

Laura Mäenranta

HUOKOISTEN TIILIEN TYPEN VIRTAUKSEN VAIKUTUS
ANODIUUNIN PELKISTYSPROSESSIIN

Satakunnan ammattikorkeakoulu
Kemiantekniikan koulutusohjelma
2012

HUOKOISTEN TIILIEN TYPEN VIRTAUKSEN VAIKUTUS ANODIUUNIN PELKISTYSPROSESSIIN

Mäenranta, Laura

Satakunnan ammattikorkeakoulu

Kemiantekniikan koulutusohjelma

maaliskuu 2012

Ohjaaja: Heikkilä, Jorma; Lehtori, SAMK

Ohjaaja: Härkönen, Mikko; Tutkimus- ja kehitysinsinööri, Boliden Harjavalta Oy

Sivumäärä: 32

Liitteitä: 1

Asiasanat: kupari, pelkistys, hapetus, kaasut, typpi

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, miten anodiuuni 1 huokoisten tiilien typen virtausmääriä muuttamalla voitiin vaikuttaa anodiuuniin virtaavaan propaanin syöttömääriin ja siten pelkistysaikoihin. Ongelmana anodiuuni 1:llä todettiin olevan pitkä pelkistysaika ja uunin lämpötilan kohoaminen pelkistyksen aikana, mikä johtui siitä, ettei propaanin reagoimisaika sulan kuparin kanssa ollut tarpeeksi riittävä.

Tutkimuksessa selvitettiin, kuinka suuria propaanin syöttömäärät olivat suhteessa tuotettua anodikuparitonnia kohti ennen koejaksoa ja sen aikana. Mittaustuloksista laadittiin taulukot ja kuvaajat selventämään saatuja tuloksia. Tämän lisäksi verrattiin anodiuunin propaanin, puulausilman sekä öljyn syöttöä, imusäätöä ja polttokammion lämpötilaa ennen koejaksoa sekä sen aikana.

Tuloksien perusteella saatiin selville, ettei huokoisten tiilien typen virtausmäärien muuttaminen koejakson ajaksi näyttänyt mittaus- ja laskutulosten perusteella merkittävästi vaikuttavan anodiuunin propaanin syöttöön ja pelkistysaikoihin. Toisaalta koejakson kestosta riippuen olisi hyvä tutkia huokoisten tiilien virtausmäärien muuttamisen vaikutusta anodiuunin pelkistysprosessiin pidemmällä aikavälillä, jotta oltaisiin varmoja saaduista tuloksista.

THE EFFECT OF NITROGEN FLOW IN POROUS BRICKS ON REDUCTION PROCESS OF FIRE REFINING FURNACE

Mäenranta, Laura

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences

Degree Programme in Chemical Engineering

March 2012

Supervisor: Heikkilä, Jorma; Lecturer, Satakunta University of Applied Sciences

Supervisor: Härkönen, Mikko; R&D Engineer, Boliden Harjavalta Oy

Number of pages: 32

Appendices: 1

Keywords: copper, reduction, oxidation, gases, sulfur

The purpose of this thesis was to study how changing nitrogen flows of porous bricks on fire refining furnace 1 could affect propane flows and reduction time on fire refining furnace. The problems discovered in fire refining furnace were long reduction times and high temperature of furnace during reduction, which had originated from the fact that the response time of propane with melted copper was not adequate enough.

The goal of this study was to find out the ratio of propane feed rate to produced anode copper ton before and during the test period. Test results were converted into charts and diagrams to clarify gained results. In addition, propane, air and oil flow rates, suction adjustment and combustor temperature of fire refining furnace were compared to each other before and during the test period.

Based on the results, it was found out that changing the nitrogen flow in porous bricks during reduction process had no significant effect on reduction time and propane flows of fire refining furnace according to measurement and calculated results. On the other hand, depending on the length of test period in this study it would be worth to investigate changing nitrogen flows in porous bricks during a longer time frame to be sure of gained results.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	KUPARIN TUOTANTO	6
3	ANODIUUNI	7
3.1	Anodiuniprosessi.....	7
3.2	Prosessin vaiheet	8
3.3	Anodiuniin syötettävät kaasut	8
3.4	Öljypolttimen käyttö	9
3.5	Poistokaasujen käsittely	10
4	ANODIUUNIN TYYPITILET.....	11
5	ANODIUUNIPROSESSIN OPEROINTITAVAT	12
5.1	Optimaalinen operointitapa.....	12
5.2	Operointitapa kahden eri vuoron välillä.....	13
6	KOKEELLINEN OSIO.....	16
6.1	Lähtötilanne.....	16
6.2	Mittausten suoritus	16
6.3	Laskennallinen osio.....	17
7	TULOKSET	18
7.1	Laskennalliset tulokset.....	18
7.2	Ajomittauskäyrät	21
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	31
	LÄHTEET.....	32

LIITTEET:

LIITE 1 – ANODIUUNIEN VÄLISET EROT

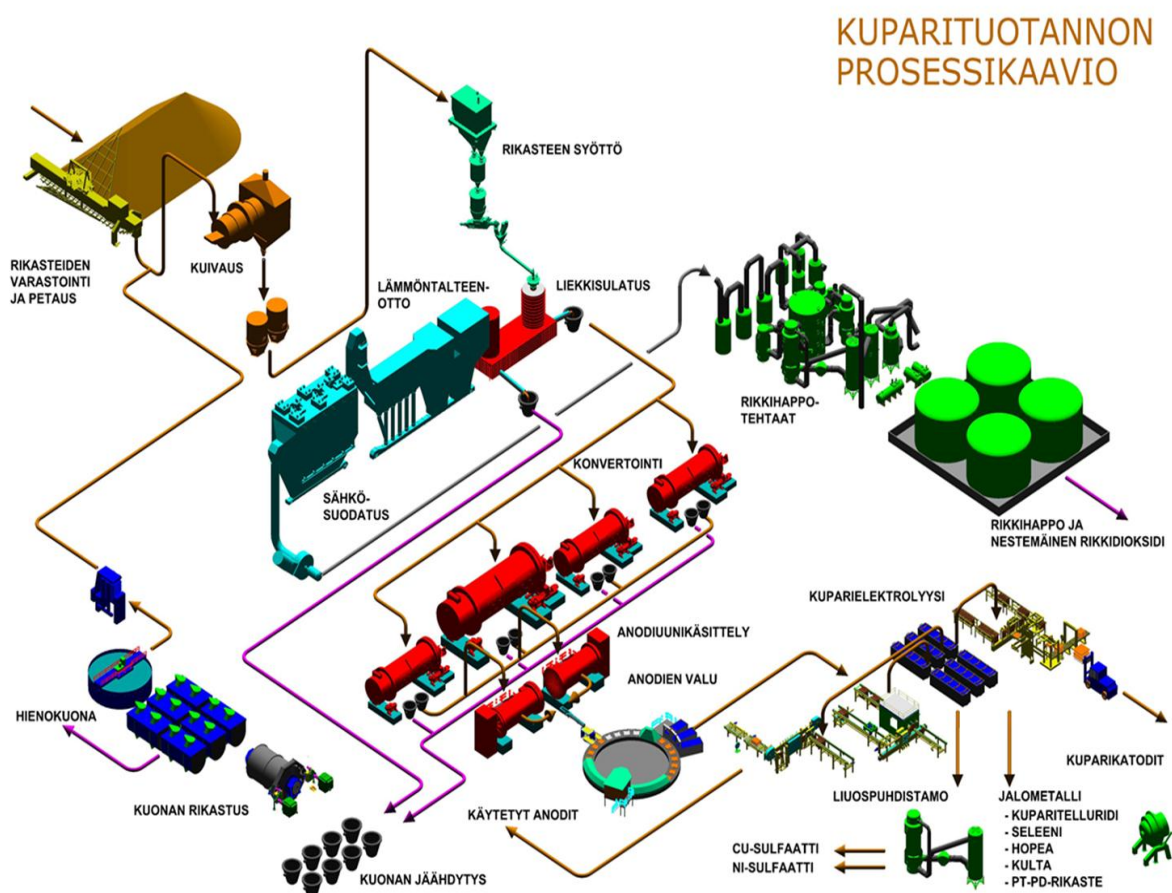
1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee Boliden Harjavalta Oy:n kuparin tuotantoprosessin pääpiirteissään ja keskittyy syvällisemmin kuparituotannon viimeisessä osassa tapahtuvaan anodiuuniprosessin eri vaiheisiin ja toimintaan. Aiheen valintaan on vaikuttanut Boliden Harjavalta Oy:n kiinnostus sekä tarve kehittää ja parantaa kuparin tuotantoprosessin eri osa-alueita, koska kuparin kovan kysynnän ja siitä johtuvan korkean markkinahinnan takia kuparin valmistus on kannattavaa.

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia, kuinka anodiuunissa olevien huokoisten tiilien typen virtausmäärien muuttamisella voitaisiin vaikuttaa propaanin kulkuun uunissa ja tätä kautta pelkistysaikaan sekä parantaa mahdollisesti pelkistyksen tehokkuutta. Edellä mainittuja asioita tarkasteltiin sen perusteella, miten propaanin syöttömäärät jakautuivat suhteessa tuotettuun kuparimäärään valitun koejakson aikana ja niitä verrattiin ennen koejaksoa saatuihin arvoihin. Tämän lisäksi analysoitiin anodiuuniprosessista saatujen ajomittauskäyrien mahdollisia eroavaisuuksia ennen koejaksoa sekä koejakson aikana.

2 KUPARIN TUOTANTO

Kuparin sulatus Boliden Harjavalta Oy:ssä perustuu sulfidirikasteiden liekkisulatukseen ja liekkiuunin kiven konvertointiin. /1/ Konvertoinnin jälkeen raaka- eli blisterkupari siirretään padoilla anodiuniin, jonka tarkoituksena on valmistella sula valua varten. Anodiuniprosessin aikana sulasta poistetaan konvertoinnin aikana sulaa jäänyt rikki ja sen jälkeen liuennut happi. /2, 3/ Prosessin tarkoituksena on siis estää blisterien (SO₂-kuplien) syntyminen, jottei liiallisia kaasupäästöjä pääse muodostumaan anodikuparivalun yhteydessä sekä estetään anodin liian karkean pinnan muodostuminen ja heikko rakenne. /4, 5/ Lämpötilan vakauttamisen jälkeen sula kupari valetaan anodeiksi, joiden sisältämä kuparipitoisuus on yli 99 %. /2/ Kuvassa 1 on esitetty Harjavallan kuparisulaton prosessikaavio, josta prosessin eri vaiheet on nähtävissä.



Kuva 1 Harjavallan kuparisulaton prosessi /6/

3 ANODIUUNI

3.1 Anodiuniprosessi

Konverttereista anodiuneille tuleva sula blisterkupari sisältää epäpuhtauksina noin 0,01–0,05 m-% rikkiä ja 0,1–0,8 m-% happea. /4/ Anodiuniprosessin aikana sula raakakupari puhdistetaan eli kuumaraffinoidaan, mikä tapahtuu sylinterin muotoisessa kiertouunissa. Pelkistys on tämäntyyppisessä uunissa tehokkaampaa, koska uunin muoto edesauttaa pelkistykseen käytettävien kaasujen tasaisen kulkeutumisen uuniin ja sitä kautta kaikkialle sulaan. Uuni on vuorattu tulenkestävillä tiilillä ja sijoitettu vaakasuoraan kannatuspyörien varaan. /8/ Tämän tyyppiseen uuniin mahtuu enimmillään noin 350 t sulaa kuparia. /7/ Anodiunun lämpötila pyritään pitämään noin 1200 °C:ssa, jotta sula kupari pysyisi viskositeetiltaan riittävänä myöhemmässä vaiheessa tapahtuvaan anodien valuun saakka. /4/

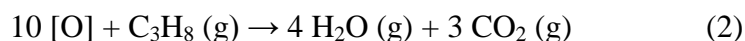
Anodiunia säädetään lämpötilamittausten, happipitoisuusmittausten ja sulanäytteiden avulla. Jokaisesta valusta otetaan näyte, joka viedään laboratorioon analysoitavaksi. Lisäksi anodiunista poistetaan aika ajoin kuonaa, jota on tullut raakakuparin mukana konverttereilta. Kuona palautetaan takaisin konvertointiprosessiin sen korkean kuparipitoisuuden (yli 20 %) vuoksi. Anodiuneja on yhtäaikaisesti käytössä kaksi, ja kun toisesta uunista valetaan, niin toista panostetaan. /2, 3/ Kuvassa 2 on esimerkki anodiuniprosessissa käytetystä uunista.



Kuva 2 Anodiuni /8/

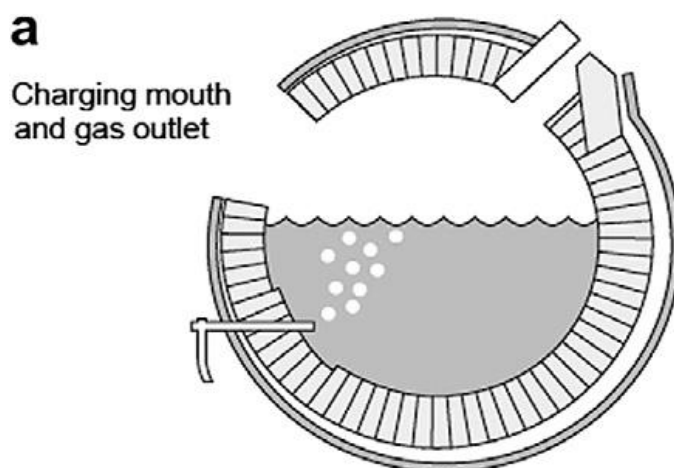
3.2 Prosessin vaiheet

Kuparin puhdistaminen anodiunissa sisältää kaksi erilaista vaihetta. Ensimmäisessä puhdistusvaiheessa sulassa kuparissa oleva rikki hapetetaan pois puhaltamalla ilmaa sulaan kupariin. Rikin hapetuksen aikana sulaan pääsee kuitenkin liukenemaan pieniä määriä happea, joka poistetaan sulasta kuparista toisessa puhdistusvaiheessa, eli pelkistysvaiheessa. Pelkistysvaiheen aikana sulaan kupariin puhalletaan propaania (C₃H₈), joka poistaa kuparissa olevan jäännöshapen. Alla olevista reaktioyhtälöistä (1) ja (2) nähdään prosessissa tapahtuvat reaktiot. Ensimmäisessä reaktioyhtälössä sulassa kuparissa oleva rikki reagoi ilman hapen kanssa muodostaen rikkidioksidia (SO₂). Toisessa reaktioyhtälössä sulaan kupariin liuennut happi reagoi propaanin kanssa muodostaen vettä (H₂O) ja hiilidioksidia (CO₂). /2, 3/



3.3 Anodiuniin syötettävät kaasut

Anodiunin hapetukseen ja pelkistykseen käytettävät kaasut johdetaan sulapinnan alle kahdesta hormiputkesta. Hormiputket toimivat vuoron perään sekä hapetus- että pelkistysuuttimina riippuen siitä, puhalletaanko sulaan kupariin ilmaa vai propaania. Hormiputkien tukkeentuminen estetään puhaltamalla jatkuvatoimisesti ilmaa niiden läpi noin 300 Nm³/h. Anodiuni käännetään hapetuksen ja pelkistyksen ajaksi sellaiseen asentoon, että hormit sijaitsevat mahdollisimman syvällä sulan kuparin pinnan alapuolella. Tällöin reagoiva kaasu pystyy tunkeutumaan mahdollisimman kovalla paineella sulaan kupariin ja aiheuttaa siten sulassa voimakkaan turbulenttisen liikkeen. Hapetuksen aikana hormeista puhalletaan ilmaa sulaan kupariin 600–700 Nm³/h ja pelkistyksen aikana propaania puhalletaan sulaan kupariin 500–600 kg/h. /2, 3/ Kuvasta 3 voidaan nähdä hormien asento ja sijainti anodiunissa pelkistyksen ja hapetuksen aikana.



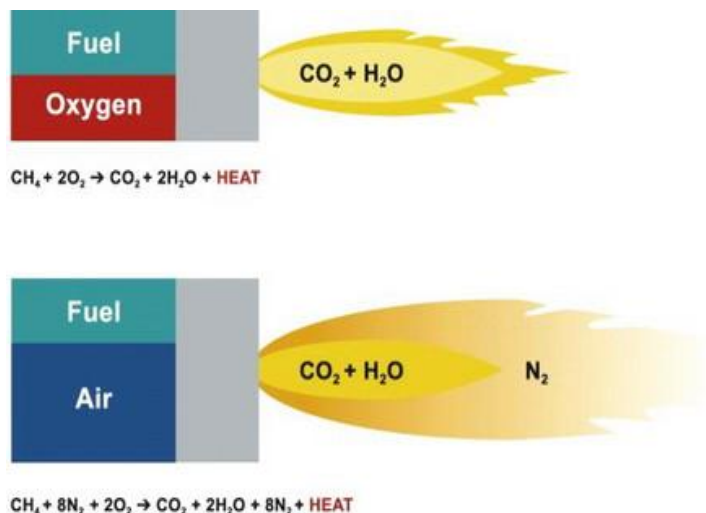
Kuva 3 Hormiputkien asento ja sijoitus uunissa /4/

Kummassakin anodiuunissa on huokoisia tiiliä, joiden läpi puhalletaan jatkuvasti typpeä sulaan kupariin voimistamaan sekoitusta. Typen puhallus aiheuttaa sulaan kupariin virtauksia, jotka pitävät sulan kuparin liikkeessä nopeuttaen siinä tapahtuvia reaktioita ja lämmönsiirtoa. Tämän lisäksi typen puhallus tasapainottaa sulan kuparin lämpötiloja. Tästä johtuen typen puhallus vähentää myös öljyn kulutusta Oxyfuel-polttimilla, koska polttimia tarvitaan harvemmin ylläpitämään sulan kuparin lämpötiloja tasaisina. /2, 3/

3.4 Öljypolttimen käyttö

Anodiuunissa oleva kupari pidetään sulana ja lämpötilaa säädetään Oxyfuel – nimisen öljypolttimen avulla. Tämän tyyppisessä öljypolttimessa öljyä poltetaan käyttämällä puhdasta happea. /2, 3/ Oxyfuel-poltin parantaa lämmön siirtymistä sulaan kupariin tehokkaan palamisen ja lämmönsiirron avulla. Polttimen avulla saadaan korkeat lämmönsiirtokertoimet, koska lämmitykseen kuluu vähemmän polttoainetta. Tämä johtaa palamiskaasujen määrän pienentymiseen ja niiden polttokammiossa olevan viipymääjan pidentymiseen. Ne voivat täten luovuttaa enemmän energiaa palamiseen ja samalla palamiskaasujen osapaineet nousevat kohottaen prosessin kokonaistehokkuutta. Lisäksi polttimen käyttö vähentää NO_x - ja partikkeliemissioita verrattuna polttimeen, missä tavallista ilmaa syötetään puhtaan hapen sijasta. /9, 1/

Kuvasta 4 käy ilmi anodiunissa käytettävän Oxyfuel-polttimen toimintaperiaate verrattuna tavalliseen öljypolttimeen.



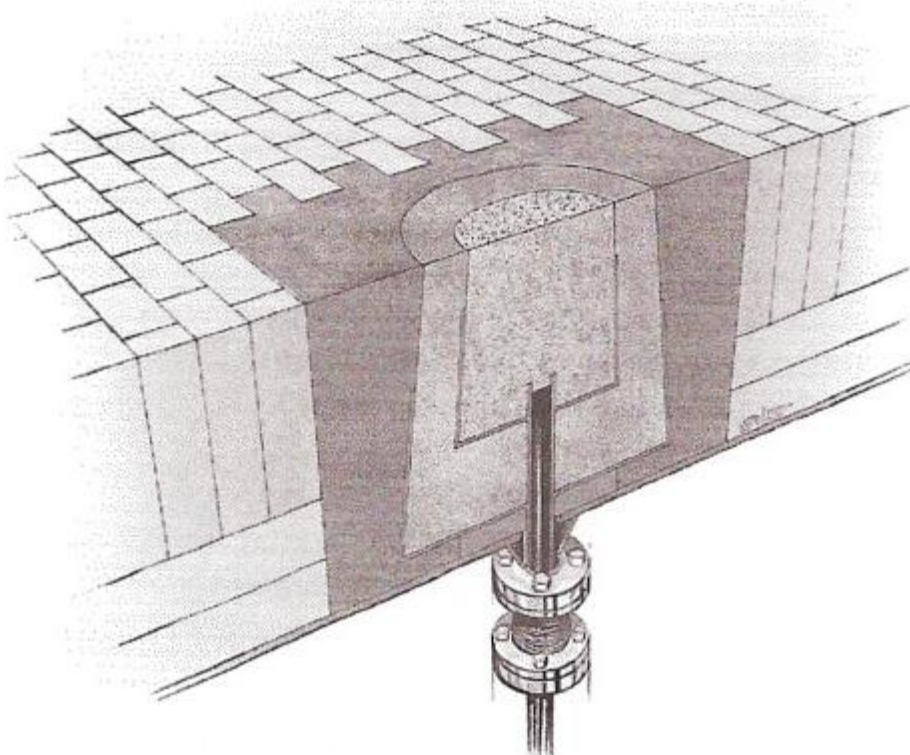
Kuva 4 Oxyfuel- ja tavallinen poltin /9/

3.5 Poistokaasujen käsittely

Suurin osa anodiunien hapetuksen ja pelkistyksen aikana muodostuvista poistokaasuista eli ”kuumakaasuista” hyödynnetään sulatolla nikkelikasteen rumpukuivaimessa. Poistokaasu sisältää keskimäärin seuraavia aineita: happea 20,5 %, typpeä 77,95 %, vettä 1,2 %, hiilidioksidia 0,3 % ja rikkidioksidia 0,015 %. Kuumakaasun käyttö kuivaimessa vähentää lämpösisältönsä verran öljyn kulutusta. Tämän lisäksi kuumakaasua hyödynnetään konvertterialueen pussisuodattimen (KLS) 1-kentän lämmityksessä. Anodiunista poistuvan kuumakaasun määrät ja lämpötilat vaihtelevat uunin prosessivaiheiden mukaan, joten kaasujen lämpötilanvaihtelut voivat olla varsin voimakkaita. Kuumakaasun lämpötila voi vaihdella 200 °C:sta 450 °C:een. Suurin osa uunin kaasuvirrasta tulee vuotoilmasta. Kuumakaasu tulee jäähdyttää lämmönvaihtimessa, jotta vältytään pussisuodattimessa olevan pölyn ja pussien palamiselta. Lämmönvaihtimen kapasiteetti ei kuitenkaan riitä jäähdyttämään yli 300 °C kuumakaasua 115 °C:n tavoitearvoon, vaan kaasun lämpötila nousee pelkistyksen aikana myös sen käyttökohteissa. /1, 2, 3/

4 ANODIUUNIN TYPPITIILET

Anodiuniin on asennettuna kolme huokoisesta materiaalista tehtyä tiiltä, joiden avoin huokoisuus on 30 %. Tiilet sisältävät 93 % magnesiumoksidia (MgO) ja tiilten läpi puhalletaan inerttiä kaasua, tässä tapauksessa typpeä, jotta se ei reagoisi anodiuniinissa olevan sulan kuparin sekä muiden uniin puhallettavien kaasujen kanssa. Tiilten käyttöikä on noin yksi vuosi, kun puhalluskaasuna käytetään typpeä. Tiilten toimintaperiaatteena on, että puhallettaessa typpeä tiilten läpi sulaan kupariin suhteellisen pienellä nopeudella saadaan kaasut kulkeutumaan sulaan pieninä kuplina, jotka sekoittavat sulaa voimakkaasti. Tämä johtaa siihen, että kemialliset reaktiot sulassa kuparissa nopeutuvat ja syötetty typpi kuljettaa reaktioista syntyviä kaasuja (pääasiassa vesihöyryä ja hiilidioksidia) tehokkaammin pois sulasta. Tämän seurauksena sulaan kupariin syötettyjen kaasujen hyötysuhde paranee, sulan lämpötila tasoituu ja sulan kemiallinen koostumus saadaan homogenisoidummaksi. /10/ Kuvasta 5 voidaan nähdä esimerkki anodiuniinissa käytetystä huokoisesta tiilestä.



Kuva 5 **Huokoinen tiili /11/**

5 ANODIUUNIPROSESSIN OPEROINTITAVAT

Anodiuniproessin operointitapoja analysoitiin eri vuorojen aikana saaduista anodiunin imusäädön, polttokammion lämpötilan sekä propaanin, öljyn ja puulausilman syötön mittaustuloksien perusteella. Mittaustulokset muunnettiin Excel-kuvaajiksi, joista oli nähtävissä anodiunin käyttäytyminen erilaisissa operointilanteissa sekä saatiin muodostettua yleiskuva anodiunin eri operointitavoista. Excel-kuvaajia vertailemalla etsittiin yhtäläisyyksiä ja eroja eri vuorojen operointitavoissa, minkä perusteella niin sanottu ”hyvä” operointitapa voitiin määrittää.

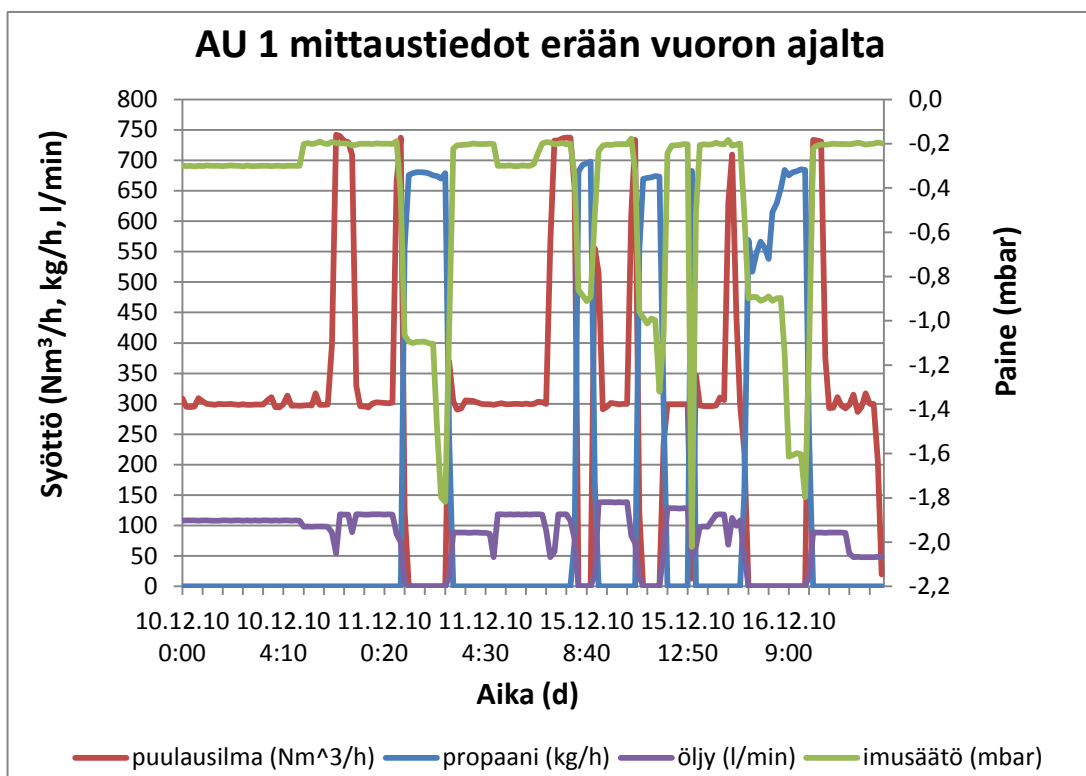
5.1 Optimaalinen operointitapa

Extractive Metallurgy of Copper – kirjan mukaan 250 tonnin raakakuparipanoksen (rikkipitoisuus 0,03 %) valmistuminen kestää keskimäärin kolme tuntia, josta yksi tunti kuluu hapetukseen ja kaksi tuntia pelkistykseen. Hapetuksen aikana ilmaa tulisi puhaltaa 600–700 Nm³/h ja pelkistyksen aikana propaania 500–600 kg/h. Ilman ja propaanin syötettävät määrät riippuvat suurelta osin uunin operaattorin ottamista sulanäytteistä, joista määritetään silmämääräisesti kuparipanoksen happi- ja rikkipitoisuus. Kuparin rikkipitoisuus voidaan tämän lisäksi arvioida myös poistokaasun SO₂-pitoisuudesta. Imusäädön arvon tulisi olla pelkistysvaiheen aikana -1,5 mbar:sta -2,0 mbar:iin ja pelkistysvaiheiden välillä arvon tulisi olla noin -0,2 mbar:ssa. Hapetuksen aikana imusäädön arvo pidetään -0,2 bar tasolla. Jos imusäädön arvo on liian alhainen, haitallisia kaasuja pääsee kulkeutumaan uunin ympäristöön ja uunissa olevan öljypolttimen öljyn palaminen on epäpuhtaampaa. Jos imusäädön arvo on liian korkea, uunista vapautuva lämpö kulkeutuu polttokammioon liian nopeasti kohottaen polttokammion lämpötilan liian korkealle tasolle. Puulausilmaa tulisi syöttää uuniin 300 Nm³/h. Öljyn syöttö uuniin hapetuksen aikana tulisi olla tasolla 100–130 l/h ja pelkistyksen aikana 50–100 l/h. Polttokammion lämpötila tulisi pitää 530 °C:n alapuolella. Anodikuparin valamiseen sopiva lämpötila tulisi olla 1240–1260 °C.

5.2 Operointitapa kahden eri vuoron välillä

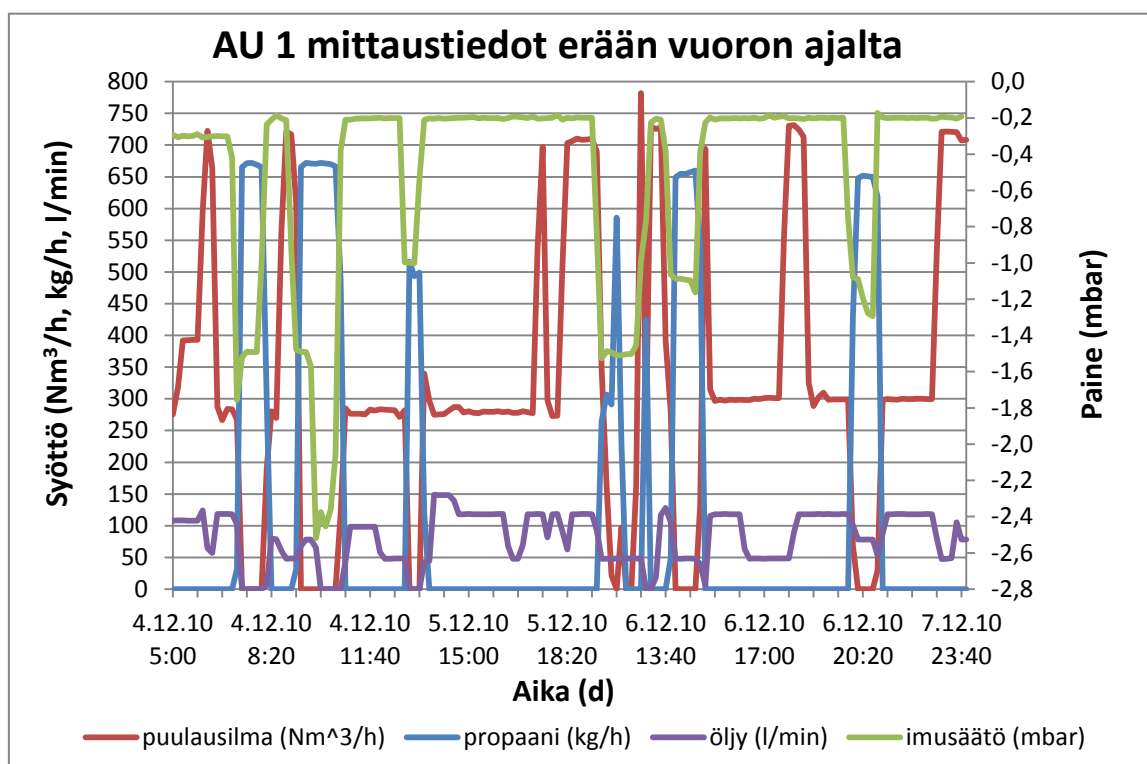
Seuraavien kahden eri vuoron anodiuunin operointitapojen valinta vertailun kohteeksi tässä työssä perustui vuorojen operoinnista saatujen mittaustietojen erilaisuuteen. Tarkastelun kohteeksi valituista eri vuorojen mittaustiedoista löytyi tarpeeksi eroavaisuuksia, minkä ansiosta vertailu on monipuolisempi ja laajempi.

Tarkasteltaessa erään vuoron anodiuuni 1:n operoinnista kerättyä mittaustietoa joulukuulta 2010, voidaan muodostetusta kuvaajasta (kuva 6) nähdä seuraavaa: Propaanin syöttö uuniin pelkistyksen aikana on tasolla 600–700 kg/h ja pelkistysaika vaihtelee 30 minuutista 120 minuuttiin. Imusäädön arvo pelkistyksen aikana on kuvassa 6 olevan kuvaajan perusteella tasolla -2 mbar ja pelkistysvaiheiden välillä tasolla -0,2 mbar. Öljyä syötetään uuniin pelkistysvaiheiden välillä noin 100–150 l/h ja pelkistyksen aikana uuniin ei syötetä öljyä. Anodiuuniin syötetään puulausilmaa kuvaajan mukaan ennen pelkistystä noin 730 Nm³/h ja pelkistysvaiheiden välillä noin 300 Nm³/h.



Kuva 6 Anodiuuni 1:n prosessidataa erään vuoron ajalta

Vertailtaessa edellä mainitun vuoron ajotapaa erään toisen vuoron ajotapaan, löydettiin eroja propaanin, öljyn ja imuasetuksien kuvaajista. Kuvassa 7 olevassa kuvaajassa voidaan nähdä propaanin syötön olevan noin tasolla 500–670 kg/h ja pelkistysaika vaihtelee 30 minuutista 90 minuuttiin. Imusäädön arvot ovat kuvaajan mukaan pelkistyksen aikana -1,2 mbar:sta -2,5 mbar:iin ja pelkistysvaiheiden välissä tasolla -0,2 mbar. Öljyn syöttö anodiunin vaihtelee kuvaajasta saatujen tietojen perusteella pelkistysvaiheiden välillä noin 50–120 l/min ja öljyn syöttö laskee tasolle 0–50 l/min pelkistyksen ajaksi. Puulausilman syötössä ei löytynyt merkittäviä eroja kuvien 6 ja 7 kuvaajia vertailtaessa, mikä johtunee mahdollisesti siitä, ettei sulassa kuparipanakossa ollut rikkipitoisuus vaihdellut merkittävästi vertailtavien vuorojen aikana.



Kuva 7 Anodiunin 1:n prosessidatalla erään vuoron ajalta

Molempien vuorojen prosessidatasta laadittuja kuvaajia tutkimalla voidaan todeta vuorojen operointitapojen olevan lähellä optimaalista operointitapaa. Esimerkiksi ensimmäisenä mainitun vuoron operointitavassa imusäädön arvo pelkistyksen aikana on lähempänä optimaalista imusäädön arvoa kuin toisena mainitun vuoron vastaava arvo. Öljyn syöttö uuniin pelkistyksen aikana on ensimmäisenä mainitun vuoron ai-

kana ideaalisin, koska syöttö pysyy nollassa ja tämän kautta säästetään öljyn syöttökustannuksissa. Hapetuksen aikana öljyn syöttö on taas lähempänä optimaalista operointia toisen mainitun vuoron aikana. Propanin syöttö pelkistyksen aikana on lähempänä optimaalista toisen vuoron operointitavassa.

On kuitenkin hankalaa arvioida, kumman vuoron operointitapa olisi parempi, koska vertailtavien vuorojen prosessidatasta löydetyt eroavaisuudet ovat loppujen lopuksi melko pieniä, eikä niillä luultavasti ole merkittävää vaikutusta anodiunin toimintaan. Öljyn syötön näkökulmasta katsottuna parempi operointitapa osoittautuisi kuitenkin olevan ensimmäiseksi mainitulla vuorolla, koska kyseisen vuoron aikana öljyn syöttökustannukset ovat pelkistyksen aikana minimissään.

6 KOKEELLINEN OSIO

6.1 Lähtötilanne

Tutkimuksessa lähdettiin liikkeelle tarkastelemalla anodiuuni 1:n ja anodiuuni 2:n toimintaa, eroavaisuuksia sekä niiden operointitapoja. Näiden perusteella tarkastelun kohteeksi tässä tutkimuksessa valittiin anodiuuni 1 lähinnä sen takia, että tutkimusta laadittaessa anodiuuni 2:n käyttöikä oli pitkittänyt ja uuni oli jäämässä pois käytöstä muuraushuollon ajaksi. Toinen valintaan vaikuttava tekijä oli se, että anodiuunien toiminta oli liian erilaisella tasolla, jotta vertailukelpoisia tuloksia ajomittauksista olisi saatu aikaiseksi. Lisäksi anodiuuni 1:n toiminta vastasi kyseisenä aikana parasta mahdollista käytössä olevaa ajotilannetta uuneilla.

Tässä tutkimuksessa lähdettiin analysoimaan sitä, miten anodiuunin pohjalle sijoitetuista huokoisista tiilistä lähtevät typen virtausmäärät vaikuttavat propaanin syöttöön uuniin ja sitä kautta pelkistysaikoihin. Ongelmana anodiuuni 1:llä todettiin olevan sulan kuparin ja uunin lämpötilojen liiallinen nousu pelkistuksen ollessa käynnissä sekä pitkä pelkistysaika. Anodiuunin jälkeisen polttokammion lämpötilat pelkistuksen aikana vaikuttivat sen sijaan olevan normaalilla tasolla. Edellä mainituista joh-tuen uuniin menevän propaanin kontaktiaika sulan kuparin kanssa ei näin ollen olisi riittävä. Oletettiin, josko typen liian suuri virtaus, anodiuunin väärä asento pelkistyk-sen aikana tai hormiputkien väärä asento olisivat syynä edellä mainittuihin ongel-miin. Tämän perusteella valittiin tutkittavaksi kohteeksi huokoisten tiilien typen vir-tausmäärien muuttaminen anodiuuni 1:llä pelkistuksen ajaksi.

6.2 Mittausten suoritus

Anodiuuni 1 huokoisten tiilien 1 ja 3 typen virtausmäärien arvojen asetuksia muutet-tiin arvoista $10 \text{ Nm}^3/\text{h}$:sta siten, että tiilen 1 typen virtausarvoksi asetettiin $6 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ja tiilen 3 arvoksi $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Kyseisten tiilien virtausmääriä muutettiin, koska niiden etäisyys hormiputkista oli melko lyhyt. Haluttiin myös tarkastella, vaikuttaako typen virtausmäärien lasku kyseisillä tiilillä propaanin syöttöön sekä propaanin reagointiin sulan kuparin kanssa, kuparin pelkistysaikaan ja polttokammion lämpötilaan. Lisäksi

seurattiin, vaikuttiko typen virtausmäärien muuttaminen anodiuunin imusäätöihin sekä puulausilman ja öljyn syöttömääriin. Mittaustuloksia tarkasteltiin vertailemalla syötettyä propaanimäärää tuotettua kuparitonnia kohti laskettuna ennen koejaksoa ja sen aikana. Koejakson mittaukset suoritettiin 9.1.–20.1.2012 välisenä aikana. Ennen koejaksoa sekä sen aikana anodiuuniprosessista saadut mittaustulokset löytyvät taulukoituina liitteestä 1.

6.3 Laskennallinen osio

Syötetyn propaanin kokonaismäärä yhden tehdasvuorokauden ajalta on verrattu suhteessa tuotettuun kuparitonniin samalta aikajaksolta. Käytetty propaanimäärä ja tuotettu kuparimäärä on saatu Boliden Harjavalta Oy:n prosessiajojärjestelmästä. Ennen koejaksoa sekä sen aikana lasketuista mittaustuloksista muodostettiin Excel-kuvaajat, jotka on esitetty tuloksien yhteydessä seuraavassa osiossa. Esimerkkinä alla on laskettu 1.1.2012 mittauksien perusteella ennen koejaksoa saatu propaanin syötön määrä suhteessa tuotettua kuparitonnia kohti:

$$m(\text{C}_3\text{H}_8) = 1612,34 \text{ kg}$$

$$m(\text{Cu}_{\text{tuotettu}}) = 232,77 \text{ t}$$

$$\frac{1612,34 \text{ kg}}{232,77 \text{ t}} = 6,93 \text{ kg propaania / t tuotettua kuparia}$$

7 TULOKSET

7.1 Laskennalliset tulokset

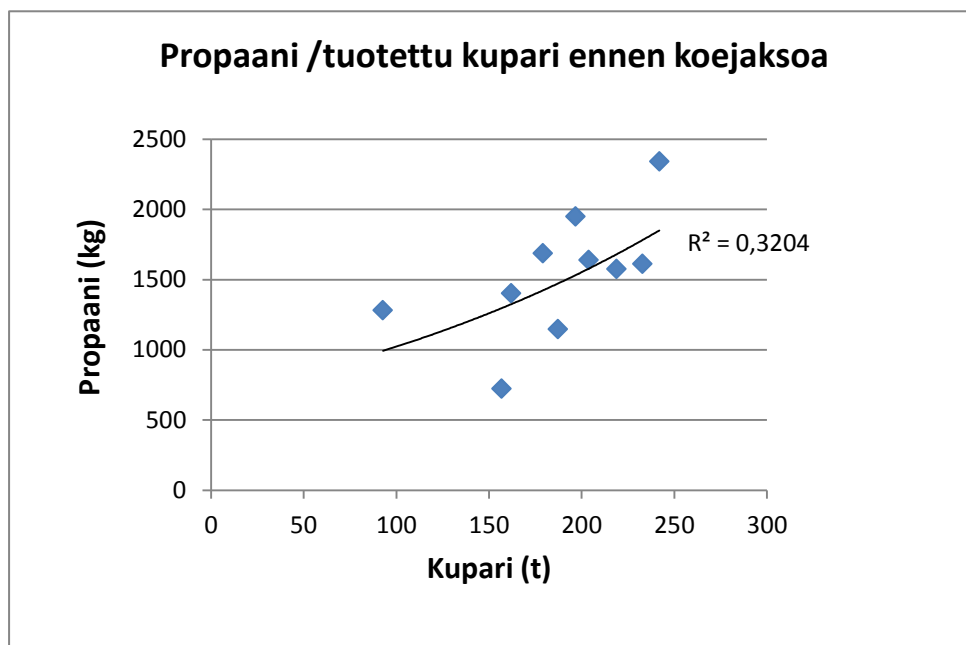
Ennen koejaksoa ja koejakson aikana tehtyjen mittausten perusteella voidaan taulukoiduista tuloksista sekä tuloksista muodostetuista kuvaajista tehdä seuraavanlaisia havaintoja: Ennen koejaksoa tuotetut anodikuparimäärät ovat suuruudeltaan noin 90–240 t tarkasteltaessa päiväkohtaisia valumääriä ja niissä on havaittavissa melko suurta hajontaa. Tämä johtunee konverttereilta tulevan kuparin erilaisista määristä sekä siitä, kuinka paljon kyseisessä kuparipanoksessa on kuonaa mukana. Anodi-uunin pelkistysajat vaihtelevat 70 ja 220 minuutin välillä ennen koejaksoa ja aikojen pituudessa on nähtävissä eroavaisuuksia.

Taulukosta 1 nähdään, että propaania syötetään uuniin noin 720–2242 kg per pelkistys. Propaanin syöttöä tarkasteltaessa voidaan todeta, että syötön suuruudessa ja kuparin valumäärissä on havaittavissa selkeä yhteys. Verrattaessa propaanin syöttöä suhteessa tuotettuun anodikuparimäärään näyttäisi siltä, että mitä suurempi tuotettu anodikuparimäärä on, sitä vähemmän propaania kuluisi pelkistyksen aikana. Ennen koejaksoa lasketuista arvoista muodostettiin lisäksi kuvaaja, joka löytyy seuraavalta sivulta.

Taulukko 1 Mittaus- ja laskutulokset ennen koejaksoa 1.1.–8.1.2012

Pvm.	Kupari (t)	Propaani (kg)	Pelkistysaika (min)	Propaani/Kupari (kg/t)
1.1.2012	232,77	1612,34	160	6,93
2.1.2012	179,09	1687,96	110	9,43
3.1.2012	196,73	1948,36	185	9,90
4.1.2012	92,74	1281,88	245	13,82
4.1.2012	187,23	1147,69	115	6,13
4.1.2012	161,94	1401,23	145	8,65
5.1.2012	156,76	723,34	70	4,61
6.1.2012	203,83	1639,96	155	8,05
7.1.2012	218,79	1575,21	140	7,20
8.1.2012	241,93	2342,04	220	9,68

Kuvan 8 kuvaajasta nähdään, miten propaania on kulunut suhteessa tuotettuun kuparimäärään ennen koejaksoa. Kuvaajasta voidaan selkeästi nähdä tuotetun kuparin melko suuri hajonneisuus kyseisellä aikavälillä.



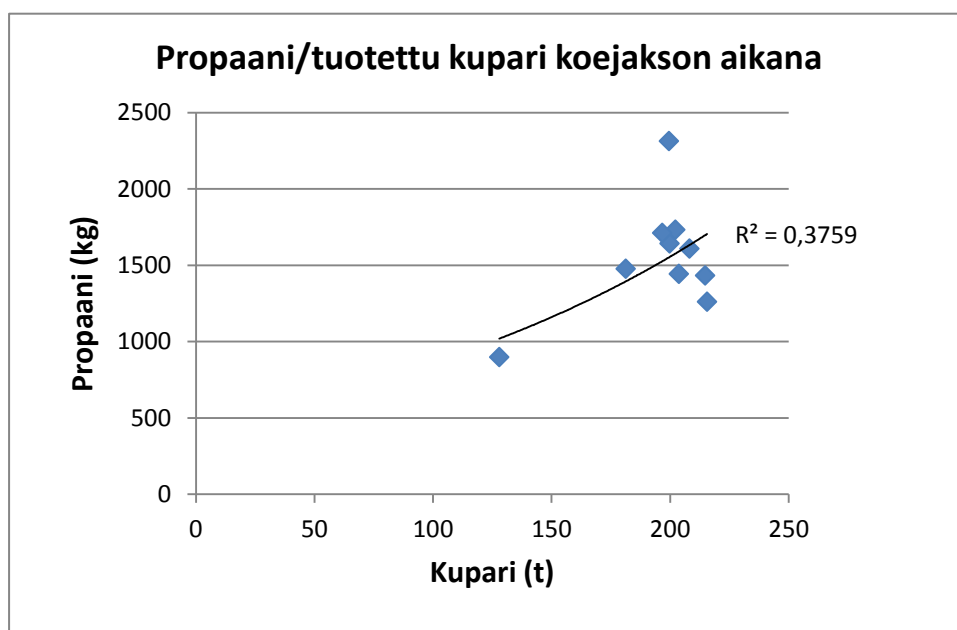
Kuva 8 Propaanin suhde tuotettuun kuparimäärään ennen koejaksoa

Taulukosta 2 voidaan havaita koejakson aikana tuotettujen anodikuparimäärien olevan suuruudeltaan noin 180–215 t, kun tarkastelun kohteena on päiväkohtainen valumäärä. Anodiunin pelkistysajat koejakson aikana ovat 80 ja 285 minuutin välillä. Taulukosta 2 nähdään, että propaania menee uuniin 1260–1730 kg per pelkistys riippuen kuparipanoksen suuruudesta. Tarkasteltaessa propaanin syöttömääriä suhteessa tuotettuun kuparimäärään, voidaan todeta propaanin kulutuksen olevan pienempi, jos tuotettu kuparimäärä on suurempi.

Taulukko 2 Mittaus- ja laskutulokset koejakson aikana 9.1.–17.1.2012

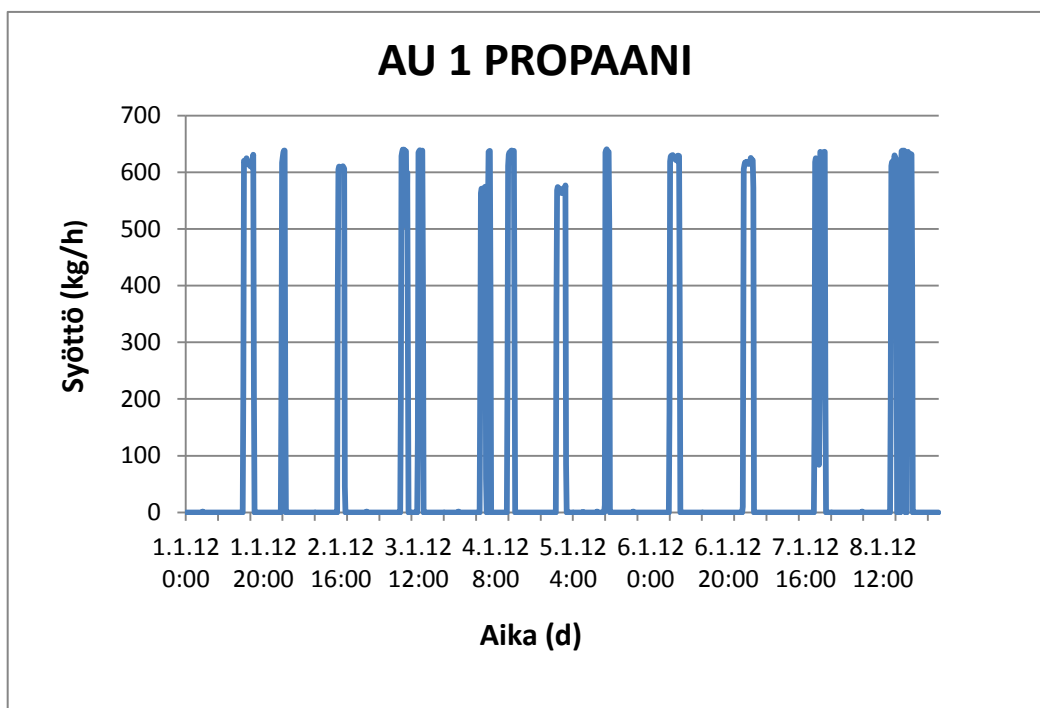
Pvm.	Kupari (t)	Propaani (kg)	pelkistysaika (min)	Propaani/Kupari (kg/t)
9.1.2012	202,23	1730,29	190	8,56
10.1.2012	214,89	1431,94	90	6,66
11.1.2012	203,83	1440,74	140	7,07
12.1.2012	208,18	1607,64	160	7,72
12.1.2012	215,63	1258,56	120	5,84
13.1.2012	181,35	1476,01	140	8,14
14.1.2012	199,82	1639,97	160	8,21
15.1.2012	128,00	897,32	80	7,01
16.1.2012	196,71	1710,32	180	8,69
17.1.2012	199,57	2311,94	285	11,58

Kuvassa 9 olevassa kuvaajassa on esitetty syötetyn propaanin suhde tuotettu kuparimäärää kohti koejakson aikana. Kuvaajasta nähdään, kuinka tuotettu kuparimäärä jakaantuu kyseisellä aikavälillä. Kuvaajan perusteella voidaan todeta, että tuotetun kuparin hajonneisuus on selkeästi pienempää kuin kuvan 8 kuvaajassa.

**Kuva 9 Propaanin suhde tuotettuun kuparimäärään koejakson aikana**

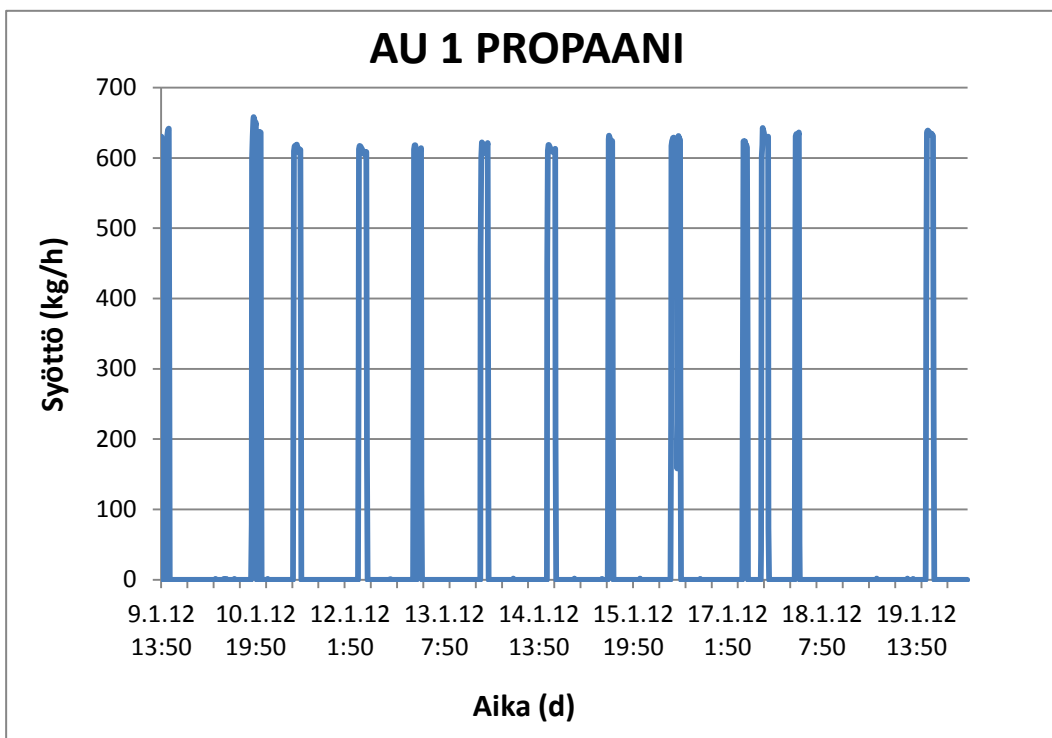
7.2 Ajomittauskäyrät

Kuvassa 10 olevassa kuvaajassa voidaan nähdä propaanin syöttö uuniin ennen koejaksoa. Kuvaajaa tarkastelemalla voidaan todeta anodiuniin menevän propaanin olevan tasolla 620–640 kg/h pelkistyksen aikana. Propaania syötetään anodiuniin noin 60–180 minuutin jaksoissa.



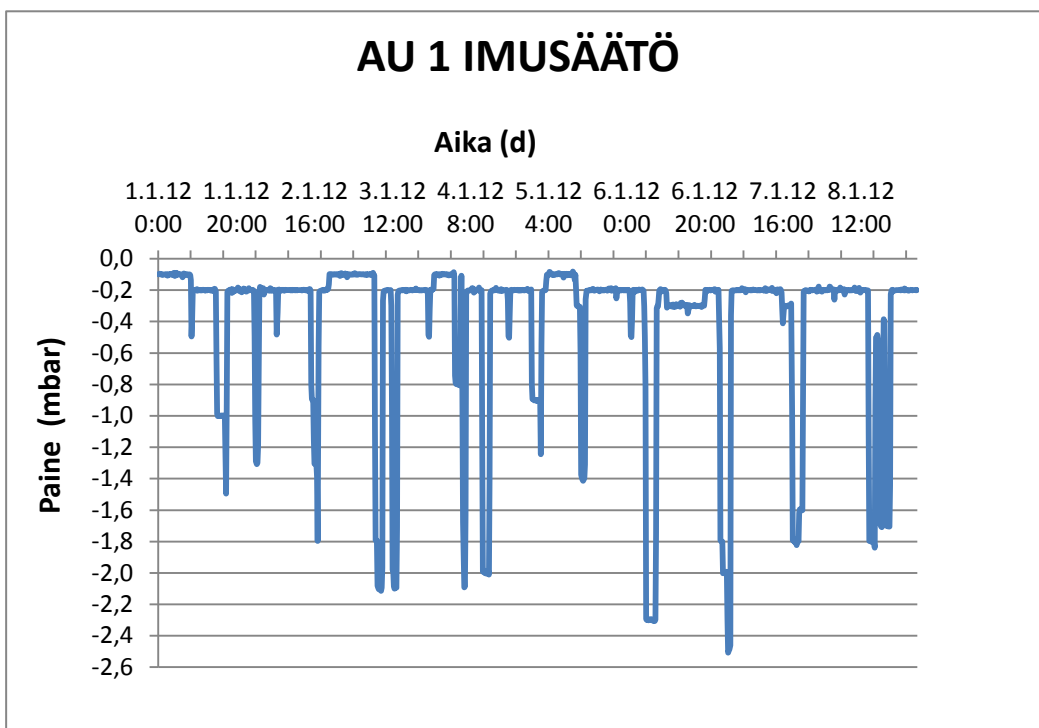
Kuva 10 Propaanin syöttö ennen koejaksoa

Kuvassa 11 on kuvaaja propaanin syötöstä anodiuniin koejakson aikana. Kuvaajasta voidaan todeta, että propaanin syöttö anodiuniin on noin 615–650 kg/h pelkistyksen aikana. Propaania syötetään uuniin noin 90–160 minuutin jaksoissa. Kun kuvaajia vertailtiin toisiinsa, propaanin syötössä ei havaittu olevan merkittäviä eroavaisuuksia. Koejakson aikana muodostetussa kuvaajassa propaanin syöttö näyttäisi kuitenkin olevan hieman tasaisemmalla tasolla ja propaanin syöttöaikojen pituuksien vaihtelevuus on vähäisempää.



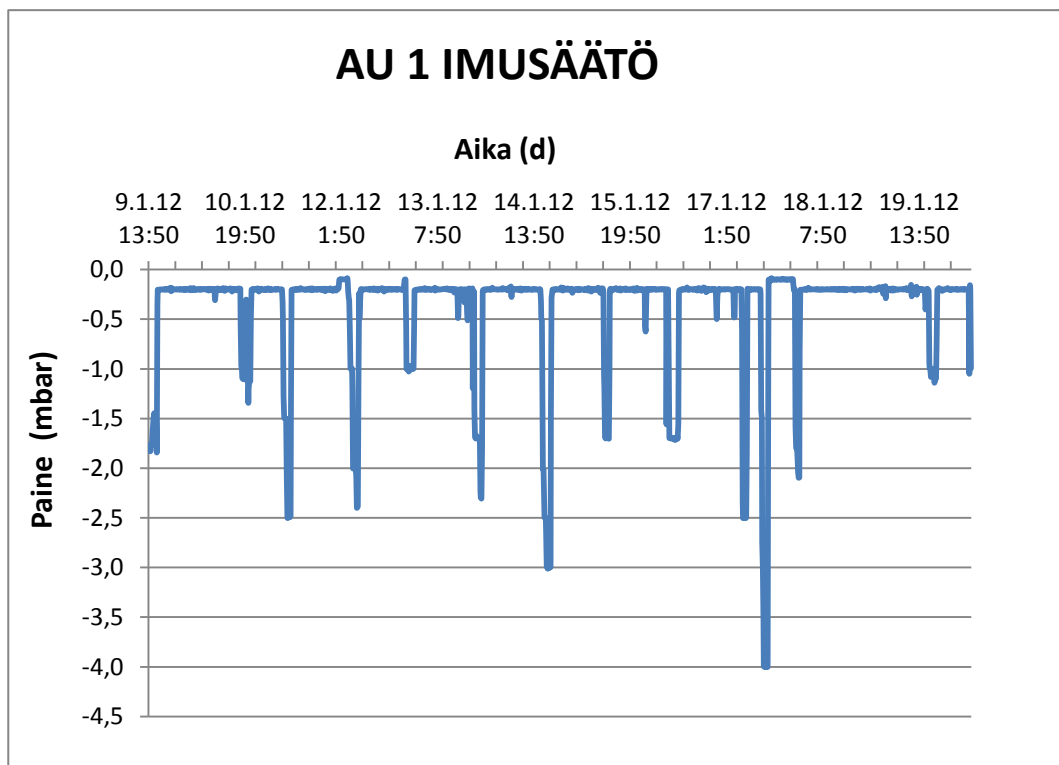
Kuva 11 Propaanin syöttö koejakson aikana

Kuvassa 12 on esitetty anodiunin imusäätöjen arvoista muodostettu kuvaaja ennen koejaksoa olevalta ajalta. Ennen koejaksoa olevasta kuvaajasta voidaan nähdä anodiunin imusäätöjen arvojen olevan ennen anodiuniprosessin pelkistysvaihetta n. -0,2 mbar:n tasolla. Pelkistyksen aikana imusäädön arvoissa on havaittavissa pientä vaihtelevuutta. Kuvassa 12 olevasta kuvaajasta voidaan huomata arvojen vaihtelevan -1,24 mbar:sta -2,5 mbar:iin.



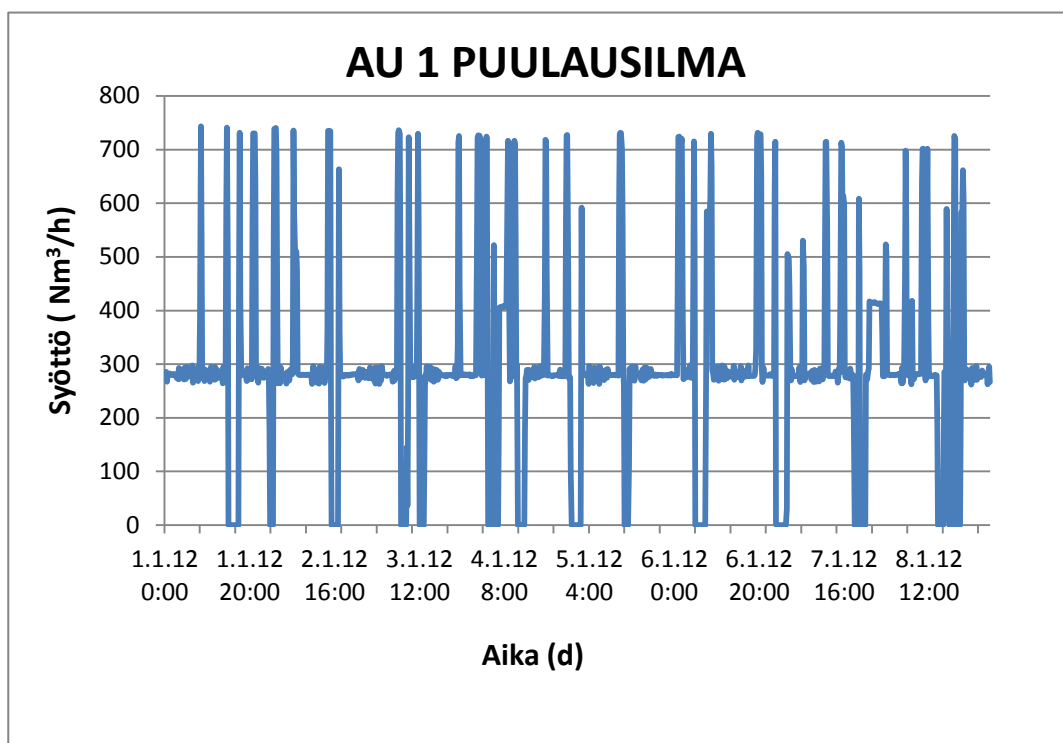
Kuva 12 Imusäätö ennen koejaksoa

Kuvassa 13 on esitetty kuvaaja anodiunin imusäädön arvoista koejakson ajalta. Kuvaa tarkastelemalla voidaan nähdä imusäädön arvojen olevan ennen pelkistysvaihetta samalla -0,2 mbar:n tasolla kuin kuvassa 12 olevassa kuvaajassa. Pelkistysvaiheen aikana imusäädön arvot vaihtelevat -1,10 mbar:n ja -4,0 mbar:n välillä. Ennen koejaksoa mitatut imusäädön arvojen heittelyt pelkistysvaiheen aikana näyttäisivät olevan kuvassa 12 olevan kuvaajan mukaan pienemmällä tasolla kuin koejakson aikana saadut imusäädön mittausarvot kuvassa 13 olevassa kuvaajassa.



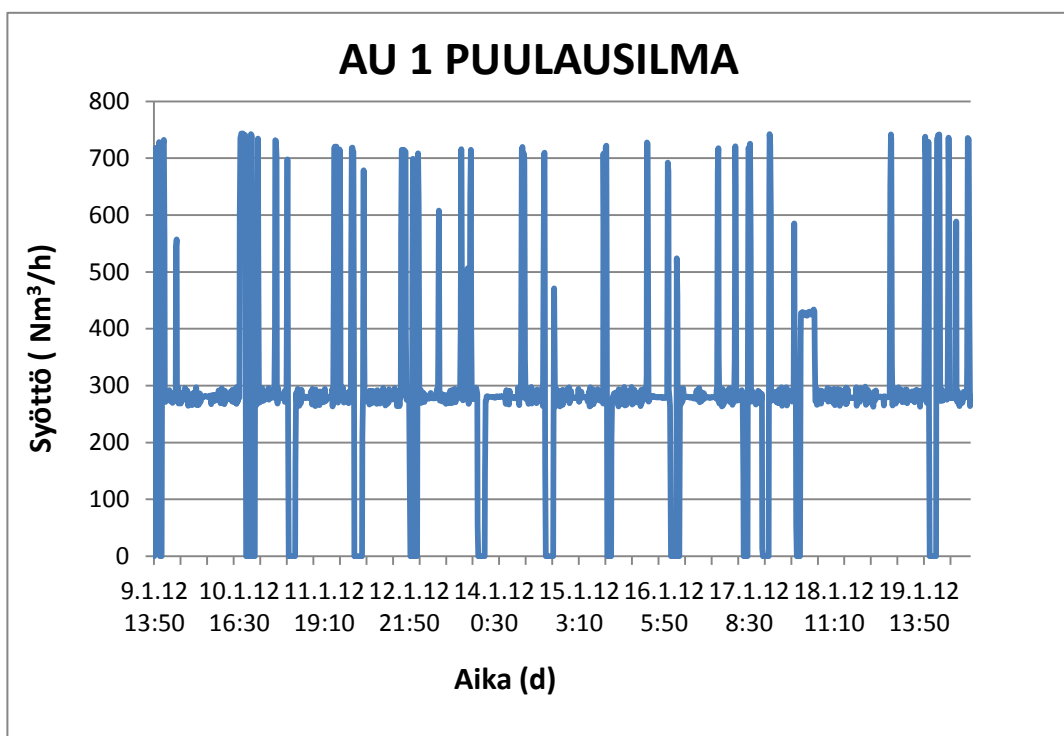
Kuva 13 Imusäätö koejakson aikana

Puulausilman syötön mittausarvoista muodostettu kuvaaja ennen koejaksoa olevalta ajalta on esitetty kuvassa 14. Puulausilman syöttö on ennen koejaksoa olevan ajan aikana noin $280 \text{ Nm}^3/\text{h}$ tasolla pelkistysvaiheiden välillä ja syöttö nousee kuvaajan mukaan ennen pelkistysvaiheen alkua noin $700\text{--}750 \text{ Nm}^3/\text{h}$ tasolle. Kuvassa 14 olevaa kuvaajaa tarkastelemalla voidaan havaita, ettei puulausilmaa syötetä anodiuniin pelkistyksen aikana.



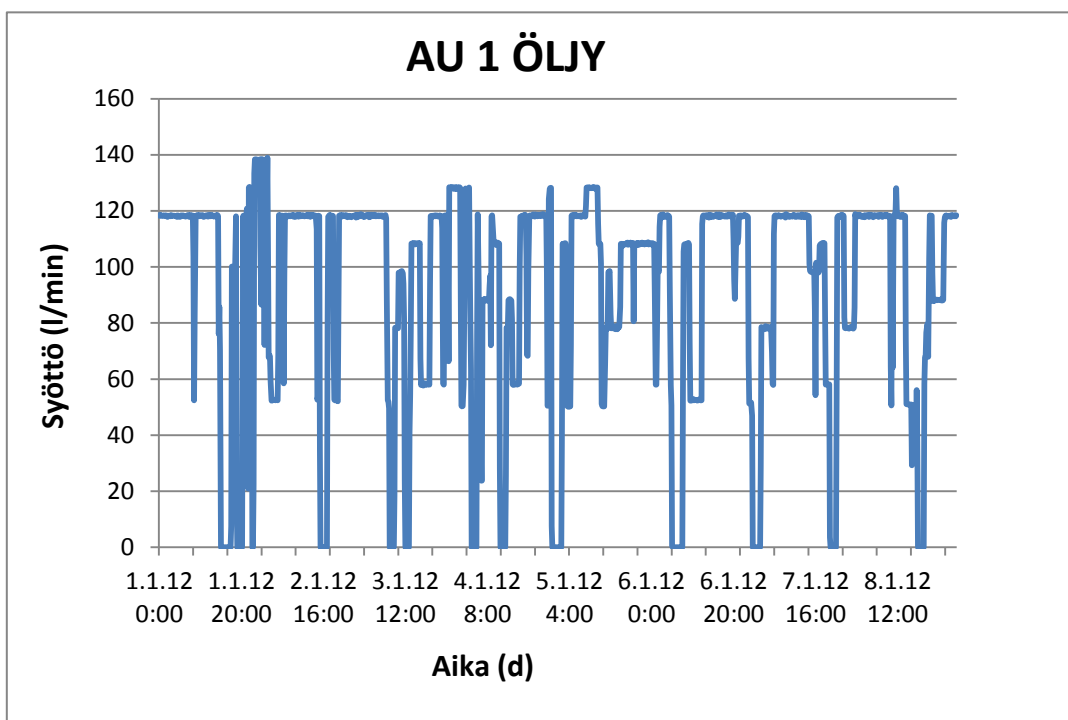
Kuva 14 Puulausilma ennen koejaksoa

Puulausilman syötön arvot koejakson aikana ovat kuvan 15 kuvaajan mukaan pelkistysvaiheiden välillä myös noin $280 \text{ Nm}^3/\text{h}$ tasolla. Ennen pelkistysvaiheen alkua mittausarvot nousevat $700\text{--}745 \text{ Nm}^3/\text{h}$ tasolle. Kuten ennen koejaksoa olevassa kuvaajassa, myös koejakson aikana olevaa kuvaajaa tarkastelemalla nähdään, ettei puulausilmaa mene pelkistysvaiheen aikana uuniin. Kuvan 15 kuvaajan perusteella ennen pelkistysvaiheen alkua olevissa mittausarvoissa ei ole nähtävissä suuria eroja verrattuna kuvan 14 kuvaajaan.



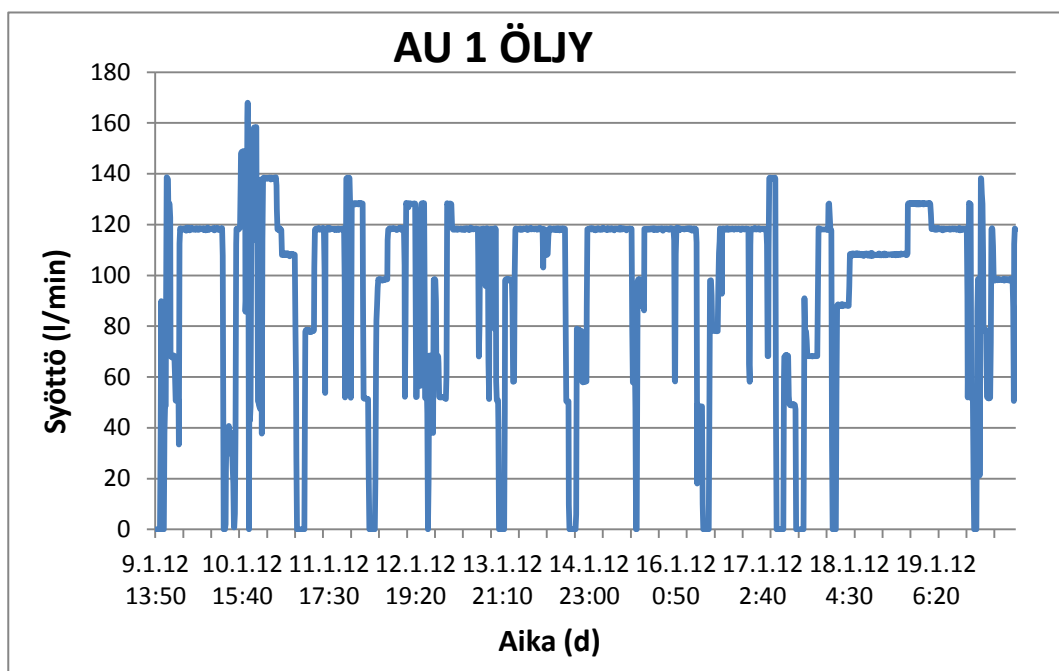
Kuva 15 Puulausilman syöttö koejakson aikana

Anodiuniin syötetyn öljyn mittausarvot ennen koejaksoa olevalta ajalta on esitetty kuvassa 16 olevassa kuvaajassa. Öljyn syötön mittausarvoista muodostetussa kuvaajassa ajalta ennen koejaksoa öljyn syöttö ennen pelkistysvaihetta on noin 118 l/min tasolla paria korkeampaa piikkiä lukuun ottamatta. Kuvassa 16 olevaa kuvaajaa tarkastelemalla voidaan havaita, ettei öljyä syötetä uuniin lainkaan pelkistysvaiheen aikana.



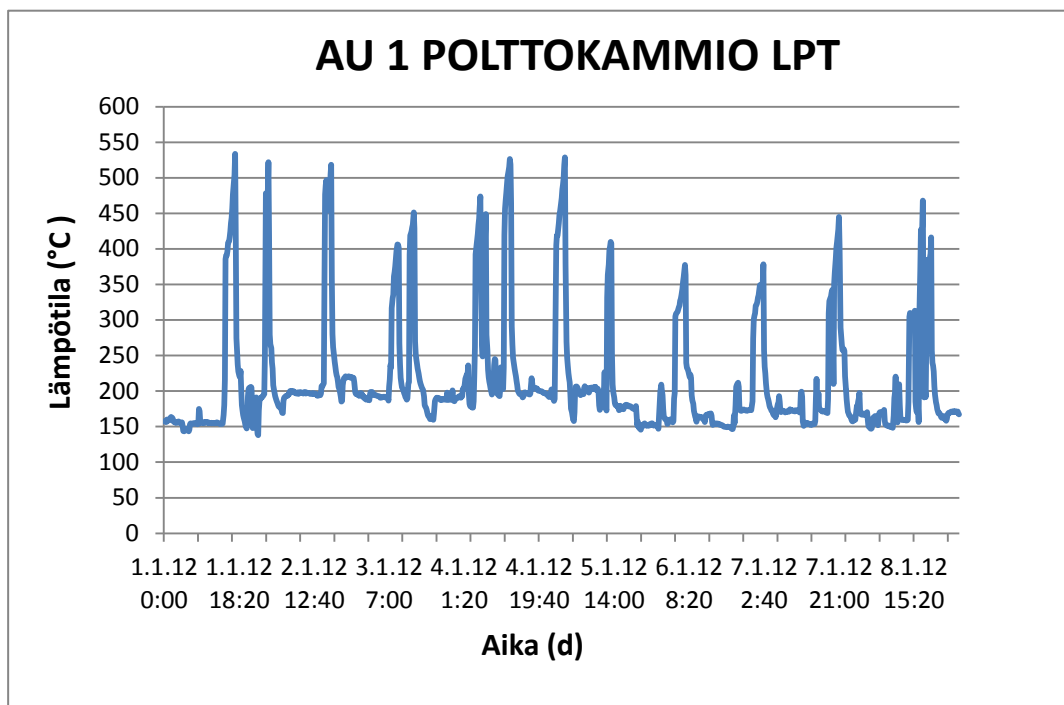
Kuva 16 Öljyn syöttö ennen koejaksoa

Kuvassa 17 olevassa kuvaajassa öljyn syötön mittausarvot näyttävät olevan myös noin 118 l/min tasolla paria korkeampaa piikkiä lukuun ottamatta. Kuten ennen koejaksoa olevassa kuvaajassa, koejakson ajalta olevassa kuvaajassa öljyä ei näyttäisi myöskään menevän uuniin pelkistysvaiheen aikana.



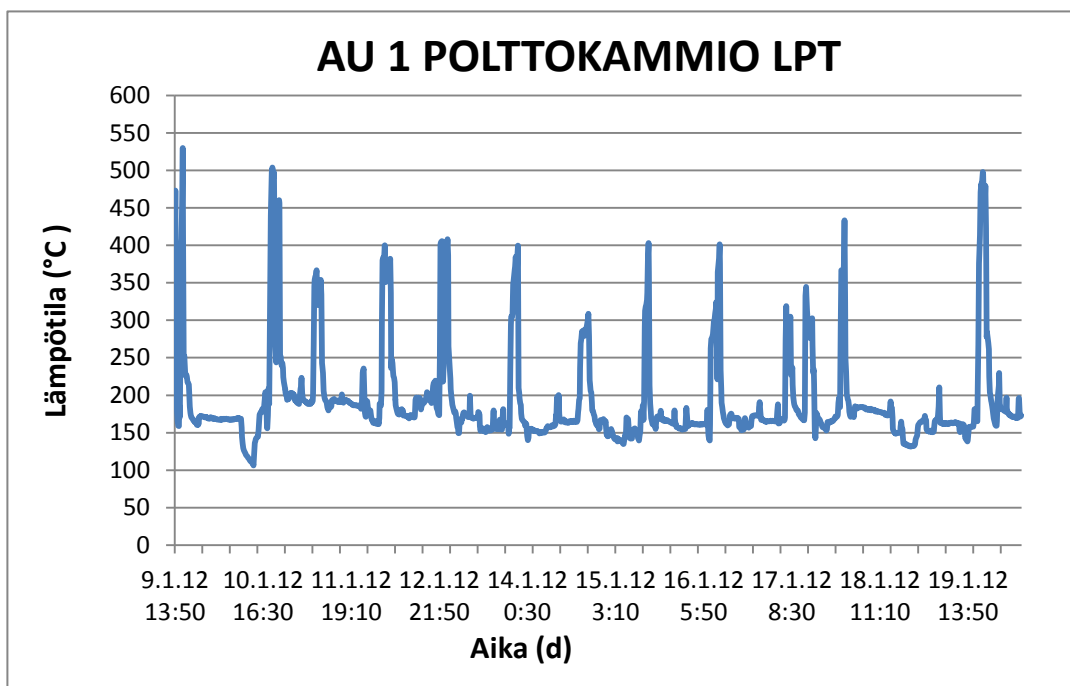
Kuva 17 Öljyn syöttö koejakson aikana

Polttokammion lämpötilan mittausarvot ennen koejaksoa olevalta ajalta on esitetty kuvan 18 kuvaajassa. Kuvaajaa tarkastelemalla voidaan havaita polttokammion lämpötilan vaihtelevan pelkistysvaiheen aikana 378–534 °C:n välillä. Polttokammion lämpötila vaihtelee pelkistysvaiheiden välissä olevassa kuvan 18 kuvaajassa noin 150–200 °C:n välillä.



Kuva 18 Polttokammion lt. ennen koejaksoa

Polttokammion lämpötilojen arvoista muodostettu kuvaaja koejakson ajalta on esitetty kuvassa 19. Tarkasteltaessa koejakson ajalta olevaa polttokammion lämpötilojen kuvaajaa nähdään, että pelkistysvaiheen aikana lämpötilat ovat noin 308–510 °C:n välillä. Polttokammion lämpötilat vaihtelevat pelkistysvaiheiden välillä 150–200 °C koejakson aikana. Kuvaajaa tutkimalla näyttäisi siltä, että polttokammion lämpötilat pelkistyksen aikana olisivat hieman alhaisemmalla tasolla koejakson ajalta olevassa kuvaajassa verrattuna kuvaajaan ajalta ennen koejaksoa.



Kuva 19 Polttokammion lt. koejakson aikana

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kun tarkasteltiin koejakson ajalta olevia mittaustuloksia, laskennallisia tuloksia sekä niistä muodostettuja kuvaajia ja verrattiin niitä ennen koejaksoa oleviin mittaus- ja laskutuloksiin sekä niistä muodostettuihin kuvaajiin, voitiin tuloksista tehdä seuraavia johtopäätelmiä: Ennen koejaksoa tuotetuissa kuparimäärissä on havaittavissa välillä suuria eroja, mikä taas vaikuttaa syötetyn propaanin kokonaismääriin pelkistysaikojen aikana sekä pelkistysaikojen epätasaisuuteen. Ennen koejaksoa olevasta propaanin syötöstä suhteessa tuotettuun kupariin tehdystä kuvaajasta voidaan nähdä kuparin tuotantomäärien jaon hajautuneisuus melko selvästi. Tarkasteltaessa koejakson aikana tuotettuja kuparimääriä päiväkohtaisesti huomataan, että kuparimäärissä ei ole niin suurta hajontaa havaittavissa verrattuna ennen koejaksoa tuotettuihin kuparimääriin. Koejakson ajalta muodostetussa kuvaajassa edellä mainittu asia on selkeästi havaittavissa. Voidaan siis päätellä, että tuotanto on ollut tasaisempaa koejakson aikana. Pelkistysaikoja katsoessa huomataan niiden olevan myös tasaisempia pituudeltaan päiväkohtaisesti katsottuna verrattaessa niitä ennen koejaksoa oleviin pelkistysaikoihin.

Kuparin pelkistysprosessi on täysin riippuvainen siitä, minkälaista blisterkupari on puhtausasteeltaan konverttereilta anodiunille tullessaan. Myös eri vuorojen tavat operoida anodiuniprosessia vaikuttavat varmasti jollain tasolla tuotetun kuparin määrään, mikä voisi tulevaisuudessa olla erittäin hyödyllinen tutkimuksen kohde tuotannollisesta näkökulmasta katsottuna. Huokoisten tiilien typen virtausmäärien muuttamisella koejakson ajaksi ei näyttäisi mittaus- ja laskutulosten perusteella olevan merkittävää vaikutusta propaanin syöttöön ja pelkistysaikoihin. Toisaalta koejakson pituudesta johtuen ei voida varmuudella sanoa, että vaikutusta ei olisi. Voisi olla hyvä tutkia huokoisten tiilien virtausmäärien muuttamisen vaikutusta anodiunin pelkistysprosessiin pidemmällä aikavälillä, jotta voitaisiin olla täysin varmoja saaduista tuloksista. Anodiunin 1 hormiputkien asento ja huokoisten tiilien nykyinen sijoitus uunissa voi myös olla vääränlainen, mikä voi osaltaan varmasti vaikuttaa kuparin pelkistymisprosessiin. Asiaa pitäisi mielestäni tutkia paremmin ja tulokset dokumentoida niin, että niistä olisi tulevaisuudessa hyötyä esimerkiksi hormiputkien ja huokoisten tiilien sijoittamisessa anodiuuneihin muurauksen yhteydessä.

LÄHTEET

1. Outokumpu Research Oy:n raportti 6.9.2004
2. Outotec Oyj:n raportti 5.5.2009
3. Outotec Research Oy:n koulutusmoniste 5.3.2009
4. Schlesinger, M., King, M., Sole, K. & Davenport, W. 2011. Extractive Metallurgy of Copper. 5. p. Iso-Britannia, Oxford: Elsevier.
5. Kundig, K. J. A., & Drescher, W. H. 2000. Copper. Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology. John Wiley & Sons, Inc.
doi:10.1002/0471238961.0315161607051518.a01.pub3
6. Boliden Harjavalta Oy:n esite. Viitattu 10.11.2011.
http://www.boliden.com/Documents/Press/Publications/Place%20broschures/Boliden_Harjvalta_oy_Yleisesite_eng.pdf
7. Lossin, A. 2000. Copper. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. doi:10.1002/14356007.a07_471
8. Kopar Oy:n www-sivut. Viitattu 15.11.2011. <http://www.kopar.fi>
9. Niemi, T. 2010. AGA poltin- ja sovelluskehityshankkeiden ja koelaboration esittely. Viitattu 12.12.2011.
http://www.ffrc.fi/Liekkipaiva_2010/Sessio2B/NiemiAGA.pdf
10. Outokumpu Harjavalta Metals Oy:n raportti 30.5.2001
11. Gamweger, K., Filzwieser, A. ALKIN®- A gas purging system for furnaces in the aluminium industry. Viitattu 28.2.2012.
http://www.mettop.com/mediaCache/28AL_KIN__A_Gas_Purging_System_for_Furnaces_in__153009.pdf

Anodiuunien väliset erot:

AU1:

- typpitiilet sijoitettu uuniin porrastetusti toisiinsa nähden
- hormiputkien etäisyys typpitiilistä 1 ja 3 melko lyhyt
- pitkä pelkistysaika
- uunin lämpötila korkea
- sulan kuparin lämpötila korkea

AU2:

- typpitiilet sijoitettu uuniin suoraan linjaan toisiinsa nähden
- typpitiili 1 poissa käytöstä
- hormiputkien etäisyys typpitiilistä 1 ja 3 suurempi kuin AU1:ssä
- propaanipillien asennot uunissa erilaiset toisiinsa nähden
- lyhyt pelkistysaika
- polttokammion korkea lämpötila
- uunin matala lämpötila
- sulan kuparin matala lämpötila
- öljypolttimen huono asento uunissa