyys tai neutraalisuus. Taulukossa 6 alapuolella on esitetty värien merkitys.

Taulukko 6. Happamuus väreinä

happo
emäs
neutraali

Taulukoissa on joitakin tyhjiä kohtia, mikä johtuu aikaisemmin kerrotuista muutoksista korroosiokokeissa. Tarkemmin tuloksia käsitellään materiaalilähtökohtaisesti seitsemännessä kappaleessa. Massanmuutoksissa otetaan tällöin huomioon mittausvirhe. Massanmuutoksista piirretään myös peittauskemikaalilähtökohtaiset kuvaajat.

Korroosiokupongit valokuvattiin ennen ja jälkeen kokeiden. Nämä kuvat ovat myös osa tuloksia. Näistä voidaan päätellä peittäuskemikaalien vaikutus eri materiaaleihin visuaalisesti. Valokuvia käsitellään seuraavassa kappaleessa jokaisen materiaalin kohdalla erikseen.

8 KOETULOSTEN KÄSITTELY JA TULKINTA

Edellisessä kappaleessa esitetyt korroosiokokeiden tulokset kootaan ja käsitellään tässä kappaleessa. Kokeiden tuloksista oli tarkoitus koota taulukot ja kaaviot, joista voidaan tehdä selkeät johtopäätökset siitä, mitkä peittauskemikaalit sopivat parhaiten kullekin metallille. Aluksi tarkastellaan peittauskemikaalilähtökohtaisesti jokaista materiaalia sekä reaktioaikaa. Sen lisäksi tarkastellaan tuloksia materiaali-lähtökohtaisesti sekä valokuvia korroosiokupongeista ennen ja jälkeen korroosiokokeiden. Koska materiaalien nimet on muuten melko pitkiä mahtuakseen kuvaajiin, käytetään lyhenteitä, jotka ovat esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Materiaaleista käytetyt lyhenteet.

Lyhenteet	
ruostumaton teräs 6h	Rt.6
ruostumaton teräs 24 h	Rt.24
haponkestävä teräs 6h	Ht.6
haponkestävä teräs 24 h	Ht.24
sinkitty teräs 6h	St.6
sinkitty teräs 24h	St.24
mustarauta 6h	Mr.6
mustarauta 24 h	Mr.24
kupari 6 h	Cu.6
kupari 24 h	Cu.24
messinki 6h	Me.6
messinki 24h	Me.24
alumiini 6h	Al.6
alumiini 24h	Al.24

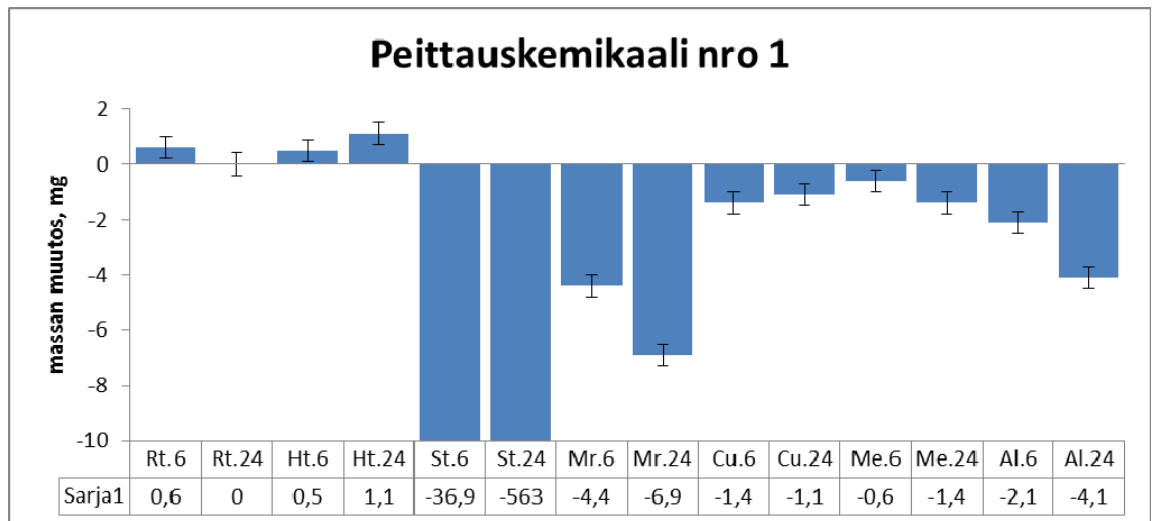
8.1 Peittauskemikaalilähtökohtaiset kaaviot

Peittauskemikaaleja tarkastellaan kahden eri kuvaajan ja yhden taulukon avulla. Ensimmäisenä on perinteinen pylväsdiagrammi jokaisesta materiaalista sekä kahdesta eri reaktioajasta per materiaali. Kaikkiin taulukkoihin on valittu sama skaala y-akselille tulosten tulkinnan helpottamiseksi ja vertailemiseksi keskenään. Pylväsdiagrammeihin on lisäksi lisätty virherajat. Nämä virherajat ovat 0,4 milligrammaa molempiin suuntiin. Analyysivaa'an oma virheraja on vain 0,2 milligrammaa, mutta punnituksia tehdessäni huomasin, miten tulos oli riippuvainen myös muista seikoista. Esimerkiksi korroosio-kupongin asento punnituskupissa vaikutti hieman tulokseen, vaikutusta oli myös kupin asennolla. Lisäksi punnitustuloksiin vaikuttavat lämpötila, ilmankosteus, sähköisyys, punnitustarkkuus ja monet muut tekijät. Sen vuoksi vaa'an omaan virhearvioon lisättiin toiset 0,2 milli-grammaa. Tämä lukema tulee kokemusperäisestä tiedosta.

Toinen kuvaaja esittää massan muutosta ajan suhteen. Näissä kuvaajissa on kolme mittauspistettä, ensimmäinen on lähtömassanmuutos, eli nolla. Seuraava mittauspiste on kuuden tunnin jälkeen ja kolmas on 24 tunnin reaktioajan jälkeen. Kuvaajista on mahdollista hahmottaa, miten aika vaikuttaa eri materiaaleihin. Lähes jokaisesta kombinaatiosta on havaittavissa ensimmäisen kuuden tunnin suuri vaikutus massan muutokseen, mutta muutos kuuden tunnin ja 24 tunnin välillä ei ole enää niin suuri. Lisäksi on taulukko, joka esittää massan muutoksen kuuden tunnin ja 24 tunnin aikana kutakin peittauskemikaali ja materiaali-yhdistelmän mukaan.

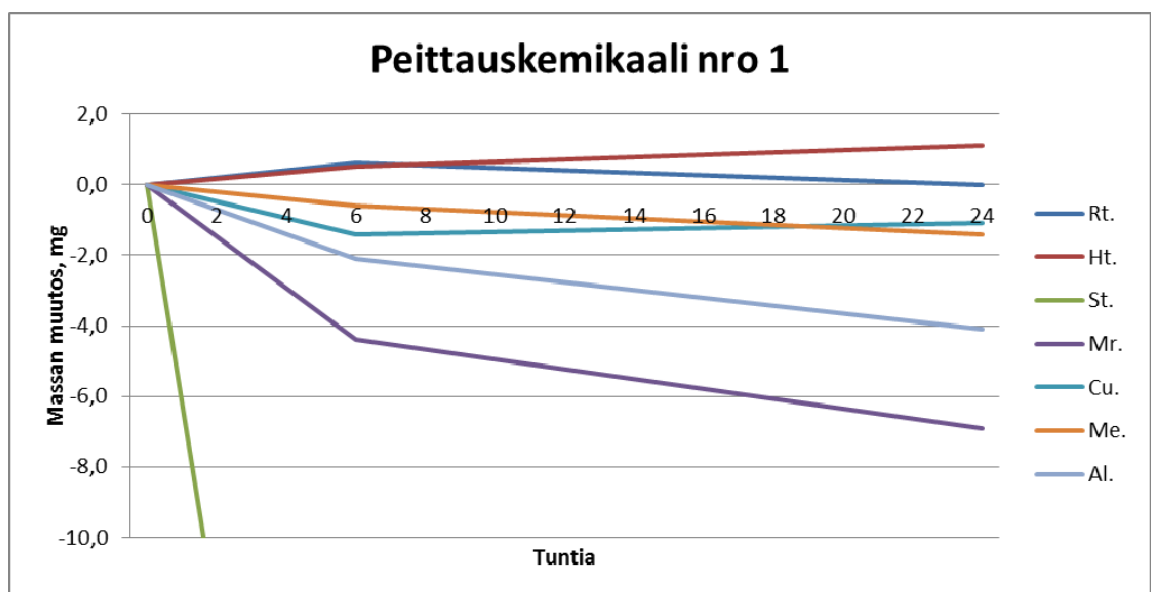
8.1.1 Peittauskemikaali 1

Kuviossa 20 nähdään hapan peittauskemikaali numero 1 tulokset. Peittauskemikaali numero 1 syövyttää selkeästi eniten sinkittyjä teräksiä sekä mustarautaa.



Kuva 20. Happaman peittauskemikaali nro 1:n pylvädiagrammi.

Virherajoja tarkastellessa näyttää siltä, että ruostumaton teräs kestää lähes täydellisesti peittauskemikaalia. On myös mahdollista, ettei kemikaali vaikuta juuri mitenkään ruostumattomaan teräkseen, sillä virherajat liikkuvat nollarajan molemmin puolin. Peittauskemikaali numero 1 on tarkastelu myös ajan suhteen kuviossa 21.

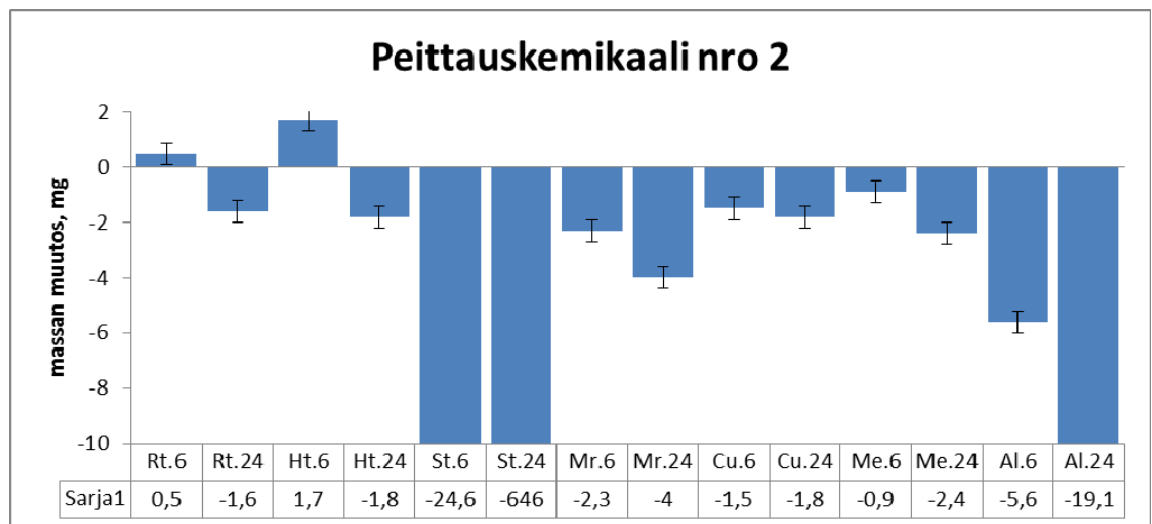


KUVIO 21. Hapan peittauskemikaali nro 1 ja aika.

Massan muutos–aika–kuvaajasta näkee myös, että sinkityn teräksen massan muutos on lähes eksponentiaalinen ja päättyy kuvaajan ulkopuolelle verrattuna muihin materiaaleihin. Myös mustaraudalla tapahtuu voimakasta massahäviötä ensimmäisen kuuden tunnin aikana. Sen sijaan ruostumaton-, haponkestäväteräs, kupari ja messinki näyttävät kestävän.

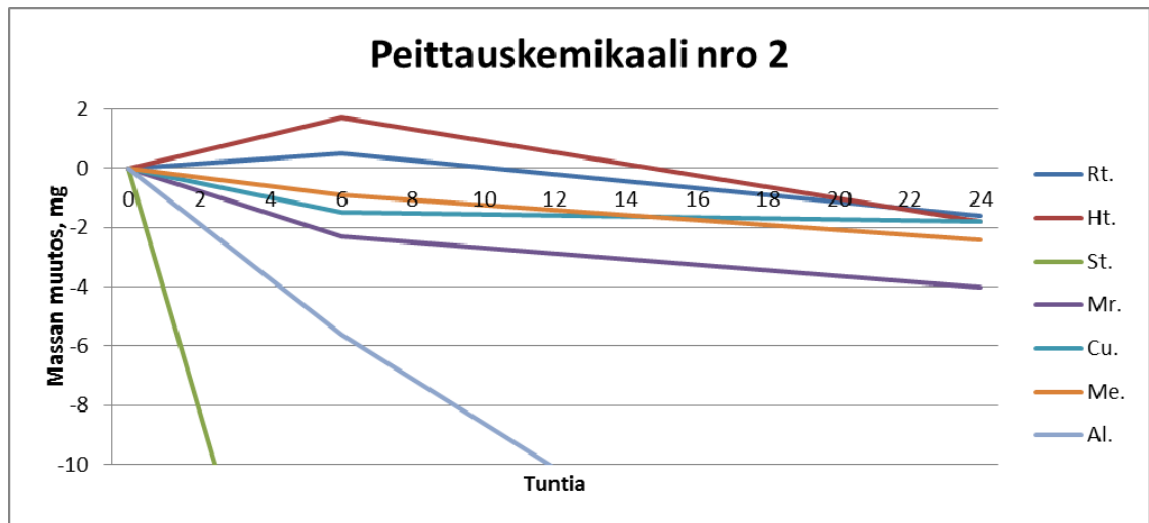
8.1.2 Peittauskemikaali 2

Pylväsdiagrammi kuviossa 22, jossa on käsitelty hapanta peittauskemikaali nro 2:n korroosiotuloksista.



KUVIO 22. Happaman peittauskemikaali nro 2:n pylväsdiagrammi.

Samoin, kuten edellisessä, sinkityn teräksen massahäviö on voimakkainta. Toiseksi suurin massan muutos on alumiinilla. Ruostumattomassa teräksessä ja hapon-kestävässä teräksessä näkyy positiivista massanmuutosta kuuden tunnin reaktioajan jälkeen, samoin kuin edellisessä hapossa. Tämä johtunee siitä, että nämä teräkset tuottavat pinnalleen suojaavan kalvon, josta kerrottiin tarkemmin teoreettisessa osuudessa. Tämä suojaava kalvo ei kuitenkaan kestä enää vuorokauden reaktioaikaa. Tämä kemikaali kuitenkin aiheuttaa jokaiseen materiaalin vähintäänkin lievää korroosiokulumista. Peittauskemikaalia numero 2 on tarkasteltu ajan suhteen kuviossa 23.

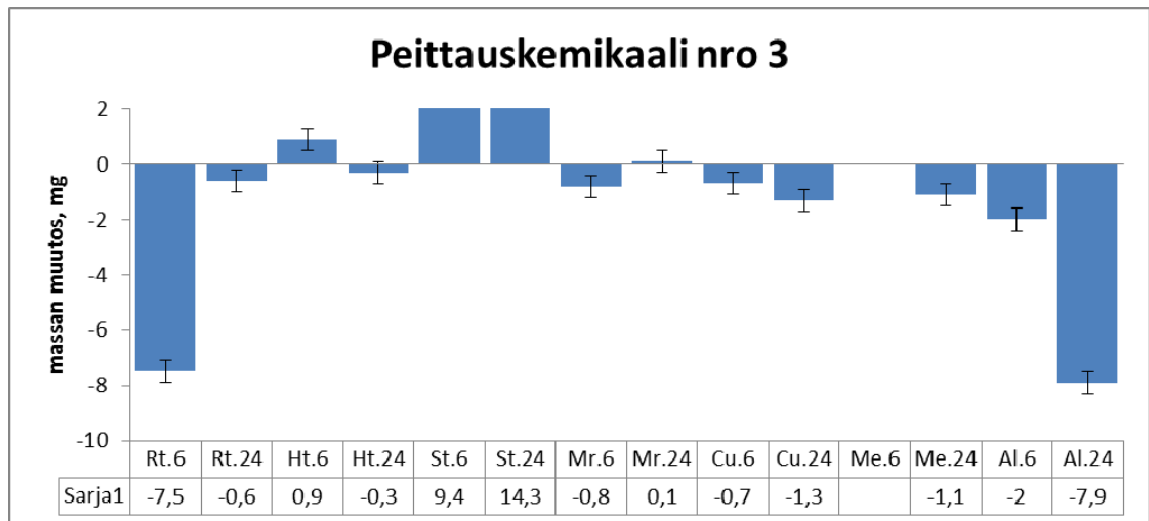


KUVIO 23. Hapan peittauskemikaali nro 2 ja aika.

Kuten edellisestä kuvaajasta näkyi, ruostumaton teräs, haponkestävä teräs, mustarauta, kupari ja messinki tulevat kaikki 24 tunnin reaktioajan jälkeen kuvaajat lähestyvät toisiaan, noin kolmen milligramman alueelle. Massahäviö näille materiaaleille on noin 1-4 milligrammaa. Sen sijaan alumiinilla ja sinkityllä teräksellä tapahtui hyvin suurta massahäviötä. Kuuden tunnin kohdalla massamuutoserot näyttävät olevan suurempia kuin 24 tunnin kohdalla. Kemikaali näyttää soveltuvan näille muille materiaaleille, paitsi sinkitylle teräkselle ja alumiinille.

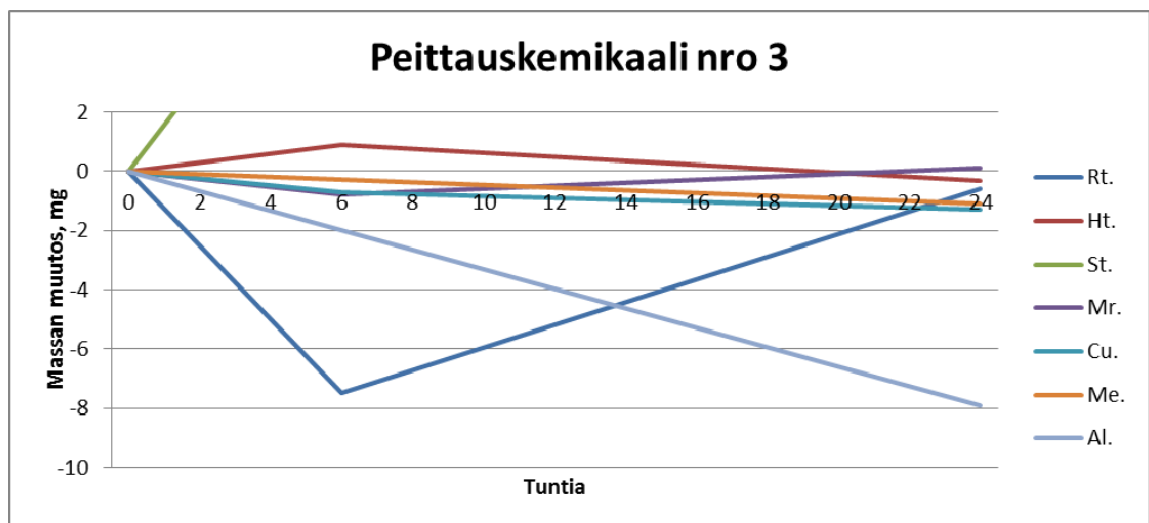
8.1.3 Peittauskemikaali 3

Kuviossa 24 nähdään hapan peittauskemikaali nro 3:n tulokset pylväsdiagrammin muodossa. Peittauskemikaali nro 3, joka on myös hapan, kuten kaksi edellistä näyttäisi diagrammin perusteella soveltuvan useimmille metalleille.



KUVIO 24. Happaman peittauskemikaali nro 3:n pylväsdiagrammi.

Ainoan poikkeuksen tekee ruostumattoman teräksen kuuden tunnin reaktioaika. Se on moninkertainen verrattuna 24 tunnin reaktioaikaan. On myös mahdollista, että teräs on muodostanut pinnalleen niin sanotun passiivikalvon, joka korjaa itseään jatkuvasti estäen korroosiota. Kuuden tunnin reaktioaikana teräs on syöpynyt, mutta on ehkä sittemmin muodostanut passiivikalvon. Tätä on kuitenkin mahdotonta sanoa täysin varmasti yksittäisen koetuloksen perusteella. Lisäksi sinkitty teräs näyttää myös muodostaneen itselleen voimakkaan passivoitumisreaktion tässä kemikaalissa. Kuviossa 25 on peittauskemikaali ajan suhteen.

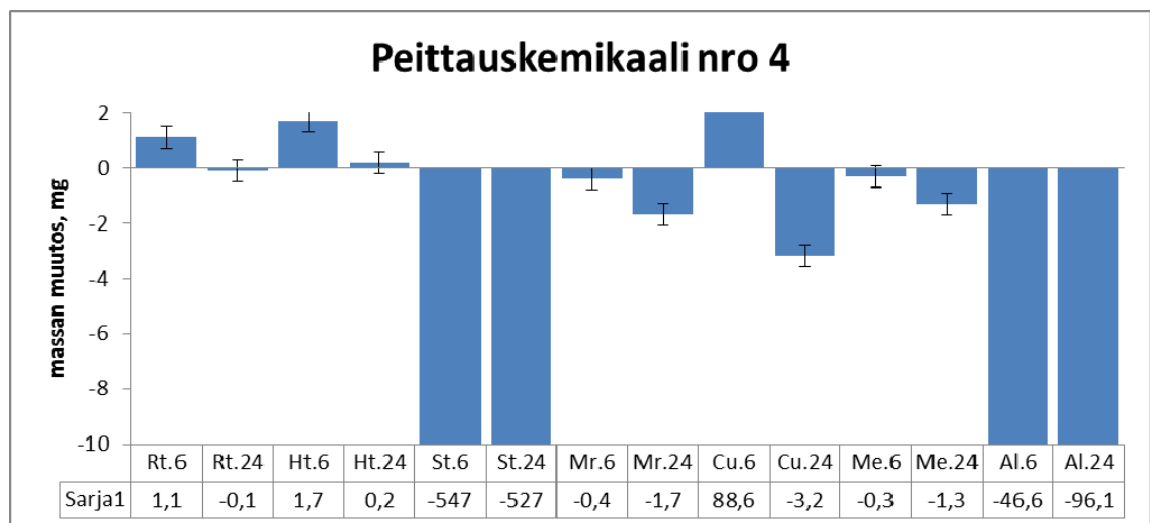


KUVIO 25. Hapan peittauskemikaali nro 3 ja aika.

Kuvaajat ovat samanmuotoisia ja massan muutos on lähes vakio, eli peittauskemikaali aiheuttaa vähäistä vahinkoa näille materiaaleille. Sinkityn teräksen massan muutos ei mahdu taulukon skaalaan, ilmeisesti passivoitumisen johdosta, ja ruostumaton teräs tekee poikkeuksen muista reaktioajoista kuuden tunnin kohdalla. Tällaista ilmiötä ei kuitenkaan ole tapahtunut muilla variaatioilla, joten kyseessä voi olla mittausvirhe, tai kuten aikaisemmin todettu, voimakas passivoituminen.

8.1.4 Peittauskemikaali 4

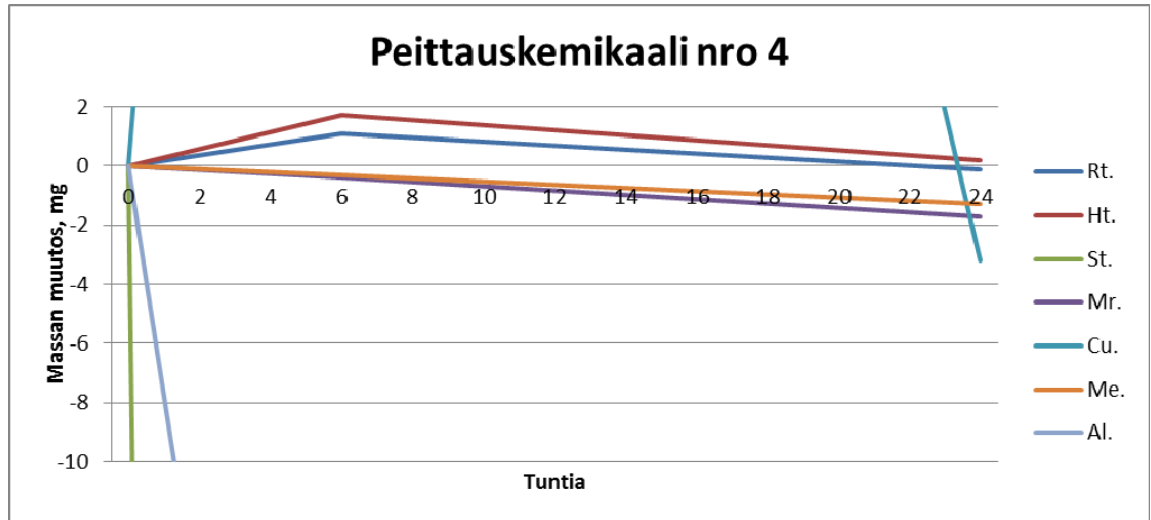
Happaman peittauskemikaali nro 4:n korroosio tulokset on esitetty seuraavassa kuviossa, kuvio 26.



KUVIO 26. Happaman peittauskemikaali nro 4:n pylväsdiagrammi.

Tässäkin näyttää joukosta nousevan selvästi esiin materiaalit, jotka eivät kestä happamia liuoksia kovinkaan hyvin, kuten sinkitty teräs ja alumiini. Myös kupariin näyttää vaikuttavan peittauskemikaali nro 4, eli kuuden tunnin kokeessa tulee esiin voimakas massan nousu. Tämä todennäköisesti johtuu voimakkaasta passivoitumisesta, mutta passivoitunut kerros liukenee pitemmän ajan kuluessa. Muut materiaalit, ruostumaton

teräs, haponkestävä teräs, rauta ja messinki näyttävät kestävän kohtalaisesti. Kuviossa 27 on peittauskemikaali ajan suhteen.

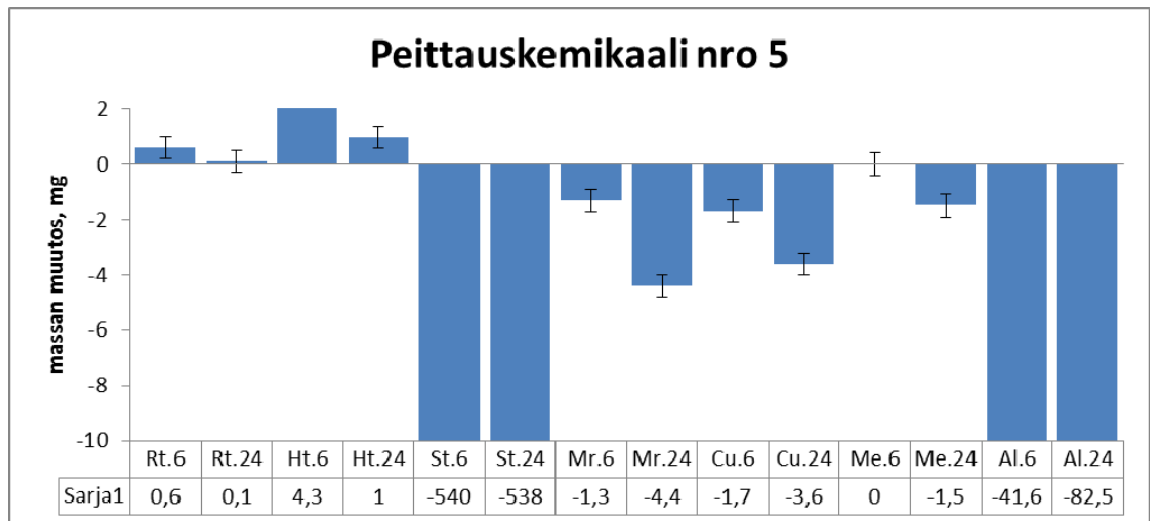


KUVIO 27. Hapan peittauskemikaali nro 4 ja aika.

Ruostumaton teräs, haponkestävä teräs, mustarauta ja messinki kestävät hyvin tasaisesti tässä kemikaalissa. Kuparin massan nousu kuuden tunnin kohdalla on hieman arveluttava, sillä 24 tunnin kohdalla massahäviö kuitenkin näyttää melko normaalilta. Tämä selittyisi metallin passivoitumisella ja oksidikerroksella.

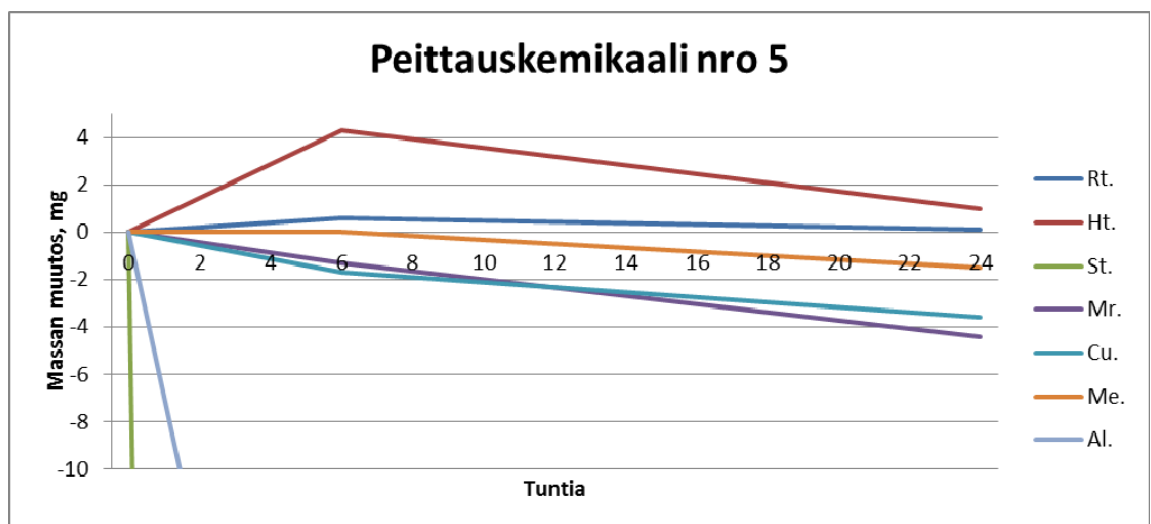
8.1.5 Peittauskemikaali 5

Hapan peittauskemikaali nro 5 tulokset näkyvät kuviossa 28 pylväsdiagrammin muodossa.



KUVIO 28. Happaman peittauskemikaali nro 5:n pylväsdiagrammi.

Happamassa peittauskemikaalissa alumiini ja sinkitty teräs reagoivat voimakkaimmin. Mustaraudassa ja kuparissa on myös massahäviötä 24 tunnin kohdalla. Teräkset kestävät myös tässä hapossa hyvin.

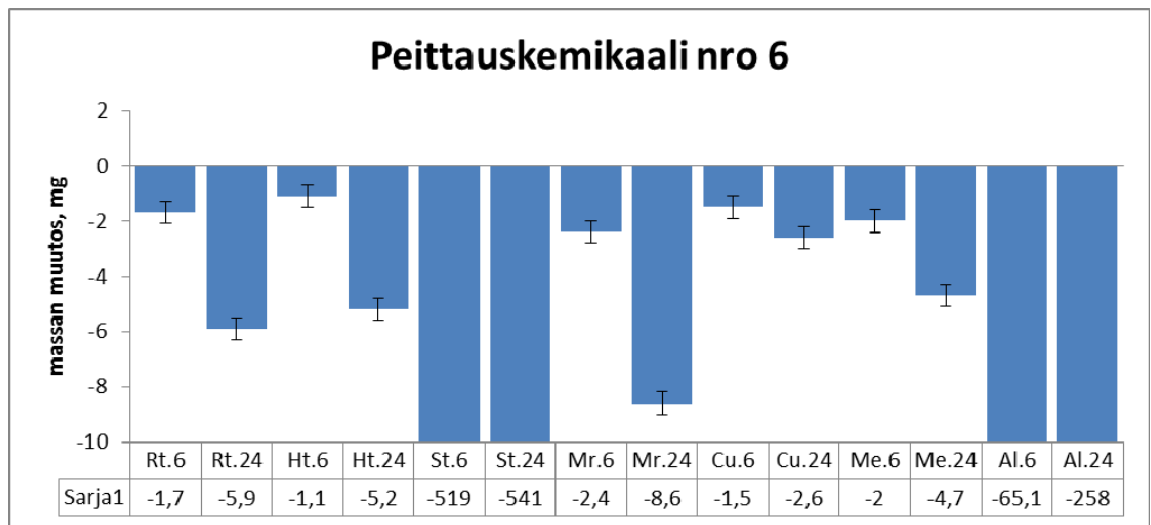


KUVIO 29. Hapan peittauskemikaali nro 5 ja aika.

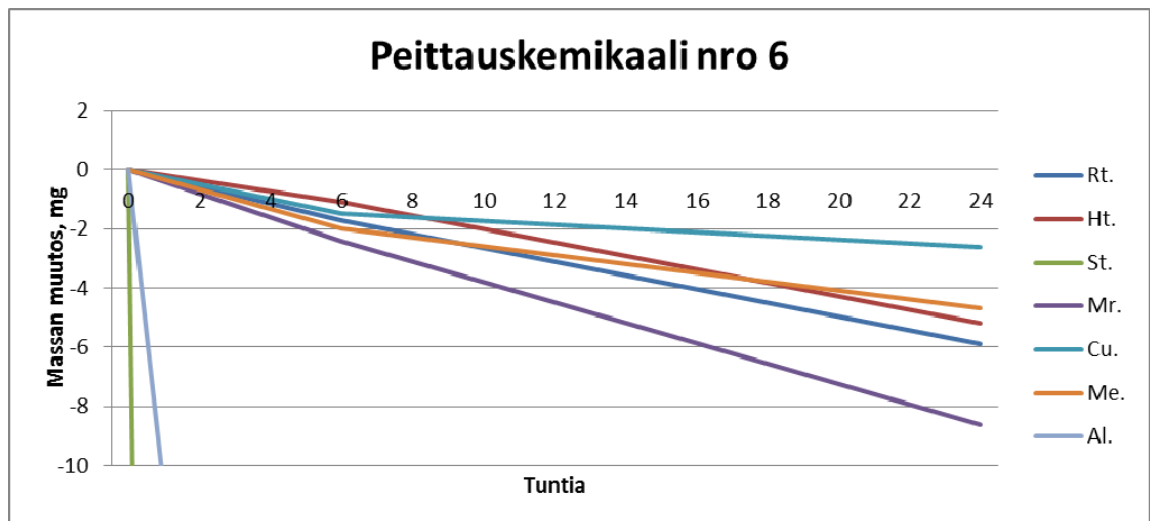
Haponkestävän teräksen, ruostumattoman teräksen ja messingin massahäviöt ovat ± 2 milligramman välillä. Kemikaali soveltuisi parhaiten näille. Mustarautaa ja kupari sijoittuvat hieman tämän alapuolelle 24 tunnin aikana.

8.1.6 Peittauskemikaali 6

Happaman peittauskemikaali nro 6:n korroosiotulokset on esitettyinä kuvioissa 30 ja 31. Tämä happo aiheuttaa kaikille materiaaleille massahäviötä, useimmille melko voimakkaastikin. Erityisesti pitemmällä reaktioajalla, eli 24 tunnin kohdalla massahäviö on suurta.



KUVIO 30. Happaman peittauskemikaali nro 6:n pylväsdiagrammi.

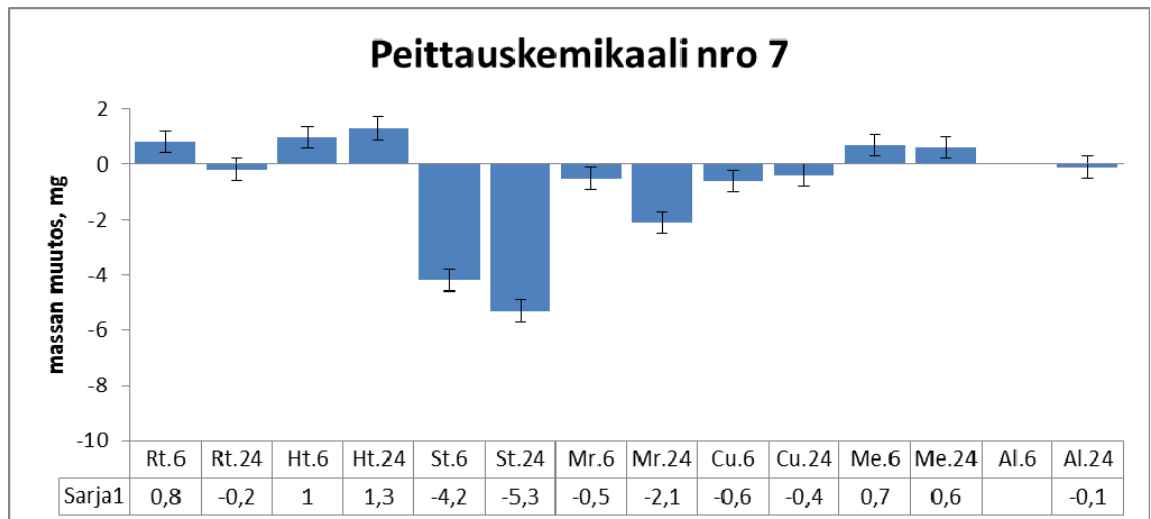


KUVIO 31. Hapan peittauskemikaali nro 6 ja aika.

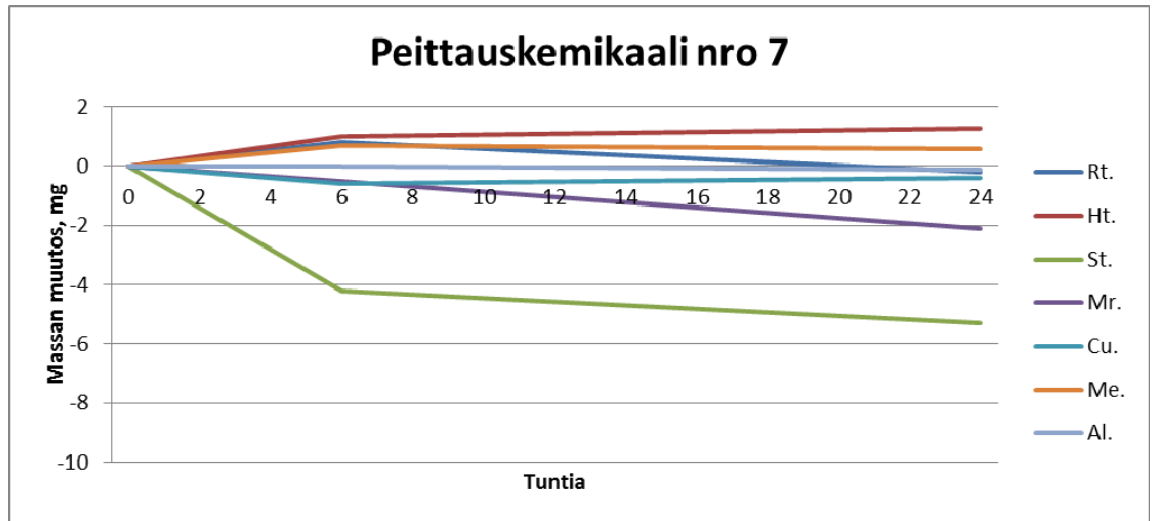
Korroosio ei näytä hidastuvan käytettäessä tätä kemikaalia kuuden tunnin jälkeen, toisin kuin muilla. Vaikuttaisi siltä, että tämä peittauskemikaali soveltuisi lyhyille peittausajoille parhaiten, lukuun ottamatta alumiinia ja sinkittyä terästä.

8.1.7 Peittauskemikaali 7

Neutraalin peittauskemikaali nro 7:n korroosiotulokset on esitetty kuvioissa 32 ja 33. Tämä peittauskemikaali nro 7 erottuu edellisistä peittauskemikaaleista siinä mielessä, että tämä kemikaali on erityisen suojea myös sinkitylle teräkselle ja alumiinille.



KUVIO 32. Neutraalin peittauskemikaali nro 7:n pylväsdiagrammi.

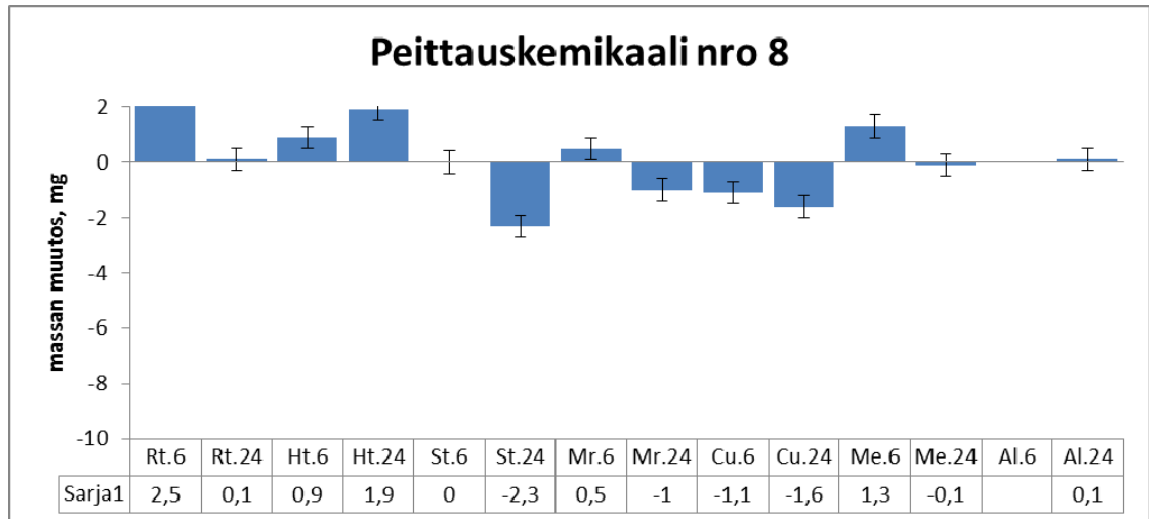


KUVIO 33. Neutraali peittauskemikaali nro 7 ja aika.

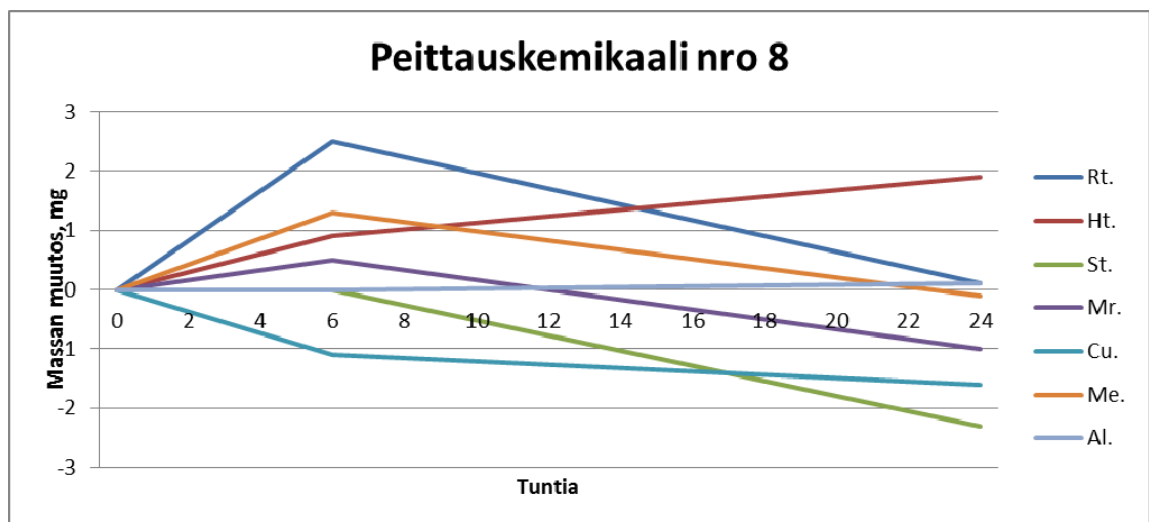
Neutraali kemikaali sopii hyvin kaikille materiaaleille myös pitkissä korroosiokokeissa, paitsi sinkitylle teräkselle.

8.1.8 Peittauskemikaali 8

Lievästi emäksinen peittauskemikaali nro 8:n korroosiotulokset ovat esitettyinä kuvioissa 34 ja 35. Tämä peittauskemikaali on erityisen suojea alumiinille ja sinkitylle teräkselle. Alumiini kestää paremmin emäksiä kuin väkeviä happoja. Teräkset ovat passivoituneet aiheuttaen massanlisäystä.



KUVIO 34. Lievästi emäksisen peittauskemikaali nro 8:n pylväsdiagrammi.

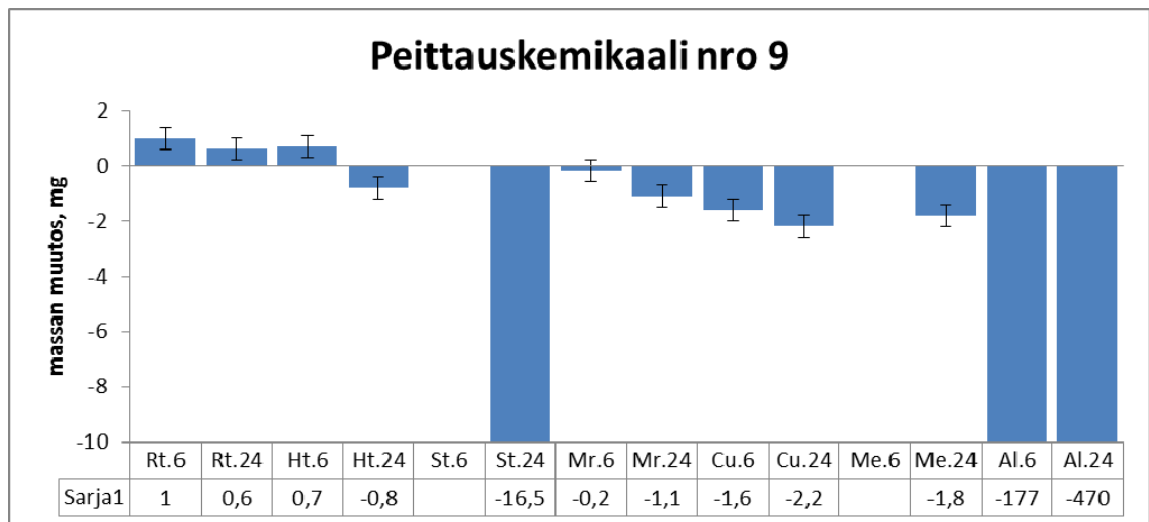


KUVIO 35. Lievästi emäksinen peittauskemikaali nro 8 ja aika.

Mikään materiaali ei näytä voimakkaasti erottuvan muiden joukosta. Ruostumaton teräs, messinki ja mustarauta aiheuttavat massan kasvua kuuden tunnin kohdalla, johtuen metallien passivoitumisesta.

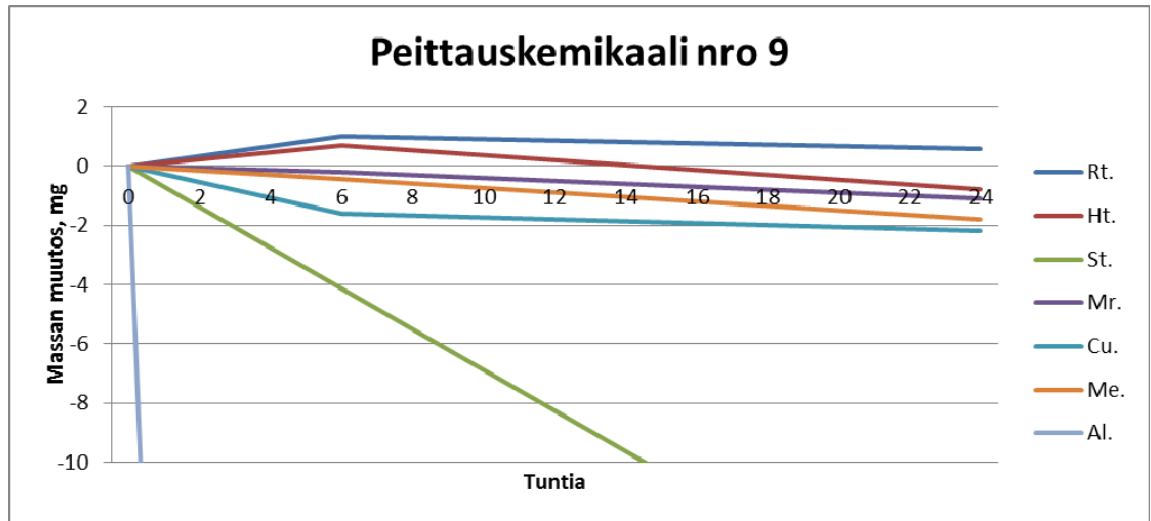
8.1.9 Peittauskemikaali 9

Emäksinen peittauskemikaali nro 9:n korroosiotulokset on esitettyä kuvioissa 36 ja 37. Hyvin voimakkaasti emäksinen kemikaali vaikuttaa lähes hapon tavoin alumiiniin. Tämä oli odotettavissa alumiinin teoriaosuudessa olevaan kuvio 6 perusteella, (alumiinin syöpyminen eri pH-alueilla).



KUVIO 36. Emäksisen peittauskemikaali nro 9:n pylväsdiagrammi.

Muut teräkset ja metallit kestävät voimakasta emästä hyvin. Näin käyttäytyy myös sinkitty teräs, jonka massahäviö on paljon pienempi kuin hapoissa.

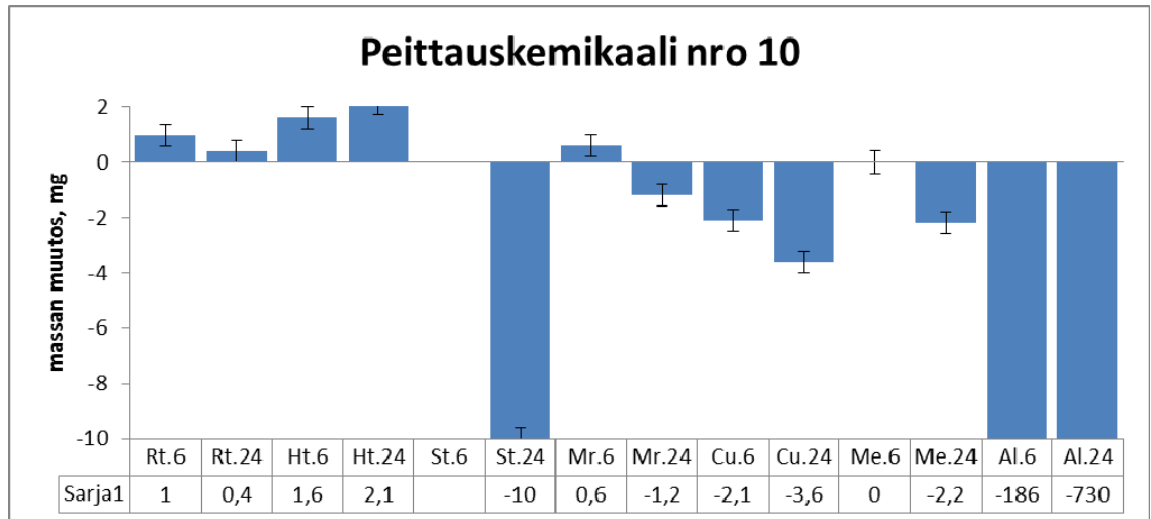


KUVIO 37. Emäksinen peittauskemikaali nro 9 ja aika.

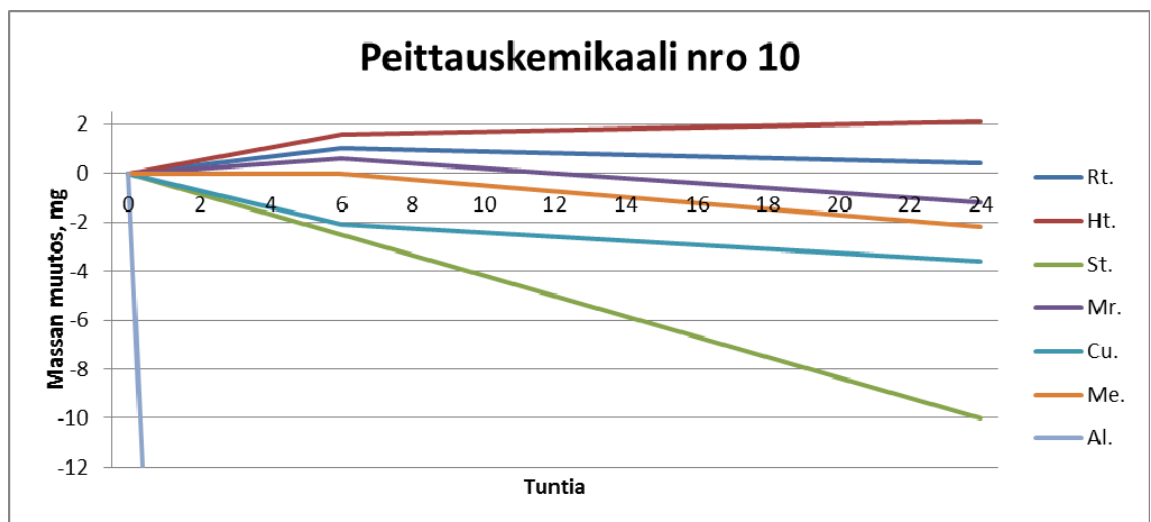
Myös tämä kuvaaja näyttää hyvin paljon happamien kemikaalien kuvaajalta. Sinkityn teräksen massahäviö ei vain ole aivan niin voimakasta, vaikka suurta onkin.

8.1.10 Peittauskemikaali 10

Voimakkaasti emäksisen peittauskemikaali nro 10:n korroosiotulokset on esitettyinä kuvioissa 38 ja 39. Tämä emäksinen kemikaali aiheuttaa alumiinin korroosiota samoin kuin happamat kemikaalit. Sinkitty teräs kestää melko hyvin. Muut teräkset myös passivoituvat ja keräävät suojaavaa kalvoa pinnalleen kuten edellisessä emäksisessä peittauskemikaalissa nro 8 ja 9.



KUVIO 38. Voimakkaasti emäksinen peittauskemikaali nro 10:n pylväsdiagrammi.

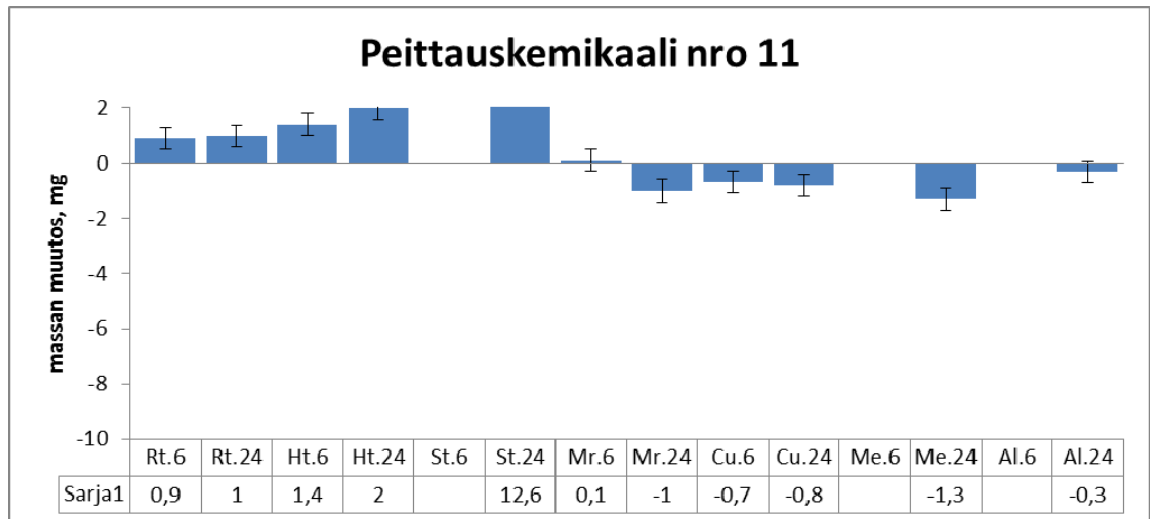


KUVIO 39. Voimakkaasti emäksinen peittauskemikaali nro 10 ja aika.

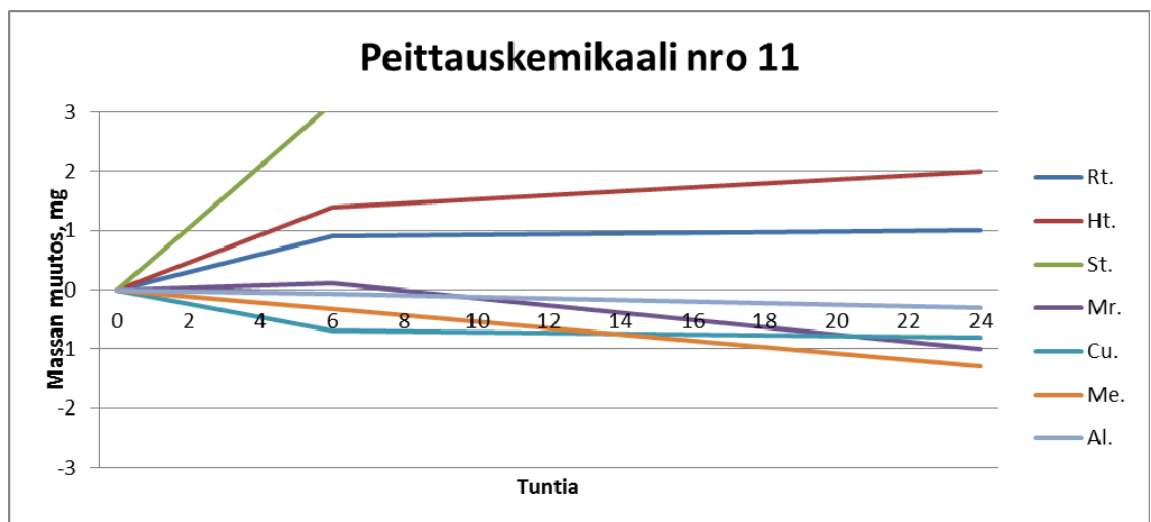
Tästäkin kuvasta alumiini erottuu selkeästi muista. Sinkitty teräs kestää melko hyvin verrattuna aikaisempiin.

8.1.11 Peittauskemikaali 11

Neutraali peittauskemikaali numero 11:n korroosiotulokset on esitetty kuvioissa 40 ja 41. Neutraali peittauskemikaali näyttää aiheuttaen hyvin vähän korroosiota kaikille materiaaleille. Teräksille aiheutuu runsasta passiivikalvon muodostumista.



KUVIO 40. Neutraalin peittauskemikaali nro 11:n pylväsdiagrammi.

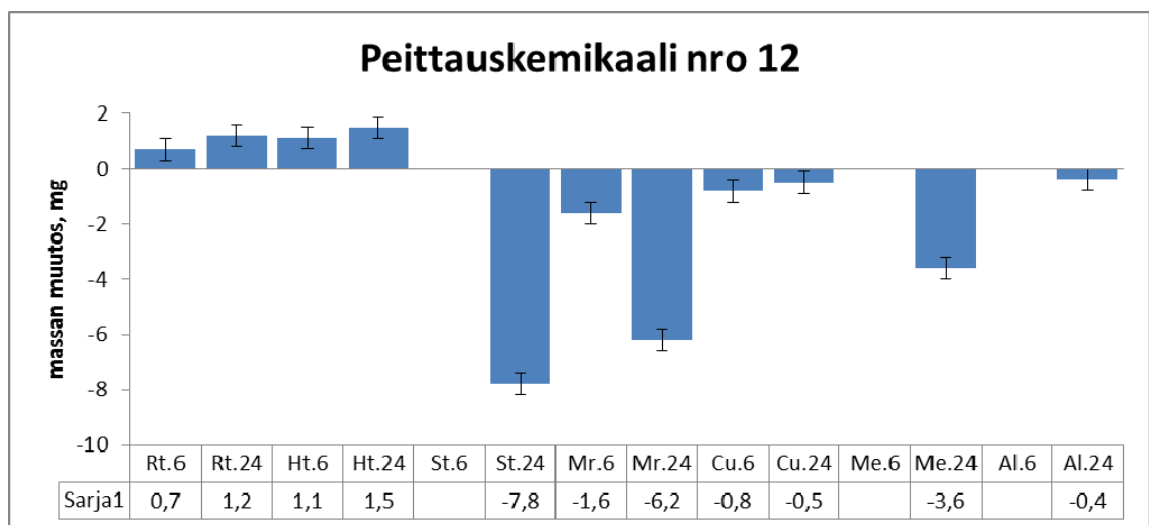


KUVIO 41. Neutraali peittauskemikaali nro 11 ja aika.

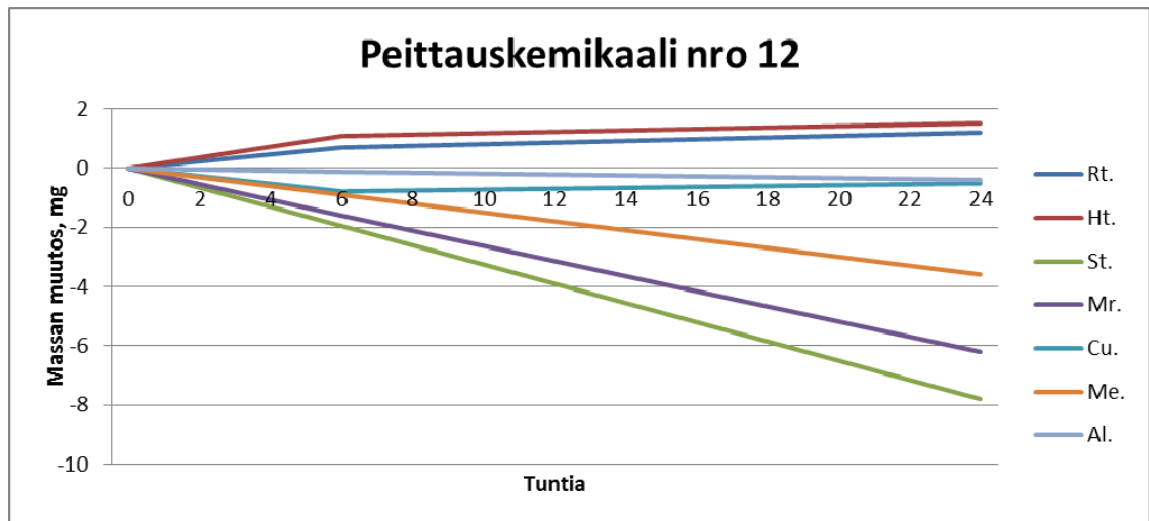
Materiaalit, paitsi sinkitty teräs, kulkevat samaa linjaa. Sinkityn teräksen massa muuttuu tällä kertaa positiivisesti, eli passivoitumisena.

8.1.12 Peittauskemikaali 12

Neutraali peittauskemikaali nro 12:n korroosiotulokset on esitetty kuvioissa 42 ja 43. Tämä neutraali peittauskemikaali on hieman aggressiivisempaa kuin edellinen. Neutraaleilla kemikaaleilla näyttää toistuvan sama ilmiö terästen suhteen, lievä passiivikalvon muodostumista. Sinkityssä teräksessä tapahtui tässäkin reaktiossa sinkkikatoa.



KUVIO 42. Neutraalin peittauskemikaali nro 12:n pylväsdiagrammi.



KUVIO 43. Neutraali peittauskemikaali nro 12 ja aika.

Haponkestävä teräs, ruostumaton teräs, alumiini ja kupari altistuvat heikosti massamuutokselle tässä kemikaalissa. Messinki, mustarauta ja sinkitty teräs ovat metalleja joissa ilmenee massan häviötä, mutta tämä häviö on hyvin pientä.

8.2 Korroosion suure

Taulukossa 8 näkyy milligrammoina kunkin metallin massamuutos. Taulukko on myös liitteenä (Liite 4). Tämä taulukko antaa eräänlaisen suureen jokaiselle metallin ja kemikaalin yhdistelmälle. Tämä suure kuvaa massanmuutosta milligrammoina per kuutta tuntia tai vuorokautta. Taulukkoon on otettu huomioon analyysiväian mittaus-tarkkuus, joka on $\pm 0,2$ milligrammaa. Esimerkkinä voidaan ottaa peittauskemikaali numero seitsemän ja sinkityn teräksen suure. Peittauskemikaali nro 7:n suure sinkityssä teräksessä on täten $(-5,3 \pm 0,2) \text{mg/vrk}$.

Taulukko 8. Massanmuutos per kuusi tuntia tai yksi vuorokausi.

Peittaus- kemikaali	Väkevyyys	Kesto	Rt.	Ht.	St.	Mr.	Cu.	Me.	Al.
			Muutos ±0,2 mg						
1	35 %	6 h	0,6	0,5	-36,9	-4,4	-1,4	-0,6	-2,1
		24 h	0	1,1	-563	-6,9	-1,1	-1,4	-4,1
2	25 %	6 h	0,5	1,7	-24,6	-2,3	-1,5	-0,9	-5,6
		24 h	-1,6	-1,8	-646	-4	-1,8	-2,4	-19,1
3	35 %	6 h	-7,5	0,9	9,4	-0,8	-0,7		-2
		24 h	-0,6	-0,3	14,3	0,1	-1,3	-1,1	-7,9
4	25 %	6 h	1,1	1,7	-547	-0,4	88,6	-0,3	-46,6
		24 h	-0,1	0,2	-527	-1,7	-3,2	-1,3	-96,1
5	25 %	6 h	0,6	4,3	-540	-1,3	-1,7	0	-41,6
		24 h	0,1	1	-538	-4,4	-3,6	-1,5	-82,5
6	10 %	6 h	-1,7	-1,1	-519	-2,4	-1,5	-2	-65,1
		24 h	-5,9	-5,2	-541	-8,6	-2,6	-4,7	-258
7	3 %	6 h	0,8	1	-4,2	-0,5	-0,6	0,7	
		24 h	-0,2	1,3	-5,3	-2,1	-0,4	0,6	-0,1
8	2 %	6 h	2,5	0,9	0	0,5	-1,1	1,3	
		24 h	0,1	1,9	-2,3	-1	-1,6	-0,1	0,1
9	20 %	6 h	1	0,7		-0,2	-1,6		-177
		24 h	0,6	-0,8	-16,5	-1,1	-2,2	-1,8	-470
10	5 %	6 h	1	1,6		0,6	-2,1	0	-186
		24 h	0,4	2,1	-10	-1,2	-3,6	-2,2	-730
11	25 %	6 h	0,9	1,4		0,1	-0,7		
		24 h	1	2	12,6	-1	-0,8	-1,3	-0,3
12	1 %	6 h	0,7	1,1		-1,6	-0,8		
		24 h	1,2	1,5	-7,8	-6,2	-0,5	-3,6	-0,4

8.3 Materiaalien visuaalinen tulkinta

Tässä kappaleessa käsitellään ja pohditaan kemikaalien vaikutusta eri materiaaleihin ulkoisesti ja ulkonäkömuutosten perusteella. Samalla tarkastellaan, miten eräät materiaalit käyttäytyivät eri liuoksissa. Korroosio näkyy yleensä selvästi ulkoisesti materiaalien pinnassa. Tämä voidaan todeta vertaamalla kuponkien ulkoista muuttumista niiden massamuutokseen.

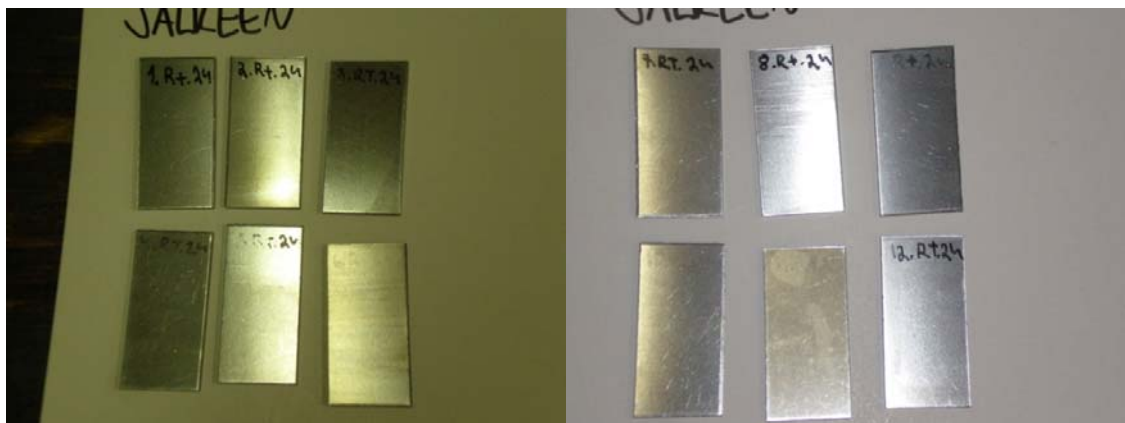
8.3.1 Ruostumaton teräs

Seuraavissa kuvioissa on esitetty ruostumattomien teräskuponkien kuvat korroosiokokeiden jälkeen. Kuvat ennen korroosiokokeita ovat tuhoutuneet. Kuvioissa 44 ja 45 voidaan todeta mahdolliset ulkoiset muutokset kupongeissa.



KUVIO 44. Ruostumaton teräs kuuden tunnin kylpyjen jälkeen kaikissa liuoksissa (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Muutoksia ei näy ruostumattomissa teräslevyissä. Kupongit ovat yhtä kirkkaita kuin ne olivat ennen kylpyjä. Ehkä jopa vielä kirkkaampia ja puhtaampia, mikä oikeastaan onkin peittauskemikaalien tarkoitus. Kuudessa tunnissa mikään käytetty kemikaali ei vahingoittanut ruostumatonta terästä visuaalisesti tarkasteltuna.



KUVIO 45. Ruostumattomat teräskuponnit 24 tunnin kylpyjen jälkeen (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Kuten kuuden tunnin kylpyajassa, 24 tunnin ajassa ei näy metallin pinnassa muutoksia. Ainoastaan kuponkien tunnistumerkkaukset ovat osittain lähteneet. Ylhäällä vasemmalla peittauskemikaali nro 1, 2, 3 ja alhaalla 4, 5, 6 sekä oikealla ylhäällä 7, 8, 9, ja alhaalla 10, 11, 12. Ulkoisten muutosten perusteella kaikki käytetyt peittauskemikaalit soveltuvat ruostumattoman teräksen peittausaineiksi, käytetyissä väkevyyksissä ja ajoissa. Kemikaali numero 6 aiheutti eniten massan muutosta, mutta ulkoisesti se ei jättänyt jälkiä, paitsi liuotti merkinnän pois.

8.3.2 Haponkestävä teräs

Seuraavissa kuvioissa on esitetty haponkestävien teräskuponkien kuvat korroosiokokeiden jälkeen. Kuvioissa 46 ja 47 voidaan todeta mahdolliset ulkoiset muutokset kupongeissa.



KUVIO 46. Haponkestävä teräs kuuden tunnin kylpyjen jälkeen peittauskemikaaleissa 1–12 (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Kupongit eivät ole muuttuneen mitenkään kylpyjen aikana. Ainoastaan merkitsemisjälki on hieman kulunut. Haponkestävässä teräksessä on tapahtunut samoin kuin ruostumattomassa teräksessä, pinta vain on puhdistunut. Tämä näkyy myös massan muutoksena, eli kupongin pinnan muuttumisella on suora yhteys kupongin massan muutokseen.

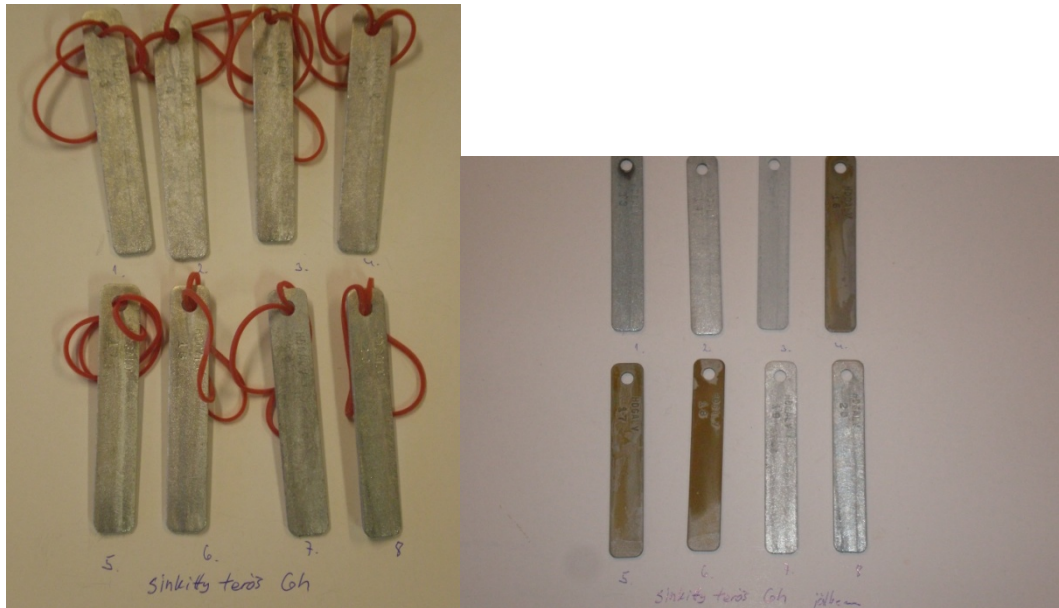


KUVIO 47. Haponkestävä teräs 24 tunnin kylpyjen jälkeen kaikissa peittauskemikaaleissa (Kuva: Tapani Latvala 2010)

24 tunnin reaktioaika ei ole jättänyt minkäänlaisia ulkoisia jälkiä korroosiokuponkeihin. Haponkestävä teräs kestää myös pitempiaikaista peittauskemikaalien vaikutusta, kupongit vain kiillottuivat kylvyissä. Peittauskemikaali nro 6, joka aiheutti eniten massan muutosta haponkestävässä teräksessä, ei ulkoisesti vaikuttanut erityisemmin kupongiin. Paitsi, että merkintä on kadonnut kupongista.

8.2.3 Sinkitty teräs

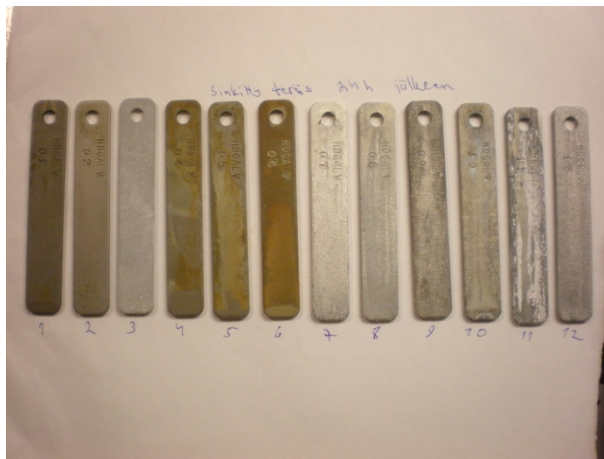
Seuraavissa kuvioissa on esitetty sinkittyjen teräskuponkien kuvat korroosiokokeiden jälkeen. Kuvioissa 48, 49 ja 50 voidaan todeta mahdolliset ulkoiset muutokset kupongeissa.



KUVIO 48. Sinkitty teräs ennen ja jälkeen kuuden tunnin kylpyjen peittauskemikaaleissa 1–8 (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Sinkitty teräs on erityisen arka monille peittauskemikaaleille. Tämä käy selväksi jo tuloksissa, joita on aikaisemmin käsitelty tässä kappaleessa. Myös ulkoisesti monet kemikaalit jättivät selviä jälkiä ja värin muutoksia kuponkeihin. Erityisesti kuuden tunnin kokeissa peittauskemikaali nro 4, 5 ja 6 aiheuttivat eniten ulkoisia muutoksia. 4, 5 ja 6 aiheuttivat myös yli 500 milligramman massahäviöitä.

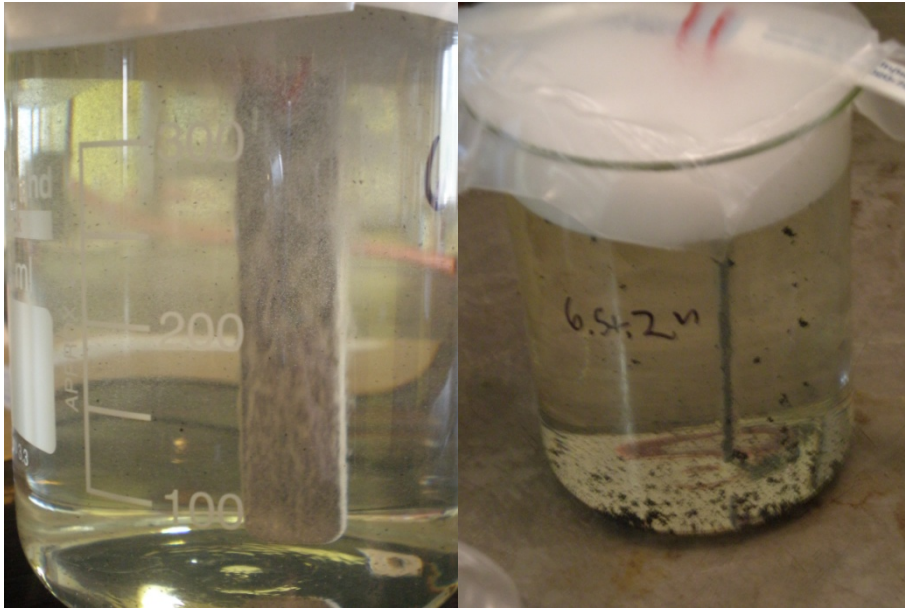
Kuuden tunnin kokeista on jätetty pois peittauskemikaali nro 9–12, sillä kuponkeja oli vain 20 kappaletta. Peruste peittauskemikaalien valinnoille tehtiin teoretiedon avulla. Poisjätetyt peittauskemikaalit aiheuttavat teorian perusteella mahdollisesti vähiten muutoksia sinkittyyn teräkseen.



KUVIO 49. Sinkitty teräs 24 tunnin kylpyjen jälkeen kaikissa peittauskemikaaleissa (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Kuvaa ennen kylpyjä ei ole otettu, mutta tätä voidaan verrata ennen kuuden tunnin kylpyjä otettuun valkokuvaan, sillä kupongit ovat kaikki samanlaisia. 24 tunnin kylvyissä myös peittauskemikaali nro 4, 5, ja 6 aiheuttivat eniten ulkonäkömuutoksia. Selviä ulkoisia muutoksia oli myös voimakkaasti emäksisillä liuksilla, 8, 9, ja 10. Neutraalissa numero 11 oli myös selviä muutoksia.

Eryteisesti kemikaalissa numero 6 tapahtui voimakas reaktio kun sinkitty teräs upotettiin nesteeseen. Hyvin pian upottamisen jälkeen kupongin pinta alkoi kuplia voimakkaasti, kuten kuviossa 50 näkyy. Muutaman tunnin jälkeen liukseen alkoi ilmestyä mustaa sakkaa. Tämä myös näkyy kuvissa 50. Musta sakka kuitenkin liukeni myöhemmin. Musta sakka todennäköisesti oli korroosiotuotteista muodostunutta suojakalvoa, joka myöhemmin liukeni hapon vaikutuksesta.



KUVIO 50. Sinkitty teräs peittauskemikaalissa numero 6 (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Kuponkien ulkoisten tarkasteluiden perusteella parhaiten soveltui peittauskemikaali nro 3, 7, 8, ja 12. Vähiten massan muutosta aiheuttivat peittauskemikaali nro 8 ja 7, neutraali ja lievästi emäksinen liuos.

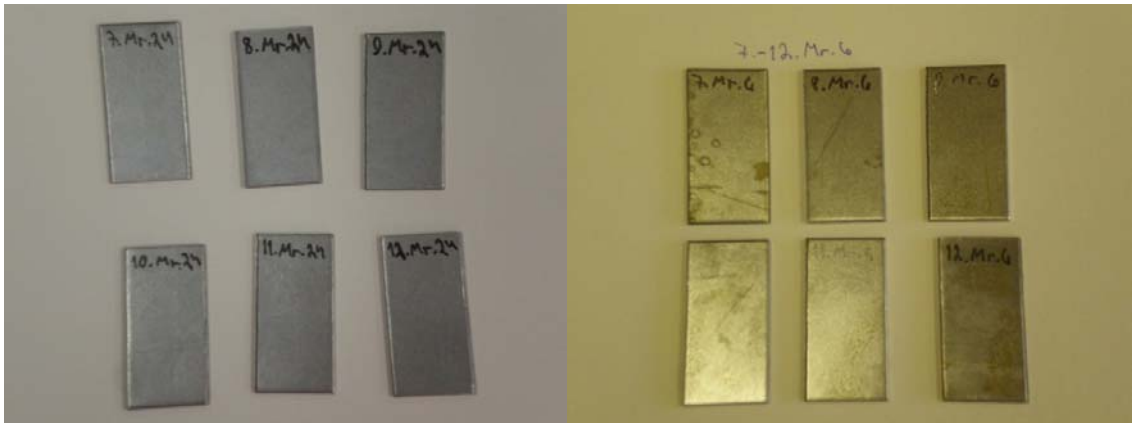
8.2.4 Mustarauta

Seuraavissa kuvioissa on esitetty mustarautakuponkien kuvat korroosiokokeiden jälkeen. Kuvioissa 51–54 voidaan todeta mahdolliset ulkoiset muutokset kupongeissa.



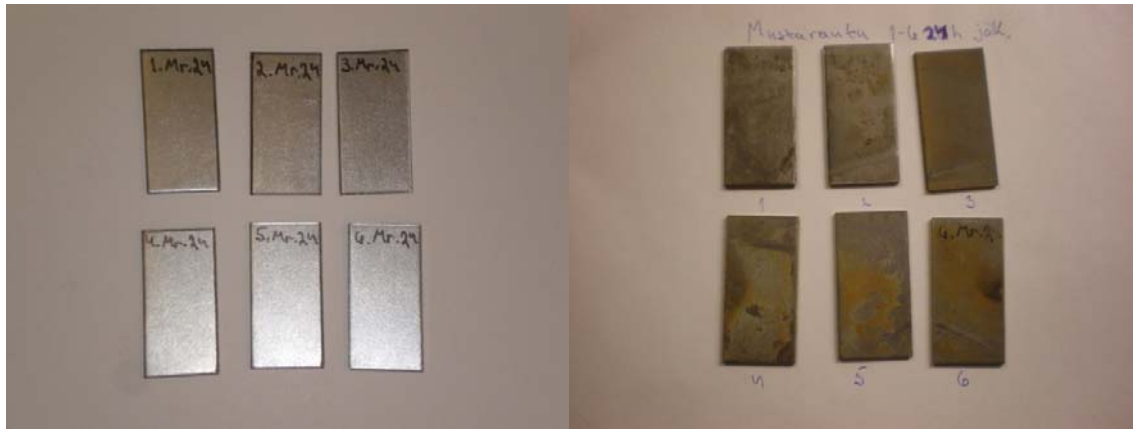
KUVIO 51. Mustarauta ennen ja jälkeen kuuden tunnin reaktion peittauskemikaaleissa 1–6 (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Tässä tilanteessa on ennen-kuvana käytetty mustaraudan 24 tunnin kuponkeja, sillä ennen-kuvaa kuuden tunnin kupongeista ei ole. Happamat liuokset näyttävät kaikki aiheuttaneen syöpymiä mustarautaan.



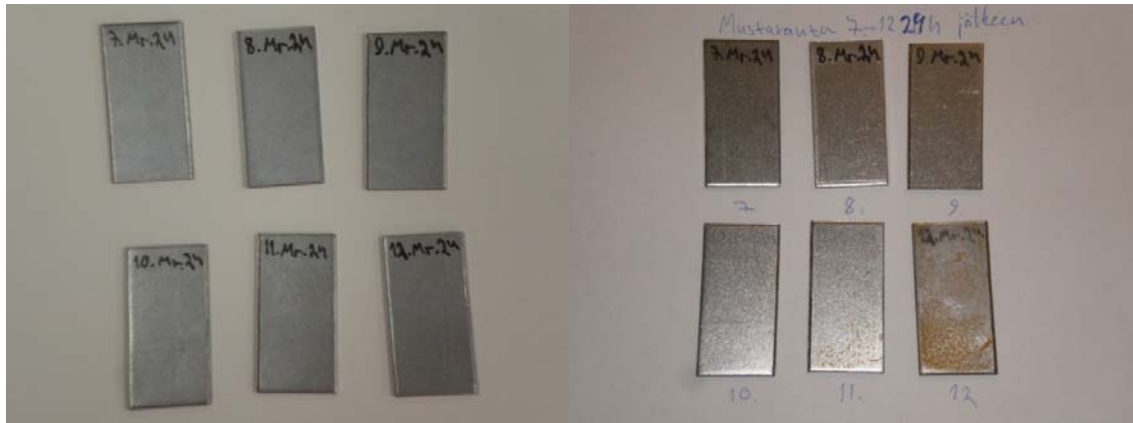
KUVIO 52. Mustarauta ennen ja jälkeen kuuden tunnin kokeiden peittauskemikaaleissa 7–12 (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Kuvissa on sama tilanne kuin edellisissä. Ennen kuvana on käytetty eri kuponkeja, jotka ovat samaa materiaalia, sillä ennen-kuvaa ei ole. Neutraalit ja emäksiset liuokset eivät ole aiheuttaneet niin voimakasta syöpymistä kuin happamat. Vähiten ulkoista muutosta ovat aiheuttaneet peittauskemikaalit nro 9, 10 ja 11. Massahäviö näillä liuksilla oli myös pientä.



KUVIO 53. Mustarauta ennen ja jälkeen 24 tunnin kylpyjen peittauskemikaaleissa 1–6 (Kuva: Tapani Latvala 2010)

24 tunnin reaktioaika jättää selkeästi enemmän ulkoisia jälkiä kuponkeihin kuin kuuden tunnin aika. Erityisesti happamat liuokset ruostuttavat rautaa tehokkaasti, verrattuna neutraaleihin ja emäksisiin liuoksiin.

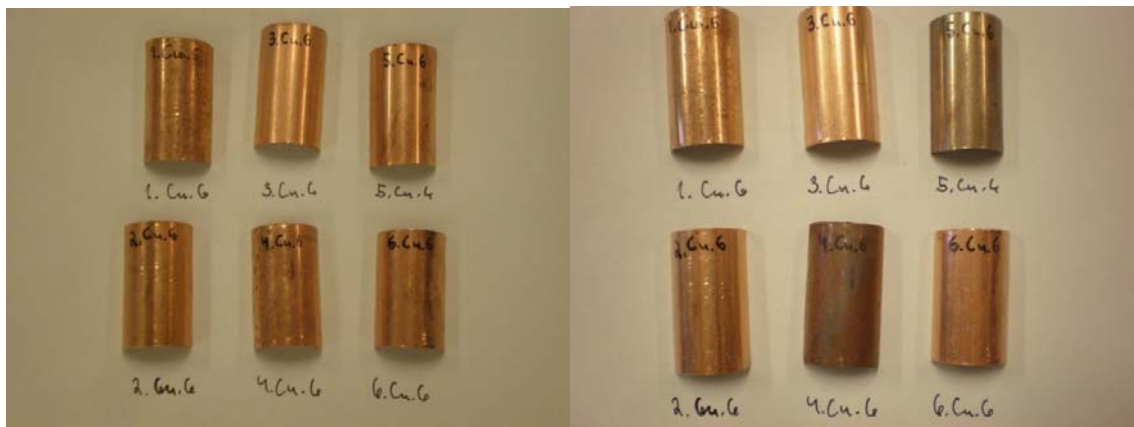


KUVIO 54. Mustarauta ennen ja jälkeen 24 tunnin kylpyjen peittauskemikaaleissa 7–12 (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Näissä neutraaleissa ja emäksisissä liuoksissa ei ulkoisesti näy kovin selkeää eroa kuuden tunnin ja 24 tunnin reaktioajan välillä. Vähiten ulkoisia muutoksia aiheuttavat peittauskemikaali nro 7, 8, 9, 10 ja 11. Samat liuokset myös aiheuttavat vähiten massahäviötä.

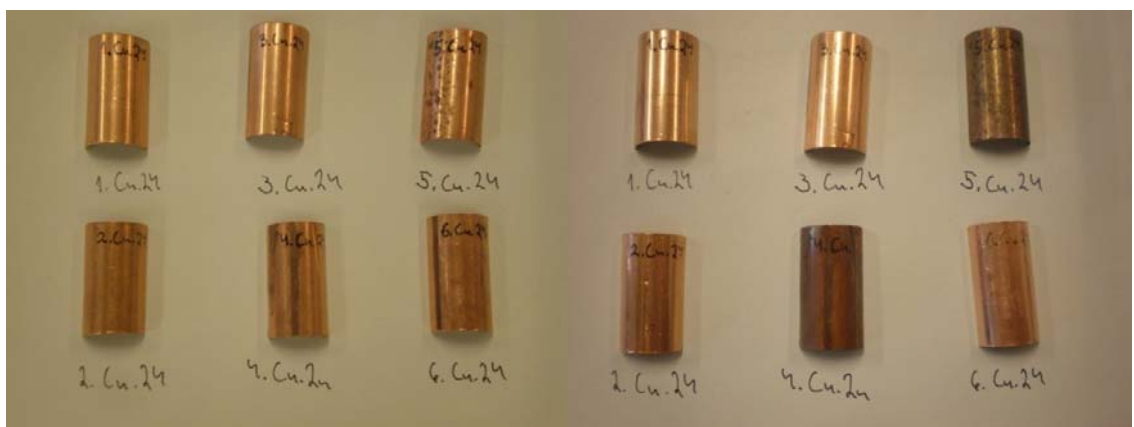
8.2.5 Kupari

Seuraavissa kuvioissa on esitetty kuparisten kuponkien kuvat korroosiokokeiden jälkeen. Kuvioissa 55–58 voidaan todeta mahdolliset ulkoiset muutokset kupongeissa.



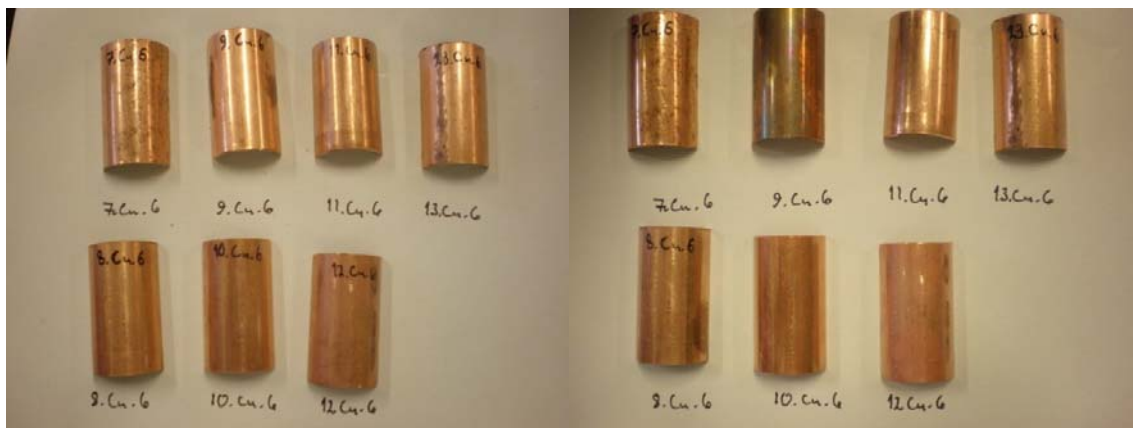
KUVIO 55. Kupari ennen ja jälkeen peittauskemikaalien 1–6, kuuden tunnin reaktioajalla (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Kuten teräkset (ei sinkitty teräs), kupari kestää myös hyvin kemikaaleja. Happamissa kemikaaleissa kupari tummui selkeästi vain peittauskemikaali nro 4:ssä. Tässä tapahtui todennäköisimmin voimakasta passivoitumista, mikä selittäisi suuren massan lisäyksen.



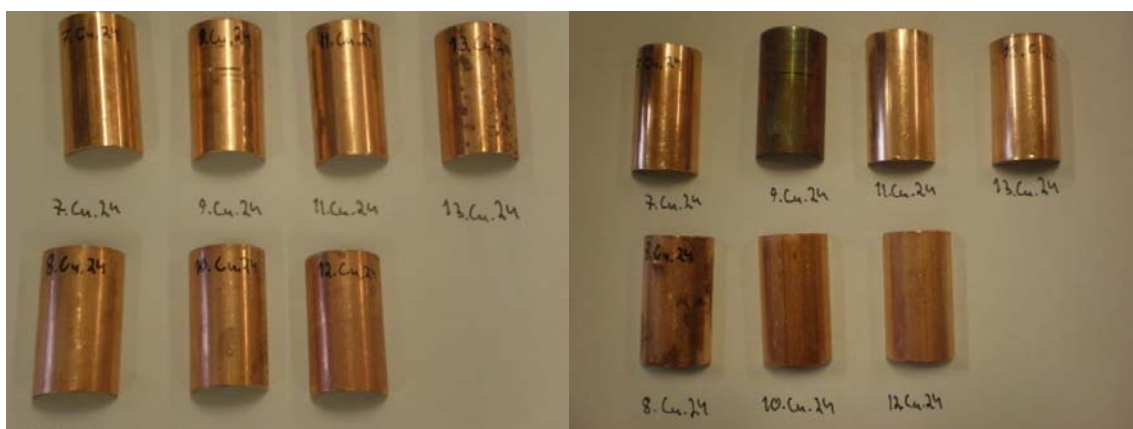
KUVIO 56. Kupari ennen ja jälkeen 24 tunnin reaktioajan peittauskemikaalissa 1–6 (Kuva: Tapani Latvala 2010)

24 tunnin reaktioajassa näkyy sama ilmiö kuin kuuden tunnin ajassa, eli peittauskemikaali nro 4 tummentaa selkeästi. Lisäksi silmiin pistää myös kemikaali numero 5. Kemikaali 5 kohdalla ei tosin tapahdu merkittävää massan muutosta.



KUVIO 57. Kupari ennen ja jälkeen peittauskemikaaleissa 7–13 kuuden tunnin reaktioajassa. (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Kupari kestää hyvin neutraaleissa ja emäksisissä kemikaaleissa. Näyttää siltä, että kupari on vain hieman kirkastunut, eli puhdistunut. Peittauskemikaali nro 9 on kuitenkin lievästi tummentanut, vaikka massahäviö ei ole kovin suuri.

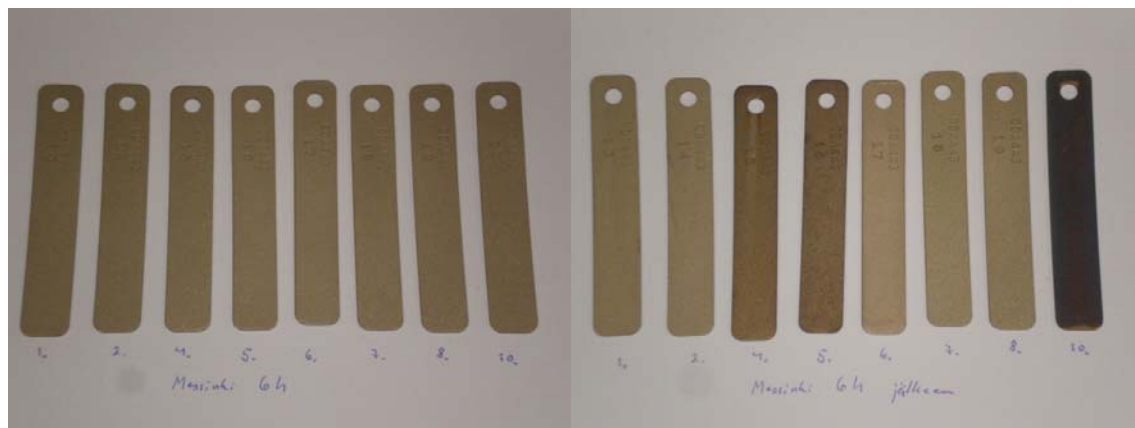


KUVIO 58. Kupari ennen ja jälkeen peittauskemikaaleissa 7–13, 24 tunnin reaktioajassa. (Kuva: Tapani Latvala 2010)

24 tunnin kylvyissä tummennusta näyttää aiheuttavan myös peittauskemikaali nro 9., sekä lievää tummentumaa myös peittauskemikaali nro 8. Tässä on mukana vielä alkuperäinen peittauskemikaali nro 12. Kuparikokeiden jälkeen 12. kemikaali jätettiin pois ja 13. kemikaalista tuli 12.

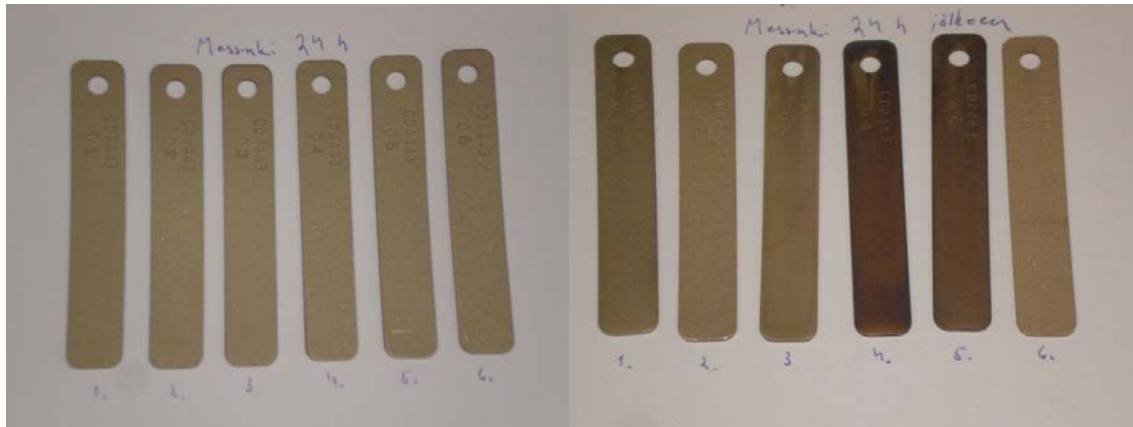
8.2.6 Messinki

Seuraavissa kuvioissa on esitetty messinkisten kuponkien kuvat korroosiokokeiden jälkeen. Kuvioissa 59–61 voidaan todeta mahdolliset ulkoiset muutokset kupongeissa.



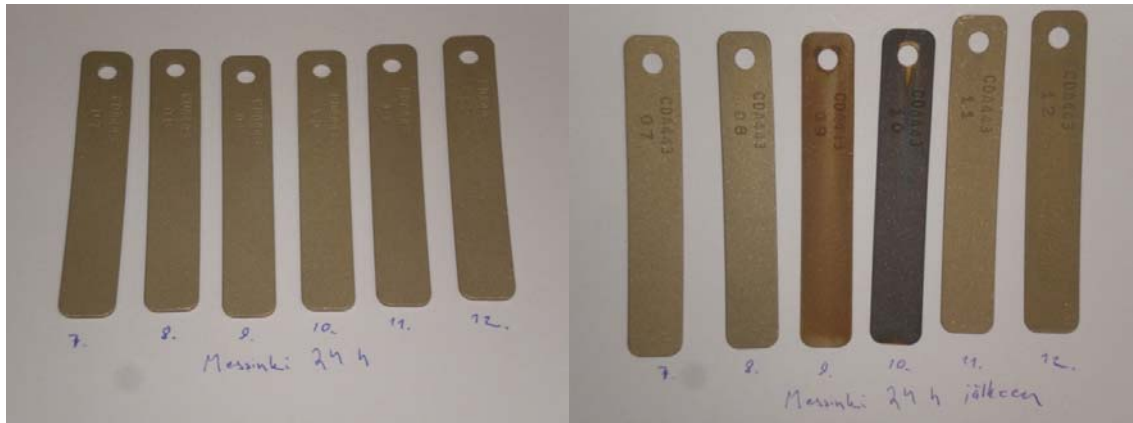
KUVIO 59. Messinki kuuden tunnin reaktioajalla ennen ja jälkeen. (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Messinkisiä korroosiokuponkeja oli vain 20 kappaletta, joten kokeissa täytyi jättää pois peittauskemikaalit nro 3, 9, 11 ja 12. Messinkisistä kokeista erottui ulkoisten muutosten perusteella peittauskemikaali nro 4, 5 ja 10. Peittauskemikaali nro 10 mustasi selkeästi kupongin. Tämä on sinänsä erikoista, sillä massan muutos tällä oli nolla. Myös peittauskemikaali nro 4 ja 5 kohdalla massan muutos on erittäin vähäistä.



KUVIO 60. Messinki 24 tunnin reaktioajalla ennen ja jälkeen peittauskemikaaleilla 1–6. (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Happamista liuoksista jonkinlaisia ulkoisia muutoksia 24 tunnin kokeissa aiheuttivat kaikki, mutta selkeimpiä muutoksia aiheutti peittauskemikaali nro 4 ja 5. Mutta näissäkään massan muutos ei ollut erityisen suurta, enimmillään -1,5 milligrammaa.

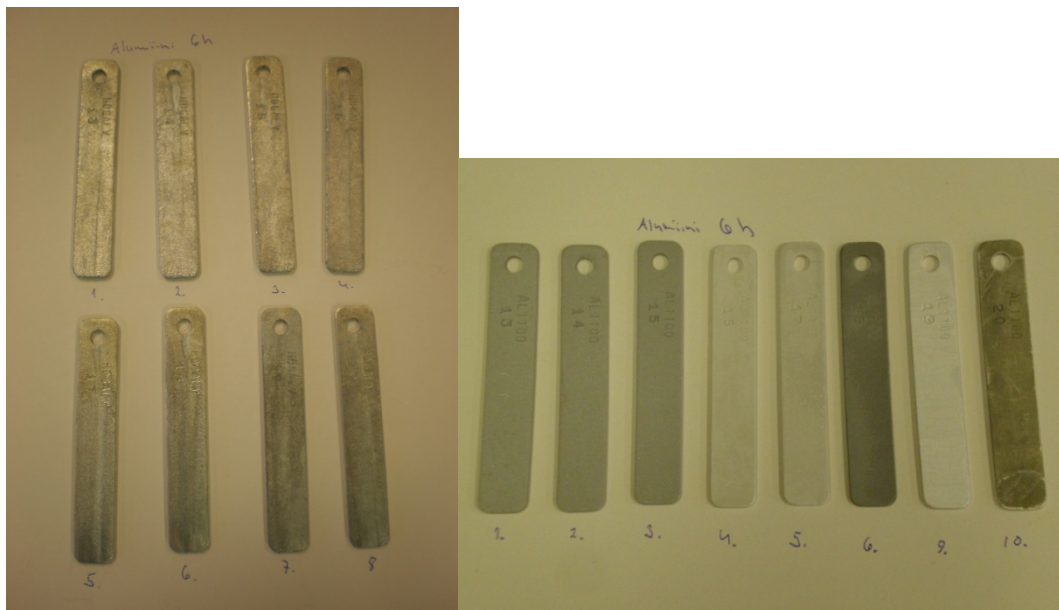


KUVIO 61. Messinki 24 tunnin reaktioajalla ennen ja jälkeen peittauskemikaalali nro 7–12. (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Emäksisissä ja neutraaleissa kemikaaleissa eniten ulkoisia muutoksia aiheutti peittauskemikaali nro 9. ja 10. Neutraalit liuokset eivät juuri vaikuttaneet messinkiin. Emäksisissä massan muutos oli enimmillään -2,2 milligrammaa.

8.2.7 Alumiini

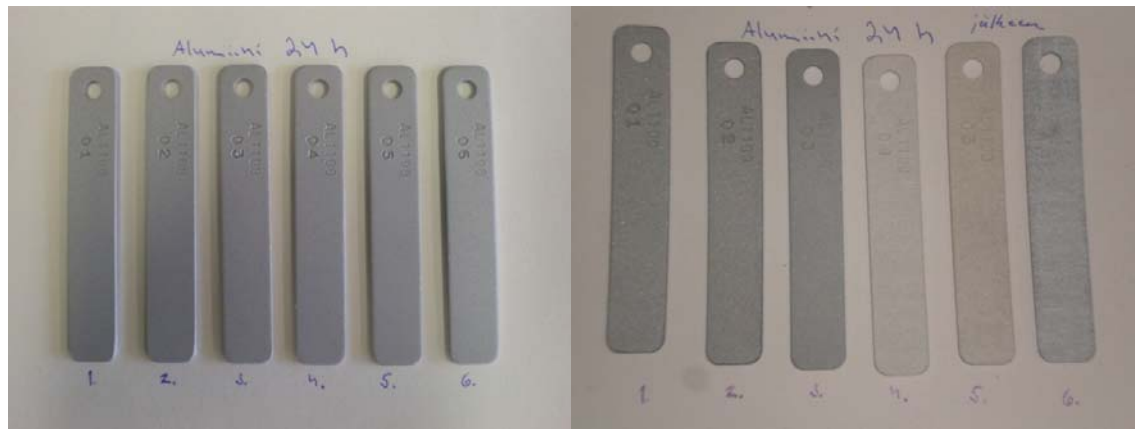
Seuraavissa kuvioissa on esitetty alumiinisten korroosiokuponkien kuvat korroosiokokeiden jälkeen. Kuvioissa 62–64 voidaan todeta mahdolliset ulkoiset muutokset kupongeissa. Alumiini oli sinkityn teräksen ohella toinen materiaali missä tapahtui suurta massahäviötä.



KUVIO 62. Alumiini ennen ja jälkeen kuuden tunnin reaktioajan. (Kuva: Tapani Latvala 2010)

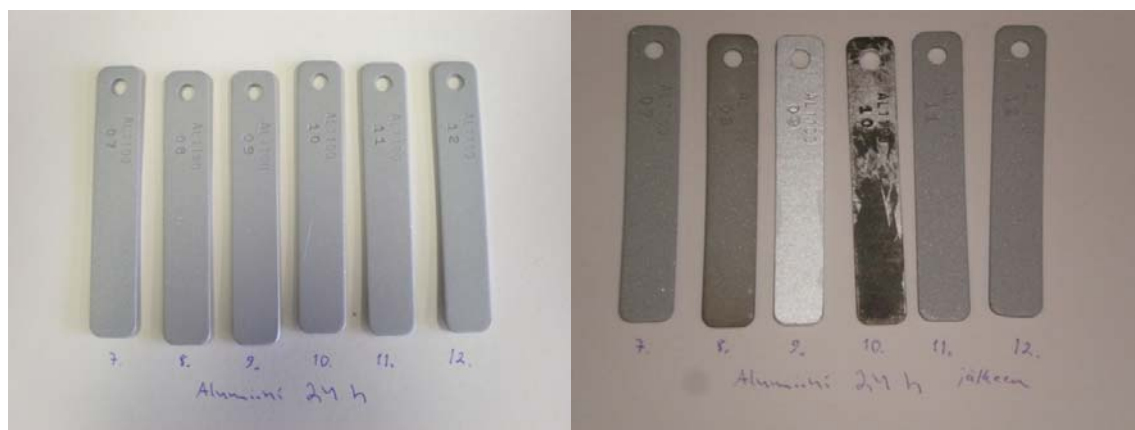
Kuuden tunnin kokeissa, joissa on käytetty muita peittauskemikaaleja paitsi peittauskemikaali nro 7, 9, 11 ja 12, selkeitä ulkoisia muutoksia aiheuttivat peittauskemikaali nro 4, 5, 6, 9 ja 10. Peittauskemikaali nro 1, 2 ja 3 eivät aiheuttaneet juuri ulkoisia muutoksia, lisäksi niiden massahäviö oli huomattavasti pienempi kuin muiden kemikaalien.

Kuviosta 63 voidaan todeta, että 24 tunnin kokeissa happamilla kemikaaleilla ulkoisia muutoksia aiheutti samat kuin kuuden tunnin kokeissa, eli peittauskemikaali nro 4, 5 ja 6. Parhaiten soveltuu happamista peittauskemikaali nro 1, 2 ja 3.



KUVIO 63. Alumiini ennen ja jälkeen 24 tunnin reaktioaikaa peittauskemikaaleilla 1–6. (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Emäksistä ja neutraaleista ulkoisia muutoksia aiheuttivat eniten peittauskemikaali nro 9. ja 10. Peittauskemikaali nro 9 selkeästi kirkasti alumiinin ja peittauskemikaali nro 10 taas tummensi. Tämä näkyy selkeästi kuviossa 64. Näissä massahäviö oli erittäin suurta. Peittauskemikaali nro 7, 11 ja 12 eivät juuri vaikuttaneet ulkoisesti alumiiniin.



KUVIO 64. Alumiini ennen ja jälkeen 24 tunnin reaktioajan kemikaaleilla 7–12. (Kuva: Tapani Latvala 2010)

Hyvin pitkälti voidaan todeta, että ulkoisilla muutoksilla on selvä yhteys massan muutoksen suuruuteen.

9 SAKKAKIRJASTO

Sakkakirjaston tarkoitus on koota yhteen korroosiokokeista ja opinnäytetyön toisen osan liuotuskokeiden tulokset. Tästä sakkakirjastosta pystytään valitsemaan sopivin peittauskemikaali kunkin olosuhteen mukaan. Muuttavana tekijänä on sakka ja lämmönvaihtimen materiaali.

Matriisissa, kuvio 65, on käytetty värikoodeja helpottamaan tunnistusta. Peittauskemikaaleissa punainen vastaa hapanta, sininen emästä ja keltainen neutraalia. Materiaalien soveltuvuudessa on käytetty vihreää symboloimaan lievää korroosiota alle 2 milli-gramman massamuutosta, tai tilannetta missä korroosiota ei ole tapahtunut lainkaan. Keltaisessa värissä massamuutos on 2–10 milligrammaa ja punaisessa yli 10 milli-grammaa. Nämä rajat on päätelty tässä työssä esiintyvien massamuutosten perusteella. Taulukossa 9 jaetaan massan muutokset kolmeen eri luokkaan sakkakirjaston väri-koodien mukaan.

Taulukko 9. Massan muutoksen luokat

Massamuutos	
±0-2mg	ei lainkaan/vähäinen
±2-10mg	selkeä
>10mg	huomattava

Matriisissa käytetään myös opinnäytetyön toisen osan, *Sakkakirjasto: alkuaineanalyysit ja liuotuskokeet*, liuotuskokeiden sakkoja. Sakoille annetaan numerot taulukossa 10. Nämä numerot esiintyvät sakkakirjastomatriisissa joko vihreänä, liukenee, tai punaisena, ei liukene, kunkin peittauskemikaalin numeron alapuolella.

Taulukko 10. Sakkojen numerot.

Sakkanumero	
1	20053
2	30184
3	33883
4	34031
5	36956
6	37625
7	37626
8	37627
9	37961
10	38041
11	38253
12	38461

Kuviossa 65 on esitetty tämän työn tulos, eli sakkakirjasto. Sakkakirjasto on taulukkona liitteenä (Liite 5) A4 kokoisella paperilla.

		Peittauskemiaali									
		1	2	3	4	5	6				
Sakat		4,5,6	1,2,3,7,8 9,10,11,12	1,2,4,5,6	3,7,8,9 10,11,12	1,3,4,5,6,9	2,7,8 10,11,12	4,5	1,2,3,6,7,8 9,10,11,12	1,2,3,4,5,6,7 8,9,10,11,12	3
M a t e r i a l i	Ruostumatont teräs	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	
	Haponkestävä teräs	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	
	Sinkitty teräs	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	
	Mustarauta	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	
	Kupari	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	
	Messinki	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	
	Alumiini	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	
			Peittauskemiaali								
		7	8	9	10	11	12				
Sakat		1,2,3,4,5,6,7 8,9,10,11,12	2,6	1,3,4,5,7,8 9,10,11,12	6	3	1,2,3,4,5,6,7 8,9,10,11,12	1	3		
M a t e r i a l i	Ruostumatont teräs	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h		
	Haponkestävä teräs	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h		
	Sinkitty teräs	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h (ei todettu) 24 h			
	Mustarauta	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h			
	Kupari	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h			
	Messinki	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h (ei todettu) 24 h			
	Alumiini	6 h (ei todettu) 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h 24 h	6 h (ei todettu) 24 h	6 h (ei todettu) 24 h			

KUVIO 65. Sakkakirjasto.

Näissä kuvissa olevat sakat ja niiden koostumukset löytyvät opinnäytetyön toisesta osasta. Sakkojen vähäisen määrän vuoksi ei kaikkia variaatioita pystynyt tekemään liuotuskokeissa. Tämän vuoksi kaikkien kemikaalien kohdalla ei ole käsitelty jokaista sakkaa.

Esimerkkitapauksena voidaan ottaa peittauskemikaali numero 4. Taulukosta voidaan todeta, että kemikaali soveltuu ruostumattomalle teräkselle, haponkestävälle teräkselle, mustaraudalle ja messingille lyhyiksi sekä pitkiksikin peittausajoiksi. Lisäksi nähdään, että tämä kemikaali liuottaa sakkoja numero 4 ja 5, ja niiden sakkojen kaltaisia sakkoja, eli kalkkikerostumia.

10 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTAA

Työ Sakkakirjasto: korroosiokokeet oli mielenkiintoinen ja käytännönläheinen opinnäytetyö. Motivaatio opinnäytetyöhön on parempi kun työn tekijä tietää, että työllä on todellista arvoa. Korroosiokokeet sujuivat suunnitelmien mukaan ja onnistuneesti. Jokaiselle peittauskemikaalin ja materiaalin yhdistelmälle saatiin järkevän tuntuinen tulos, joista oli mahdollista johtaa kahden opinnäytetyön tulos, sakkakirjasto.

Opinnäytetyölle tapahtui useita viivytyksiä ja aikataulujen muutoksia. Opinnäytetyön tekeminen alkoi vasta huhtikuussa ja laboratoriokokeet alkoivat toukokuussa. Aikataulun muutokset johtuivat kahdesta työmahdollisuudesta, jotka tulivat yllättäen opinnäytetyön tekijälle. Onneksi työn aikataulussa oli joustovaraa.

Korroosiokokeissa käytettävien Imotron-korroosiokuponkien niukan määrän vuoksi, jouduttiin tekemään valintoja poisjätettävistä koe yhdistelmistä. Imotron-kuponkeja oli 20 kutakin materiaalia ja reaktioaikaa kohden, tarvittava määrä olisi ollut 24. Tämä valinta poisjätettävistä kokeista oli harmillinen, sillä korroosiokokeet oli tarkoitus tehdä niin sanotusti sokkokokeina.

Myös yksittäisten kokeiden runsaan lukumäärän vuoksi jokaisesta yhdistelmästä tehtiin vain yksi korroosiokoe. Tämä vaikuttaa kokeen tuloksen luotettavuuteen, sillä rinnakkais-kokeet tekevät laboratoriokokeiden tuloksista luotettavimpia. Rinnakkaiskokeisiin olisi tarvinnut kaksi- tai kolminkertaisen määrän korroosiokuponkeja. Lisäksi monet kupongit olivat erimuotoisia, mikä vaikuttaa kupongin asentoon peittauskemikaalikylyssä. Ihanteellisin korroosiokuponkimuoto oli Imotron-kupongeilla. Nämä kupongit oli mahdollista laittaa roikkumaan nesteeseen siten, että kuponki ”kellui” nesteen keskellä. Joillekin kupongeille oli rakennettava telineitä, jotta kupongit saisivat mahdollisimman suuren kosketuspinnan nesteen kanssa. Telineet eivät olleet hankalia, mutta kokeet olisi hyvä suorittaa samalla tavalla.

Jatkotutkimuksille ehdottaisin, että vastaavanlaisissa korroosiokokeissa keskityttäisiin yhteen tai kahteen materiaaliin tai muutamaaan peittauskemikaaliin. Siten olisi mahdollista tehdä rinnakkaiskokeita, ilman että työstä tulisi liian pitkä. Vähemmällä materiaali ja peittaus-kemikaalimäärällä olisi mahdollista tutkia myös lämpötilan ja eri väkevyyksien vaikutuksia. Myös korroosiokylpyjen sekoittaminen on vaihtoehto. Korroosiokylpyihin olisi ehkä hyvä saada liikettä, mikä kuvastaisi nesteen virtausta. Tällainen olisi mahdollista toteuttaa tasosekoittajilla. Valitettavasti TAMKin laboratorion sekoittajien käsittelykyky on melko pieni.

Opinnäytetyön tulos on mielestäni onnistunut, sillä ilmeisesti käytössä ei ole aikaisemmin ollut tällaista matriisimuotoista sakkakirjasto. Vaikka opinnäytetyö venyi suunniteltua pidemmäksi, lopputuloksena on käytäntöön sovellettava sakkakirjasto, joka antaa viitteitä peittauskemikaalien käyttöön erilaiset olosuhteet huomioon ottaen. Sakkakirjasto antaa myös mahdollisuuden tarkemmille jatkotutkimuksille peittauskemikaalien soveltuvuuksista eri ympäristöissä. Itse olen tyytyväinen lopputulokseen ja työ oli mielekäs, koska sillä on todellista arvoa jota on mahdollista soveltaa käytännön työelämään ja se pitää opinnäytetyön mielenkiintoisena koko työn ajan.

LÄHTEET

Kivioja, Seppo, 2009. Konetekniikka. Espoo: Otatieto.

Mansukoski, Raimo 1975. Yleinen prosessitekniikka 3: Lämmönsiirtoprosessit. Helsinki: Helsingin Liike esityspaino.

Napari, Pirjo 2001. Orgaaninen kemia. 2.-5. painos. Helsinki: Oy Edita Ab.

Suomen Korroosioyhdistys, 1988. Korroosiokäsikirja. Hanko: Hangon Kirjapaino Oy.

Suomen KL-Lämpö Oy:n Internet-sivut. Luettu 28.10.2010. <http://www.kl-lampo.com/>

LIITTEET

LIITE 1: 1 (4)

Tapani Latvala 12.5.2010

TAMK

LABORATORIOKOKOKEIDEN SUUNNITELMA

Aikataulu

Laboratoriokokeiden aikataulu on suunniteltu siten, että kokeet alkaisivat viikon 20 maanantaina, eli 17.5. ja kokeet kestäisivät kolme viikkoa. Eli perjantaihin 4.6. asti. Kokeita tehdään laboratoriossa viitenä päivänä viikossa klo 0800 – 1600, tarvittaessa myöhempään. On mahdollista, että kaikki kokeet pystytään suorittamaan jo kahdessa viikossa, mutta kolmas viikko on hyvä varata ennustamattomien tilanteiden varalta. Ensimmäinen päivä todennäköisesti menee tarvikkeiden keräämiseen ja työpisteen järjestelyyn, sekä viimeinen työpisteen purkuun ja siivoamiseen.

Kokeiden kesto

Liutuskokeet kestävät min. yhdestä tunnista kuuteen tuntiin riippuen sakan liukenemisnopeudesta, kuitenkin maksimissaan kuusi tuntia. Liutuskokeet voi hyvin käynnistää aamulla ja lopettaa tarvittaessa, mutta kuitenkin yhden työpäivän aikana.

Korroosiokokeissa muuttuvana tekijänä on reaktioaika. Reaktioaikana käytetään 6 tuntia ja 24 tuntia. Kuuden tunnin korroosiokokeet voidaan suorittaa työpäivän aikana, mutta 24 tunnin kokeet kestävät vuorokauden yli, eli lopetetaan seuraavana päivänä.

Laboratoriokokeet

Opinnäytetyössä tehtävät laboratoriokokeet ovat liutuskokeet ja korroosiokokeet. Näitä kokeita tehdään eri liuoksilla (13 kpl peittauskemikaaleja), liuosvahvuuksilla ja reaktioajoilla.

Liutuskokeisiin käytetään noin 12 eri sakkaa ja korroosiokokeisiin 7 eri korroosiokupunkia. Kokeita tulee siis useita eri variaatioita, joiden tuloksia voidaan arvioida etukäteen kirjallisuudesta saatavan teorian tiedon avulla ja voi auttaa näin kokeiden aikatauluja/suunnittelua.

Liutuskokeet

Liutuskokeet tehdään ns. sokkokokeina, eli teorian tietoa ei käytetä hyväksi sakkojen liuotuksissa. Sakkojen määrä tulee olemaan noin 12 (10 – 12). Sakkoja liuotetaan Suomen KL-Lämmön omiin peittauskemikaaleihin, 13 kpl, ja näistä kemikaaleista tehdään kahta eri vahvuusastetta, esim. 10 % ja 20 %. Näin ollen eri liuoksia tulee olemaan 26 kappaletta.

LIITE 1: 2 (4)

Sakkoja liuotetaan kuhunkin näistä liuoksista, joten kaiken kaikkiaan liuotuskokeita tulee olemaan 312 kappaletta.

Sakkojen liukenemista seurataan **ensimmäisen puolen tunnin ajan koko ajan, sen jälkeen vähintään 30 minuutin välein** ja yksittäinen koe lopetetaan kunnes sakka on liuennut täysin, kuitenkin enintään kuuden tunnin ajan. Mikäli liuotuskokeissa sakka ei liukene, lisätään liuoksen vahvuutta maksimissaan 50 %:iin. Mikäli vieläkään ei mitään näkyvää reaktiota synny, liuosta lämmitetään +50°C:een. Nämä lisäykset lienevät kuitenkin epätodennäköisiä. **Tässä kohtaa pitäisi selvittää auttaako liuoksen lämmitys sakan liukenemista normaalilla annostelulla. Esim. Jos tunnin aikana ei tapahdu mitään, liuosta voidaan alkaa lämmittämään ja seurata reaktioita.**

Liuotuskokeet suoritetaan erlenmeyereissä (100 ml) joihin punnitaan n. 1 g sakkaa (sakan määrä pitää olla reilusti silmillä havaittava, jotta liukenemista voidaan visuaalisesti seurata). Sakkojen punnitusmäärät ja liuostilavuudet merkitään ylös ja jos liuos haihtuu lämmitettäessä, pidetään alkutilavuus lisäämällä tarvittaessa vettä. Erlenmeyerit laitetaan sekoituslaitteeseen, mikä sekoittaa useita astioita jatkuvasti pyörittäen yhtäjaksoisesti.

Liukenemisajat kirjataan valmiille tulospaperille joka on tehty kokeita varten. Tulokset myöhemmin siirretään Excel-muotoon. Tavoitteena on löytää mahdollisimman tehokas liuotuskombinaatio jokaiselle sakalle.

Korroosiokokeet

Korroosiokokeet tehdään samoilla 13 peittauskemikaalilla (kahdella liuosvahvuudella) ei laimenneta?) seitsemälle (7) eri materiaalista olevalle korroosiokupongille/kappaleelle, ruostumaton teräs, haponkestävä teräs, sinkitty teräs ja musta rauta sekä kupari, messinki ja alumiini. Nämä kokeet tehdään kahdella eri reaktioajalla, 6 h ja 24h. Mahdollinen korrosio todetaan punnitsemalla kuponki analyysivaivalla, ennen ja jälkeen kylpyjen. Korroosiokupongit valokuvataan ennen ja jälkeen kokeita. Mikroskooppitarkastelut. Näillä laskelmilla kokeita tulisi 182 kappaletta (kahdella väkevyydellä yhteensä 364).

Korroosiokupongit pestään ennen koeliuokseen upottamista. Kupongit pestään siten että ne laitetaan 30 minuutiksi 15 %:en suolahappoliuokseen, jonka jälkeen kupongit pestään tislattulla vedellä ja laitetaan vielä 10 minuutiksi 5 %:en NaHCO₃-liuokseen. Tämän jälkeen ne vielä huuhdellaan NaHCO₃-liuoksella ja tislattulla vedellä ja annetaan kuivua lämpökaapissa. (50°C, 1 tunti). Kuponkien annetaan jäähtyä huoneenlämmössä ja ne numeroidaan pysyvällä permanenttitussilla. Kupongit valokuvataan ja punnitaan. Sen jälkeen kupongit upotetaan koeliuokseen. Työvaiheet ja ajat kirjataan ylös.

On huolehdittava/varmistettava etukäteen, että merkinnät pysyvät kupongeissa.

Korroosiokylvyt ovat dekkaja tai kylvyt leikataan muovisista kanistereista ja leikataan myös kammat, jotka pitävät kuponkeja pystyssä liuoksessa. Yksi liuos per kuponki per kylpy. Kylpyjä voidaan sekoittaa tasosekoittajassa koko reaktioajan ajan. Tämä ei kuitenkaan pakollista, mutta suositeltavaa. Tämän jälkeen kupongit tarvittaessa puhdistetaan korroosiotuotteesta

LIITE 1: 3(4)

huuhtelemalla tislattulla vedellä ja tarvittaessa mekaanisesti. Kupongit kuivataan lämpökaapissa (50°C) tunnin ajan. Kuponkien annetaan jäähtyä huoneenlämmössä vuorokauden, jotta kupongit ovat kaikki saman lämpöisinä. Punnitaan analyysivaakalla. Korroosion voimakkuus todetaan massan muutoksella.

Tavoitteena on löytää sopivin peittauskemikaali ja reaktioaika mikä aiheuttaa mahdollisimman vähän korroosiota kupongissa. Tulokset kirjataan paperille ja myöhemmin siirretään Excel-muotoon.

Välineet

Laboratoriokokeisiin tarvittavat välineet ja reagenssit olisivat seuraavat:

- vetokaappi
- analyysivaaka
- lämmitettävät magneettisekoittajat (keittolevy)
- mittalasi, 50 ml, 100 ml
- erlenmeyerit, min. 20 kpl, 100 ml
- kylvyt, lasiastiat joissa hahlot korroosiokupongeille + kannet
- lämpökaappi
- kertakäyttöpipettejä
- punnitusastiat
- spaatteleita/lusikoita
- parafilmiä
- sekoittaja, pystyy sekoittamaan yhtäjaksoisesti useampaa astiaa, 1 – 2 kpl
- 1500 ml mittapullo, 2 kpl
- tislattua vettä ja suihkupullo
- suolahappoa, n. 100 ml
- NaHCO₃, n. 100 g
- eksikaattori
- merkintävälineet

Nämä löytyvät koululta. Lisäksi Suomen KL-Lämpö Oy:ltä peittauskemikaalit, sakat ja korroosiokupongit. Korroosiokupongit olisi hyvä mitoittaa kylpyihin sopiviksi.

LIITE 1: 4 (4)

Tulokset

Kokeista saadut tulokset kerätään paperiseen muotoon, josta ne myöhemmin siirretään sähköiseen muotoon Excel- taulukkoon. Tavoitteena liuotuskokeissa on löytää sakoille tehokkain liuotuskemikaaliyhdistelmä ja korroosiokokeissa vähiten korroosiota aiheuttava yhdistelmä. Kaikki tulokset kuitenkin raportoidaan opinnäytetyössä. Näistä tuloksista kootaan tuotekartta, mistä löytyy mahdollisimman selkeästi oikea peittäuskemikaali kullekin tapaukselle.

LIITE 2: 2 (2)

Korroosio- kemiaal	Väkevyy- s	Kesto	Kupari		Messinki		Alumiini		Erotus
			Ennen	Jälkeen	Ennen	Jälkeen	Ennen	Jälkeen	
1	25 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
2	25 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
3	25 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
4	25 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
5	25 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
6	10 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
7	3 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
8	2 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
9	20 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
10	5 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
11	25 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
12	20 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0
13	1 %	6 h 24 h	0	0	0	0	0	0	0

LIITE 3: 1 (2)

Peittauskermitaali ja väkevyyys	Kupari			Messinki			Alumiini			
	Kesto	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos
1	35% *	10,1598	10,1584	-0,0014	12,0439	12,0433	-0,0006	3,9443	3,9422	-0,0021
		10,8456	10,8445	-0,0011	12,1131	12,1117	-0,0014	3,9443	3,9402	-0,0041
2	25 %	10,8490	10,8475	-0,0015	12,0711	12,0702	-0,0009	3,9480	3,9424	-0,0056
		10,3211	10,3193	-0,0018	12,0455	12,0431	-0,0024	3,9471	3,928	-0,0191
3	35% *	10,3417	10,3410	-0,0007	g	g	g	3,9448	3,9428	-0,0020
		10,9847	10,9834	-0,0013	12,0991	12,098	-0,0011	3,9464	3,9385	-0,0079
4	25 %	10,3477	10,4363	0,0886	12,0653	12,065	-0,0003	3,9472	3,9006	-0,0466
		10,7679	10,7647	-0,0032	12,1262	12,1249	-0,0013	3,9460	3,8499	-0,0961
5	25 %	10,1031	10,1014	-0,0017	12,1395	12,1395	0,0000	3,9455	3,9039	-0,0416
		10,2979	10,2943	-0,0036	12,1433	12,1418	-0,0015	3,9459	3,8634	-0,0825
6	10 %	9,8788	9,8773	-0,0015	12,0447	12,0427	-0,0020	3,9445	3,8794	-0,0651
		10,6641	10,6615	-0,0026	12,0621	12,0574	-0,0047	3,9462	3,6883	-0,2579
7	3 %	10,1299	10,1293	-0,0006	11,9591	11,9598	0,0007	-	g	g
		10,2414	10,2410	-0,0004	12,1989	12,1995	0,0006	3,9529	3,9528	-0,0001
8	2 %	10,5833	10,5822	-0,0011	12,1765	12,1778	0,0013	-	g	g
		10,6705	10,6689	-0,0016	12,1855	12,1854	-0,0001	3,9485	3,9486	0,0001
9	20 %	11,1460	11,1444	-0,0016	g	g	g	3,9500	3,7729	-0,1771
		10,6662	10,6640	-0,0022	12,0920	12,0902	-0,0018	3,9483	3,4787	-0,4696
10	5 %	10,4071	10,4050	-0,0021	12,1074	12,1074	0,0000	3,9490	3,7634	-0,1856
		10,8063	10,8027	-0,0036	12,1569	12,1547	-0,0022	3,9451	3,2154	-0,7297
11	25 %	9,4134	9,4127	-0,0007	g	g	g	-	g	g
		10,5572	10,5564	-0,0008	12,1833	12,182	-0,0013	3,9410	3,9407	-0,0003
12	20 %	10,4725	10,4714	-0,0011	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
		10,2025	10,2016	-0,0009	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei	Ei
13	1 %	10,0413	10,0405	-0,0008	g	g	g	-	g	g
		10,5128	10,5123	-0,0005	12,0560	12,0524	-0,0036	3,9562	3,9558	-0,0004

	Peittauskemiaalli ja väkevyyt	Ruostumatonta terästä			Haponkestävää terästä			Sinkitty teräs			Mustarautaa			
		Kesto	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos	Ennen	Jälkeen	Muutos
1	35 %	6 h	9,3489	9,3495	0,0006	9,5293	9,5298	0,0005	12,5723	12,5354	-0,0369	9,1889	9,1845	-0,0044
		24 h	9,2732	9,2732	0,0000	9,8508	9,8519	0,0011	12,5492	11,9864	-0,5628	9,2869	9,2800	-0,0069
2	25 %	6 h	9,2366	9,2371	0,0005	9,5314	9,5331	0,0017	12,7314	12,7068	-0,0246	9,1711	9,1688	-0,0023
		24 h	9,3032	9,3016	-0,0016	10,1066	10,1048	-0,0018	12,7487	12,1028	-0,6459	9,2244	9,2204	-0,0040
3	35 %	6 h	9,3591	9,3516	-0,0075	10,0433	10,0442	0,0009	12,6522	12,6616	0,0094	9,3133	9,3125	-0,0008
		24 h	9,2335	9,2329	-0,0006	10,0229	10,0226	-0,0003	12,7093	12,7236	0,0143	9,2310	9,2311	0,0001
4	25 %	6 h	9,2962	9,2973	0,0011	9,5000	9,5017	0,0017	12,5992	12,0527	-0,5465	9,2884	9,2880	-0,0004
		24 h	9,2459	9,2458	-0,0001	9,9010	9,9012	0,0002	12,6395	12,1125	-0,5270	9,1599	9,1582	-0,0017
5	25 %	6 h	9,1821	9,1827	0,0006	10,0274	10,0317	0,0043	12,6117	12,0719	-0,5398	9,1542	9,1529	-0,0013
		24 h	9,3365	9,3366	0,0001	10,0639	10,0649	0,0010	12,5691	12,0309	-0,5382	9,2121	9,2077	-0,0044
6	10 %	6 h	9,3019	9,3002	-0,0017	9,9806	9,9795	-0,0011	12,6389	12,1198	-0,5191	9,0832	9,0808	-0,0024
		24 h	9,2692	9,2633	-0,0059	9,9940	9,9888	-0,0052	12,6089	12,0676	-0,5413	9,2526	9,2440	-0,0086
7	3 %	6 h	9,2412	9,2420	0,0008	9,9740	9,9750	0,0010	12,5983	12,5941	-0,0042	9,3166	9,3161	-0,0005
		24 h	9,3122	9,3120	-0,0002	9,9732	9,9745	0,0013	12,7190	12,7137	-0,0053	9,2302	9,2281	-0,0021
8	2 %	6 h	9,2819	9,2844	0,0025	10,0748	10,0757	0,0009	12,4475	12,4475	0,0000	9,2469	9,2474	0,0005
		24 h	9,3276	9,3277	0,0001	9,9851	9,9870	0,0019	12,6513	12,6490	-0,0023	9,1709	9,1699	-0,0010
9	20 %	6 h	9,2832	9,2842	0,0010	9,4968	9,4975	0,0007	g	g	g	9,1828	9,1826	-0,0002
		24 h	9,3176	9,3182	0,0006	9,8824	9,8816	-0,0008	12,7183	12,7018	-0,0165	9,1668	9,1657	-0,0011
10	5 %	6 h	9,3089	9,3099	0,0010	9,5020	9,5036	0,0016	g	g	g	9,0951	9,0957	0,0006
		24 h	9,2515	9,2519	0,0004	9,8841	9,8862	0,0021	12,6768	12,6668	-0,0100	9,2890	9,2878	-0,0012
11	25 %	6 h	9,3246	9,3255	0,0009	9,9880	9,9894	0,0014	g	g	g	9,2535	9,2536	0,0001
		24 h	9,2718	9,2728	0,0010	9,5587	9,5607	0,0020	12,5603	12,5729	0,0126	9,2013	9,2003	-0,0010
12	1 %	6 h	9,3059	9,3066	0,0007	9,9784	9,9795	0,0011	g	g	g	9,1882	9,1866	-0,0016
		24 h	9,2039	9,2051	0,0012	10,0754	10,0769	0,0015	12,6708	12,6630	-0,0078	9,2754	9,2692	-0,0062

LIITE 4

Peittaus- kemikaali	Väkevyyys	Kesto	Rt.	Ht.	St.	Mr.	Cu.	Me.	Al.
			Muutos ±0,2 mg						
1	35 %	6 h	0,6	0,5	-36,9	-4,4	-1,4	-0,6	-2,1
		24 h	0	1,1	-563	-6,9	-1,1	-1,4	-4,1
2	25 %	6 h	0,5	1,7	-24,6	-2,3	-1,5	-0,9	-5,6
		24 h	-1,6	-1,8	-646	-4	-1,8	-2,4	-19,1
3	35 %	6 h	-7,5	0,9	9,4	-0,8	-0,7		-2
		24 h	-0,6	-0,3	14,3	0,1	-1,3	-1,1	-7,9
4	25 %	6 h	1,1	1,7	-547	-0,4	88,6	-0,3	-46,6
		24 h	-0,1	0,2	-527	-1,7	-3,2	-1,3	-96,1
5	25 %	6 h	0,6	4,3	-540	-1,3	-1,7	0	-41,6
		24 h	0,1	1	-538	-4,4	-3,6	-1,5	-82,5
6	10 %	6 h	-1,7	-1,1	-519	-2,4	-1,5	-2	-65,1
		24 h	-5,9	-5,2	-541	-8,6	-2,6	-4,7	-258
7	3 %	6 h	0,8	1	-4,2	-0,5	-0,6	0,7	
		24 h	-0,2	1,3	-5,3	-2,1	-0,4	0,6	-0,1
8	2 %	6 h	2,5	0,9	0	0,5	-1,1	1,3	
		24 h	0,1	1,9	-2,3	-1	-1,6	-0,1	0,1
9	20 %	6 h	1	0,7		-0,2	-1,6		-177
		24 h	0,6	-0,8	-16,5	-1,1	-2,2	-1,8	-470
10	5 %	6 h	1	1,6		0,6	-2,1	0	-186
		24 h	0,4	2,1	-10	-1,2	-3,6	-2,2	-730
11	25 %	6 h	0,9	1,4		0,1	-0,7		
		24 h	1	2	12,6	-1	-0,8	-1,3	-0,3
12	1 %	6 h	0,7	1,1		-1,6	-0,8		
		24 h	1,2	1,5	-7,8	-6,2	-0,5	-3,6	-0,4

