



samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

SAMULI VEHMAS

Yhden päivän siemenlevy nikkelielektrolyysissä

ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2022

Tekijä Vehmas, Samuli	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2022
	Sivumäärä 35	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi Yhden päivän siemenlevy nikkielektrolyysissä		
Tutkinto-ohjelma Energia- ja ympäristötekniikka		
Tiivistelmä <p>Työssä oli tarkoituksena selvittää olisiko Norilsk Nickel Harjavalta Oy:n nikkielektrolyysissä mahdollista tuottaa siemenlevyjä nykyistä nopeammalla prosessilla. Nykyinen tuotanto kestää noin 48 tuntia ja työssä testattiin pystytäänkö hyvänlaatuisia siemenlevyjä tuottamaan noin 24 tunnissa. Harjavallan nikkielektrolyysissä ei tällä hetkellä ole mahdollisuutta tuottaa siemenlevyjä nopeammalla syklillä, mutta opinnäytetyön tulokset mahdollisesti tukevat tulevaisuuden laitteistojen hankintaa, joilla nopeutettu prosessi tehtäisiin mahdolliseksi.</p> <p>Siemenlevyjä tuotetaan syöttämällä tasavirtaa nikkeli-liuoksessa eli katolyytissä oleville elektrodeille, positiivisesti varautuneelle anodille ja negatiivisesti varautuneelle katodille. Tämä luo anodin ja katodin väliin jännitteen, jolloin liuoksen nikkeli-ionit varautuvat positiivisesti ja alkavat pelkistyä katodin pinnalle. Siemenlevyprosessin tapauksessa katodina toimii titaaniemälevy, jonka pintaan nikkeli muodostaa siemenlevyn.</p> <p>Työn testit suoritettiin Harjavallan nikkielektrolyysin hallissa normaalituotantoa mukailevalla testilaitteistolla. Testeissä käytettiin katolyyttiä tuotannosta. Testeissä mitattiin prosessiin käytetty virta, jännite, aika, levyjen paksuus, leveys sekä korkeus ja niiden paino sekä tarkkailtiin silmämääräisesti levyjen laatua. Mittaustuloksista laskettiin siemenlevyjen tuotantoprosessin virtahyötysuhde sekä energiankulutus.</p> <p>Testien tulosten perusteella siemenlevyjen nopeampi tuottaminen olisi mahdollista laitteistojen uusinoilla testeissä huomioitujen parametrien osalta. Kuitenkaan muita vaikuttavia tekijöitä, kuten mahdollisia päästöjen lisääntymistä sekä lisääntyneitä turvallisuusriskejä ei tutkittu eikä niitä testeissä havaittu. Laskettujen testitulosten erot vertailukappaleisiin olivat suurimmaksi osaksi pieniä ja tärkein ominaisuus eli siemenlevyjen laatu oli testikappaleissa sekä vertailukappaleissa samankaltainen.</p>		
Avainsanat Elektrolyysi, Siemenlevy, Emälevy, Virtahyötysuhde		

Author(s) Vehmas, Samuli	Type of Publication Bachelor's thesis	Date May 2022
	Number of pages 35	Language of publication: Finnish
Title of publication One-day seed cathode in nickel electrolysis		
Degree programme Energy and environmental engineering		
<p>Abstract</p> <p>The object of the thesis was to figure out if it would be possible to produce nickel seed cathodes with a shorter process in Norilsk Nickel Harjavalta Oy's nickel electrowinning plant. The current production lasts about 48 hours and in the thesis was tested if seed cathodes process could be about 24 hours without compromising the quality of the cathodes. Harjavalta's nickel electrowinning plant does not currently have the capabilities to produce seed cathodes at a faster rate, but the outcome of the thesis could possibly back the acquirement of future equipment that would make this possible for the plant.</p> <p>The seed cathodes are produced by supplying direct current to the positively charged anode and the negatively charged cathode i.e. to the electrodes that are in a nickel solution i.e. the catholyte. This creates a voltage between the cathode and the anode causing the catholyte's nickel ions to charge positively and start to reduce on the surface of the cathode. In the seed cathode process, the cathode is a mother plate made of titanium to which's surface the nickel forms a seed plate.</p> <p>The tests of the thesis were completed in the Harjavalta nickel electrowinning plant's hall with test equipment imitating the normal process. The catholyte from the normal production was used in the tests as a raw material. The used current, voltage, time as well as the height, width, thickness, and the weight of the seed cathodes in the tests were measured and the quality of the cathodes was visually monitored. The current efficiency and energy consumption of the seed cathode process were calculated from the measurement results.</p> <p>Based on the tests of the thesis, a shorter process to produce seed cathodes would be possible with the renewal of equipment considering the parameters of the tests. However, other factors, such as increased emissions and the additions to safety risks were not regarded. The differences between the test result calculations for the test cathodes and the reference cathodes were mostly minimal and the most important characteristic i.e. the quality of the seed cathodes was similar in both the test cathodes and in the reference cathodes.</p>		
Keywords Electrolysis, Seed cathode, Mother plate, Current efficiency		

ALKUSANAT

Kiitos Norilsk Nickel Harjavalta Oy:lle mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta. Haluan kiittää toimeksiantajayrityksen ohjaajaa Tuomo Laukkasta sekä edustajaa Rauno Luomaa, kuin myös kaikkia opinnäytetyöprosessissa auttaneita Norilsk Nickel Harjavalan elektrolyysin henkilöstön jäseniä.

Lisäksi haluan kiittää oppilaitoksen edustajaa, opinnäytetyöni ohjaajana toiminutta Eija Joutsenvirtaa avusta ja ohjauksesta läpi opinnäytetyöprosessin.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 NORILSK NICKEL HARJAVALTA OY.....	7
2.1 Liuottamo	7
2.2 Pelkistämä	8
2.3 Kemikaalitehdas	9
2.4 Elektrolyysi	9
3 ELEKTROLYYSI.....	11
3.1 Faradayn vakio	11
3.2 Nikkelin elektrolyysi.....	12
4 TESTIT	15
4.1 Testilaitteisto	15
4.2 Testiprosessi.....	16
4.2.1 Virta ja jännite	17
4.2.2 Katolyytin syöttö	17
5 TESTIAJOT	19
5.1 Vertailukappale 1	19
5.2 Vertailukappale 2	20
5.3 Vertailukappale 3	21
5.4 Testi 1.....	21
5.5 Testi 2.....	22
5.6 Testi 3.....	23
5.7 Testi 4.....	24
5.8 Testi 5.....	24
5.9 Testi 6.....	25
5.10 Testi 7.....	26
5.11 Testi 8.....	26
5.12 Testi 9.....	27
5.13 Testi 10.....	28
5.14 Testi 11	28
5.15 Testi 12.....	29
6 TESTITULOKSET	30
6.1 Virtahyötysuhteet	30
6.2 Energiankulutukset.....	31
6.3 Siemenlevyjen paksuudet.....	31
6.4 Stanssatut siemenlevyt	33
7 JOHTOPÄÄTELMÄT	34

LÄHTEET

LIITTEET

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli testata NNH:n eli Norilsk Nickel Harjavalta Oy:n nikkielektrolyysin nykyisen siemenlevyjen kahden vuorokauden kasvatussyklin nopeuttamista yhteen vuorokauteen siemenlevyjen laatua vaarantamatta.

Työ suoritettiin NNH:n elektrolyysihallissa yhden emälevyn testialtaalla eli normaalituotantoa pienemmässä mittakaavassa olevalla testilaitteistolla, joka on kuitenkin olosuhteiltaan vertailtavissa normaalituotantoon. Normaalituotannosta poikkeavia parametrejä testeissä oli virtapiirissä olevien levyjen määrä sekä virran suuruus.

NNH:n elektrolyysissä ei tällä hetkellä ole mahdollista tuottaa siemenlevyjä nykyistä lyhyemmässä ajassa. Nykyisellä tasasuuntaajalla ei ole mahdollista nostaa siemenlevytuotantoon käytettävillä emälevyaltailta virtaa vaikuttamatta katodituotantoon käytettäviin altaisiin. Tulevaisuuden investoinneissa on jo vanhan tasasuuntaajan uusinta ja tätä myötä mahdollisesti testien osoittaessa olisi ottaa käyttöön myös säätöjärjestelmä, jolla voitaisiin mahdollistaa siemenlevyjen tuottaminen lyhyemmässä ajassa.

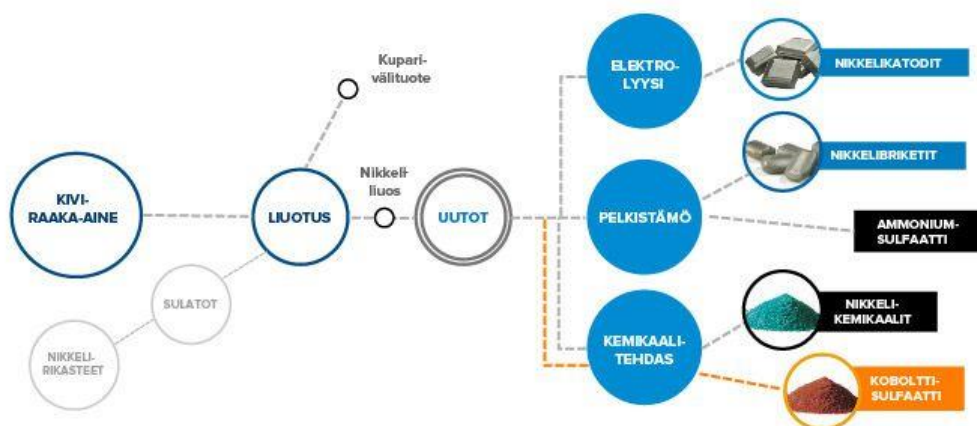
Opinnäytetyön testeistä saadut siemenlevyt stanssattiin sekä valmisteltiin muilta osin mahdollista katodeiksi kasvatusta varten, jos työn toimeksiantaja näin haluaisi, kuitenkin opinnäytetyössä tätä ei suoritettu. Työssä ei myöskään huomioitu normaalituotantoa lyhyemmän kasvatusajan mahdollisesti synnyttämiä päästö- sekä turvallisuustekijöitä. Näitä ovat mm. rikin lisääntynyt vapautuminen prosessissa sekä mahdollisen oikosulun tapauksessa altaalla tapahtuvat reaktiot, kuten vetypaukahdukset ja liiallinen lämpeneminen, jonka myötä taas altaan kunto kärsisi.

2 NORILSK NICKEL HARJAVALTA OY

Norilsk Nickel Harjavalta Oy on vuodesta 2007 asti ollut osa venäläistä kaivos- ja metallialan MMC Norilsk Nickel -konsernia, joka on maailman suurin nikkelin tuottaja. Konsernin tuotantoyksiköt sijaitsevat Harjavaltaa lukuun ottamatta Venäjällä, myös sen päämaja sijaitsee Venäjällä Moskovassa. (Nornickel, 2022.)

Norilsk Nickel Harjavalta Oy työllistää n. 300 henkilöä ja välillisesti se työllistää Suurteollisuuspuiston alueelta näiden lisäksi reilusti työntekijöitä kuljetuspalveluiden, kunnossapidon ym. kautta. NNH:n liikevaihto oli vuonna 2020 n. 1,1 miljardia euroa, josta liike-tulosta yritys teki n. 48 miljoonaa euroa. (Kauppalehti, 2022.)

NNH jakautuu neljään eri tuotanto-osastoon: Liuottamoon, Pelkistämöön, Kemikaali-tehtaaseen sekä Elektrolyysiin, jonka prosesseihin tämä opinnäytetyö keskittyi. NNH:n tuotteita ovat erityyppiset pitkälle jalostetut laadukkaat nikkelimetallit ja -kemikaalit. Näistä esimerkkejä, kuten nikkelikatodeja, näkyy kuvassa 1 tuotantoprosessin tapahtumajanan ohella.



Kuva 1. NNH tuotanto (Nornickel, 2022).

2.1 Liuottamo

Liuottamo tuottaa raakaliuoksen, jota käytetään nikkelin jalostamiseen muiden tuotanto-osastojen prosesseissa. Raakaliuos tuotetaan liuottamalla kuulamylyssä jauhettu

nikkelipitoinen kivi rikkihapon ja hapen avulla, jonka jälkeen sitä vielä liuotetaan korkeassa paineessa ja lämpötilassa. Tällöin saadaan kaikki nikkeli liuotettua sekä epäpuhtaudet, kuten rauta sekä kupari saadaan saostamalla pois liuoksesta. Liuottamo ei tuota jalostettuja jälleenmyytäviä tuotteita. Liuosjäännöksenä erotettu Cu-sakka kuitenkin myydään jatkokäsiteltäväksi mm. Norliskin Kuolan tehtaalle. (Poikkimäki, 2015, s. 8.)

2.2 Pelkistäminen

Pelkistäminen jatkopuhdistaa liuottamalla tuotettavaa liuosta uuttoprosessissa jäljellä olevista epäpuhtauksista, esimerkiksi koboltista. Raakaliuos käsitellään keroseenilla, jonka jälkeen se käy läpi kobolttiuuton sekä kalsiumuuton, joissa liuoksesta poistuu mm. koboltti, sinkki, lyijy, kalsium, rauta, kupari sekä mangaani. Uuton puhdistusten jälkeen tuotettu liuos siirretään eteenpäin pelkistämön muille osastoille sekä elektrolyysiin ja kemikaalitehtaalle jatkokäsittelyyn. Tärkeimpänä sivutuotteena syntyy puhdistuksesta kobolttisulfaattiliuosta, josta tuotetaan kemikaalitehtaalla kobolttisulfaattikiteitä. (Nornickel, 2018b, s. 8.)

Pelkistämön jalostusprosessissa tuotetaan pääasiassa nikkelibrikettejä (kuva 2). Nikkeliliuos pelkistetään vedyn avulla panoksittain autoklaaveissa, joissa muodostuva nikkelipulveri erotetaan liuoksesta sakeuttamalla ja suodattamalla. Tämän jälkeen kuivattu pulveri pakataan suoraan tai se tehdään briketeiksi typpisitrauksella. Loppuliuos saostetaan ja kuivataan sivutuotteeksi, ammoniumsulfaatiksi. (Nornickel, 2018b, s. 8.)



Kuva 2. Nikkelibrikettejä (Nornickel, 2018a).

2.3 Kemikaalitehdas

Kemikaalitehdas tuottaa nikkeli-liuoksesta epäorgaanisia suoloja. Pääraaka-aineena toimii uutosta saatava nikkeli-sulfaattiliuos. Liuoksesta valmistetaan kiteyttämällä nikkeli-sulfaattia (kuva 3), saostamalla nikkeli-karbonaattia sekä nikkeli-hydroksidia käyttämällä natrium-karbonaattia sekä natrium-hydroksidia saostimena. (Nornickel, 2018b, s. 8.)



Kuva 3. Nikkeli-sulfaattia (Nornickel, 2018a).

Kemikaalitehtaalla sijaitsee myös NNH:n vesienkäsittely, jossa puhdistetaan prosessivesien sekä tehdasalueelta kerättyjen sadevesien sisältämät metallit ennen. Vesien laatua seurataan kemikaalitehtaalla, jotta varmistetaan ettei se sisällä epäpuhtauksia ja se voidaan pumpata ympäristölle turvallisena jokeen. (Nornickel, 2018b, s. 9.)

2.4 Elektrolyysi

Elektrolyysi valmistaa Electrowinning-tekniikan avulla n. 99,8 % nikkeliä sisältäviä nikkeli-katodeja. Katodien kasvatus aloitetaan siemenlevyjen avulla, joita kasvatetaan titaaniemälevyjen pintaan, josta ne irrotetaan sitä varten tarkoitetulla strippauslinjalla tai käsin ”strippaamalla”. Siemenlevyt ovat ohuita nikkeli-levyjä, jotka toimivat kasvualustana nikkeli-katodeille. Elektrolyysissä johdetaan tasavirtaa liukenemattomien lyijyanodien kautta elektrolyyttiin ts. katolyyttiin ja siemenlevylle tai emälevylle. Altaat ovat kytkettynä sarjaan eli jokaisen altaan läpi kulkee yhtä suuri virta, ja altaissa olevat anodit sekä katodit ovat puolestaan kytketty rinnan. Tässä opinnäytetyössä keskityttiin lähinnä elektrolyysin siemenlevyprosessiin ja sen nopeuttamiseen. (Nornickel, 2018b, s. 7.)

Harjavallan nikkeli-elektrolyysissä on 128 tuotantoallasta, joista suurinta osaa käytetään katodien tuotantoon ja tilanteesta riippuen n. 20 allasta käytetään siemenlevy-tuotantoon. Katodit ja siemenlevyt kasvatetaan diafragma-pusseissa, joihin syötetään liuottamon tuottama uuton läpikäynyt katolyyttiliuos, johon on sekoitettu elektrolyysissä natriumlauryylisulfaattia, joka puolestaan muodostaa altailla vaahtokerroksen, joka estää suuren osan päästöistä halli-ilmaan. Sähkövirran avulla nikkeli-ionit pelkistyvät katolyttistä katodin pinnalle. Siemenlevyt kasvavat emälevyn pintaan 2 vuorokauden kuluessa, kun taas katodit kasvavat elektrolyysialtaissa noin 6-7 vuorokautta. Kasvu-aika riippuu kyseisenä ajankohtana käytettävästä sähkövirrasta, virtahyötysuhteesta sekä tasasuuntaajan virtapiirissä olevien altaiden määrästä. Osana elektrolyysiä toimii myös leikkaamo, jossa leikataan katodit asiakkaiden toiveiden mukaisiksi paloiksi (kuva 4).



Kuva 4. Nikkelikatodipaloja (Nornickel, 2018a).

3 ELEKTROLYYSI

Elektrolyysi ja opinnäytetyön tapauksessa periaatteessa tarkemmin elektrolyyttisen pinnoituksen muoto on prosessi, jossa siirretään ja samanaikaisesti puhdistetaan elektrolyyttisesti metallia kappaleen pinnalle elektrolyyttiin liuotetusta metallista. Elektrolyytti on tuotettu liuottamalla metallia sisältävää raakakiveä liuokseen (yleensä tuloksena sulfaattiliuos), josta tuloksena on liuos, joka sisältää sähköisesti varautuneita partikkeleja tai ioneja.

Elektrolyysiprosessissa syötetään sähkövirtaa kahden elektrodin välillä, jotka puolestaan ovat upotettuina elektrolyyttiin. Positiivisesti varautunutta elektrodia kutsutaan anodiksi ja negatiivisesti varautunutta elektrodia puolestaan katodiksi. Kun elektrodien väliin luodaan jännite, alkavat elektrolyytin sähköisesti varautuneet ionit siirtymään kohti vastakkaisen varauksen omaavaa elektrodia. Positiivisesti varautuneet ionit kohti katodia ja negatiivisesti varautuneet kohti anodia. Tämä reaktio aiheuttaa elektronien vaihdon ja toteuttaa siten suljetun virtapiirin. (Rose & Whittington, 2014, s. 6.)

3.1 Faradayn vakio

Elektrolyysin tuottama metallimäärä voidaan päätellä ja laskea Michael Faradayn tutkimusten mukaan. Faraday totesi tutkimuksessaan, että katodille pelkistyvä metallin määrä sekä anodilla tapahtuva hapetus korreloivat suoraan läpikulkevan virran määrän kanssa. Toisin sanoen pelkistyvän nikkelin määrä voidaan laskea suoraan elektrolyysissä käytettävän virran ja elektrolyysiin käytettävän ajan avulla. (Rose & Whittington, 2014, s. 7.)

Faraday sai tutkimuksissaan myös löydettyä yhteyden eri metallien elektrolyysireaktiossa pelkistämien tai hapettamien partikkelien määrän suoraan niiden atomimassaan sekä reaktioon osallistuvien elektronien määrän mukaan. Reaktioon osallistuvien elektronien määrä on ominainen eri metalleille ja se nähdään metallin alkeisvarauksesta. Jakamalla metallin atomimassa sen alkeisvarauksella ja vertaamalla sitä

Faradayn vakioon saadaan siis metallille ominainen vakio (X), sekä elektrolyysiin käytettyä aikaa ja virran määrää käyttäen saadaan elektrolyysin tuottama teoreettinen metallin määrä (W). (Rose & Whittington, 2014, s. 6-7.)

Metallille ominainen vakio (X) (Määrä metallia, joka saadaan per Faradayn vakio):

$$X = \frac{M_A/q}{\text{Faradayn vakio}}, \quad M_A = \text{Atomimassa [u]} \quad (1)$$

q = Alkeisvaraus

Faradayn vakio näyttää kuinka paljon virtaa vaaditaan metallin yhden gramman tuottamiseen elektrolyyttisesti. Faradayn vakio on 96 500 C (Coulombia eli ampeerisekuntia) eli 26,799 Ah (Ampeerituntia). (Rose & Whittington, 2014, s. 7.)

Elektrolyyttisesti tuotettavan metallin teoreettinen massa (m_{teor}) saadaan seuraavasti:

$$m_{teor} = X * I * t, \quad I = \text{Virta [A]} \quad (2)$$

t = Aika [h]

Edellä mainitut kaavat suoraan laskettua kuitenkin olettavat, että kaikki elektrolyysin piiriin syötetty virta menee elektrolyysiin eikä systeemissä ole häviöitä. Todellisuudessa virtahyötysuhde ei ole 100 % ja tämä pitää ottaa laskennassa huomioon. (Rose & Whittington, 2014, s. 8.)

3.2 Nikkelin elektrolyysi

Nikkelin atomimassa on 58,70 u ja sen alkeisvaraus on +2 (Fabricius ym., 2010, s. 52–53), joten edellisessä kappaleessa esitetyt metallille ominaiset kaavat olisivat nikkelille seuraavanlaiset:

Nikkeliä per Faradayn vakio (Ni ominainen vakio):

$$X = \frac{58,70/2}{26,799} = 1,095 \quad (3)$$

Teoreettisen massan laskentakaava nikkelille:

$$m_{teor} = 1,095 * I * t \quad (4)$$

Todellisuudessa yllä olevaan teoreettisen massan kaavaan tulisi lisätä Harjavallan nikkelielektrolyysin tapauksessa virtapiirin allasmäärä, koska kaikki altaat ovat kytkettyinä samaan tasasuuntaajaan, eli teoreettisen massan laskentakaava olisi silloin (Nornickel, 2009.):

$$m_{teor}(Ni) = 1,095 * I * t * allasmäärä \quad (5)$$

Virtahyötysuhde vaihtelee yleensä nikkellektrolyysissä välillä 90...97 %. Vaihtelu johtuu pääasiassa elektrolyysin sivureaktioihin kuluva energiasta, kuten vedyn muodostumisesta prosessissa. Myös kasvuympäristön pH sekä reaktiossa vapautuvan kloridin pitoisuus aiheuttavat virtahäviöitä. Virtahyötysuhde voidaan nikkellektrolyysin tapauksessa laskea kaavalla (Nornickel, 2009.):

$$VHS = \frac{\text{Todellinen paino} - \text{Siemenlevyn paino}}{\text{Teoreettinen paino}} * 100 \% \quad (6)$$

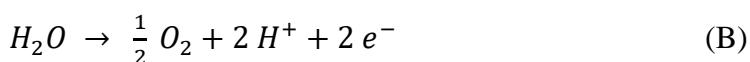
Siemenlevyjien tapauksessa edellinen kaava voidaan yksinkertaistaa poistamalla yhtiöstä jakoviivan yläpuolella oleva osa ja korvaamalla se siemenlevyn mitatulla painolla, jolloin saadaan kaava:

$$VHS = \frac{\text{Siemenlevyn paino}}{\text{Teoreettinen paino}} * 100 \% \quad (7)$$

Katodilla tapahtuvassa reaktiossa nikkeli pelkistyy emälevylle/siemenlevylle reaktion (A) mukaisesti (Nornickel, 2019):



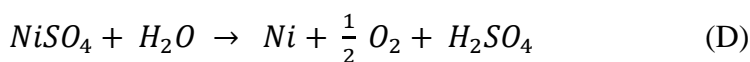
Anodilla tapahtuva reaktio (B) puolestaan on (Nornickel, 2019):



Prosessissa ei-toivottuna reaktiona (C) tapahtuu myös seuraava (Nornickel, 2019):



Kennoreaktiona (D) on sitä myötä (Nornickel, 2019):



Harjavallan nikkeli-elektrolyysissä katolyytin syöttö on mitoitettu ns. Delta-nikkelin mukaan. Delta-nikkeli tarkoittaa nikkelipitoisuuden eroa katolyytissä ja reaktiossa muodostuvassa anolyytissä. Katolyytin nikkelipitoisuus on elektrolyysissä n. 120 g/L ja Delta-nikkeli arvoksi on asetettu 30 g/L. Jos katolyytin nikkelipitoisuus laskee alle 80 g/L, syntyy mahdollisuus tuottaa hydraattikatodia, joka on liian huolaatuista myytäväksi ja taas jos nikkelipitoisuus on hyvin korkea eli yli 130 g/L syntyy mahdollisuus saostumien muodostumiseen altaalla. (Nornickel, 2019.)

Katolyytin ominaisuuksina myös tärkeitä ovat sen pH sekä lämpötila. Näitä seurataan tarkasti ja voidaan itsenäisesti säätää elektrolyysissä muista osastoista riippumatta. Katolyytin tavoite-pH on noin 4,5–5 ja sitä säädetään rikkihapolla. Jos katolyytin pH on liian lähellä neutraalia (yli 5,5) on mahdollisuus, että altailla muodostuu hydraattikatodia. Jos katolyytti on liian hapanta (pH alle 4), alkaa katodilla muodostumaan enemmän vetyä, joka taas laskee virtahyötysuhdetta ja sitä myötä tuotantoa. Katolyytin lämpötila on elektrolyysiin sen tullessa n. 50 astetta ja sitä jäähdytetään levylämmönvaihtimilla. Tavoitelämpötilana jäähdytyksen jälkeen on n. 25 astetta. Jos katolyyttiä jäähdytettäisiin liikaa, olisi vaarana sen kiteytyminen kaksoissuolaksi ($\text{Ni}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$). (Nornickel, 2019.)

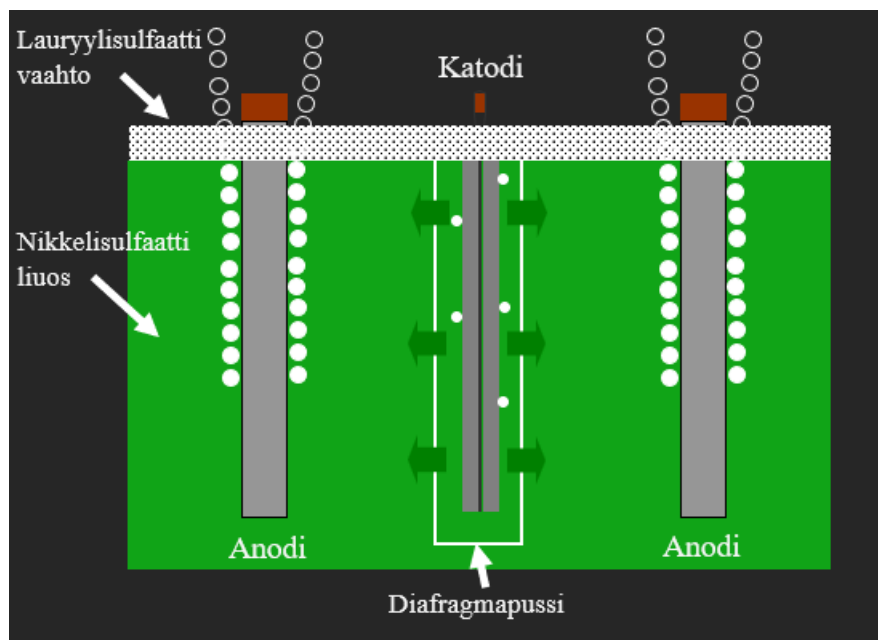
Katolyyttiä pitää jäähdyttää, koska anolyytin lämpötila ei saa nousta yli 70 asteen, sillä allaskalusto ei sitä kestäisi. Kuitenkaan altaiden lämpötilaa pidetään n. 65 asteessa, koska mitä suurempi lämpötila on, sitä suurempi on prosessin virtahyötysuhde. Lämpöä anolyyttiin muodostuu reaktiossa eli mitä suurempi virta altaaseen tulee, sitä enemmän sitä pitää katolyytillä jäähdyttää.

4 TESTIT

Opinnäytetyön testit suoritettiin Harjavallan nikkielektrolyysissä. Testien vaatimat työtehtävät suoritti suurimmalta osin opinnäytetyön tekijä, mutta testien valvonnassa auttoivat myös Elektrolyysin työnjohto sekä allastehtävissä Elektrolyysin prosessihenkilöstö.

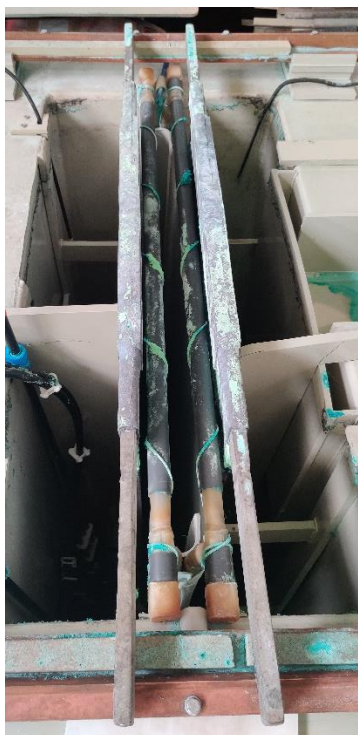
4.1 Testilaitteisto

Testit suoritettiin laitteistolla, joka mukailee normaalituotantoa parhaansa mukaan, mutta on kooltaan pienempi ja sitä kautta kasvuympäristö on helpommin säädeltävissä. Testilaitteistossa on normaalin 48 tai 52 katodin sijaan vain 1 katodi eli tässä tapauksessa emälevy, koska tavoitteena on kasvattaa siemenlevyjä. Katodin molemmilla puolilla on anodi ja allas täytettiin samalla nikkelisulfaattiliuoksella kuin normaalituotannossa olevat altaat. Natriumlauryylisulfaatin syöttö toteutettiin erillisellä annostelupumpulla. Ohessa kaaviokuva testialtaasta (kuva 5).



Kuva 5. Testialtaan kaaviokuva.

Kuvassa 6 on esitetty testiallas yläpuolelta. Kuvassa ei ole katodia altaassa, joten pelkät anodit sekä diafragmapussi näkyvissä.



Kuva 6. Testiallas yläpuolelta kuvattuna.

Testialtaalla on oma tasasuuntaajansa, jotta virtaa saadaan säädettyä normaalituotantoa häiritsemättä ja suoraan testilaitteistolta. Altaalla on myös oma lämmitysvastuksensa, jotta saavutetaan riittävä lämpötila optimaaliseen kasvatusympäristöön. Jännitettä sekä lämpötilaa voidaan seurata altaalle asennetun CellSense-järjestelmän avulla etänä Metso-DNA-sovelluksen avulla.

4.2 Testiprosessi

Testit aloitettiin kasvattamalla siemenlevyjä normaalin tuotannon parametreilla, jotta saatiin allas lämmitettyä sekä tuotettua testialtaalla vertailukappaleet testikappaleihin. Normaalituotannon mukaisia 2 vuorokauden siemenlevyjä tuotettiin 3 kierron ajan eli 6 kpl siemenlevyjä. Tämän jälkeen aloitettiin testaamaan 1 vuorokauden kestävää sykliä, jota tehtiin 12 kertaa eli yhteensä tuotettiin 24 siemenlevyä. Testien ajaksi virta sekä katolyytin syöttö kaksinkertaistettiin ja suuruudet selitetään seuraavissa kappaleissa. Jännitteen arvot jätettiin opinnäytetyön julkisesta versiosta pois.

4.2.1 Virta ja jännite

Siemenlevytuotannossa virta on elektrolyysissä normaalisti n. 18,0 kA ja siemenlevy-tuotannon altailla on 52 kpl emälevyjä (Nornickel, 2015). Tarvittava virrantiheys saa-daan jakamalla käytettävä virta jaettuna emälevyjen määrällä ja molempien puolien pinta-alalla:

$$A = 2 * 1,03 \text{ m} * 0,927 \text{ m} \approx 1,91 \text{ m}^2 \quad \text{Yhden emälevyn pinta-ala.}$$

$$I = \frac{18,0 \text{ kA}}{52} = 0,346 \text{ kA} \approx 350 \text{ A} \quad \text{Emälevykohtainen virta}$$

$$\frac{I}{A} = \frac{346,15 \text{ A}}{1,91 \text{ m}^2} \approx 181 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \quad \text{Emälevyn virrantiheys}$$

Testeissä vaadittiin prosessin nopeuttamiseen kahdesta vuorokaudesta yhteen vuoro-kauteen kaksinkertainen virta, joten testeissä käytettiin virtaa, joka oli n. 700 A. Tes-tilaitteiston tasasuuntaaja kuitenkin ei pystynyt pitämään virtaa täysin tasaisena, jo-ten virta mitattiin aina ennen nostoa sekä syklin alussa ja käytettiin näiden keskiarvoa laskentaan.

Vertailukappaleiksi tuotettujen siemenlevyjen prosessissa testialtaan tasasuuntaaja pystyi pitämään virran sekä jännitteen sen verran tasaisina, että voidaan käyttää las-kennassa kaikille asetusarvoja eli samaa jännitettä ja samaa virtaa eli 350 A.

4.2.2 Katolyytin syöttö

Normaalituotannossa 48 katodin tuotantoaltailla katolyytin syöttö on optimaalisesti n. 600 L/h, joten tästä voidaan laskea yhden katodin altaan tarvitsema syöttö:

$$\frac{600 \frac{\text{L}}{\text{h}}}{48} = 12,5 \frac{\text{L}}{\text{h}} \rightarrow \frac{12,5 \frac{\text{L}}{\text{h}}}{60 \text{ min/h}} \approx 0,21 \frac{\text{L}}{\text{min}}$$

Koska virta on kaksinkertainen, kuluu myös liuoksesta nikkeliä kaksinkertainen määrä, joten testit vaativat kaksinkertaisen määrän katolyytin syöttöä eli testeissä syö-tön piti olla vähintään 0,42 L/min. Kuitenkin heti testien alussa huomattiin, että

testialtaan lämpötila nousi tällä syöttömäärällä liian korkeaksi eli yli 70 asteen, jolloin altaan kunto voisi kärsiä, joten syöttöä nostettiin minimimäärää korkeammaksi. Tämä stabilisoi altaan lämpötilan hyvälle tasolle ja pitää kuitenkin lämpötilan tarpeeksi korkealla, ettei virtahyötysuhde kärsi. Myös vertailukappaleiden tuotannossa katolyytin syöttö oli hieman yli minimimäärän (0,21 L/min), jotta voitiin varmistua, ettei syötetty liian vähän nikkeliä altaaseen.

5 TESTIAJOT

Kaikki testit pyrittiin suorittamaan samoilla parametreilla, esitettynä raportointipohjan ohella liitteessä 1, ja täten samoissa olosuhteissa, mutta kuten jo edellisessä osiossa on mainittu, testilaitteisto ei pystynyt pitämään olosuhteita tasaisena. Tämä tarkoittaa sitä, että laskentaan vaikuttavia muuttuvia arvoja testeissä olivat jännite, virta sekä kasvatussyklin kesto. Jännitteitä ei kuitenkaan esitetty työn julkisessa versiossa. Mitattujen arvojen avulla laskettiin virtahyötysuhteet sekä energiankulutukset testeille, energiankulutuksien arvot kuitenkin jätettiin pois julkisesta versiosta.

Siemenlevyjen ”striippaantuvuutta” eli kuinka hyvin siemenlevy irtosi emälevyn pinnasta sekä siemenlevyjen pinnanlaatua arvioitiin silmämääräisesti ja kokemusten perusteella. Mitatut arvot, joita käytettiin laskennoissa löytyvät liitteistä 2-16, tuloksissa on esitetty laskennat pyöristetyillä arvoilla.

5.1 Vertailukappale 1

Vertailukappaleiden jännitekeskiarvot saatiin testialtaan mittauslaitteiston avulla prosessin seurantajärjestelmästä ja testien virta pysyi tarpeeksi tasaisena, että voidaan olettaa sen keskiarvon olevan lähellä tavoiteparametriä eli 350 A. Testin kasvatussykli kesti 45 h. Levy 1 painoi 6,7 kg ja levy 2 8,2 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 14,9 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 350 A * 45 h = 17246 g \Rightarrow 17,2 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{14,9 kg}{17,2 kg} * 100 \% = 86,4 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 7).



Kuva 7. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.2 Vertailukappale 2

Testin kasvatussykli kesti 48,8 h ja laskennassa käytettiin virtaa 350 A. Levy 1 painoi 8,0 kg ja levy 2 7,5 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 15,5 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 350 A * 48,8 h = 18703 g \Rightarrow 18,7 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{15,5 kg}{18,7 kg} * 100 \% = 82,9 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 8).



Kuva 8. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.3 Vertailukappale 3

Testin kasvatussykli kesti 46,6 h ja laskennassa käytettiin virtaa 350 A. Levy 1 painoi 7,9 kg ja levy 2 8,9 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 16,8 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 350 A * 46,6 h = 17859 g \Rightarrow 17,9 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{16,8 kg}{17,9 kg} * 100 \% = 94,1 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 9).



Kuva 9. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.4 Testi 1

Ensimmäistä testiä suoritettaessa testialtaan mittauslaitteisto ei ollut toiminnassa ja arvoja ei mitattu. Testien tavoiteparametrit ja muiden testien mittaukset kuitenkin ovat niin lähellä toisiaan, että voidaan käyttää muissa testeissä mitattujen arvojen keskiarvoa. Täten voidaan käyttää laskennassa keskiarvojännitettä ja virtaa 704 A. Testin kasvatussykli kesti 25 h. Levy 1 painoi 8,2 kg ja levy 2 8,2 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 16,4 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 704 A * 25 h = 19272 g \Rightarrow 19,3 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{16,4 \text{ kg}}{19,3 \text{ kg}} * 100 \% = 85,1 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä pieniä kohtia toisessa levyssä lukuun ottamatta, näkyy pieninä tummina kohtina. (Kuva 10).



Kuva 10. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.5 Testi 2

Kuten ensimmäisessä testissä, ei vielä toisessa kierrossakaan saatu mittauksia, joten käytetään samoja keskiarvoja kuin testissä 1. Testin kasvatussykli kesti 23,7 h. Levy 1 painoi 7,4 kg ja levy 2 8,3 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 15,7 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 704 \text{ A} * 23,7 \text{ h} = 18270 \text{ g} \Rightarrow 18,3 \text{ kg}$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{15,7 \text{ kg}}{18,3 \text{ kg}} * 100 \% = 85,9 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 11).



Kuva 11. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.6 Testi 3

Kasvatussykli testissä oli 23,7 h ja virran keskiarvo 699 A. Levy 1 painoi 8,2 kg ja levy 2 8,2 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 16,4 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 699 A * 23,7 h = 18140 g \Rightarrow 18,1 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{16,4 kg}{18,1 kg} * 100 \% = 90,4 \%$$

Siemenlevyt olivat hieman kasvaneet keskeltä alareunasta kiinni listaan, joten niitä piti irrottaa apuvälineen avulla. Siemenlevyjen pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 12).



Kuva 12. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.7 Testi 4

Kasvatussykli testissä oli 22,5 h ja virran keskiarvo 691,5 A. Levy 1 painoi 7,6 kg ja levy 2 8,2 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 15,8 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 691,5 A * 22,5 h = 17037 g \Rightarrow 17,0 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{15,8 kg}{17,0 kg} * 100 \% = 92,7 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 13).



Kuva 13. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.8 Testi 5

Kasvatussykli testissä oli 24 h ja virran keskiarvo 697 A. Levy 1 painoi 8,2 kg ja levy 2 8,9 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 17,1 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 697 A * 24 h = 18317 g \Rightarrow 18,3 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{17,1 kg}{18,3 kg} * 100 \% = 93,4 \%$$

Siemenlevyt irtosivat pääasiassa helposti emälevyn pinnasta, mutta toinen levyistä oli kasvanut alareunasta hieman listaan kiinni, joten siemenlevy piti vetää irti listasta. Siemenlevyjen pinnanlaatu oli pääasiallisesti hyvä (Kuva 14).



Kuva 14. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.9 Testi 6

Kasvatussykli testissä oli 23,8 h ja virran keskiarvo 703,5 A. Levy 1 painoi 8,2 kg ja levy 2 8,9 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 17,1 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 703,5 A * 23,8 h = 18334 g \Rightarrow 18,3 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{17,1 kg}{18,3 kg} * 100 \% = 93,3 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä, mutta pintaan oli muodostunut jonkin verran vedyn muodostamaa pientä reikää (Kuva 15).



Kuva 15. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.10 Testi 7

Kasvatussykli testissä oli 24,3 h ja virran keskiarvo 703 A. Levy 1 painoi 8,1 kg ja levy 2 9,2 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 17,3 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 703 A * 24,3 h = 18706 g \Rightarrow 18,7 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{17,3 kg}{18,7 kg} * 100 \% = 92,5 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 16).



Kuva 16. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.11 Testi 8

Kasvatussykli testissä oli 24,2 h ja virran keskiarvo 708 A. Levy 1 painoi 8,2 kg ja levy 2 9,1 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 17,3 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 708 A * 24,2 h = 18761 g \Rightarrow 18,8 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{17,3 kg}{18,8 kg} * 100 \% = 92,2 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 17).



Kuva 17. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.12 Testi 9

Kasvatussykli testissä oli 23,4 h ja virran keskiarvo 693,5 A. Levy 1 painoi 7,6 kg ja levy 2 8,6 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 16,2 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 693,5 A * 23,4 h = 17770 g \Rightarrow 17,8 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{16,2 kg}{17,8 kg} * 100 \% = 91,2 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 18).



Kuva 18. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.13 Testi 10

Kasvatussykli testissä oli 23,8 h ja virran keskiarvo 710 A. Levy 1 painoi 8,2 kg ja levy 2 9,2 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 17,4 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 710 A * 23,8 h = 18503 g \Rightarrow 18,5 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{17,4 kg}{18,5 kg} * 100 \% = 94,0 \%$$

Toinen siemenlevy irtosi emälevyn pinnasta hyvin, mutta toinen oli hieman alanurkasta kasvanut reunan listan päälle ja vaati hieman kääntelyä irrotukseen. Siemenlevyjen pinnanlaatu oli hyvä, kuitenkin hieman vetyreikiä on havaittavissa (Kuva 19).



Kuva 19. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.14 Testi 11

Kasvatussykli aloitettiin ja lopetettiin samaan kelloaikaan, mutta testin aikana siirrettiin kelloja kesäaikaan, joten kasvatussykli testissä oli 23 h ja virran keskiarvo 698 A. Levy 1 painoi 7,6 kg ja levy 2 8,6 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 16,2 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 698 A * 23 h = 17579 g \Rightarrow 17,6 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{16,2 kg}{17,6 kg} * 100 \% = 92,2 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 20).



Kuva 20. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

5.15 Testi 12

Kasvatussykli testissä oli 23,1 h ja virran keskiarvo 735 A. Levy 1 painoi 7,9 kg ja levy 2 8,8 kg, joten levyjen todellinen yhteismassa oli 16,7 kg. Levyjen teoreettinen massa saatiin kaavasta 4:

$$m_{teor} = 1,095 * 735 A * 23,1 h = 18591 g \Rightarrow 18,6 kg$$

Täten prosessin virtahyötysuhteeksi saatiin kaavan 7 mukaisesti:

$$VHS = \frac{16,7 kg}{18,6 kg} * 100 \% = 89,8 \%$$

Siemenlevyt irtosivat emälevyn pinnalta helposti ja niiden pinnanlaatu oli hyvä (Kuva 21).



Kuva 21. Kuvakokoelma siemenlevyistä molemmin puolin.

6 TESTITULOKSET

Tuloksissa verrattiin toisiinsa vertailukappaleiden sekä testeissä tuotettujen siemenlevyjen edellä laskettuja virtahyötysuhteita sekä mitattuja siemenlevyn paksuuksia. Myös testi- sekä vertailukappaleiden energiankulutuksia verrattiin toisiinsa suhteellisesti toisiinsa nähden. Paksuudet mitattiin digitaalisella paksuusmittarilla levyn reunoista neljästä eri kohdasta suurin piirtein samoista kohdista levyjä (n. 5 cm sivusta ja ylä/alareunasta). Siemenlevyt myös stanssattiin leikkaamon stanssauslinjastolla ja stanssattuja levyjä tarkasteltiin silmämääräisesti ja verrattiin toisiinsa. Stanssauksessa leikataan levy siihen muotoon, missä se laitetaan kasvamaan altaaseen.

6.1 Virtahyötysuhteet

Vertailukappaleiden virtahyötysuhteet (VHS) vaihteli 82,9 ja 94,1 prosentin välillä. Keskiarvo vertailukappaleille oli 87,8 prosenttia (Taulukko 1).

Taulukko 1. Vertailukappaleiden VHS-keskiarvot.

<i>Virtahyötysuhde</i>	<i>[%]</i>
12/03/2022	86,4
14/03/2022	82,9
16/03/2022	94,1
Keskiarvo	87,8

Testeissä tuotettujen siemenlevyjen VHS puolestaan oli keskiarvolta 91,1 prosenttia ja vaihteluväli oli 85,1 ja 94,0 prosentin välillä (Taulukko 2). Virtahyötysuhteet olivat suhteellisen tasaisia ja hyvällä tasolla eli yli 90 prosentissa kahta ensimmäistä testi-kiertoa lukuun ottamatta. Ensimmäisten kahden testikierron aikana ei mitattu virtoja altaalta ja altaan mittauslaitteisto ei ollut toiminnassa, joten virrat olivat mahdollisesti hieman matalampia kuin oletettua ja tästä johtuen virtahyötysuhteet olivat pienempiä kuin muissa kierroissa.

Taulukko 2. Testikappaleiden VHS-keskiarvot.

<i>Virtahyötysuhde</i>	<i>[%]</i>
17/03/2022	85,1
18/03/2022	85,9
19/03/2022	90,4
20/03/2022	92,7
21/03/2022	93,4
22/03/2022	93,3
23/03/2022	92,5
24/03/2022	92,2
25/03/2022	91,2
26/03/2022	94,0
27/03/2022	92,2
28/03/2022	89,8
Keskiarvo	91,1

Vertailukappaleiden sekä testeissä tuotettujen siemenlevyjen virtahyötysuhteiden keskiarvot erosivat toisistaan 3,3 prosenttia.

6.2 Energiankulutukset

Energiankulutus oli vertailukappaleissa selvästi pienempi kuin testisiemenlevyissä. Tämä voi mahdollisesti johtua siitä, että vertailukappaleiden laskennoissa käytetyt jännitteen arvot olivat testialtaan mittauslaitteistolta saatuja keskiarvoja, kun taas manuaalisesti paikan päällä tehdyt mittaukset eivät näytä koko syklin keskiarvoa ja niissä voi muutenkin olla laitteista johtuvaa heittoa. Testikappaleiden energiankulutus oli keskiarvolta lähes 20 % enemmän energiaa per kilogramma nikkeliä.

6.3 Siemenlevyjen paksuudet

Siemenlevyjen paksuutta tarkasteltiin pääasiassa siitä syystä, että jos siemenlevyt ovat liian ohuita, ei niiden rakenne kestä siemenlevyn käsittelyä ja täten niitä ei pystyttäisi laittamaan helposti altaisiin kasvatusta varten. Erot siemenlevyjen paksuuksissa voivat muuttua reilusti kohdan valitsemisen mukaan, koska mitat ovat niin pieniä, jolloin pintojen epätasaisuudet muuttavat tulosta helposti. Siemenlevyjen mitatut paksuudet löytyvät laskenta-arvojen ohella liitteistä 2–16.

Testialtaalla tuotettujen vertailusiemenlevyjen paksuus oli keskiarvolta 0,77 mm, keskiarvopaksuuden vaihdellen välillä 0,70 ja 0,89 mm (Taulukko 3). Mittauksissa ohuimman tulos oli 0,5 mm ja paksuin 0,98 mm (Liitteet 2-4).

Taulukko 3. Vertailukappaleiden keskiarvopaksuudet.

<i>Siemenlevyn paksuus (reunoista)</i>	<i>Levy 1 [mm]</i>	<i>Levy 2 [mm]</i>
12/03/2022	0,79	0,70
14/03/2022	0,71	0,70
16/03/2022	0,81	0,89
Keskiarvo	0,77	0,76
<i>Keskiarvojen keskiarvo</i>	0,77	

Testisiemenlevyjen keskiarvopaksuus oli puolestaan 0,81 mm ja vaihteluväli siemenlevyjen keskiarvoista lasketussa paksuudessa oli 0,68...0,88 mm (Taulukko 4). Pienin mittaustulos oli 0,52 mm ja suurin 1,19 mm (Liitteet 5-16).

Taulukko 4. Testikappaleiden keskiarvopaksuudet.

<i>Siemenlevyn paksuus (reunoista)</i>	<i>Levy 1 [mm]</i>	<i>Levy 2 [mm]</i>
17/03/2022	0,81	0,86
18/03/2022	0,80	0,75
19/03/2022	0,81	0,86
20/03/2022	0,82	0,73
21/03/2022	0,88	0,83
22/03/2022	0,81	0,84
23/03/2022	0,86	0,79
24/03/2022	0,83	0,71
25/03/2022	0,78	0,68
26/03/2022	0,88	0,76
27/03/2022	0,82	0,73
28/03/2022	0,86	0,87
Keskiarvo	0,83	0,78
<i>Keskiarvojen keskiarvo</i>	0,81	

6.4 Stanssatut siemenlevyt

Siemenlevyjen stanssaus saatiin suoritettua normaalisti ja vertailukappaleet sekä testi-siemenlevyt olivat stanssauksen kaikki hyvin samanlaisia eli voidaan todeta, että stanssaus onnistui testisiemenlevyillä hyvin. Tarkempaa analysointia stanssatuille levyille ei tehty. Stanssattuja vertailusiemenlevyjä näkyy kuvassa 22 sekä testisiemenlevyjä kuvassa 23.



Kuva 22. Kuvakokoelma stanssatuista siemenlevyistä (Vertailukappaleet 2).



Kuva 23. Kuvakokoelma stanssatuista siemenlevyistä (Testiajot 3 ja 4).

7 JOHTOPÄÄTELMÄT

Opinnäytetyön testitulosten perusteella voidaan päätellä, että siemenlevyjä olisi teoriassa mahdollista tuottaa Harjavallan nikkeli-elektrolyysissä lyhyemmässä ajassa kuin nykyisessä prosessissa. Testeissä tuotetut siemenlevyt olivat ominaisuudeltaan hyvin samanlaisia kuin vertailukappaleiksi samoissa olosuhteissa tuotetut siemenlevyt. Siemenlevyjien pinnanlaadut olivat silmämääräisesti myös hyvin samanlaisia, erot olivat suurimmalta osin värjäytymiä, jotka johtuivat mahdollisesti säilytyksessä levyjen väliin jääneistä nesteistä. Tuloksissa lasketut arvot olivat myös hyvin lähellä toisiaan.

Nopeamman siemenlevyproduktion suurempi katolyttin tarve tarkoittaa myös katolyttin suurempaa pumppaustarvetta, joka kuluttaa täten enemmän sähköä, kuin lyhyempi tuotanto. Suurempi sähkönkulutus pumppauksen sekä korkeamman energiankulutuksen myötä tarkoittaa sitä, että siemenlevyille tulisi nopeammalla tuotannolla enemmän hintaa per kilogramma nikkeliä. Toisaalta voitaisiin kuitenkin vapauttaa allastilaa katodien tuotannolle, joka puolestaan toimisi vastapainona kalliimmalle siemenlevyproduktiolle.

Siemenlevyjien tuottamiseen lyhyemmässä ajassa vaadittaisiin kuitenkin uusi tasa-suuntaaja, jolla saataisiin tuotettua emälevyaltaille riittävä virta, sillä nykyisen järjestelmän teho ei riittäisi siihen. Myös erillinen säätö tuotantoaltaille sekä emälevyaltaille olisi tarpeen, sillä tuotantoaltaille tarvittaisiin edelleen sama määrä virtaa kuin nykyisessäkin prosessissa.

Opinnäytetyössä käytetty testiallas kuitenkin oli olosuhteiltaan optimoitu prosessin tarpeisiin suhteellisen tarkasti ja suuremmassa mittakaavassa tapahtuva todellinen prosessi voi olla olosuhteiltaan erilainen. Testialtaalla muun muassa katolyttin syöttö ja levyjen altaaseen asettelu oli paljon tarkempaa kuin se olisi normaaliprosessissa, sillä testeissä oli käytössä rotametri syötön optimoimiseen ja muovista tehty apuväline katodin ja anodien asetteluun. Testiallas soveltuu siis kuvaamaan isompaa tuotantoallasta, mutta virhemarginaalit prosessissa voivat olla suurempia niissä.

Jos opinnäytetyön esittämällä ja siinä testatulla prosessilla tuotettaisiin siemenlevyjä, tulisi vielä selvittää mahdolliset vaaratekijät, kuten mitä mahdollisen oikosulun tapahtuessa altaalla tapahtuu kohotetun virran johdosta. Myös ympäristölliset tekijät tulisi selvittää, sillä luonnollisesti prosessia nopeutettaessa myös päästöjä syntyy enemmän lyhyessä aikavälissä. Elektrolyysillä on tavat päästöjen vähentämiseen, kuten natriumlauryyლისulfaatin syöttö katolyytin sekaan, jotka voivat hyvinkin riittää nopeammassakin tuotannossa.

Opinnäytetyöprosessi sujui hyvin pieniä viivästyksiä lukuun ottamatta, jotka johtuivat laitteiston kunnostamisesta testejä aloitettaessa. Testien suoritus sujui kuitenkin hyvin ja tulokset saatiin mitattua hyvin alun pienistä ongelmista huolimatta. Aiempi kokemukseni tehtaalla auttoi opinnäytetyön testien työtehtävissä paljon. Suurimpana antina koin opinnäytetyön tekemisestä opitut prosessinsäätömenetelmät, joista sai kokemusta testeissä käytetyn pienen järjestelmän avulla nopeammin palautteen kuin isossa systeemissä normaaliprosessissa. Opinnäytetyötä tehdessä tietämykseni kehittyi merkittävästi ja koen, että opintoni prosessitekniikan painotuksessa sopivat täydellisesti yhteen opinnäytetyön sisällön kanssa. Olen varma, että opinnäytetyö antoi minulle kokemusta, jota auttaa minua tulevaisuudessa työelämässä.

LÄHTEET

Fabricius, Liukkonen & Sundholm. (2010). Fysikaalisen Kemian Taulukoita (8.painos). Otatieto. ISBN: 978-951-672-183-8

Kauppalehti. (2022). Norilsk Nickel Harjavalta Oy. Haettu 20.2.2022 osoitteesta <https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/norilsk+nickel+harjavalta+oy/1591728-4>

Nornickel. (2022). Company profile. Haettu 20.2.2022 osoitteesta <https://www.nornickel.com/company/profile/>

Nornickel. (2009). Elektrolyysin laskentakaavat [Excel-taulukot].

Nornickel. (10.11.2015). Nikkeli-elektrolyysi – koulutus [PowerPoint-diat].

Nornickel. (4.4.2019). Nornickel Harjavalta – Elektrolyysi ja Leikkaamo - Esittely [Powerpoint-diat].

Nornickel. (9.8.2018) (a). Nornickel Harjavalta – Nikkelijalostuksen maailmanluokan asiantuntija [PowerPoint-diat].

Nornickel. (2022). Tuotantoprosessi. Haettu 20.2.2022 osoitteesta <https://www.nornickel.fi/tuotteemme/tuotantoprosessi>

Nornickel. (2018) (b). Yleinen toimintaohje.

Poikkimäki, A. (2015). Kobolttirikasteen liuotus [AMK-opinnäytetyö, Satakunnan ammattikorkeakoulu]. Theseus. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201502272629>

Rose, I. & Whittington, C. (2014). Nickel Plating Handbook. Nickel Institute.

Raportointipohja sekä testien tavoiteparametrit

Yhden päivän siemenlevy			
Vertailukappaleet/Testit			
Testin tavoitteena on testata, pystytäänkö nykyisen kahden päivän syklin sijaan käyttämään lyhyempää yhden päivän sykliä siemenlevyn kasvattamiseen siemenlevyn laatua huonontamatta. Merkataan stripattujen siemenlevyjen pintaan nostopäivä ja kerätään ne lavan päälle mahdollisia jatkotutkimuksia varten.			
	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
			0
Tavoitevirta (Vertailukappaleet/testit)	350/700	A	
Virta katodilla (mitattu)		A	
		A	
	K.A.		A
Tavoitejännite		V	
Jännite (mitattu)		V	
		V	
	K.A.		V
Katol-syötön määrä (Vertailukappaleet/testit)	n.0,3/ n.0,7	L/min	
		Annostelupumpulla	
Nalan määrä syöttö	20 ppm	ml annoksina /min	Nala-seos: 4g/Nala/1L (vettä)
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino			kg
Siemenlevyn korkeus			cm
Siemenlevyn leveys			cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)			mm
			mm
			mm
			mm
	K.A.		mm
Teoreettinen yhteismassa		kg	
Virtahyötysuhde		%	
Energiankulutus		kWh/kg Ni	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)			
Stripaantuvuus (helposti/vähän tiukassa tiukassa)			
Kuvat molemmiin puolin emälevystä (ennen stripausta)			[X = Otettu]
Kuvat stripatuista levyistä			[X = Otettu]

LIITE 2

Vertailukappale 12.3. mittausarvot (Vertailukappale 1)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	10/03/2022 14.30	12/03/2022 11.30	45
Virta katodilla	350	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	6,7	8,2	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,82	0,69	mm
	0,78	0,8	mm
	0,77	0,67	mm
	0,8	0,64	mm
KA	0,79	0,70	mm
Teoreettinen yhteismassa	17,246	kg	
Virtahyötysuhde	86,396	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Strippaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

LIITE 3

Vertailukappale 14.3. mittausarvot (Vertailukappale 2)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	12/03/2022 12.00	14/03/2022 12.45	48,8
Virta katodilla	350	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	8	7,5	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,59	0,5	mm
	0,82	0,68	mm
	0,9	0,65	mm
	0,54	0,96	mm
KA	0,71	0,70	mm
Teoreettinen yhteismassa	18,703	kg	
Virtahyötysuhde	82,876	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Strippaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

LIITE 4

Vertailukappale 16.3. mittausarvot (Vertailukappale 3)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	14/03/2022 13.15	16/03/2022 11.50	46,6
Virta katodilla	350	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	7,9	8,9	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,75	0,98	mm
	0,9	0,88	mm
	0,82	0,91	mm
	0,78	0,79	mm
KA	0,81	0,89	mm
Teoreettinen yhteismassa	17,859	kg	
Virtahyötysuhde	94,068	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Strippaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

LIITE 5

Testikappale 17.3. mittausarvot (Testikappale 1)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	16/03/2022 12.00	17/03/2022 13.00	25
Virta katodilla	704	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	8,2	8,2	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,7	0,78	mm
	0,85	1,19	mm
	0,74	0,95	mm
	0,95	0,52	mm
KA	0,81	0,86	mm
Teoreettinen yhteismassa	19,272	kg	
Virtahyötysuhde	85,098	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Ok	
Strippaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

LIITE 6

Testikappale 18.3. mittausarvot (Testikappale 2)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	17/03/2022 13.20	18/03/2022 13.00	23,7
Virta katodilla	704	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	7,4	8,3	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,94	1,04	mm
	0,78	0,7	mm
	0,77	0,7	mm
	0,72	0,54	mm
KA	0,80	0,75	mm
Teoreettinen yhteismassa	18,270	kg	
Virtahyötysuhde	85,934	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Strippaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

Testikappale 19.3. mittausarvot (Testikappale 3)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	18/03/2022 13.25	19/03/2022 13.10	23,7
Virta katodilla (mitattu)	703	A	
	695	A	
K.A.	699	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	8,2	8,2	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,7	0,78	mm
	0,85	1,19	mm
	0,74	0,95	mm
	0,95	0,52	mm
KA	0,81	0,86	mm
Teoreettinen yhteismassa	18,140	kg	
Virtahyötysuhde	90,407	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Stripaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Vähän tiukassa	Vähän tiukassa	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

LIITE 8

Testikappale 20.3. mittausarvot (Testikappale 4)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	19/03/2022 13.30	20/03/2022 12.00	22,5
Virta katodilla (mitattu)	707	A	
	676	A	
K.A.	691,5	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	7,6	8,2	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,73	0,85	mm
	1,09	0,76	mm
	0,68	0,65	mm
	0,76	0,64	mm
KA	0,82	0,73	mm
Teoreettinen yhteismassa	17,037	kg	
Virtahyötysuhde	92,740	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Strippaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

Testikappale 21.3. mittausarvot (Testikappale 5)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	20/03/2022 12.20	21/03/2022 12.20	24
Virta katodilla (mitattu)	673	A	
	721	A	
K.A.	697	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	8,2	8,9	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,81	1,01	mm
	1,08	0,68	mm
	0,73	0,92	mm
	0,91	0,72	mm
KA	0,88	0,83	mm
Teoreettinen yhteismassa	18,317	kg	
Virtahyötysuhde	93,355	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Stripaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Vähän tiukassa	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

Testikappale 22.3. mittausarvot (Testikappale 6)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	21/03/2022 12.35	22/03/2022 12.20	23,8
Virta katodilla (mitattu)	696	A	
	711	A	
K.A.	703,5	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	8,2	8,9	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,74	0,81	mm
	0,9	0,69	mm
	0,64	1,06	mm
	0,95	0,8	mm
KA	0,81	0,84	mm
Teoreettinen yhteismassa	18,334	kg	
Virtahyötysuhde	93,270	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä (vetyreikää)	Hyvä (vetyreikää)	
Stripaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

Testikappale 23.3. mittausarvot (Testikappale 7)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	22/03/2022 12.50	23/03/2022 13.05	24,3
Virta katodilla (mitattu)	701	A	
	705	A	
K.A.	703	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	8,1	9,2	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,7	0,95	mm
	0,96	0,74	mm
	0,82	0,83	mm
	0,96	0,64	mm
KA	0,86	0,79	mm
Teoreettinen yhteismassa	18,706	kg	
Virtahyötysuhde	92,485	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Strippaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

Testikappale 24.3. mittausarvot (Testikappale 8)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	23/03/2022 13.25	24/03/2022 13.35	24,2
Virta katodilla (mitattu)	688	A	
	728	A	
K.A.	708	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	8,2	9,1	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,84	0,87	mm
	0,65	0,73	mm
	0,94	0,69	mm
	0,88	0,55	mm
KA	0,83	0,71	mm
Teoreettinen yhteismassa	18,761	kg	
Virtahyötysuhde	92,211	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Strippaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

Testikappale 25.3. mittausarvot (Testikappale 9)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	24/03/2022 13.50	25/03/2022 13.15	23,4
Virta katodilla (mitattu)	709	A	
	678	A	
K.A.	693,5	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	7,6	8,6	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,82	0,79	mm
	0,94	0,58	mm
	0,56	0,73	mm
	0,78	0,62	mm
KA	0,78	0,68	mm
Teoreettinen yhteismassa	17,770	kg	
Virtahyötysuhde	91,167	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Stripaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

Testikappale 26.3. mittausarvot (Testikappale 10)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	25/03/2022 13.30	26/03/2022 13.15	23,8
Virta katodilla (mitattu)	694	A	
	726	A	
K.A.	710	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	8,2	9,2	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,9	0,76	mm
	0,74	0,73	mm
	0,98	0,86	mm
	0,89	0,69	mm
KA	0,88	0,76	mm
Teoreettinen yhteismassa	18,503	kg	
Virtahyötysuhde	94,037	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä (vetyreikää)	Hyvä (vetyreikää)	
Stripaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Vähän tiukassa	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

Testikappale 27.3. mittausarvot (Testikappale 11)

	Aloitus (pvm. klo.):	Nosto (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	26/03/2022 13.30	27/03/2022 13.30	23
Virta katodilla (mitattu)	704	A	
	692	A	
K.A.	698	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	7,6	8,6	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	0,72	0,76	mm
	0,91	0,76	mm
	0,69	0,72	mm
	0,97	0,66	mm
KA	0,82	0,73	mm
Teoreettinen yhteismassa	17,579	kg	
Virtahyötysuhde	92,155	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Strippaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	

Testikappale 28.3. mittausarvot (Testikappale 12)

	Aloituspvm. (pvm. klo.):	Nostopvm. (pvm. klo.):	Syklin kesto (tuntia)
	27/03/2022 13.50	28/03/2022 12.55	23,1
Virta katodilla (mitattu)	716	A	
	754	A	
K.A.	735	A	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Siemenlevyn paino	7,9	8,8	kg
Siemenlevyn korkeus	102,8	102,8	cm
Siemenlevyn leveys	93,5	93,5	cm
Siemenlevyn paksuus (reunoista)	1,1	0,81	mm
	0,91	0,73	mm
	0,66	0,97	mm
	0,76	0,98	mm
KA	0,86	0,87	mm
Teoreettinen yhteismassa	18,591	kg	
Virtahyötysuhde	89,826	%	
	Levy 1 (LIU)	Levy 2 (ELY)	
Pinnan laatu silmämääräisesti (hyvä/ok/huono)	Hyvä	Hyvä	
Stripaantuvuus (helposti/vähän tiukassa/tiukassa)	Helposti	Helposti	
Kuvat stripatuista levyistä	X	[X = Otettu]	