

Uusiutuvalla sähköenergialla tuotettujen hiilidioksidivirtojen pilotkokoluokan liikutettavan paineistus- ja puhdistuslaitteen suunnittelu ja toteutus

Jyri Nissinen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2021
Tekniikan ala
Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä(t) Nissinen, Jyri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2021
	Sivumäärä 30	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi Uusiutuvalla sähköenergialla tuotettujen hiilidioksidivirtojen pilotkokoluokan liikutettavan paineistus- ja puhdistuslaitteen suunnittelu ja toteutus		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kari Hytönen & Antti Henell		
Toimeksiantaja(t) Reteres Oy, VTT Oy		
Tiivistelmä <p>Ihmisten ympäristötietoisuuden kasvaessa, on yritysten ollut pakko alkaa reagoimaan ihmisten ympäristövaatimuksiin. Ihmiset eivät enää halua ostaa tuotteita, joiden tiedetään aiheuttavan ympäristöpäästöjä tai tuotteen valmistuksessa käytetään fossiilisia menetelmiä. Sementtiteollisuus, jonka hiilidioksidi päästöt ovat noin 7 % koko maailman hiilidioksidipäästöistä on alkanut reagoimaan asiaan. VTT tutkii, voidaanko sementtiä valmistaa ympäristöystävällisemmin, sekä voidaanko kalkkipoltossa syntyvä hiilidioksidi ottaa talteen.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksen oli tuottaa suunnitelma, jonka avulla voidaan toteuttaa hiilidioksidin puhdistus- ja paineistuslaite. Suunnitelman tarkoituksena oli kartoittaa mahdolliset laitteet, joilla kokonaisuus on toteutettavissa. Laitteiston rakentamista ja kokeilua ei ole työssä käsitelty, koronasta johtuneiden laitteiden toimitusten viivästymisien takia.</p> <p>Suoritustapana työllä oli kehittämistutkimus, jossa esiintyi kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia ominaisuuksia. Laitteiston mitoittamisessa hyödynnettiin kalkkiuunin suunnittelu arvoja, koska mitattavia arvoja ei vielä ollut saatavilla. Laitteistoa suunniteltiin yhteistyössä VTT:n henkilökunnan, sekä laitetoimittajien kanssa.</p> <p>Työn tuloksena syntyi hiilidioksidin paineistus- ja puhdistuslaitetta kuvaava PI-kaavio. Kaaviosta käy hyvin ilmi laitteiston vaatimat komponentit, sekä niiden sijainti. PI-kaavion mukaan määriteltiin kustannusarvio, jota voitiin käyttää kustannuslaskelmissa, sekä rahoitushakemuksissa. Työn aikana syntyi kehitysehdotuksia, joita otetaan varmasti tulevaisuudessa huomioon.</p>		
Avainsanat (asiasanat) hiilidioksidi, hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, hiilineutraalius, kalkkiuuni		
Muut tiedot Liitteet 1 ja 2 ovat salassa pidettäviä, jotka on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassa pitoaika viisi (5) vuotta, salassapito päättyy 30.5.2026.		

Author(s) Nissinen, Jyri	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2021 Language of publication: Finnish
	Number of pages 30	Permission for web publication: x
Title of publication Design and implementation of a pilot-scale mobile pressure and purification device for carbon dioxide streams produced by renewable electricity		
Degree programme Bachelor's Degree Programme in Energy and Environmental Technology		
Supervisor(s) Hytönen, Kari & Henell, Antti		
Assigned by Reteres Oy, VTT Oy		
Abstract <p>As people's environmental awareness grows, companies have been forced to start responding to people's environmental demands. People no longer want to buy products that are known to cause environmental problems or that are made by using fossil methods. The cement industry, which emits about 7% of the world's CO₂ has begun to react. VTT is investigating whether cement can be produced more environmentally friendly and whether the carbon dioxide generated by lime kiln can be recovered.</p> <p>The purpose of the work was to produce a plan that could be used to implement a carbon dioxide purification and pressurization device. The purpose of the plan was to determine possible devices with which they can be implemented. The construction and testing of the equipment have not been discussed in the work, due to delays in the delivery of equipment caused by the covid-19.</p> <p>The way of doing the work was developmental research which showed qualitative and quantitative characteristics. The design values of the lime kiln were utilized in the dimensioning of the equipment as measurable values were not yet available. The equipment was designed in co-operation with VTT staff and equipment suppliers.</p> <p>The result of the work was the PI diagram describing a carbon dioxide pressurization and purification device. The diagram well shows the hardware required for the component, as well as their location. According to the PI diagram, a cost estimate was defined that could be used in cost calculations as well as in funding applications. During the work development proposals emerged, which will certainly be considered in the future.</p>		
Keywords/tags (subjects) Carbon dioxide, carbon capture and storage, carbon neutral, lime kiln		
Miscellaneous (Confidential information) Appendixes 1 and 2 are confidential and they have been removed from the public thesis. Grounds for secrecy: Act on the Openness of Government Activities 621/1991, Section 24, 17: Business or professional secret. Period of secrecy is five years and it ends 30.5.2026		

Sisältö

Termit ja lyhenteet	3
1 Johdanto	4
1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet	4
1.2 Tutkimusasetelma ja rajaus	6
2 Toimeksiantajat.....	6
2.1 Reteres Oy	6
2.2 Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy.....	7
3 Hiilidioksidi.....	7
4 Hiilidioksidin talteenotto, varastointi ja hyödyntäminen	8
4.1 Hiilidioksidin talteenotto	8
4.1.1 Hiilidioksidi sähköntuotannosta	9
4.1.2 Hiilidioksidi teollisuuden prosesseista	9
4.1.3 Ilmasta kaappaaminen (DAC).....	10
4.2 Hiilidioksidin varastointi	11
4.3 Hiilidioksidin hyödyntäminen (CCU).....	12
5 Kalkinpoltto.....	12
5.1 Kalkkiuuni.....	13
6 Hiilidioksidin puhdistus, kompressointi ja varastointi	13
6.1 Puhdistuslaitteet.....	13
6.2 Prosessiarvojen mittaaminen	16
6.3 Kompessorit	16
6.4 Putkistomateriaalit	17
6.5 Hiilidioksidi pullot ja säiliöt.....	18
7 Turvallisuus	19
7.1 Painelaitelaki.....	19
7.2 Varolaitteet.....	20
8 Järjestelmän suunnittelu ja mitoitus	21
8.1 Lähtötiedot	21
8.2 Hiilidioksidin jäähdytys	22
9 Kustannusarvio.....	22
10 Tulokset	23
11 Pohdinta.....	25
11.1 Jatkotutkimustarve	25
12 Lähteet.....	26
Liitteet.....	29

Liite 1. Kustannusarvio	29
Liite 2. PI-kaavio	30

Kuviot

Kuvio 1. Hiilidioksidin talteen ottamisen lähestymistavat.....	9
Kuvio 2. "Pii"-merkki.....	18
Kuvio 3. UN-merkintä	19
Kuvio 4. Kalkkiuuni	21
Kuvio 5. Hiilidioksidin faasidiagrammi	23

Termit ja lyhenteet

bar	Paineen yksikkö
barL	Baarilitra yksikkö, jota käytetään painelaite määrittelyssä
CCU	Carbon Capture and Utilization, Hiilidioksidin kaappaaminen ja hyödyntäminen
CCS	Carbon Capture and Storage, hiilidioksidin kaappaaminen ja varastointi
CO₂	Hiilidioksidi
CSI	Cement Sustainability Initiative, Sementin tuotannon kestävän kehityksen aloite
DAC	Direct Air Capture, hiilidioksidin kaappaaminen suoraan ilmasta
DN	Standardi mittainen putkikoko
IEA	International Energy Agency, Kansainvälinen energiajärjestö
Nm³	Normikuutio, eli normaaliolosuhteissa 20°C ja normaali ilmanpaineessa
PI-kaavio	Prosessin instrumentointi kaavio
ppm	Suhdeluku, joka kertoo miljoonasosien määrän
FTIR mittaus	Infrapunavalon avulla tehtävä mittaus, jolla tunnistetaan kaasujen pitoisuuksia

1 Johdanto

Yritysten sekä tavallisten kuluttajien ympäristötietoisuuden kasvaessa, on jatkuvasti kehitettävä ympäristöystävällisempiä toimintatapoja. Pariisin ilmastopöytäkirjaan liittyneet melkein kaikki maat maailmassa. Pariisin ilmastopöytäkirjan tavoitteena on pysäyttää ilmastonlämpeneminen 1,5 asteeseen.

Sementtiteollisuus globaalisti tuottaa noin 7 % kaikista hiilidioksidipäästöistä ja on kolmanneksi suurin energiankuluttaja teollisuudenaloista. Cement Sustainability Initiativen (CSI) jäsenet ovatkin jo pitkään pyrkineet vähentämään hiilidioksidipäästöjä, sekä vähentämään energiankulutusta julkistamalla kulutus- ja päästötiedot. (Technology Roadmap, Low-Carbon Transition on the Cement Industry 2018.) CSI:n tarkoituksena on kartoittaa sementtiteollisuuden kestävä kehityksen edellytykset, sekä yrittää saada sementtiteollisuuden toimijat sitoutumaan tekemään asioita ilmaston hyväksi.

Suomessa sementtiteollisuuden tuottamat hiilidioksidipäästöt olivat noin 1 miljoonaa tonnia Suomen kaikista 80 miljoonan tonnin vuosipäästöistä. Vuonna 2013 sementtiteollisuuden osuus Suomen kaikista kasvihuonepäästöistä oli 1,28 %. (Sementti ja kasvihuonepäästöt n.d.) Suomen hiilidioksidipäästöt eivät ole globaalisti kovin suuret, mutta Suomessa olevan teknologiaosaamisen avulla voidaan kehittää ympäristöystävällisempiä tuotantomuotoja ja näin pienentää teollisuuden hiilijalanjälkeä globaalisti. Opinnäytetyön toimeksiantajayrityksellä VTT Oy:llä onkin tehty tutkimustyötä pitkään teollisuuden päästöjen vähentämiseksi. Opinnäytetyössä tutkittiin, kuinka sementtiteollisuuden tuottama hiilidioksidi saataisiin otettua talteen.

1.1 Opinnäytetyön tausta ja tavoitteet

Sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2013 Suomessa 1,28 % kaikista Suomen päästöistä. (Sementti ja kasvihuonepäästöt n.d.) Sementtiteollisuudessa käytetään pääosin fossiilisia polttoaineita kalkkiunien

lämmittämiseen. Kalkin poltossa tarvittavat lämpötilat ovat korkeita, jolloin energiankulutus ja päästötkin ovat suuret.

VTT:llä onkin käynnissä tutkimushanke, jossa tutkitaan, voidaanko kalkinpolttoa tehdä uusiutuvia energiavirtoja hyödyntäen. Hankkeessa kalkkiuuni lämmitetään uusiutuvasti tuotetulla sähköllä, sekä kalkinpoltoissa syntyvä hiilidioksidi otetaan talteen jatkokäyttöä varten. Näin hiilidioksidi, joka on aikaisemmin päästetty päästöinä ilmaan, saadaan kiertotalouden periaatteiden mukaan tuotteistettua.

Hiilidioksidista voidaan tuottaa esimerkiksi hiilivetyjä, kun uusiutuvasti tuotettua sähköä tulee markkinoille suuria määriä. Uusiutuvien sähköntuotantolaitosten lisääntyessä markkinoilla sähkönhinta laskee. Halpa sähkönhinta mahdollistaa esimerkiksi sähkön käyttämisen sementtiteollisuuden kalkkiuuneissa.

Mikäli kalkkiuuneista otettaisiin hiilidioksidi talteen, sementtiteollisuuden hiilidioksidipäästöt laskisivat huomattavasti. Tästä syntyikin opinnäytetyön tekemiselle hyvät edellytykset.

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella laitteisto hiilidioksidin talteen ottamiselle, sekä mitoittaa se sopivaksi pilotkokoluokan kalkkiuunille. Suunnitelma antoi edellytykset VTT:lle rakentaa toimiva laitteisto kalkkiuunin jatkeeksi. Laitteiston mahdollinen käyttö muissa tutkimuksissa ja prosesseissa otettiin huomioon sitä suunnitellessa.

Suunnittelussa oli tarkoitus ottaa huomioon mahdolliset ratkaisuvaihtoehdot hiilidioksidin talteen ottamiseksi, mitoittaa laitteisto pilotkokoluokkaan, määrittää laitteiston sijoitus, sekä suunnitella vaadittavat instrumentoinnit, putkistot sekä mahdolliset sähkökaapeloinnit. Hiilidioksidin talteen ottamiseksi tarvittavista pääkomponenteista laadittiin alustava kustannusarvio mahdollista kannattavuuden tarkastelua varten. Opinnäytetyöllä saavutetaan pilotkokoluokan malli, ympäristöystävällisestä tavasta kalkin polttamiseksi, hiilidioksidin talteenottoa hyödyntäen.

1.2 Tutkimusasetelma ja rajaus

Kehittämistutkimuksen tavoitteena on muutoksen aikaan saaminen, sekä sillä aikaan saatava tuotos. Kehittämistutkimus ei ole suoraan oma tutkimusmenetelmänsä, vaan siinä voidaan yhdistää kvalitatiivista ja kvantitatiivista tutkimusta, tai pelkästään kvalitatiivista tutkimusta. (Kananen 2012, 19)

Tässä opinnäytetyössä hyödynnettiin kvantitatiivista, sekä kvalitatiivista otetta. Opinnäytetyö oli kehittämistutkimus, jossa selvitettiin millä tavalla hiilidioksidi saadaan talteenotettua ja varastoitua. Kvantitatiivista tutkimusotetta käytettiin paineistusaseman suunnittelussa ja mitoituksessa. Kvalitatiivista otetta lähtötietojen, sekä aseman paikan suunnittelussa.

Opinnäytetyölle asetettiin tutkimuskysymykset, joihin haettiin vastauksia:

- Millainen on jäähdytyksen tarve kompressoinnin jälkeen?
- Millaiset vaatimukset ovat tuotteistetulle hiilidioksidille?
- Mitä turvallisuusvaatimuksia suuri hiilidioksidin paine asettaa paineistusaseman suunnittelulle?

Kehittämistyö rajattiin koskemaan pelkästään paineistusasemaa, eikä siinä otettu huomioon koko hiilidioksidin kiertokulkua kalkkiuunilta jatkotutkimuksiin.

2 Toimeksiantajat

2.1 Reteres Oy

Opinnäytetyöntekijän työnantajana toimi Reteres Oy ja toimeksiantajana Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Reteres Oy on spin-off yhtiö VTT:stä, joka on perustettu vuonna 2014. Reteres Oy tarjoaa henkilöresursseja energia- ja metsäteollisuuden tutkimus ja kehitystoiminnan tueksi. (Reteres OY n.d.)

Vuonna 2020 Reteresin liikevaihto oli 803 000 euroa, kasvua edelliseen vuoteen nähden oli 9 %. Yritys työllisti 9 (+1) henkilöä vuonna 2020. Reteresin toimitusjohtajana toimii Antti Tourunen. (Asiakastieto n.d.)

2.2 Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

Teknologian Tutkimuskeskus VTT Oy toimi toimeksiantajana opinnäytetyössä. VTT on Suomen valtion omistama yksi johtavista tutkimuslaitoksista, joka on perustettu vuonna 1942. VTT:n tehtävä on edistää tutkimuksen ja teknologian hyödyntämistä kaupallisesti ja yhteiskunnassa. Tutkimustoimintaa ohjaavat strategiset arvot: tulevaisuuden ilmasto, resurssien riittävyys, hyvä elämä, kokonaisturvallisuus ja teollisuuden uudistaminen. (VTT n.d.)

Vuonna 2019 VTT:n liikevaihto oli 147 miljoonaa euroa ja liiketulos 2,3 miljoonaa euroa. VTT:n liikevaihdosta kertyi 53 prosenttia Suomesta ja 47 prosenttia ulkomailta. Samana vuonna yhtiö työllisti yhteensä 2083 henkilöä. Toimitusjohtajana VTT:llä toimii Antti Vasara. (Kauppalehti n.d.)

3 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi esiintyy vapaana kaasuna tai kiinteässä muodossa. Kiinteätä hiilidioksidia kutsutaan hiilidioksidijääksi. Kiinteä hiilidioksidi on todella kylmää (-78.5 °C), joten se voi aiheuttaa paljaalle iholle palovamman kaltaisia oireita. Kaasuna esiintyvä hiilidioksidi on lähes hajutonta ja ilmaa raskaampaa. (OVA-ohje: Hiilidioksidi, 2017.)

Hiilidioksidia säilytetään yleensä nesteeksi paineistettuna tai kaasun ja nesteen seoksena. Hiilidioksidin lämpötila säilöttynä on -56,6 ... +30,6 °C. Vuotaessaan säiliöstä hiilidioksidi muuttuu nesteestä kaasuksi ja osittain kiinteäksi lumenkaltaiseksi hiilihappojääksi. Yhdestä nestelitrasta hiilidioksidia saadaan noin 440 litraa kaasumaista hiilidioksidia. (OVA-ohje: Hiilidioksidi, 2017.)

Hiilidioksidikaasu on inerttiä, se ei ole syttyvää eikä ylläpidä palamista. Tulipalossa kuumentuva hiilidioksidisäiliö voi kuitenkin revetä ja aiheuttaa räjähdysten. Voimakkaiden emästen ja alkalimetallien kanssa hiilidioksidi reagoi voimakkaasti ja voi aiheuttaa palo- ja räjähdysvaaran. (OVA-ohje: Hiilidioksidi, 2017.)

Hiilidioksidilla on monia käyttökohteita niin teollisuudessa kuin lääketieteessä. Arkisia käyttökohteita ovat esimerkiksi, virvoitusjuomien ja oluiden hiilihapotukset, elintarvikkeiden suojakaasut. Teollisuuden käyttökohteita hiilidioksidille ovat mm. sellunvalmistuksessa massan pesun tehostaminen, mäntyöljyn valmistamisessa, hiilidioksidilannoituksessa kasvihuoneissa, sekä eläinten tainnutuksessa. Hiilidioksidia käytetään myös hapettumisensuojauksessa ja hitsauskaasuissa. Palojen ja räjähdysten ehkäisyssä hiilidioksidia käytetään sen inerttiytensä ansiosta. (OVA-ohje: Hiilidioksidi, 2017.)

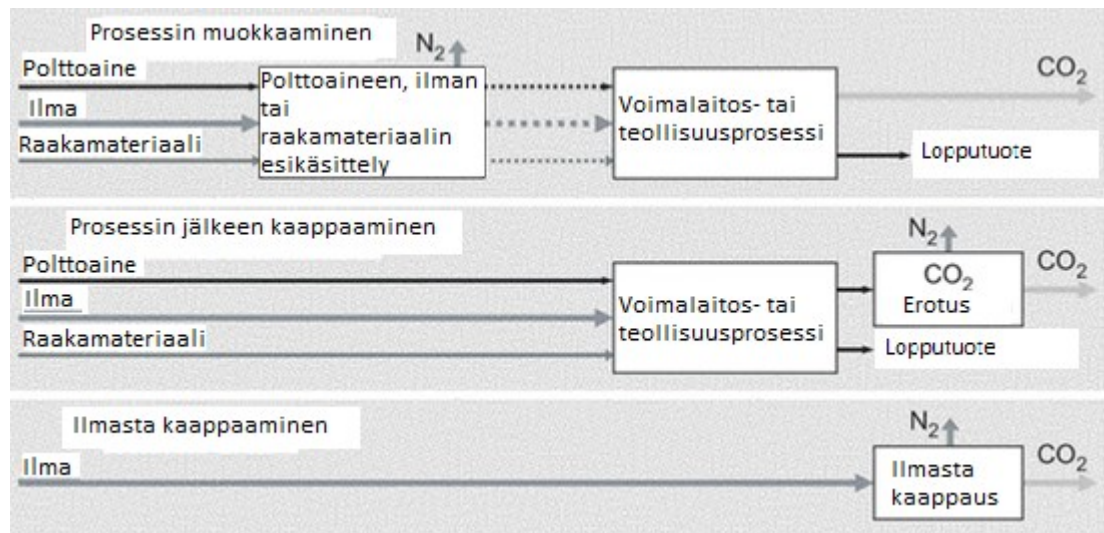
4 Hiilidioksidin talteenotto, varastointi ja hyödyntäminen

Seuraavissa kappaleissa kerrotaan hiilidioksidin talteenoton olemassa olevista periaatteista ja kehitteillä olevista tavoista kaapata hiilidioksidi.

4.1 Hiilidioksidin talteenotto

Hiilidioksidin talteenottamiseksi on olemassa kolme lähestymistapaa (ks. kuvio 1.):

- Puhtaan tai lähes puhtaan hiilidioksidivirran hyödyntäminen prosessista tai sellaisen virrantuottaminen olemassa olevasta prosessista (Happipoltto, kaasutinlaitokset / pyrolyysi)
- Erottaminen teollisuuden savukaasuista (ns. Piipunpääteknikka)
- Hiilidioksidin kaappaaminen suoraan ilmasta (DAC). (Rackely, Stephen 2010)



Kuvio 1. Hiilidioksidin talteen ottamisen lähestymistavat (Rackley ym. 2010, 19, muokattu).

4.1.1 Hiilidioksidi sähköntuotannosta

Hiilidioksidi voidaan kaapata prosessista, esimerkiksi kaasutinlaitoksessa tuotetusta kaasusta, voidaan erottaa hiilidioksidi ennen polttoa. Kaapattua hiilidioksidia voidaan käyttää osittain, vaikka kiertokaasuna ja loppu varastoida. (Rackley ym. 2010.)

Globaalissa mittakaavassa sähköntuotanto on yksi merkittävistä päästölähteistä. Tuotetusta sähköstä noin 75 % (2018) on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla tai biomassaa käyttämällä. (IEA 2019, 3.) Suomessa 2020 tuotettu sähkö oli 85-prosenttisesti hiilidioksidivapaata. (Energiateollisuus, 2021.) Hiilidioksidipitoisuus polttoprosesseissa vaihtelee 3 – 15 % välillä riippuen käytetystä polttoaineesta. Pienemmät pitoisuudet tulevat kaasunpoltosta ja suurimmat hiilidioksidipitoisuudet hiilenpoltosta. (Rackley ym. 2010.)

Hiilidioksidin talteenottoa voidaan parantaa esimerkiksi happipoltolla. Happipoltossa ilma korvataan puhtaalla hapella, jolloin palaminen tapahtuu puhtaammin. Savukaasuihin syntyvien epäpuhtauksien määrä pienenee, joka helpottaa talteenotettavan kaasun puhdistamista. (Rackley ym. 2010.)

4.1.2 Hiilidioksidi teollisuuden prosesseista

Niin kuin sähköntuotannossa, on teollisuudessakin osa-alueita, jotka tuottavat suuren osan hiilidioksidipäästöistä. Esimerkkejä tällaisista toimialoista on sementin ja

metallien valmistusprosessit. Osasta prosesseista olisi helposti pienillä muutoksilla mahdollista erottaa hiilidioksidi.

Sementin tuotannossa suurimmat päästöt aiheutuvat raaka-aineiden valmistuksesta ja kalsiumkarbonaatin ($CaCO_3$) polttamisesta kalsiumoksidiksi (CaO).

Kalsiumkarbonaatti kuumennetaan n. 1000 °C, jolloin hiilidioksidi vapautuu ja jäljelle jää kalsiumoksidi (CaO). Kalkinpolttoprosessissa syntyvä kaasu sisältää 14 – 33 % hiilidioksidia. Sementin valmistuksessa muodostuu hiilidioksidia 0,8 tonnia, yhtä tuotettua tonnia sementtiä kohden. Hiilidioksidin muodostuminen polttoprosessissa jakautuu karkeasti 50:50 kalsiumkarbonaatin hajoamiseen ja lämmityspolttoaineen palamiseen. (Rackley ym. 2010.) Sementtituotteet voivat toimia pitkällä aikavälillä hiilinieluinä, absorboiden takaisin itseensä hiilidioksidia.

Terästeollisuutta pidetään yhtenä suurimpana hiilidioksidipäästöjen lähteenä sementtiteollisuuden rinnalla. Terästeollisuus onkin ottanut asian vakavasti ja alkanut viime aikoina kehittämään tekniikoita päästöjen vähentämiseksi. SSAB, joka on suuri terästeollisuudentoimija, on julkaissut aloittavansa pilot-hankkeen, jossa terästä tuotettaisiin vedyn avulla lähes päästöttömästi. SSAB:n terästeollisuuden päästöt Suomessa ovat n. 7 % kaikista Suomen hiilidioksidipäästöistä. Teräksen valmistamisesta syntyy n. 1,4 t hiilidioksidia jokaista tuotettua terästonnia kohden. Masuunista poistuvat savukaasut sisältävät n. 30% hiilidioksidia. (Rackley ym. 2010.)

4.1.3 Ilmasta kaappaaminen (DAC)

Ilmasta kaapatessa hiilidioksidipitoisuudet ovat pieniä (420 – 440 ppm), verraten teollisuuden savukaasuihin (~30 %). Pieni hiilidioksidipitoisuus ilmassa aiheuttaakin suuren massavirran kaapatessa, suuri massavirta vaatii myös paljon energiaa siirtyäkseen. Käyttökelpoisimpia tekniikoita hiilidioksidin kaappaamiseksi ovat absorptio ja adsorptio liuottimeen. (Marcucci 2017, 183.)

Tällä hetkellä on olemassa 15 laitosta, joissa kaapataan hiilidioksidia suoraan ilmasta. Kapasiteetti näillä laitoksilla yhteensä on noin 9 000 t_{CO_2} /vuosi. Pidemmän aikavälin tavoitteena on kaapata hiilidioksidia ilmasta yli 10 Mt_{CO_2} /vuosi. (IEA 2020.)

Hiilidioksidin kaappaamiseksi käytettävässä nestejärjestelmässä pumpataan ilma nesteen läpi, johon hiilidioksidi absorboituu. Nesteenä tällaisessa järjestelmässä käytetään yleensä hydroksidiliuoksia. Järjestelmän läpi kulkenut muu kaasu päästetään takaisin ilmaan. Toisessa tavassa kaapata hiilidioksidia, käytetään adsorptiota. Ilma kuljetetaan adsorptioaineen läpi, jolloin hiilidioksidi takertuu aineen pinnalle. Hiilidioksidi voidaan myöhemmin erottaa adsorptioaineen pinnalta esimerkiksi kuumentamalla ja varastoida tai käyttää sitä uusiin tarkoituksiin. (IEA 2020.)

4.2 Hiilidioksidin varastointi

Talteen otettu hiilidioksidi on varastoitava pysyvästi ja eristettävä pääsemästä ilmakehään takaisin, jos talteenottamisella pyritään poistamaan ilmakehästä hiilidioksidia. Suuren varastointitarpeen takia mahdollisia varastointitapoja, sekä paikkoja on rajallisesti. Täysimittaista varastointimenetelmää on demonstroitu geologisiin muodostumiin, kuten esimerkiksi ehtyneisiin öljy- ja kaasukenttiin, sekä suolavesikerrostumiin. Suolavesikerrostumat ovat huokoisia kivikerroksia, jotka ovat täyttyneet vedellä. Nämä kerrostumat soveltua hyvin hiilidioksidin varastointiin ja teollisen maakaasuntuotannon yhteydessä kerrostumiin on jo injektoitu hiilidioksidia. (Teir, Tsupari, Koljonen, Pikkarainen, Kujanpää, Arasto, Tourunen, Kärki, Nieminen & Aatos 2009.)

Hiilidioksidia on käytetty Pohjois-Amerikassa öljyntuotannon tehostamisessa. Ehtyviin öljylähteisiin pumpataan hiilidioksidia, jolloin öljyntuotanto voi tehostua jopa 30 %. Injektoimalla hiilidioksidia öljylähteeseen, saadaan öljyn viskositeettia parannettua, jolloin se kulkeutuu helpommin lähteestä pois. Hiilidioksidilla voidaan myös nostaa ehtyvän öljy- tai maakaasulähteen painetta. Paineen nostamisella saadaan lähde tyhjennettyä mahdollisimman tyhjäksi. (Teir ym. 2009.)

Huokoiset kivihiilikerrostumat, jotka eivät ole kannattavia louhimiseen voisivat sopia hiilidioksidin varastoimiseen. Tapaa ei ole tutkittu vielä riittävästi. Hiilikerrokseen varastointiin liittyy riskitekijöitä, kuten esimerkiksi hiilikerroksen turpoaminen. Valtameriin voitaisiin teoriassa varastoida hiilidioksidia, joko syvälle (yli 3000 m syvyyteen) mereen injektoimalla tai silikaattimateriaalien avulla. Suoraan mereen

injektointi on kielletty lainsäädännöllä, siihen liittyvien riskien takia. Suora injektointi mereen voisi aiheuttaa meren ekosysteemille haittoja hiilidioksidin liuetessa veden sekaan. (Teir ym. 2009.)

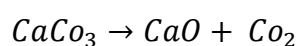
4.3 Hiilidioksidin hyödyntäminen (CCU)

Hiilidioksidin käyttöä raaka-aineena on tutkittu vaihtoehtona varastoinnille. Mahdollisia hyödyntämiskeinoja hiilidioksidille löytyy puhtaan energiantuotannon prosesseista, joissa hiilidioksidista valmistetaan arvokkaampia tuotteita, eikä päästetä sitä päästönä ilmaan. Prosessien täytyy vain olla taloudellisesti kannattavia, turvallisia ja ympäristöystävällisiä. (Al-Mamoori, Krishnamurthy, Rownaghi & Razaeei 2017, 841.)

Tällä hetkellä hiilidioksidia käytetään ehtyneiden tai ehtymässä olevien öljy- ja kaasukenttien uudelleen paineistamiseen, jolloin niiden tuotantoa saadaan tehostettua, sekä kenttä hyödynnettyä mahdollisimman tarkasti. Hiilidioksidi nostaa lähteen painetta, sekä sekoittuu öljyn sekaan osittain. Sekoittuminen aiheuttaa öljyn laajenemista ja tiheyden laskua, jolloin öljy saadaan helpommin poistettua lähteestä. Hiilidioksidin käyttöön tuotannon tehostamisessa liittyy riskejä, lähteen täytyy olla hyvin tiivis, ettei hiilidioksidi pääse karkaamaan lähteestä pois väärillä reiteillä. Muita kohteita hiilidioksidin käytölle on juomateollisuudessa, ruuan pakkauksien suojakaasuna, urean valmistuksessa, veden käsittelyssä, kemikaalien valmistuksessa, polymeerisynteeseissä, kylmäaineena ja hitsauskaasuissa. (Al-Mamoori ym. 2017, 841.)

5 Kalkinpolttaminen

Polttettua kalkkia saadaan kuumentamalla kalkkikiveä n. 1000 °C kuilu- tai kiertouunissa. Polttamisen tarkoitus on poistaa kalkkikivestä hiilidioksidi, jolloin jäljelle jää kalsiumoksidi. Polttamisen jälkeen kalsiumoksidi murskataan sopivaan raekokoon jatkokäyttö varten.



(R1)

Poltettua kalkkia käytetään esimerkiksi raudan ja teräksen tuotannossa, sementin valmistamisessa, selluloosan valmistuksessa, veden- ja savukaasujen puhdistuksessa sekä kaivosteollisuudessa. (SMA-minerals n.d.)

5.1 Kalkkiuuni

Kalkkiuuneja on käytetty jo ennen teollista aikakautta. Vanhoja kalkkiuunin raunioita on vieläkin näkyvillä ympäri maailman. Vanhoissa kalkkiuuneissa on lämpö tuotettu puuta, tai hiiltä polttamalla. (Historic England 2018, 1.) Nykypäivän kalkkiuunit lämpiävät useimmiten kaasulla tai öljyllä, mikä tuottaa huomattavia kasvihuonepäästöjä suuren energiantarpeen vuoksi.

Tulevaisuudessa kalkkiuunit voitaisiin lämmittää puhtaalla, uusiutuvasti tuotetulla ympäristöystävällisellä sähköllä. Kalkkiuunin lämmitessä sähköllä, voidaan kalkista erottuva hiilidioksidi ottaa talteen helpommin. Kalkkiuunia lämmitettäessä uusiutuvalla sähköenergialla, saadaan uunista poistuvan hiilidioksidin puhtausaste lähelle 100 %.

Sähkön tarve kalkkiuunissa tulee olemaan huomattava, mikä tarkoittaa sitä, että sähkön hinnan on oltava alhainen kannattavuuden takaamiseksi tulevaisuuden sähköisille kalkkiuuneille. Opinnäytetyössä käsiteltävän kalkkiuunin lämpö tuotetaan sähköllä, mutta sen kannattavuutta ei tässä työssä tarkastella.

6 Hiilidioksidin puhdistus, kompressointi ja varastointi

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi tarvittavien komponenttien vaihtoehdot. Vaihtoehtojen avulla voidaan selvittää soveltuvimmat komponentit tätä laitteistoa varten.

6.1 Puhdistuslaitteet

Sykloni

Yleisin mekaaninen polynerotin on sykloni. Syklonissa ei tarvita mekaanisia liikkuvia osia. Syklonia käytetään yleisesti ennen varsinaisia suodattimia. Tällä

erotusmenetelmällä saadaan pöly erotettua kuivana, mutta sillä voidaan myös erottaa kaasusta nestepisaroiita. (Pihkala 2011, 72.)

Sykloniin johdetaan pölypitoinen kaasu, joko tangentialisesti tai aksiaalisesti. Kaasu kulkee syklonissa spiraalimaisesti kohti pohjaa. Syklonin sisällä hiukkaset sinkoutuvat seiniä vasten ja valuvat sitä myötäillen syklonin pohjalle. Syklonista imetään pois puhdistunut kaasu keskeltä. Syklonin erotuskykyä kuvaa keskipakovoiman yhtälö:

$$F = \frac{mv^2}{R} \quad (1.0)$$

missä, F= Voima
 m = hiukkasen massa
 v = hiukkasen nopeus
 R = syklonin säde

Yhtälöstä käy ilmi, että voima on kääntäen verrannollinen syklonin säteeseen nähden, joten syklonin kokoa kasvattamalla keskipakovoima pienenee, sekä erotuskyky heikkenee nopeuden ollessa vakio. Parhaan erotuskyvyn saavuttamiseksi syklonin halkaisijan tulisi olla mahdollisimman pieni. (Pihkala 2011, 72.)

Sykloni ei sovellu erottamaan alle 5 µm raekokoja. Hienojakoisen pölyn erottamiseksi syklonin käyttö on siten rajoittunutta. Syklonin erotustehoa voidaan kasvattaa kytkemällä rinnan useita sykloneja, näin saadaan ns. multisykloni. (Pihkala 2011, 73.)

Letkusuodatin ja pölysuodatin

Pölynerottamiseksi kaasuista käytetään letkusuodattimia, joiden kankaat ovat valmistettu yleensä luonnonkuiduista, mineraalikuiduista tai synteettisistä kuiduista. Korkea erotusaste riippuu monen mekanismin yhteisvaikutuksesta, joista jokainen tulee kysymykseen erihiukkaskokojen alueilla. (Pihkala 2011, 77.)

Pölysuodattimen letkuihin johdetaan pölypitoista kaasua alapäästä, jolloin kaasun kulkeutuessa ylöspäin, tarttuu pöly letkussa olevan kankaan sisäpinnalle. Hiukkasten tartuttua suodatinletkun pinnalle, se osaltaan parantaa erotuskykyä, mutta samalla myös tukkii suodatinta. (Pihkala 2011, 77.)

Suodatinletkuja voidaan puhdistaa joko ravistamalla, ilmahuuhtelulla tai molemmilla yhdessä. Puhdistuksen aikana pölyhiukkaset putoilevat letkujen alla olevaan pölykammioon. Markkinoille on myös tullut ultraääniravisteisia suodatinratkaisuja. Letkusuodatinta ei voida käyttää pölyille, jotka ovat tahmeita ja kiinnitarttuvia, eikä myöskään liian kuumille kaasuille. Letkusuodattimien kuitulaadut kestävät maksimissaan noin 200 – 250 °C lämpötiloja. (Pihkala 2011, 77.)

Letkusuodattimen pohjakartioon johdetaan pölypitoinen kaasu. Kartiossa erottuvat raskaimmat hiukkaset, jotka laskeutuvat kartion pohjalle. Suodatinletkujen sisälle imetään kaasu, jolloin se suodattuu kankaan läpi. Kankaan läpi imetty kaasu kulkeutuu sulkupetien kautta ulos, pölyn jäädessä suodatinpinnoille. (Pihkala 2011, 77.)

Jos letkusuodattimia on kytketty rinnan useita, voidaan kaasua ohjata vuoroittain eri suodatinyksiköiden läpi. Käytöstä poistettu suodatin voidaan kytkeä puhdistukselle, jolloin sulkupellit kytkeytyvät kiinni, ja tärytinmoottori ravistaa suodattimista kiintoainesta irti. Kiinteät partikkelit valuvat näin pohjakartioon, josta partikkelit voidaan kuljettaa esimerkiksi ruuvikuljettimella pois kammiosta. Kun suodatinyksikkö on puhdistettu, voidaan se kytkeä takaisin käyttöön ja ottaa seuraava yksikkö puhdistukseen. (Pihkala 2011, 77.)

Hienosuodatin

Hienosuodatin on yksi mekaanisen suodatuksen tavoista poistaa partikkeleita kaasusta. Suodatin on ikään kuin verkko, joka estää partikkelin pääsyn siitä läpi. Mitä suurempi partikkelikoko suhteessa reikiin, sitä suuremmalla todennäköisyydellä partikkeli ei sitä läpäise. Suodattimet voivat olla ohuita paperielementtityyppisiä tai paksuja suodatinainetta sisältäviä elementtejä. (Airila, Hallikainen, Käätä & Laurila 1983, 65.)

Suodattimet, joissa on pienimpiä reikiä, pysäyttävät partikkeleita tehokkaimmin, mutta aiheuttavat samalla voimakasta vastavirtausta. Pienimmillä rei'illä varustetut suodatin patterit aiheuttavat suurta painehäviötä. Suodattimen painehäviötä voidaan pienentää kasvattamalla suodattimen pinta-alaa, mutta kokoa kasvattamalla suodattimesta voi tulla nopeasti epäkäytännöllinen kokonsa vuoksi.

Hienosuodattimien suodatuskyky on yleisesti 0,1 – 0,01 µm. (Airila ym. 1983, 65.)

6.2 Prosessiarvojen mittaaminen

Hiilidioksidin paineistusasemalla mitattavia prosessiarvoja ovat, kaasun koostumus, lämpötila, paine, sekä massa-/ tilavuusvirtaus. Prosessin tilaa seurataan mitattavilla arvoilla, jotta prosessia voidaan käyttää turvallisesti, ympäristöystävällisesti, sekä tuotteiden laadun takaamiseksi. Tämän lisäksi prosessin käyttäjälle tuotetaan informaatiota prosessin tilasta ja toiminnasta. Prosesseista useimmiten mitataan painetta, lämpötilaa, virtausta ja pinnankorkeutta. (Pihkala. 2000, 9.)

Prosessia mittaavia laitteita kutsutaan antureiksi. Antureiden mittaama tieto muutetaan yleensä sähköiseen muotoon, jotta se saadaan lähetettyä automaatiojärjestelmään. (Pihkala. 2000, 9.) Prosessiarvojen viennillä automaatiojärjestelmään, saadaan rakennettua käyttäjille turvallinen laitteisto.

Kaasun koostumusta voitiin mitata VTT:llä olevalla FTIR mittauksella. FTIR-mittauksella mitataan infrapunavalon absorboitumista eri aallonpituuksilla kaasuihin. Mitattavilla kaasuilla on oma absorptiospektri, jonka avulla voidaan tunnistaa kaasujen pitoisuuksia. (Gasmel. n.d.) Mittauksella varmistettiin hiilidioksidin pitoisuus prosessista tullessa, sekä ennen pulloon säilömistä.

6.3 Kompessorit

Scroll- eli kierukkakompessorit

Kierukka- eli scroll-kompressorit on yleisesti käytetty pienissä teholuokissa, kuten ilmastointien jäähdytyslaitteistoissa, jääkaapeissa ja lämpöpumpuissa. Kierukka kompressoreilla päästään pienessä kokoluokassa parempiin hyötysuhteisiin ja tuottoihin suhteessa mäntäkompressoreihin. (Laitinen, Rämä & Airaksinen 2016.) Kierukkakompressorissa kaasun paineennousu muodostetaan kahden kierukan avulla. Toinen kierukka on kiinteä ja toinen ”pyörii” kiinteän kierukan sisällä. Kierukat ovat toisissaan kiinni vain muutamasta kohdasta. Kierukkaan syntyy näin perättäisiä kammioita, jotka pienenevät kiertymän mukana kohti keskustaa. (Kianta 2013, 34.)

Mäntäkompressorit

Mäntäkompressoreita on kalvo- ja mäntäperiaatteella toimivia.

Mäntäkompressoreilla saavutetaan suuria tuottoalueita alkaen 1 l/s aina kymmeneen kuutioihin sekunnissa. Mäntätyyppin kompressoreilla saavutetaan myös laaja paine alue, noin 1 bar ylipaineesta yli 1000 bar paineisiin saakka. (Airila ym. 1983, 26.)

Mäntäkompressorin rakenne vaihtelee sen käyttötarkoituksen mukaan.

Mäntäkompressorin yksinkertaisimmillaan on sijoitettu suoraan sähkömoottorin akselille. (kuva) Pienissä ja keskisuurissa kompressoreissa käytetään nk.

kampimekanismia. (kuva) Jos paineen tuotannossa halutaan öljytöntä kompressiota, voidaan käyttää erillistä ristipäätä. (kuva) Kaikkein suurimpia mäntäkompressorin ratkaisuja ovat nk. boxerityypin kompressorit. Boxerityyppisillä kompressoreilla saavutetaan korkeimmat paineet. Mäntäkompressorit voivat olla, joko yksitoimisia tai kaksitoimisia. Yksitoimisessa ratkaisussa kaasu on männän yhdellä puolella ja kaksitoimisessa molemmilla puolilla. (Airila ym. 1983, 26.)

Mäntäkompressorissa tapahtuva kaasunvaihto tapahtuu automaattiventtiilien avulla, jotka avautuvat ja sulkeutuvat paine-eron avulla. Tällöin mekaanista ohjauskoneistoa ei tarvita ja rakenne pysyy yksinkertaisempaan. (Airila ym. 1983, 26)

Ruuvikompressorit

Ruuvikompressorit on kehitelty jo 1930-luvulla ja niiden kehittäjänä pidetään ruotsalaista A. Lysholmia. Ruuvikompressorit kehitettiin tuottamaan öljytöntä ilmaa. (Airila ym. 1983, 30) Ruuvikompressoreita käytetään yleisesti suurille ilmamäärille. Ruuvikompressorissa yleensä kaksi ruuvia pyörivät rinnakkain. Ruuvien pyöriessä niiden välissä oleva puristustila pienenee, tilan edetessä ruuvin suuntaisesti eteenpäin. Kun puristustila pienenee, siellä oleva kaasu tiivistyy ja paine kasvaa (Kianta 2013, 72).

6.4 Putkistomateriaalit

Hiilidioksidi virtaa putkistossa kaasuna, nesteinä tai molempien olomuotojen sekoituksena. Putkistoa suunniteltaessa on otettava huomioon virtaavan aineen ominaisuudet. Materiaalia valittaessa on tärkeätä, myös tarkastella putkistossa

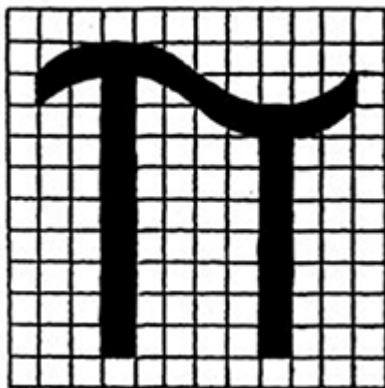
vallitsevaa painetta, ympäröiviä olosuhteita, sekä lämpötilaa. Putkistoa suunniteltaessa on myös hyvä varautua kapasiteetin muutoksiin, sekä mahdollisille huoltotoimenpiteillä jättää tarvittava tila. (PSK 2402, 7-8.)

Opinnäytetyössä putkiston materiaaliksi valikoitui 316L, joka on vähähiilinen austeniittinen ruostumaton teräs. Materiaali on korroosiota kestävä ja monipuolinen materiaali, jolla on toteutettu putkistoja esimerkiksi kemian ja petrokemian tuotantolaitoksissa.

6.5 Hiilidioksidi pullot ja säiliöt

Opinnäytetyössä käytettävät kaasupullot tulevat valmiina, niitä ei erikseen valmisteta työtä varten. Suomessa käytettävien kaasupullojen on kestävä minimissään -40 °C asteen lämpötiloja. Kaasupullon hyväksymisen käyttöön, tunnistaa hyväksymismerkinnästä ja määräaikaistarkastusleimasta. (Kaasupullojen vaatimustenmukaisuus n.d.)

Suomalaisissa kaasupulloissa on täytynyt olla 1.7.2001 alkaen painelaitteiden direktiivin 2010/35/EU mukainen "pii"-merkki (ks. kuvio 2), sekä tarkastuslaitoksen tunnusnumero. Vanhemmissa kaasupulloissa voi olla erilaisia merkintöjä, esimerkiksi kaasupullon rakennesuunnitelman hyväksymisnumero. (Kaasupullojen vaatimustenmukaisuus n.d.)



Kuvio 2. "Pii"-merkki (ruudukko ei ole osa merkkiä). (Kaasupullojen vaatimustenmukaisuus n.d)

EU:ta suurempaan kansainväliseen käyttöön hyväksytyjen kaasupullojen merkinnöissä on UN-paineastian tunnus. (ks. kuvio 3) UN-tunnuksella merkittyjä

pulloja ei välttämättä ole merkitty ”pii”-merkillä. UN-merkittyä pulloa voidaan käyttää Suomessa samaan tapaan kuin ”pii”-merkinnällä varustettua pulloa. (Kaasupullojen vaatimustenmukaisuus n.d.)



Kuvio 3. UN-merkintä. (Kaasupullojen vaatimustenmukaisuus n.d)

7 Turvallisuus

Suunniteltava laitteisto tulee sisältämään kuumia kaasuja, sekä korkeita paineita laitetta käytettäessä. Korkeita paineita sisältävän laitteiston suunnittelussa on otettava huomioon valtioneuvoston asetus painelaitteista, joka määrittää vaatimukset painelaitteille. *”Tätä asetusta sovelletaan painelaitteisiin ja laitekokonaisuuksiin, joiden suurin sallittu käyttöpaine on yli 0,5 baaria.”* (Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1548/2016 §1)

7.1 Painelaitelaki

Turvallisuusvaatimukset painelaitteille on määritelty Euroopan parlamentin, sekä Euroopan neuvoston direktiivin 2014/68/EU, mukaan. Direktiivissä määritellyt vaatimukset on laadittu yhdenmukaistamaan Euroopan jäsenvaltioiden lainsäädännön. (Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1144/2016 §7)

Säiliöiden on täytettävä olennaiset turvallisuusvaatimukset - - jotka on tarkoitettu 1) niille kaasuille, nesteytetyille kaasuille, - - joiden höyrynpaine korkeimmassa sallitussa lämpötilassa on yli 0,5 baaria yli normaali-ilmankehän paineen (1013 mbar).

(Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1144/2016 §7) Opinnäytetyössä käytettävän säiliön tulee täyttää olennaiset turvallisuusvaatimukset, koska tavoitteena on paineistaa hiilidioksidi yli 30 bar paineeseen. b) ryhmään 2 kuuluva painelaitteen

sisältö, kun $V > 1$ L ja $PS \cdot V > 50$ bar • L tai kun $PS > 1000$ bar- -. (Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1144/2016 §7) Säiliöt, joihin kaasu täytetään, on tilavuudeltaan 12 x 50 L ja sisältää noin 30 – 50 bar paineen. Mutta ne ovat erillisiä laitteistoon liitettäviä osia, jolloin niihin ei tarvitse tehdä painelaitetarkastelua. Laitteiston sisältämät muut säiliöt, kuten adsorptiotornit ja tislauskolonnit, on syytä ottaa huomioon painelaitetarkastelussa.

Putkistojen on täytettävä olennaiset turvallisuusvaatimukset, jos ne on tarkoitettu: 1) niille kaasuille, nesteytetyille kaasuille, - - joiden höyrynpaine korkeimmassa sallitussa lämpötilassa on yli 0,5 baaria yli normaali-ilmankehänpaineen (1013 mbar) (Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1144/2016 §7). Putkistoissa oleva paine tulee ylittämään paineen 0,5 bar kompressoinnin jälkeen. Mutta putkiston koon ollessa alle DN 25, sisältö ei kuulu ryhmään 1. ”b) ryhmään 1 kuuluva painelaitteen sisältö, kun $DN > 25$;”. (Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1144/2016 §7) Putkiston jäädessä alle DN 25 koon, sen valmistuksessa on noudatettava hyvää konepajakäytäntöä. *Painelaitteet ja laitekokonaisuudet, joiden ominaisuudet ovat 7 §:n 2-4 momentissa säädetyillä rajoilla tai niiden alapuolella, on suunniteltava ja valmistettava Euroopan unionin jäsenvaltiossa noudatettavan hyvän konepajakäytännön mukaisesti.* (Valtioneuvoston asetus painelaitteista 1144/2016 §9)

7.2 Varolaitteet

Puhdistus- ja paineistuslaitteen käyttäjien turvallisuuden takaamiseksi laitteeseen on suunniteltu asennettavaksi varolaitteita. Korkeiden paineiden, sekä kuumien kaasujen kanssa on toimittava käyttäjien turvallisuus huomioiden.

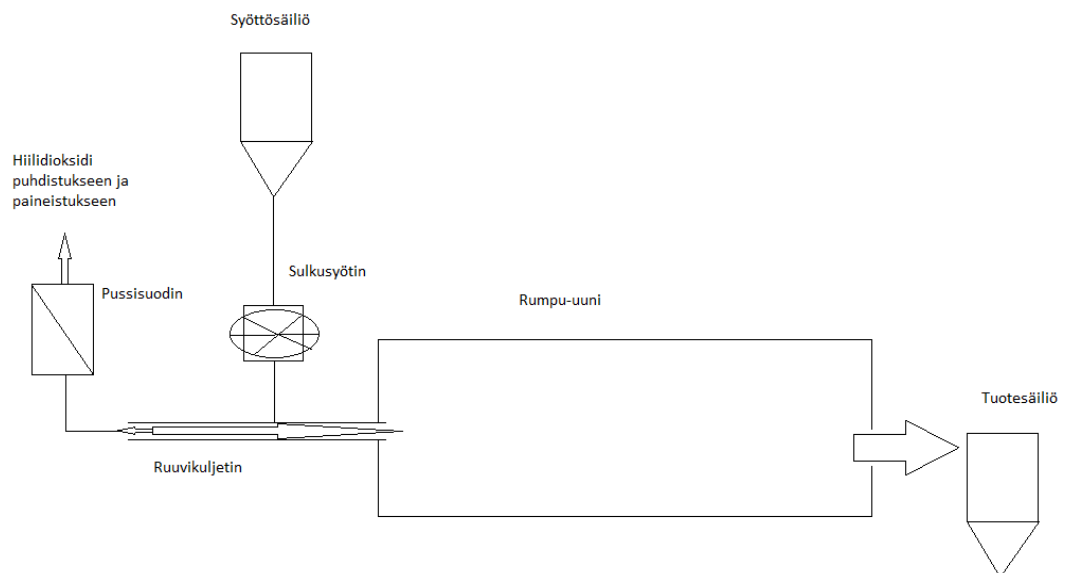
Laitteiston ylipaineistuminen on estetty varoventtiilein. Varoventtiili aukeaa, jos paine putkistossa alkaa nousemaan liian korkeaksi. Ilman varoventtiiliä putkiston paine pahimmassa tapauksessa voisi nousta liian korkeaksi ja aiheuttaa materiaalien murtumisia, eli käytännössä räjähdysten. Ylipaineistusta estetään myös automaation avulla. Kompressori ja pumppu, jotka nostavat painetta prosessissa on varustettu painekeytkimillä. Painekeytkin toimii ikään kuin varoventtiili, mutta ei päästä painetta

purkautumaan minnekään. Painekytkin katkaisee kompressorin tai pumpun pyörimisen, jos paine nousee liian korkeaksi.

8 Järjestelmän suunnittelu ja mitoitus

8.1 Lähtötiedot

Hiilidioksidi opinnäytetyössä käsiteltävään paineistuslaitteeseen saadaan kalkinpolttoprosessista. (ks. kuvio 4)



Kuvio 4. Kalkkiuuni.

Kalkkikivi syötetään prosessiin tuotesäiliöstä, josta se siirretään syöttökanavaa pitkin sulkusyöttimen kautta ruovikuljettimen avulla rumpu-uuniin. Uunissa kalkkikivi kuumennetaan sähkövirran avulla noin 1000 °C, jolloin hiilidioksidi vapautuu kalkkikivestä. Vapautunut hiilidioksidi imetään puhaltimella uunista ruovikuljettimen läpi kohti pussisuodattimia ja siitä edelleen kohti paineistusasemaa. Ruovikuljettimen aikana vapautunut hiilidioksidi luovuttaa osan lämmöstä uuniin syötettävään kalkkikiveen. Poltettukalkki kulkeutuu rumpu-uunista purkukammion läpi tuotesäiliöön, jossa se jäähtyy veden kiertäessä säiliön vaipassa.

Pussisuodattimien jälkeen hiilidioksidivirran lämpötila on yli 200 °C, joka aiheuttaa jäähdytystarpeen ennen paineistusta. Pussisuodattimet eivät myöskään poista aivan

pienimpiä partikkeleita, eikä kosteutta hiilidioksidivirrasta, jolloin kaasua on vielä myös puhdistettava ja kuivattava. Kalkkiuunista poistuvan hiilidioksidin tilavuusvirtaus on noin 60 Nm³/h.

Hiilidioksidin paineistukselle on asetettu vaatimukset, jotka paineistusaseman on täytettävä. Hiilidioksidin seasta on poistettava kiintoaineet ja kosteus mahdollisimman vähäiseksi, sekä paine nostettava yli 30 bar paineeseen jatkokäyttöä varten. Muiden prosessissa mahdollisesti syntyvien epäpuhtauksien poistamiseen on kuitenkin varauduttava.

8.2 Hiilidioksidin jäähdytys

Hiilidioksidin lämpötila on maksimissaan noin 240-asteinen sen saapuessaan prosessista ulos. Hiilidioksidin tavoitelämpötilaksi asetettiin alle 35-astetta, näin ollen lämpötilaa on laskettava 205-astetta ennen kompressointia. Jäähdyttämiseen voidaan käyttää prosessivettä, joka saapuu jäähdyttimelle 4 – 10-asteisena. Jäähdyttimen läpi kulkee noin 60 Nm³/h hiilidioksidikaasua.

Kalkkiuunilta saapuva kaasu saatiin jäähdytettyä, kalkkiuunissa olevalla jäähdyttimellä n. 30 °C asteeseen, joten erillistä jäähdytin ratkaisua ei ennen paineistus- ja puhdistuslaitetta tarvittu. Muissa projekteissa on jäähdytyksen tarvetta tarkasteltava tapauskohtaisesti.

9 Kustannusarvio

Kustannusarvio perustui tarjouksiin, joita saatiin laitetoimittajilta, sekä aiempien projektien kustannusarvioihin.

Kompressoreista tarjouksia antoivat Banmark, Specialty Fuels ja Söders Maskinservice. YTM-Industrial teki tarjouksen kaasuboosterista. Specialty Fuels pystyi tarjoamaan kompressorin lisäksi kokonaisvaltaista laitteiston rakennusta kilpailukykyiseen hintaan.

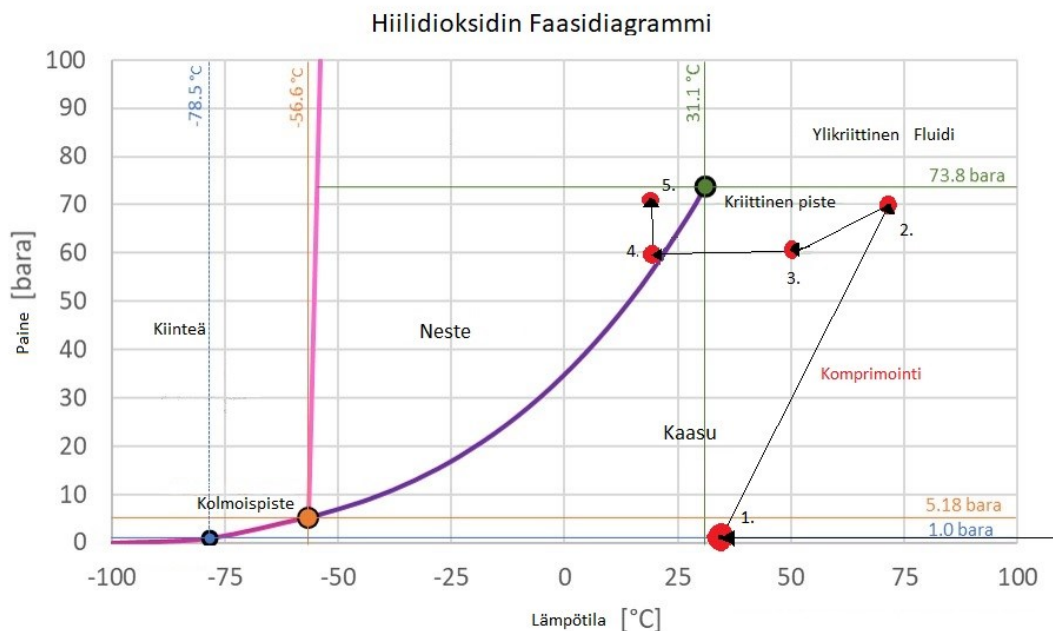
Osa laitetoimittajista tarjosi kompressoreita, joiden kapasiteetti oli huomattavasti suurempi mitä oli tarpeen. Sen takia myös laitteiden hinnat olivat erittäin korkeat.

Specialty Fuelin työntekijöillä oli kokemusta laitteistoista, joten heidän oli helppo tarjota kokonaisvaltaista ratkaisua.

10 Tulokset

Opinnäytetyön ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä kysyttiin, millainen on jäähdytyksen tarve kompressoinnin jälkeen. Kompressoinnin jälkeen oli tarkasteltava jäähdytyksen tarvetta muiden komponenttien mukaan. Hiilidioksidista oli poistettava kosteus, epäpuhtaudet, sekä muut kaasut. Hiilidioksidin kuivaaminen, sekä rikin poistaminen onnistui parhaiten pitämällä hiilidioksidi vielä kaasuna. Rikki ja kosteus poistettiin adsorptio aineilla samassa adsorptiotornissa. Muut kaasut eroteltiin hiilidioksidista tislaamalla.

Puhdistusmenetelmät aiheuttivat tarpeen käsitellä hiilidioksidia kaasuna ja nestemäisenä (ks. kuvio 5). Pisteiden 1 ja 2 välillä kaasu komprimoitiin, jonka jälkeen hiilidioksidi jäähdytettiin mahdollisimman viileäksi, mutta kuitenkin huomioiden hiilidioksidin pysyminen kaasuna. Adsorption jälkeen hiilidioksidia jäähdytettiin lisää (3 -4), jotta kaasu saatiin tiivistymään nesteeksi ennen tislauskolonnia.



Kuvio 5. Hiilidioksidin faasidiagrammi (The Engineerin toolbox, n.d, muokattu)

Ensimmäinen jäähdytin kompressorin jälkeen toteutettiin vapaajäähdytyksellä, jolloin hiilidioksidin lämpötila saatiin laskettua noin 50 °C. Vapaajäähdytyksen

kohdalla hiilidioksidin paine oli 60 bar, jolloin hiilidioksidi pysyi kaasumaisessa olomuodossa. Hiilidioksidi kaasu johdettiin adsorptiotorniin, jossa rikki, sekä kosteus adsorboituvat. Adsorptioaineina käytettiin aluminaa, sekä A3 luokan adsorbentteja.

Adsorption jälkeen hiilidioksidia jäähdytettiin uudelleen veden avulla lähelle huoneen lämpöä (20°C). Huoneenlämpöisenä hiilidioksidi tiivistyi nesteeksi, mutta epäpuhtaudet pysyivät kaasumaisena. Kaasuvirtaus johdettiin jäähdytyksen jälkeen tislaukolonniin, jossa nestemäinen hiilidioksidi painui kolonnin pohjalle ja kaasumaisena olevat epäpuhtaudet nousivat kolonnin yläosaan. Kolonnin yläosasta oli johdettu hönkäputki ulos. Putkeen oli asennettu neulaventtiili, sekä virtausmittaus. Hönkäputkesta oli mahdollisuus myös mitata kaasunominaisuuksia FTIR mittauksella.

Toisena tutkimuskysymyksenä kysyttiin, millaiset vaatimukset ovat tuotteistetulle hiilidioksidille. Hiilidioksidin laatuvaatimukset vaihtelevat käyttötarkoitusten mukaan. Puhtaimpia kaasuja käytetään esimerkiksi lääke- ja elintarviketeollisuudessa ja likaisimpia kaasulaatuja kasvihuonekäytössä. Opinnäytetyössä puhtausvaatimus tuli hiilidioksidin jatkokäytön vaatimuksista. Hiilidioksidin kastepiste piti saada laskettua alle ulkolämpötilan (-25°C), ettei kosteus tiivisty putkistoissa ja häiritse massavirtasäätimiä. Hiilidioksidin seasta oli poistettava myös aromaattiset hiilivedyt, rikkiyhdisteet, sekä typpiyhdisteet (NH₃ ja HCN).

Kolmantena tutkimuskysymyksenä kysyttiin, mitä turvallisuusvaatimuksia suuri hiilidioksidin paine asettaa paineistusaseman suunnittelulle. Suuren paineen vuoksi on tarkasteltava painelaitelakia, täytyvätkö rajaehdot painelaitteeksi määrittämiselle, vai jäädäänkö niiden alle. Laitteen putkiston paine ylitti painelaitelain määrittämän 0,5 bar, mutta putkikoon ollessa alle DN25, ne kuuluvat ryhmään yksi. Putkisto voidaan siis valmistaa hyvää konepajakäytäntöä noudattaen. Laitteessa olevat adsorptiotornit, sekä tislaukolonnit nostavat paineenalaista tilavuutta järjestelmässä, jolloin PS * V nousee yli 50 barL. Säiliöiden PS * V on oltava alle 3000, tällöin säiliöt saadaan painelaiteluokkaan III. Eli säiliöiden on oltava alle 37,5 l, jos suunniteltu maksimipaine on 80 bar.

11 Pohdinta

Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa suunnitelma, jonka pohjalta on mahdollista valmistaa hiilidioksidin talteenottojärjestelmä kalkkiuunille, sekä asentaa paikalleen ja suorittaa käyttöönotto. Vallitsevan koronatilanteen takia on monessakin asiassa tullut viivästyksiä. Kalkkiuuni ei vielä kerennyt saapua VTT:lle, joten emme päässeet vielä testaamaan laitteiston toimintaa käytännössä, emmekä saamaan kalkkiuunista todellisia prosessiarvoja, joiden mukaan olisi saatu hiilidioksidin talteenottolaitteisto suunniteltua tarkemmin. Prosessiarvojen saaminen olisi ollut tärkeätä laitteiston suunnittelun kannalta. Nyt laitteisto on suunniteltu arvoilla, jotka on saatu aikaisemmista tutkimuksista ja kalkkiuunin suunnitteluarvoista.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin tehtyä laitteistosta PI-kaavio, jonka pohjalta tehtiin kustannusarvio tarvittavista komponenteista. Käyttöönotto, sekä laitteiston rakentaminen tapahtuu, kun kalkkiuunin saapuu VTT:lle. Opinnäytetyölle asetettuihin tutkimuskysymyksiin löydettiin vastaukset.

11.1 Jatkotutkimustarve

Kun laitteisto on saatu käyttöönotettua, sillä tullaan tekemään monia jatkotutkimuksia, mutta mielestäni laitteistolle olisi hyvä tehdä energiatase, sekä laskea hyötysuhde ja tehdä kannattavuustarkastelu. Jatkotutkimuksia tullaan laitteistolle tekemään myöhemmin. Opinnäytetyön aikataulun ja laitetoimitusten viivästymisen takia niitä ei ole keretty tekemään tähän työhön.

Laitteiston kannattavuus tarkastelu olisi tärkeä tehdä tulevaisuuden kannalta. Hiilidioksidin hinnan vaikutusta kannattavuuteen, sekä vertailua hiilidioksidipäästön hinnan vaikutusta kannattavuuteen. Tulevaisuudessa hiilidioksidin talteenottamisen ratkaisuille on varmasti kysyntää, jos päästöjen hinnat alkavat nousemaan. Jos päästötöntä vaihtoehtoista tuotantomenetelmää ei ole, on hiilidioksidi todennäköisesti otettava talteen kannattavuuden säilyttämiseksi tuotannossa.

12 Lähteet

A 29.12.2016/1548. Valtioneuvoston asetus painelaitteista. Työ- ja elinkeino ministeriö. <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161548>

Airila, M., Hallikainen, K., Kääpä, J. & Laurila, T. 1983. Kompressorikirja. Helsinki: Korpivaara Oy, Hydor Ab.

Al-Mamoori, A., Krishnamurthy, A., Rownaghi, Ali A., Rezaei, F., 2017. Carbon Capture and Utilization Update. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ente.201600747>

Asiakastieto. N.d. Asiakastiedon verkkosivuilla olevat yrityksen taloustiedot. <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/reteres-oy/25938396/taloustiedot>.

Birol, F., Fonta, P. 2018. Technology Roadmap. IEA:n tuottama opas hiilidioksidi päästöjen vähentämiseksi sementtiteollisuudessa. Viitattu 23.11.2020. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/low-carbon-transition-in-the-cement-industry_9789264300248-en.

Energiateollisuus. 2021. Energiateollisuuden verkkosivuilla julkaistu tiedote, vuoden 2020 energiantuotannon päästöistä. Viitattu 17.5.2021. https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/energiatuotannon_kokonaispaastot_laskivat_20_vuonna_2020._taustalla_ei_korona_vaan_lammin_saa_ja_uusiutuva_energia.html.

The engineerin toolbox. N.d. Carbon dioxide – thermophysical properties, Engineering toolboxin verkkosivuilla julkaistu hiilidioksidin faasidiagrammi. https://www.engineeringtoolbox.com/CO2-carbon-dioxide-properties-d_2017.html

Gasmet. N.d. Gasmetin verkkosivuilla oleva esite FTIR:n toiminnasta. <https://www.gasmet.com/fi/tuotteet/ftir/>.

Historic England. 2018. Pre-industrial Lime kilns: Introduction to Heritage Assets. England. Swindon. Viitattu 17.5.2021. <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/iha-preindustrial-lime-kilns/heag222-pre-industrial-lime-kilns/>

IEA. 2019. Global Energy & CO2 Status Report. IEA. Ranska. IEA:n julkaisema raportti energiantuotannon päästöistä. Viitattu 17.5.2021.

https://iea.blob.core.windows.net/assets/23f9eb39-7493-4722-aced-61433cbffe10/Global_Energy_and_CO2_Status_Report_2018.pdf.

IEA. 2020. Direct Air Capture. IEA:n verkkosivuilla oleva referaatti ilmasta kaappaamisesta. Viitattu 17.5.2021. <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>.

Kaasupullojen vaatimustenmukaisuus. N.d. Tukesin verkkosivuilla oleva ohjeistus kaasupullojen vaatimustenmukaisuuden tunnistamiselle.

<https://tukes.fi/vak/kaasupullojen-vaatimustenmukaisuus>

Kananen, J. 2012. Kehittämistutkimus opinnäytetyönä: Kehittämistutkimuksen kirjoittamisen käytännön opas. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kianta, J. 2013. Kylmätekniikan käsikirja. 1. painos. Tampere: Eräsalon kirjapaino Oy.

Laitinen, A., Rämä, M. & Airaksinen, M. 2016. Jäähdytyksen teknologiset ratkaisut. Helsinki: VTT. Viitattu 26.1.2021.

https://energia.fi/files/1359/Jaahdytysteknologiaselvitys_VTT_221216.pdf.

Marcucci, A. 2017. The road to achieving the long-term Paris targets: Energy transition and the role of direct air capture.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-017-2051-8>.

Pihkala, J. 2011. Prosessiteknikka. Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. 3. painos. Helsinki: Opetushallitus.

Rackley, Stephen, A. 2010. Carbon capture and storage. Amsterdam, Boston, Elsevier / BH 2010.

https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpCCS00001/viewerType:toc//root_slug:viewerType%3Atoc/url_slug:root_slug%3Acarbon-capture-storage?kpromoter=federation.

Reteres Oy. N.d. Reteresin nettisivuilla oleva yritysesittely. Viitattu 24.11.2020.

https://www.reteres.fi/wp-content/uploads/2020/01/Palvelut_Reteres_Oy_23012020.pdf.

Sementti ja kasvihuonepäästöt. N.d. Artikkelel Betoniteollisuus ry:n verkkosivuilla. Viitattu 23.11.2020. <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betonirakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>.

Poltettu kalkki. N.d. SMAmineral. Yrityksen verkkosivuilla kerrottua tietoa tuotteesta. Viitattu 17.5.2021. <https://smamineral.se/fi/product/poltettu-kalkki/>.

PSK 2402. 2021. Teollisuuden putkistot: Putkistosuunnittelun perusteet. Viitattu 18.5.2021 <https://psk-standardisointi.fi/standardit/>

Teir, S., Tsupari, E., Koljonen, T., Pikkarainen, T., Kujanpää, L., Arasto, A., Tourunen, A., Kärki, J., Nieminen, M. & Aatos, S. 2009. Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi (CCS). Espoo: VTT. Viitattu 23.12.2020.

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2009/T2503.pdf>.

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, Kauppalehti. N.d. Yrityshaku Kauppalehden verkkosivuilla. Viitattu 24.11.2020.

<https://www.kauppalehti.fi/yritykset/yritys/teknologian+tutkimuskeskus+vtt+oy/2647375-4>.

OVA-ohje: hiilidioksidi. 2017. Työterveyslaitos. Työterveyslaitoksen julkaisema ohjeistus hiilidioksidille. <http://www.ttl.fi/ova/hiilidioksidi.pdf>.

Liitteet

Liite 1. Kustannusarvio (salassa pidettävä)

Liite 2. PI-kaavio (salassa pidettävä)