

PCC saostusprosessin mallinnus

Tuukka Kotiranta

| | |
|---------------|--------------------------|
| Jakelu | |
| Asiakas | Cleen CCSP-ohjelma (pdf) |
| Outotec Espoo | Iikka Kojo |
| ORC | Heljä Peltola |
| Kierto | R&D Hydromet - Tekijä |
| Asiakaskanta | OT |

Hyväksyntä

Sami Salo, Kehityspäällikkö

Liitteet

-

Liittyvät raportit

-

Projektinumero

10006535 (2012)

Avainsanat

PCC, saostettu kalsiumkarbonaatti, mineraal karbonointi, kuonakarbonointi, Slag2PCC, mallinnus, massatase, hiilidioksidin talteenotto, CCS, CLEEN

Key words

PCC, precipitated calcium carbonate, mineral carbonation, slag carbonation, Slag2PCC, modeling, mass balance, carbon capture and storage, CCS, CLEEN

Tiivistelmä

Tämä raportti esittelee PCC (Precipitated Calcium Carbonate) saostusta varten tehdyn mallin ja tulosten perusteella lasketut investointi- ja käyttöhyödykekustannukset. Mallilla laskettiin myös eri vaihtoehtoja helpottamaan prosessisuunnittelua tulevaisuudessa. Prosessissa kalsiumlähteenä käytetään terästehtaan kuonaa, kalsium liuotetaan NH_4Cl liuoksella ja PCC saostetaan savukaasusta saatavalla hiilidioksidilla.

Prosessin saaminen taloudellisesti kannattavaksi näyttää haastavalta. Nyt tehdyt investointi- ja käyttöhyödykekustannusarviot eivät ole rohkaisevia, mutta täytyy muistaa, ettei prosessia ole aiemmin mietitty kokonaisuutena. Myös osassa prosessivaiheita tutkimustietoa on vain vähän käytettävissä. Alla on esitetty yhteenveto kustannuksista ja tuotoista.

- Kokonaisinvestointikustannus: 59 M€
- Käyttöhyödykekustannus: 3 M€/a
- PCC myyntitulo: 8 M€/a

Kustannukset on laskettu hyvin karkealla tasolla. Investointikustannuksesta puuttuu esim. jauhatuksen laitteet, välisäiliöt, pumput, lähtömateriaalien ja tuotteiden käsittelylaitteet, yms. Suodatinten hinta on luultavasti arvioitu kokonaisinvestoinnissa liian korkeaksi. Käyttöhyödykekustannukseen pitää lisätä mm. työvoimakulut, huollot, laitteiden sähkönkulutus, yms. Takaisinmaksuajat nousevat tuollaisella investoinnilla ja tuotto – tulosuhteella hyvin pitkiksi. Viiden prosentin sisäisellä korolla 4 M€/a tuottavan prosessin takaisinmaksuaika on 27 vuotta.

Investointikustannuksissa suurin yksittäinen osa oli PCC suodattimet. PCC pitää olla lähes kloridivapaata, joten sen pesuun tarvitaan 3 suodatusvaihetta välipulppauksilla. Mikäli tähän löydettäisiin parempi vaihtoehto, voitaisiin investointia saada pienemmäksi. Käyttöhyödykekustannusten puolella haihdutus edusti 40% kustannuksista. Etsimällä kohteet, joissa vesiä voitaisiin syöttää vähemmän prosessiin, pystytään pienentämään haihdutuksen energiankulutusta.

Yhteenvetona voidaan todeta prosessin vaativan lisää työtä, jotta se saataisiin taloudellisesti kannattavaksi. Tämän tarkastelun pohjalta ei voi todeta prosessia kannattamattomaksi sillä pienillä muutoksilla voidaan vaikuttaa kustannuksiin huomattavastikin. Myös mallinnuksessa on tehty lukuisia oletuksia, joten laskelma ei välttämättä kuvaa todellisuutta tarkasti. Oletukset on toisaalta tehty mahdollisimman realistisiksi, eli niihin ei ole lisätty mitään varmuuden vuoksi, joten kustannukset saattavat myös osoittautua alakanttiin arvioituiksi.

Abstract

Modeling of the Slag2PCC process

This report presents a model and calculated results for the PCC (Precipitated Calcium Carbonate) precipitation process. Investment and operational costs were also calculated as well as a few alternative process options or parameters to give their indicative costs. In the process the calcium source is steelmaking slag, which is leached with NH_4Cl solution and PCC is precipitated with flue gas containing CO_2 .

The process economics appears to be challenging; the calculated costs are high, but we must keep in mind that this is the first time, when the economics of the whole process have been evaluated. The research information was also limited for some process stages. The calculated costs and the revenue from PCC are described below:

- Total investment cost: 59 M€
- Operation costs 3 M€/a
- Revenue from PCC 8 M€/a

The costs are a rough estimate. For example milling equipment, intermediate storage tanks, pumps, handling of raw material and products are missing from the investment cost estimate. Filters are probably overestimated. The operation cost estimate does not include labor, maintenance, equipment electricity consumption, etc. The payback time for the investment is very long. With 5% internal rate of interest and revenue of 4 M€/a the payback time is 27 years.

The biggest single investment cost is the PCC filters. The product needs to be virtually chloride free and therefore the filtration is divided to three stages with pulping in between. If a better solution is found to reduce chloride level in the PCC, the investment will be a lot smaller. In the operation costs the evaporation of water presented 40% of the costs. If water feed to the process can be reduced the amount of evaporation will be smaller and the costs are smaller as well.

More work is needed to make the process economically viable. The costs can be reduced with small changes and therefore it is too early to say whether the process is too expensive or not. Numerous assumptions have been made in the modeling so it is possible that the true costs can also be higher than estimated in this report.

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| Tiivistelmä | 3 |
| Abstract | 4 |
| Sisällysluettelo | 5 |
| 1. Johdanto..... | 6 |
| 2. Prosessimallin kuvaus | 6 |
| 2.1. Syöttömateriaali..... | 7 |
| 2.2. Taulukko lähtötiedoista..... | 8 |
| 2.3. Extractor | 9 |
| 2.4. Carbonator..... | 9 |
| 2.5. PCC suodatus ja pesu..... | 10 |
| 2.6. Savukaasujen käsittely | 10 |
| 2.7. NH ₃ talteenotto | 10 |
| 2.8. Haihdutus | 10 |
| 2.9. RO yksikkö (käänteisosmoosi) | 11 |
| 3. Prosessin vesitase..... | 11 |
| 4. Investointi- ja käyttöhyödykekustannus | 12 |
| 4.1. Investointikustannus | 12 |
| 4.2. Käyttöhyödykekustannus..... | 13 |
| 5. Herkkyysanalyysi | 13 |
| 5.1. PCC kosteus 30% | 13 |
| 5.2. Carbonator yksikön lämpötila 15°C | 14 |
| 5.3. Extractor vaiheen kiintoainepitoisuus 50 g/l..... | 14 |
| 5.4. Kaasunpesun jälkeinen lämpötila 60°C | 14 |
| 5.5. Prosessi ilman RO yksikköä | 14 |
| 5.6. Prosessi ilman haihdutusta..... | 15 |
| 5.7. Prosessi ilman savukaasujen jäähdytystä | 15 |
| 6. Tutkimustulosten vaikutus ympäristöön | 16 |
| 7. Johtopäätökset | 16 |
| 8. Jatkotoimenpiteet..... | 17 |

1. Johdanto

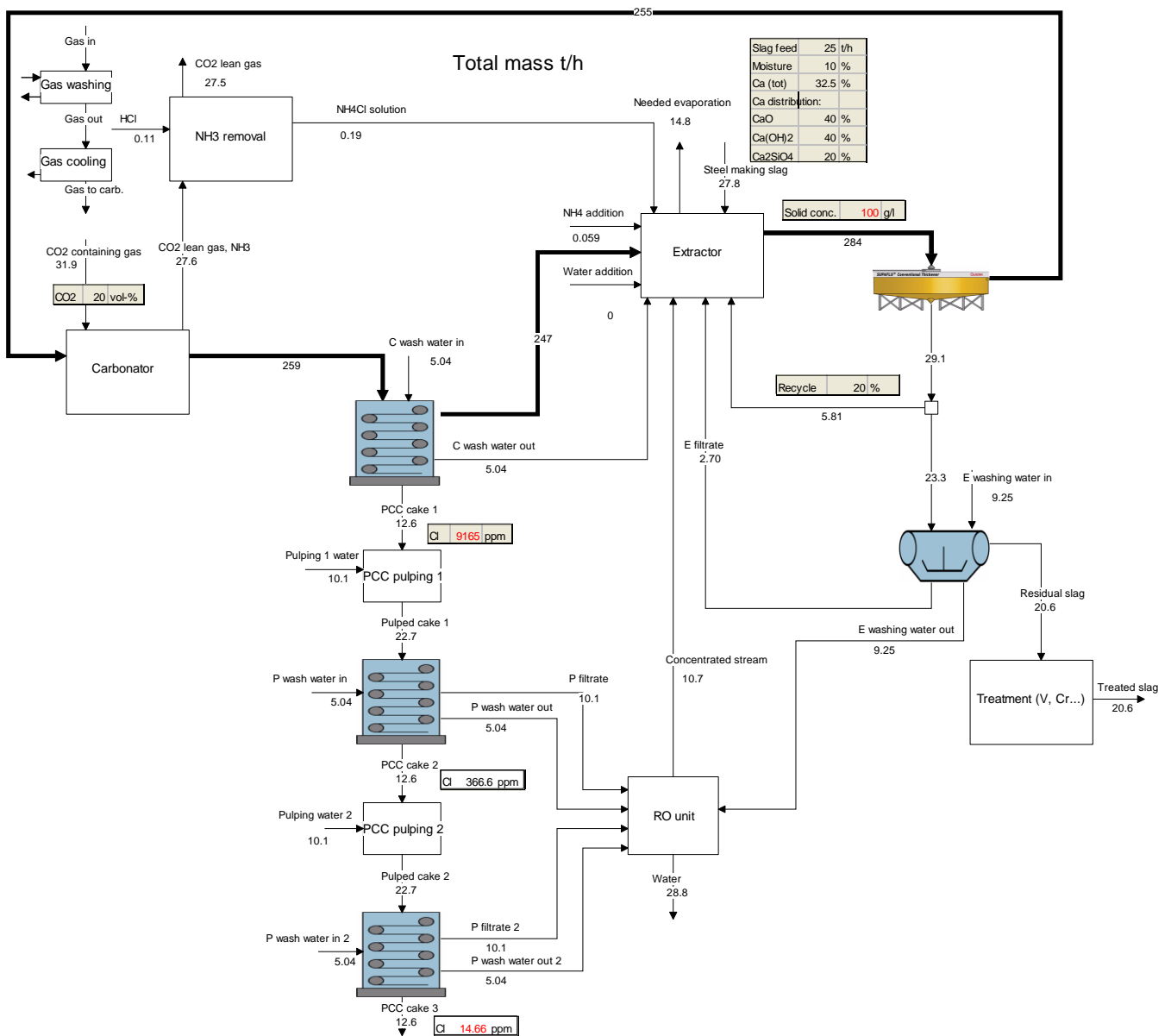
Tässä projektissa tehtiin malli PCC tuotantoprosessista (Slag2PCC). Prosessissa käytetään kiertoliuoksena NH_4Cl liuosta ja kalsium saadaan terästehtaan kuonasta. Hiilidioksidin lähteenä on tarkoitus käyttää savukaasua. Lähtötiedot prosessiin saatiin Cleen CCSP-ohjelman jäseniltä (WP 5.2).

Prosessi mallinnettiin HSC Chemistry ohjelmalla ja prosessille laskettiin karkeat investointi- ja käyttöhyödykekustannukset. Monista prosessivaiheista ei ollut kokeellista tietoa saatavilla, joten kustannusten kannalta tärkeimpiä kohtia tarkasteltiin laskemalla perustapauksen lisäksi muutosten vaikutus valittuihin lähtötietoihin.

Tämä on ensimmäinen raportti, jossa Slag2PCC-prosessia mietitään kokonaisuutena. Aiemmat tutkimukset ovat keskittyneet lähes pelkästään extractor ja carbonator vaiheiden toimintaan. Tavoitteena tällä raportilla onkin nostaa esiin vähemmälle huomiolle jääneitä kohtia, joilla on merkitystä kokonaisprosessin kannalta. Tässä raportissa ei ole mietitty mikä ratkaisuvaihtoehto olisi optimaalisin kokonaisuuden kannalta vaan kuhunkin prosessivaiheeseen on otettu joku perinteinen ratkaisu ja arvioitu sen kustannukset. Näitä ratkaisuja pitää tarkastella kriittisesti. Jatkossa pitää myös tarkastella millaisilla prosessilaitteilla esitettyihin olosuhteisiin voitaisiin päästä, koska myös tämä tarkastelu on jätetty tekemättä tässä raportissa. Esimerkiksi carbonator vaiheessa saattaa olla tarpeen käyttää jotain muuta kuin perinteistä sekoitussäiliötä reaktorina johtuen suuresta kaasumäärästä.

2. Prosessimallin kuvaus

Tässä kappaleessa on käyty läpi laitekokonaisuus kerrallaan prosessin laitteet ja kerrottu miten laitteet on mallinnettu. Kuvassa 1 on esitetty prosessikaavio.



Kuva 1. Mallinnusta varten tehty prosessikaavio

2.1. Syöttömateriaali

Syöttömateriaalina käytetyn terästehtaan kuonan koostumus oli seuraava:

| | | | |
|----------------------------------|--------|-----|-----|
| Kuona (kuiva) | | 25 | t/h |
| Kosteus | 10 % | 2.8 | t/h |
| Ca (kok) | 32.5 % | 8.1 | t/h |
| Ca jakauma: | | | |
| CaO | 40 % | 4.6 | t/h |
| Ca(OH) ₂ | 40 % | 6.0 | t/h |
| Ca ₂ SiO ₄ | 20 % | 3.5 | t/h |

Syöttömateriaalin koostumus ei vaikuta kovin paljoa laskennan lopputulokseen, sillä puolet kaikista kalsiumpitoisista yhdisteistä oletettiin liukenevan.

2.2. Taulukko lähtötiedoista

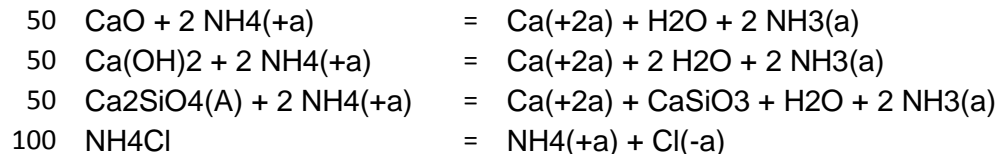
Taulukkoon 1 on kerätty tietoja miten eri laitteet toimivat prosessissa. Myös lähde on mainittu, jos lukuarvo on otettu suoraan laboratorikokeesta. Vaikka jotkin lähtötiedot perustuvat kokeisiin, eivät ne välttämättä kuvaa prosessin toimintaa tehdasmittakaavassa, sillä ne ovat panoskokeista saatuja suuntaa-antavia tuloksia.

Taulukko 1. Yhteenveto laitteiden lähtötiedoista ja mallinnuksen tuloksista.

| Laite | Lukuarvo | | Kommentti tai lähde |
|-----------------------------------|----------|------------------------|---|
| Extraction | | | |
| Ammoniumpitoisuus sisääntulossa | 53 | g/l | Ulostulossa 41 g/l |
| Kalsiumin reaktioaste | 50 | % | |
| Kiintoainepitoisuus reaktorissa | 100 | g/l | |
| Sakeuttimen alitepitoisuus | 1300 | g/l | Laskeutuskoe 1/2012 |
| Alitteen kierrätys reaktoriin | 20 | % | |
| Suodattimen kakun kosteus | 10 | % | Suodatuskoe 1/2012 |
| Suodattimen pesutehokkuus | 80 | % | Suodatuskoe 1/2012 |
| Suodattimen pesuveden määrä | 0.5 | m ³ /t k.a. | Suodatuskoe 1/2012 |
| Carbonator | | | |
| Lämpötila | 25 | °C | |
| Hiilidioksidin pitoisuus syötössä | 20 | vol-% | |
| Hiilidioksidin reaktioaste | 50 | % | |
| Ammoniakin haihtuminen | 0.5 | % | Liuenneesta ammoniakista, ammoniumioni ei mukana. |
| Tarvittava jäähdytys | 2.3 | MW | |
| PCC tuotantomäärä | 10.08 | t/h | 80 500 t/a |
| PCC suodatus ja pesu | | | |
| Suodattimien määrä / pesu | 5 | kpl | |
| Yhden suodattimen pinta-ala | 396 | m ² | |
| Suodattimen kakun kosteus | 20 | % | |
| Suodattimen pesutehokkuus | 80 | % | |
| Suodattimen pesuveden määrä | 0.5 | m ³ /t k.a. | |
| Välipulppausten vesimäärä | 1 | t/t k.a. | |
| Suodatusvaiheiden lukumäärä | 3 | | = Kaksi välipulppausta |
| Kakun kloridipitoisuus | 14 | ppm | Pesujen jälkeen |
| Savukaasujen käsittely | | | |
| Savukaasujen lämpötila | 300 | °C | Sisääntulossa |
| Savukaasujen kosteus | 6 | vol-% | Sisääntulossa |
| Savukaasujen pesuvesimäärä | 69 | t/h | |
| Savukaasujen lämpötila | 50 | °C | Pesun jälkeen |
| Savukaasujen lämpötila | 20 | °C | Jäähdytyksen jälkeen |
| Lauhtuneen veden määrä | 1.8 | t/h | Jäähdytyksessä |
| Jäähdytyksen tehontarve | 1.5 | MW | |
| Haihdutus | | | |
| Haihdutettava vesimäärä | 19.2 | t/h | |
| Haihdutuksen höyryntarve | 6.4 | t/h | Kolmivaiheinen haihdutin |
| RO yksikkö | | | |
| Konsentraatin suolapitoisuus | 60 | g/l | |

2.3. Extractor

Extractor vaiheeseen syötetään terästehtaan kuona ja PCC:n suodatukselta tuleva liuos. Muut syötöt liittyvät ammoniumpitoisten liuosten kierrätykseen ja extractor vaihe on paras paikka syöttää näitä liuoksia. Reaktiot ovat seuraavia, reaktioaste on esitetty reaktioiden edessä:



Säädöt:

Ammoniumin pitoisuus extractor vaiheen sisääntulossa pidetään 53 g/l syöttämällä salmiakkia (NH_4Cl). Tällä tavalla säädettynä ammoniumpitoisuus extractor vaiheen ulostuloliuoksessa on 41 g/l.

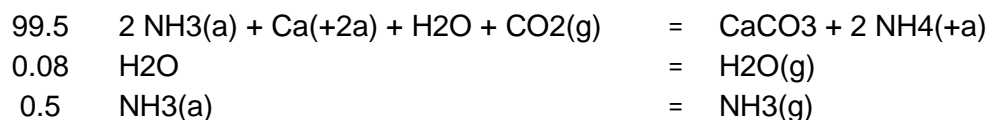
Sakeuttimen alitetta kierrätetään 20% takaisin reaktoriin.

Kiintoainepitoisuus extractor vaiheessa on 100 g/l.

Käytetyn kuonan Ca pitoisuus laskee vaiheessa 32.5% → 22%.

2.4. Carbonator

Carbonator vaiheeseen syötetään extractor vaiheen kalsiumia ja ammoniakkia sisältävä liuos ja hiilidioksidipitoista savukaasua. Reaktiot ovat seuraavia:



Carbonator vaiheessa lämpötila on 25°C. Savukaasun hiilidioksidipitoisuus on 20% ja loppu on typpeä. Savukaasun lämpötila on 20°C. Hiilidioksidista reagoi puolet. Oletetaan, että ulostuleva kaasu on kylläistä veden suhteen. Liuenneesta ammoniakista haihtuu 0.5%, joka vastaa ulostulokaasussa 0.1 vol-% pitoisuutta.

Carbonator vaihe tarvitsee jäähdytystä 2.3 MW. Jos jäähdytystä ei ole, nousee lämpötila reaktioiden seurauksena 37°C oletuksella, että vaiheeseen syötettävän liuoksen lämpötila pysyy 25°C.

2.5. PCC suodatus ja pesu

PCC suodatuksen mitoitus perustuu Andritz:lta saatuun tietoon suodatuspinta-alasta ja arvaukseen pesutehokkuudesta. Painesuodattimien määrä oli 100 000 t PCC/a valmistavassa laitoksessa 6 kpl, koko 1500*1500 mm, 30 mm paksu kammio ja 114 kammiota per suodatin. Eli suodatuspinta-ala on n. 396 m² per suodatin. Nyt tuotantomäärä on 80 500 t PCC/a, joten suodattimien tarve on 5 kpl per suodatusvaihe.

PCC suodatuksessa on kaksi välipulppausta (eli 3 suodatusvaihetta), jotta kakun kloridipitoisuus saadaan alle 30 ppm. Välipulppausten vesimäärä on 1 t/t kiintoainetta. Kloridin oletetaan olevan pelkästään nesteessä eli oletetaan, ettei kloridipitoisia yhdisteitä saostu.

Pesutehokkuutena käytettiin 80%, kakun kosteutena 20% ja pesuvesimääränä 0.5 m³/t k.a. Näille arvoille ei ollut saatavissa kokeellista vahvistusta.

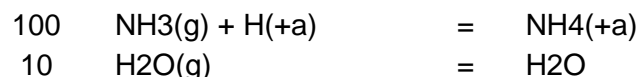
2.6. Savukaasujen käsittely

Savukaasua käytetään hiilidioksidilähteenä PCC saostuksessa. Savukaasun oletetaan olevan 300°C ja sisältävän 6 vol-% vettä. Kaasu ensin pestään pesurilla, jolloin lämpötila laskee 50°C:een ja kaasun oletetaan olevan kylläistä veden suhteen. Kaasun pesuun käytettävä vesi on syötettäessä 30°C ja ulostulossa 50°C. Veden määrä laskettiin lämpötaseesta, eli sitä tarvittiin 69 t/h.

Kaasun pesun jälkeen kaasu jäähdytetään 20°C:een. Jäähdytyksen vaatima teho on 1.5 MW. Jälleen oletetaan kaasun olevan kylläistä veden suhteen jäähdytyksen jälkeen, eli vesihöyryä lauhtuu 1.8 t/h jäähdytyksen seurauksena. Kaasun jäähdytyksen läpi virtaava kaasumäärä on 23 000 Nm³.

2.7. NH₃ talteenotto

Pieni määrä ammoniakkia haihtuu carbonator vaiheesta ja se täytyy pestä pois kaasuista. Tähän luultavasti soveltuu suolahappopesu, jolloin tuotteeksi saadaan ammoniumkloridiliuos, joka voidaan suoraan syöttää takaisin prosessiin. Tuoteliuoksen pitoisuus oli 313 g/l NH₄Cl ja määrä 0.19 t/h. Reaktiot ovat seuraavat:



Tälle prosessivaiheelle ei laskettu energiatasetta.

2.8. Haihdutus

Jotta vesitase prosessissa saadaan pidettyä kohdallaan, täytyy pesuvesiä vastaava määrä vettä poistaa prosessista. Haihdutus soveltuu tähän tarkoitukseen, mutta on ongelmallinen monessakin mielessä. Paras ratkaisu olisi miettiä vesitase siten, ettei haihdutusta tarvita.

- Haihdutus on kallis rakentaa ja käyttää.
- PCC saostusprosessi toimii huoneen lämpötilassa, joten haihdutusta varten täytyy liuos lämmittää tai käyttää alipainetta.

- Haihdutuksen jälkeen liuos olisi jäähdytettävä sillä liuoksen haihduttaminen kuiviin ja kiteyttäminen on yleensä kalliimpaa kuin haihduttaminen, koska se vaatii lisää laitteita.
- Puhallinhaihdutin voisi olla halvempi ja kustannustehokkaampi vaihtoehto kuin nyt laskennassa käytetty vaihtoehto.

Mallinnuksessa haihdutus laitettiin extractor vaiheen yhteyteen, vaikka todellisuudessa haihdutettava liuos tulisi PCC saostuksesta, sillä se ei sisällä enää liuennutta ammoniakkia. Haihdutuslaitteena käytettiin kolmivaiheista haihdutinta. Liuosten lämmityksiä ja jäähdytyksiä ei huomioitu mallinnuksessa.

Veden haihdutustarve oli 19.2 t/h, jolloin höyryä tarvittiin haihdutukseen 6.4 t/h.

2.9. RO yksikkö (käänteisosmoosi)

RO yksikkö on lisätty prosessiin, koska siinä on paljon pesuvaiheita. Näistä tulevissa liuoksissa ei ole kovin korkea suolapitoisuus, joten käänteisosmoosi voisi olla toimiva ratkaisu poistaa pääosa pesuista tulevasta vedestä. Toki pesuvesiä kierrättämällä päästäisiin osasta pesuvesiä eroon.

Tämäkään prosessivaihe ei ole ongelmaton, sillä kalvoille ei saa saostua mitään käytön aikana. Kipsi on yksi pahimmista kalvoja tukkivista aineista, sillä sitä ei saa pestyä pois kalvosta, kun se kerran on siihen saostunut. Tämä voi olla myös este käänteisosmoosin käyttämiseksi tässä prosessissa, sillä kalsiumpitoisuudet ovat korkeita kaikissa liuoksissa. Jos sulfaattia joutuu liuokseen esim. savukaasuista tai kuonasta, tulee liuos olemaan kylläistä kipsin suhteen. Tämä johtaa kipsin saostumiseen käänteisosmoosilaitteessa ja kalvot tukkeutuvat hyvin nopeasti. Myöskään kuonan suodatuksen pesuveden ohjaaminen tähän laitteeseen ei luultavasti onnistu, sillä se sisältää liuennutta ammoniakkia.

Oletettiin, että käänteisosmoosilla pystytään konsentroimaan suolapitoisuus 60 g/l.

3. Prosessin vesitase

Sakkojen pesusta johtuen prosessiin tulee ylimääräistä vettä. Vesitaseen hallinta puolestaan aiheuttaa tässä prosessissa suuria kustannuksia, ja sen vuoksi on siitä tehty yhteenveto taulukkoon 2. Tästä nähdään, mitkä prosessivaiheet tuovat vettä ja mitkä sitä kuluttavat.

Taulukko 2. Prosessin vesitase.

| Vesitase | Syöttö | Ulostulo | Erotus |
|--|------------------|------------------|------------------|
| Kuona (Pesuvesi ei ole mukana) | 2.78 t/h | 1.46 t/h | 1.32 t/h |
| PCC (Pesuvesi - kosteus) | 5.04 t/h | 2.38 t/h | 2.66 t/h |
| CO ₂ pitoinen kaasu | 0.43 t/h | 0.58 t/h | -0.16 t/h |
| RO konsentraatti (suolapit. 60 g/l) | 10.05 t/h | | 10.05 t/h |
| NH ₃ talteenoton suolaliuos | 0.13 t/h | | 0.13 t/h |
| Haihdutus | | 14.83 t/h | -14.83 t/h |
| | | | |
| Kokonaistase | 18.43 t/h | 19.25 t/h | -0.83 t/h |

Ero syötön ja ulostulon välillä kokonaistaseessa johtuu reaktioista.

4. Investointi- ja käyttöhyödykekestä

Investointi- ja käyttöhyödykekestä laskettiin hyvin karkealla tasolla, ja tulos on vain suuntaa-antava. Käyttöhyödykekestästä pitää huomata, että kyseessä ei ole käyttökästä, sillä kustannuksista puuttuu ainakin työvoiman ja huollon kustannukset. Investointikästä on laskettu vain pääprosessilaitteiden perusteella. Siinä täytyy huomioida, ettei esim. lähtömaterialien ja tuotteiden käsittelyä tai välisäiliöitä ole huomioitu laskelmassa. Laskelmat ovat kuitenkin kohtuullisen tarkat ottaen huomioon, missä vaiheessa prosessin tuotekehitys tällä hetkellä on menossa.

4.1. Investointikästä

Investointikästä on laskettu kappaleessa 2 esitetyle prosessille, ja eri muuttujien vaikutusta investointiin on tarkasteltu kappaleessa 5. Investointikästä on laskettu päälaitteille, ja kokonaisinvestointikästä on saatu olettamalla päälaitteiden edustavan 34% kokonaisinvestoinnista. Loppu 66% sisältää mm. maanrakennuksen, putkistot, automaation, rakennukset, yms. Poikkeuksena on haihdutus ja RO yksikkö, sillä ne ovat erikseen ostettavia paketteja, jotka sisältävät enemmän kuin vain päälaitteen. Myös suodattimet sisältävät huomattavan määrän muita laitteita, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi näillekin on käytetty samaa prosentiosuutta kuin muille laitteille.

Taulukossa 3 on esitetty investointikästä. Kallein laitekokonaisuus on suodattimet. PCC suodatuksessa on kaksi välipulppausta, joten suodatusvaiheita on kolme.

Taulukko 3. PPC saostusprosessin investointikästä. Kuonan jauhatuksen laitteet puuttuvat investointikästä.

| Investointikästä | | |
|--|-------------|-----------|
| Suodattimet | 14 | M€ |
| Reaktorit | 2 | M€ |
| Sakeutin | 0.5 | M€ |
| Kaasun pesuri | 0.5 | M€ |
| Kaasun jäädytys | 1 | M€ |
| NH ₃ poisto kaasuista | 0.5 | M€ |
| Laitekästä | 18.5 | M€ |
| RO yksikkö | 2.2 | M€ |
| Haihdutus | 2.3 | M€ |
| Kokonaisinvestointikästä (josta laitteet edustavat 34%) | 58.9 | M€ |

4.2. Käyttöhyödykekustannus

Käyttöhyödykekustannus on laskettu kappaleessa 2 esitetyle prosessille, ja eri muuttujien vaikutusta käyttöhyödykekustannuksiin on tarkasteltu kappaleessa 5. Käyttöhyödykekustannukset on arvioitu karkealla tasolla ja mm. sekoituksen ja pumppauksen sähkönkulutus puuttuu arviosta monien muiden asioiden lisäksi. Arvio on kuitenkin suuntaa-antava. Tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. PCC saostusprosessin käyttöhyödykekustannus.

| Käyttöhyödyke | t/h, MW | €/t, €/MWh | M€/a |
|---|------------|---------------|-------------|
| NH ₄ Cl | 0.06 | 650 | 0.31 |
| HCl (33%) | 0.11 | 250 | 0.22 |
| RO yksikön energiankulutus (1€/t syötettä) | 39.49 | 1 | 0.32 |
| Jauhatus 100 µm, MW (30 kWh/t kuonaa) | 0.75 | 60 | 0.36 |
| Jäähdytys carbonator reaktorissa (pidetään 25°C), MW | 2.31 | 20 * | 0.37 |
| Carbonator reaktoriin johdettavien kaasujen jäähdytys, MW | 1.54 | 20 * | 0.25 |
| Haihdutus (höyryn kulutus, 3 vaiheinen haihdutin) | 4.94 | 30 | 1.19 |
| Yhteensä | | | 3.01 |
| Tuotot PCC:stä | | | |
| CaCO ₃ | 10.08 | 100 | 8.06 |

* Jäähdytyksen yksikköhinnan arviointi on haastavaa sillä 25°C:een pääseminen pelkkää jäähdytysvettä käyttäen toimii vain joissain olosuhteissa. Toisaalta sähkön hinnan (60 €/MWh) käyttäminen tässä yhteydessä olisi yliarviointia sillä tuohon todennäköisesti löytyy halvempikin vaihtoehto. Käytetty 20 €/MWh on arvio näiden kahden vaihtoehdon välistä.

5. Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysi tehtiin koska monille lähtötiedoille ei löytynyt kokeellista vahvistusta tai lähtötiedot näyttivät aiheuttavan huomattavia kustannuksia. Tavoitteena on antaa hintalappu erilaisille ratkaisuille, jolloin voidaan katsoa, onko esim. matalampi lämpötila ja parempi saanti carbonator reaktorissa tuotoltaan edullisempi vaihtoehto kuin korkeampi lämpötila ja huonompi saanti. Tämä tarkastelu on pelkästään suuntaa-antava, eikä tarkkuus ole kovin hyvä. Sen tarkoituksena on kuitenkin herättää keskustelua ja ajatuksia siitä voitaisiinko prosessiolosuhteita muuttaa ”halvempaan” suuntaan, vaikka laboratoriokokeissa olisikin jo löytynyt ”paras” olosuhde kemiallisten reaktioiden etenemisen kannalta.

5.1. PCC kosteus 30%

PCC kosteus perustapauksessa on 20%, ja nyt se nostettiin 30%:iin. Investointi- ja käyttöhyödykekustannukseen tällä ei ollut merkitystä sillä kosteuden mukana kulkeutuva suolan määrä ei ole kovin iso ja ensimmäisen suodattimen pesuvesi syötetään suoraan extractor vaiheeseen. PCC kloridipitoisuuteen tällä puolestaan oli merkitystä, se kasvoi 14.7 ppm → 56.6 ppm. Eli kloridin määrän pienentämiseksi pitäisi joko pesu- tai pulppausvesimääriä kasvattaa tai lisätä prosessiin uusi pulppaus- ja suodatusvaihe. Molemmat toimenpiteet vaikuttavat kustannuksiin.

5.2. Carbonator yksikön lämpötila 15°C

Carbonator yksikön lämpötila on perustapauksessa 25°C ja kaasu yksikköön tulee 20°C lämpötilassa. Liuokset tulevat 25°C lämpötilassa. Nyt muutettiin kaasun sisääntulolämpötila 20°C → 15°C ja carbonator yksikön lämpötila 25°C → 15°C. Sisääntulevan liuoksen lämpötilan annettiin olla 25°C. Kustannukset muuttuivat seuraavasti:

- Carbonator reaktorin jäähdytys: 2.31 MW (0.37 M€/a) → 4.24 MW (0.68 M€/a)
- Kaasun jäähdytys: 1.54 MW (0.25 M€/a) → 1.67 MW (0.27 M€/a)

Eli käyttökustannus nousi 0.33 M€/a. Tässä täytyy kuitenkin huomata, että energian hintana on käytetty 20 €/MW. Kun lämpötila pyritään saamaan noinkin alas kuin 15°C, on kuitenkin todennäköistä, että joudutaan käyttämään jäähdytykseen lämpöpumppuja, jolloin energian hintana pitäisi käyttää sähkön hintaa, ja investointi on huomattavasti suurempi.

5.3. Extractor vaiheen kiintoainepitoisuus 50 g/l

Extractor vaiheessa kiintoainepitoisuus on 100 g/l, ja nyt laskettiin, miten kiintoainepitoisuuden vähentäminen vaikuttaa kustannuksiin. Tulos oli hieman yllättävä sillä käyttöhyödykekustannukset pienenevät 0.18 M€/a johtuen haihdutuksen tarpeen pienentymisestä. Liuosvirtaus kuitenkin kaksinkertaistui, joten näin saatava säästö menisi moninkertaisesti pumppujen ja tarvittavien uusien reaktorien sekoituksen sähkönkulutuksen kasvuun.

Investointikustannus puolestaan kasvaisi päälaitteiden osalta n. 2.5 M€ eli kokonaisinvestointi n. 7.4 M€. Muutos oli yllättävän pieni, mutta tässä täytyy huomioida, ettei välisäiliöitä tai pumppuja ole mukana arviossa.

5.4. Kaasunpesun jälkeinen lämpötila 60°C

Kaasunpesun jälkeisenä lämpötilana käytettiin 50°C. Tämä voi olla kuitenkin hieman optimistinen arvio siitä, miten alas lämpötilassa päästään. Jos kaasunpesun jälkeinen lämpötila on 60°C on sillä vaikutusta kaasun jäähdytyksen energiantarpeeseen, joka kasvaa 1.5 MW → 2.6 MW. Samoin kasvaa jäähdytyksen kustannus 0.25 M€/a → 0.42 M€/a. Myös investointi kasvaisi, mutta tarkastelua varten ei saatu laitehintaa kaasun jäähdytyslaitteistolle, joten sitä ei voida tässä yhteydessä laskea.

5.5. Prosessi ilman RO yksikköä

Prosessille laskettiin myös vaihtoehto ilman RO yksikköä. RO yksikköön tulevista vesistä extractor vaiheen pesuvesi ohjattiin takaisin extractor vaiheeseen ja muut menivät jäteveden puhdistukseen. Tulosten perusteella RO yksikkö kannattaa jättää pois prosessista, koska ammonium pystytään erittäin todennäköisesti poistamaan jätevesistä riittävän hyvin. Kustannusero voi muuttua, jos PCC kakun kosteus onkin selvästi suurempi kuin 20%, sillä silloin ammoniumkloridia tulee enemmän toiseen pesuvaiheeseen. Luultavasti tästä huolimatta RO yksikköä ei kannata prosessiin laittaa.

Käyttöhyödykekustannus pysyi yhtä suurena. Tässä ei ole otettu huomioon jätevesien puhdistuksen suurempia kustannuksia. Alla on esitetty muutokset:

| | |
|---------------------------------|--|
| NH ₄ Cl tuoresyöttö: | 0.31 M€/a (0.06 t/h) → 0.7 M€/a (0.14 t/h) |
| Haihdutus: | 1.19 M€/a → 1.08 M€/a |
| RO yksikkö: | 0.32 M€/a → 0 M€/a |
| Yhteensä: | 3.01 M€/a → 2.97 M€/a |

Kokonaisinvestointikustannus pienenee 2.4 M€. Tässä ei ole otettu huomioon suurempaa investointitarvetta jätevesien puhdistukseen.

5.6. Prosessi ilman haihdutusta

Tässä vaihtoehdossa RO yksikkö jätetään pois ja lähes kaikki suodattimien pesuvedet ohjataan ulos prosessista. PCC ensimmäisen suodatusvaiheen pesuvettä lisätään prosessiin pieni määrä korvaamaan kiintoaineiden mukana poistuvaa vettä. Muutos johti NH₄Cl tuoresyötön lisääntymiseen ja investoinnin pienenemiseen. Tuoresyötön verran salmiakkia joutuu jätevesien mukana pois prosessista, joten jätevesien puhdistukseen tulisi investoida enemmän kuin perusprosessissa. Jätevesien käsittelyä ei ole huomioitu näissä laskelmissa. Muutoksen vaikutus käyttöhyödykekustannuksiin on seuraava:

| | |
|---------------------------------|---|
| NH ₄ Cl tuoresyöttö: | 0.31 M€/a (0.06 t/h) → 3.34 M€/a (0.66 t/h) |
| Haihdutus: | 1.19 M€/a → 0 M€/a |
| RO yksikkö: | 0.32 M€/a → 0 M€/a |
| Yhteensä: | 3.01 M€/a → 4.53 M€/a |

Kokonaisinvestointikustannus laski haihdutuksen verran eli 58.9 M€ → 56.6 M€.

Haihdutus näyttää olevan kustannustehokkaampi tapa hoitaa prosessin vesitasetta kuin liuosten syöttäminen jätevedenpuhdistukseen. Tämäkin vaihtoehto on mielenkiintoinen sillä tästä näkee miten iso määrä salmiakkia menee pois prosessista pesuvesien mukana. Salmiakkin hinnan pitäisi olla puolet nyt käytetystä tai puolet salmiakista pitäisi saada talteen jätevesistä, jotta tämä vaihtoehto olisi kannattavampi.

5.7. Prosessi ilman savukaasujen jäähdytystä

Prosessissa savukaasut ensin pestään ja sitten jäähdytetään. Jäähdytysvaihe saattaa tuntua turhalta, sillä voisihan jäähdytyksen hoitaa carbonator vaiheessakin. Tämän vuoksi laskettiin myös vaihtoehto, jossa 50°C savukaasu johdetaan kaasun pesusta suoraan carbonator vaiheeseen. Tulos olikin yllättävä sillä käyttökustannus nousi vain 0.1 M€/a ja investointikustannus laskisi n. 2 M€. Alla on käyttöhyödykekustannuksen muutokset:

| | |
|-------------------------------|---|
| Carbonator vaiheen jäähdytys: | 2.31 MW (0.37 M€/a) → 3.55 MW (0.57 M€/a) |
| Haihdutus: | 1.19 M€/a → 1.33 M€/a |
| Savukaasujen jäähdytys: | 1.54 MW (0.25 M€/a) → 0 MW |

Savukaasujen jäähditys näyttääkin olevan ylimääräinen prosessivaihe, jos carbonator reaktorin jäähdytystarve pystytään toteuttamaan. Tähänkin tosin on useita ratkaisuvaihtoehtoja, sillä voidaanhan vaiheeseen syötettävää liuosta esijäähdyttää. Tosin jäähdityksen osalta eksotermisen reaktiovaiheen pitäminen 25°C voi osoittautua hyvin haastavaksi, jos vaiheeseen johdettavat savukaasut ovat lämpimiä ja jäähdytystarve on suuri. Tältä osin laskelma ei ole kovin tarkka, sillä jäähdityksen hintana on pidetty 20 €/MW ja se käyttääkö jäähdityslaitteisto jäähditysvettä vai jäähdytetäänkö lämpöpumpuilla vaikuttaa jäähdityksen hintaan. Vasta kun tiedetään tarkemmin mahdolliset laiteratkaisut savukaasujen jäähdityksessä ja carbonator reaktorissa, voidaan sanoa, onko savukaasujen jäähditys taloudellista jättää pois.

6. Tutkimustulosten vaikutus ympäristöön

Tässä prosessissa tarkoituksena on tuottaa PCC:tä terästehtaan sivuvirroista, joita ei muuten pystytä hyödyntämään. Tutkimus on vielä alussa, mutta toimiessaan prosessi sitoisi tehtaan hiilidioksidipäästöjä karbonaattiin, joka olisi myytävä tuote.

7. Johtopäätökset

PCC saostusprosessi käyttäen terästehtaan kuonaa ja savukaasujen hiilidioksidia lähtömateriaalina näyttää mielenkiintoiselta, ja sitä kannattaa tutkia pidemmälle. Prosessin saaminen taloudellisesti kannattavaksi näyttää kuitenkin haastavalta. Nyt tehdyt investointi- ja käyttöhyödykekustannusarviot eivät näytä rohkaisevilta, mutta täytyy muistaa, ettei prosessia ole aiemmin mietitty kokonaisuutena. Myös osassa prosessivaiheita tutkimustietoa on ollut vain vähän käytettävissä. Alla on esitetty yhteenveto kustannuksista ja tuotoista.

- Kokonaisinvestointikustannus: 59 M€
- Käyttöhyödykekustannus: 3 M€/a
- PCC myyntitulo: 8 M€/a

Kustannukset on laskettu hyvin karkealla tasolla. Investointikustannuksesta puuttuu esim. jauhatuksen laitteet, välisäiliöt, pumput, lähtömateriaalien ja tuotteiden käsittelylaitteet, yms. Suodatinten hinta on luultavasti arvioitu kokonaisinvestoinnissa liian korkeaksi. Käyttöhyödykekustannukseen pitää lisätä mm. työvoimakulut, huollot, laitteiden sähkönkulutus, yms. Takaisinmaksuajat nousevat tuollaisella investoinnilla ja tuotto – tulosuhteella hyvin pitkiksi. Viiden prosentin sisäisellä korolla takaisinmaksuajat ovat seuraavat:

- 5 M€ vuosituotolla takaisinmaksuaika on 18 vuotta
- 4 M€ vuosituotolla takaisinmaksuaika on 27 vuotta
- 3.5 M€ vuosituotolla takaisinmaksuaika on 38 vuotta

Jotta prosessista saataisiin kannattava, pitää investointia saada pienemmäksi. Jatkotoimenpiteissä on esitetty tärkeimmät tarkasteltavat asiat eli PCC:n suodatus ja pesu sekä käytettävien prosessilaitteiden yksityiskohtainen miettiminen. Myös prosessivaiheita, kuten RO yksikkö, voidaan poistaa nyt lasketusta prosessista.

Käyttökustannusten puolella suurin yksittäinen kustannus 40% osuudella on haihdutus. Tähän pystytään vaikuttamaan miettimällä prosessin vesitasetta uudestaan. Esim. pesuvesimääriä voi olla mahdollista pienentää, jolloin veden syöttö prosessiin pienenee. Samalla menetetään osa NH_4Cl liuoksesta kiintoaineisiin jääneenä kosteutena. Tässä tarkastelussa täytyy tietää, miten paljon klorideja sallitaan loppusakassa.

Yhteenvedona voidaan todeta prosessin vaativan lisää työtä, jotta se saataisiin taloudellisesti kannattavaksi. Tämän tarkastelun pohjalta ei prosessia kuitenkaan voida todeta kannattamattomaksi, sillä pienillä muutoksilla voidaan vaikuttaa kustannuksiin huomattavastikin. Myös mallinnuksessa on tehty lukuisia oletuksia, joten laskelma ei välttämättä kuvaa todellisuutta tarkasti. Oletukset on toisaalta tehty mahdollisimman realistisiksi, eli niihin ei ole lisätty mitään varmuuden vuoksi, joten kustannukset saattavat myös osoittautua alakanttiin arvioituiksi.

8. Jatkoimenpiteet

Jatkotoimenpiteitä on esitetty raportissa johdannosta lähtien, ja niitä löytyy lähes jokaisesta prosessilaitteesta. Tähän on kerätty keskeisimmät jatkotoimenpide-ehdotukset prosessin kustannusten kannalta.

- PCC suodatusarvot mukaan lukien kakun kosteus pitäisi selvittää. PCC suodattimet ovat ehdottomasti suurin yksittäinen investointi prosessissa. Olisi myös harkitseminen arvoista saostaa sellaista PCC:tä, josta NH_4Cl :n peseminen onnistuu helpommin, vaikka tuotteesta saatava hinta laskisikin. Pesun helpottaminen vaatisi luultavasti suurempaa kidekokoa.
- PCC puhtausvaatimus (kloridipitoisuus) on myös erittäin tärkeä selvittää. Nyt kloridipitoisuus saa olla korkeintaan 30 ppm, ja tästä johtuen puhdistukseen tarvitaan kolme suodatusvaihetta. Mikäli karbonaattiin sallitaan enemmän klorideja, voisi suodatusvaiheita vähentää.
- Pitäisi suunnitella, millaisilla prosessilaitteilla halutut olosuhteet saavutetaan. Tämä pitäisi tehdä kaikille kappaleessa 2 esitetyille prosessivaiheille. Tällöin prosessin hinnoittelusta saadaan huomattavasti tarkempi, ja myös eri vaihtoehtojen laskeminen helpottuu.
- Haihdutus on selkeästi suurin käyttöhyödykekustannus. Prosessin vesitasetta pitää tarkastella kriittisesti ja miettiä, missä kohdin voitaisiin vettä säästää. Myös muut keinot saada vettä pois prosessista pitää katsoa läpi.