

Jani Ollikainen & Juha-Matti Heino

DESORPTIOKOLONNIN KAPASITEETIN TUTKIMINEN

**Opinnäytetyö
CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2015**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Yksikkö Kokkola-Pietarsaari	Aika Toukokuu 2015	Tekijä/tekijät Juha-Matti Heino & Jani Ollikainen
Koulutusohjelma Kemiantekniikka		
Työn nimi DESORPTIOKOLONNIN KAPASITEETIN TUTKIMINEN		
Työn ohjaaja Staffan Borg	Sivumäärä 42+10	
Työelämäohjaaja		
<p>Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena oli tutkia, miten desorptiokolonnin hiilidioksidinpuhdistuskapasiteettia voisi parantaa. Lisäksi työhön kuului tutkia laitteiston tehonkulutusta. Opinnäytetyön teoriaosassa syvennyttiin absorptioon ja desorptioon ilmiöinä, sekä niihin vaikuttaviin muuttujiin. Työ suoritettiin Centria-ammattikorkeakoulun prosessilaboratoriossa sijaitsevalla absorptio-desorptiolaitteistolla. Työn toimeksiantaja oli Centria-ammattikorkeakoulu ja työ suoritettiin kahden opiskelijan yhteistyönä johtuen koelaitteiston operoinnin haastavuudesta.</p> <p>Koeajoissa keskityttiin höyrynpaineen, virtausnopeuden sekä pohjakiehuttimen levyjen määrän vaikutukseen desorptiokolonnin puhdistustehokkuuden, poistotehon sekä tehonkulutuksen suhteen. Työnjako tulosten analysoinnissa tehtiin niin, että Jani Ollikainen tutki pohjakiehuttimen levyjen määrän sekä höyrynpaineen vaikutusta, kun taas Juha-Matti Heino tutki virtausnopeuden vaikutusta.</p> <p>Koeajojen perusteella voitiin todeta, että suurempi levymäärä ja korkeampi höyrynpaine antoivat parhaimman tuloksen. Merkittävin yksittäinen tekijä desorptiokolonnin toimintaan vaikutti olevan virtausnopeus.</p>		

Asiasanat

absorptio, desorptio, hiilidioksidi, kolonni, MEA, stripperi, täytekappaleet

ABSTRACT

Unit Kokkola-Pietarsaari	Date May 2015	Author/s Juha-Matti Heino & Jani Ollikainen
Degree programme Chemical engineering		
Name of thesis INVESTIGATION OF THE DESORPTION COLUMN'S CAPACITY		
Instructor Staffan Borg		Pages 42+10
Supervisor		
<p>The purpose of this thesis work was to investigate how to improve the carbon dioxide cleaning capacity of the desorption column. The power consumption of the system was also investigated. Absorption and desorption as a phenomena and parameters affecting the phenomena was investigated in the theoretical part of this thesis. The commissioner of the work was Centria University of Applied Sciences, and the experimental work was conducted with absorption-desorption apparatus in process laboratory of Centria university of applied sciences. The work was conducted by two students because operating the absorption-desorption apparatus would have been too challenging for one person.</p> <p>The experimental work focused on the effects in the system caused by changing steam pressure, flow rate and number of plates in the reboiler. The changes were investigated by measuring the cleaning efficiency, the removal rate and the power consumption. The analysis of the results of the experiments was divided between two students. Jani Ollikainen analyzed the results of steam pressure and bottom heater plates. Juha-Matti Heino analyzed the affects of flow rate.</p> <p>The conclusion of the experimental work was that the larger number of heating plates and higher steam pressure produced better results. The results indicated that the flow rate affects the desorption column's efficiency the most.</p>		
<p>Key words absorption, carbon dioxide, column, desorption, MEA, packing, stripper</p>		

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 ABSORPTIO–DESORPTIO	2
3 LAITTEISTO	4
3.1 Täytekappalekolonnit	4
3.1.1 Täytekappaleet	5
3.1.2 Nesteenjakaajat	8
3.2 Välipohjakolonnit	8
3.3 Muut kolonnityypit	10
3.4 Kolonnityypin valinta	11
3.5 Monivaiheinen absorptio	12
4 KEMIKAALIT	13
4.1 Hiilidioksidi	13
4.2 Monoetanoliamiini	14
5 TEOREETTISET KAAVAT	15
6 TYÖN SUORITUS	18
6.1 Koelaitteisto ja analyysit	18
6.2 Koeajot	23
6.3 Tulosten analysointi	26
7 TULOSTEN TARKASTELU	31
7.1 Pohjakiehuhtimen levyjenmäärän ja höyrynpaineen vaikutus kolonnin toimivuuteen	31
7.2 Virtaus	36
8 YHTEENVETO	40
LÄHTEET	42
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Satunnaiseen järjestykseen asettuvia täytekappaleita sisältävä kolonni.	5
KUVIO 2. Työssä käytetyn laitteiston Raschig-renkailla täytetty absorptiokolonni.	6
KUVIO 3. Erilaisia strukturoituja täytekappalemoduuleja (a) ja täytekappaleita (b).	7
KUVIO 4. Välipohjakolonni.	9
KUVIO 5. Välipohjatyypit vasemmalta oikealle: reikäpohja, venttiilipohja ja kellopohja.	10
KUVIO 6. Erilaisia kolonnityyppejä: Spraykolonni (a), kuplakolonni (b) ja keskipaikoisvoimalla toimiva laitteisto (c).	11
KUVIO 7. Työssä käytetty monoetanoliamiini.	14
KUVIO 8. Absorptio-desorptiolaitteiston virtaukset ja laskuissa käytettävät symbolit.	15

KUVIO 9. Työssä käytetty absorptio-desorptiolaitteisto.	18
KUVIO 10. Laitteiston näyttöpäätte, höyrynkehitin, pumppu ja esilämmittimen säätöpaneeli.	19
KUVIO 11. Laitteiston pohjakiehutin ja lämmönvaihdin.	20
KUVIO 12. Prosessikaavio laitteistosta.	21
KUVIO 13. Analyysilaitteisto.	22
KUVIO 14. Höyrynpaineen vaikutus puhdistustehokkuuteen.	32
KUVIO 15. Tehonkulutus eri höyrynpaineilla.	33
KUVIO 16. Höyrynpaineen vaikutus poistotehoon.	35
KUVIO 17. CO ₂ puhdistustehokkuus eri parametreilla.	36
KUVIO 18. Desorptiokolonnin teho eri parametreilla.	37
KUVIO 19. CO ₂ poistotehokkuus.	38

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Ajoarvot.	23
TAULUKKO 2. Koeajotulokset.	26
TAULUKKO 3. Ajoarvoja ja lauhteen keskiarvot.	27
TAULUKKO 4. Taloudellisuus puhdistustehokkuuden suhteen.	33
TAULUKKO 5. Taloudellisuus poistotehon suhteen.	35
TAULUKKO 6. Puhdistustehokkuus eri ajoarvoilla.	40
TAULUKKO 7. Poistoteho eri ajoarvoilla.	41

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia Centria-ammattikorkeakoulun prosesilaboratoriossa sijaitsevan absorptio-desorptiolaitteiston desorptiokolonnin CO₂-puhdistuskapasiteetin nostoa eri ajoarvoilla. Tutkittaviksi ajoarvoiksi valittiin nestevirtaus, höyrynpaine sekä pohjakiehuttimen levymäärä.

Opinnäytetyön tekeminen aloitettiin tammikuussa 2015, ja toimeksiantajana toimi Centria-ammattikorkeakoulu. Työ suoritettiin kahden opiskelijan voimin, kokeellisen osuuden haastavuuden vuoksi. Opinnäytetyön aihetta ehdotettiin, kun aikaisemmin kyseisestä laitteistosta tehtyjen opinnäytetöiden perusteella todettiin CO₂-puhdistuskapasiteetin olevan lähes sama ajoarvoista riippumatta.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsiteltiin absorptiota ja desorptiota ilmiönä, sekä niihin liittyviä käsitteitä, laitteistoa ja työssä käytettyjä kemikaaleja. Tarkemman tutkinnan kohteena olivat erilaiset kolonnit ja niissä käytettävät täytekappaleet. Tulosten tarkastelusta tuli ilmi optimaaliset ajoarvot kustannustehokkaaseen sekä puhdistustehokkaaseen laitteiston käyttöön

2 ABSORPTIO–DESORPTIO

Absorptio on yleensä hitaasti tapahtuva komponentin siirtyminen kaasusta nesteeseen (Pihkala 2001, 105). Sitä käytetään erottamaan kaasuseoksista epäpuhtauksia tai haluttuja aineita (Henley, Seader & Roper 2011, 223). Aineen siirtymiseen kaasusta nesteeseen vaikuttaa moni tekijä, kuten vallitsevat olosuhteet, aineominaisuudet sekä nesteen ja kaasun rajapinnan suuruus. Liuottaminen tapahtuu yleensä prosessiin suunnitellussa laitteistossa, jossa kaasu ja neste virtaavat vastavirtaan toisiinsa nähden. Fysikaalisessa absorptiossa kaasun liukeneminen nesteeseen ei aiheuta kemiallista reaktioita, mutta kemiallinen reaktio nesteen ja kaasun välillä on myös mahdollinen absorptiossa ja silloin sitä kutsutaan kemialliseksi absorptioksi. (Pihkala 2001, 105.)

Absorptioprosessiin voidaan vaikuttaa esimerkiksi painetta kasvattamalla, jolloin prosessi nopeutuu. Myös konsentraatio vaikuttaa prosessiin. Suuri konsentraatioero nesteen ja kaasun välillä vaikuttaa samaan tapaan kuin paineen nostaminenkin, eli nopeuttaa prosessia. Halutun kaasun konsentraatio nesteessä ja kaasuseoksessa määrittää absorboituvan kaasun määrän. Kolmas absorptiota parantava keino on alentaa nesteen tai kaasun lämpötilaa. Absorptio on mahdollista suorittaa myös selektiivisesti, jolloin vain tietty kaasu absorboituu. (Pihkala 2001, 105.)

Desorptio on absorption käänteinen toiminto (McCabe, Smith & Harriot 1993, 686). Desorptiota käytetään usein absorboituneen seoksen regenerointiin. Regeneroinnissa absorboitunut seos puhdistetaan siihen liuenneesta kaasusta, jolloin neste voidaan johtaa takaisin absorptiokolonniin. Samalla saadaan haluttu kaasu erilleen seoksesta puhtaammassa muodossa. Desorptiota voidaan tehostaa muuttamalla olosuhteita päinvastoin absorptioon nähden, eli nostamalla lämpötilaa tai madaltamalla painetta. Absorptiossa ja strippauksessa eli desorptiossa eräs merkittävimmistä kuluista tulee käytetystä höyrystä. Monesti prosessi suunnitellaankin siten, että se kuluttaisi mahdollisimman vähän höyryä, jolloin stripperi toimii vain vähän

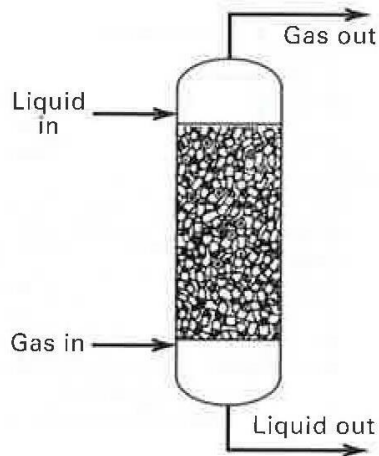
höyrystymispisteen yläpuolella. Tämän seurauksena osa absorboituneesta aineesta jää regeneroituun nesteeseen, koska on edullisempaa olla yrittämättä strippata kaikkea absorboitunutta ainetta seoksesta. (McCabe ym. 1993, 711.)

3 LAITTEISTO

Absorptioon ja strippaukseen käytetyt laitteistot ovat enimmäkseen välipohja- tai täytekappalekolonneja (Henley ym. 2011, 225). Näiden yleisesti käytettyjen laitteistojen lisäksi on olemassa myös muita yksikköprosessiin sopivia laitteistoja sekä erilaisia menetelmiä. Jokaisella laitteistolla ja menetelmällä on omat ominaisuutensa, mutta käytössä edullisin vaihtoehto on jatkuvatoiminen prosessi, jossa on vastavirtaus laitteiston läpi. Yhtenä lajittelumenetelmänä laitteistoille voidaan pitää faasien välisten kosketuspintojen laajuutta. Tämän lajittelumenetelmän avulla laitteistot voidaan jakaa useampaan kategoriaan. (Pihkala 2001, 105.) Välipohja- ja täytekappalekolonnien lisäksi on olemassa myös spray-kolonne, kuplakolonne ja keskipakoisvoimalla toimiva laitteisto. Spray-kolonnissa neste suihkutetaan kolonniin sumuna ja johdetaan kaasun kanssa kosketuksiin. Kuplakolonnin toimintaperiaate on varsin yksinkertainen. Siinä kaasu syötetään nesteellä täytettyyn kolonniin alaosasta, josta se nousee kuplina kohti kolonnin yläosaa. Keskipakoisvoimalla toimiva laitteisto käyttää hyväkseen melko suuria aineensiirtoarvoja. (Henley ym. 2011, 228.)

3.1 Täytekappalekolonnit

Täytekappalekolonniin nesteen syöttö tapahtuu kolonnin yläosasta, ja se valuu kolonnin sisällä olevien täytekappaleiden läpi. Vastaavasti kolonnin alaosasta syötettävä kaasu pyrkii kulkemaan täytekappaleiden pintoja pitkin vastavirtaan nesteseen nähden. Neste pyritään syöttämään kolonnin yläosasta niin, että se jakautuu mahdollisimman tasaisesti arinalle asetettujen täytekappaleiden päälle. Absorptio saadaan tehokkaaksi, kun syötetty neste saadaan valumaan tasaisesti kolonnin koko pinta-alan laajuudelta, jolloin nesteen ja alaosasta syötettävän kaasun kosketuspinta on mahdollisimman suuri. (Pihkala 2001, 106.)



KUVIO 1. Satunnaiseen järjestykseen asettuvia täytekappaleita sisältävä kolonni (Henley ym. 2011, 225.)

Absorption tehottomuus voi johtua kanavoitumisesta, joka aiheuttaa heikon kosketuspinnan nesteen ja kaasun välille. Kanavoituminen johtuu nesteen tai kaasun epätasaisesti jakautuneesta syötöstä. Kanavoitumisen lisäksi täytekappalekolonnissa on myös toinen mahdollinen riskitekijä, kolonnin tulviminen. Kolonnin tulvimisen aiheuttaa kaasun paine, joka on kyseisellä hetkellä suurempi kuin nesteen hydrostaattinen paine. Näin neste ei pääse kulkeutumaan kohti kolonnin alaosaan, vaan kaasun paine puskee sen takaisin kohti kolonnin yläosaan ja kolonni alkaa tulvimaan. (Pihkala 2001, 106.)

3.1.1 Täytekappaleet

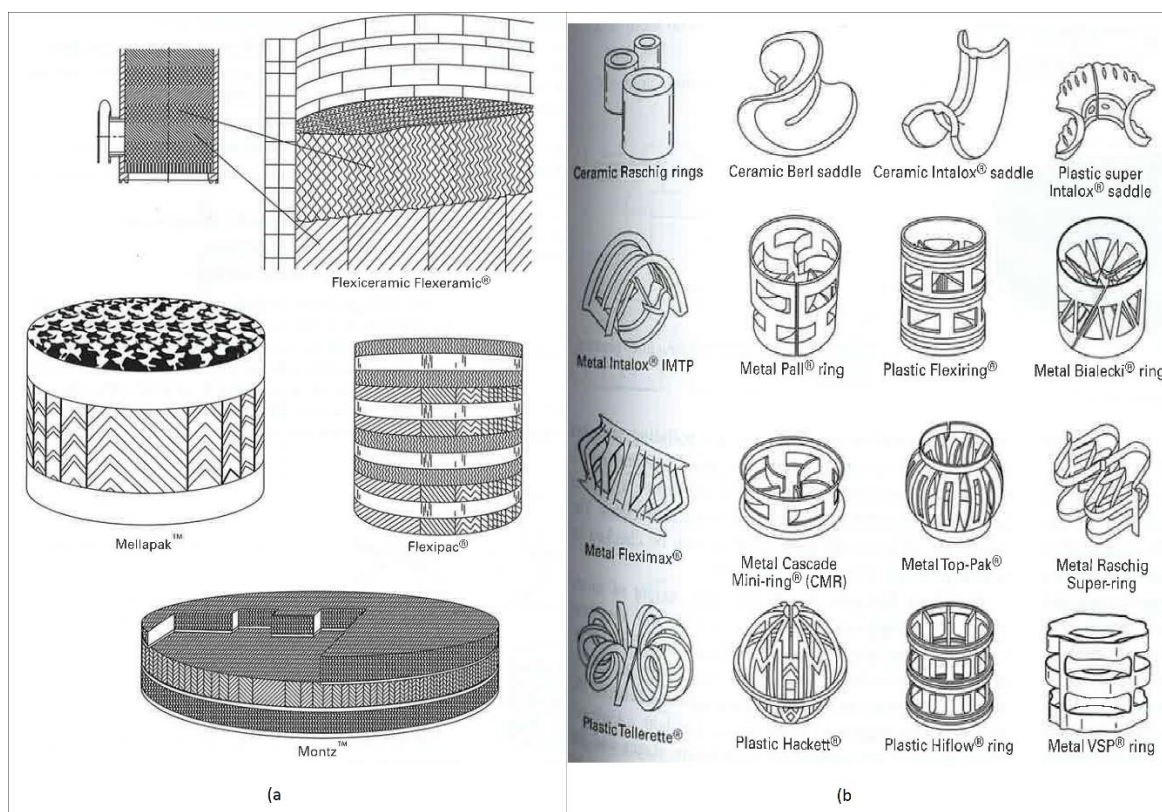
Täytekappaleita valittaessa tehdään valinta satunnaiseen järjestykseen asettuvien, aseteltujen eli systemaattisesti pakattujen ja strukturoitujen kappaleiden väliltä. Täytekappaleiden perimmäinen tarkoitus on lisätä kontaktipinta-alaa nesteen ja kaasun välillä. Satunnaiseen järjestykseen asettuvat kappaleet voidaan vain kaataa kolonniin, kun taas systemaattisesti pakatuista ja strukturoidut kappaleet täytyy asettaa yksi kerrallaan paikalleen. Systemaattisesti pakatuista täytekappaleista yleisimpänä toimivat pinotut täytekappaleet, joita pinotaan kolonniin vierekkäin sekä päällekkäin (Borg 2014a, 1-2). Esimerkkinä satunnaiseen järjestykseen asetetuista kappaleista

ovat keraamiset, onton sylinterin muotoiset Raschig-täytekappaleet, joita on käytetty jo 1900-luvun alusta asti. Lisäksi ennen on käytetty laajasti myös satulanmuotoisia Bearl-täytekappaleita.



KUVIO 2. Työssä käytetyn laitteiston Raschig-renkailla täytetty absorptiokolonni

Nykyään molemmat on korvattu laajalti uudemmissa muovisilla tai metallisilla täytekappaleilla, jotka omaavat suuremman pinta-alan aineensiirrolle sekä korkeamman virtauskapasiteetin. Samalla myös painehäviö pienenee. Nykyään on kehitetty myös ristikonmallisia täytekappaleita, jotka voivat olla joko muovisia, metallisia tai keraamisia. Ne tarjoavat suurempia aineensiirtoarvoja sekä pienempiä painehäviöitä. Kun täytekappaleen koko suurenee, niin aineensiirtotehokkuus sekä painehäviö pienenevät, joten täytekappaleelle on olemassa optimaalinen koko. Kanavoitumisen minimoimiseksi tulisi täytekappaleen koko olla enimmillään kahdeksasosa kolonnin halkaisijasta. (Henley ym. 2011, 227.)



KUVIO 3. Erilaisia strukturoituja täytekappalemoduuleja (a) ja täytekappaleita (b) (Henley ym. 2011, 229–230.)

Neljännän sukupolven täytekappaleet, kuten Raschig super-rings tai Fleximax ovat rakenteeltaan avoimia ja aaltomaisia kappaleita, jotka edesauttavat kosteuttavaa turbulenttista liikettä. Sen seurauksena painehäviö madaltuu ja aineensiirron tehokkuus paranee. Metalliset täytekappaleet ovat suosittuja, koska ne ovat kestäviä ja niillä on hyvät kosteutusominaisuudet. Huonona puolena on kallis hinta. Keraamisilla täytekappaleilla on myös hyvät kosteutusominaisuudet, mutta vastaavasti huono iskukestävyys. Niitä käytetäänkin korroosiota aiheuttavissa olosuhteissa ja korkeissa lämpötiloissa. Muoviset täytekappaleet ovat yleensä valmistettu polypropyleenista. Ne ovat halpoja ja riittävän kestäviä, mutta niillä on vastaavasti huonot kosteutusominaisuudet alhaisilla nestevirroilla. Strukturoidut kappaleet voivat olla aaltomaisia metalliverkkokappaleita tai uudempia ja edullisempia moduulikappaleita, jotka ovat valmistettu metalleista ja muoveista. Ne ovat rei'itettyjä, kohokuvioituja tai karhennettuja, joissa on erikokoisia aukkoja kerrosten välissä ja ne asetel-

laan käsin kolonniin. Vaikka kyseiset moduulikappaleet ovat huomattavasti kalliimpia kuin satunnaiseen järjestykseen asettuvat, tuottavat ne pienemmän painehäviön, suuremman tehokkuuden ja kapasiteetin. (Henley ym. 2011, 227–228.)

3.1.2 Nesteenjakaajat

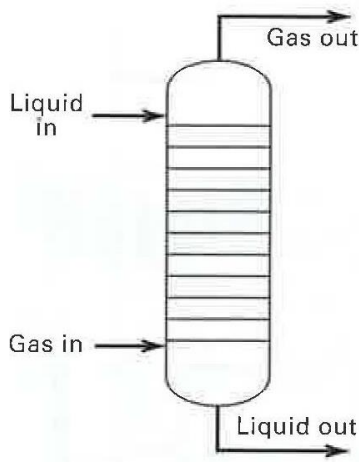
Täytekappaleiden lisäksi nesteenjakaajat ovat suuressa roolissa täytekappalekolonnista puhuttaessa. Nesteenjakaaja sijaitsee kolonnin yläosassa, josta se jakaa nesteen täytekappaleiden päälle. Täytekappaleiden ja koko kolonnin toimivuus ja tehokkuus riippuu nesteenjakaajasta. Sitä valittaessa on kiinnitettävä huomiota nestevirtauksiin, likaavuuksiin ja turn-down vaatimuksiin.

Vapaalla virtauksella toimivia jakajia ovat esimerkiksi V-aukkojakajat, jotka kestävät likaavuutta ja suuren turn-down suhteen. Toinen malli on kanavajakaja, jonka jakolaatikkoon on kiinnitetty putkia. Putkien avulla neste saadaan ohjattua suoraan alaspäin. Putkia hyödyntävä jakaja ja kanavajakaja, jonka jakoreiät sijaitsevat laatikon pohjassa ovat herkkiä likaantumiselle. Kanavajakajien lisäksi on olemassa putkijakajia, joiden etu on pieni painehäviö. Putkijakajilla on kuitenkin heikko turn-down suhde ja lisäksi ne eivät suosi kiintoainetta sisältäviä nesteitä. Vapaalla virtauksella toimiville jakajille löytyy vaihtoehto paineellisella nesteellä toimivista jakajista. Paineellisella nesteellä toimivat spray-jakajat toimivat suuttimien avulla. Spray-jakajien toimivuuden mahdollistaa nesteen puhtaus sekä alle 1 baarin paine-ero. (Borg 2014a, 3–4.)

3.2 Välipohjakolonnit

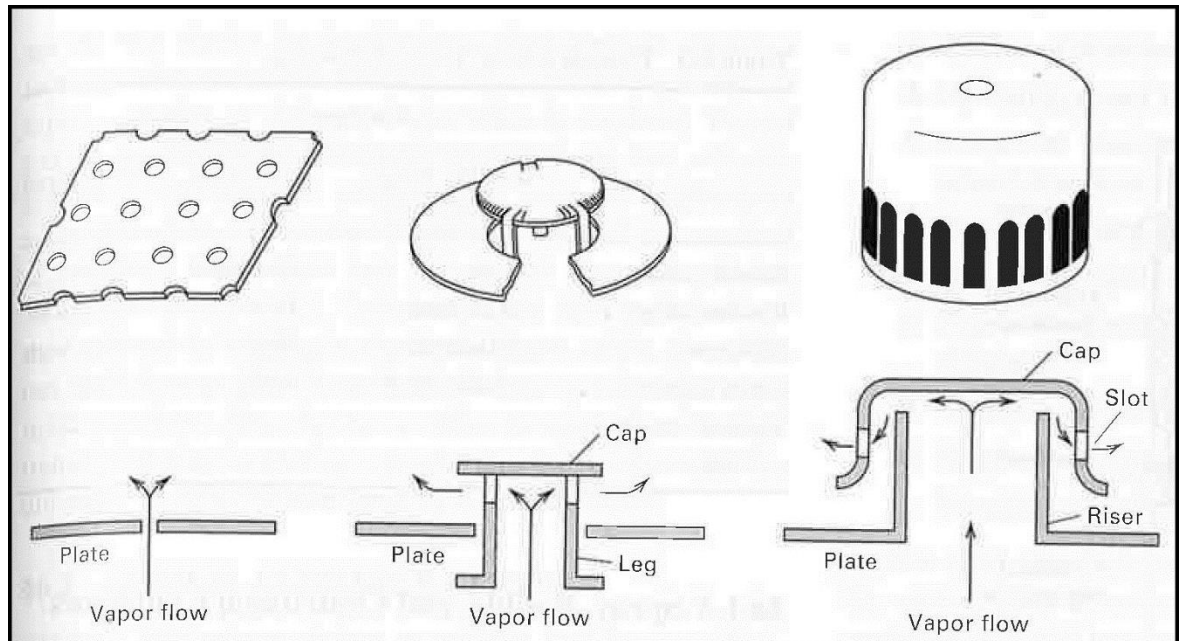
Välipohjakolonniissa on samankaltainen toimintaperiaate kuin täytekappalekolonnissa, eli kaasu syötetään alaosasta ja neste yläosasta, jolloin ne virtaavat vastavirtaan toisiinsa nähden (Pihkala 2001, 106). Välipohjakolonniissa täytekappaleiden tilalle on aseteltu välipohjia, joiden aukoista kaasu pyrkii nousemaan kohti yläosaa.

Välipohjia on muutamia erilaisia vaihtoehtoja ihan kuin täytekappalekolonnissa täytekappaleita. Jokaisella välipohjalla on omanlaisensa ulostulo niin kaasulle kuin nesteellekin. Kaasun noustessa välipohjassa sijaitsevien aukkojen läpi välipohjan pinnalle, luo välipohja hyvän kontaktipinta-alan aineiden absorboitumiselle. Aineiden hyvä kontaktipinta-ala nopeuttaa aineensiirtoa. (Henley ym. 2011, 225.)



KUVIO 4. Välipohjakolonne (Henley ym. 2011, 225.)

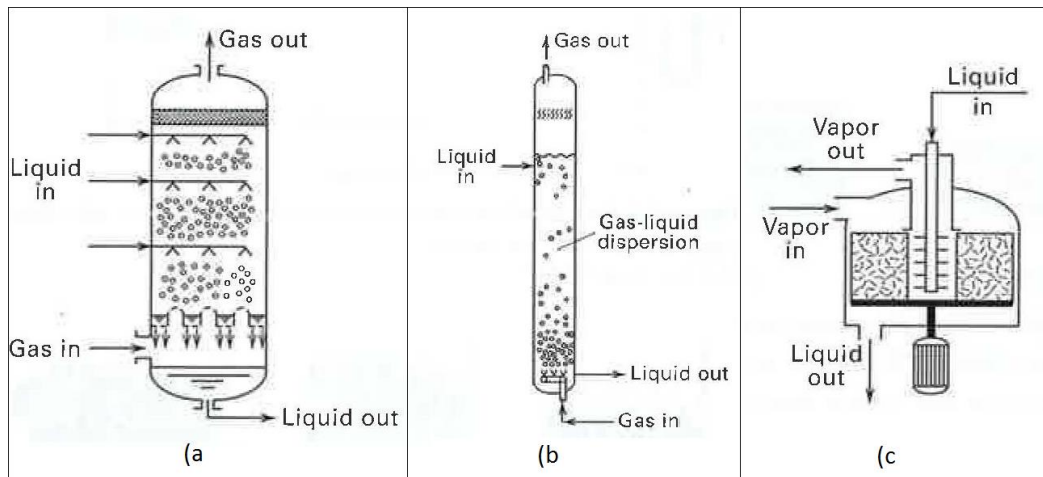
Välipohjissa on käytetty muutamaa erilaista mallia kaasun läpivirtaamiseksi. Reikäpohja on kaikista yksinkertaisin malli, siinä kaasu nousee välipohjan läpi noin 0,3–1,3 cm halkaisijaltaan olevien reikien kautta. Toinen käytetty malli on venttiilipohja. Siinä kaasulle on tehty 2,5–5 cm halkaisijaltaan olevia venttiileitä, jotka koostuvat reiästä sekä reiän päällä olevasta hatusta. Hatussa on jalat tai häkki, jonka tarkoitus on rajoittaa hatun liikettä vaakasuoraan suuntaan. Kun venttiilit ovat lepotilassa, eli kolonniin ei syötetä kyseisellä hetkellä kaasua, peittävät ne välipohjissa olevat aukot. Kaasua syötettäessä kolonniin, venttiilit nousevat ylöspäin ja näin kaasulle tarjoutuu suurempi pinta-ala virrata ja muodostaa vaahtoa. Kolmas käytetty välipohjmalli on kellopohja, joka koostuu n. 7,5–15 cm halkaisijaltaan olevista hatuista. Hattut on laitettu noin 5–7,5 cm kokoisen pystyputken päälle. Hattuun on tehty suorakulmion tai kolmion muotoisia aukkoja. Kaasu virtaa välipohjan reikien läpi putkeen, jossa se muuttaa suuntaa ja virtaa hatussa olevien aukkojen läpi nesteeseen, missä se muodostaa vaahtoa. (Henley ym. 2011, 226.)



KUVIO 5. Välipohjatyypit vasemmalta oikealle: reikäpohja, venttiilipohja ja kellopohja (Henley ym. 2011, 227.)

3.3 Muut kolonnityypit

Muita käytettyjä, mutta harvinaisempia kolonnityyppejä ovat mm. spray-kolonnit, joissa neste suihkutetaan kolonniin sumuna ja johdetaan kaasun kanssa kosketuksiin. Tätä menetelmää käytetään kun halutaan mahdollisimman pieni painehäviö ja haluttu aine on helposti liukeneva. Kuplakolonne toimii siten, että kolonne on täytetty lähes kokonaan nesteellä ja sinne syötetään kaasua kolonnin alaosasta, josta se nousee kuplina kohti kolonnin huippua. Kuplakolonnissa on suuri painehäviö ja pieni kaasunläpisyttö. Kuplakolonne on melko epäkäytännöllinen ja se soveltuukin lähinnä sellaisten aineiden absorbointiin, joilla on matala liukeneminen tai pitkä kemiallinen reaktioaika, joka vaatii pitkän viipymääajan. Keskipakoisvoimalla toimivat absorptiolaitteet koostuvat kiinteästä ympyränmallisesta kotelosta, joka on lomittain ympyränmuotoisen pyörivän osan kanssa. Neste syötetään lähelle laitteen keskiosaa, josta se lentää ulospäin kohti laitteen ulkolaitoja. Vastaavasti kaasu syötetään laitteen ulkolaidalta sisään. Tällöin voidaan saavuttaa melko suuria massavirtoja. Laitte on kätevä vain silloin, kun on tilanpuutetta, koska se on myös sopiva esimerkiksi tislaukseen. (Henley ym. 2011, 228.)



KUVIO 6. Erilaisia kolonnityyppejä: Spraykolonni (a), kuplakolonni (b) ja keskipa-koisvoimalla toimiva laitteisto (c)

3.4 Kolonnityypin valinta

Laitteistoa suunniteltaessa valinnat tehdään yleensä tätekappale- ja välipohjakolonnin väliltä. Kolonnin valintaan vaikuttaa useampi asia. Tätekappalekolonnia tulisi käyttää jos kolonnin halkaisija on alle 60 cm ja korkeus alle 6 metriä. Tätekappalekolonnin hyödyksi voidaan laskea tätekappaleiden korroosiokestävyys sekä vaahtominen, kun se on liian suurta välipohjakolonnille. Muutoin valitaan yleensä välipohjakolonni, koska se on helpompi suunnitella. (Henley ym. 2011, 228.)

Tätekappalekolonnit, missä tätekappaleet ovat järjestettyjä, sopivat parhaiten sellaisiin tapauksiin, joissa painehäviö on merkitsevä tekijä. Lisäksi järjestelmällisillä tätekappaleilla voidaan korvata välipohjakolonnissa käytetyt välipohjat ja näin parantaa kolonnin kapasiteettia tai erotustehokkuutta. Tätä kutsutaan termillä ”retrofitting”. Välipohjakolonneja käytetään myös silloin, kun nesteen nopeus on alhainen, kun taas satunnaispakattu tätekappalekolonni on parempi korkeanopeuksisille nesteille. Voidaan todeta, että jatkuva kaasuvirta on rajoittava tekijä tätekappalekolonneissa ja jatkuva nestevirtaus on rajoittava tekijä välipohjakolonneissa. (Henley ym. 2011, 228–229.)

3.5 Monivaiheinen absorptio

Absorptio tehokkuutta voidaan nostaa kytkemällä absorptiokolonneja sarjaan, jos yhden kolonnin avulla ei saada haluttua määrää absorboitumaan. Kuten aiemmin mainittiin, nesteen syöttö tapahtuu kolonniin sen yläosasta ja kaasun syöttö vastavasti alaosasta. Tämän seurauksena sarjaan kytkettyjen kolonnien väliin on vedettävä linjat nesteelle ja kaasulle siten, että edellisen kolonnin läpi kulkenut neste vietään alaosasta takaisin seuraavan kolonnin yläosaan, josta neste syötetään kolonniin. Kaasulle vedettävät linjat vedetään juuri päinvastaisesti, eli edellisen kolonnin yläosasta seuraavan kolonnin alaosaan. On myös mahdollista tehdä jokaiselle kolonnille oma sisäinen kierto suuremmalle määrälle nestettä ja kierrättää pienempää määrää nestettä kolonnista kolonniin. Tämä auttaa suuremman kosketuspinnan saamista kolonneissa, jos kolonnista kolonniin kiertävä nestemäärä ei riitä suuren kosketuspinnan saamiseen ja näin tehokkaampaan absorboitumiseen. (Pihkala 2001, 107.)

4 KEMIKAALIT

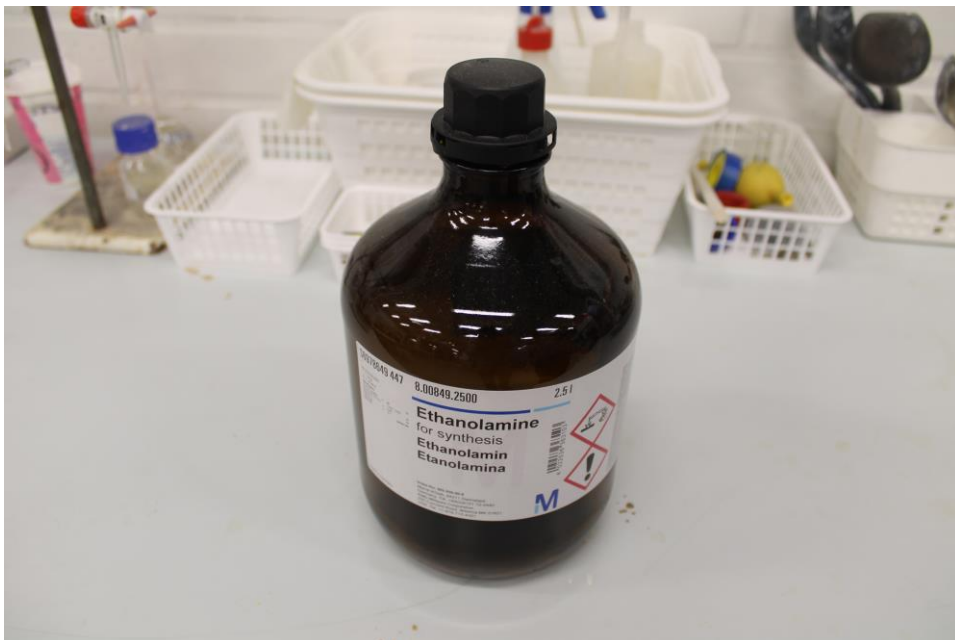
Absorptio-desorptiolaitteistoa ajettaessa käytetään hyödyksi erilaisia kemikaaleja, joita tarvitaan laitteiston toimintaan. Absorptio perustuu kaasuseoksen puhdistamiseen absorptioreagenssilla, johon kaasusta tarttuvat ei halutut tai vastaavasti halutut komponentit. Näin kaasu saadaan puhtaampana ulos kolonnista. Kaasuseoksena käytetään yleisesti hiilidioksidia ja vastaavasti absorptioreagenssina MEA:ta eli monoetanoliamiinia. Molemmille kemikaaleille on kuitenkin olemassa erilaisia vaihtoehtoja. Valinta absorptioreagenssien väliltä määräytyy käytettävän kaasuseoksen perusteella. Desorptiossa käytettävä inertti kaasu on yleisimmin höyryä ja sen kulutus pyritään pitämään mahdollisimman pienenä, koska höyrystä aiheutuu merkittäviä taloudellisia kustannuksia. Inertin kaasun avulla absorptioreagenssi saadaan puhdistettua siihen liuenneista kaasuista.

4.1 Hiilidioksidi

Hiilidioksidi esiintyy huoneenlämpötilassa kaasuna. Sen molekyylikaava on CO_2 ja se on väritön ja lähes hajuton kemiallinen yhdiste, joka kuuluu inertteihin kaasuihin. Rakenteeltaan hiilidioksidimolekyylissä on kaksi happiatomia liittyneenä yhteen hiiliatomiin kaksoissidosten avulla. Vapaana hiilidioksidia esiintyy kaasun lisäksi myös kiinteänä hiilidioksidijäänä eli kuivajäänä. Hiilidioksidi liukenee niukasti veteen, mutta paremmin joihinkin orgaanisiin liuottimiin kuten etanoliin tai tolueeniin. Glukoosin käyminen ja kalsiumkarbonaatin terminen hajottaminen ovat esimerkkejä hiilidioksidin valmistamisesta teollisessa mittakaavassa. Myös arkisista olosuhteista löytyy esimerkkejä, kuten hiilen tai hiilyhdisteiden palaminen runsaassa ilmassa, joiden lopputuotteena saadaan hiilidioksidia (Laitinen & Toivonen 2007, 201). Käyttökohteita hiilidioksidille teollisuudessa on esimerkiksi elintarvikkeiden säilöminen ja erilaisten juomien hapottaminen. Lisäksi sitä voidaan käyttää erilaisten teollisuusvesien käsittelyyn sekä palosammutukseen. (Työterveyslaitos 2014.)

4.2 Monoetanoliamiini

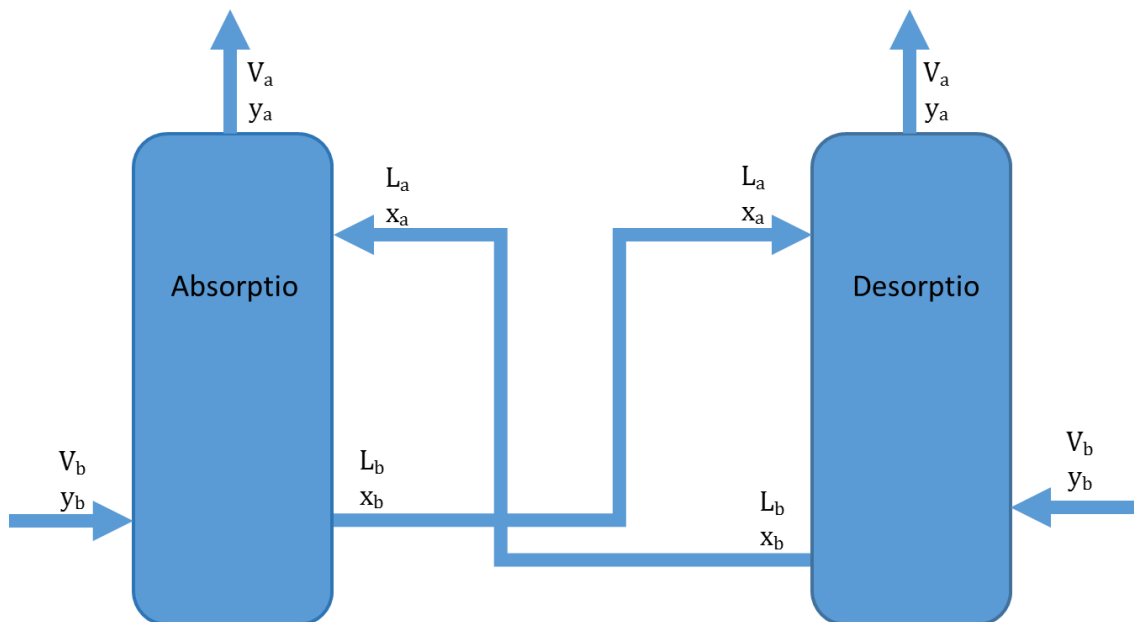
Prosessissa voidaan käyttää absorptioreagenssina MEA:ta eli monoetanoliamiinia, jonka kemiallinen kaava on $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$. Yleensä noin 30 m-% osuus MEA:ta reagenssiliuoksessa takaa hyvän absorptiokyvyn sekä kestävämmän liuoksen. MEA on suositumpi absorptioreagenssi kuin muut amiinit, koska sillä on korkea reaktiivisuus hiilidioksidin kanssa. MEA:lla on pieni moolimassa, joten sillä on erittäin suuri hiilidioksidin absorptiokyky massayksikköä kohden ja tällöin se pienentää myös reagenssin virtausta. Lisäksi MEA:ta on helppo valmistaa, se on halpaa ja laajasti teollisuudessa käytettyä. MEA:lla on korkea entalpia reaktiossa hiilidioksidin kanssa, jolloin se suurentaa kuluja merkittävästi, koska kyseinen energia täytyy palauttaa reagenssin regenerointivaiheessa. MEA:n korkea höyrystymispiste sekä voimakas korrosoituminen aiheuttavat reagenssihäviötä. (Lecomte, Broutin & Lebas 2010, 53.)



KUVIO 7. Työssä käytetty monoetanoliamiini

5 TEOREETTISET KAAVAT

Täytekkapalekolonnin halkaisijaan vaikuttavat neste- ja kaasuvirtaamien suhde sekä niiden ominaisuudet. Korkeuteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat mm. haluttu konsentraatioero sekä aineensiirtonopeus. Kolonnin korkeuden laskemiseen käytetään aine- ja entalpiataseita, sekä ajopotentiaaleja ja aineensiirron kertoimia. Differentiaalikäytössä kolonnin pitoisuudet muuttuvat jatkuvasti. Se pätee täytekkapalekolonnille. Välipohjakolonnissa muutos ei ole jatkuva, vaan se etenee vaiheittain. (Borg 2014a, 9.)



KUVIO 8. Absorptio-desorptiolaitteiston virtaukset ja laskuissa käytettävät symbolit

Kokonaistase voidaan laskea kaavalla:

$$L_a \cdot x_a + V_b \cdot y_b = L_b \cdot x_b + V_a \cdot y_a$$

missä:

Moolivirtaamat:

V_a = Kolonnista poistuva kaasu

V_b = Kolonniin tuleva kaasu

L_a = Kolonniin tuleva neste

L_b = Kolonnista poistuva neste

Mooliosuudet:

y_a = Kolonnista poistuva kaasu

y_b = Kolonniin tuleva kaasu

x_a = Kolonniin tuleva neste

x_b = Kolonnista poistuva neste

Kolonnin virtauksissa kaasujen yksikkönä on kg/h ja nesteiden yksikkönä l/min. Mooliosuuksien yksikkönä ovat prosentit. (Borg 2014b, 2.)

Käyttösuoran yhtälö:

$$y = \frac{L}{V} \cdot x + \frac{V_a \cdot y_a - L_a \cdot x_a}{V}$$

x ja y ovat nesteen ja kaasun päävirtaaman keskimääräiset pitoisuudet missä tahansa kolonnin poikkileikkauksen kohdassa. Käyttösuoran keskimääräinen kulmakerroin on L/V eli nesteen ja kaasun moolivirtaamien suhde. Kun nestevirtaamaa pienennetään tietyllä kaasuvirtauksella, niin käyttösuoran kulmakerroin pienenee. L/V :n suhde on taloudellisesti tärkeä esimerkiksi vastavirtaperiaatteella toimivalle absorptiokolonnille. $y-y^*$ on aineensiirtoon vaikuttava voima, joka on verrannollisesti riippuva käyttöviivan ja tasapainokuvaajan pystysuoraan etäisyyteen. Jos L/V :n suhdetta kasvatetaan, silloin konsentraatio kasvaa ja aineensiirto tehostuu kaikkialla paitsi kolonnin huipulla. (Borg 2014a, 10–11.)

Täytekappalekolonnin korkeuteen vaikuttaa absorptionopeus. Absorptionopeuteen vaikuttavia tekijöitä vastaavasti ovat neste- ja kaasufaasin välinen aineensiirron nopeus. Kolonnin korkeus voidaan laskea yhtälöllä:

$$N = \frac{V \cdot dy}{S \cdot dZ}$$

missä:

N = Kaasupuolen aineensiirron nopeus nestefaasiin, yksikkö on $\frac{mol}{s \cdot m^3}$

V = Kaasun moolivirtausnopeus, joka oletetaan vakioksi

S = Kolonnin poikkipinta-ala

Z = Täytekappalekerroksen korkeus

Järjestelemällä yhtälön termit ja lisäämällä siihen kaasupuolen kokonaisaineensiirtokerroin, saadaan yhtälö:

$$Z_T = \int_0^Z dZ = \frac{V}{S} \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{K_y a \cdot (y - y^*)}$$

missä:

K_{ya} = Kaasupuolen kokonaisaineensiirtokerroin

y = Kaasun pitoisuus tarkastelupisteessä

y^* = Kaasun tasapainopitoisuus tarkastelupisteessä

Kyseinen kaava voidaan muokata muotoon:

$$Z_T = \frac{V/S}{K_y a} \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

josta voidaan edelleen muokata kaava:

$$N_{Oy} = \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(y - y^*)}$$

Integraalitermi kuvaa kaasufaasin pitoisuuden muutosta jaettuna keskimääräisellä ajopotentialilla. Integraalitermiä voidaan kutsua myös siirtoyksiköiden kokonaisuudeksi eli NTU:ksi (number of transfer units). (Borg 2014b, 4-6.)

Siirtoyksikön korkeus voidaan laskea kaavalla:

$$H_{Oy} = \frac{V/S}{K_y a}$$

Yhdistelemällä kaavoja voidaan muodostaa täytekappalekerroksen korkeuden yhtälö:

$$Z_T = H_{Oy} \cdot N_{Oy}$$

6 TYÖN SUORITUS

Työ suoritettiin Centria Ammattikorkeakoulun prosessilaboratoriossa sijaitsevalla absorptio-desorptiolaitteistolla. Koeajojen valmisteluissa kesti useampi viikko, mutta varsinaiset koeajot kestivät noin viikon verran. Koeajoja eli näytesarjoja ajettiin yhteensä 12 kappaletta ja lähes jokainen näytesarja piti sisällään kolme erillistä näytteen analysointia tulosten varmistamiseksi.



KUVIO 9. Työssä käytetty absorptio-desorptiolaitteisto

6.1 Koelaitteisto ja analyysit

Työssä käytetty koelaitteisto koostuu absorptiokolonnista sekä desorptiokolonnista ja niiden välissä sijaitsevasta lämmönvaihtimesta. Lisäksi laitteistoon kuuluu höyrykehitin sekä pohjakiehutin. Kolonnien tekniset tiedot poikkeavat toisistaan varsin paljon. Absorptiokolonnin halkaisija on 100 mm, joka on 20 mm suurempi kuin

desorptiokolonnin halkaisija. Myös täytekappaleet ovat erilaiset. Absorptiokolonnissa täytekappaleina toimivat Raschig-renkaat, joiden halkaisija on 10 mm ja vastaavasti desorptiokolonnissa strukturoidut Mellapak M 350 Y täytekappaleet. Täytekappalekerroksen korkeus absorptiokolonnissa on 1700 mm ja desorptiokolonnissa 850 mm. Laitteistoon kuuluu myös esilämmitin, jonka tehoa saa säädettyä porrastetusti 2, 4 tai 6 kW:n. Laitteistoa ohjataan kosketusnäytöllä toimivalta näyttöpäätteeltä.

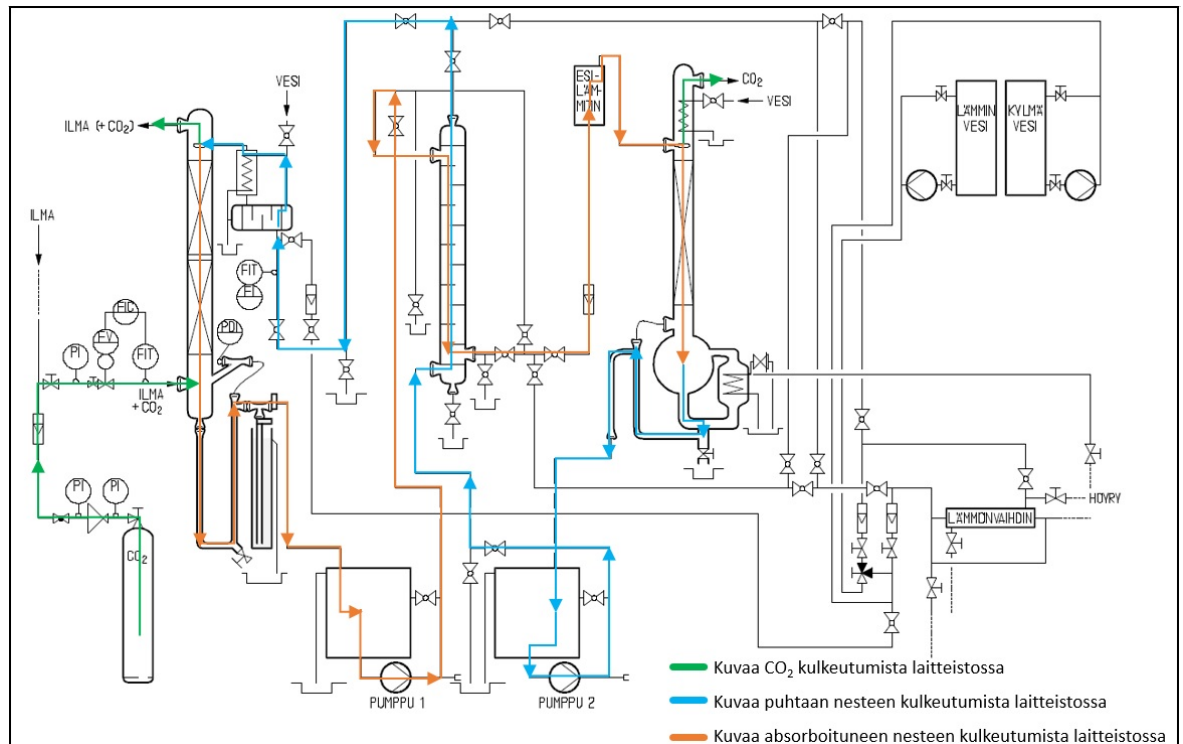


KUVIO 10. Laitteiston näyttöpäätte, höyrynkehitin, pumppu ja esilämmittimen säätöpaneeli



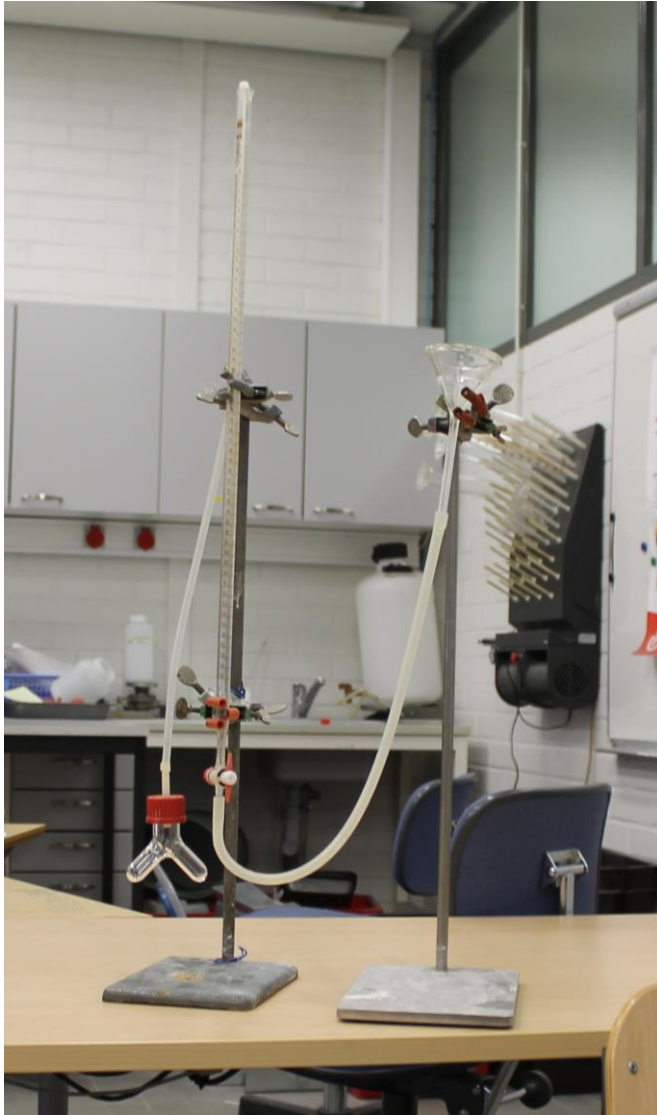
KUVIO 11. Laitteiston pohjakiehutin ja lämmönvaihdin

Laitteistossa MEA-liuos syötetään absorptiokolonnin huipulle. Absorptiokolonniin syötetään alhaalta hiilidioksidia, jolla MEA-liuos kyllästetään. Kyllästetty liuos jatkaa matkaansa kolonnin alaosasta välisäiliön kautta kolonnien välissä sijaitsevaan lämmönvaihtimeen. Lämmönvaihtimesta liuos jatkaa edelleen matkaansa esilämmittimen kautta desorptiokolonnin huipulle. Desorptiokolonnissa liuos puhdistetaan höyrykehittimestä saadun höyryn avulla hiilidioksidista, jolloin hiilidioksidi poistuu laitteistosta kolonnin huipulta ja puhdistettu liuos jatkaa kiertoa. (KUVIO 12.)



KUVIO 12. Prosessikaavio laitteistosta

CO₂ määrittämiseen MEA-liuoksesta käytettiin analyysilaitteistoa, joka oli ilmatiivis. Laitteisto koostui byretistä, mihin oli liitetty muoviletku. Muoviletku meni byretin alaosasta sulkunesteastiaan. Byretin huipulle oli liitetty toinen muoviletku, jonka päähän liitettiin housuputki. Byretti täytettiin sopivan täyteen, tässä tapauksessa noin 20 millilitraan sulkuliuosta. Kun housuputkeen pipetoitiin toiseen lahkeeseen 2 ml MEA-liuosta ja toiseen 2 ml hajoitushappoa ja sekoitettiin ne keskenään, aiheutti se hiilidioksidin vapautumisen MEA-liuoksesta. Kun hiilidioksidi vapautui liuoksesta, se työnsi byretissä ollutta sulkuliuoksen pintaa alaspäin. Sulkunesteastialla seurattiin byretissä liikkuvaa nestepintaa, kunnes byretissä nestepinnan lasku loppui. Tätä arvoa verrattiin lähtötasoon ja näin nähtiin kuinka paljon näytteessä oli hiilidioksidia. Analyysi tehtiin sekä absorptiokolonnista tulevalle, että myös desorptiokolonnista lähtevälle liuokselle, jotta nähtiin, kuinka paljon hiilidioksidia oli laitteistossa puhdistunut.



KUVIO 13. Analyysilaitteisto

MEA-liuoksen vahvuuden määrittäminen tapahtui titraamalla. Analyysiin tarvittiin byretti, rikkihappoa, erlenmeyer-astia, magneettisekoitin sekä metyylinpunaista indikaattoria. Analyysi toteutettiin pipetoimalla 2 ml MEA-liuosta erlenmeyeriin, jonka jälkeen astia täytettiin tislattulla vedellä noin 100 ml:n asti. Tämän jälkeen liuokseen laitettiin muutama tippa indikaattoria, jolloin liuos oli valmis analyysiin. Liuos laitettiin magneettisekoittimen päälle, ja sinne lisättiin rikkihappoa tipoitain, kunnes liuos muuttui kevyesti punertavaksi.

6.2 Koeajot

Työn tekeminen aloitettiin perehtymällä laitteistoon ja sen toimintaan. Laitteistoon perehtymisen jälkeen valmistettiin sulkuliuos ja hajoitushappoliuos, joita tarvittiin näytteiden analysointiin. Kun liuokset saatiin valmistettua, niin siirryttiin takaisin laitteiston pariin ja valmistettiin laitteistossa kulkeva MEA-liuos. MEA eli monoetanoli-amiiniliuos valmistettiin laimentamalla etanoliamiinia tislattulla vedellä. Liuoksen valmistamisen jälkeen laitettiin laitteisto käyntiin ja tarkasteltiin, että se toimii halutulla tavalla eikä vuotoja löydy. Huomattiin, että laitteisto toimii ja kaikki on valmista koeajoja varten, kun hiilidioksidipullo saapuu. Ennen varsinaisten koeajojen aloittamista mietittiin ajoarvoja. Päätettiin vakioida virtaukselle seuraavat arvot: 1,5 l/min, 2,2 l/min ja 3,0 l/min. Höyrynpaineelle päätettiin antaa arvot 0,4 baaria ja 0,6 baaria sekä pohjakiehuttimen levyjen määräksi valittiin aluksi jo laitteistossa olevat 5 levyä. Pohdittiin mahdollista levyjen tuplaamista, mutta päätettiin jättää kyseinen pohdinta myöhemmäksi.

TAULUKKO 1. Ajoarvot

Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Virtaus (l/min)
5	0,4	1,5
5	0,4	2,2
5	0,4	3,0
5	0,6	1,5
5	0,6	2,2
5	0,6	3,0
7	0,1	1,5
7	0,1	2,2
7	0,1	3,0
7	0,3	1,5
7	0,3	2,2
7	0,3	3,0

Hiilidioksidipullon saapumisen jälkeen aloitettiin koeajot. Laitteisto ajettiin ylös laittamalla pumpput päälle ja virtauksen arvoksi 1,5 l/min. Seuraavaksi avattiin kolonnien huipulle tulevat jäähdytysvedet. Kun jäähdytysvedet olivat päällä ja liuos kiersi lait-

teistossa, laitettiin esilämmitin päälle. Esilämmittimen asetusarvona pidettiin 6 kilowattia koko koeajojen ajan. Lopuksi laitettiin päälle höyrynkehitin. Näin laitteisto oli ajovalmiudessa ja aloitettiin hiilidioksidin syöttäminen laitteistoon. Kun liuos oli kyläinen hiilidioksidista, niin annettiin ensimmäisen koeajon arvot laitteistolle.

Koeajot päätettiin suorittaa aloittaen alhaisimmista ajoarvosta edeten kohti suurimpia ajoarvoja. Näin ensimmäiselle koeajolle määräytyi seuraavat arvot: virtaus 1,5 l/min, höyrynpaine 0,4 bar ja 5 pohjakiehuttimen levyä. Tämän jälkeen päätettiin odottaa noin 45 minuuttia, että arvot kerkeävät vaikuttaa laitteistossa. Kyseinen noin 45 minuutin viive päätettiin pitää samana koko koeajojen ajan. Kun edellä mainittu aika oli kulunut, niin otettiin näytteet. Näytteet otettiin koko koeajojen ajan samasta paikasta. Näytteiden otto tapahtui laitteiston kahdesta eri kohdasta. Alkupään näyte otettiin näytepulloon lämmönvaihtimen yläpäästä, ja loppupään näyte otettiin desorptiokolonnista säiliöön saapuvasta nestevirtauksesta. Alkupään näyte oli kyläinen hiilidioksidista, koska se tuli absorptiokolonnista ja vastaavasti loppupään näyte sisälsi vähemmän hiilidioksidia, koska se tuli desorptiokolonnista. Kun näytteet saatiin otettua, jäähdytettiin ne huoneenlämpöiseksi ja siirryttiin analysoimaan niitä analyysilaitteiston avulla. Analysoinnin jälkeen mitattiin dekanterilasiin lauhdetta kahden minuutin ajan ja punnittiin se. Nämä näytteille tehdyt toimenpiteet sekä lauhteen ottaminen, suoritettiin jokaisessa koeajossa samalla tavalla.

Ensimmäisen koeajon jälkeen vaihdettiin virtaus 2,2 litraan minuutissa ja muut arvot pidettiin samana. Jälleen annettiin muutosten vaikuttaa noin 45 minuuttia, ennen kuin otettiin näytteet ja tehtiin muut yllämainitut toimenpiteet. Kun näytteet ja lauhde oli otettu ja tehty niille tarvittavat toimenpiteet, pohdittiin, olivatko tulokset varmasti luotettavia. Päätettiin muuttaa koeajoja niin, että otetaan jokaisesta koeajosta kolme eri näytesarjaa, jotka pitävät sisällään yllämainitut alkupään näytteen, loppupään näytteen ja lauhteen. Päätettiin pitää näytesarjojen välissä noin 15–20 minuutin viiveväli, jolloin tulokset saadaan mahdollisimman luotettaviksi. Samalla todettiin, että emme ota ensimmäistä koeajoa uusiksi, vaan oletamme, että saatu tulos on luotettava. Tämän seurauksena toinen koeajo oli ensimmäinen, josta otettiin kolme erillistä näytesarjaa yllämainitulla tavalla. Toisen koeajon jälkeen vaihdettiin virtaus 3,0 litraan minuutissa ja edelleen muut arvot pidettiin muuttumattomana. 45 minuutin

viiveen jälkeen otettiin taas kolme näytesarjaa ja tehtiin samat toimenpiteet kuin edellisessä näytesarjassa. Näin saatiin tulokset eri virtauksilla höyrynpaineen ollessa 0,4 baaria ja pohjakiehuttimen levyjen määrän ollessa 5 kappaletta.

Seuraavaksi lähdettiin tutkimaan paineen vaikutusta desorptioon. Muutettiin höyrynpaine 0,4 baarista 0,6 baariin. Virtauksena käytettiin edelleen samoja virtauksia kuin edellisellä höyrynpaineella ja myös levyjen määrä pidettiin samana. Edettiin suunnitelman mukaisesti eteenpäin eli aloitettiin jälleen pienimmästä virtauksesta eli 1,5 litraa minuutissa ja edettiin kohti suurinta virtausta ottaen jokaisesta koeajosta kolme eri näytesarjaa käyttäen samoja viiveitä. Kun 0,6 baarin höyrynpaineella ajettiin tarvittavat koeajot ja saatiin halutut näytesarjat, niin siirryttiin kolmannen muuttujan tutkimiseen.

Kolmas muuttuja eli pohjakiehuttimen levyt olivat tähän asti pysyneet samana. Levyjä lisättäessä huomattiin pohjakiehuttimen vuotavan. Tarkemman tarkastelun jälkeen todettiin, että kaikki saatavilla olleet levyt eivät olleetkaan identtisiä toisiinsa nähden. Erottelun jälkeen löydettiin neljä sopivaa lisälevyä ja päätettiin lisätä jokainen laitteistoon. Näin saatiin kasvatettua levyjen määrää viidestä yhdeksään. Lisäyksen jälkeen kokeiltiin ajaa laitteistoa lisäämättä vielä hiilidioksidia. Varsin nopeasti huomasimme kuitenkin levyjen määrän olleen liikaa, koska desorptiokolonne rupesi tulvimaan 1,5 litraa minuutissa virtauksella paineen ollessa 0,4 baaria. Kolonnin painero kasvoi jopa 80 millibaariin. Tämän seurauksena avattiin pohjakiehutin uudestaan ja otettiin kaksi levyä pois. Näin lopulliseksi levyjen määräksi jäi 7 levyä, joka on prosentuaalisesti 40 prosentin kasvu aikaisempaan verrattuna. jälleen kokeiltiin ajaa laitteistoa 1,5 litraa minuutissa virtauksella ja 0,4 baarin höyrynpaineella ja tulos oli sama, eli kolonne rupesi jälleen tulvimaan. Tultiin siihen tulokseen, että höyrynpainetta on laskettava, jotta pystytään suorittamaan koeajot loppuun. Kokeilujen jälkeen päätettiin antaa uusiksi höyrynpaineen arvoiksi 0,1 baaria ja 0,3 baaria.

Seuraavaan koeajoon otettiin arvot: 1,5 l/min, 0,3 bar ja 7 levyä. Näillä arvoilla tehtiin samat näytesarjat kuin aikaisemminkin. Seuraavaksi kasvatettiin virtaukset, ensin

2,2 l/min ja sitten 3,0 l/min toistaen edellä mainitut toimenpiteet. Tämän jälkeen otettiin vielä näytesarjat 0,1 baarin höyrynpaineella käyttäen vakioituja virtauksia ja levyjen määrän ollessa 7 levyä.

Viimeinen näytesarja, joka otettiin seuraavilla arvoilla: virtaus 3,0 l/min, 0,1 bar ja 7 levyä, ei saatu otettua kuin yksi edustava näyte, koska hiilidioksidi loppui kesken. Joten tultiin siihen tulokseen, että luotetaan näytteen olevan edustava ja näin todettiin koeajojen olevan valmiit ja siirryttiin analysoimaan tuloksia.

6.3 Tulosten analysointi

Kokeellisesta osuudesta saatuja tuloksia analysoitaessa jätettiin huomattavasti muista saman näytesarjan tuloksista poikkeavat arvot pois tarkastelusta näytesarjan luotettavuuden parantamisen vuoksi. Yhden arvon poistamisen jälkeen otettiin keskiarvo kahdesta jäljelle jääneestä arvosta ja näin saatiin näytesarjalle luotettava tulos. Jos kaikki kolme näytesarjan arvoa olivat lähellä toisiaan tai tasaisen kaukana toisistaan, otettiin kaikista kolmesta keskiarvo, ja tämä arvo edusti näytesarjaa. Kokeellisen osuuden ensimmäisestä ja viimeisestä koeajosta otettiin vain yhdet näytteet jo edellä mainituista syistä. Kyseinen menettelytapa oli sama lauhdetta mitattaessa, eli keskiarvosta suuresti poikkeavat arvot jätettiin pois lopullisista tuloksista.

TAULUKKO 2. Koeajotulokset

Koeajo	Levyjen määrä	Paine	Virtaus	CO ₂ A ₁	CO ₂ L ₁	CO ₂ erotus 1 (A ₁ -L ₁)	CO ₂ A ₂	CO ₂ L ₂	CO ₂ erotus 2 (A ₂ -L ₂)	CO ₂ A ₃	CO ₂ L ₃	CO ₂ erotus 3 (A ₃ -L ₃)
Numero	kpl	bar	l/min	ml	ml	ml	ml	ml	ml	ml	ml	ml
1	5	0,4	1,5	19,7	7,8	11,9	-	-	-	-	-	-
2	5	0,4	2,2	17,2	9,8	7,4	16,3	12,4	3,9	16,7	10,1	6,6
3	5	0,4	3,0	15,8	11,0	4,8	16,0	11,2	4,8	16,0	11,5	4,5
4	5	0,6	1,5	19,2	9,7	9,5	20,2	10,6	9,6	20,7	11,1	9,6
5	5	0,6	2,2	19,7	12,7	7,0	20,3	12,4	7,9	20,8	12,9	7,9
6	5	0,6	3,0	20,2	14,0	6,2	19,0	14,9	4,1	20,7	14,7	6,0
7	7	0,1	1,5	22,5	16,0	6,5	22,0	12,7	9,3	22,2	13,1	9,1
8	7	0,1	2,2	21,3	15,0	6,3	21,9	15,8	6,1	22,2	16,0	6,2
9	7	0,1	3,0	21,6	17,3	4,3	-	-	-	-	-	-
10	7	0,3	1,5	16,1	7,4	8,7	16,8	7,4	9,4	17,6	8,1	9,5
11	7	0,3	2,2	18,1	10,8	7,3	18,4	10,2	8,2	18,3	11,1	7,2
12	7	0,3	3,0	19,5	12,9	6,6	19,1	12,7	6,4	19,1	12,8	6,3

CO₂ A = alkupään näytteen pitoisuus

CO₂ L = loppupään näytteen pitoisuus

TAULUKKO 3. Ajoarvoja ja lauhteen keskiarvot

Koeajo	Levyjen määrä	Paine	Virtaus	Kolonnin pohjan lämpötilä	Kolonnin huipun lämpötilä	Desorptio kolonnin paine-ero	Absorptiokolonnin poistuvan CO ₂ pitoisuus	Absorptiokolonnin saapuva CO ₂ pitoisuus	Lauhde
Número	kpl	bar	l/min	°C	°C	mbar	%	%	g/min
1	5	0,4	1,5	98,7	86,4	0,5	-	-	226,9
2	5	0,4	2,2	98,3	85,5	0,7	1,9	-	225,4
3	5	0,4	3,0	98,0	83,3	0,5	1,3	-	223,4
4	5	0,6	1,5	98,0	86,7	0,9	2,2	9,5	270,1
5	5	0,6	2,2	98,1	83,7	0,9	1,3	8,9	278,5
6	5	0,6	3,0	97,8	83,2	0,9	1,2	8,9	260,8
7	7	0,1	1,5	96,5	87,8	0,2	12,7	15,9	118,3
8	7	0,1	2,2	96,4	87,2	0,4	9,9	15,4	128,1
9	7	0,1	3,0	95,6	81,1	0,4	0,0	0,0	142,5
10	7	0,3	1,5	99,2	84,3	42,3	8,0	16,3	249,6
11	7	0,3	2,2	98,7	83,3	45,7	6,8	15,7	247,1
12	7	0,3	3,0	98,3	83,0	41,5	6,9	15,4	211,4

Näytesarjoista ja lauhteiden keskiarvoista saatujen tuloksien perusteella laskettiin ideaalikaasulain avulla ainemäärä alla mainitulla tavalla:

$$pV = nRT \rightarrow n = \frac{pV}{RT}$$

missä:

p= paine (bar)

V= CO₂ erotus (l)

R= 0,0831451 (bar*l)/(mol*K)

T= Lämpötila (K)

Ainemäärän lisäksi laskettiin konsentraatio:

$$c = \frac{n}{V}$$

missä:

c= konsentraatio (mol/l)

n= ainemäärä (mol)

V= tilavuus (l)

moolivirta:

$$\dot{n} = Q * c * 60$$

missä:

\dot{n} = moolivirta (mol/h)
 Q = tilavuusvirta (l/min)
 c = konsentraatio (mol/l)

massavirta (poistoteho):

$$\dot{m} = M * \dot{n}$$

missä:

\dot{m} = massavirta (kg/h)
 M = moolimassa (g/mol)
 \dot{n} = moolivirta (mol/h)

pohjakiehuksen teho:

$$P = \Delta H_{vap} * \dot{m}_{lauhde}$$

missä:

P = teho (kW)
 \dot{m}_{lauhde} = massavirta (kg/s)
 ΔH_{vap} = höyrystymislämpö (kJ/kg)

puhdistustehokkuus:

$$\Delta CO_2 = CO_2 A_1 - CO_2 A_2$$

$$\frac{\Delta CO_2}{CO_2 A_1} * 100$$

missä:

$CO_2 A_1$ = alkupään pitoisuus
 $CO_2 A_2$ = loppupään pitoisuus
 ΔCO_2 = pitoisuuksien erotus

Kaikki työssä esiin tulevat laskut laskettiin alla olevan esimerkin mukaisesti. Laskussa käytettiin esimerkkiarvoina neljännen koeajon näytesarjan ensimmäisestä näytteestä saatuja arvoja.

pohjakiehuhtimen levymäärä= 5 levyä
 höyrynpaine= 0,6 bar
 virtaus $Q= 1,5$ l/min
 alkupään pitoisuus CO_2 $A_1= 19,2$ ml
 loppupään pitoisuus CO_2 $A_2= 9,7$ ml
 paine (atm) $p= 1,013$ bar
 moolimassa $M= 44,01$ g/mol
 tilavuus $V= 0,00957$ l
 tilavuus $V_{\text{näyte}}= 0,002$ l
 $\dot{m}_{\text{lauhde}}= 0,0045$ kg/s
 moolinen kaasuvakio $R= 0,0831451 \frac{\text{bar}\cdot\text{l}}{\text{mol}\cdot\text{K}}$
 lämpötila $T= 298$ K
 höyrystyslämpö $\Delta H_{\text{vap}}= 2220,9$ kJ/kg

puhdistustehokkuus:

$$\Delta \text{CO}_2 = \text{CO}_2 A_1 - \text{CO}_2 A_2$$

$$\Delta \text{CO}_2 = 19,2 \text{ ml} - 9,7 \text{ ml} = 9,5 \text{ ml}$$

$$\frac{\Delta \text{CO}_2}{\text{CO}_2 A_1} * 100 = \frac{9,5 \text{ ml}}{19,2 \text{ ml}} * 100\% = 49,5\%$$

ainemäärä:

$$pV = nRT \rightarrow n = \frac{pV}{RT}$$

$$n = \frac{1,013 \text{ bar} * 0,00957 \text{ l}}{0,0831451 \frac{\text{bar}\cdot\text{l}}{\text{mol}\cdot\text{K}} * 298 \text{ K}} = 3,91 * 10^{-4} \text{ mol}$$

konsentraatio:

$$c = \frac{n}{V_{\text{näyte}}}$$

$$c = \frac{3,91 * 10^{-4} \text{ mol}}{0,002 \text{ l}} = 0,196 \text{ mol/l}$$

moolivirta:

$$\dot{n} = Q * c * 60$$

$$\dot{n} = 1,5 \frac{\text{l}}{\text{min}} * 0,196 \frac{\text{mol}}{\text{l}} * 60 \text{ min/h} = 17,64 \text{ mol/h}$$

poistoteho:

$$\dot{m} = M * \dot{n}$$

$$\dot{m} = \frac{44,01 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 17,64 \frac{\text{mol}}{\text{h}}}{1000} = 0,776 \text{ kg/h}$$

teho:

$$P = \Delta H_{vap} * \dot{m}_{lauhde}$$

$$P = 2220,9 \frac{kJ}{kg} * 0,0045 \frac{kg}{s} = 9,994 \text{ kW}$$

Laskuista saatujen vastauksien perusteella luotiin koeajotuloksia havainnollistavia kuvaajia. Opinnäytetyön tavoitteita havainnollistavimmat kuvaajat ja taulukot ovat puhdistustehokkuus prosentteina (KUVIO 17), poistoteho (KUVIO 19), tehonkulutus (KUVIO 18) sekä taloudellisuus puhdistustehokkuuden suhteen (TAULUKKO 4) ja poistotehon suhteen (TAULUKKO 5). Puhdistustehokkuuden laskemiseen käytettiin näytesarjojen analysoinnista saatuja alkupään ja loppupään hiilidioksidipitoisuuksien keskiarvoja millilitroina. Kyseiset arvot muutettiin prosenteiksi, jotta ne kuvaavat paremmin saatuja tuloksia.

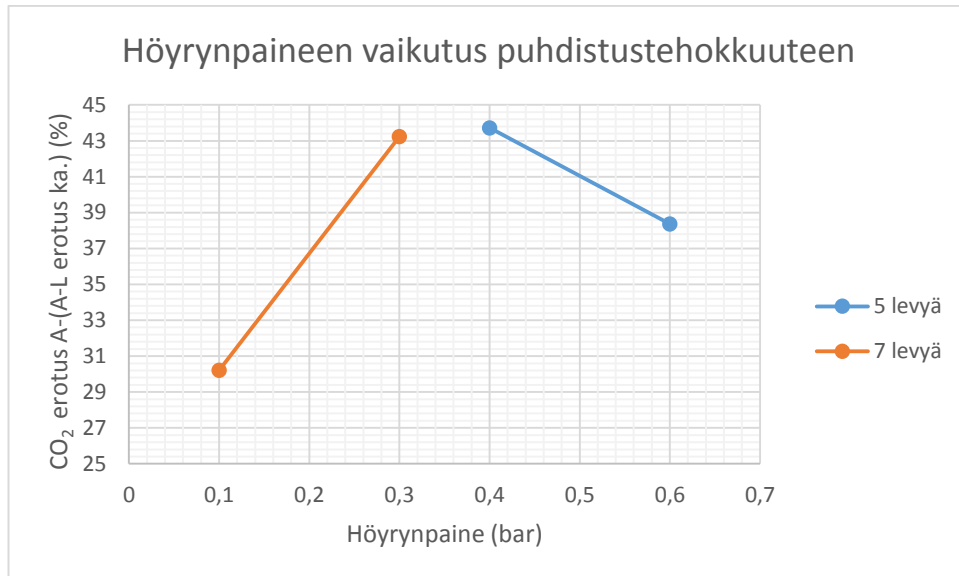
Tehonkulutuksen laskemiseen käytettiin kirjallisuudesta saatua ominaishöyrystymislämmön ΔH_{vap} arvoa ja näytesarjasta saatua lauhteen keskimääräistä massavirtaa. Taloudellisuuden kuvaajaan arvot saatiin jakamalla tietyn näytesarjan tehonkulutus puhdistustehokkuudella. Poistotehon kuvaajassa käytetyt massavirran arvot saatiin laskettua näytesarjoista moolivirran ja moolimassan avulla. Poistotehon kuvaajassa virtausnopeus on muutettu vastaamaan massavirran aikayksikköä eli l/h.

7 TULOSTEN TARKASTELU

Tutkittiin eri parametrien muutoksien vaikutusta desorptiokolonnin toiminnan parantamiseksi. Valittiin muuttuviksi parametreiksi virtaus, höyrynpaine sekä pohjakiehuhtimen levyjen määrä. Annettiin virtaukselle kolme eri vakioitua arvoa ja vastaavasti höyrynpaineelle kaksi arvoa kutakin pohjakiehuhtimen levymäärää kohti. Saadut tulokset taulukoitiin ja tehtiin niistä kuvaajat.

7.1 Pohjakiehuhtimen levyjenmäärän ja höyrynpaineen vaikutus kolonnin toimivuuteen

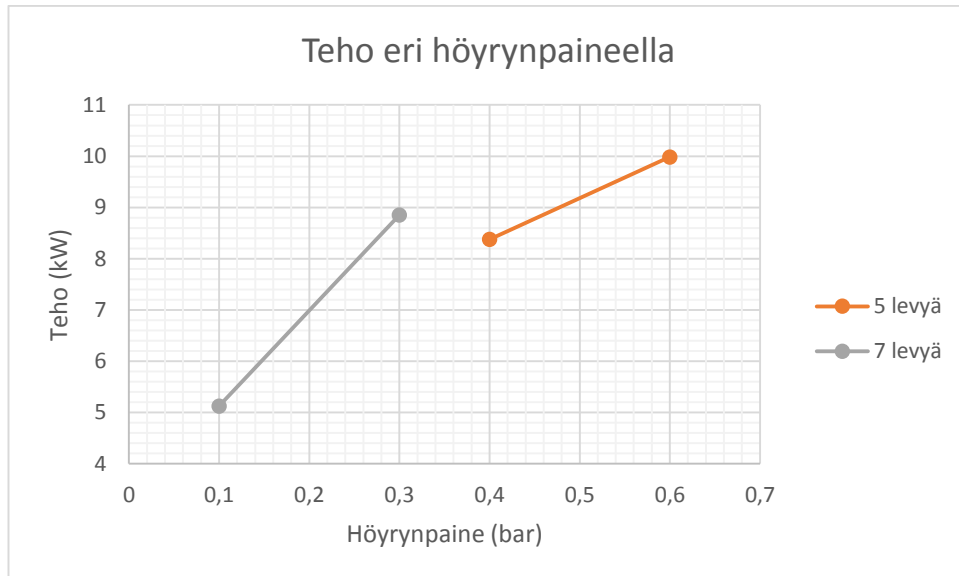
Muuttuvia parametreja valittaessa tarkoituksena oli pitää höyrynpaine samana molemmilla levymäärillä, mutta tämä ei ollut mahdollista desorptiokolonnin tulvimisen takia. Koeajot aloitettiin laitteistossa jo valmiiksi olevilla viidellä pohjakiehuhtimen levyllä ja höyrynpaineeksi kyseiselle levymäärälle valikoitui 0,4 ja 0,6 baaria. Kuten työn suorituksesta nähdään, niin toiseksi pohjakiehuhtimen levymääräksi valikoitui seitsemän levyä ja höyrynpaineeksi kyseiselle levymäärälle 0,1 ja 0,3 baaria desorptiokolonnin tulvimisen johdosta. Näitä ajoarvoja lähdettiin tutkimaan vakioitujen virtauksien avulla. Tutkinnan kohteena oli levymäärän ja höyrynpaineen vaikutus kolonnin puhdistustehokkuuteen, poistotehoon sekä pohjakiehuhtimen tehoon.



KUVIO 14. Höyrynpaineen vaikutus puhdistustehokkuuteen

Puhdistustehokkuutta tarkasteltaessa, voitiin kuviosta 14 huomata, että prosentuaalisesti parhaan puhdistustehokkuuden suhteessa höyrynpaineeseen antoi viisi levyä 0,4 baarin höyrynpaineella. Vastaavasti 0,1 baarin höyrynpaine seitsemällä levyllä antoi heikoimman puhdistustehokkuuden. Tarkasteltaessa pelkästään höyrynpainetta oli huomattavissa, että välillä 0,3-0,4 baaria oli paras puhdistustehokkuus. Vastaavasti levymäärän vaikutusta puhdistustehokkuuteen oli vaikea arvioida, koska höyrynpaineet erosivat toisistaan eri levymäärillä. Erot puhdistustehokkuudessa johtuivat höyrynpaineen vaikutuksesta desorptioon. Korkeammalla höyrynpaineella puhdistustehokkuus oli parempi kuin matalalla, koska korkeampi höyrynpaine nostaa lämpötilaa ja näin parantaa desorptiota.

Tarkasteltaessa kuviota 14, voitiin todeta viidellä levyllä saatujen tulosten olevan lähempänä toisiaan kuin seitsemällä levyllä saadut tulokset. Myös parempi puhdistustehokkuus prosentuaalisesti ilmaistuna oli viidellä levyllä kuin seitsemällä levyllä, koska seitsemällä levyllä käytetyt höyrynpaineet olivat matalammat kuin viidellä levyllä käytetyt. Kuvion 14 perusteella voitiin myös olettaa, että seitsemällä levyllä ja korkeammalla paineella kuin 0,3 baaria saataisiin parempi puhdistustehokkuus, mutta tämän tutkimisen estää kolonnin tulviminen.



KUVIO 15. Tehonkulutus eri höyrynpaineilla

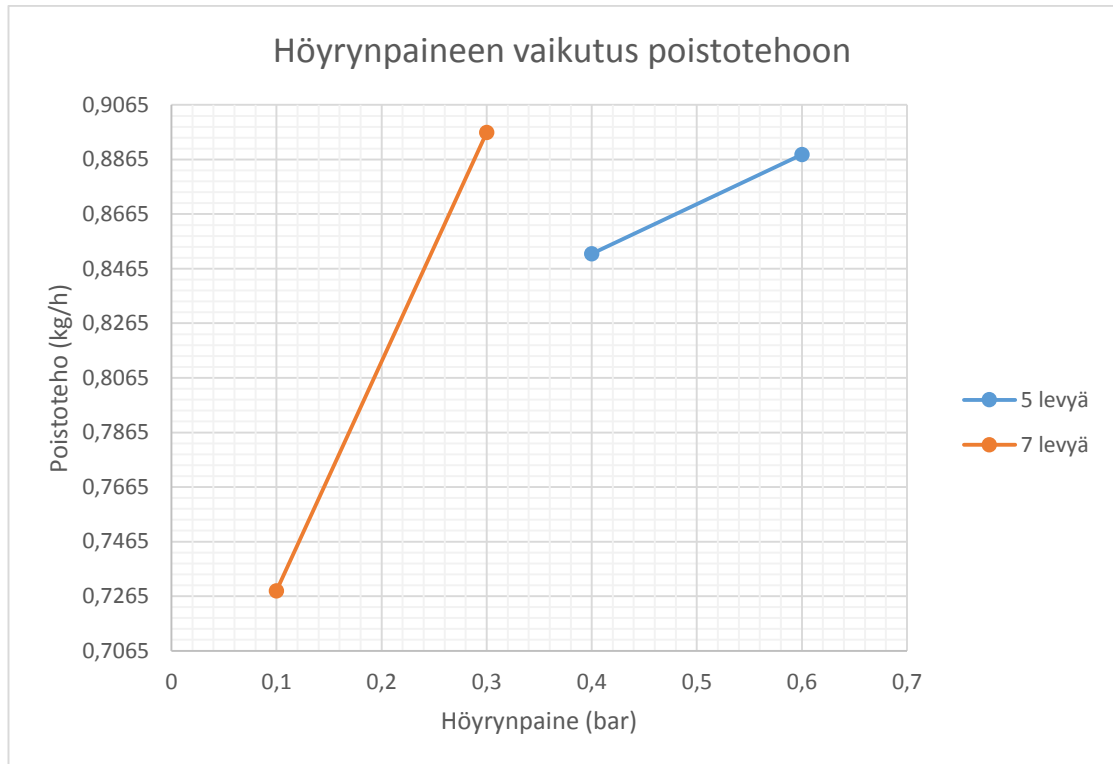
Tehonkulutusta tarkasteltaessa voitiin kuviosta 15 huomata, että seitsemällä levyllä ja 0,1 baarin höyrynpaineella saatiin matalin tehonkulutus ja vastaavasti viidellä levyllä ja 0,6 baarin höyrynpaineella suurin tehonkulutus. Kyseisen kuvion pohjalta voitiin todeta, että suurin vaikutus tehonkulutukseen on höyrynpaineen määrällä. Molemmilla levymäärillä pienempi höyrynpaine antoi matalamman tehonkulutuksen. Levymäärän vaikutus tehonkulutukseen voitiin huomata seitsemän levyn ja 0,3 baarin höyrynpaineen antamasta tuloksesta, sekä viiden levyn ja 0,4 baarin höyrynpaineen tuloksesta. Näitä vertailtaessa nähtiin, että suurempi levymäärä, mutta pienempi höyrynpaine antoi vain vähän korkeamman tehonkulutuksen. Ero tehonkulutuksessa näiden kahden pisteen osalta oli noin 0,5 kW, joten levymäärän vaikutusta tehonkulutukseen voitiin pitää pienempänä kuin höyrynpaineen vaikutusta koeajoista saatujen tuloksien perusteella.

TAULUKKO 4. Taloudellisuus puhdistustehokkuuden suhteen

Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Teho (kW)	Puhdistustehokkuus (%)	Taloudellisuus (%/kW)
5	0,4	8,38	43,72	5,22
5	0,6	9,99	38,37	3,84
7	0,1	5,13	30,21	5,89
7	0,3	8,85	43,23	4,88

Tarkasteltaessa pelkästään höyrynpainetta ja levyjen määrää, niin voitiin todeta taulukon 4 perusteella, että taloudellisesti puhdistustehokkaimmat ajoarvot olivat 0,1 baaria ja seitsemän levyä. Vaikka kyseisillä ajoarvoilla saatiin taloudellisesti tehokain puhdistus, oli se selkeästi heikoin puhdistustehokkuudeltaan. Vastaavasti heikoimmat ajoarvot taloudellisen puhdistustehokkuuden kannalta olivat 0,6 baaria ja viisi levyä, mutta vastaavasti kyseisten ajoarvojen puhdistustehokkuus oli huomattavasti parempi kuin 0,1 baarin ja seitsemän levyn arvoilla saatu puhdistustehokkuus.

Poistoteho ilmoittaa, kuinka paljon hiilidioksidia saatiin poistettua liuksesta kilogrammoina tunnissa. Tarkasteltiin poistotehoa suhteessa pohjakiehttimen levyjen määrään sekä höyrynpaineeseen. Huomattiin kuvion 16 perusteella, että paras poistotehokkuus saatiin levymäärällä seitsemän, paineen ollessa 0,3 baaria. Kyseiset parametrit antoivat arvoksi noin 0,90 kg/h. Kuviosta 16 huomattiin heikoimman arvon olevan noin 0,73 kg/h. Tämä arvo saatiin seitsemällä levyllä ja 0,1 baarin höyrynpaineella. Seitsemän levyn antamat arvot olivat paras sekä heikoin, ja niiden välinen erotus oli suhteellisen suuri, kun verrattiin viiden levyn antamiin arvoihin. Seitsemän levyä ja 0,1 baaria antoi selkeästi heikoimman arvon ja viidellä levyllä saadut arvot vahvistivat toteamuksen, että korkeammalla paineella levymäärän ollessa sama, saatiin parempi poistotehokkuus. Myös poistotehon suhteen tultiin siihen tulokseen, että höyrynpaineella oli suurempi vaikutus lopputulokseen kuin levyjen määrällä.



KUVIO 16. Höyrynpaineen vaikutus poistotehoon

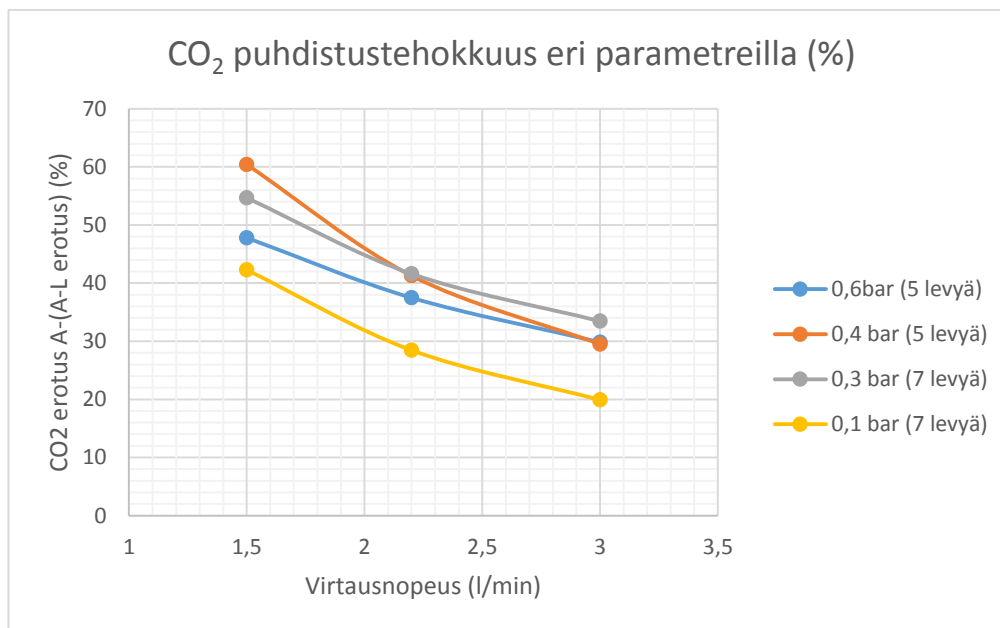
Poistotehokkuutta tarkasteltaessa tehonkulutuksen suhteen voitiin todeta, että poistotehokkuudeltaan parhaat arvot eivät olleet taloudellisesti paras vaihtoehto. Taloudellisesta näkökulmasta katsottuna parhaan tuloksen antoivat arvot seitsemän levyä ja 0,1 baaria kuten taulukosta 5 voitiin huomata. Kyseiset arvot olivat kuitenkin poistotehokkuudeltaan selkeästi heikoin yhdistelmä. Taulukon 5 ja kuvion 16 perusteella voitiin todeta arvojen 7 levyä ja 0,3 baaria olevanärkevin valinta poistotehokkuuden ja taloudellisuuden kannalta. Kyseiset arvot antoivat parhaan yhteistuloksen muihin arvoihin verrattuna.

TAULUKKO 5. Taloudellisuus poistotehon suhteen

Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Teho (kW)	Poistoteho (kg/h)	Taloudellisuus (kg/kJ)
5	0,4	8,38	0,85	366,0
5	0,6	9,99	0,89	320,1
7	0,1	5,13	0,73	511,3
7	0,3	8,85	0,90	364,6

7.2 Virtaus

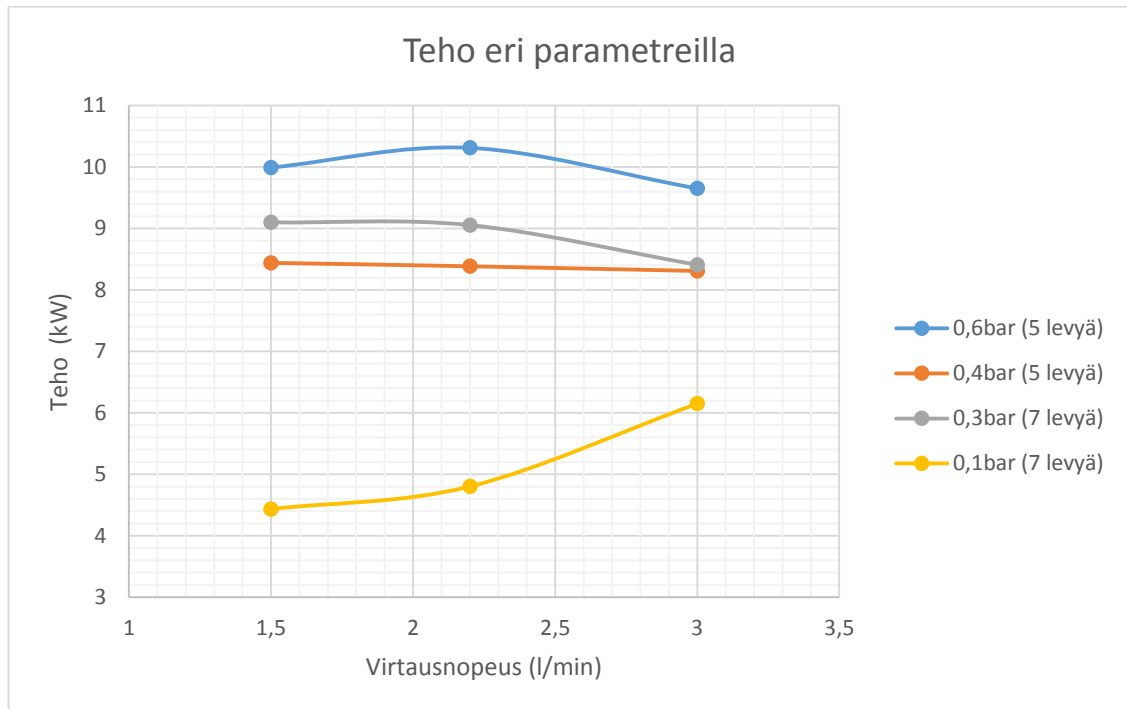
Kuviosta 17 voidaan päätellä, että virtausnopeudella on merkittävä osuus desorptiokolonnin puhdistustehokkuuteen. 1,5 l/min virtauksella kolonni puhdistaa hiilidioksidia liuoksesta n. 40–60% riippuen käytetystä höyrynpaineesta ja pohjakiehuttimen levyjen määrästä. Paras puhdistuvuus on 0,4 baarin höyrynpaineella ja viidellä pohjakiehutinlevyllä. Huonoin vastaavasti on 0,1 baarin paineella ja seitsemällä levyllä. Kun virtausnopeutta lisätään, desorptiokolonnin puhdistustehokkuus heikkenee. 3,0 l/min virtauksella puhdistustehokkuus on enää noin 20–35%:n luokkaa. Kyseisellä virtauksella paras puhdistuvuus saatiin, kun painetta oli 0,3 baaria ja pohjakiehuttimen levyjä oli seitsemän. Tällöin liuoksesta puhdistui noin 33 %. Huonoin tulos saatiin taas 0,1 baarin paineella ja seitsemällä levyllä (n. 20 %).



KUVIO 17. CO₂ puhdistustehokkuus eri parametreilla

Huomattava seikka on 0,4 baarin paineella ja viidellä levyllä ajettu sarja, joka on 1,5 l/min virtauksella kaikista paras vaihtoehto, mutta taasen 3,0 l/min virtauksella toiseksi huonoin. Kyseisillä ajoarvoilla puhdistustehokkuuden heikkeneminen on suhteessa huomattavasti rajumpaa, kuin muissa koeajoissa. Syynä tähän voi olla esimerkiksi puutteellinen näytesarja 1,5 l/min virtauksella. Huomattavaa on myös se, että 0,1 baarin paineella ja seitsemällä levyllä ajettu koesarja on huomattavasti muita heikompi puhdistustehokkuudessa. Kaksi muuta koeajosarjaa (0,3 baaria ja

seitsemän levyä sekä 0,6 baaria ja viisi levyä) ovat muutoksiltaan tasaisempia ja ääripäiden erot ovat hieman pienemmät. Yhteenvetona voidaan todeta, että mitä pienempi virtausnopeus, sitä parempi puhdistustehokkuus desorptiokolonnilla on. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että pienemmällä virtausnopeudella ajettaessa nesteellä on suurempi viipymäaika kolonnissa jolloin kolonni kerkeää puhdistaa nestettä kauemmin kuin suuremmalla virtausnopeudella.

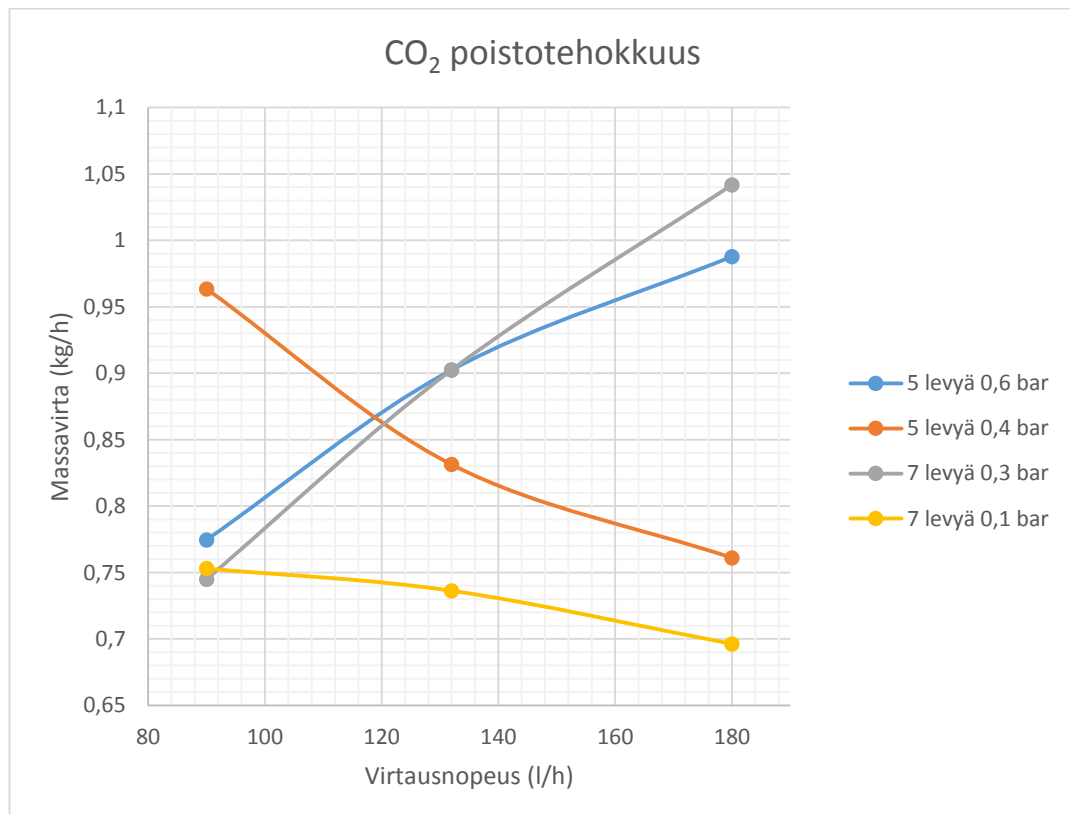


KUVIO 18. Desorptiokolonnin teho eri parametreilla

Tutkittaessa kuviota 18 voidaan todeta, että virtausnopeudella ei näyttäisi olevan suoraan verrannollista vaikutusta desorptiokolonnin tehonkulutukseen. Tehonkulutus näyttäisi pysyvän 8-10,5 kW tienoilla, lukuun ottamatta 0,1 baarin höyrynpaineella ja seitsemällä levyllä tehtyä koeajosarjaa, joka poikkeaa radikaalisti muista koeajotuloksista. Koesarjan trendi eroaa täysin muista sarjoista, sillä tehonkulutus näyttäisi kasvavan virtausnopeutta suurennettaessa. Kuitenkin tehonkulutus kokonaisuudessaan on huomattavasti muita sarjoja pienempi millä tahansa virtausnopeudella.

0,6 baarin paineella ja viidellä levyllä sekä 0,3 baarin paineella ja seitsemällä levyllä ajettut koeajosarjat noudattavat tehonkulutuksessa keskenään samankaltaista trendiä: tehonkulutus on 3,0 l/min virtausnopeudella jonkin verran pienempi kuin 1,5 l/min virtausnopeudella. Lisäksi 0,6 baarin paineella ja viidellä levyllä ajatussa koeajossa näyttäisi suurin tehonkulutus olevan 2,2 l/min virtausnopeudella.

Kun katsotaan 0,4 baarin ja viiden levyn koesarjan tuloksia, huomataan tehonkulutuksen pysyvän samana virtausnopeudesta riippumatta. Voidaan todeta, että eniten tehoa kulutti 0,6 baaria ja viisi levyä (n. 10 kW) ja vähiten 0,1 baaria ja seitsemän levyä (n. 4-6 kW). Koeajotulosten käyttäytyminen vaihtelee keskenään niin paljon, että tuloksista on vaikea vetää mitään yleispäteviä johtopäätöksiä.



KUVIO 19. CO₂ poistotehokkuus

Tarkasteltaessa virtausnopeuden vaikutusta kolonnin poistotehoon (KUVIO 19), huomataan, että yhtä vaille kaikki koeajosarjat puhdistivat 90 l/h (1,5 l/min) virtauksella suunnilleen yhtä paljon, eli noin 0,75 kg/h. Poikkeuksen tekee 5 levyllä ja 0,4 baarin paineella ajettu sarja, joka tulosten mukaan puhdistaa huomattavasti muita

enemmän (0,96 kg/h). Tämä johtuu mahdollisesti virheellisestä tuloksesta. Kun tarkastellaan poistotehoa kokonaisuutena, huomataan, että koeajojen trendit eroavat toisistaan melko paljon. Viidellä levyllä ja 0,6 baarin paineella sekä seitsemällä levyllä ja 0,3 baarin paineella ajetuissa sarjoissa puhdistusteho nousee melko tasaisesti virtausmäärän mukaan. Viiden levyn ja 0,4 baarin paineella sekä seitsemällä levyllä ja 0,1 baarin paineella ajetuilla sarjoilla puhdistusteho noudattaa päinvas- taista suuntaa kuin edellä mainituilla sarjoilla, sillä puhdistusteho laskee virtausno- peuden nousun myötä. Tämä johtaa siihen, että suurimmalla virtauksella (180 l/h eli 3 l/min) sarjojen väliset erot suurenevat huomattavasti pienempiin virtausmääriin verrattuna.

Arvioitaessa mikä olisi poistoteholta parhaat ajoarvot, erottuvat viiden levyn ja 0,6 baarin sekä seitsemän levyn ja 0,3 baarin sarjat huomattavasti edukseen. Yhdistävä tekijä näille sarjoille on se, että molemmat sarjat ovat levymääriin nähden tehty kor- keammalla paineella. Kokonaisuutena parhaan sarjan valitseminen on makuasia, sillä viiden levyn ja 0,6 baarin sarja on seitsemän levyn ja 0,3 baarin sarjaa parempi pienellä virtauksella, kun taas seitsemän levyn ja 0,3 baarin sarja on parempi isom- malla virtauksella.

Kokonaisuutena huonoimmat puhdistustehokkuudet saatiin viidellä levyllä ja 0,4 baarin paineella sekä seitsemällä levyllä ja 0,1 baarin paineella. Pienellä virtauksella kyseiset sarjat antoivat hyviä tuloksia verrattuna muihin sarjoihin, mutta virtausno- peuden kasvaessa tulokset huononivat, ja suurimmalla mitatulla virtauksella (180 l/h) huonoimman (seitsemän levyä ja 0,1 baaria painetta) ja parhaimman (seitsemän levyä ja 0,6 baaria painetta) sarjan välinen ero oli noin 0,35 kg/h. Virtausnopeus ei siis yksiselitteisesti vaikuta poistotehoon (vrt. poistotehokkuus prosentuaalisesti), vaan siihen vaikuttavat myös muut tekijät.

8 YHTEENVETO

Kokeellisen osuuden tuloksia tarkasteltaessa huomattiin virtauksella olevan selkeästi suurin vaikutus kolonnin puhdistustehokkuuteen. Taulukosta 6 voidaan todeta, että mitä pienempi virtaus oli ajoarvona, sitä parempi puhdistustehokkuus oli kolonnilla. Höyrynpaineen vaikutus virtaukseen nähden on huomattavasti pienempi, mutta virtauksen ollessa vakio on puhdistustehokkuus parhaimmillaan höyrynpaineen ollessa 0,3-0,4 baaria. Vastaavasti levyjen määrällä ei nähty olevan kovinkaan suurta vaikutusta kolonnin puhdistustehokkuuteen. Alla olevaan taulukkoon on lisätty ajoarvot puhdistustehokkuudeltaan paremmuusjärjestykseen. (TAULUKKO 6.)

TAULUKKO 6. Puhdistustehokkuus eri ajoarvoilla

Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Virtaus (l/min)	Puhdistustehokkuus (%)
5	0,4	1,5	60,41
7	0,3	1,5	54,66
5	0,6	1,5	47,79
7	0,1	1,5	42,27
7	0,3	2,2	41,60
5	0,4	2,2	41,27
5	0,6	2,2	37,48
7	0,3	3,0	33,45
5	0,6	3,0	29,84
5	0,4	3,0	29,50
7	0,1	2,2	28,45
7	0,1	3,0	19,91

Analysoitaessa kolonnin poistotehoa (TAULUKKO 7.) voidaan todeta poistotehon riippuvan kaikista tutkittavista parametreista, eli virtausnopeudesta, höyrynpaineesta sekä levyjen määrästä. Määrällisesti parhaimmat tulokset saavutettiin korkealla virtausnopeudella ja levyjen määrään nähden korkeimmilla höyrynpaineilla. Huomattavaa oli myös koeajosarjojen välisten erojen kasvu virtausnopeuden nousun myötä.

TAULUKKO 7. Poistoteho eri ajoarvoilla

Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Virtaus (l/min)	Poistoteho (kg/h)
7	0,3	3,0	1,042
5	0,6	3,0	0,988
5	0,4	1,5	0,964
7	0,3	2,2	0,903
5	0,6	2,2	0,903
5	0,4	2,2	0,831
5	0,6	1,5	0,775
5	0,4	3,0	0,761
7	0,1	1,5	0,753
7	0,3	1,5	0,745
7	0,1	2,2	0,736
7	0,1	3,0	0,696

Kolonnin taloudellisuutta suhteessa poistotehoon arvioitaessa (TAULUKKO 5) voidaan todeta, että tehonkulutuksella on suuri vaikutus kolonnin taloudellisuuteen. Huomattiin, että mitä pienempi tehonkulutus oli, sitä parempi oli poistotehon ja siihen käytetyn energian suhde. Tämä ei pätenyt suoraan arvioitaessa puhdistustehokkuuden taloudellisuutta, koska puhdistustehokkuuden arvojen väliset erot olivat suhteessa suurempia kuin poistotehossa, jolloin niiden merkitys taloudellisuuden kannalta oli merkittävämpi, kuin poistotehon arvojen.

Saatujen tulosten perusteella voitiin todeta, että seitsemän levyä ja 0,3 baaria tuotti suhteessa parhaimman tuloksen kokonaisuutena, niin poistotehokkuuden, kuin puhdistustehokkuudenkin kannalta. Huomattavaa oli myös se, että samalla levymäärällä, mutta 0,1 baarin höyrynpaineella tehdyt koeajot tuottivat huonoimman tuloksen. Voidaan siis päätellä, että höyrynpaineella oli suuri vaikutus tuloksiin. Kyseisen levymäärän tutkiminen eri parametreilla voisi tuottaa parhaan mahdollisen tuloksen työssä käytetyllä laitteistolla. Toinen tutkimuksen perusteella tehty oletta-
mus oli, että mitä suurempi levymäärä ja korkeampi höyrynpaine laitteistossa oli, sitä paremmin se toimi. Nykyisellä laitteistolla tulvimispiste tuli nopeasti vastaan, mikä viittaa siihen, että kolonnin tilavuutta tulisi kasvattaa, jotta päästäisiin parempiin tuloksiin.

LÄHTEET

Borg, S. 2014a. Aineensiirtoprosessit. Centria-ammattikorkeakoulu. Kaasuabsorptio.

Borg, S. 2014b. Prosessitekniikan harjoitustyöt. Centria-ammattikorkeakoulu. Absorptio-Desorptio työohje.

Henley, E., Seader, J. & Roper, D. 2011. Separation process principles. Kolmas painos. Aasia: John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd.

Laitinen, R. & Toivonen, J. 2007. Yleinen ja epäorgaaninen kemia. 17. painos. Helsinki: Otatieto, Gaudeamus Helsinki University Press.

Lecomte, F., Broutin P. & Lebas, E. 2010. CO2 capture. Ensimmäinen painos. Pariisi: Editions Technip.

McCabe, W., Smith, J. & Harriot, P. 1993. Unit operations of chemical engineering. Viides painos. Yhdysvallat: McGraw-Hill.

Pihkala, J. 2001. Prosessitekniikan yksikköprosessit. Toinen painos. Helsinki: Opetushallitus.

Työterveyslaitos. 2014. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet: Hiilidioksidi. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.ttl.fi/ova/hiilidioksidi.html>. Luettu 10.2.2015.

TAULUKKO 1. Ajoarvot

Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Virtaus (l/min)
5	0,4	1,5
5	0,4	2,2
5	0,4	3,0
5	0,6	1,5
5	0,6	2,2
5	0,6	3,0
7	0,1	1,5
7	0,1	2,2
7	0,1	3,0
7	0,3	1,5
7	0,3	2,2
7	0,3	3,0

TAULUKKO 2. Koeajotulokset

Koeajo	Levyjen määrä	Paine	Virtaus	CO ₂ A ₁	CO ₂ L ₁	CO ₂ erotus 1 (A ₁ -L ₁)	CO ₂ A ₂	CO ₂ L ₂	CO ₂ erotus 2 (A ₂ -L ₂)	CO ₂ A ₃	CO ₂ L ₃	CO ₂ erotus 3 (A ₃ -L ₃)
Numero	kpl	bar	l/min	ml	ml	ml	ml	ml	ml	ml	ml	ml
1	5	0,4	1,5	19,7	7,8	11,9	-	-	-	-	-	-
2	5	0,4	2,2	17,2	9,8	7,4	16,3	12,4	3,9	16,7	10,1	6,6
3	5	0,4	3,0	15,8	11,0	4,8	16,0	11,2	4,8	16,0	11,5	4,5
4	5	0,6	1,5	19,2	9,7	9,5	20,2	10,6	9,6	20,7	11,1	9,6
5	5	0,6	2,2	19,7	12,7	7,0	20,3	12,4	7,9	20,8	12,9	7,9
6	5	0,6	3,0	20,2	14,0	6,2	19,0	14,9	4,1	20,7	14,7	6,0
7	7	0,1	1,5	22,5	16,0	6,5	22,0	12,7	9,3	22,2	13,1	9,1
8	7	0,1	2,2	21,3	15,0	6,3	21,9	15,8	6,1	22,2	16,0	6,2
9	7	0,1	3,0	21,6	17,3	4,3	-	-	-	-	-	-
10	7	0,3	1,5	16,1	7,4	8,7	16,8	7,4	9,4	17,6	8,1	9,5
11	7	0,3	2,2	18,1	10,8	7,3	18,4	10,2	8,2	18,3	11,1	7,2
12	7	0,3	3,0	19,5	12,9	6,6	19,1	12,7	6,4	19,1	12,8	6,3

CO₂ A = alkupään näytteen pitoisuusCO₂ L = loppupään näytteen pitoisuus

TAULUKKO 3. Ajoarvoja ja lauhteen keskiarvot

Koeajo	Levyjen määrä	Paine	Virtaus	Kolonnin pohjan lämpötila	Kolonnin huipun lämpötila	Desorptiokolonnin paine-ero	Absorptiokolonnin poistuva CO ₂ pitoisuus	Absorptiokolonniin saapuva CO ₂ pitoisuus	Lauhde
Numero	kpl	bar	l/min	°C	°C	°C	°C	°C	g/min
1	5	0,4	1,5	98,7	86,4	0,5	-	-	226,9
2	5	0,4	2,2	98,3	85,5	0,7	1,9	-	225,4
3	5	0,4	3,0	98,0	83,3	0,5	1,3	-	223,4
4	5	0,6	1,5	98,0	86,7	0,9	2,2	9,5	270,1
5	5	0,6	2,2	98,1	83,7	0,9	1,3	8,9	278,5
6	5	0,6	3,0	97,8	83,2	0,9	1,2	8,9	260,8
7	7	0,1	1,5	96,5	87,8	0,2	12,7	15,9	118,3
8	7	0,1	2,2	96,4	87,2	0,4	9,9	15,4	128,1
9	7	0,1	3,0	95,6	81,1	0,4	0,0	0,0	142,5
10	7	0,3	1,5	99,2	84,3	42,3	8,0	16,3	249,6
11	7	0,3	2,2	98,7	83,3	45,7	6,8	15,7	247,1
12	7	0,3	3,0	98,3	83,0	41,5	6,9	15,4	211,4

TAULUKKO 4. Taloudellisuus puhdistustehokkuuden suhteen

Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Teho (kW)	Puhdistustehokkuus (%)	Taloudellisuus (%/kW)
5	0,4	8,38	43,72	5,22
5	0,6	9,99	38,37	3,84
7	0,1	5,13	30,21	5,89
7	0,3	8,85	43,23	4,88

TAULUKKO 5. Taloudellisuus poistotehon suhteen

Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Teho (kW)	Poisto- teho (kg/h)	Taloudellisuus (kg/kJ)
5	0,4	8,38	0,85	366,0
5	0,6	9,99	0,89	320,1
7	0,1	5,13	0,73	511,3
7	0,3	8,85	0,90	364,6

TAULUKKO 6. Puhdistustehokkuus eri ajoarvoilla

Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Virtaus (l/min)	Puhdistustehokkuus (%)
5	0,4	1,5	60,41
7	0,3	1,5	54,66
5	0,6	1,5	47,79
7	0,1	1,5	42,27
7	0,3	2,2	41,60
5	0,4	2,2	41,27
5	0,6	2,2	37,48
7	0,3	3,0	33,45
5	0,6	3,0	29,84
5	0,4	3,0	29,50
7	0,1	2,2	28,45
7	0,1	3,0	19,91

TAULUKKO 7. Poistoteho eri ajoarvoilla

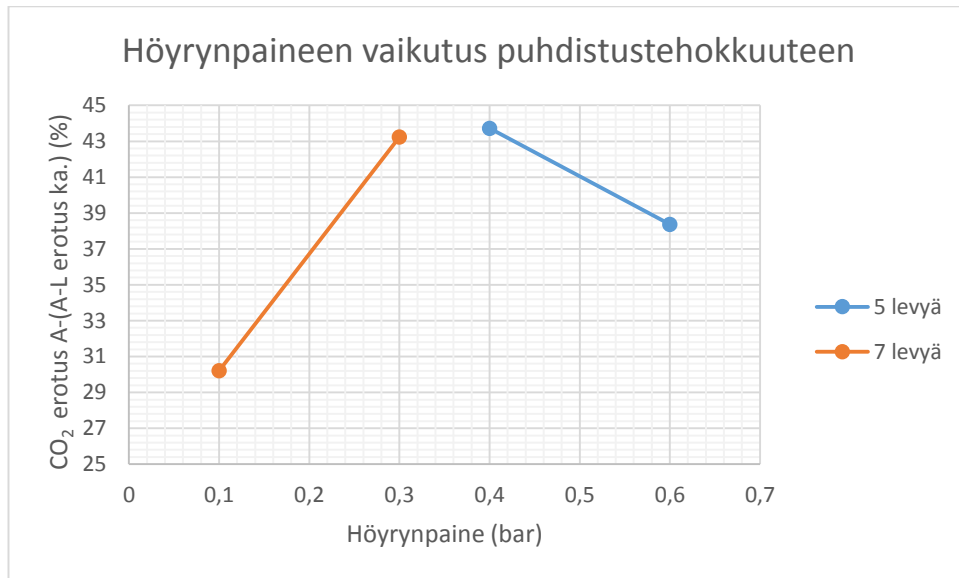
Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Virtaus (l/min)	Poistoteho (kg/h)
7	0,3	3,0	1,042
5	0,6	3,0	0,988
5	0,4	1,5	0,964
7	0,3	2,2	0,903
5	0,6	2,2	0,903
5	0,4	2,2	0,831
5	0,6	1,5	0,775
5	0,4	3,0	0,761
7	0,1	1,5	0,753
7	0,3	1,5	0,745
7	0,1	2,2	0,736
7	0,1	3,0	0,696

TAULUKKO 8. Poistoteho ja taloudellisuus eri ajoarvoilla

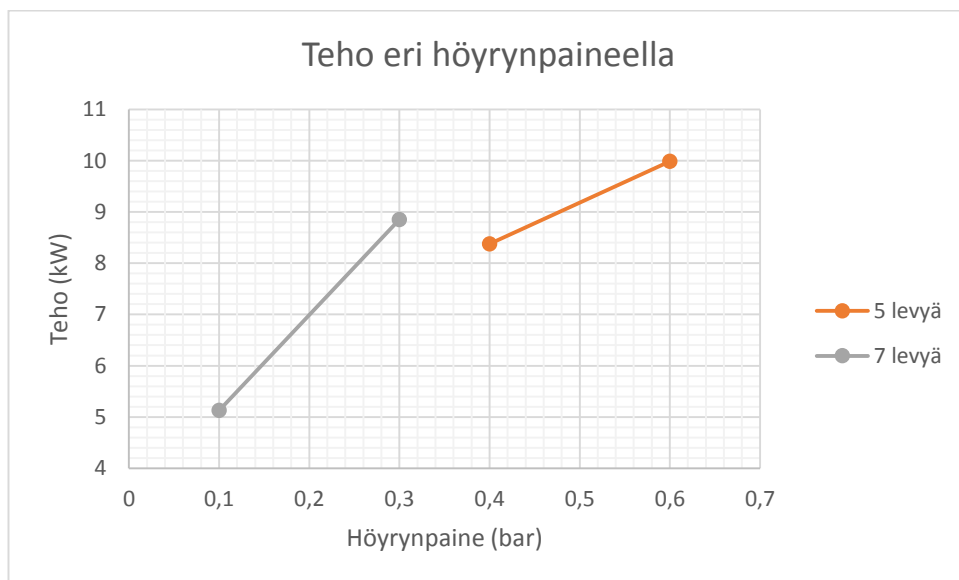
Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Virtaus (l/min)	Teho (kW)	Poistoteho (kg/h)	Taloudellisuus (kg/kJ)
5	0,4	1,5	8,44	0,964	410,99
5	0,4	2,2	8,38	0,831	356,94
5	0,4	3,0	8,31	0,761	329,81
5	0,6	1,5	10,00	0,775	278,97
5	0,6	2,2	10,31	0,903	315,05
5	0,6	3,0	9,65	0,988	368,45
7	0,1	1,5	4,43	0,753	611,30
7	0,1	2,2	4,80	0,736	551,90
7	0,1	3,0	6,15	0,696	407,66
7	0,3	1,5	9,10	0,745	294,75
7	0,3	2,2	9,05	0,903	358,88
7	0,3	3,0	8,41	1,042	446,04

TAULUKKO 9. Puhdistustehokkuus ja taloudellisuus eri ajoarvoilla

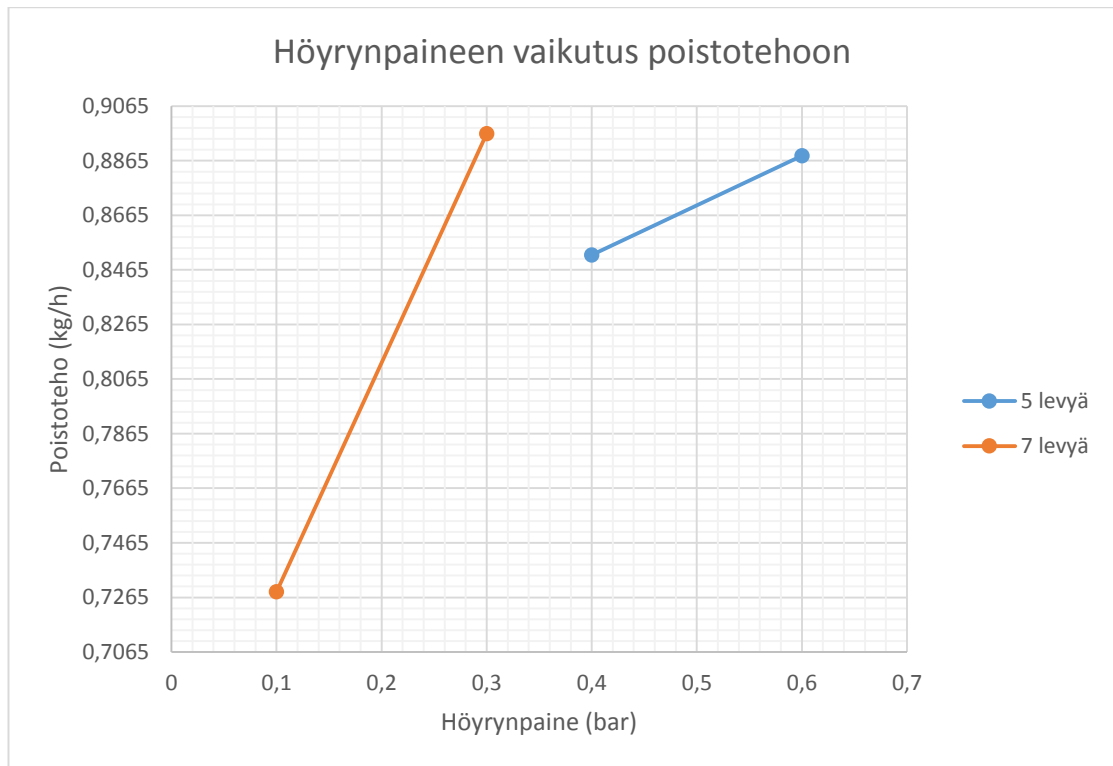
Levyjen määrä (kpl)	Höyrynpaine (bar)	Virtaus (l/min)	Teho (kW)	Puhdistustehokkuus (%)	Taloudellisuus (%/kW)
5	0,4	1,5	8,44	60,41	7,16
5	0,4	2,2	8,38	41,27	4,92
5	0,4	3,0	8,31	29,50	3,55
5	0,6	1,5	10,00	47,79	4,78
5	0,6	2,2	10,31	37,48	3,63
5	0,6	3,0	9,65	29,84	3,09
7	0,1	1,5	4,43	42,27	9,53
7	0,1	2,2	4,80	28,45	5,92
7	0,1	3,0	6,15	19,91	3,24
7	0,3	1,5	9,10	54,66	6,01
7	0,3	2,2	9,05	41,60	4,59
7	0,3	3,0	8,41	33,45	3,98



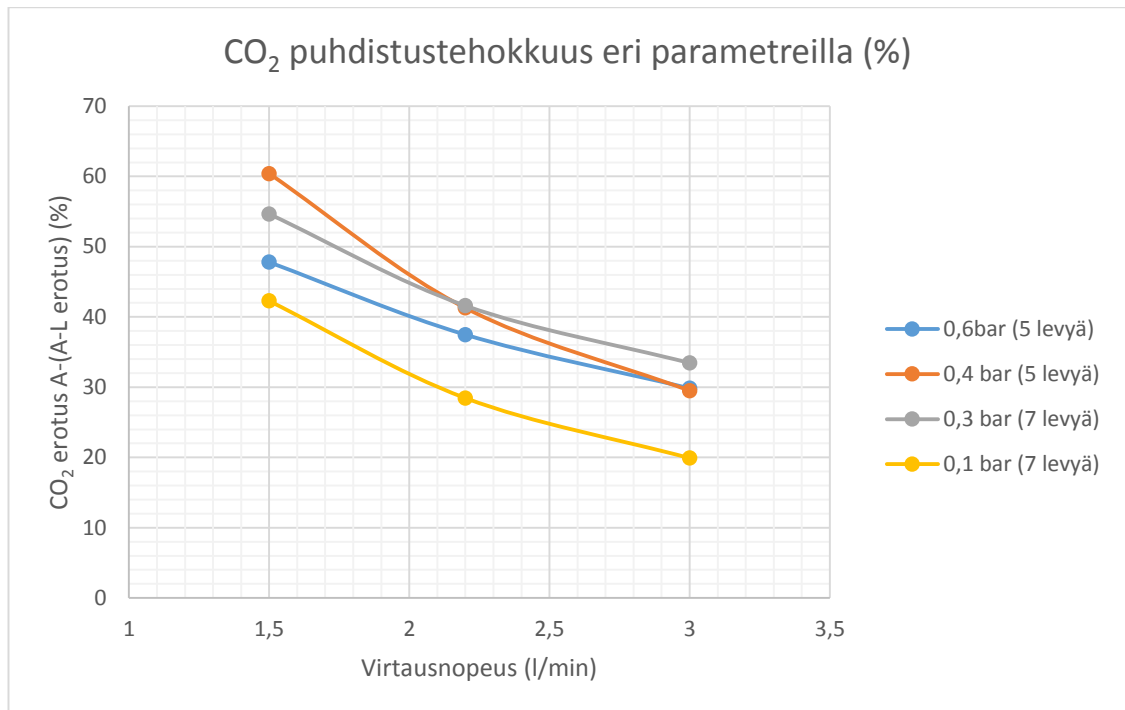
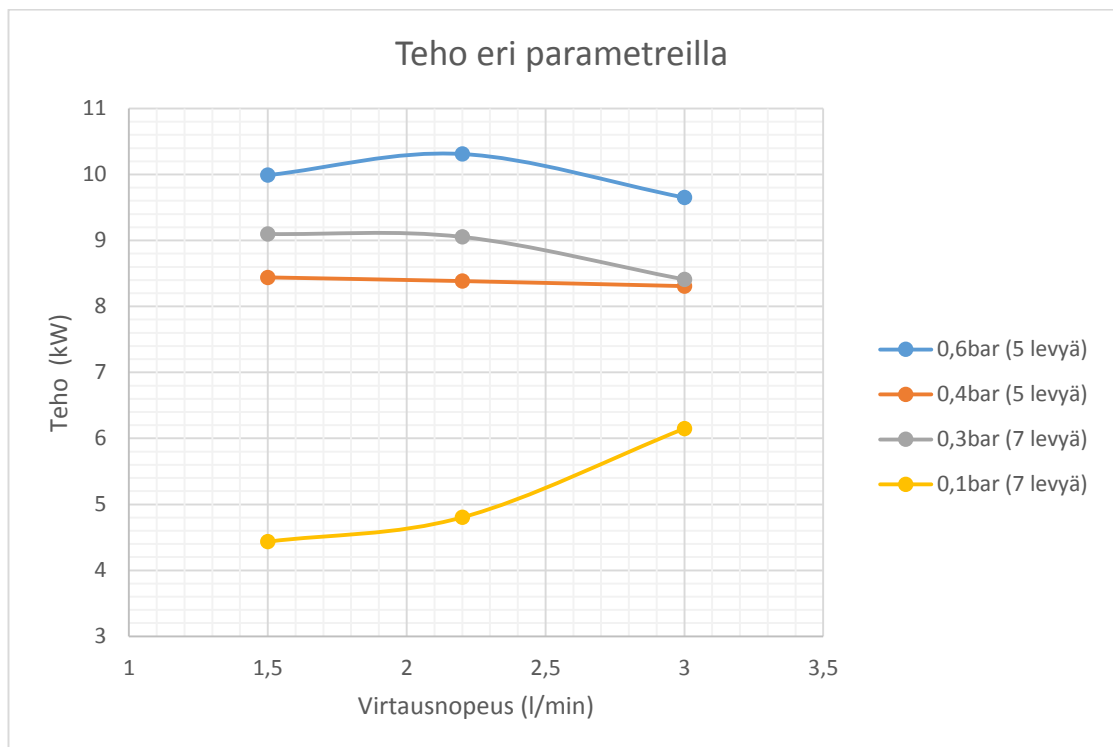
KUVIO 14. Höyrynpaineen vaikutus puhdistustehokkuuteen



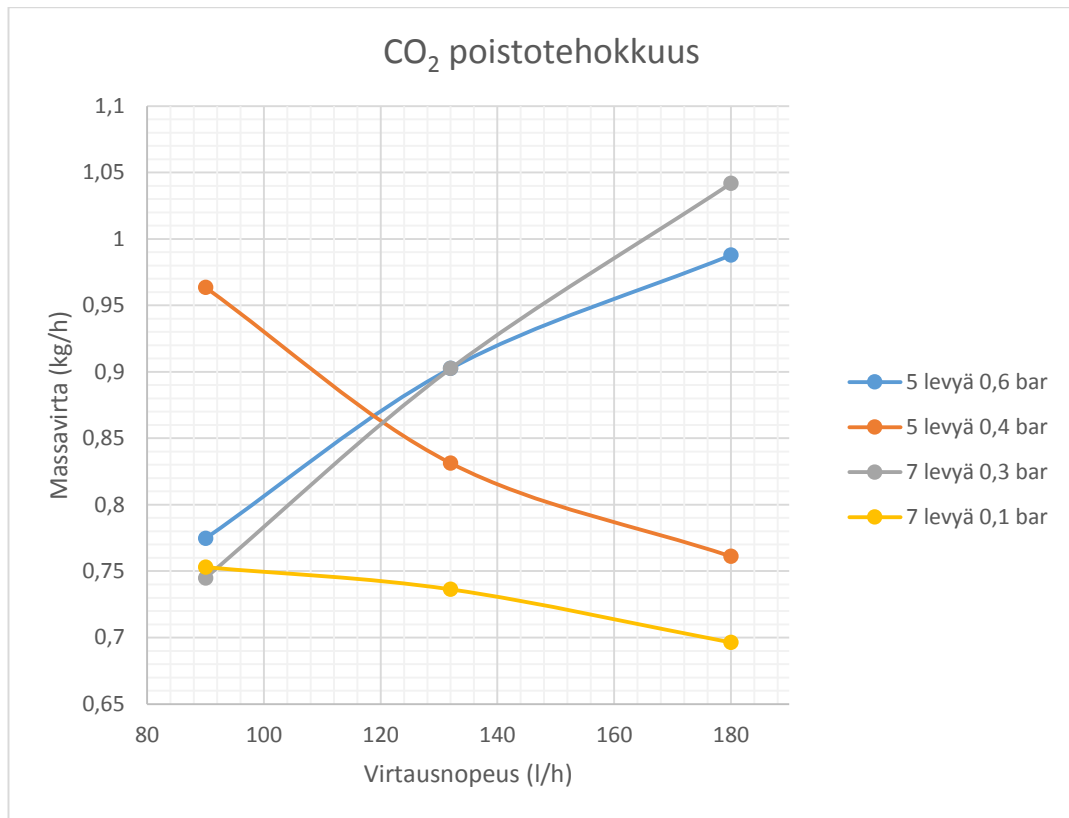
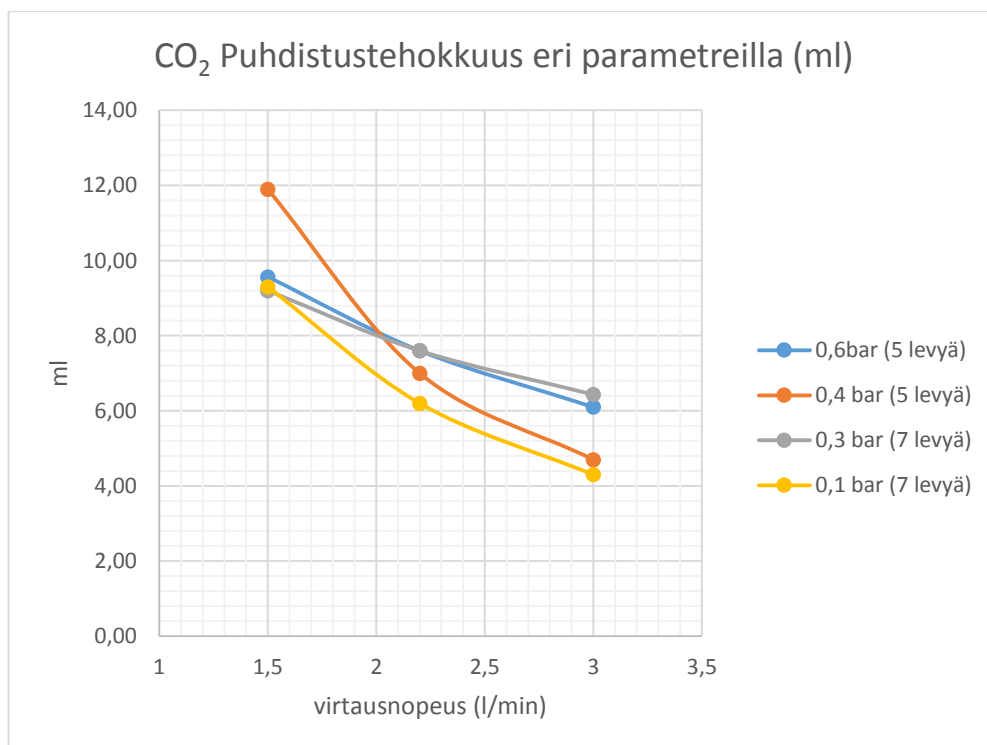
KUVIO 15. Tehonkulutus eri höyrynpaineella



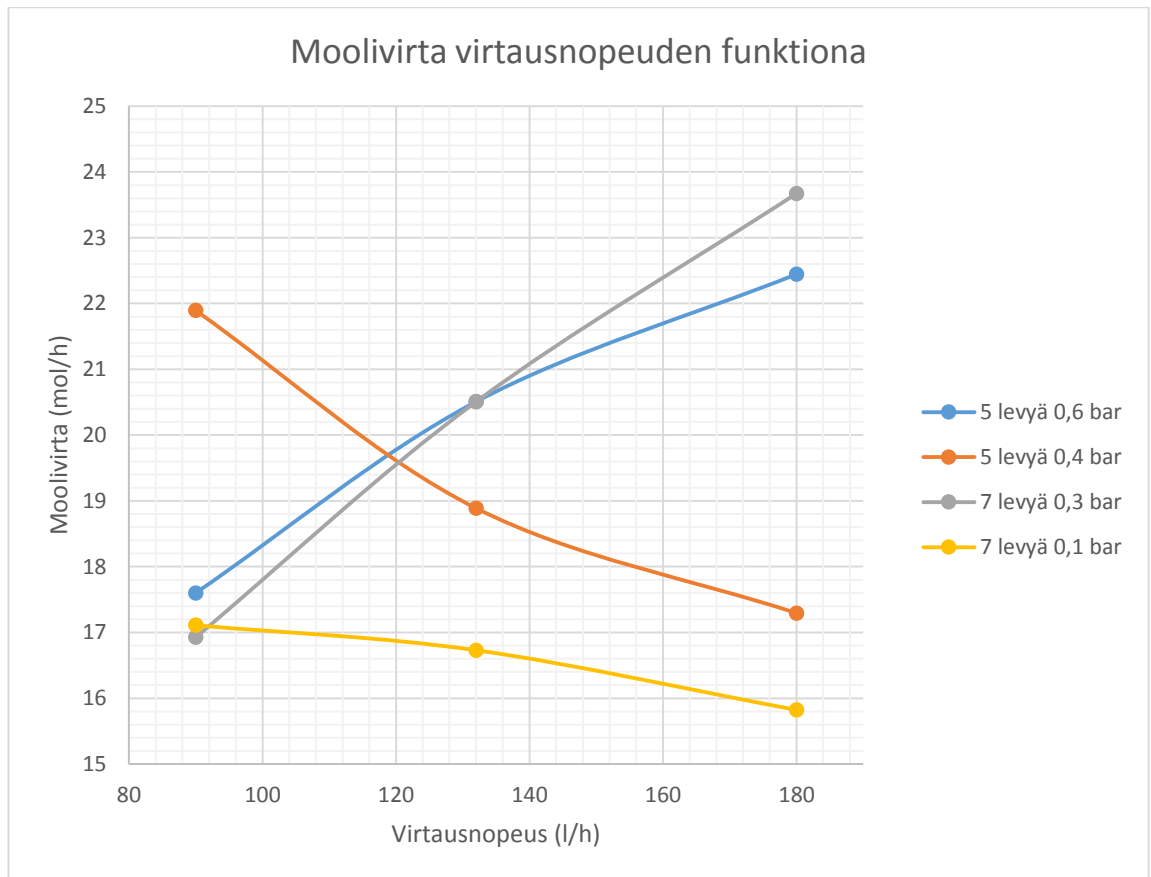
KUVIO 16. Höyrynpaineen vaikutus poistotehoon

KUVIO 17. CO₂ puhdistustehokkuus eri parametreilla

KUVIO 18. Desorptiokolonnin teho eri parametreilla

KUVIO 19. CO₂ poistotehokkuus

KUVIO 20. Desorptiokolonnin puhdistustehokkuus millilitroina



KUVIO 21. Moolivirtauksen riippuvuus virtausnopeudesta