



VOC-talteenottojärjestelmän kehittäminen

Sanna Laakkonen

Opinnäytetyö, AMK

Maaliskuu 2023

Tekniikan ja liikenteen ala

Energia- ja ympäristötekniikan koulutusohjelma

Laakkonen, Sanna

VOC-talteenottojärjestelmän kehittäminen

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Maaliskuu 2023, 86 sivua.

Tekniikan ala. Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

Tiivistelmä

VOC-aineita sisältävien liuotinhölkien talteenottoprosessin nykytilan selvittäminen ja kehittäminen oli tullut ajankohtaiseksi toteuttaa Nouryon Chemicals Finland Oy:n Äänekosken CMC -tehtaan tuotantolinjalla kolme. Tutkimuksen yksi tavoitteista oli selvittää tehtaan 3-linjan nykyisen liuotinhölkien talteenottoprosessin toimintapistettä vertaamalla linjan nykyisiä prosesseja ja laitteita Euroopan unionin määrittämään parhaaseen käyttökelpoiseen tekniikkaan. Tutkimuksessa keskityttiin tietyn liuotinhölkäpesurin toimintapisteen selvityksen ympärille. Tutkimuksessa selvitettiin myös Euroopan unionin tulevia päästörajajoja erilaisille VOC-päästöille, sekä tutustuttiin kryogeenisiin lauhdutusmenetelmiin ja niiden sovellettavuuteen.

Työ toteutettiin vahvasti työelämään kytkettynä tutkimuksellisenä kehittämistyönä laadullisen tutkimustyön työkaluja käyttäen. Tutkimuksen teoriaosuus perustuu laajasti vieraskielisiin verkkolähteisiin, kirjallisuuteen ja asiantuntijoiden tietotaitoon. 3-linjan nykytilanteen kartoitukseen käytettiin monipuolisesti tehtaan omaa dokumentaatiota ja havainnointia linjan prosessitiloissa. Asiantuntijoiden osaaminen saatiin hyödynnettyä teemahaastatteluiden avulla.

Liuotinhölkäpesurin toiminnan tutkimuksessa käytettiin apuna pesurien laskentaohjelmaa, jolla saatiin aikaan useita laskentatuloksia ja taseita käyttämällä erilaisia prosessiarvoja. Laskennan tulokset eivät antaneet suoraan vastausta siihen, miksi pesuri toimii heikosti. Tutkimus antaa kuitenkin jatkoehdotuksia lisämittausten ja -määritysten tekoon. Parhaan käyttökelpoisen tekniikan selvityksessä tuli ilmi, että 3-linjalla on jo tällä hetkellä käytössä parasta käyttökelpoista tekniikkaa, mutta aina on varaa lisätoimenpiteille, joilla linjan ympäristönsuojelun tasoa saadaan kasvatettua ja tulevaisuuden päästörajat alitettua.

Liuotinhölkien talteenoton toteutus on jatkuva prosessi. Paras käyttökelpoinen tekniikka ja siihen liittyvät päästötasot päivittyvät jatkuvasti, jolloin niin viranomaisen, kuin tuotantolaitoksen pitää olla aktiivinen toimija. Erilaiset tekniikat soveltuvat vaihtelevasti erilaisten jätekaasuvirtojen tarpeisiin, joten on tärkeä valita käsittelytekniikka, mikä on parasta käyttökelpoista tekniikkaa ja räätälöity juuri tiettyyn prosessiin tietyille prosessisuureille.

Avainsanat (asiasanat)

Nouryon Chemicals Finland Oy, BAT, VOC, liuotinhölkä, pesuri

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Laakkonen, Sanna

Developing VOC recovery system

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, September 2020, 86 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

It had become timely to investigate and develop the recovery of solvent wastes containing VOC substances in production line three of Nouryon Chemicals Finland Oy's Äänekoski CMC plant. One of the goals of the study was to find out the operating point of the current solvent waste recovery process of the plant's third line by comparing the line's current processes and equipment with the best available technology determined by the European Union. The research focused on a specific scrubber's operating point. The study also investigated the European Union's future emission limits for VOC emissions and introduced cryogenic condensation methods and their applicability.

The work was conducted as a research and development work strongly connected to working life using the tools of qualitative research work. The theoretical reference framework of the research is based extensively on foreign language web sources, literature and the expertise of specialists. The factory's own documentation and observations in the line's process facilities were used in many ways to map the current situation of the 3-line. The expert's knowledge was utilized with the help of thematic interviews.

In the study of the operation of the solvent scrubber, a scrubber calculation program was used, which produced several calculation results using different process values. The calculation results did not give a direct answer to why the scrubber works poorly. However, the study gives further suggestions for making additional measurements and determinations. The analysis of the best available technology revealed that the third line already has the best available technology in use, but there is always room for additional measures to increase the line's level of environmental protection and lower future emissions.

The implementation and development of the solvent recovery is a continuous process. The best available technology and the related emission levels are constantly updated, in which case both authorities and industry must be active participants. Different technologies are suited to the needs of different waste gas streams in different ways, so it is important to choose a treatment technology that is the best available technology and tailored to a specific process for specific process conditions.

Keywords/tags (subjects)

Nouryon Chemicals Finland Oy, BAT, VOC, solvent gas, scrubber

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

1	Johdanto	7
1.1	Tausta	7
1.2	Elomatic Oy	7
1.3	Nouryon Chemicals Finland Oy	8
2	Tutkimusasetelma	9
2.1	Tavoitteet ja rajausta.....	9
2.2	Eettisyys.....	11
2.3	Tutkimusmenetelmät	11
2.3.1	Tutkimuksellinen kehittämistyö	11
2.3.2	Tutkimusmenetelmien hyödyntäminen	13
3	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet	14
3.1	VOC-aineet	14
3.2	Euroopan unionin lainsäädäntö	16
3.2.1	Paras käyttökelpoinen tekniikka.....	16
3.2.2	Euroopan unionin perussopimukset.....	16
3.2.3	IE-direktiivi 2010/75/EU	17
3.2.4	CWW BAT- päätelmä	19
3.2.5	CWW BAT-vertailuasiakirja	19
3.2.6	WGC BAT-vertailuasiakirja	20
3.3	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden hajapäästöt	22
3.3.1	Hajapäästöjen hallinta	22
3.3.2	Hajapäästöjen vähentäminen.....	23
4	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden käsittely	25
4.1	Aineensiirtoprosessit.....	25
4.1.1	Adsorptio	25
4.1.2	Absorptio	26
4.2	Täytekappalekolonnit.....	29
4.2.1	Täytekappalekolonnin rakenne	29
4.2.2	Täytekappaleet	31
4.2.3	Täytekappaleiden puhdistaminen	33
4.2.4	Täytekappalekolonnin mitoitus	34
4.3	Lämmönsiirtotekniikat	36
4.3.1	Lämmönsiirtimet.....	36
4.3.2	Lauhdutus	37

4.3.3	Kryogeeninen lauhdutus.....	39
4.4	Muut prosessit ja järjestelmät	42
4.4.1	Terminen ja katalyyttinen hapetus.....	43
4.4.2	Bioprosessit.....	44
4.4.3	Zeoliittipohjainen roottori-konsentraattori.....	44
4.4.4	Fotokatalyyttinen hapetus.....	45
5	3-linjan toimintakuvaus	46
5.1	Karboksimetyyliselluloosan valmistus.....	46
5.2	Reaktioliuottimen talteenotto	48
5.3	Typpikaasun valmistus	49
6	Työn toteutus	49
6.1	VOC-päästörajojen tarkastelu	49
6.1.1	Nykyinen VOC-päästöraja ja -mittaukset	50
6.1.2	Tulevaisuuden VOC-päästöraja ja -mittaukset	51
6.2	3-linjan parhaan käyttökelpoisen tekniikan tarkastelu.....	52
6.2.1	Liuotinhönkien käsittely.....	52
6.2.2	Hajapäästöjen käsittely.....	53
6.3	Pesurin 41K602 tutkiminen laskennallisesti.....	54
6.3.1	Pesurin nykyiset prosessisuureet	55
6.3.2	Pesurin toiminnan tarkastelu nykyisillä prosessisuureilla	59
6.3.3	Pesurin toiminnan tarkastelu muutetuilla prosessisuureilla.....	60
7	Laskennan tulokset	62
7.1	Pesurin toiminta	62
8	Pohdinta ja parannusehdotukset	63
8.1	Täytekappalekolonnin puhdistus	63
8.2	Liuotinhönkien käsittely	65
8.2.1	Pesuri 41K602	65
8.2.2	Kryolauhdutus.....	69
8.3	Hajapäästöjen käsittely	70
9	Loppupohdinta	71
	Lähteet	73
	Liitteet	78
	Kuviot	
	Kuvio 1. Äänekosken tehdasintegraatti	9

Kuvio 2. IE-direktiivin vaikutuspiirin kulku	18
Kuvio 3. Vuototesti EN13555 mukaiselle ePTFE tiivisteelle.....	24
Kuvio 4. Jatkuvatoiminen adsorptio-desorptio prosessi	26
Kuvio 5. Tyypillinen absorptio-desorptio prosessi.....	28
Kuvio 6. Täytekappalekolonnin rakenne.....	29
Kuvio 7. Erilaisia nesteenjakaajia	31
Kuvio 8. Erilaisia täytekappaleita	32
Kuvio 9. Putkilämmönsiirsin.....	37
Kuvio 10. Yksinkertainen lauhdutusjärjestelmä	38
Kuvio 11. Kryolauhdutusjärjestelmä ja typpikaasun hyödyntäminen	40
Kuvio 12. Cryo-Condap® -järjestelmä	41
Kuvio 13. Katalyyttinen hapetus	43
Kuvio 14. Zeoliittipohjainen roottori-konsentraattori.....	45
Kuvio 15. Fotokatalyyttinen hapetusreaktio.....	46
Kuvio 16. CMC:n valmistuksen päävaiheet.....	47
Kuvio 17. VOC-päästöt suhteessa tuotettuun CMC:hen.....	50
Kuvio 18. Valokuva liuotinhölkäpesurista 41K602.....	54
Kuvio 19. Pesurin 41K602 VOC-mittaukset vuoden ajalta.....	56
Kuvio 20. Pesurin tase 1: Nykytilanne.....	59
Kuvio 21. Pesurin tase 2: Suurempi pitoisuus.....	60
Kuvio 22. Pesurin tase 3: Suurin mahdollinen kapasiteetti	61
Kuvio 23. Pesurin tase 4: Pesuveden lämpötila korotettu.....	61
Kuvio 24. Pesurin tase 5: Suurin etanolipitoisuus pesuvedessä	62
Kuvio 25. Valokuva pesurin 41K601 näkölasista.....	64
Kuvio 26. Pesurin 41K602 VOC-mittaukset 2004-2021	66
Kuvio 27. Pesurit sarjassa.....	68

Taulukot

Taulukko 1. VOC-yhdisteiden luokitus	15
Taulukko 2. Kryolauhdutussysteemin edut ja haitat	69

1 Johdanto

1.1 Tausta

Suomi ja muu maailma ovat vasta pikkuhiljaa viime vuosikymmenten aikana alkaneet heräämään kunnolla päästöjen todellisiin haittoihin ja niiden pitkäaikaisiin vaikutuksiin ympäristölle. Alati tiukenevat Euroopan unionin lainsäädännöt koskien teollisuuden päästöjä ja niiden käsittelyä saattavat jättää tuotantolaitokset ahtaalle. Yksi tapa on olla aina askeleen edellä; tutkia kriittisesti omia päästöjä ilman lakien painostusta, ja tehostaa päästöjen keräysjärjestelmiä motiivina pelkästään energiatehokkuuden lisääminen ja ympäristön suojelu tuleville sukupolville. Kokonaisvaltainen tieto laitoksen prosessien toiminnan nykytilasta toimii lähtökohtana kannattavien tehostamiskohteiden paikallistamiselle (Voimalaitoksen energia-analyysi 2015, 4).

Opinnäytetyössä tarkasteltiin Nouryon Chemicals Finland Oy:n Äänekosken CMC -tehtaan 3-linjan VOC-talteenottojärjestelmän nykyistä toimintapistettä. Tarkastelussa olivat linjan liuotinhönkien talteenoton nykyinen ympäristönsuojelun taso ja se, miten talteenottoa voisi kehittää tehokkaammaksi. Työn tarkoituksena oli saada aikaan laadukas ja hyvää tieteellistä käytäntöä noudattava opinnäytetyö, joka antaa toimeksiantajalle mahdollisimman kokonaisvaltaisen kartoituksen 3-linjan VOC-järjestelmän nykytilasta antaen kehitysehdotuksia ja jatkosuunnitelman.

Opinnäytetyö oli toimeksiantajalle toivottu ja tarpeellinen. Toimeksiantajalla on vahva pyrkimys toteuttaa opinnäytetyön tulosten pohjalta syntyneet kehitysehdotukset käytännössä ja jalostaa opinnäytetyön pohjalta syntyneitä päätelmiä ja ideoita. Opinnäytetyö auttaa toimeksiantajaa varautumaan seuraavien vuosikymmenien aikana voimaan tuleviin päästörajoituksiin. Energiatehokkuuden, resurssitehokkuuden ja prosessiturvallisuuden edistämisen näkökulmat oli myös toivottu ottaa huomioon tutkimuksessa hönkäkaasujen käsittelyjärjestelmän kehittämisen ohella.

1.2 Elomatic Oy

Opinnäytetyö toteutettiin Nouryon Chemicals Finland Oy:n ja suunnittelutoimisto Elomatic Oy:n yhteistyönä. Elomatic on arvostettu, reilu 50-vuotta vanha suomalainen insinööritoimisto, jolla on toimipisteitä useiden suurien Suomen kaupunkien lisäksi Puolassa, Hollannissa, Intiassa, Kiinassa,

Italiassa ja Yhdistyneissä Arabiemiirikunnissa. Elomatic toimii laajasti useilla eri toimialoilla. Suurimpiin toimialoihin lukeutuvat meri-, offshore-, energia-, prosessi-, kone- ja lääketieteellisyys. Elomaticin palveluihin lukeutuvat suunnittelu, konsultointi, ohjelmistokehitys, projektinhallinta ja tuotekehitys. (Elomatic lyhyesti n.d.)

1.3 Nouryon Chemicals Finland Oy

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Nouryon Chemicals Finland Oy:n Äänekosken CMC -tehdas. Tehdas on maailman suurin CMC-tehdas, ja se sisältää yhteensä kolme erilaista CMC:n tuotantolinjasta: 3-linjan, 4-linjan ja 6-linjan. Nouryon osti Äänekosken CMC -tehtaan vuonna 2020 J.M. Huber -yhtiöltä, ja tehdas tunnettiin ennen kauppvoja nimellä CP Kelco. Oston yhteydessä Äänekosken CMC -tehdas ja sen reilut 200 työntekijää liittyi osaksi Nouryonin 400 vuotta vanhaan kemikaali-imperiumiin. Nouryonilla on maailmanlaajuisesti yli 10 000 työntekijää, ja sen toimialoihin kuuluvat paperi, muovi, rakennusmateriaalit, elintarvikkeet, lääkkeet ja hygieniatuotteet. Tehdaslisäyksen myötä tullut kattava CMC-tuotevalikoima palvelee Nouryonin asiakkaita yli 80 maassa. (CP Kelco on myyty Nouryonille 2020.)

CMC eli karboksimeetyliselluloosa on puolisynteettinen polymeerin ja selluloosan johdannainen. Karboksimeetyliselluloosassa osa sellumolekyylin hydroksyyli-ryhmistä on korvaantunut karboksimeetyli-ryhmillä. (E466. n.d.) CMC:n valmistuksessa käytettäviä pääraaka-aineita ovat selluloosa, lipeä, monokloorietikkahappo, erilaiset liuottimet ja typpi. Lopputuotteena CMC on ominaisuuksiltaan hajuton, mauton ja täysin biohajoava. (Turvallisuustiedote 2019.) CMC:tä käytetään vuodessa maailmanlaajuisesti yhteensä 230 000 tonnia lukuisilla eri teollisuuden aloilla, mihin lukeutuvat elintarvike-, paperi-, öljy-, kaivos-, tekstiili- ja lääketieteellisyys (Savela 2013). Elintarviketeollisuudessa CMC:tä käytetään paljon esimerkiksi stabilointi- ja täyteaineena, ja sillä on useita eri e-koodoja, riippuen CMC:n kemiallisesta koostumuksesta. Esimerkiksi E466 on natriumkarboksimeetyliselluloosa, jossa CMC on natriumsuolana. (E466 n.d.) E-koodilla merkitään Euroopan unionin hyväksymät elintarvikkeiden lisäaineet (Schwab 2020).

Nouryonin CMC -tehdas on osa Äänekosken tehdasintegraattia. Kuviosta 1 näkee, että integraattiin kuuluu Nouryonin CMC-tehtaan (kuvassa vielä vanhalla nimellä CP Kelco) lisäksi Metsä Boardin kartonkitehdas, Metsä Fibren biotuotetehdas, Metsä Woodin viilutehdas, Specialty Mineralsin kaliumkarbonaattitehdas ja AGA:n happea tuottava tehdas. (Turvallisuustiedote 2019.)



Kuvio 1. Äänekosken tehdasintegraatti (Turvallisuustiedote 2019)

2 Tutkimusasetelma

2.1 Tavoitteet ja rajaus

Opinnäytetyön toimeksiantajalla oli tutkimukselle selkeitä tavoitteita. Opinnäytetyö rajautui fyysisesti Nouryonin Äänekosken tehtaan tuotantolinjalle kolme, tutummin 3-linjalle. 3-linjan sisällä opinnäytetyössä tarkasteltava kokonaisuus tarkentui liuotinhönkien talteenottoprosessiin. Toimeksiantajaa kiinnosti selvittää, mikä on nykyhetken parasta käyttökelpoista tekniikkaa liuotinhönkien talteenotossa. Selvityksen tulosta peilattiin 3-linjan nykyiseen liuotinhönkien talteenottoprosessiin, jolloin saatiin kuva prosessin ympäristönsuojelun nykyisestä tasosta. Selvityksen perusteella tutkittiin myös muita mahdollisia liuotinhönkien talteenottotekniikoita ja niiden soveltuvuutta 3-linjalle.

3-linjan liuotinhönkien talteenottoprosessiin kuuluu kaksi liuotinhönkä-pesuria. Liuotinhöngällä tarkoitetaan ilmaa tai muuta kaasua, mihin on absorboitunut liuotinta. Toimeksiantajalla oli vahva

aavistus, että toinen pesureista ei toimi tarpeeksi tehokkaasti. Opinnäytetyön yksi tutkimuskysymys eli tavoite olikin selvittää pesurin nykyistä toimintapistettä, ja etsiä syitä sen toiminnan heikkenemiselle. Toimeksiantaja halusi myös selvittää, mikä on parasta käyttökelpoista tekniikkaa pesurin sisältämien täytekappaleiden puhdistuksessa. Opinnäytetyö rajautui selvitystyöksi.

Tutkimuksen edetessä kävi ilmi, että selvitystä olisi hyvä hieman laajentaa, jotta tutkimuksen avulla saataisiin mahdollisimman kokonaisvaltainen käsitys 3-linjan liuotinhönkiin liittyvästä tekniikasta. Hajapäästöt muodostavat ison osan tehtaan VOC-päästöistä, joten ne oli hyvä ottaa tutkimuksessa huomioon. Tutkimukseen lisättiin myös selvitys, miltä VOC-päästörajat tulevat näyttämään tulevaisuudessa verrattuna nykyisiin päästörajoihin.

Tutkimuskysymyksiksi muodostuivat:

- Mikä on BAT liuotinhönten talteenotossa?
- Mikä on liuotinhönpesurin 41K602 toimintapiste?
- Mikä on BAT pesurin täytekappaleiden puhdistuksessa?
- Miten kryolauhdutus sopii 3-linjalle?
- Mitkä ovat VOC-päästörajat tulevaisuudessa?
- Mikä on BAT hajapäästöjen hallinnassa?

Opinnäytetyö rajattiin sisältämään vain selvitystyön, ja kaikki konkreettiset parannustyöt rajattiin työn ulkopuolelle. Tutkimuksen tärkein tehtävä oli vastata toimeksiantajan kysymyksiin ja selvittää toimeksiantajan antamia ongelmakohtia. Selvitystyön tulosten perusteella toimeksiantaja saa suunnan, mihin suuntaan 3-linjan liuotinhönten talteenottoa kannattaisi viedä ja millaisia laitemuutoksia se vaatisi.

2.2 Eettisyys

Samoin kuin työelämässä, myös opinnäytetyössä tulee noudattaa eettisiä sääntöjä ja periaatteita. Kansainvälinen konsulttien ja insinöörien liitto FIDIC on luonut suunnittelu- ja konsulttitoiminnalle eettiset säännöt, mitä Suomessa noudattavat kaikki SKOL-jäsenyritykset. SKOL on lyhenne sanoista suunnittelu- ja konsultointiyritykset, ja se on edellä mainittujen alojen edunvalvontajärjestö. FIDICin eettiset säännöt koostuvat 15 kohdasta, missä pureudutaan erilaisiin velvollisuuksiin, pätevyyteen, rehellisyyteen, puolueettomuuteen ja oikeudenmukaisuuteen. Säännöissä kehoitetaan noudattamaan kestävän kehityksen mukaisia periaatteita, mitä myös Jyväskylän ammattikorkeakoulu toivoo kouluttamiltaan osaajiltaan (FIDICin eettiset säännöt 2018; Vastuullinen ja kestävä Jamk n.d.). Säännöissä muistutetaan myös ylläpitämään ammattitaitoa eritoten teknologian kehityksen ja lainsäädännön aloilla, sekä palvelemaan tilaajaa, opinnäytetyön tapauksessa toimeksiantajaa, parhaalla mahdollisella taidolla (FIDICin eettiset säännöt 2018).

”FIDICin eettisten sääntöjen (2018) sääntö numero kuusi kiteyttää hyvin myös Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettiset perusteet opinnäytetyölle: Toimia tilaajan laillisten tavoitteiden toteuttamiseksi sekä suorittaa toimeksiannot rehellisesti ja uskollisesti.” Opinnäytetyöprosessissa epärehellisyys eli plagiointi ja huijaus johtavat seuraamuksiin (Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettiset periaatteet 2018). Opinnäytetyössä tulee noudattaa hyvää tieteellistä käytäntöä aivan samalla tavalla, kuten esimerkiksi metallipajoilla tulee noudattaa hyvää konepajakäytäntöä. Hyvään tieteelliseen käytäntöön sisältyy muun muassa rehellisyys ja huolellisuus tutkimustyön kaikissa vaiheissa, sekä oikein toteutettu aineistohallinta (Hyvä tieteellinen käytäntö 2023).

2.3 Tutkimusmenetelmät

2.3.1 Tutkimuksellinen kehittäminen

Tutkimuksellisen kehitystyö pohjautuu työelämän ongelmiin ja kysymyksiin. Kehittämistyössä käytännön ongelmiin haetaan ratkaisua niin kehittämis- kuin tutkimuksellisella toiminnalla (Tutkimuksellinen kehittäminen n.d.). Kehittämistutkimukseen kuuluvat yleensä selkeät tavoitteet ja tavoitteiden onnistumisen mittarit (Jurvelin 2020). Opinnäytetyönä kehittämistutkimus rakentuu pitkälle tutkimuskysymysten, työn toteuttamisen ja tulosten arvioinnin sekä työn teoreettisen viitekehyksen ympärille (Tutkimuksellinen kehittäminen n.d.).

Teoreettinen viitekehys määrittelee opinnäytetyön kehittämisosaa. Teoreettinen viitekehys eli tietoperusta koostuu olemassa olevasta tiedosta työhön liittyvistä aihealueista. Tietoperustan tulee sisältää perusolettamukset, joilla edistetään opinnäytetyön tutkimuskysymysten eli selvitettävien ongelmien määrittämistä, rajaamista ja ratkaisemista. Tietoperustaan kannattaa valita vain tietoa, mitä käytetään opinnäytetyön tutkimuskysymysten ratkaisuun tai näkökulman laajentamiseen. (Jurvelin 2020). Tietoperustan rakentamisen yhtenä menetelmänä voidaan käyttää kirjallisuuskatsausta. Kirjallisuuskatsauksessa kootaan tutkimustuloksia jo tehdyistä tutkimuksista, ja analysoidaan niitä kriittisesti. (Kananen 2019, 40.)

Tutkimuksellinen kehittäminen on empiirinen tutkimus. Empiirisessä eli kokeellisessa tutkimuksessa aineisto kerätään itse ja sen tavoitteena on kartoittaa, kuvailla, selittää ja arvioida tutkittavaa ilmiötä. Empiirinen tutkimus voidaan jakaa kahteen alalajiin, kvalitatiivisiin ja kvantitatiivisiin tutkimuksiin. (Jurvelin 2020.) Kvalitatiivinen eli laadullinen tutkimus tapahtuu tyypillisesti tutkittavan ilmiön luona ja tutkija on usein ulkoinen havainnoija. Laadullisella tutkimuksella pyritään saamaan mahdollisimman kokonaisvaltainen kuva ja ymmärrys tutkittavasta ilmiöstä. Kvantitatiivisessa eli määrällisessä tutkimuksessa ilmiötä pyritään analysoimaan yleistämällä teorioiden ja mallien kautta. Tutkittava ilmiö ja siihen vaikuttavat tekijät ovat tuntemattomia. Tutkimuksellisessa kehittämisessä käytetään yleensä laadullisen tutkimuksen menetelmiä. (Kananen 2019, 25–26.)

Laadullisessa tutkimuksessa aineistoa kerätään ja analysoidaan jatkuvasti vaiheittain. Aineistonkeruumenetelmiä ovat sekundääriset ja primääriset menetelmät. Sekundääriaineistoon sisältyvät jo olemassa olevat aineistot, esimerkiksi tutkimukset, standardit, ohjeet ja tilastot. Primääriaineisto kerätään yleensä nimenomaista tutkimusongelmaa varten ja siihen sisältyvät kyselyt, haastattelut ja havainnointi. Haastattelun kaksi eri tyyppiä ovat strukturoidut haastattelut ja teemahaastattelut. Havainnoinnin eri tyyppisiä ovat tekninen-, piilo-, suora-, osallistava- ja osallistuva havainnointi. Laadullinen tutkimus voi perustua kokonaan jo olemassa oleviin aineistoihin. (Kananen 2019, 27–28.)

Yksi tutkimustyön tärkeimmistä asioista on arvioida työn luotettavuutta. Laadullisen tutkimuksen luotettavuutta voidaan arvioida tulosten pysyvyyden eli reliabiliteetin ja oikeiden asioiden tutkimi-

sen eli validiteetin avulla. Tutkimuksen luotettavuus voidaan arvioida hyväksi silloin, kun tutkimuskysymykset on määritelty oikein, aineisto on riittävä ja luotettava, ja aineiston perusteella tehdyt johtopäätökset ovat oikeita. (Kananen 2019, 30-31.) Luotettavuutta voidaan vahvistaa muun muassa aineistotriangulaatiolla, informantin vahvistuksella, memberchekingillä ja arvioitavuudella. Aineistotriangulaatiossa eri lähteitä verrataan keskenään tai lähteitä verrataan esimerkiksi omaan tulkintaa. Mitä useampi lähde tukee samaa tulkintaa, sitä uskottavampi ja luotettavampi lähde on. Informantin käyttäminen aineiston vahvistamisessa tarkoittaa, että työssä haastateltu henkilö käy läpi tutkimuksen aineiston ja tulkinnan, ja joko vahvistaa tulkinnot tai on sen kanssa eri mieltä. Memberchekingissä toinen tutkija vahvistaa tutkimuksessa tehdyt tulkinnot. Laadullisen tutkimuksen arvioitavuutta parantaa riittävä dokumentaatio, minkä avulla voidaan arvioida, onko tutkimuksen johtopäätökset tehty oikein. (Kananen 2019, 33–35.)

2.3.2 Tutkimusmenetelmien hyödyntäminen

Opinnäytetyö rajautui työelämään vahvasti pohjautuvaksi selvitystyöksi, jolloin työ sopi hyvin tutkimuksellisen kehittämistyön raameihin. Opinnäytetyöllä yritettiin saada mahdollisimman kokonaisvaltainen kuva VOC-päästöjen hallinnasta, ja havainnointiympäristönä toimi Nouryonin Äänekosken tehtaan 3-linja. Tutkimuskysymykset muotoutuivat selkeästi toimeksiantajan ongelmien ympärille.

Opinnäytetyön aineistoa kerättiin ja analysoitiin monista eri lähteistä monipuolisesti työn aikana. Kanasen (2019, 28) mukaan laadulliselle tutkimukselle tyypillisiä aineistonkeruumenetelmiä ovat dokumentit, havainnointi ja teemahaastattelut. Kyseiset keruumenetelmät valikoituivat myös tämän opinnäytetyön aineistonkeruumenetelmiksi, sillä niiden avulla päästiin vastaamaan tutkimuskysymyksiin. Sekundääriaineistoa kerättiin paljon kirjoista ja englanniksi internetistä, minkä avulla vahvistettiin työhön liittyvien ilmiöiden ymmärrystä. Sekundääriaineiston tärkeimmän osan muodostivat Euroopan unionin dokumentit teollisuuden päästöistä, sekä Nouryonin tehtaan sisäiset dokumentit. Primääriaineistoa kerättiin havainnoimalla tutkimuksen ympäristöä 3-linjaa ja haastatteleamalla alan asiantuntijoita. Havainnointi kohteessa lisäsi selvitystyön kokonaisvaltaista ymmärrystä. Asiantuntijoiden teemahaastattelut antoivat vastauksia kysymyksiin, mitä olisi ollut mahdotonta löytää muualta. Erilaisten aineistonkeruumenetelmien avulla tutkimukselle kertyi runsas aineisto, mitä analysoimalla saatiin vastaukset tutkimuskysymyksiin.

Tutkimuksen luotettavuuteen panostettiin lähteiden määrällä ja monimenetelmäisyydellä, sekä itse lähteiden luotettavuudella. Euroopan Unionin dokumentteja voidaan pitää hyvinkin luotettavina, sillä niitä kokoavat erilaiset asiantuntijoista koostuvat työryhmät ja niitä käytetään kansainvälisten lainsäädäntöjen pohjana. Luotettavuutta lisäsi asiantuntijan kanssa aineiston läpikäyminen, ja tulkinnoista samaa mieltä oleminen. Aineiston tulkintaa vahvistettiin myös vertaamalla eri lähteitä toisiinsa, jolloin saatiin varmistus tulkinnan paikkaansa pitävyydelle.

3 Haihtuvat orgaaniset yhdisteet

3.1 VOC-aineet

VOC on vakiintunut lyhenne termistä volatile organic compound, mikä tarkoittaa haihtuvaa orgaanista yhdistettä. Erilaisia VOC-aineiksi luokiteltavia aineita yhdistävät toisiinsa se, että ne sisältävät muiden orgaanisten yhdisteiden tapaan hiiltä, sekä niillä on korkea höyrynpaine. Aine luokitellaan VOC-aineeksi, jos sen höyrynpaine on yhtä suuri tai suurempi kuin 0,01 kPa lämpötilan ollessa 20 °C, tai jos aineella on vastaava haihtuvuus tietyissä käyttöolosuhteissa. (2010/75/EU.)

Aineilla, joilla on korkea höyrynpaine, kiehuvat eli höyrystyvät jo alhaisissa lämpötiloissa. Erittäin korkean höyrynpaineen omaavat aineet höyrystyvät jo huoneenlämpötilassa. Höyrynpaine on kemiallisesti puhtaan aineen fysikaalinen ominaisuus. Seoksien höyrynpaine ja kiehumispiste on riippuvainen seoksen sisältämien komponenttien suhteellisista määristä. Neste alkaa kiehumaan silloin, kun sen höyrynpaine on yhtä suuri vallitsevan ympäristön paineen kanssa. (Kiss 2013, 6.)

VOC-aineet vaikuttavat negatiivisesti ympäristöön, ihmisten terveyteen ja varsinkin ihmisten hengitysteihin, siksi niitä kutsutaankin yleensä päästöiksi. Maailman terveysjärjestö WHO:n mukaan VOC-aineet voidaan luokitella kolmeen eri luokkaan riippuen aineen kiehumispisteestä taulukon 1 mukaan. Eri luokan VOC-aineet niputetaan kuitenkin yleensä pelkästään VOC-termin alle. Herkästi haihtuvilla orgaanisilla yhdisteillä VVOC on alhainen kiehumispiste ilmakehän paineessa, jopa alle 0 °C aina 50–100 °C asti. VVOC on luokista varallisin ja sen sisältämät aineet voivat olla myrkyllisiä jo pieninä pitoisuuksina. Herkästi haihtuvia aineita ovat mm. propaani, butaani ja metyylikloridi. (EPAs List of VOCs in order of toxicity 2020.)

Taulukko 1. VOC-yhdisteiden luokitus (EPAs List of VOCs in order of toxicity 2020)

Description	Abbreviation	Boiling Point Range (°C)	Example Compounds
Very volatile (gaseous) organic compounds	WVOC	<0 to 50-100	Propane, butane, methyl chloride
Volatile organic compounds	VOC	50-100 to 240-260	Formaldehyde, d-Limonene, toluene, acetone, ethanol (ethyl alcohol) 2-propanol (isopropyl alcohol), hexanal
Semi volatile organic compounds	SVOC	240-260 to 380-400	Pesticides (DDT, chlordane, plasticizers (phthalates), fire retardants (PCBs, PBB))

Kaksi muuta luokkaa ovat haihtuvat orgaaniset yhdisteet VOC ja puoli haihtuvat orgaaniset yhdisteet SVOC. Keskimmaisessä luokassa vaaditaan yli 50 °C ympäristön lämpötila ilmakehän paineessa, ja viimeisessä luokassa olevat VOC-aineet vaativat tuotantoteollisuudessa käytettäviä korkeita lämpötiloja n. 250–400 °C kiehuakseen. Keskimmaiseen luokkaan kuuluvia aineita ovat esimerkiksi teollisuudessa paljon käytetyt asetoni ja etanoli. Herkimpään SVOC-luokkaan kuuluvat hyönteistorjunta- ja palonestoon käytettävää aineita. (EPAs List of Volatile Organic Compounds in order of toxicity 2020.)

Osa VOC-aineista kuuluvat myös erityistä huolta aiheuttavien aineiden listalle. Erityistä huolta aiheuttavat aineet ovat osa Euroopan parlamentin ja neuvoston REACH-asetusta, missä käsitellään kemikaalien rekisteröintiä, arviointia, rajoituksia ja lupamenettelyjä. (1907/2006.) Tällaisiin aineisiin sisältyvät biokertyvät ja myrkylliset aineet, hengitystieherkistäjät, hormonitoimintaa häiritsevät aineet ja CRM-luokitellut aineet. CMR-aineet aiheuttavat syöpää, vahingoittavat perimää ja ovat lisääntymiselle vaarallisia. (Erityistä huolta aiheuttavat aineet n.d.)

3.2 Euroopan unionin lainsäädäntö

3.2.1 Paras käyttökelpoinen tekniikka

Paras käyttökelpoinen tekniikka, englanniksi best available technique eli lyhennettynä BAT, on Euroopan unionin teksteissä esiintyvä termi. BAT-konsepti esiteltiin Euroopan unionin lainsäädännössä ensimmäisen kerran nyt jo kumotussa IIPC-direktiivissä, ja se on edelleen tärkeä osa nykyisin voimassa olevaa IE-päästädirektiiviä 2010/75/EU. (IED key feature n.d.)

Parhaan käyttökelpoisen tekniikan voi määritellä olevan mahdollisimman tehokasta, mutta myös taloudellisesti toteuttamiskelpoista ja sovellettavaa. Paras käyttökelpoinen tekniikka edistää ympäristönsuojelun tasoa vähentämällä ja estämällä ympäristön pilaantumista. Parasta käyttökelpoista tekniikkaa voivat olla erilaisten laitteiden ja tuotantomenetelmien lisäksi tapa suunnitella, rakentaa, ylläpitää, käyttää ja lopettaa toimintoja. (Junnila 2015, 3.) BAT on dynaaminen konsepti, se muuttuu koko ajan tekniikan kehittyessä (WGC Bref 2022, ii). Dynaamisuuden takia jokaisen Euroopan unionin jäsenvaltion on pidettävä huoli, että niissä toimiva viranomainen seuraa jatkuvasti parhaan käytettävissä olevan tekniikan kehitystä ja siitä tiedottamista (2010/75/EU).

3.2.2 Euroopan unionin perussopimukset

Euroopan unioni ohjailee jäsenvaltioidensa toimintaa erilaisilla sopimuksilla. Sopimusten taustalla on jokin tietty tavoite, mihin sopimuksilla pyritään. Suomen kuullessa Euroopan unioniin nämä sopimukset koskevat Suomea, jos sopimuksessa erikseen ei ole muuta mainittu. (Säädöstyyppit n.d.)

Sitovat perussopimukset ovat oikeudellisesti velvoittavia. Sitovia perussopimuksia ovat asetukset, päätökset, päätelmät ja direktiivit. Asetuksia sovelletaan kaikilta osiltaan kaikkialla EU:ssa. Päätökset sitovat taas niitä ryhmiä (esimerkiksi yksittäinen EU-maa tai teollisuuden ala), joille ne ovat määritelty. Kaikkien EU-maiden on yllettävä direktiivien määritteleviin tavoitteisiin esimerkiksi säättämällä lakeja jäsenmaan sisällä. Sitomattomia perussopimuksia ovat erilaiset suositukset ja lausunnot. Sitomattomista perussopimuksista ei voi seurata oikeudellisia velvoitteita. (Säädöstyyppit n.d.)

Tuotantoteollisuutta koskevia sopimuksia ovat direktiivien ja jäsenmaiden omien lakien lisäksi BAT-vertailuasiakirjat ja BAT-päätelmät. Molemmat liittyvät nimensä mukaan parhaan käytökel-poisen tekniikan määrittelyyn. (IED key feature n.d.) BAT-vertailuasiakirjoja tarkastellaan ja päivitetään jatkuvasti tekniikan kehittyessä (WGC Bref 2022, ii).

BAT-vertailuasiakirjat ovat laadittu määritetyille toiminnoille ja sidosryhmille. Vertailuasiakirjassa kuvataan parhaan käytettävissä olevan tekniikan määrittämisessä huomioon otettavat tekniikat, sekä nykyiset päästö- ja kulutustasot. Itse vertailuasiakirjat eivät ole oikeudellisesti sitovia, vaan niiden tarkoituksena on avata taustoja BAT-päätelmille. Uusi versio BAT-vertailuasiakirjasta on pyrittävä toteuttamaan viimeistään kahdeksan vuoden kuluttua edellisen version julkaisemisesta, jotta sen antamat tiedot pysyvät mahdollisimman ajankohtaisina. (IED key feature n.d.) Koska BAT on dynaaminen konsepti, on vertailuasiakirjoja päivitettävä jatkuvasti (CWW Bref 2016, ii).

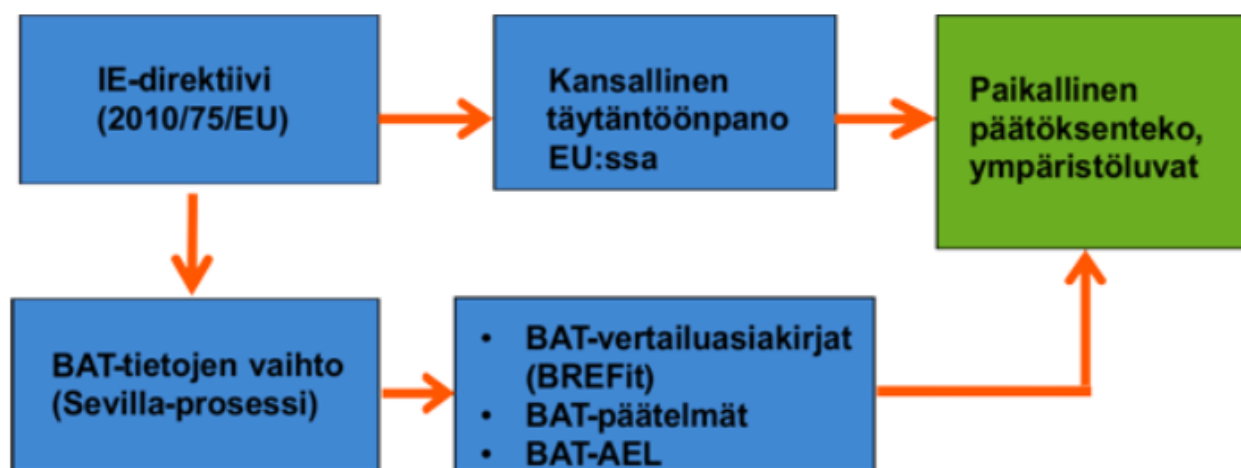
BAT-päätelmissä esitetään parhaat käytettävissä olevat tekniikat määritetyille toiminnoille ja arvioidaan niiden sovellettavuutta. Ne ovat oikeudellisesti sitovia ja niitä on noudatettava viimeistään neljän vuoden kuluessa päätöksen julkaisusta EU:n virallisessa lehdessä. BAT-päätelmiin liittyvät BAT AEL:t, eli parhaisiin käytettävissä oleviin tekniikoihin liittyvät päästötasot. (IED key feature n.d.) Jos BAT-päätelmässä ei ole määrätty mitään päästöjen raja-arvoista, määritellään ne tapauskohtaisesti. Päästörajat määritellään aina sellaisiksi, että niiden täyttämiseen tarvitaan vähintään BAT-tasosta tekniikkaa. (Junnila 2015, 10.)

3.2.3 IE-direktiivi 2010/75/EU

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/75/EU teollisuuden päästöistä koskee yhteinäistettyä ympäristön pilaantumisen ehkäisemistä ja vähentämistä. Direktiivi astui voimaan 21.11.2010, jolloin se kumosi muun muassa direktiivin 2001/81/EY, joka käsittelee tiettyjen ilman epäpuhtauksien kansallisia päästörajoituksia. Direktiiviä 2010/75/EU sovelletaan pilaantumista aiheuttavaan teolliseen toimintaa, mutta sitä ei tarvitse soveltaa uusien prosessien kehityksessä. (2010/75/EU.)

Direktiivissä käsitellään pääasiassa erilaisten ympäristöä pilaavien aineiden päästörajoja ja niihin liittyviä tarkastuksia eri teollisuudenaloilla, lupamenettelyjä, sekä tiedonantoa parhaan käytettä-

vissä olevan tekniikan käytöstä. Direktiivi muistuttaa myös, että jäsenvaltioita on tarvittaessa kannustettava varsinkin BAT-vertailuasiakirjojen sisältämien uusien tekniikoiden soveltamiseen, kehittämiseen ja jakamiseen. BAT-päätelmät pitäisi ottaa lähtökohdaksi laitoksen lupaehtoja määrittäessä. Direktiivi on saatettu Suomessa voimaan osana ympäristönsuojelulakia 527/2014, joka astui voimaan vuonna 2014. (Paras käyttökelpoinen tekniikka BAT n.d.)



Kuvio 2. IE-direktiivin vaikutuspiirin kulku (Paras käyttökelpoinen tekniikka BAT n.d.)

Teollisuuslaitos kuuluu direktiivin alle, jos se altistaa ympäristön eli ilman, veden tai maaperän pilaantumiselle. Pilaantumisella tarkoitetaan ihmisten toimesta aineiden, värinän, lämmön tai melun päätymistä suoraan tai epäsuoraan ympäristöön aiheuttaen haittaa ihmisten terveydelle tai ympäristön laadulle. Myös polttolaitokset, mihin lukeutuvat voimalaitokset ja lämpölaitokset, kuuluvat direktiivin piiriin tietyillä poikkeuksilla. Direktiivissä todetaan, että ympäristön saastumista ei kannata torjua vain suurena kokonaisuutena, sillä ilmaan, veteen tai maaperään kohdistuvat erilliset toimenpiteet on havaittu tehokkaammaksi tavaksi torjua ympäristön pilaantumista. (2010/75/EU.)

Direktiivin liitteessä 2 on listattu pilaavien aineiden luettelo, mihin myös haittavat orgaaniset yhdisteet kuuluvat. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja muiden päästöjen raja-arvoja sovelletaan vain juuri siihen hetkeen, jolloin päästöt tulevat laitoksesta ja sen kanavista ulos ympäristöön. Muita VOC-päästöjä, mitkä päätyvät ympäristöön muuten kuin hallittuina poistokaasuina, kutsutaan VOC-hajapäästöiksi. Kokonaispäästöillä tarkoitetaan taas nimensä mukaisesti hajapäästöjen ja kanavoitujen poistokaasujen sisältämien päästöjen kokonaismäärää. (2010/75/EU.)

3.2.4 CWW BAT- päätelmä

CWW BAT-päätelmässä käydään läpi paras käyttökelpoinen tekniikka kemian alan jätevesien ja jätekaasujen järjestelmissä. CWW on lyhennetty koodi, ja se tarkoittaa kemian alan jätevesien ja jätekaasujen yhdenmukaisia käsittely- ja hallintajärjestelmiä. Päätelmässä on käytännössä tiivistetty vastaavan CWW BAT-vertailuasiakirjan asiat. Päätelmässä annettavat parhaat käyttökelpoiset tekniikat eivät kuitenkaan ole sitovia, sillä muiden, päätelmässä mainitsemattomien tekniikoiden käyttö on sallittua, kunhan ne takaavat saman ympäristönsuojelun tason parhaan käyttökelpoisen tekniikan kanssa. Päätelmässä käsitellään useiden erilaisten prosessitekniikoiden lisäksi erilaisia ympäristönhallintajärjestelmiä, päästöjen seurantaa ja päästörajoituksia. (2016/902.)

Päätelmässä todetaan ilmaan johdettavien päästöjen kohdalla, että parasta tekniikkaa on käsitellä jätekaasut suoraan niiden lähteillä, eli prosessin lomassa. Erilaisia käsittelyvaihtoehtoja ei oikeastaan kuvata tarkemmin soihdutusta lukuun ottamatta. Päätelmässä ei eritellä, mitkä tekniikat ovat parasta käyttökelpoista tekniikkaa VOC-päästöjen käsittelyssä. VOC-yhdisteiden hajapäästöjen hallintaa päätelmässä kuitenkin kuvaillaan yksityiskohtaisesti. Päätelmässä käydään läpi, miten VOC-yhdisteiden hajapäästöt minimoidaan laitoksen suunnittelu-, rakennus-, ja operointivaiheessa. (2016/902.)

3.2.5 CWW BAT-vertailuasiakirja

CWW BAT-vertailuasiakirjassa käydään läpi laajasti tietoa kemian alan jätevesistä ja jätekaasuista. Tärkeässä roolissa ovat ilmaan ja veteen päätyvien päästöjen estämiseen ja vähentämiseen liittyvät parhaat käyttökelpoiset tekniikat. Tiedot vertailuasiakirjaan on kerätty useista erilaisista lähteistä, mutta suuressa roolissa ovat tekniset työskentelyryhmät eli TWG:t. (CWW Bref 2016, i-ii.) Teknisten työskentelyryhmien asiantuntijajäsenet tulevat komissiosta, jäsenvaltioista, teollisuudesta ja ympäristönsuojelujärjestöistä. (Who's who in the Industrial Emissions Directive n.d.)

Liitteessä 1 on taulukoitu vertailuasiakirjassa käsitellyt poistokaasujen käsittelytekniikat erilaisille epäpuhtauksille. VOC-aineille liite 1 mainitsee pääasiallisiksi talteenotto- ja käsittelyprosesseiksi lauhdutuksen, adsorption, absorption, bioprosessit, membraanierotuksen sekä lämpö- ja kylmähapetuksen ja niiden sisältämät erilaiset tekniikat. Tekniikat on kuvattu hyvin yksityiskohtaisesti

erilaisten prosessiesimerkkien avulla. Jokaiselle tekniikalle on myös arvioitu investointi- ja operointikustannukset sekä ympäristönsuojelun taso olemassa olevien laitosten tietojen avulla. (CWW Bref 2016, 334–335.)

3.2.6 WGC BAT-vertailuasiakirja

CWW BAT-vertailuasiakirjan lisäksi Euroopan komissio on julkaisemassa WGC BAT-vertailuasiakirjan, joka keskittyy jätekaasujen yhdenmukaiseen käsittelyyn kemian alalla. Tähän uuteen, vain jätekaasuihin keskittyvästä vertailuasiakirjasta julkaistiin maaliskuussa 2022 viimeinen luonnos, joten asiakirjan virallinen julkaisu ei ole enää kaukana. Asiakirja on tarkoitettu täydentämään CWW BAT-vertailuasiakirjaa ja CWW BAT-päätelmää. On kuitenkin mahdollista, että uuteen WGC BAT-vertailuasiakirjan tehdään muutoksia vielä ennen sen virallista julkaisua. (WGC Bref 2022, i–xxi.)

Uudessa jätekaasuihin keskittyvässä vertailuasiakirjassa käsitellään laajasti kemianteollisuuden päästöjä ilmaan. Vertailuasiakirjassa kerrotaan Euroopan unionin alueella sijaitsevan kemianteollisuuden merkitystä ympäristölle, sekä tietoa jätekaasujen käsittelytekniikoista ja niiden ympäristönsuojelun tasosta. Vertailuasiakirjasta löytyvät myös uudet BAT-päätelmät ja BAT-AEL päästötasot liittyen jätekaasujen käsittelyyn, sisältäen haihtuvat orgaaniset yhdisteet. (WGC Bref 2022.)

Uusi vertailuasiakirja muistuttaa, että parasta käyttökelpoista tekniikkaa on huolehtia, että laitoksella on paras mahdollinen ympäristönsuojelun taso. Paras käyttökelpoinen tekniikka edellyttää, että laitoksen jätekaasujen käsittelyjärjestelmät on suunniteltua noudattaen hyvää insinöörikäytäntöä, ja suunnittelussa on otettu asianmukaisesti huomioon kaikki jätekaasujen käsittelyyn liittyvät suuret. Laitteita pitää myös käyttää niiden suunnittelualueiden rajoissa ja pitää huolta niiden kunnosta ennaltaehkäisevästi, korjaavasti ja säännöllisesti. Oikein suunniteltu, käytetty ja huollettu laite toimii luotettavasti ja tehokkaasti. (WGC Bref 2022, 73.)

Vertailuasiakirjassa painotetaan prosessiin integroitujen ympäristönsuojelutekniikoiden lisäämistä. Integroiduilla tekniikoilla pyritään estämään tai ainakin vähentämään tuotettujen päästöjen määrää, mikä taas vähentää päästöjen jälkikäsittelyn kustannuksia. Integroituja tekniikoita ovat puh-
taampien raaka-aineiden käyttö, prosessivaiheiden optimointi, liuottimien käytön tehostaminen,

apuaaineiden kierrätys (esimerkiksi suojakaasuina) ja jätteiden käyttö energian tuotannossa. Päästöjen hävityskustannusten pieneneminen sekä jätekaasujen jälkikäsittelytekniikoiden rajoitukset muodostavat kannusteita integroitujen tekniikoiden hyödyntämiselle. Muita mahdollisia integroitujen tekniikoiden etuja ovat raaka-aineiden tarpeen väheneminen (esim. prosessiveden) ja jopa lisääntynyt tuotantokapasiteetti. Parasta käyttökelpoista tekniikkaa on myös yhdistää ominaisuuksiltaan samankaltaiset jätekaasuvirrat, mikä minimoi mahdollisten päästölähteiden määrää, helpottaa talteenottoa ja lisää energiatehokkuutta. Prosessin sisäisten muutosten tekeminen on kuitenkin suhteellisen hankalaa toteuttaa jo olemassa olevilla laitoksilla, joten panostus jätekaasujen jälkikäsittelyyn pysyy edelleen tärkeässä roolissa. (WGC Bref 2022, 24, 274.)

Vertailuasiakirjassa on kuvattu paras käyttökelpoinen tekniikka orgaanisten aineiden ilmaan kanavoitujen päästöjen vähentämiseen. Toimintatapana parasta käyttökelpoista tekniikkaa on seurata jatkuvasti jätekaasujen keskeisiä prosessisuureita, esimerkiksi virtausta ja lämpötilaa, jo ennen jätekaasun esikäsittelyä ja/tai lopullista käsittelyä. WGC BAT-vertailuasiakirja rajaa tarkemmin parhaat käyttökelpoiset tekniikat liittyen haihtuvien orgaanisten yhdisteiden käsittelyyn verrattuna CWW BAT-vertailuasiakirjaan. WGC BAT-vertailuasiakirjan mukaan yleisesti sovellettavissa olevia parhaita käyttökelpoisia jätekaasujen käsittelytekniikoita haihtuville orgaanisille yhdisteille ovat adsorptio, absorptio, sekä lauhdutus. Prosessiolosuhteista riippuvaisia parhaita käyttökelpoisia tekniikoita ovat taas katalyyttinen hapetus, terminen hapetus ja bioprosessit. Katalyyttisen hapetuksen soveltuvuutta rajoittavat kaasussa esiintyvät katalyyttiset myrkyt. Termisen hapetuksen soveltuvuutta rajoittavat alhaiset pitoisuudet ja jo olemassa olevan tehtaan asettamat suunnittelu- ja operointirajoitukset. Bioprosessit taas sopivat vain biohajoavien aineiden käsittelyyn. (WGC Bref 2022, 273–278.)

Suuressa roolissa uudessa WGC BAT-vertailuasiakirjassa ovat CWW BAT-vertailuasiakirjan tavoin jätekaasujen hajapäästöt ilmaan. Uutta vertailuasiakirjaa varten suoritettun tiedonkeruun mukaan hajapäästöjen osuus tehtaiden kokonaispäästöistä on kanavoituja päästöjä huomattavasti suurempi. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden korkean höyrynpaineen takia niiden hajapäästöjen osuus verrattuna muiden aineiden hajapäästöihin on myös merkittävästi suurempi. Uudessa vertailuasiakirjassa kuvataan mittaustekniikoiden lisäksi, miten hajapäästöjä voidaan arvioida laskennallisesti. Laskennallisia välineitä hajapäästöjen arviointiin ovat päästökertoimien, massataseiden ja termodynaamisten mallien käyttö. (WGC Bref 2022, 32, 232–235.)

Uutta vertailuasiakirjaa varten suoritettussa kemianteollisuuden kyselyssä käytetyimmiksi jätekaasujen käsittelytekniikoiksi nousivat suodatus ja absorptio. Suodatus oli käytössä 26,1 %:lla, ja absorptio 26,0 %:lla vastaajista. Selkeästi suosituimpia käsittelylaitteita olivat pussisuodatin ja tätekappalekolonni. Jopa 20,1 % vastaajista raportoi, että tehtaalla ei ole käytössä olleenkaan jätekaasujen käsittelytekniikoita. (WGC Bref 2022, 36.)

3.3 Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden hajapäästöt

Jätekaasuvirrat voidaan jakaa kanavoiduiksi virroiksi ja kanavoimattomiin virtoihin. Kanavoimattomia virtoja kutsutaan hajapäästöiksi. Kanavoituja jätekaasuvirtoja voidaan käsitellä tehokkaasti, hajapäästöjen kohdalla pyrkimys on niiden vähentämiseen, sillä niitä on haastava käsitellä hallitusti. Hajapäästöjen määrää voidaan yrittää minimoida erilaisilla tekniikoilla, tai pyrkiä niiden talteenottoon ja käsittelyyn yhdessä kanavoitujen jätevirtojen kanssa. (WGC Bref 2022, 32.)

3.3.1 Hajapäästöjen hallinta

Hajapäästöjen hallintaan kuuluvat olennaisesti niiden tutkiminen ja mittaaminen. Hajapäästöjä voidaan tutkia tehtaan ulkopuolella usealla eri menetelmällä tai yhdistelmällä. SOF-menetelmä (solar occultation flux) perustuu VOC-höyryjen läpi kulkevan laajakaistaisen auringonvalon spektrin kuvaamiseen ja sen analysoimiseen spektromitresesti Fourier-muunnosanalyysillä. Toinen tekniikka on LIDAR-tutka, minkä toiminta perustuu sen lähettämien lasersädeimpulssien takaisinsironnan spektriominaisuuksien analysointiin. Lasersädepulssit siroavat ilmakehässä olevien aerosolien eli myös VOC-aineita sisältävien höyryjen vaikutuksesta. (2016/902.)

Tehtaan sisällä hajapäästöjä voidaan tutkia useilla tekniikoilla. OGI eli optinen kaasukuvauslaite käyttää kädessä pidettäviä infrapunakameroita kaasun havaitsemiseen reaaliajassa. OGI-kamera näyttää vuotaneen kaasun kuvaruudulla mustana savupilvenä, mutta kaasun pitoisuuksia sillä ei pysty tunnistamaan. Perinteisemmässä, kädessä pidettävässä VOC-analysaattorissa on pieni pumppu, joka imee jatkuvasti kaasua analysaattorin tunnistimen sisään mitaten pitoisuuksia reaaliajassa. VOC-analysaattoria sanotaan myös haistelijaksi ja sen käytöstä löytyy paljon tietoa standardissa EN 15446. Yksi tapa käyttää VOC-analysaattoria on pussittaa eli eristää vuotava laita, jolloin vuodon määrä saadaan mitattua hyvinkin tarkasti pussista. (WGC Bref 2022, 235–240.)

Tehtaan suunnitteluvaiheessa hajapäästöjen syntyyn voidaan vaikuttaa valitsemalla prosessiin mahdollisimman tiiviitä laitteita, ja mahdollisuuksien mukaan minimoida mahdollisten hajapäästölähteiden määrää. Hajapäästöjä syntyy kaikkialla, missä prosessilaitteisto ei ole täysin tiivistä. Tällaisia hajapäästö-pistelähteitä ovat laippaliitokset, venttiilit, pumput ja muut prosessilaitteet. (2016/902.)

Hajapäästöjen määrän syntyyn voidaan vaikuttaa valitsemalla laitteita, jotka ovat erittäin tiiviitä. Venttiileitä, joissa on kaksinkertaiset pakkatiivisteet, voidaan pitää täysin tiiviinä. Magneettikäyttöiset tai mekaanisilla tiivisteillä varustetut pumput, kompressorit ja sekoittimet lasketaan myös hyvin tiiviiksi. Korroosion ehkäiseminen on tärkeää hajapäästöjen torjunnassa. Valitsemalla ruostumattoman tai haponkestävän teräsmateriaalin vältetään putkistojen ja laitteiden korroosiosta johtuvat vuodot. (2016/902.)

WGC BAT-vertailuasiakirjassa on annettu monta keinoa hallita VOC-hajapäästöjä. Hajapäästöjen määrää voidaan arvioida laskennallisesti, esimerkiksi liuottimien käytöstä aiheutuvia hajapäästöjä voidaan seurata massataseiden avulla. Hajapäästöjen seuranta on jatkuva prosessi. Yksi keino seurata ja hallita hajapäästöjä on leak detection program eli LDAR-ohjelma. LDAR on parasta käyttökelpoista tekniikkaa. LDAR-ohjelmaan kuuluvat toimenpiteet on esitelty lyhyesti liitteessä 2. (WGC Bref 2022, 229–232.)

3.3.2 Hajapäästöjen vähentäminen

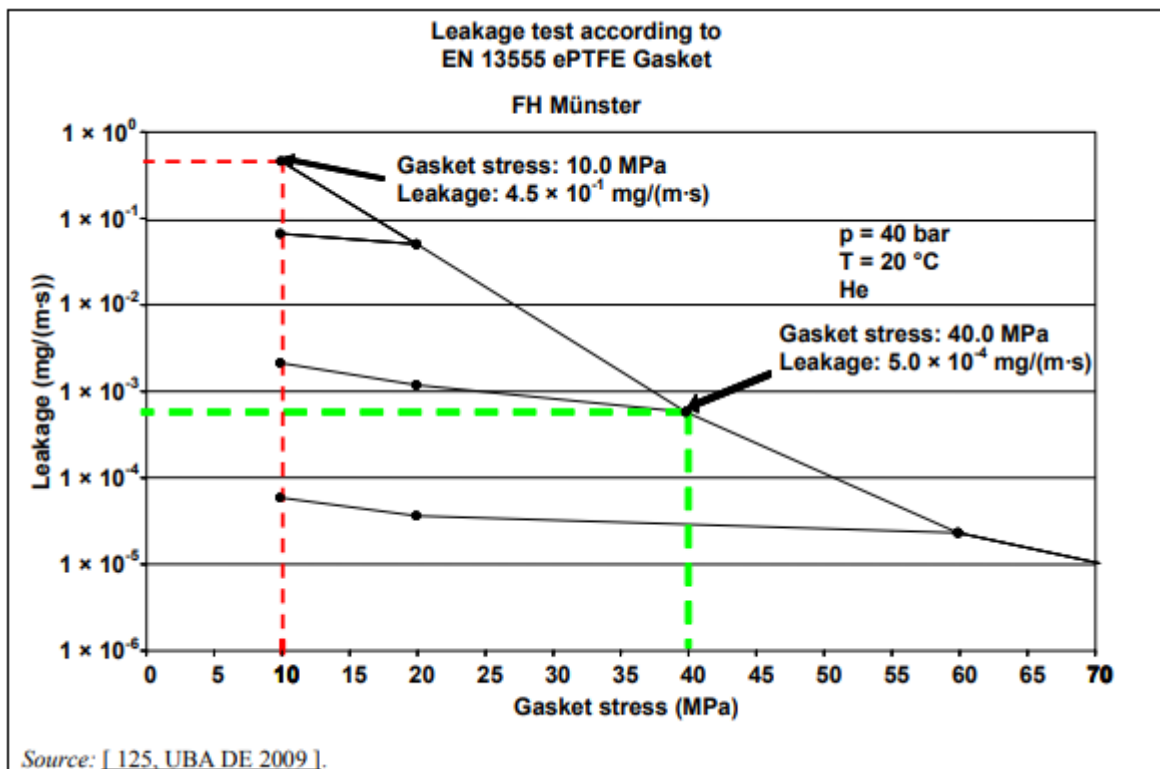
Uusi jätekaasujen CWW BAT-vertailuasiakirja antaa BAT-AEL arvon liuottimien VOC-hajapäästöille. BAT-AEL arvo annetaan prosenttimääränä tehtaalla käytetyn liuottimen vuosittaisen keskiarvon määrästä. VOC-hajapäästöjen määrän on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin 5 % käytetyn liuottimen vuosittaisesta keskiarvosta. Arvon liittyvän seuraamisen ohjeet annetaan kohdissa BAT 2 ja BAT 21. Kohtien mukaan parasta tekniikkaa on arvioida VOC-hajapäästöjen määrä vähintään kerran vuodessa käyttämällä koko laitoksen massatasetta, liuottimien massatasetta ja/tai termodynaamisia malleja. BAT 22 listaa tekniikoita ja käytänteitä miten VOC-hajapäästöjä voi estää ja vähentää. (WGC Bref 2022, 288–294.)

Hajapäästöt voidaan jakaa kahteen ryhmään, ei-kanavoituihin ja muihin hajapäästöihin. Kanavoimattomat päästöt johtuvat liikkuvien tai staattisten laitteiden vuotamisesta, esimerkiksi pumpusta

tai laippaliitoksesta. Muut hajapäästöt pääsevät ilmakehään esimerkiksi säiliöiden avaamisesta, tuuletusaukoista, varastoinnista ja avoimista viemäreistä. (WGC Bref 2022, 360–361.)

Hajapäästöjä saa parhaiten vähennettyä yksinkertaisesti rajaamalla päästölähteiden määrää. Laippaliitokset vuotavat aina jonkin verran, joten laippaliitoksen vaihtaminen hitsausliitokseen eliminoi pistehajapäästölähteen täysin, kunhan hitsausliitos on toteutettu oikein. Tuotevirtojen kuljettaminen painovoimaisesti tai pneumaattisesti vähentää vuotavien laitteiden määrää. (WGC Bref 2022, 291–292.)

Tiivisteiden ja laippaliitoksen tiiveys eli pulttien kiristykset voivat vaikuttaa merkittävästi vuodon määrään. Kuviossa 3 on esitetty kuvaaja heliumia sisältävän putkiston laippaliitoksen vuodosta tiivisteiden jännityksen funktiona. Molempien tiivisteiden jännitystä voidaan pitää tiukkana, eli tarvittavan tiiviinä, vaikka ero vuodoissa on suuri. Kuvaajasta näkee, että kyseisen tiivisteiden jännityksen nostaminen nelinkertaiseksi 10 MPa:sta 40 MPa:han vähentää vuodon suuruutta 900-kertaisesti. (CWW Bref 2016, 516–517.)



Kuvio 3. Vuototesti EN13555 mukaiselle ePTFE tiivisteelle (CWW Bref 2016, 516)

Asennushenkilökunnan pätevöittäminen on avainasemassa hajapäästöjen hallinnassa. Laippaliitoksista aiheutuvat hajapäästöt voidaan minimoida hankkimalla standardin EN 13555:2005 mukainen laadukas ja korkeita jännityksiä kestävä tiiviste. Liitoksen pultit tulee myös asentaa oikein ja kiristää määritettyyn maksimijännitykseen EN 1591-1:2001 mukaan. (CWW Bref 2016, 516–517.)

4 Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden käsittely

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden käsittelyyn on olemassa lukuisia tekniikaltaan, tehokkuudeltaan ja kustannuksiltaan toisistaan eroavia ratkaisuja. Tässä pääluvussa käydään läpi tämänhetkistä parasta käytettävissä olevaa tekniikkaa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden käsittelyssä ja talteenotossa.

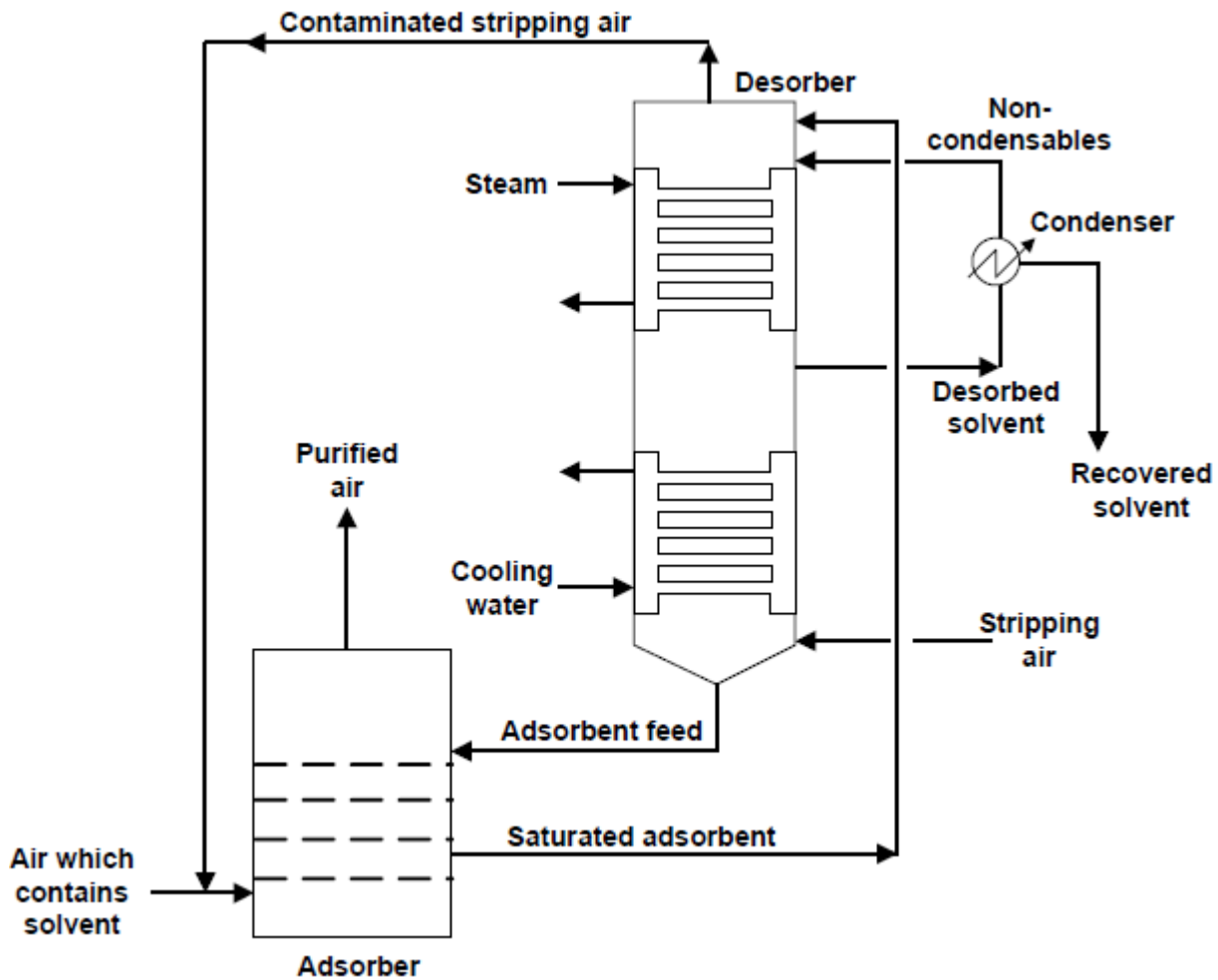
4.1 Aineensiirtoprosessit

4.1.1 Adsorptio

Adsorptiossa erotetaan joko kaasu- tai nestekomponentit toisiinsa saattamalla ne kosketuksiin adsorbentiksi kutsuttujen aineiden pinnan kanssa. Adsorbentit ovat kiinteäpintaisia aineita, joilla on suuri ominaispinta-ala, minkä takia niillä on kyky absorboida. Yleisiä adsorbentteja ovat muun muassa aktiivihili, piimaa, silikageeli ja erilaiset molekyyliseulat. Adsorptio perustuu adsorbentin pinnalla sijaitsevien molekyyliden tai atomeiden kykyyn kiinnittää vieraita molekyylejä erilaisilla vetovoimilla. Adsorptioprosessi on yleensä jatkuvatoiminen prosessi, missä adsorbentti ja kaasu- tai nestekomponentti kulkevat yhdessä prosessin läpi, tai kaasu- tai nestekomponentti virtaa paikallaan olevan adsorbentin läpi. Adsorptiota käytetään erityisesti silloin, kun adsorboitavan aineen pitoisuus on pieni nesteessä tai kaasussa. (Pihkala 2011, 139.) Adsorptio on hyvin tehokas prosessi VOC-aineiden talteenotossa (CWW Bref 2016, 360).

Fysikaalisessa adsorptiossa eli fysisorptiossa kaasu- tai nestekomponentti kiinnittyy adsorbentin pintaan molekyyliden välisten voimien vaikutuksesta. Kemiallisessa adsorptiossa eli kemisorptiossa absorboivan aineen ja neste- tai kaasukomponentin välillä muodostuu rikkoutumaton kemiallinen sidos. Fysisorptio tapahtuu oikeissa prosessiolosuhteissa kaikilla adsorbentin pinnoilla ja useissa kerroksissa, kemisorptiossa taas adsorbentin pinnalle voi sitoutua vain yksi kerros molekyylejä. Yhden kemisorptio kerroksen päälle voi kuitenkin kerääntyä useampia kerroksia fysisorption avulla. (Pihkala 2011, 139–142.)

Käytännön sovelluksissa adsorptiota seuraa yleensä aina desorptio, missä adsorbentti regeneroidaan, jotta sitä voidaan hyödyntää uudelleen prosessissa. Kuviossa 4 on esitetty tyypillinen jatkuvatoiminen adsorptio–desorptio prosessi. Adsorbenttinä toimivaa ainetta syötetään jatkuvasti absorberin yläosaan, josta se kulkee alaspäin vastavirtaan puhdistettavan kaasun kanssa. Adsorberin pohjalta adsorbentti siirtyy kolonniin regeneroitavaksi ja sieltä takaisin absorberiin. (CWW Bref 2016, 354.)



Kuvio 4. Jatkuvatoiminen adsorptio-desorptio prosessi (CWW Bref 2016, 354)

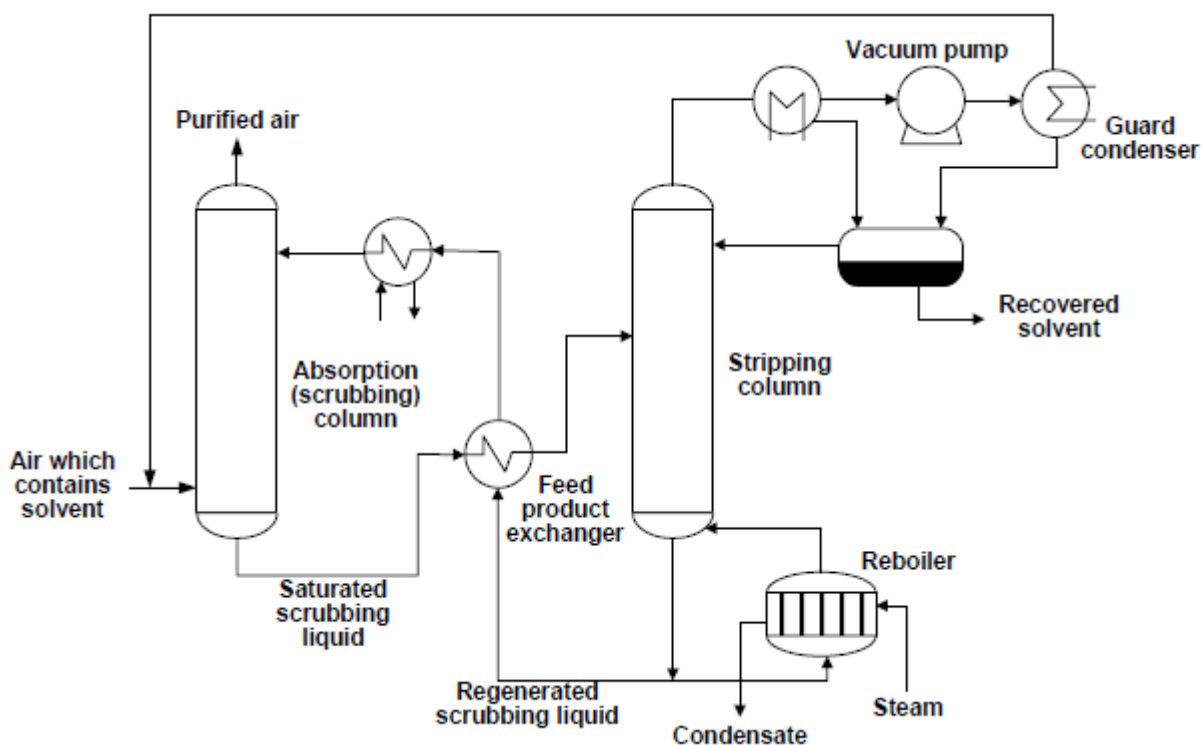
4.1.2 Absorptio

Kun jokin kaasun aineosa imeytyy kaasusta nesteeseen, eli siirtyy kaasufaasista nestefaasiin, kutsutaan tapahtumaa absorptioksi. Adsorptiota kutsutaan myös scrubbaukseksi ja pesemiseksi. (CWW Bref 2016, 362.) Desorptio on absorptiolle käänteinen prosessi, jossa jokin nesteen ai-

nesosa siirtyy nestefaasista kaasufaasiin. Desorptiota kutsutaan taas toiselta nimeltä strip-paukseksi. Absorptio on yleensä jatkuvatoiminen prosessi, jossa kaasu- ja nestefaasit saatetaan kosketuksiin, yleensä vastavirtaan toisiinsa nähden. Myös absorptio voi tapahtua kemiallisesti ja/tai fysikaalisesti. (Pihkala 2011, 135.)

Absorptiossa tapahtuvaa aineensiirtoa voi tehostaa laskemalla jommankumman faasin lämpötilaa ja suurentamalla niiden kosketuspintaa. Absorptiota parantaa myös korkeammat neste-kaasu suhteet ja kaasun suurempi talteen otettavan aineen pitoisuus. (CWW Bref 2016, 371.) Aineensiirtoa tehostaa myös prosessipaineen kasvattaminen. Absorptio on nopeinta, kun faasit kohtaavat toisensa ensimmäisen kerran, eli kun siirtyvän aineen konsentraatioero on suurin eri faaseissa. (Pihkala 2011, 135.)

Absorptio voi tapahtua yksinkertaisessa järjestelmässä, jossa pesunestettä ei regeneroida strip-paamalla. Tällöin pesevän nesteen sekaan pitää tuoda puhdasta nestettä jatkuvasti, tai puhdistaa pesuneste muilla tavoilla. Usein on kuitenkin järkevää suorittaa kuvion 5 esittämä tyypillinen absorptio-desorptio prosessi. Yksinkertaistettuna pesevä neste kiertää scrubberilta stripperille elvytettäväksi, ja sieltä takaisin scrubberille. Absorptio-desorptio järjestelmän useat lämmönvaihtimet pitävät prosessin mahdollisimman energiatehokkaana, ja pesunesteen lämpötilan säädettävänä. (CWW Bref 2016, 368.)



Kuvio 5. Tyypillinen absorptio-desorptio prosessi (CWW Bref 2016, 368)

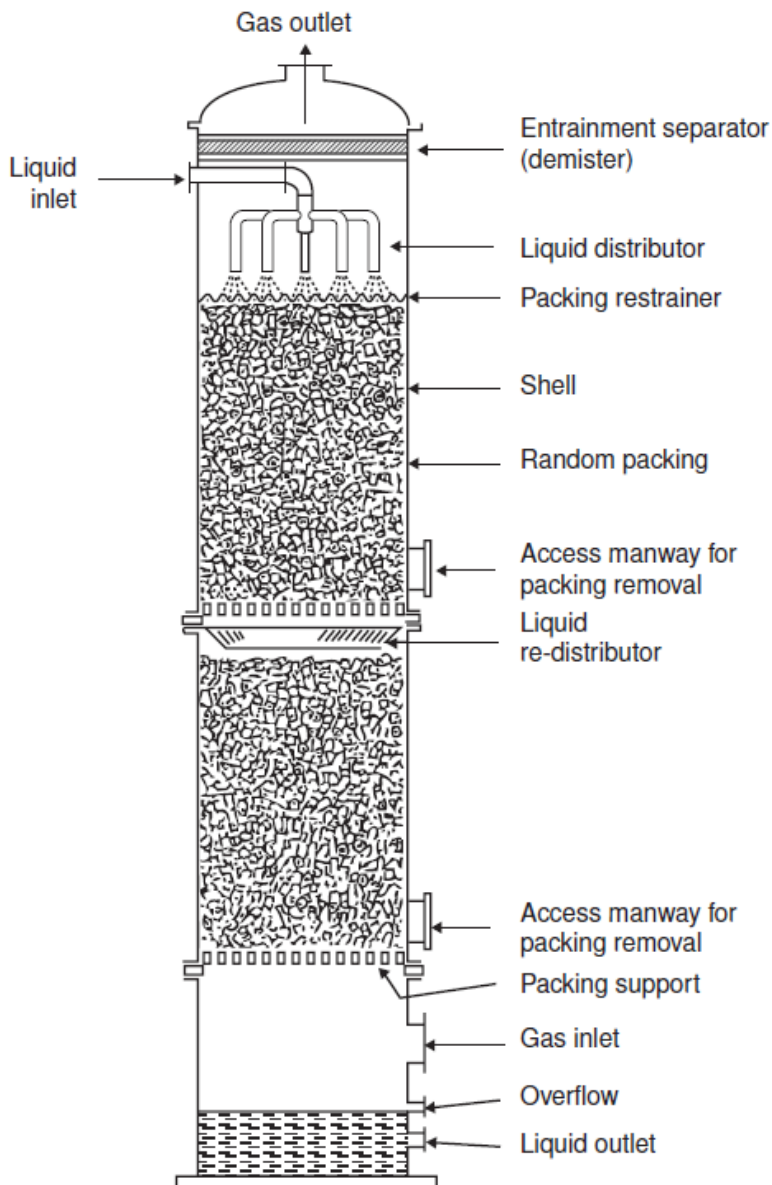
Absorptio tapahtuu yleensä kolonnimaisissa pesureissa, joita on useita erityyppisiä. Erilaisia pesureita ovat esimerkiksi suihkutornit, kuitupakkauspesurit, levypesurit ja täytekappalekolonnit. Pesurin tyypin valinta riippuu puhdistettavan kaasuvirran ominaisuuksista, halutusta talteenottotehokkuudesta, reagensseista ja energiantarpeesta. Täytekappalekolonnit ovat yleisimpiä ja laajasti käytössä varsinkin jätekaasuvirtojen puhdistamisessa. (CWW Bref 2016, 363.)

Pesurit ovat tehokas keino VOC-aineiden talteenotossa. Yleisesti pesurit voivat ottaa talteen jopa 99 % kaasun VOC-aineista oikeissa prosessiolosuhteissa. Alkoholi- ja orgaanien talteenotossa talteenottoprosentit 30-99 % välillä ovat yleisiä. Vettä käyttävillä pesureilla on rajallinen kapasiteetti alkoholi- ja orgaanien käsittelyyn, ne yleensä pystyvät käsittelemään alkoholipitoisuuksia 200-5000 mg/Nm³ välillä. Jotkin laitokset ovat raportoineet pesurin puhdistaman ulos kanavoidun kaasun sisältämän alkoholimäärän olevan suurempi kuin 100 mg/Nm³, mikä on enemmän verrattuna muiden aineiden raportoituihin päästömääriin. Talteenottoprosentit ovat kuitenkin täysin riippuvaisia laitoksen prosessista, käyttöolosuhteista ja virtaavien aineiden ominaisuuksista. (CWW Bref 2016, 369–372.)

4.2 Täytekappalekolonnit

4.2.1 Täytekappalekolonnin rakenne

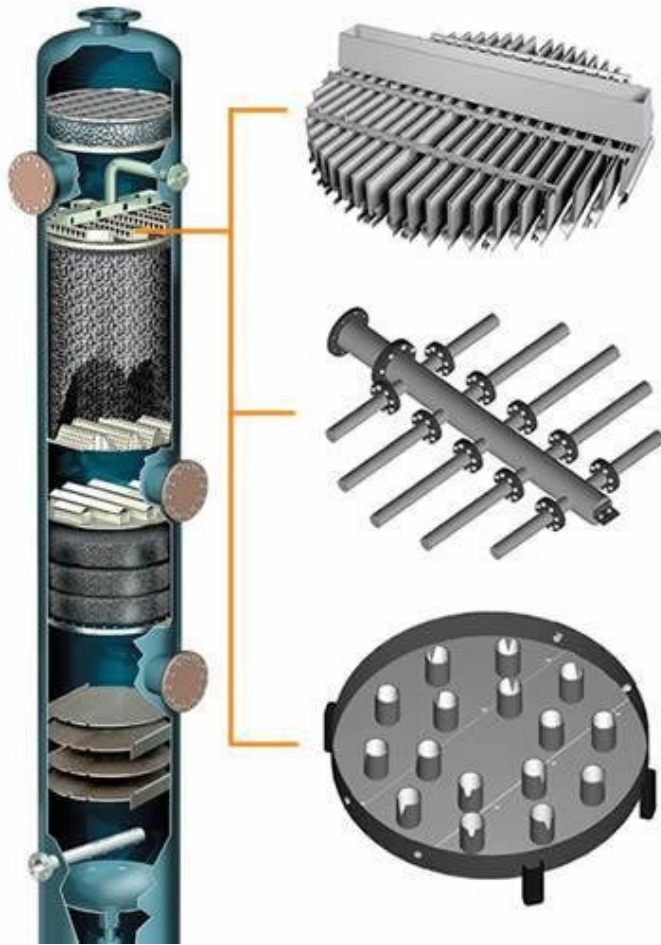
Täytekappalekolonnit ovat pysyväkenteisiä, yleensä tornimaisia säiliöitä, jotka on täytetty ai-neensiirtoa edistävillä täytekappaleilla (Pihkala 2011, 137). Tyypillisen täytekappalekonnien ra-kenne on esitetty kuviossa 6. Kuvion kolonnissa on yhteen kaasun ja nesteen syötöille ja tyhjennyk-sille, ylijouksuyhde ja tarkastusluukkuja. Kolonnin sisäosiin kuuluvat nesteenjakaja, pisaranerotin, mahdolliset erilaisten tasomaisten jakajien rajaamat kammiot täytekappaleille, tukitasot täytekappaleille, sekä itse täytekappaleet. (Gorak & Olujic 2014, 87.)



Kuvio 6. Täytekappalekolonnin rakenne (Alley 1998)

Kolonnin päässä sijaitseva pisaranerotin estää kolonnin yläpäähän syntyvien nestepisaroiden poistumisen kaasuvirtauksen mukana. Nesteiden syöttöjärjestelmä eli nesteenjakaja on tärkeä kolonnin osa sen toiminnan kannalta. Tasaisella nesteen syötöllä estetään nesteen kanavoituminen kolonnissa. Nesteiden kanavoituessa se muodostaa kolonniin noroja, eikä levity tasaisesti kolonnin tätekappalekerrokselle. (Pihkala 2011, 137.) Epätasaisen nesteen syötön vaarana on myös nesteen valuminen pääasiassa kolonnin seiniä pitkin, minkä vaikutus aineensiirtoon on suuri pienemmän halkaisijan kolonneilla (Strigle 1994, 287). Nesteiden kanavoituminen vähentää kaasun ja nesteen kosketuspintaa, eli huonontaa aineensiirtoa (Pihkala 2011, 137). Pesuneste voi olla mitä vaan pesutuloksen vaativaa nestettä, mutta usein käytetään vettä varsinkin kustannus- ja saatavuussyistä. Veteen voi lisätä esimerkiksi jotain happoa tai emästä, millä voidaan vaikuttaa pesurin toimintaan ja pesutulokseen. (CWW Bref 2016, 370–372.)

Kolonnin nesteenjakajia on monia eri tyyppisiä, joista on olemassa useita eri versioita. Suutin-tyyppinen jakaja on yleisin nesteenjakajatyyppeistä pesureissa. Se koostuu reikäisestä levystä, minkä läpi menee putkia. Kaasu nousee ylös suutinjakajan putkien läpi ja neste virtaa levyn reikien läpi alaspäin. Kaukalotyyppisessä jakajassa neste syötetään ensin jakolaatikkoon, mistä se jakautuu tasaisesti sivulaatikkoihin, joiden rei'istä neste jakaantuu kolonniin. Kaasu pääsee nousemaan ylös läpi laatikoiden tyhjiä välejä. Kaukalopakajaa ei suositella kolonneille, joiden halkaisija on alle 800 mm. Suutinjakaja taas sopii myös kolonneille, joilla on pieni halkaisija. (Strigle 1994, 281). Suutin- ja kaukalotyyppiset jakajat toimivat painovoiman avulla. Paineen avulla toimivia nesteen jakajia ovat erilaiset putkijakajat ja suuttimet. Kuviossa 7 on esitetty ylimpänä kaukalopakaja, keskimmäisenä putkijakaja ja alimpana suutinjakaja. (Liquid distributors n.d.)



Kuvio 7. Erilaisia nesteenjakaajia (Liquid distributors n.d.)

4.2.2 Täytekappaleet

Täytekappalekolonnin toiminnan kannalta tärkeitä ovat sen sisältämät täytekappaleet, joiden pinnalla aineensiirto tapahtuu. Kappaleita on olemassa useita erilaisia, esimerkiksi kaukaloita, jäsennettyjä täytekappaleita ja satunnaisia täytekappaleita. Usein yhdessä täytekappalekolonnissa käytetään vain yhdenlaisia kappaleita, mutta kaikkien kolmen yhdistelmä on myös mahdollinen prosessin sitä vaatiessa. (Gorak & Olujic 2014, 3.) Satunnaisia täytekappaleita on monen muotoisia, kuten kuviosta 8 näkyy. Usein käytettyjä muotoja ovat Raschig-renkaat, Dixon-renkaat, Pall-renkaat ja satulat. (Packed-bed absorption column n.d.) Täytekappaleiden pitäisi olla halkaisijaltaan suurin piirtein 6–10 kertaa kolonnin sisähalkaisijaa pienempiä, kuitenkin vähintään 10 mm (Gorak & Olujic 2014, 86).



Kuvio 8. Erilaisia täytekappaleita (Packed-bed absorption column n.d.)

Kappaleiden materiaali määräytyy hyvin pitkälle systeemin korroosio-ominaisuuksista. Täytekappaleet voivat olla metallisia (yleensä ruostumatonta terästä), muovisia tai keraamisia. Materiaali- ja muotovalintaan vaikuttaa korroosionkeston lisäksi muut keskeisen ominaisuudet, esimerkiksi painehäviöiden minimoiminen. (Gorak & Olujic 2014, 86–88.) Kappaleen kykyä edesauttaa aineen-siirtoa, eli muodostaa mahdollisimman paljon kontaktipintaa nesteen ja kaasun välille, kuvaa sen huokoisuus. Mitä suurempi huokoisuus kappaleella on, sitä suurempi on kappaleen pinta-ala verrattuna sen tilavuuteen. Kappaleen muoto vaikuttaa sen kykyyn vastustaa likaantumista; strukturoidut, rutilämäiset kappaleet likaantuvat satunnaisen geometrian omaavia kappaleita vähemmän. (Kolmetz et al 2004.)

4.2.3 Täytekappaleiden puhdistaminen

Täytekappalekolonnit ja ovat herkkiä tukkeutumaan ja likaantumaan. Täytekappalekolonnin rakenteen takia tukkeutuminen ja likaantuminen ovat vaikeita ongelmia, sillä täytekappaleisiin on hankala päästä käsiksi. Täytekappaleiden peseminen vaatii kolonnin talteenotto-prosessin pysäyttämisen. (CWW Bref 2016, 364.)

Tukkeutuminen ja likaantuminen johtuvat virtauksissa olevista hiukkasista. Herkän tukkeutumisen takia täytekappalekolonnit eivät sovellu prosesseihin, missä virtauksissa on $0,5 \text{ g/Nm}^3$ suurempia määriä hiukkasia. (CWW Bref 2016, 364.) Hiukkasten päätymistä täytekappalekolonniin voi ehkäistä asentamalla prosessiin hiukkastenpoistojärjestelmän, esimerkiksi pussisuodattimen (Capocelli n.d.). Täytekappaleiden likaantuminen heikentää aineensiirtoa merkittävästi. Ihanteellisessa prosessitilanteessa virtauksissa ei ole ollenkaan hiukkasia, jolloin täytekappaleet eivät likaantuisi. Näin vältetään kolonnin toiminnan pysäyttäminen pesutilanteen ajaksi. (Nummela 2022.)

Tarvittaessa kolonnin sisäosan ja täytekappaleet voidaan pestä. Yleinen tapa on toteuttaa pesemisen sisäisellä pesukierrolla. Kolonnin tarkastusluukusta laitetaan sisään sopivaa pesuainetta, esimerkiksi sitruunahappoa. Kolonnin muut yhteydet suljetaan asettamalla sulkuventtiilit kiinni ja sisäisen kierron pumppu käynnistetään. Pesukierto voi kestää tunneista vuorokauteen, pesutarpeen vaativan ajan. Pesukierron lopussa pesuneste poistetaan kolonnista tyhjennyksen kautta, ja tarvittaessa suoritetaan lisähuuhtelu. (Nummela 2022.) Täytekappalekolonnin rakenteesta, prosessijärjestelmistä tai muista moninaisista syistä johtuen täytekappalekolonnin peseminen sisäisellä kierrolla ei ole kuitenkaan aina mahdollista. Tällöin täytekappaleet pitää poistaa kolonnista ja pestä käsityönä ämpäreissä. (Karhu 2022.)

Täytekappaleiden puhdistaminen ei välttämättä ole ainoa ongelma, mihin täytekappaleiden kanssa voidaan törmätä. Täytekappaleet saattavat ajan mittaan painua tiiviiseen kasaan, mikä huonontaa aineensiirtoa. (Karhu 2022.) Alzner ja Schrader (1988) esittävät patentissaan, että täytekappaleet voi pestä samalla, kun kolonni jatkaa talteenotto-prosessia. Patentti koskee erityisesti kokonaisvaltaista kiinteän rikin puhdistusta täytekappaleista, mutta samalla se esittää konseptin täytekappaleiden uudelleenjärjestäytymiselle pesun yhteydessä. Jos täytekappaleiden tiheys on pesunesteen tiheyttä pienempi, aiheuttaa kolonnin täyttäminen eli tulviminen pesunesteellä täytekappaleiden nouseminen nesteessä ylöspäin. Jos pesuun käytetään vettä, jonka tiheys on noin

1000 kg/m³, pitäisi täytekappaleiden materiaalin olla esimerkiksi polypropyleneeni -muovia, jonka tiheys on noin 900 kg/m³ (Water Density 2018; Polypropylene n.d.). Pesunesteen poistuttua täytekappaleet järjestäytyvät uudelleen kolonnin pohjatason päälle (Alzner & Schrader 1988).

4.2.4 Täytekappalekolonnin mitoitus

Pesureina toimivat täytekappalekolonnit mitoitetaan sopimaan juuri tiettyyn prosessiin ja tietyille prosessimuuttujille. Laskennalla määritetään kolonnin halkaisija, täytekappaleiden koko ja tarvittava täytekappalekerroksen korkeus. Täytekappaleiden materiaali ja muoto valitaan puhdistettavan kaasun ja puhdistavan nesteen perusteella. Mitoitus alkaa virtaavien aineiden ja niiden sisältämien pitoisuuksien määrittelyllä. Tärkeimpiä lähtötietoja ja prosessimuuttujia ovat puhdistettavan kaasun virtaus ja sen sisältämän puhdistettavan aineen pitoisuus. Seuraavaksi määritellään, kuinka paljon talteen otettavaa ainetta puhdistettavasta kaasusta halutaan tai on ylipäänsä mahdollista ottaa talteen. Usein yritetään pyrkiä suhteelliseen korkeisiin talteenottoprosentteihin, esimerkiksi 90 %:n talteenotto on jo hyvä. (Ricci & Theodore 2010, 224.)

Tärkeä asia varsinkin ilmanpaineessa toimivan täytekappalekolonnin toiminnan kannalta on kaasun painehäviö ja sen minimoiminen. Stringlen (1994) mukaan vaahtoamattomat täytekappalekolonnit mitoitetaan normaalisti painehäviöille 2-3,3 mbar/m väliltä. Jos kolonnissa on vaahtoamisen mahdollisuus, painehäviö mitoitetaan välille 0,8-2 mbar/m. Painehäviöön voi vaikuttaa varsinkin kolonnin halkaisijan koolla ja täytekappaleiden valinnalla. Vaahtoaminen kolonnin sisällä nostaa painehäviötä ja heikentää aineensiirtoa merkittävästi, ja se voi johtua useista syistä. Yleisiä syitä vaahtoutumiselle ovat liian suuret kaasuvirtaukset ja aineiden ominaisuudet. Puhtaat nesteet eivät yleensä vaahtoa. Vaahtoamista tapahtuu varsinkin raskasöljyillä, amiineilla, nesteissä, joissa on liukenemattomia kiintoaineita ja orgaanisilla nesteillä, joiden viskositeetti on yli 0,5 cps. Myös korroosion tuotteet ja kemiallisen hajoamisen lopputuotteet voivat kerääntyä nesteen pinnalle aiheuttaen vaahtoamista. (Stringle 1994, 23.)

Satunnaisesti pakatuissa täytekappalekolonneissa kaasun paineen laskun aiheuttaa kaasun ja nesteen virtausnopeudet ja niiden keskinäiset suhteet. Laskennallisesti L/G eli neste-kaasusuhte on pieni, kun se on alle 1,2. L/G alkaa olla todella suuri, kun se on yli 20. (Stringe 1994, 63.) Nesteen virtauksen lisääminen, kun kaasun virtaus pysyy vakiona, lisää nesteen tilavuutta kolonnin sisällä verrattuna kaasun tilavuuteen. Nesteen viedessä enemmän ja enemmän tilaa kaasulta lisääntyy

myös paineen alentuminen. Nesteen virtauksen ollessa liian suuri alkaa kolonnissa tapahtua tulvimista. Tällöin kaasun paine ei enää riitä nostamaan sitä ylös kolonnissa nestepatsaan läpi, ja kolonnin toiminta pysähtyy. Sama periaate pätee liian suureen kaasun virtaukseen verrattuna nesteen virtaukseen; tulvimisen tapahtuessa neste ei enää pääse virtaamaan alas kolonnin yläosasta höyrypatsaan takia. (Ricci & Theodore 2010, 224.) Mitoituslaskennassa kolonni tulvii, kun tulvimistekijä saa arvon 100 %. Uusien kolonnien mitoituksessa suositellaan mitoittamaan tulvimistekijä maksimissaan 80 %. Uusiokäyttöön menevissä ja/tai kunnostettavissa kolonneissa tulvimistekijä voi olla hieman korkeampi, noin 85 %. (Packing Hydraulics Calculations n.d.)

Absorptiokolonnin täytekappalekerroksen korkeus määritellään NTU:lla, eli tarvittavilla siirtoyksiköiden lukumäärällä ja niiden korkeudella. NTU on erotuksen vaikeuden mitta, ja se kuvaa aineen siirron kulkua yhdessä erotusaskelleessa. Laskennalla määritetään tarvittavien erotusaskelien lukumäärä ja yhden erotusaskelen korkeus. Kertomalla yhden erotusaskelen korkeuden NTU:n lukumäärällä saadaan tulokseksi tarvittava täytekappalekerroksen kokonaiskorkeus. Erotusaskleet määritellään tasapainokäyrän ja toimintasuoran avulla. (Packing Height: The Method of Transfer Units n.d.)

Täytekappalekolonnin mitoituksessa tarvitaan Henryn lain sanelemaa Henryn vakiota. ”Teknoinnovaation julkaisu tiivistää Henryn lain hyvin: Henryn lain mukaan kaasujen liukeneminen nesteisiin on suoraan verrannollinen nesteen kanssa kontaktissa olevan kaasun osapaineeseen. Henryn laki ilmaisee siis tasapainotilan, johon kaasun kanssa kontaktissa oleva neste riittävän pitkän ajan kuluttua asettuu.” (Kaasujen liukenemisen laskennallinen määrittely n.d.) Henryn lain vakiota käytetään Henryn lakiin liittyvän laskennan suhteellisuustekijänä. Henryn vakio ei ole aivan yksinkertainen käsite, se voidaan ilmoittaa monessa erilaisessa muodossa ja se on riippuvainen paineesta ja lämpötilasta. Kaikilla kaasuilla eri nesteliuoksissa on oma Henryn vakio. Henryn vakio on kuitenkin vain likiarvo, ja se toimii hyvin vain suhteellisen laimeiden liuosten laskennassa. (Henryn lain esimerkkiongelmia 2020.)

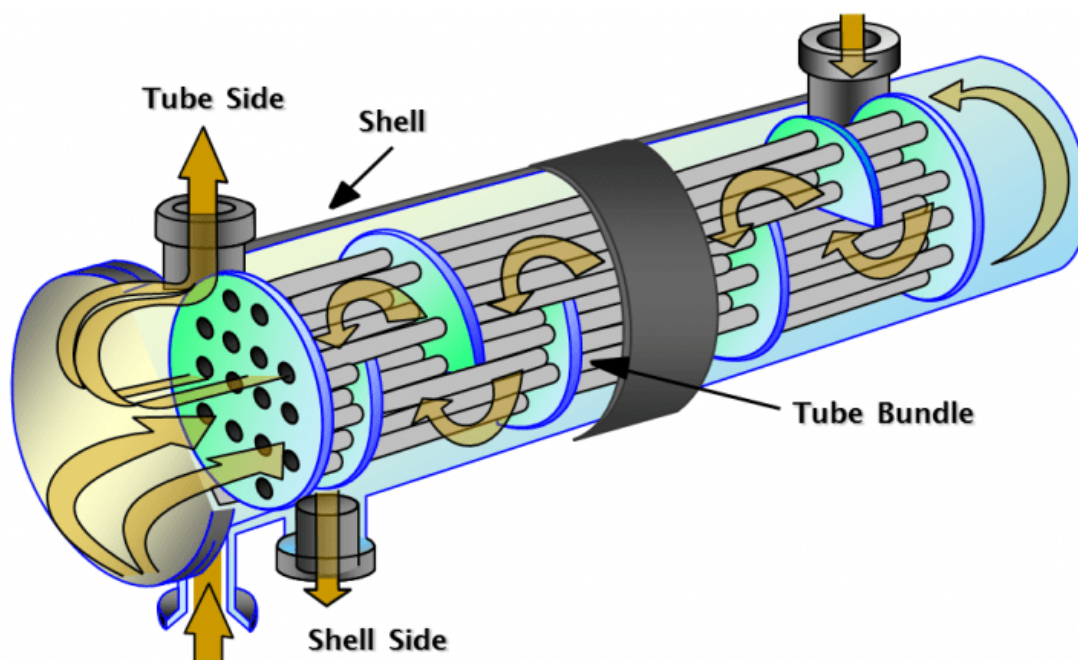
4.3 Lämmönsiirtotekniikat

4.3.1 Lämmönsiirtimet

Lämmönsiirrin on yksi ylivoimaisesti käytetyimmistä energiateknisistä laitteista teollisuudessa. Voidaan jopa sanoa, että nykyisin tuntemaamme teollisuutta ja energiantuotantoa ei olisi olemassa ilman lämmönsiirtimen kehittämistä. Lämmönsiirrin on laite, minkä sisällä virtaa kaksi eri fluidia yleensä toisiinsa sekoittumatta. Korkeamman energiatason omaavasta fluidista siirtyy lämpöenergiaa matalaenergisempään fluidiin pääasiassa konvektion avulla, mutta siirtymistä tapahtuu myös johtumalla ja säteilemällä. (Heat exchanger n.d.)

Lämmönsiirtimiä on useita erilaisia, ja niitä käytetään laajasti monissa teollisuuden sovelluksissa. Voimalaitoksissa lämmönsiirtimet toimivat veden ja ilman esilämmittiminä, tulistimina ja turbiniin välitoissa. Muualla lämmönsiirtimet palvelevat lauhduttimina ja muissa eri prosessien vaatimissa lämmönsiirroissa. Yleinen sovellus löytyy myös ilmanvaihdosta, jossa menoilman lämpöenergiaa siirretään ulkoa tuotavaan tuloilmaan. (Heat exchanger n.d.)

Teollisuudessa paljon käytettyjä lämmönsiirrintyyppejä ovat levy- ja putkilämmönsiirtimet. Levylämmönsiirtimet ovat yleensä suorakulmion muotoisia, useista vierekkäisistä yhdensuuntaisista levyistä muodostuvia laitteita. Joka toisessa levyvälissä virtaa lämpimämpi fluidi ja lopuissa väleissä virtaa viileämpi fluidi, jolloin lämmön siirtyminen tapahtuu levyjen kautta. Putkilämmönsiirtimet taas ovat lieriön muotoisia laitteita, jonka sisällä kulkee pienenpää putkistoa, kuten kuviosta 9 näkyy. (Pihkala 2011, 104–106.)



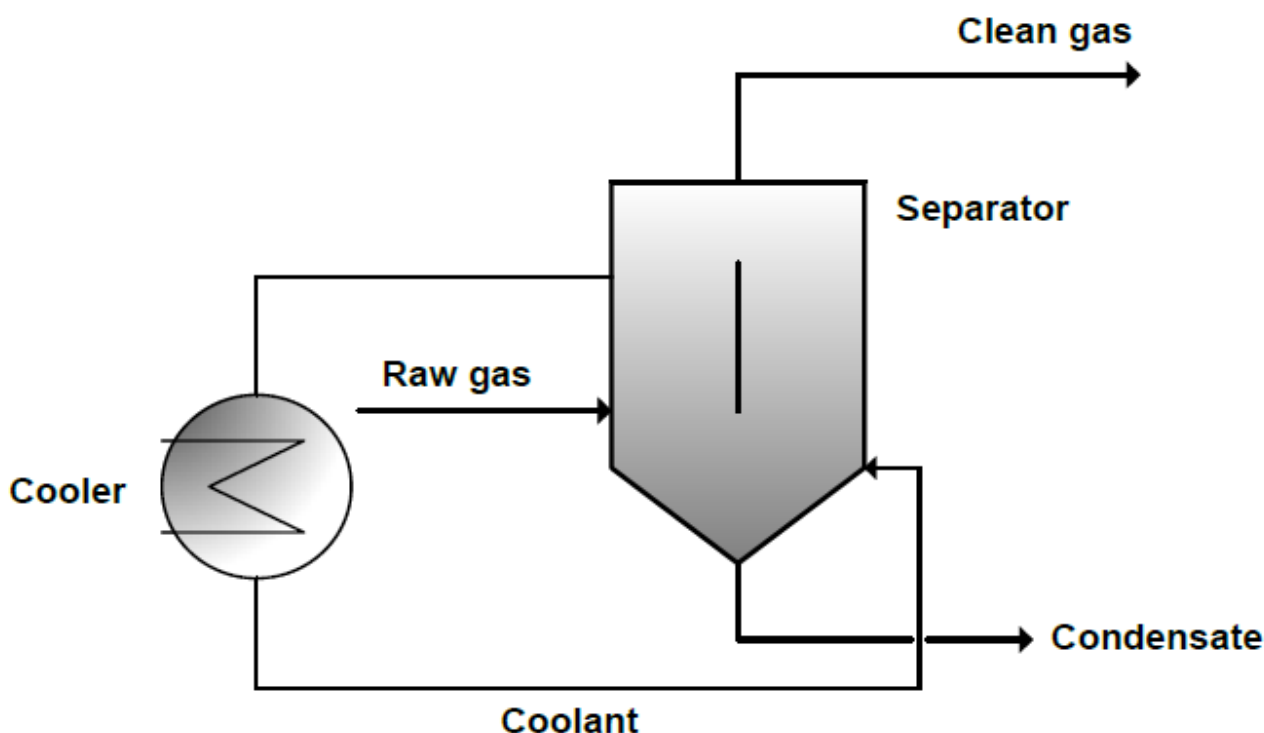
Kuvio 9. Putkilämmönsiirsin (Basics of shell & tube heat exchangers 2015)

Putkilämmönsiirtimien etuja ovat niiden suuri lämmönsiirtopinta-ala ja lämmönsiirtoteho (Pihkala 2011, 106). Putkilämmönsiirtimessä toinen fluidi tulee siirtimen vaipan sisään, ja toinen fluidi siirtimen sisäisen putkiston sisään. Lämmönsiirto tapahtuu putkilämmönsiirtimessä epäsuorasti, eli ilman putken seinämien välistä fluidien keskinäistä sekoittumista. Putkilämmönsiirtimessä on muihin siirrintyyppeihin verrattuna pienempi painehäviö ja vähemmän lämpöjännityksestä johtuvaa metallin virumista. Ne on myös helppo huoltaa putkimaisen rakenteensa ansiosta. (Basics of shell & tube heat exchangers 2015.)

4.3.2 Lauhdutus

Lauhdutin on nimitys lämmönsiirtimille, jossa höyry tai kaasu halutaan muuttaa nesteeksi poistamalla siitä lämpöenergiaa. Lauhduttimissa virtaavan kaasun tai höyryn lämpötilaa lasketaan matalaenergisien virtauksien avulla vähintään höyryn tai kaasun kyllästymispisteeseen, jolloin kaasu tai höyry lauhtuu nesteeksi. Lauhtumista tapahtuu aina höyryn ollessa kosketuksissa höyryn kyllästymislämpötilaa alhaisemman lämpötilan omaavan pinnan kanssa. Lauhdutusta käytetään usein teollisuudessa liuotinhöyryjen poistoon kaasuvirrasta. (Pihkala 2011, 108.)

Lauhduttimet ovat usein malliltaan putkilämmönsiirtimiä, mutta myös levylämmönsiirtimiä voidaan käyttää (Pihkala 2011, 108). Kuviossa 10 on esitetty yleisesti käytetty yksinkertainen epäsuora lauhdutusjärjestelmä. Suoraa lauhdutusta, missä jäähdytysneste ja kaasu sekoittuvat, ei yleensä suositeta, koska silloin tarvittaisiin yksi erotusprosessi lisää jäähdytysnesteen erottamiseen muista jakeista. Yksinkertaisessa epäsuorassa lauhdutuksessa jäähdytysneste kulkee jatkuvatoimisesti suljetussa kierrossa jäähdyttimen kautta lauhduttimeen. Puhdistettava kaasu johdetaan lauhduttimen sisään, mistä se jakaantuu lauhteeksi ja puhdistetuksi kaasuksi. (CWW Bref 2016, 341.)



Kuvio 10. Yksinkertainen lauhdutusjärjestelmä (CWW Bref 2016, 341)

Lauhdutus on hyvin joustava prosessi, sillä voidaan käsitellä höyrymassoja laajalta virtausalueelta 100–100 000 Nm³/h ilmakehän paineessa. Lauhdutus soveltuu kaasuille, joiden lämpötila on 50–123 °C. Sen käyttäminen talteenotto-prosessin ensimmäisenä osana pienentää kuormaa talteenotto-prosessin myöhemmiltä vaiheilta, esimerkiksi absorptiolta. (CWW Bref 2016, 348–349.) Perinteistä jäähdytysnesteellä toimivaa lauhdutusta yksinään ei yleensä pidetä riittävänä talteenottona. Lauhduttimien jälkeen kaasuvirtaa on käsiteltävä vielä jollain toisella prosessilla, esimerkiksi hapetuksella tai adsorptiolla. Lauhdutusta pidetään kuitenkin yleisesti kompaktina ja helposti ajettava

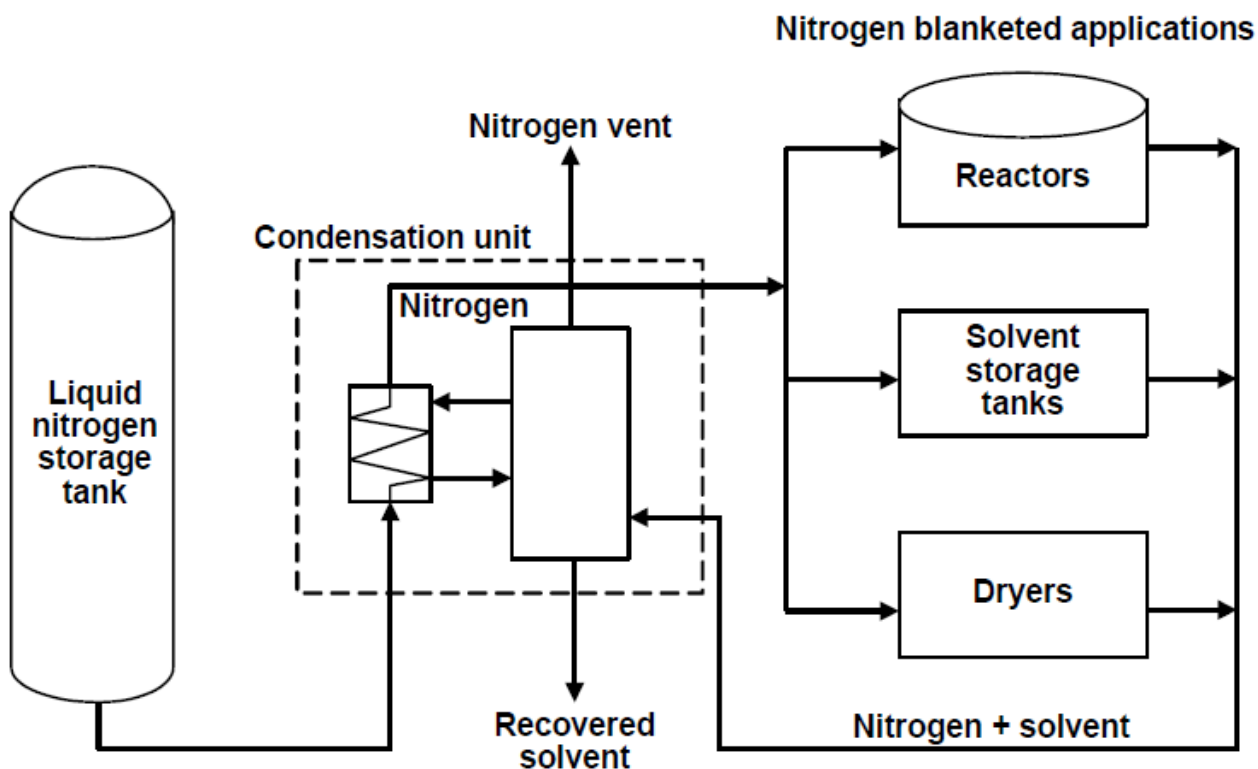
prosessina, mikä tekee siitä luotettavan ja edullisen vaihtoehdon osaksi laitoksen jätekaasujen puhdistusjärjestelmää. (CWW Bref 2016, 347–350.)

4.3.3 Kryogeeninen lauhdutus

Sanan ”kryo” juuret johtavat kreikan sanaan ’kryos’, mikä tarkoittaa jäätä. Alkuperäisen tarkoituksensa mukaan kryo-sanalla voitaisiin siis viitata kaikkiin veden jäätymispistettä kylmiin lämpötiloihin. Aivan 1800-luvun loppupuolella sana kuitenkin vakiintui tarkoittamaan kylmempiä lämpötiloja, esimerkiksi hapen ($-183,0\text{ °C}$), typen ($-195,8\text{ °C}$), ja vedyn ($-252,9\text{ °C}$) nesteytyslämpötiloja normaalissa ilmanpaineessa. (Radebaugh 2002.)

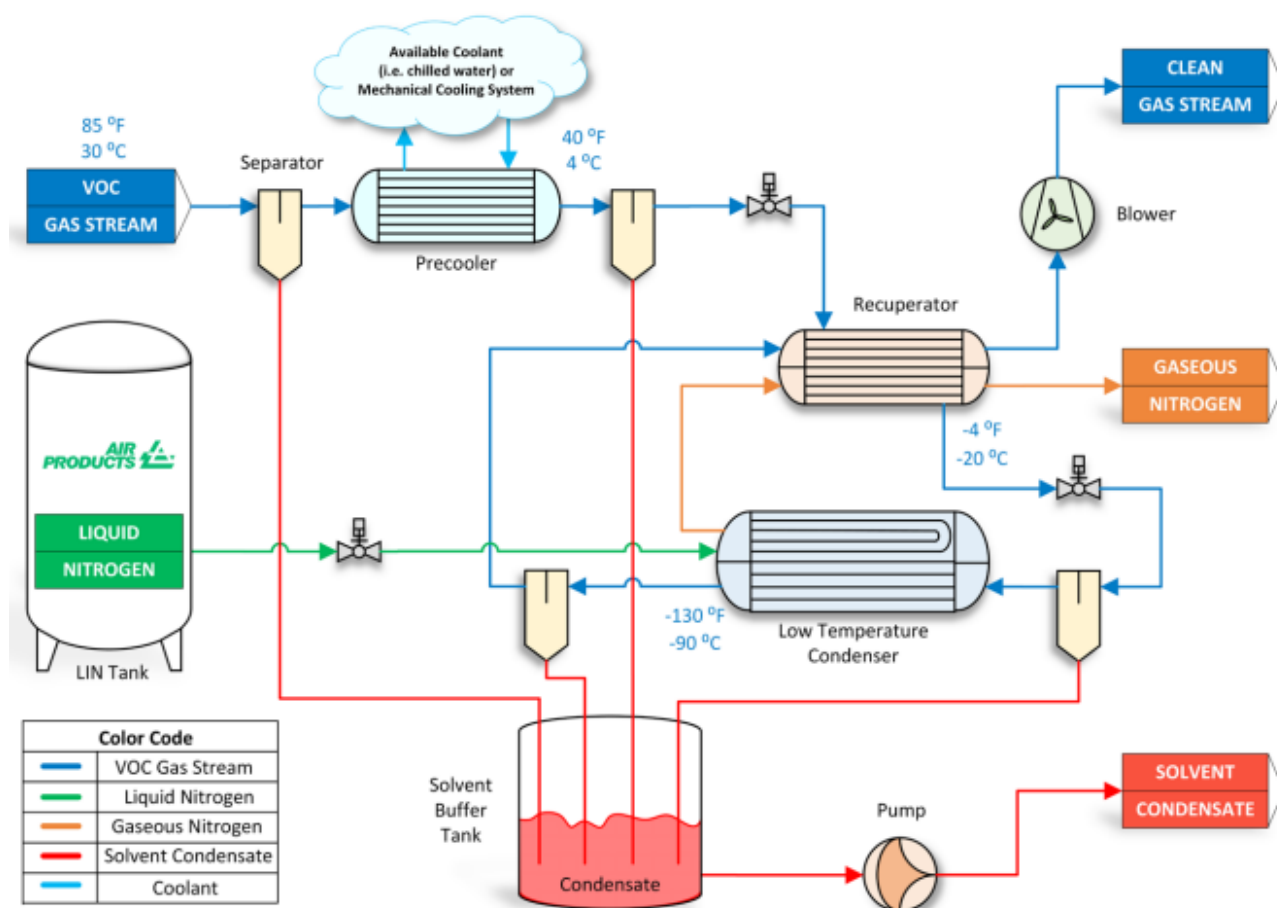
Kryogeenisessä lauhdutuksessa käytetään jäähdytysaineena nestemäistä typpeä. Lauhduttimessa nestemäinen typpi ottaa vastaan lämpöenergiaa ja höyrystyy typpikaasuksi. (CWW Bref 2016, 343.) Typpikaasu ei ole jalo kaasu, mutta se on niiden tavoin hyvin reagoimaton muiden aineiden kanssa. Jaloilla kaasuilla ei ole atomirakenteessaan vapaita ulkoelektroneja, jolloin ne eivät reagoi helposti muiden aineiden kanssa luovuttaen tai vastaanottaen elektroneja. Kahden typpiatomin muodostettua typpikaasumolekyylin N_2 ei kummallakaan typpiatomilla ole enää jäljellä vapaita ulkoelektroneja, jolloin molekyyli käyttäytyy jalojen kaasujen tapaan. Typpi on luonnossa paljon esiintyvä alkuaine, sillä 79,1 % ilmakehästäämme koostuu typpikaasusta. (Argon or Nitrogen 2016.)

Typpikaasua voi reagoimattomuutensa ansiosta käyttää erilaisten yksikköprosessien suojakaasuna. Kuviossa 11 on periaatekuva kryogeenisestä lauhdutusjärjestelmästä, missä höyrystynyt typpi ohjataan suojakaasuksi reaktoreihin, liuottimien varastosäiliöihin ja kuivureille. Poistokaasu, mikä sisältää typpikaasun lisäksi prosesseissa höyrystynyttä liuotinta, palaa lauhduttimelle. Lauhduttimessa jäähdytysaineena toimiva nestemäinen typpi höyrystyy ja talteen otettava liuotin lauhtuu nesteeksi. (CWW Bref 2016, 343.)



Kuvio 11. Kryolauhdutusjärjestelmä ja typpikaasun hyödyntäminen (CWW Bref 2016, 343)

Kryokondensaatio vaatii toimiakseen energiatehokkaasti useamman lauhdutusprosessin. Kuviossa 12 on esitetty esimerkkinä englantilaisen Air Productsin tuote Cryo-Condap-kryolauhdutusjärjestelmä VOC-aineiden talteenottoon. Ennen kryolauhdutusprosessin päälauhdutinta VOC-virran lämpötilaa alennetaan ensimmäisen kerran esijäähdyttimellä, ja vielä toisen kerran rekuperaattorilla. (Cryo-Condap® technology for VOC recovery) Esijäähdyttimessä voidaan käyttää jäähdytysaineena jäähdytettyä vettä tai esimerkiksi glykolia (CWW Bref 2016, 343). Rekuperaattorilla tarkoitetaan tässä tapauksessa lauhdutinta, mikä käyttää jäähdytysaineena päälauhduttimelta tulevaa puhdistettua kaasua. Rekuperaattorin päätarkoitus on siis parantaa prosessin energiatehokkuutta hyödyntämällä päävirtauksen “ylimääräistä” lämpö- tai kylmäenergiaa. (Cryo-Condap® technology for VOC recovery 2015.)



Kuvio 12. Cryo-Condap® -järjestelmä (Cryo-Condap® technology for VOC recovery 2015)

Tärkeitä komponentteja Cryo-Condap-kryolauhdutinjärjestelmässä ovat lauhduttimien lisäksi erilaiset pisaranerotimet. Kryolauhduksen alhaisten lämpötilojen takia kosteus voi aiheuttaa laitteiston jäätymistä, mikä saattaa pahimmassa tapauksessa pysäyttää koko prosessin. Putkistoon kertyvä lauhde kerätään päälauhduttimesta syntyvän lauhteen kanssa puskurisäiliöön, mistä se jatkaa matkaansa esimerkiksi takaisin pääprosessin liuottimeksi tai lisätalteenottoon tislaukseen. Päälauhduttimessa höyrystynyt typpi taas voidaan viedä eteenpäin toimimaan pääprosessin suoja- ja kaasuna. Puhdistettu kaasu voidaan parhaassa tapauksessa kanavoida suoraan ulkoilmaan, tai tarvittaessa eteenpäin jatkotalteenottoon. (Cryo-Condap® technology for VOC recovery 2015.)

Kryolauhdutuksessa pitää kiinnittää erityistä huomiota prosessiturvallisuuteen. Nestemäisen typen lämpötila on aina alle sen nesteytyslämpötilan, normaalissa ilmanpaineessa alle $-195,8\text{ °C}$, jonka takia se voi aiheuttaa ihmiselle vakavan vahingon kontaktin tapahtuessa (CWW Bref 2016, 347).

Kaasumuodossa typpi ei ole myrkyllinen, mutta sen kyky syrjäyttää happea ihmisen keuhkoissa tekee siitä tappavan. Ihminen voi tulla tajuttomaksi jo yhdestä typpikaasun täytteisestä hengenvendosta. Yhdysvalloissa on alettu tutkimaan typpikaasun käyttöä jopa kuolemaantuomittujen teloitamiseen. (Pappas 2018.)

Kryolauhdutuksessa voidaan teoriassa päästä lähes mihin tahansa haluttuun talteenotto prosenttiin. Käytännössä on kuitenkin hankala saada pudotettua puhdistettavan kaasun lämpötilaa enemmän kuin 95 °C, mikä ei vielä välttämättä riitä lähes täydelliseen lauhtumiseen eli talteenottoon. Nykyiset jatkuvatoimiset kryolauhduttimet ovat kaasun puhdistuskapasiteetiltaan yleensä maksimissaan 250 Nm³/h, eikä kaasun VOC-pitoisuus saisi ylittää 100 g/Nm³. Kryolauhdutus vaatii myös pienen ylipaineen väliltä 2-600 kPa. Jos kryolauhduttimen kapasiteettia halutaan kasvattaa 1000 Nm³/h asti, saadaan puhdistettavan kaasun lämpötilaa laskettua vain 30 °C. Kuten perinteisessä lauhdutuksessa, myös kryolauhdutuksen jälkeen kaasuvirta voidaan vielä käsitellä esimerkiksi adsorptiolla korkeamman talteenotto prosentin saavuttamiseksi. (CWW Bref 2016, 348–349.)

Tavanomaiseen lauhdutukseen verrattuna kryolauhdutuksella päästään parempaan lauhtumiseen eli suurempiin talteenottomääriin, jolloin puhdistettava kaasu ei välttämättä tarvitse toista käsitelyä jollain muulla talteenotto prosessilla. Kryolauhdutuksen etuna voidaan myös pitää typen kierräystä ja sen ominaisuuksia suojakaasuna, mutta samalla se vaatii nestemäisen typen hankintaa. Tehokkainta on tuottaa nestemäinen typpi mahdollisimman lähellä, jotta kuljetus- ja energiahäviöt jäävät minimiin. Kryolauhdutuksen haittoja ovat mahdollinen lauhduttimen jäätyminen, jos puhdistettavassa kaasuvirrassa on yhtään kosteutta. Kryolauhdutusjärjestelmän investointikulut voivat olla jopa 40-kertaiset verrattuna perinteiseen lauhdutusjärjestelmään, ja se tarvitsee arviolta neljä kertaa enemmän ylläpitotyötunteja. (CWW Bref 2016, 351.)

4.4 Muut prosessit ja järjestelmät

Alakappaleessa kuvaillaan lyhyesti muita parhaita käyttökelpoisia tekniikoita ja niiden sovelluksia VOC-aineiden käsittelyssä ja talteenotossa.

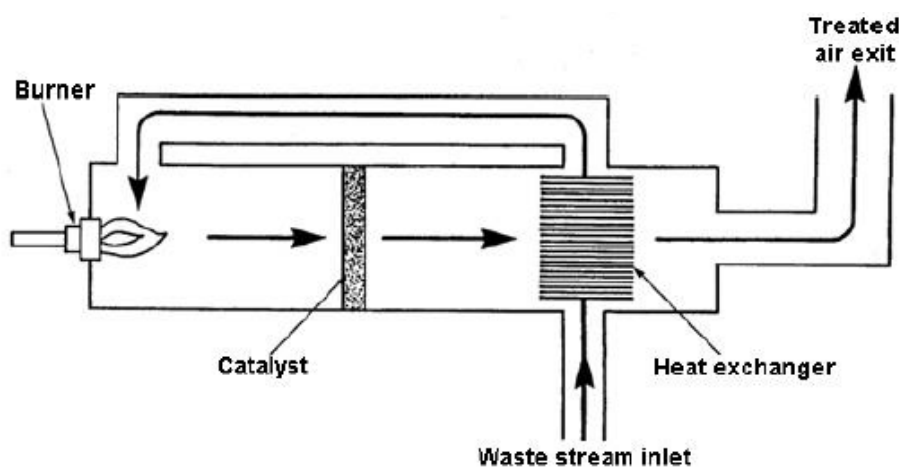
4.4.1 Terminen ja katalyyttinen hapetus

Termisellä hapetuksella eli polttamisella voidaan hapettaa VOC-aineet pääasiassa hiilidioksidiksi ja vedeksi. Hapetus tapahtuu polttokammioissa korkeissa, jopa yli 1100 °C lämpötiloissa. Hapetuksen pääprosessimuuttujat ovat poltettavan kaasun viipymäaika, lämpötila, turbulenssi ja hapen saataavuus. Termistä hapetusta on olemassa useaa eri tyyppiä: suoraa, rekuperatiivista, regeneratiivista sekä kaasu- ja höyrykattiloissa tapahtuvaa. (CWW Bref 2016, 397–398.)

Terminen hapetus sopii hyvin keskisuurille ja suurille VOC-virtauksille, 900–86 000 Nm³/h, joissa kaasun määrä ei vaihtelee vaan pysyy hyvinkin tasaisena. Terminen hapetus on erittäin luotettava prosessi, millä voidaan vähentää kaasun VOC-pitoisuutta jopa 100 %. Termisen hapetuksen haittapuolia ovat mahdolliset muut syntyvät savukaasut ja lisäpolttoaineen tarve vähintään kattilan käynnistyksessä. Prosessista voidaan ja kannattaakin ottaa lämpöä talteen erilaisia käyttökohteita varten. (CWW Bref 2016, 402–407.)

Katalyyttisen hapetuksen toiminta perustuu samoihin asioihin termisen hapetuksen kanssa, polttoprosessiin lisätään vain katalyytti (CWW Bref 2016, 408). Katalyyttien tehtävä on yleensä kiihdyttää reaktiota ja ohjata sitä haluttuun suuntaan. Katalyytit eivät ota pysyvästi osaa kemialliseen reaktioon, toisin kuin esimerkiksi adsorptiossa tarvittava adsorbentti. (Pihkala 2011, 164.)

Katalyyttisessä hapetuksessa (kuvio 13) kaasu johdetaan liekkialueen jälkeen katalyyttipedin läpi, mikä alentaa tarvittavaa reaktiolämpötilaa ja edistää hapettumisreaktiota (CWW Bref 2016, 408).



Kuvio 13. Katalyyttinen hapetus (CWW Bref 2016, 408)

Katalyyttisellä hapetuksella voidaan tyypillisesti käsitellä suuria jätekaasuvirtoja 1200–90 000 Nm³/h välillä, ja katalyytti vähentää samanaikaisesti myös syntyneitä hiilidioksidipäästöjä. Termisen hapetuksen tapaan katalyyttistä hapetusta on olemassa useaa eri tyyppiä. Termiseen verrattuna katalyyttinen hapetus on kalliimpaa ja poistaa vähemmän VOC-aineita, mutta vie vähemmän tilaa laitoksella ja on paloturvallisempi matalampien lämpötilavaatimusten takia. (CWW Bref 2016, 412–413.)

4.4.2 Bioprosessit

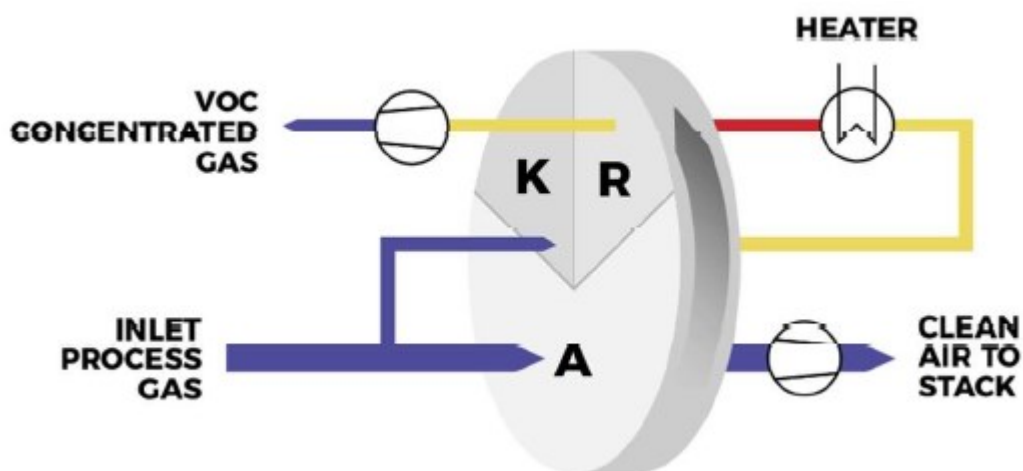
Biosuodatuksessa VOC-aineita sisältävä kaasu ohjataan orgaanisia materiaaleja sisältävän laakean altaan muotoisen pedin läpi. Petimateriaaleja voivat olla esimerkiksi turve, komposti ja kaarna. Pedissä VOC-kaasut hapettuvat luonnollisesti esiintyvien mikro-organismien ansiosta hiilidioksidiksi, vedeksi, epäorgaanisiksi suoloiksi ja biomassaksi. Biosuodatuksen etuja ovat edulliset investointi- ja käyttökustannukset, ja se sopii erittäin hyvin orgaanisille, biohajoaville yhdisteille kuten VOC-aineille. Biosuodatuksen haittapuolia ovat mahdollinen laaja tilantarve (petimateriaalia tarvitaan yksi neliömetri per 100–400 Nm³/h virtausta) ja heikko prosessihallittavuus. Talven alhaisten lämpötilojen takia biosuodatus ei sovellu Suomessa ulkoilmaan. (CWW Bref 2016, 376–381.)

Bioscrubbaus yhdistää absorption ja biohajoamisen. Siinä absorberin pesuneste sisältää tiettyjä mikro-organismeja, jotka pystyvät hapettamaan kaasuvirran VOC-aineita. Prosessi tarvitsee absorberin lisäksi mikro-organismien aktivointisäiliöön ja lietekiertopumpun. Bioscrubbaus sopii hyvin alkoholeille ja muille biohajoaville aineille, ja sen prosessia on helpompi hallita verrattuna biosuodatukseen. Suurina haittapuolina ovat biomassan tukkeutuminen, kerääntyminen ja hävittäminen. Molemmat, biosuodatus ja bioscrubbaus, voivat aiheuttaa epätoivottuja hajupäästöjä ja hajuhaittoja. (CWW Bref 2016, 382–387.)

4.4.3 Zeoliittipohjainen roottori-konsentraattori

Zeoliittipohjaisen roottori-konsentraattori-järjestelmän tehtävänä on kasvattaa adsorptioprosessin avulla päästökaasun VOC-pitoisuutta, jotta se voidaan käsitellä tehokkaammin esimerkiksi termisellä- tai katalyyttisellä hapetuksella. Kuviossa 14 on periaatekaavio prosessista, missä kirjaimet tarkoittavat: A = adsorptio, K = jäähdytys ja R = desorptio. Prosessi pohjautuu absorptioon ja lauh-

dutukseen, mitkä ovat parhaita käyttökelpoisia tekniikoita VOC-aineiden käsittelyssä ja talteenotossa. Ensin kaasu johdetaan adsorptioprosessiin, missä zeoliittipyörä toimii adsorbenttinä. Adsorption jälkeen noin 5 % puhdistetusta kaasusta kuumennetaan ja syötetään vastavirtaan roottori-konsentraattoriin ja loput kaasuja keesta voidaan kanavoida ulkoilmaan. Zeoliittipyörään aiemmin adsorboitunut VOC-aine siirtyy desorptiossa takaisin pieneen kaasuja keeseen, ja zeoliittipyörä regeneroituu samalla. (Rotor-concentrators with zeolites n.d.)



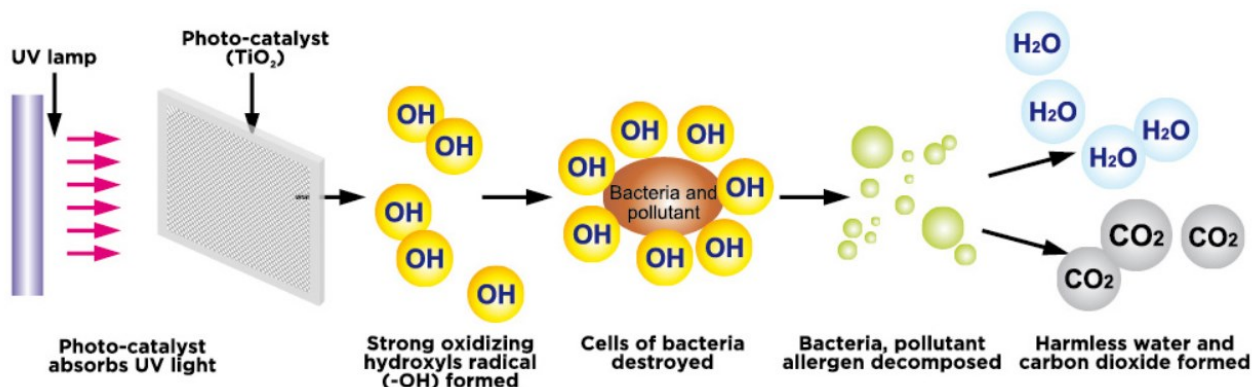
Kuvio 14. Zeoliittipohjainen roottori-konsentraattori (Rotor-concentrators with zeolites n.d.)

Pienen kaasuja keen VOC-pitoisuus kasvaa roottori-konsentraattorissa jopa 20 kertaiseksi, jolloin se on järkevä loppukäsittellä hapettamalla. Tekniikka soveltuu hyvin suurille virtaamille, aina 200 000 Nm³/h asti, ja pienille tai todella pienille VOC-pitoisuuksille. Tekniikka tarvitsee suuren kapasiteettinsa vuoksi paljon tilaa, ja siksi se on järkevä sijoittaa esimerkiksi tehdasrakennuksen ulkopuolelle. (Rotor-concentrators with zeolites n.d.)

4.4.4 Fotokatalyyttinen hapetus

CWW BAT-vertailuasiakirjassa mainitaan tulevaisuuden tekniikaksi VOC-kaasujen puhdistamisessa fotokatalyyttinen hapetus. Tekniikka perustuu kaksivaiheiseen prosessiin, missä tarvitaan katalyyttinä toimivaa ainetta. Katalyyttinä fotokatalyyttisessä hapetuksessa toimii titaanioksidi. Ensimmäisessä vaiheessa titaanioksidi TiO₂ altistetaan VOC-kaasulle. Toisessa vaiheessa katalyytti aktivoidaan UV-valolla, mikä voi olla suoraan auringonvaloa tai lampuilla keinotekoisesti tuotettua. Katalyytin ja UV-säteiden yhteisvaikutus muuttaa osan käytettävissä olevasta kaasun vesihöyrystä

hydroksyyliiradikaaleiksi (OH) ja superoksidi-ioneiksi (O_2^-). Ne ovat erittäin reaktiivisia ja vahvoja hapettajia, jolloin ne hajottavat tehokkaasti orgaanisia aineita, eli myös VOC-yhdisteitä. Lopputuloksena orgaaniset aineet hajoavat hiilidioksidiksi (CO_2) ja vedeksi (H_2O). (CWW Bref 2016, 574.)



Kuvio 15. Fotokatalyyttinen hapetusreaktio (How Photocatalytic Oxidation Works n.d.)

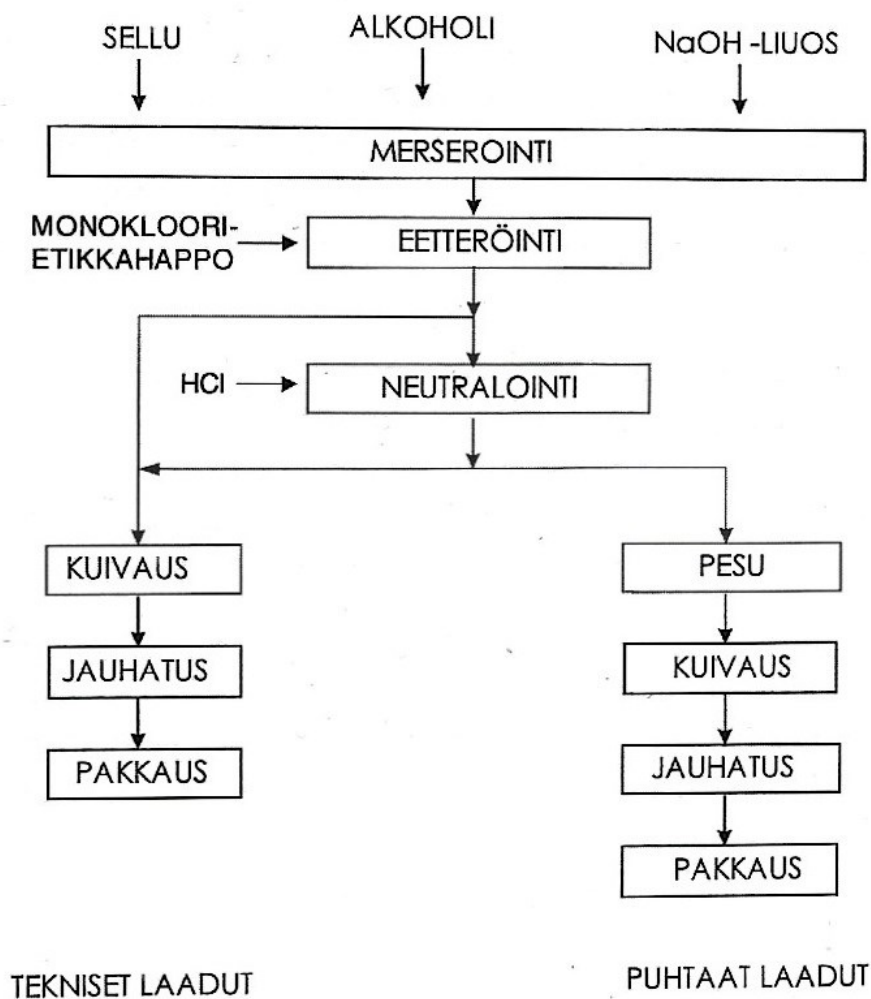
Fotokatalyyttinen hapetus sopii parhaiten matalille VOC-pitoisuuksille ja pienille virtaamille. Optimaalinen VOC-pitoisuus on noin 1 g/m^3 luokkaa virtauksen ollessa $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Tekniikka ei sovellu pienen kapasiteettinsa takia kovinkaan monen tehtaan pääjätevirtojen käsittelyyn. Tekniikkaa käytetään tällä hetkellä pääasiassa vain varastoitujen nestemäisten päästöjen tai lietteiden hönhöyryjen käsittelyyn. Tekniikka on jo käytössä Ahlstromin paperitehtaalla Pont L'Evêquessa Ranskassa. (CWW Bref 2016, 575.)

5 3-linjan toimintakuvaus

Nouryonin Äänekosken 3-linja otettiin käyttöön vuona 1993 ja se on maailman suurin yksittäinen CMC:n valmistuslinja. 3-linjan tuotantokapasiteetti on 37 000 tonnia CMC:tä vuodessa. (ISY-2004-Y-261 2006, 8.)

5.1 Karboksimeyyli selluloosan valmistus

CMC:n eli karboksimeyyli selluloosan valmistuksen päävaiheet on esitetty kuviossa 16. Valmistus alkaa arkkimuotoisen puu- tai puuvillasellun hajottamisella (Riistama, Laitinen & Vuori 2005, 129). Selluloosa jauhetaan kahdessa vaiheessa, ensin karkeajauhimmella postimerkkikokoon, minkä jälkeen se pulveroidaan hienojauhimmilla (ISY-2004-Y-261 2006, 8).



Kuvio 16. CMC:n valmistuksen päävaiheet (Riistama, Laitinen & Vuori 2005, 130)

Seuraavaksi sellujauhe siirretään alkalisaattoreihin, jossa sellukuidut turvotetaan ja avataan natriumhydroksidilla ja liuottimena toimivalla alkoholilla. Tapahtuu merseröinti-reaktio, missä selluloosa muuttuu alkaliselluloosaksi. Merseröinnin jälkeen alkaliselluloosaan lisätään monokloorietikkahappoa, minkä jälkeen alkaliselluloosasatsi siirretään reaktoreihin. Reaktoreissa tapahtuu eetteröityminen, kun lämpötila nostetaan noin 70 °C:een. Tehtaan 3-linjalla on neljä rinnakkaista alkalisaattoria ja neljä reaktoria. Reaktiotuotteena muodostuu jälkikäsittelyä vaille valmista CMC:tä. Ennen kuivatusta sitä kutsutaan kuitenkin vielä CMC-slurryksi. (Alkalointi ja eetteröinti 3-linjalla 2020.) Slurry on teollisuudessa usein käytetty termi, ja se tarkoittaa nesteen ja kiinteän aineen pienten osasten seosta (Slurry n.d.).

Syntynyt CMC voidaan joko jättää lievästi alkaliseksi, jolloin se jää tekniseksi laaduksi, tai neutraloida suolahapolla alkoholivesiliuoksessa puhtaaksi laaduksi (Riistama, Laitinen & Vuori 2005, 129). Tehtaan 3-linjalla CMC neutraloidaan (Alkalointi ja eetteröinti 3-linjalla 2020). Neutraloinnin jälkeen CMC-slurrystä erotetaan kahdessa vaiheessa reaktioluottimena toiminut alkoholi, minkä jälkeen CMC pestään vielä kertaalleen alkoholivesiliuoksella. Lopuksi CMC kuivataan noin 93 %:n kuiva-ainepitoisuuteen, jonka jälkeen se jauhetaan ja seulotaan tasalaatuiseksi granulaatiksi tai hyvin hienojakoiseksi jauheeksi asiakkaan toiveiden mukaisesti. Valmis CMC toimitetaan asiakkaille säkeissä tai suoraan säiliöautolla irtotavarana. (Riistama, Laitinen & Vuori 2005, 129.)

5.2 Reaktioluottimen talteenotto

3-linjan prosessilaitteet, missä käytetään reaktioluotinta, inertisoidaan typpikaasulla. Happipitoisuuden laskeminen prosessissa alle 8 % eliminoi liuotinräjähdysten mahdollisuuden, jolloin prosessiturvallisuus paranee merkittävästi. CMC:n valmistukseen tarvittava reaktioluotin koostuu pääasiassa VOC-aineiksi luokiteltavista etanolista ja isopropanolista. Suojakaasuna toimivaan typpikaasuun höyrystyy mukaan reaktioluotinta eli kaasumuotoista liuotinhöngkää CMC:n valmistusprosesseissa. Liuotinhöngästä johtuen kaasua ei voida suoraan hävittää kanavoimalla kaasuvirta ulos tehtaan piipusta, eikä se olisi kovin energiatehokastakaan. Kaasun liuotinhöngäpitoisuutta eli VOC-pitoisuutta ja lämpötilaa pitää ensin laskea, mikä tapahtuu 3-linjalla lauhduttamalla ja absorboimalla liuotinhöngkää. (ISY-2004-Y-261 2006, 8–12.)

Jokaisesta neljästä alkalisaattorista ja neljästä reaktorista liuotinhöngkää sisältävä typpikaasu johdetaan omiin, yhteensä kahdeksaan hönkälauhduttimeen. Lauhduttimissa takaisin nesteeksi lauhtunut reaktioluotin viedään takaisin prosessiin. Lauhdutuksen jälkeen jäljelle jäävä kaasu johdetaan liuotinhöngäpesurille 41K602. Liuotinhöngäpesurilta puhdistettu kaasu kanavoidaan tehtaan ulkoilmaan. Liuotinhöngäpesurilta pesunesteeseen absorboitunut liuotin johdetaan takaisin alkalisäattoreihin reaktioluottimeksi liuotinhöngkien talteenottosäiliön 41B608 kautta. (Alkalointi 3-linjalla 1997.)

Nestemäinen reaktioluotin erotetaan CMC-slurrystä kahdessa eri vaiheessa. CMC-slurry puristetaan ensi ruuvipuristimella kakuksi. Puristimen jälkeen CMC-kakku johdetaan kuivuriin, jossa loppu reaktioluotin poistetaan höyrystämällä CMC-kakku noin 85 °C:een. Erotetusta nestemäisestä reak-

tioliuottimesta suurin osa puhdistetaan pyörrepuhdistimella, mistä se viedään käytettäväksi puristimen ja siirtolinjojen huuhteluun. Puhdistettua reaktioliuotinta viedään myös takaisin alkalointiin lisä-reaktioliuottimeksi. Jäljelle jäävä puhdistamaton reaktioliuotin pumpataan säiliötarhalle. (Reaktioliuottimen erotus 2011.) Kuivurilta lähtevä liuotinhönkä menee pesurille 41K601, joka on lähes identtinen pesurin 41K602 kanssa. Kaksi pesuria ovat myös yhteydessä toisiinsa liuotinhönkien talteenottosäiliön 41B608 kautta. 3-linjalla on myös kolmas hönkäpesuri 42K601, millä pestään granulaattorien ja stripperien hönkiä. (Alkalointi 3-linjalla 1997.)

Nestemäisen liuottimen loppukäsittely tapahtuu kahdessa tislaamossa. Vanhempi tislaamo uudistettiin vuonna 1996, ja uudempi tislaamo otettiin käyttöön vuonna 2001. Tislaamot toimivat toisensa varalaitoksina. Tislauksen jälkeen tisle eli väkevöity liuotin palautetaan takaisin prosessiin. Tislauksen pohjatuote johdetaan läheiselle Metsä Botnian jätevedenpuhdistamolle loppukäsittelyyn. Pohjatuote sisältää CMC:n valmistusprosessin sivutuotteita lipeää, natriumglykolaattia, uuteaineita ja pieniä pitoisuuksia reaktioliuotinta. (ISY-2004-Y-261 2006, 7–9.)

5.3 Typpikaasun valmistus

3-linjalla ja muualla tehtaassa prosessien suojakaasuna käytetty typpikaasu valmistetaan tehtaan välittömässä läheisyydessä Polargas Oy:n omistamalla typenvalmistusyksiköllä. Typpilaitos tuottaa typpikaasua noin 17 000 kg päivässä ulkoilmasta membraanitekniikan avulla. Typen valmistus vaatii vain sähköenergiaa, eikä tuota suoria päästöjä ilmaan tai vesistöön. Typen valmistus tehtaan läheisyydessä minimoi myös typen säiliöautokuljetuksista aiheutuvat päästöt. (ISY-2004-Y-261 2006, 11–12.)

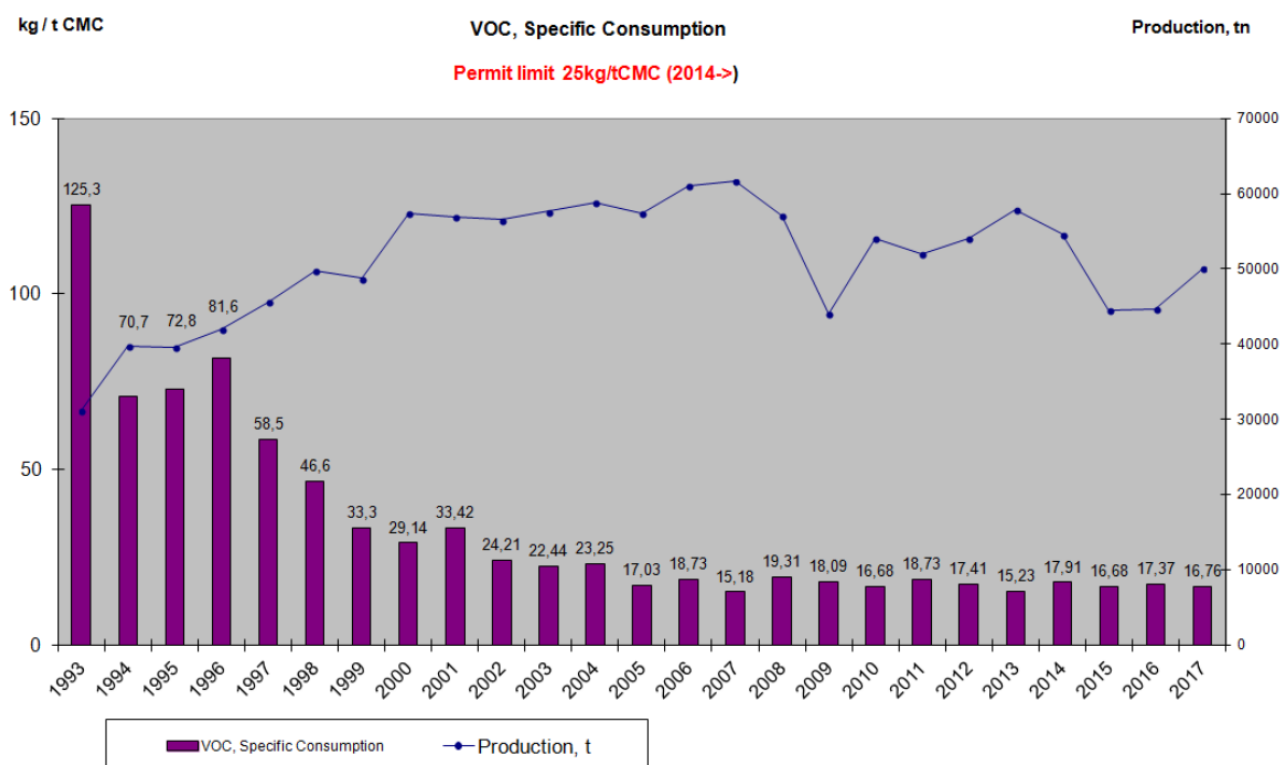
6 Työn toteutus

6.1 VOC-päästörajojen tarkastelu

VOC-päästörajojen tarkastelu valikoitui yhdeksi tutkimuskysymykseksi, sillä se on hyvin keskeinen osa Äänekosken CMC -tehtaan tulevaisuutta. Päästörajat antavat raamit 3-linjan ja koko tehtaan liuotinhönkien talteenotto-prosessien muutostarpeille.

6.1.1 Nykyinen VOC-päästöraja ja -mittaukset

Nouryon Chemicals Finland Oy:n VOC-päästöt ilmaan eivät saa ylittää 25 kg/tCMC eli 25 kg per tuotettu tonni CMC:tä. Vuoden 2006 ympäristöluvassa raja oli 35 kg/tCMC, mutta tavoitteena oli laskea päästöt alle nykyisen päästörajan vuoteen 2014 mennessä, missä onnistuttiin hyvin kuvion 16 mukaan. Esimerkiksi vuonna 2015 CMC:tä tuotettiin 50 000 tonnia, ja VOC-päästöt olivat 16,76 kg/tVOC eli reippaasti alle päästörajan. Nykyinen päästöraja on määritelty tehtaan päästöjen keskiarvon avulla (Karhu 2022).



Kuvio 17. VOC-päästöt suhteessa tuotettuun CMC:hen (VOC Recovery system n.d.)

Pesurilta 41K602 kanavoitu VOC-pitoisuus mitataan tehtaan toimesta vaihtelevasti, mutta noin kerran viikossa. Mittaukseen käytetään MiniRae 3000 PID -mittaria, minkä toiminta perustuu valoionisaatioilmaisimeen (VOC Recovery system n.d.). Nykyinen CWW BAT-päätelmä ei aseta erityisiä mittausvaatimuksia päästöille ilmaan. Vuoden 2006 ympäristöluvan mukaan tehtaan tulee kuitenkin raportoida päästöt ilmaan ympäristökeskukselle kerran vuodessa, ja sisäiseen ympäristöraporttiin kerran kuukaudessa (ISY-2004-Y-261 2006, 20).

6.1.2 Tulevaisuuden VOC-päästöraja ja -mittaukset

Pian julkaistavassa WGC-päätelmässä annetaan uusia BAT-AEL-päästörajoja VOC-aineille. WGC BAT-vertailudokumentti ei kuitenkaan antanut uutta, koko tehdasta koskevia päästörajaa, mikä liittyisi CMC:n valmistukseen. Voidaan olettaa, että vanhalla rajalla 25 kg/tCMC mennään niin pitkälle, kunnes Suomen viranomaiset sitä päättävät laskea. Päätelmässä on kuitenkin annettu BAT-AEL-arvot yleisesti VOC-aineille, jotka on luokiteltu CMR-luokituksen mukaan. Nämä päästörajat on annettu yksittäiselle, ulos kanavoidulle päästölähteelle. Mikään päätelmän antamista VOC-arvoista ei kuitenkaan päde suoraan Äänekosken CMC -tehtaan VOC-päästörajoituksiin, sillä reaktioluottimena käytettävät etanoli ja isopropanoli eivät ole listalla ja eivät kuulu CMR-luokiteltuihin aineisiin ainakaan vielä (272/2008). Haihtuvan orgaanisen kokonaishiilen määrälle eli TVOC:lle päätelmä antaa yksittäiselle päästölähteelle päästörajaksi välin 1-20 mg C/Nm³. Koska VOC-aineet ovat orgaanisia, sisältävät ne aina hiiltä. (WGC Bref 2022, 279.)

Kreikka on kuitenkin laittanut vireille ehdotuksen etanolin luokittelemiseksi CMR-aineeksi. Jos ehdotus menee läpi, sen vaikutukset olisivat merkittävät Euroopan unionin jäsenmaiden useisiin teollisuuden sektoreihin, eritoten desinfiointiaineiden valmistukseen. (Ethanol n.d.) On vielä hyvin epäselvää, miten luokittelu vaikuttaisi juuri CMC:n valmistukseen, mutta se tulisi todennäköisesti näkymään tiukempana päästörajana etanolille. Päätelmän mukaan CRM-luokitellulla VOC-aineella, jonka massavirta on yli 1 g/h tai yli 50 g/h, on yksittäisen päästölähteen päästöraja väliltä 1–10 mg/Nm³ riippuen CRM-luokituksen vaarallisuudesta. (WGC Bref 2022, 279.)

Uudessa WGC BAT-päätelmässä annetaan myös pienimmät mittaustiheydet eri aineita sisältävien jätekaasujen ulos kanavoitujen pitoisuuksien mittaamiseen. Asiakirjassa ei anneta mittaustiheyttä suoraan kaasun sisältämälle VOC-määrälle, jos VOC-aine ei ole CRM-luokiteltu, vaan sen sisältämälle haihtuvan orgaanisen kokonaishiilen määrälle TVOC:lle. Parasta käyttökelpoista tekniikkaa on mitata TVOC-pitoisuus kuuden kuukauden välein, kun yksittäisen ulos kanavoidun jätekaasun TVOC-pitoisuus on alle 2 kg C/h. Jos ulos kanavoidun jätekaasun TVOC-pitoisuus on suurempi tai yhtä suuri kuin 2 kg C/h, on parasta käyttökelpoista tekniikkaa mitata päästön määrää jatkuvatoimisesti. Vuoden 2017 päästömittausraportin mukaan pesurin 41K601 hiilipäästöt olivat 234 ± 78 g C/h ja pesurin 41K602 päästöt 345 ± 74 g C/h. Virhemarginaalit mukaan ottaen kummankaan 3-linjan pesureiden hiilipäästöt eivät ylitä 2 kg C/h, jolloin mittaustiheydeksi riittäisi puoli vuotta. Jos

etanoli määriteltäisiin CMR-aineeksi, ei luokittelu vaikuta mittausväliin tiukentavasti. (WGC Bref 2022, 274–277.)

Vertailudokumentti muistuttaa myös tärkeän asian yksittäisistä ulos kanavoitavista päästölähteistä: jos kaksi tai useampaa poistokaasuvirtaa, joilla on samat ominaisuudet keskenään, johdetaan tehtaan eri kanavista pihalle, niin todennäköisesti näitä poistokaasuvirtoja tarkastellaan kuin ne tulisivat ulos vain yhdestä kanavasta. Toimivaltainen viranomainen päättää, arvioidaanko eri poistokaasuvirtoja yhtenä virtana. Virtojen arvioiminen yhdistettynä saattaa hankaloittaa päästörajojen alittamista. (WGC Bref 2022, 296.)

WGC BAT-vertailudokumentin antamat päästörajat yksittäisille ulos kanavoitaville poistokaasuvirroille vaikuttavat todella tiukoilta ja hyvinkin epärealistisilta vanhoille laitoksille. Vuoden 2017 päästömittausraportin mukaan pesurin 41K602 TVOC-pitoisuus oli $1188 \pm 123 \text{ mg C/Nm}^3$, mikä ylittää uuden päästörajan tuhatkertaisesti. Nähtäväksi jää, milloin ja miten uudet päästörajat otetaan käyttöön Suomen lainsäädännössä, ja millainen siirtymisaika vanhoille laitoksille annetaan.

6.2 3-linjan parhaan käyttökelpoisen tekniikan tarkastelu

Yksi opinnäytetyön tutkimuskysymyksistä oli selvittää, mikä on parasta käyttökelpoista tekniikkaa liuotinhölkien talteenotossa. Vertaamalla tietoperustan BAT-selvityksen tuloksia 3-linjan nykyiseen käytössä olevaan tekniikkaan saadaan ajankohtaista tietoa linjan nykyisestä ympäristönsuojelun tasosta. Nykyisen ympäristönsuojelun tason selvitys ohjaa liuotinhölkien talteenotto-prosessin kehitysehdotuksia.

6.2.1 Liuotinhölkien käsittely

CWW BAT-vertailuasiakirjan mukaan parasta käyttökelpoista tekniikkaa ilman johdettavilla jätekaasuilla on koteloida päästölähteet ja käsitellä päästöt mahdollisuuksien mukaan. Parasta käyttökelpoista tekniikkaa on myös käyttää erilaisia prosessin sisäisiä tekniikoita ja jätekaasun käsittelytekniikoita päästöjen vähentämiseksi. Vertailuasiakirja jättää suhteellisen paljon tulkinnanvaraa parhaalle käyttökelpoiselle tekniikalle. Nouryonin Äänekosken tehtaan 3-linjalla liuotinhölkä käsitellään lauhdutusella ja absorptiolla, ja pesurissa pesuveteen absorboitunut liuotin päätyy vielä lopulta tislaukseen ja jätevedenpuhdistukseen. Näitä tekniikoita suositellaan käytettäväksi CWW

BAT-vertailuasiakirjassa, joten voidaan todeta, että 3-linjan VOC-kaasujen puhdistus on tällä hetkellä parasta käyttökelpoista tekniikkaa.

Pian virallisesti julkaistavan WGC BAT-vertailuasiakirjan mukaan parasta käyttökelpoista tekniikkaa VOC-jätekaasujen käsittelyssä on käyttää adsorptiota, absorptiota, lauhdutusta, termistä hapestusta, katalyyttistä hapetusta tai bioprosesseja. Myös kyseisten prosessien erilaisten yhdistelmien käyttö on suositeltavaa ja parasta käyttökelpoista tekniikkaa. Tietoperustan selvityksen perusteella voidaan todeta, että kyseisistä tekniikoista 3-linjalle parhaiten sopivat tekniikat ovat adsorptio, absorptio sekä lauhdutus. 3-linjan nykyinen VOC-järjestelmä on siis myös tulevan WGC BAT-vertailuasiakirjan ja päätelmän mukaan parasta käyttökelpoista tekniikkaa. Tämä tarkoittaa, että lain velvoittamia muutoksia VOC-talteenottolaitteistolle ei ole pakollista tehdä vielä pitkään aikaan. Vaikka prosessit eivät olisi olleet uuden vertailuasiakirjan mukaan enää parasta käyttökelpoista tekniikkaa, riittää se, että niillä päästään samalle ympäristönsuojelu- eli päästötasolle parhaan käyttökelpoisen tekniikan kanssa.

WGC BAT-vertailuasiakirjan mukaan parasta käyttökelpoista tekniikkaa on mitata jatkuvasti jätekaasun keskeisiä suureita ennen esikäsittelyä ja/tai ennen loppukäsittelyä. Pesurille 41K602 päätyvän hönkäkaasun virtaamaa tai lämpötilaa ei kuitenkaan mitata missään vaiheessa ennen kaasun käsittelyä lauhduttimilla tai ennen kaasun käsittelyä pesurilla. Mittaukset auttaisivat jätekaasuvirtojen seurannassa ja hallinnassa, sekä erilaisten taseiden muodostamisessa. Parasta käyttökelpoista tekniikkaa on myös yhdistää samantyyllisiä jätekaasuvirtoja, jolloin niiden käsittely on tehokkaampaa. 3-linjalla tämä toteutuu, kun kahdeksan lauhduttimen hönkäkaasut kerätään yhteen ja johdetaan pesurille 41K602. Myös IPA-kuivurin ja IPA-pesurin höngät kerätään yhteen ja käsitellään yhdessä pesurilla 41K601.

6.2.2 Hajapäästöjen käsittely

Tehtaalla on käytössä liikuteltava VOC-mittari, minkä avulla pyritään löytämään hajapäästöjen lähteitä. Henkilökuntaa on koulutettu mittarin käyttöön ja säännöllisten mittasarjojen toteuttamiseen. Mittausten tulokset kirjataan ylös Excel -taulukkoon, mihin myös kanavoitujen päästöjen mittaustulokset merkitään. Laitoksen sisällä olevien laitteiden hajapäästöjä kuvataan ajoittain myös ulkopuolisen toimijan toimesta.

6.3 Pesurin 41K602 tutkiminen laskennallisesti

Yksi tutkimuskysymyksistä on selvittää pesurin 41K602 toimintaa. Toimeksiantajalla oli epäily, että pesuri 41K602 ei toimi riittävän hyvin, eli liuotinhöngän talteenotto ei ole tarpeeksi tehokasta. Yksi vaihtoehto pesurin heikolle toiminnalle on, että se on mitoitettu liian pieneksi nykytilanteen virtauksille. Opinnäytetyön alkuperäiseen tutkimuksen toteutusosion suunnitelmaan kuului tutkia pesurin toimintaa mittaustekniikan työvälineillä. Tarkoituksena oli mitata pesurilta 41K602 ulos kanavoitavan kaasun VOC-pitoisuus jatkuvatoimisella mittarilla, ja samanaikaisesti muuttaa pesurille menevän pesuveden prosessimuuttujia. Muutokset olisivat todennäköisesti näkyneet lähes heti ulos kanavoitavan kaasun VOC-pitoisuudessa, jolloin olisi voitu vetää johtopäätöksiä pesurin toiminnasta. Suunnitelma ei kuitenkaan toteutunut VOC-mittarin ja sen asennukseen liittyvien ongelmien takia, joten pesurin toiminnan tarkastelu päätettiin suorittaa laskennallisella menetelmällä.



Kuvio 18. Valokuva liuotinhöngäpesurista 41K602

Laskenta suoritettiin Rapsody-nimisellä pesurien mitoitusohjelmalla. Rapsody on saksalaisen täytekappaleita valmistavan RVT Process Equipment GmbH:n ohjelma, ja sen avulla voidaan mitoittaa absorptio- ja desportiokolonnejä. Ohjelmaa voidaan käyttää pääpiirteiseen pesurien mitoitusohjelmalla, mutta pesurien toiminnan tarkkaa simulointia varten tarvitaan tehokkaampia kemiantekniikan simulointiohjelmia, esimerkiksi Aspenia. Rapsody valikoitui opinnäytetyön työkaluksi sen selkeyden ja yksinkertaisen käyttöliittymänsä takia. Ohjelma on tiedettävästi käytössä myös pesurialan ammattilaisilla.

6.3.1 Pesurin nykyiset prosessisuureet

Täytekappalekolonnin eli pesurin mitoituksen tutkimiseen tarvitaan tiedot kolonniin virtaavista aineista, pitoisuuksista, prosessiolosuhteista sekä tiedot nykyisestä kolonnista. Pesurin toimintapaine on ilmanpaine 1,013 bar, sillä pesurista on suora yhteys ulkoilmaan ulos kanavoitavan, puhdistetun kaasun ulospuhalluksen kautta.

Talteenotettava VOC-aine

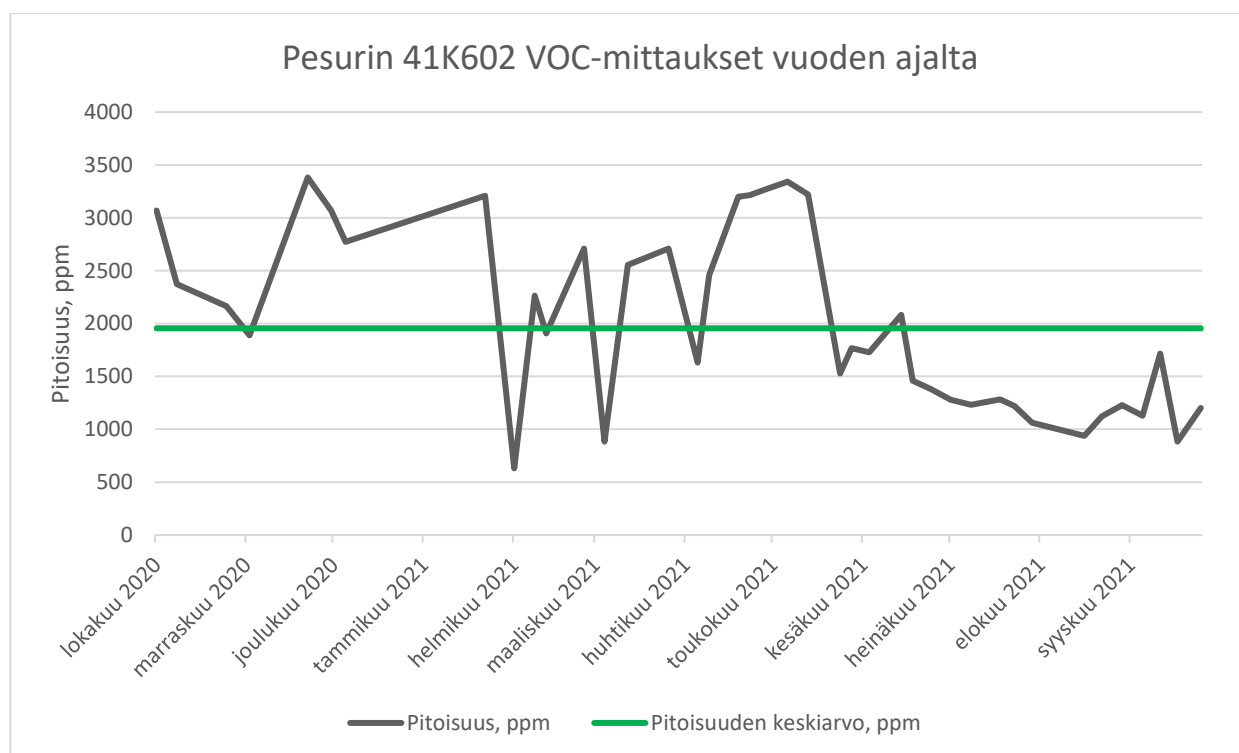
Pesurin avulla halutaan ottaa talteen kaasussa olevaa reaktioliuotimen hönkäkaasua. Todellisuudessa 3-linjan reaktioliuotin ja liuotinhönkä sisältävät etanolia ja isopropanolia. Laskennan yksinkertaistamiseksi talteen otettavaksi aineeksi valittiin kuitenkin vain etanoli. Laskennassa käytetään laskentaohjelma Rapsodyn valmiiksi antamaa Henryn vakiota etanolille kolonnin prosessiolosuhteissa, mikä on 0,209 bar pesuveden lämpötilan ollessa 10 °C.

Poistokanavasta ulkoilmaan päätyvän kaasun VOC-aineen pitoisuus pystyttiin valikoimaan monesta eri lähteestä. VOC-mittarit mittaavat VOC-määrää yksikkönä ppm, eli miljoonasosana. Ppm-arvo voidaan muuttaa muuntokertoimen avulla pitoisuudeksi, ja jokaiselle kaasulle löytyy oma muuntokerroin riippuen aineen moolimassasta ja lämpötilasta. Muuntokaava etanolille on $1 \text{ ppm} = 1,92 \text{ mg/m}^3$, eli muuntokerroin on 1,92 lämpötilan ollessa 20 °C. (Etanoli 2022.)

Vuoden 2017 päästömittausraportin mukaan pesurin jälkeisen ulkoilmaan kanavoidun kaasun VOC-pitoisuus oli $739 \pm 75 \text{ ppm}$ ja lämpötila 18 °C. Mittaustulosten virherajoja ei pesurilaskennassa oteta huomioon, sillä niiden vaikutus tuloksiin on minimaalinen. Etanolin muuntokertoimen avulla pitoisuus on:

$$739 \text{ ppm} * 1,92 = 1418,88 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = 1419 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Kuviossa 19 on esitetty Nouryonin tehtaan omat VOC-mittaukset lokakuulta 2020 syyskuulle 2021. Alkuperäisessä Nouryonin taulukkomuotoisessa Excelissä oli esitetty mittaukset ajalta 2004-2021. Mittauksesta valikoitiin viimeisin vuoden jakso ja sen mittausarvoista tehtiin kuvaaja, jonka avulla selvitettiin pitoisuuden keskiarvo vuoden ajalta. Tälle vuoden kestäneelle ajanjaksolle VOC-mittausten pitoisuuden keskiarvoksi muodostui 1955 ppm.



Kuvio 19. Pesurin 41K602 VOC-mittaukset vuoden ajalta (VOC data 2021)

Etanolin muuntokertoimen avulla laskettu pitoisuus keskiarvolle on:

$$1955 \text{ ppm} * 1,92 = 3753,6 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = 3754 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Mitatut VOC-päästöarvot heittelevät merkittävästi. Heittelyt johtuvat prosessivaihteluista eli siitä, missä vaiheessa alkalisaattorit ja reaktorit ovat tuotteen valmistuksessa. Pesurin toiminnan tarkastelemisen kannalta kannattaa kuitenkin valita päästöarvo heittelyn alarajalla, esimerkiksi 1000

mg/m³. Pesuriin menevän kaasun etanolipitoisuus on täysin valistuneen arvauksen varassa. Jos pesurilta vaaditaan 80 % talteenottoa ulos kanavoitavan etanolipitoisuuden ollessa 1000 mg/m³, on pesurin sisään tulevan kaasun VOC-pitoisuus oltava 5000 mg/m³.

Poistokanavasta ulkoilmaan päätyvän VOC-aineen eli etanolin pitoisuudeksi valikoitui 1000 mg/m³. Pesurin sisään tulevan etanolin pitoisuus arvioitiin olevan 5000 mg/m³.

Puhdistettava kaasu

Kaasu, mihin reaktioliuotin on absorboitunut, on pääasiassa CMC:n valmistuksen prosesseissa käytettyä suojakaasua eli typpikaasua. Kaasun tilavuusvirta saadaan otettua vuoden 2017 päästömittausraportista, missä tilavuusvirta mitattiin pesurin jälkeen ulos kanavoidusta kaasuvirrasta. Arvo mitattiin olevan $290 \pm 54 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Jos kirjain "N" on kaasun suuressa, tarkoittaa se kaasua normaaliolosuhteissa. Kaasun tilavuus on riippuvainen sen paineesta ja lämpötilasta. Euroopassa yleisesti käytetyn standardin DIN 1343 mukaan kaasun normaaliolosuhteet ovat, kun kaasun lämpötila on 0 °C ja paine on 101,3 kPa eli ilmakehän paine. Kaasun tilavuus muissa kuin normaaliolosuhteissa voidaan laskea ideaalikaasujen tilanyhtälöiden avulla. (Normal cubic meters (Nm³) and cubic meters (m³) n.d.)

Pesurin sisään menevän kaasun lämpötilaa oli vaikea arvioida, sillä kaasulinjoissa ei ole lämpötilanmittausta. Arvioidaan, että lauhduttimilta tulevan hönkäkaasun lämpötila olisi noin 50 °C. Käyttämällä Gay-Lussacin lakia, voidaan laskea pesuriin menevän kaasun tilavuus, kun paine on vakio. Gay-Lussacin laki on englanninkielisissä julkaisuissa Charlesin laki, mikä voi hieman hämmentää. (Gay-Lussacin laki n.d.)

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{V_1 * T_2}{T_1}$$

$$V_2 = \frac{290 \text{ m}^3 * (50 \text{ °C} + 273,15) \text{ K}}{(0 \text{ °C} + 273,15) \text{ K}}$$

$$V_2 = 343,08 \text{ m}^3 = 343 \text{ m}^3$$

Pesurille menevän kaasun virtaama on siis noin 343 m³/h.

Pesevä neste

Pesurissa käytetään pesevänä nesteenä vettä, mihin etanoli liukenee hyvin. Neste ei kuitenkaan ole pelkästään vettä, sillä siihen on myös liuenneena reaktioluotinta. Reaktioluotinta on vedessä, koska pesuvettä kierrätetään pesureissa osittain uudestaan. Tämän takia reaktioluottimen määrä pesevässä vedessä on vaikea määritellä. Liitteessä 3 näkyy, miten pesurilta lähtevä likainen vesi menee liuotinhölkien talteenottosäiliöön 41B601. Säiliöön lisätään kempuvettä eli kemiallisesti puhdistettua vettä. Säiliöltä lähtevä linja haarautuu syöttöpumpun jälkeen useaksi linjaksi; pesureille 41K601 ja 42K602, hullunkiertona takaisin talteenottosäiliölle ja takaisin prosessiin alkalisaattoreille. Pesureille lähtevän linjan lämpötilaa voidaan säätää pesurivesien lämmönvaihtimella 41W607. Pesurilta 41K601 likainen pesuvesi lähtee likaisen isopropanolin pumppaussäiliöön 41B609 ja takaisin talteenottosäiliöön 41B608.

Jos pesuri 41K602 ottaa talteen 4000 mg/m³ etanolia kaasun virtauksen ollessa vähän alakanttiin 290 m³/h, on talteen otettavan etanolin massavirta 1160 mg/h. Pesuveteen lisätään kempuvettä nopeudella 0,2 l/s eli 720 l/h. Pesuriin menevän etanolin pitoisuus on siis 1611 mg/l. Pitoisuuden todellista määrittystä hankaloittaa kuitenkin se, että sama pesuneste menee ja palaa myös pesurilta 41K601, mihin välissä on myös mahdollisuus lisätä kempuvettä, ja osa pesunesteestä poistuu isopropanolin pumppaussäiliöön. Osa pesunesteestä pumpataan myös välillä takaisin reaktoreille. Pesurit ovat kuitenkin rakenteeltaan ja toiminnaltaan hyvin samanlaiset, joten voidaan laskennan kannalta olettaa, että pesuri 41K601 suorittaa saman talteenoton pesurin 41K602 kanssa. Karkeasti tuplaamalla ensin lasketun pesuriin 41K602 menevän etanolin pitoisuuden, saadaan pesuveden etanolin kokonaispitoisuuden arvioksi 3200 mg/l. Pesuveden lämpötilan katsottiin liitteen 3 valvomokuvan mukaan olevan 10 °C.

Kolonnin mitat

Kolonnin mittapiirustus mukaan sen vaippa on valmistettu DN350 putkesta, jolloin sen ulkohalkaisija oD on 355,6 mm. Kolonnin seinämän vahvuus s on 4 mm, jolloin kolonnin sisähalkaisija iD lasketaan kaavalla:

$$iD = oD - s * 2$$

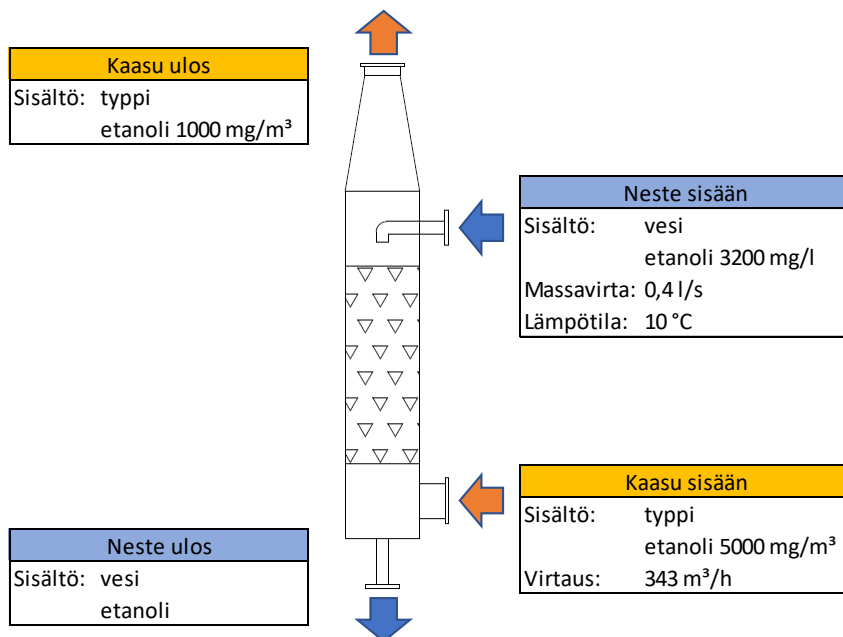
$$iD = 355,6 \text{ mm} - 4 \text{ mm} * 2$$

$$iD = 347,6 \text{ mm} = 348 \text{ mm}$$

Kolonnin tätekappalekerrokselle on varattu kahden ritiläkerroksen välissä tilaa 2500 mm eli 2,5 metriä. Kolonnin tätekappaleet arvioitiin olevan mallia Hiflow metal 38-5, joiden koko on 38 mm. (Pesurin 41K602 mittapiirustus 1999.)

6.3.2 Pesurin toiminnan tarkastelu nykyisillä prosessisuureilla

Laskenta suoritettiin ensin nykyisillä, alakappaleessa 6.3.1 läpikäydyillä prosessisuureilla ensimmäisessä taseessa.

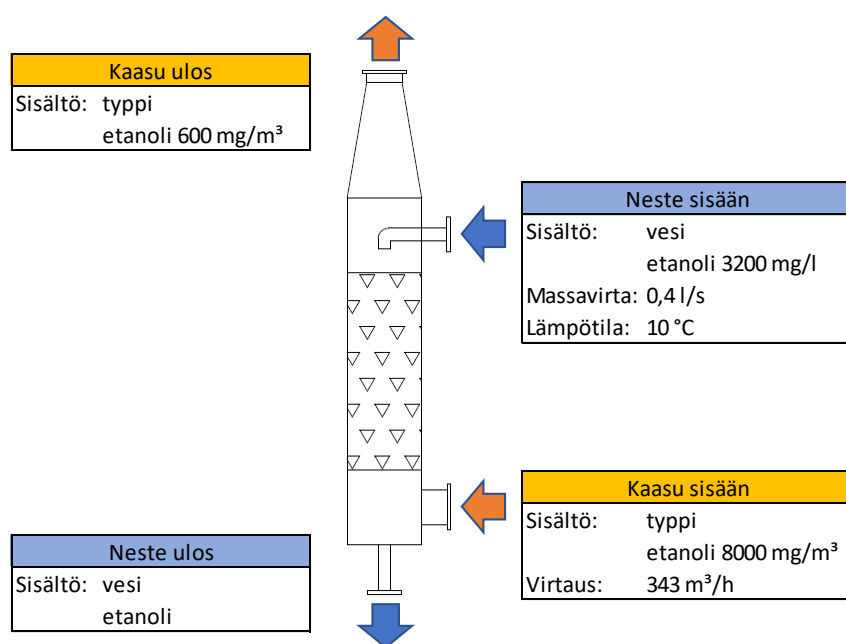


Kuvio 20. Pesurin tase 1: Nykytilanne

6.3.3 Pesurin toiminnan tarkastelu muutetuilla prosessisuureilla

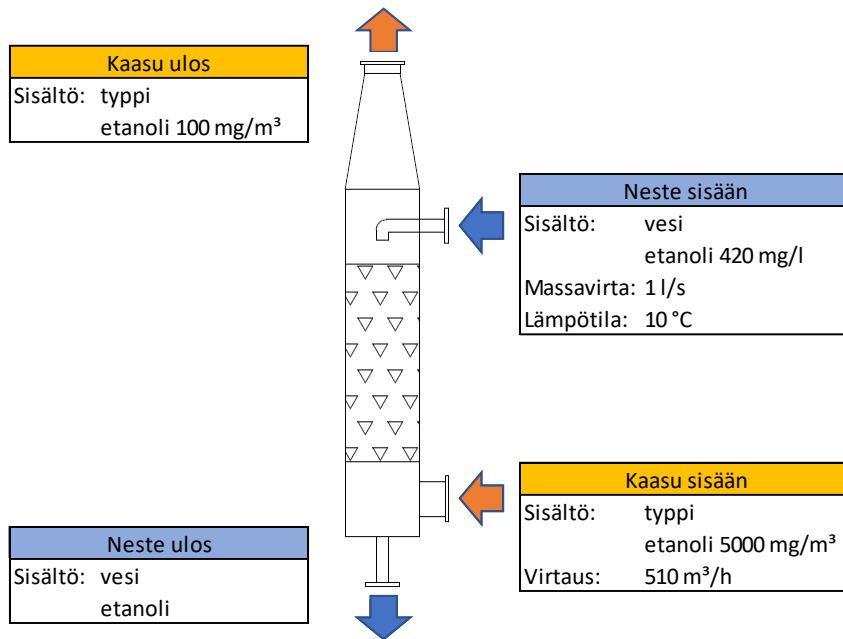
Nykytilanteen taseen laskennan tulosten perusteella tehdään uusia taseita, millä tutkitaan pesurin toimintaa. Pesurin mitat ja täytekappaleet pidettiin samoina kaikissa laskennoissa. Myös pesurille tulevan kaasun etanolipitoisuus pysyy kaikissa muissa paitsi toisessa taseessa 5000 mg/m^3 :ssa, sillä se on CWW-vertailuasiakirjan mukaan maksimipitoisuus alkoholeille, minkä pesuri pystyy käsittelemään, kun pesevänä nesteinä käytetään vettä. Taseiden 2–5 muuttujat määriteltiin niin, että pesurin laskennallinen täytekappalekerroksen pituus pysyy samana, kuin nykyisen pesurin täytekappalekerroksen korkeus, eli 2,5 metrissä.

Pesurin toisessa taseessa pidettiin virtaamat samoina ensimmäisen taseen kanssa, mutta nostettiin pesurin erotusprosentti n. 93 %:in ja pesurille tulevan kaasun etanolipitoisuus nostettiin 8000 mg/m^3 .



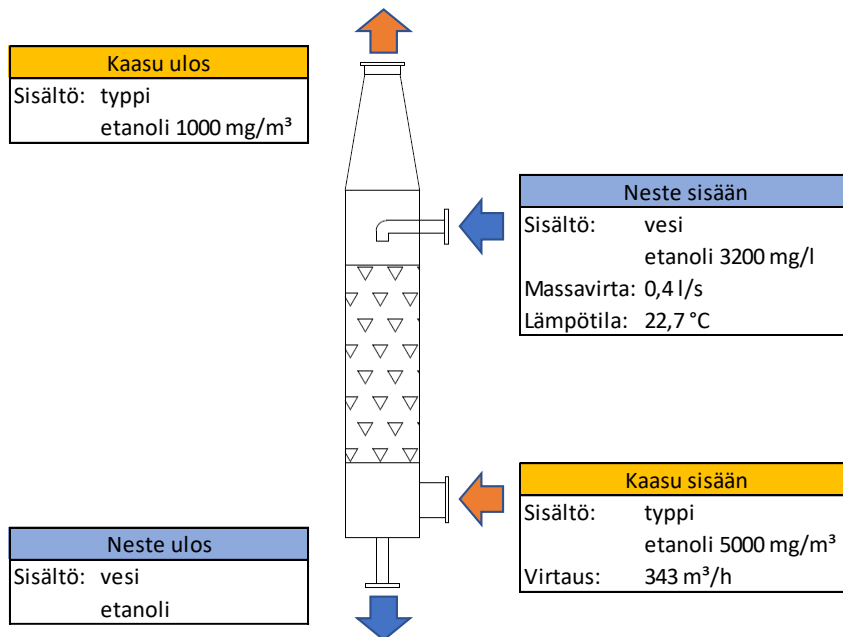
Kuvio 21. Pesurin tase 2: Suurempi pitoisuus

Taseessa kolme pesuria tarkasteltiin mahdollisimman suurilla prosessisuureilla. Talteenotto prosentiksi laitettiin korkea 98 %, minkä pitäisi olla teoriassa mahdollista pesureille. Kaasun virtaama nostettiin $500 \text{ m}^3/\text{h}$ ja pesuveden 1 l/s . Pesuveden etanolipitoisuus laskettiin 600 mg/l , jotta 98 % talteenotto prosentti on mahdollista saavuttaa.



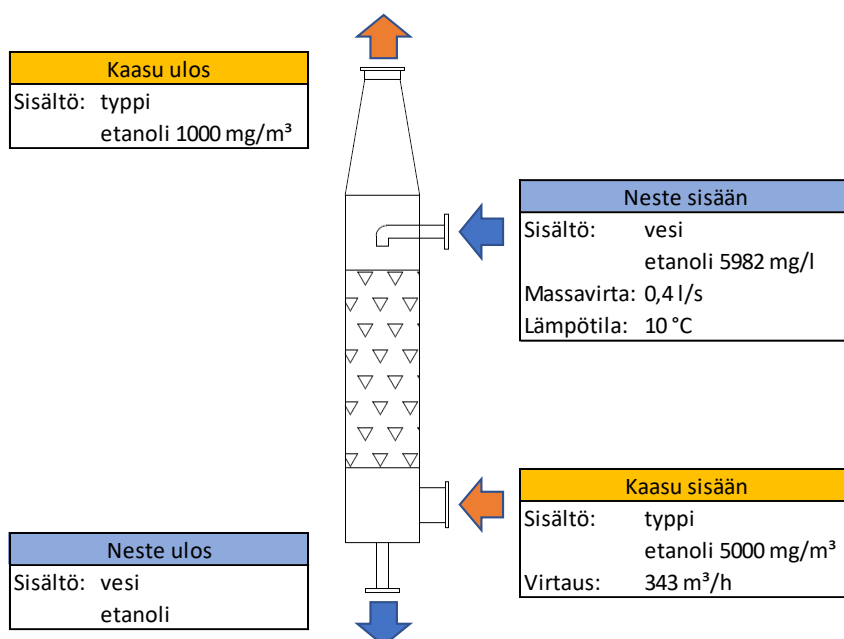
Kuvio 22. Pesurin tase 3: Suurin mahdollinen kapasiteetti

Neljännessä taseessa optimoitiin pesuveden lämpötilaa nykytilanteen virtaamilla ja pitoisuuksilla. Pesuveden lämpötila korotettiin 23,5 °C:een.



Kuvio 23. Pesurin tase 4: Pesuveden lämpötila korotettu

Pesurin viidennessä taseessa haettiin laskennallisesti suurin mahdollinen arvo pesuveden etanolipitoisuudelle muiden suureiden ollessa samat kuin nykytilantessa.



Kuvio 24. Pesurin tase 5: Suurin etanolipitoisuus pesuvedessä

7 Laskennan tulokset

7.1 Pesurin toiminta

Ensimmäisen taseen perusteella tehty laskenta antoi tuloksen (liite 4), että kolonnin kapasiteetti nykyisillä suureilla pitäisi olla riittävä. Tulvimistekijä oli vain 34 % luokkaa (suositeltu maksimi n. 80 %), ja kolonnin laskennallisen täytekappalekerroksen korkeudeksi riittäisi 1,2 metriä. Pesurin laskennallinen painehäviö $1,2 \text{ mbar/m}$ on vähemmän kuin yleensä vaahtoamattomilla kolonneilla, joten laskennallisen painehäviön takia aineensiirto ei ole heikentynyt. Pesurin laskennallisen määrityksen mukaan nykyisen pesurin pitäisi siis toimia normaalitilanteessa hyvin, olettaen, että prosessisuureet on arvioitu todellista tilannetta vastaavaksi.

Toisen taseen laskennassa (liite 5) pesuveden ja kaasun virtaamat pidettiin samana, kuin ensimmäisessä taseessa, mutta pesurille tulevan etanolin pitoisuus nostettiin 8000 mg/m^3 ja erotusaste kasvatettiin 93 %:in, jolloin poistuvan etanolin pitoisuus laskettiin olevan 600 mg/m^3 .

on laskennallinen minimi uloskanavoitavalle etanolipitoisuudelle pesuveden etanolipitoisuuden ollessa 3200 mg/l. Jos pesuveden etanolipitoisuutta laimennettaisiin, on mahdollista päästä alhaisempiin päästölukemiin. CWW-vertailuasiakirjan mukaan pesurit sopivat maksimissaan 5000 mg/m³ alkoholipitoisuuksille, kun pesunesteenä käytetään vettä. Laskentaohjelma ei kuitenkaan antanut viitteitä, että 5000 mg/m³ olisi mitenkään ehdoton yläraja.

Kolmannen taseen eli suurimman mahdollisen kapasiteetin laskennan (liite 6) mukaan kolonnin pitäisi pystyä käsittelemään nykyistä suurempiakin virtausmääriä. Kaasun virtaaman ollessa 510 m³/h ja nesteen 1 l/s, on tulvimistekijä vielä hieman alakanttiin 68 %. Talteenottoprosentin nosto 98 %:iin tarkoitti pesuveden etanolipitoisuuden laskemista maksimissaan 420 mg/l. Kolonnin laskennallinen täytekappalekerroksen korkeus on edellä mainituilla suureilla 2,5 m, eli nykyisen kolonnin korkeus. Toisen taseen suureet pitäisivät siis olla ainakin teoriassa mahdollisia.

Neljännän taseen avulla pesuveden lämpötila nostettiin niin korkeaksi kuin laskennallisen toiminnan kannalta mahdollista, 22,7 °C:een (liite 7). Absorptio heikkenee, kun pesuveden lämpötilaa nostetaan. Nostamalla pesuveden lämpötilaa voidaan kuitenkin mahdollisesti säästää energiaa, jos vesi viilennetään erikseen absorptioprosessia varten. Laskennan mukaan pesuveden lämpötilaa voisi olla siis mahdollista nostaa nykyisillä prosessisuureilla, ilman, että pesurin toiminta heikkenee entisestään.

Viimeisen viidennen taseen avulla laskettiin, kuinka suuri voi pesuveden etanolipitoisuus olla, että kolonnin toiminta ei heikkene merkittävästi (liite 8). Pitoisuuden maksimiarvoksi tuli 6190 mg/l, kun talteenottoprosentti on 80 %.

8 Pohdinta ja parannusehdotukset

8.1 Täytekappalekolonnin puhdistus

Yksi opinnäyteyön tutkimuskysymyksistä oli selvittää erilaisia tapoja puhdistaa täytekappalekolonnin täytekappaleet. Nykyisen 3-linjan liuotinhölkäpesurin 41K602 täytekappaleet puhdistetaan käsityönä; pesuri avataan ja täytekappaleet kerätään saaviin ja huuhdotaan. Pesu tapahtuu noin kerran vuodessa.

Tietoperustan selvitys täytekappaleiden puhdistuksesta ei tuottanut suuria yllätyksiä. Lähtökohtaisesti täytekappalekolonnit eivät sovellu kaasuvirroille, mitkä sisältävät kiintoainehiukkasia enemmän kuin 5 g/Nm^3 . Hiukkasellisten kaasuvirtojen käsittelyyn suositellaan muun tyyppistä kolonnia. Täytekappalekolonneja on kuitenkin mahdollista käyttää, vaikka likaantumisen mahdollisuus on olemassa. Prosessiin voidaan ennen pesuria lisätä kaasusta kiintoaineita erottava laite, esimerkiksi jonkinlainen suodatin tai sykloni. Pesureille voidaan myös toteuttaa sisäinen pesukierto pesuainetta kierrättävän kiertopumpun avulla.

Kuviossa 17 on valokuva pesurin 41K601 näkölasista. Valokuvan ottohetkellä näkölasissa näyttäisi olevan jonkin verran kiintoainetta. Kiintoainetta ei kuitenkaan näy kolonnin 41K602 näkölasissa (kuvio 16). Koska pesurit ovat yhteydessä toisiinsa liuotinhölkien talteenottosäiliön kautta, voidaan olettaa, että samaa kiintoainetta voi päätyä myös pesuriin 41K602 pesuveden mukana. Jatko-tutkimukset kiintoaineen määrästä ja alkuperästä voivat antaa lisätietoa kolonnien likaantumisen syistä, ja auttaa ennaltaehkäisemään likaantumista sekä mahdollisesti tehostamaan aineensiirtoa.



Kuvio 25. Valokuva pesurin 41K601 näkölasista

Nykyiseen pesuriin 41K602 ja/tai 41K601 pesukierron toteuttaminen ei ole todennäköisesti järkevää. Kierto tarvitsisi mahdollisesti pesuriin lisää yhteitä, joiden lisääminen jälkikäteen on aina työstä ja hintavaa. Kaikissa kolonnille tulevilla ja lähtevillä linjoissa ei myöskään ole sulkuventtiileitä. Pesukierro vaatisi myös uuden kiertopumpun, mikä nostaa kustannuksia.

Jos pesurien uusinta ja/tai muut lähialueen prosessimuutokset ovat ajankohtaisia, voisi pesurin sisäisen pesukierron lisäämisen vaatimat muutokset ottaa huomioon suunnittelussa. Toistaiseksi 3-linjan pesureiden täytekappaleiden peseminen on kuitenkin järkevämpää hoitaa edelleen käsipelin. Likaantumisen syyn selvittäminen ja ratkaiseminen voi kuitenkin tuoda helpotusta pesuväliin ja jopa eliminoida pesun tarpeen lähes kokonaan.

8.2 Liuotinhönkien käsittely

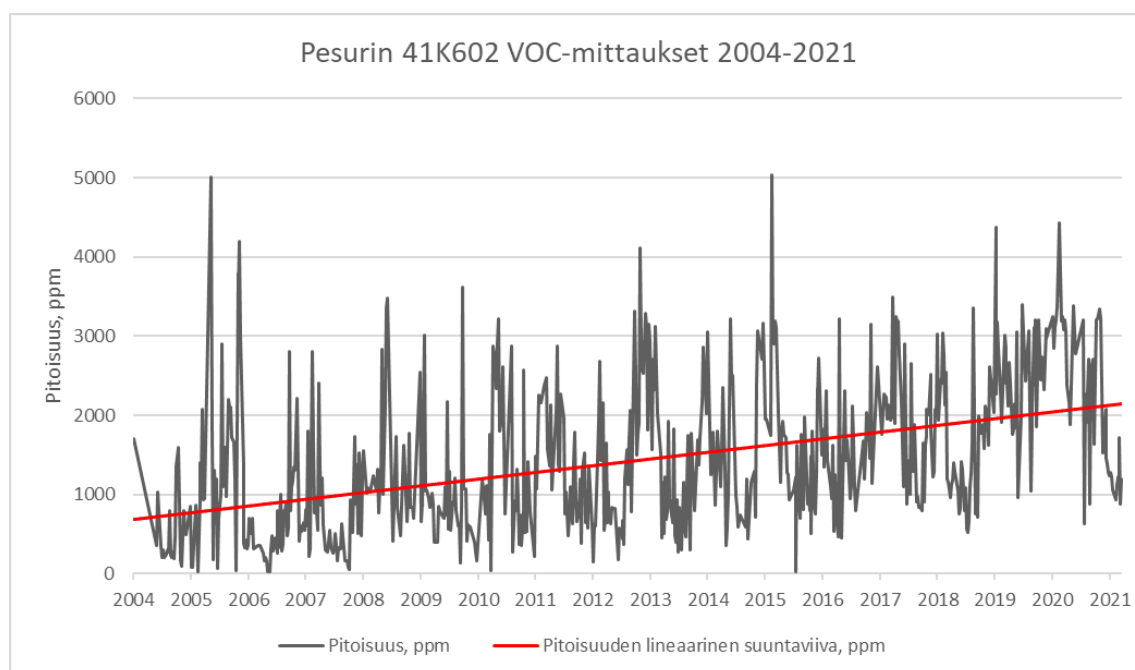
8.2.1 Pesuri 41K602

Pesurin laskennallisen määrityksen mukaan nykyisen pesurin pitäisi toimia määritetyssä normaali-tilanteessa hyvin. Laskenta ei siis suoraan antanut suurempia vinkkejä pesurin heikosta toimivuudesta. Pesurin mittapiirustuksen mukaan pesuvesi tulee kolonniin käyrällä alas suunnatusta halkaisijaltaan DN25 putken päästä. Pesurin mittapiirustus ei anna viitteitä, että pesuriin kuuluisi jokin erillinen nesteen jakaja. Jakajan puuttuminen voi vaikuttaa merkittävästi nesteen epätasaiseen jakautumiseen kolonnissa. Pesurin yläosasta puuttuu myös pisanerotin, mikä ei tosin vaikuta pesutulokseen.

Liitteen 8 kaasunestekontaktori-valintaoppaan mukaan täytekappalekolonni, missä on satunnaisesti järjestäytyneet täytekappaleet, sopii erinomaisesti absorptioon ja kapeille kolonneille. Kolonnityyppi käy myös yleensä matalapaineisiin, alle 0,13 bar:n sovelluksiin. Valintaoppaan mukaan nykyinen pesuri pitäisi tyypiltään sopia hyvin 3-linjan liuotinhöngän talteenottoprosessiin. Nykyiset täytekappaleet metalliset Hiflow:t vaikuttavat olevan kolonnin toiminnan kannalta oikean kokoiset, muotoiset ja oikeasta materiaalista. Pienentämällä Hiflow -kappaleiden kokoa saadaan kolonnin laskennallista täytekappalekerrosta pienemmäksi. Pienemmät täytekappaleet aiheuttavat kuitenkin isomman painehäviön ja vievät enemmän tilaa kolonnista, jolloin kolonni tulvii pienemmillä virtauksilla.

Pesurin heikko toiminta voi johtua useista eri syystä, tai olla monen asian summa. Kiintoaineista johtuva likaantuminen ja tukkeutuminen heikentävät pesurin aineensiirtokykyä ja nostavat pesurin painohäviöitä. Ongelmat pesunesteen syötössä eli nesteen heikko, epätasainen jakautuminen täyttekappalepedille ovat suuri yksittäinen syy pesurien aineensiirron heikkenemiseen. Jos pesuveden liuotinpitoisuus on arvioitua suurempi se voi heikentää kolonnin aineensiirtokykyä merkittävästi.

Suurin syyllinen pesurin heikkoon toimintaan saattaa kuitenkin olla pesurille saapuvan kaasun virtaaman vaihtelu ja arvioitua suurempi määrä. Kuviosta 26 voidaan nähdä, että pesurin 41K602 VOC-päästöt ovat kasvaneet vuosien varrella asettamalla mittaustuloksiin lineaarinen suuntaviiva. Syynä kasvaneisiin päästöihin on todennäköisesti lisääntynyt kaasun virtaama pesurille, mikä taas johtuu CMC:n valmistusprosessin ajotavan muutoksista. Joissain tuotelaaduissa joudutaan ajamaan enemmän ilmaa ja/tai typpeä sisään alkalisaattoreihin ja reaktoreihin. Ilman ja/tai typen määrän kasvaminen tarkoittaa, että kaasun etanolipitoisuus todennäköisesti laskee jonkin verran. Kaasun etanolipitoisuuden laskiessa pesurin talteenotto myös heikkenee, sillä pesurien talteenotto on sitä tehokkaampaa, mitä suurempi etanolipitoisuus kaasussa on (tiettyihin rajoihin asti). Myös ilman suurempi määrä kaasussa heikentää pesutulosta jonkin verran laskentaohjelman mukaan.



Kuvio 26. Pesurin 41K602 VOC-mittaukset 2004-2021 (VOC data 2021)

Jatkotoimenpiteet pesurin toiminnan selvittämiseksi

Totuus on, että pesurin 41K602 VOC-päästömittaukset ovat olleet hyvinkin korkeita viimeisten vuosien aikana, kuten kuviosta 26 voi nähdä. On siis todennäköistä, että pesuri ei toimi enää alku-peräisellä mitoitusalueellaan. Suorittamalla mittasarjoja ja määrittäksiä, ja vertaamalla niiden tuloksia tämän tutkimuksen laskentatuloksiin, voidaan selvittää, toimiiko pesuri mitoitusrajojensa ulkopuolella.

Ehdotetut jatkomittaukset ja -määrittelyt:

- Pesuveden etanolipitoisuuden mittaaminen (näytteestä).
- Pesurille tulevan kaasun virtausmittaus (vaikeaa ilman on-line mittaria).
- Pesurille tulevan kaasun liuotinpitoisuuden määrittäminen (taseiden avulla).

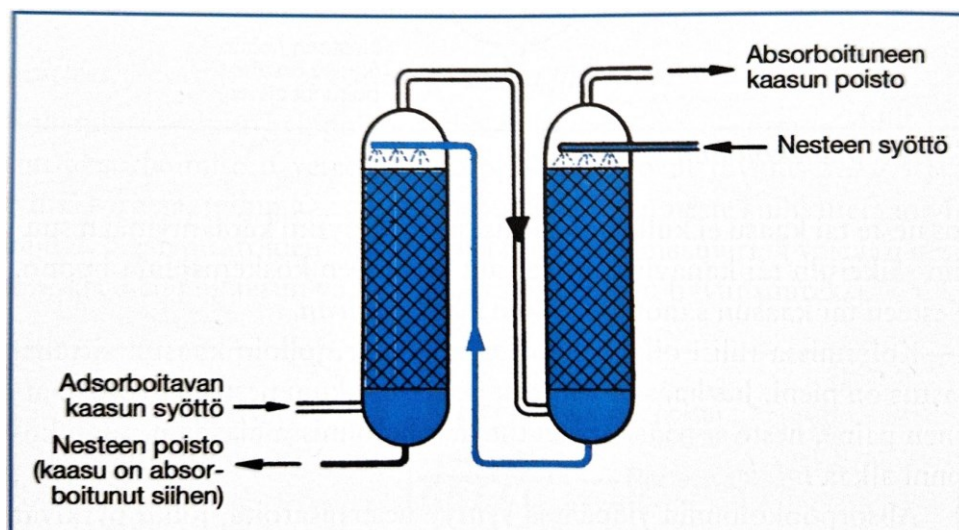
Pesurille tulevan etanolipitoisuuden määrittäminen joudutaan tekemään käytännössä laskennallisesti, jos prosessiin ei asenneta erillistä VOC-mittausta. Pitoisuus vaihtelee jatkuvasti CMC:n valmistusprosessin vaiheiden ja lauhduttimien toiminnan tehokkuuden mukaan, jolloin sen määrittäminen voi olla hyvinkin haastavaa. Jos kaasun virtaama paljastuu ajoittain olevan reippaasti yli 500 m³/h, voi pesurin kuorman jakaa asentamalla prosessiin uusi pesuri. Kaasun tilavuus on riippuvainen sen lämpötilasta, eli jos lauhduttimet jättävät hönkäkaasun lämpötilan arvioitua korkeammaksi, tulee pesurille myös suurempi virtaama kaasua puhdistettavaksi.

Jos kaasun liuotinpitoisuus paljastuu arvioitua suuremmaksi, voi yksi syy löytyä myös lauhduttimien toiminnasta. Muuttuneet prosessiolosuhteet vaikuttavat samalla tavalla niin pesuriin, mutta myös lauhduttimiin. Vaikka absorptio paranee, kun etanolin pitoisuus kaasussa kasvaa, vaativat suuret pitoisuudet silti tehokkaampaa talteenottoa, eli käytännössä korkeampaa täytekappalekerrosta. Jos kaasun liuotin- eli alkoholipitoisuus on kuitenkin yli 5000 mg/m³, ei pelkkä pesuvesi riitä tarpeeksi tehokkaaseen talteenottoon vertailudokumentin mukaan, vaan veteen pitäisi lisätä jostain talteenottoa tehostavaa ainetta, mikä tuo taas mukanaan omat haasteensa ja kustannuksensa. Pitoisuutta saadaan laskettua myös, jos lauhduttimien toimintaa on mahdollista tehostaa. Pesurin pesutulosta heikentää myös se, jos liuotinpitoisuus kaasussa on liian alhainen.

Jos pesuveden etanolipitoisuus paljastuu korkeaksi, parantaa kempuveden virtaaman lisääminen pesutulosta, mutta toisaalta nostaa kustannuksia. Kempuveden määrän lisääminen vaikuttaa myös liuottimen loppukäsittelyyn. Pesurin toimintaa on myös mahdollista tehostaa laskemalla pesuveden lämpötilaa. Toisaalta pesuveden nykyinen lämpötila 10 °C on jo suhteellisen alhainen, eikä välttämättä olisi resurssitehokasta laskea sitä vielä alemmas.

Pesurit sarjassa

Jos nykyinen pesurin täytekappalekerros todetaan liian lyhyeksi haluttavan talteenoton aikaansaamiseksi, yksi mahdollisuus on tehostaa pesutulosta liittämällä toinen pesuri sarjaan vanhan pesurin kanssa. Kuviossa 27 on esitetty pesurit sarjassa, jolloin puhdistettava kaasu syötetään ensimmäiseen pesuriin, ja pesuneste toiseen, mistä virrat kulkevat ristiin kahden pesurin läpi. Usein pesurit sarjassa toteutetaan kuitenkin vain korkeussuunnan tilanpuutteen takia. Investointikustannukset ovat pienemmät, kun hankitaan pienempi pesuri isomman sijaan, eikä vanhaa pesuria tarvitse lähteä purkamaan. Säästöpotentiaali jää todennäköisesti kuitenkin pieneksi, sillä kaksi pesuria tarvitsee enemmän aikaa kunnossapidolta, jos molemmat kolonnit ja niiden täytekappaleet pitää edelleen puhdistaa käsipelillä. Myös kaasun painehäviö voi kasvaa merkittäväksi.



Kuvio 27. Pesurit sarjassa (Pihkala 2011, 138)

8.2.2 Kryolauhdutus

Yksi tutkimuskysymyksistä oli tutustua kryolauhdutukseen ja selvittää sen potentiaalia 3-linjalla. Tehtaan VOC-talteenotto-prosessin vaihtaminen lauhdutus–absorptio prosessista kryolauhdutukseen tulisi olemaa mittava prosessimuutos. Taulukossa 2 on esitetty kryolauhdutuksen edut ja haitat verrattuna 3-linjan nykyiseen talteenotto-prosessiin.

Taulukko 2. Kryolauhdutussysteemin edut ja haitat

Edut	Haitat
<ul style="list-style-type: none"> • Hyvä jälkiasennettavuus • Suhteellisen vähän tilaa vievä systeemi, pystytään mahduttamaan olemassa oleviin laitoksiin. • Mahdollisuus päästä eroon pesureista -> ei tarvetta pesuvesien regeneroinnille ja täytekappaleiden pesuille • Höyrystyneen typen hyötykäyttö suojakaasuna • Mahdollisuus hyödyntää olemassa olevia lauhdutin- ja typpijärjestelmiä jollain asteella • VOC-talteenoton tehostaminen -> tehdas on valmis tulevaisuuden tiukentuviin päästörajoihin 	<ul style="list-style-type: none"> • Investointikustannukset per systeemi >400k € • Kryolauhduttimien mahdollinen jäätyminen ja lisääntyvä kunnossapidon tarve • Typen käyttämiseen liittyvät turvallisuusriskit • Nestetyypen säiliöautokuljetukset -> nykyisen typpilaitoksen jääminen turhaksi

Suurena kysymysmerkkinä olisi myös kryolauhdutusjärjestelmän koko ja kapasiteetti; nykyisessä 3-linjan prosessissa on 4 reaktoria ja alkalisäätoria, ja jokaiselle reaktorille ja alkalisäätorille on oma jäähdytysvettä käyttävä lauhdutin. Erilaisten lauhdutinjärjestelmien etuihin kuitenkin lukeutuu se,

että niiden materiaalitaseet voidaan laskea suhteellisen tarkasti, mikä helpottaa lauhdutinjärjestelmien vertailtavuutta keskenään. Koska kryolauhduttimet pystyvät tehokkaihin talteenottomääriin kaasuvirroista, joiden virtaus on alle $250 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ja VOC-pitoisuus alle 100 g/Nm^3 , linjalla tarvittavien lauhduttimien määrää voitaisiin todennäköisesti vähentää. Parasta käyttökelpoista tekniikkaa on yhdistää samantyyllisiä jätekaasuvirtoja, jolloin niiden käsittely on tehokkaampaa, olisi järkevää yhdistää lauhduttimille suuntaavia virtauksia ja vähentää lauhduttimien määrää.

Ongelmaksi voi muodostua myös nestetyypen valmistus ja/tai kuljetus. Nykyinen, tehtaan läheisyydessä sijaitseva Polargasin typpilaitos tuottaa vain typpikaasua. Typpikaasun muuttaminen nesteeksi vaatii korkeita paineita ja matalia lämpötiloja, eli paljon energiaa, eikä sitä todennäköisesti voitaisi valmistaa enää tehtaan läheisyydessä. Nestetyypen käyttöön ja kuljetukseen liittyvät turvallisuusriskit pitää myös muistaa kartoittaa huolellisesti.

Selkeimmät edut ja haitat huomioiden voidaan arvioida, että ainakaan toistaiseksi 3-linjan VOC-talteenoton muuttaminen kryolauhdutukseksi ei välttämättä ole kannattavaa. Suurehkot investointikustannukset eivät välttämättä toisi merkittävän suurta VOC-talteenoton parannusta nykyisestä. Nestetyypikuljetukset nostavat kustannuksia entisestään ja aiheuttavat päästöjä ja turvallisuusriskejä varsinkin lastauspaikoilla. Kryolauhdutusta ei kuitenkaan kannata täysin unohtaa, sillä se voi olla tulevaisuudessa merkittävässä roolissa VOC-aineiden tehokkaassa talteenotossa ja päästörajoituksien saavuttamisessa. Jos 3-linjan kapasiteettia tulevaisuudessa kasvatetaan, kannattaa kryolauhduttimet ehdottomasti ottaa mukaan suunnittelupöydälle.

8.3 Hajapäästöjen käsittely

3-linjalla ja koko tehtaalla olisi kannattavaa pohtia LDAR-ohjelman käyttöönottoa. Ohjelman käyttöönottoa puoltaa uusi, pian julkaistava WGC BAT-päätelmä ja sitä myötä tuleva uusi BAT-päätelmä ja uusi BAT-AEL arvo VOC-hajapäästöille. Euroopan unionin linjaus on selvä, päästöjä ilmaan on vähennettävä, mistä hajapäästöt muodostavat suuren osan. Hajapäästöjen vähentäminen ja parempi hallitseminen parantaa myös prosessiturvallisuutta, sillä tehtaan hengitysilmaan vuotaa vähemmän terveydelle haitallisia VOC-aineita. Tulevan WGC BAT-päätelmän myötä tulee myös ajankohtaiseksi määrittää laskennallisesti tehtaan VOC-hajapäästöjen määrä, jotta voidaan tutkia, pystytäänkö tuleva VOC-hajapäästöjen BAT-AEL arvo alittamaan.

Myös tehtaan tulevissa liuottimeen ja liuotinhönkiin liittyvissä prosessimuutoksissa kannattaa ottaa huomioon paras käyttökelpoinen tekniikka VOC-hajapäästöjen vähentämisessä. Laitteiden vähentäminen ja putkireittien yksinkertaistaminen vähentää vuotoja ja niiden syntymistä. Hitsattavat venttiilit ovat laipallisia venttiileitä tiiviimmät. Kaikkea ei kuitenkaan voi aina hitsata moninaisien syiden takia, jolloin laippaliitosten tiivistevalinnat ja pulttiliitosten oikea kiristys ovat tärkeitä. Venttiilien hankinnassa kannattaa myös kiinnittää huomiota oikeaan venttiilin pesän tiivistettyypin valintaan.

9 Loppupohdinta

Opinnäytetyön tekemisessä oli useita haasteita ja työn aikataulu venyi reippaasti suunnitellusta. Työn kehitysoosan muuttuminen kesken opinnäytetyöprojektin muutti työn rakennetta, ja korona-aika toi tutkimukseen omat vaikeutensa ja hidasteensa. Loppujen lopuksi opinnäytetyöstä tuli kuitenkin kattava tutkimus VOC-aineiden talteenottoprosesseista, -laitteistoista ja niiden toiminnasta. Jos uuden pesurin hankkiminen 3-linjalle todetaan ajankohtaiseksi, saa opinnäytetyöstä hyvää tietoa pesurin prosessisuureista ja muista pesurin määrittelyssä huomioon otettavista asioista. Opinnäytetyö oli myös tekijälleen todella opettavainen kokemus. Opinnäytetyöprojektin aikana opituista tiedoista ja taidoista tulee varmasti olemaan paljon hyötyä työelämässä.

Tutkimuksen luotettavuuteen panostettiin käyttämällä useita laadullisen tutkimuksen luotettavuuden arviointimenetelmiä. Aineiston keruussa ja analyysissä käytettiin aineistotriangulaatiota ja panostettiin aineiston monipuolisuuteen ja laadukkuuteen. Luotettavuutta kasvatti asiantuntijan kanssa tutkimuksen läpikäyminen ja tulkintojen vahvistaminen. Tutkimuksen teoreettisesta viitekehyksestä tuli monipuolinen ja runsas, eikä se sisältänyt epäolennaista tietoa tutkimuksen kannalta. Tietoperusta antoi hyvät taustat ja säännöt kehittämisosion tuloksille ja johtopäätöksille. Pesurin laskennassa käytettyjä prosessiarvoja ei päästy kuitenkaan missään vaiheessa mittaamaan tutkimusta varten, joten tutkimus jouduttiin tekemään täysin sekundääriaineiston prosessiarvojen perusteella, mikä heikentää tutkimuksen luotettavuutta. Vaikka liuotinhönkäpesurin prosessiarvot olisi arvioitu väärin, se ei muuta itse laskennan luotettavuutta ja sitä, että todellisia, mitattuja prosessiarvoja voi verrata laskennassa käytettyihin prosessiarvoihin, ja vetää arvojen eroavaisuuksista johtopäätöksiä. Tutkimuksen reliabiliteetti voidaan kaiken kaikkiaan arvioida olevan kohtalaisen hyvä.

Tutkimuskysymykset valittiin oikein, sillä ne vastasivat toimeksiantajan tarpeita ja tavoitteita tutkimukselle. Tutkimuksesta tuli hyvin monipuolinen, mutta suhteellisen pintapuolinen katsaus VOC-aineiden talteenoton maailmaan, mikä kuitenkin oli tutkimukselle hyväksyttävää, sillä sen tarkoitus oli toimia hyvinkin laajan aihealueen selvitystyönä. Täytekappalepesureihin liittyvä tutkimustyö toteutettiin kuitenkin mahdollisimman yksityiskohtaisesti ja tarkasti toimeksiantajan toiveiden mukaisesti. Tutkimuksessa ei kuitenkaan saatu selkeää vastausta siihen, miksi pesuri 42K602 toimii heikosti. Tutkimus antaa kuitenkin jatkoehdotuksia lisämittausten ja -määritysten tekoon, joita vertaamalla tutkimuksen laskelmiin voidaan selvittää pesurin todellinen toimintapiste. Työssä otettiin laajasti kantaa ajankohtaisiin asioihin ympäristön suojelun ja prosessitehokkuuden näkökulmista, mutta myös prosessiturvallisuuden, resurssitehokkuuden ja kustannusten näkökulmaa ei unohdettu. Voidaan arvioida, että tutkimuksen validiteetti on hyvä. Tutkimuksellisen kehittämistyön tavoite saavutettiin, sillä toimeksiantajan ongelmista muodostetut tutkimuskysymykset saatiin selvitettyä. Toimeksiantaja sai arvokasta tietoa liuotinhönkien talteenottoon liittyvistä parhaista käyttökelpoisista tekniikoista, päästörajoista ja ongelmallisen pesurin vianmäärittämisestä. Toimeksiantaja oli työhön hyvin tyytyväinen ja antoi kiitosta erityisesti tietoperustan laajuudesta ja monipuolisuudesta.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden poistaminen kaasuvirroista ei ole aivan yksinkertaista. Euroopan unionin BAT-vertailudokumentit antoivat kuitenkin selkeän kuvan, minkälaisilla eri tekniikoilla VOC-aineita sisältäviä kaasuvirtoja voi käsitellä. Vertailudokumentit antavat myös selkeän suunnan, minne talteenottoprosesseja kannattaa viedä ja millaisiin päästölukemiin erilaisilla talteenotto-tekniikoilla tulee päästä. VOC-aineita sisältävien liuotinhönkien talteenoton toteutus on jatkuva prosessi. Paras käyttökelpoinen tekniikka ja siihen liittyvät päästötasot päivittyvät jatkuvasti, jolloin niin viranomaisen, kuin tuotantolaitoksen pitää olla aktiivinen toimija. Erilaiset tekniikat soveltuvat vaihtelevasti erilaisten prosessien ja jätekaasuvirtojen tarpeisiin, joten on tärkeä valita käsittelytekniikka, mikä on parasta käyttökelpoista tekniikkaa ja räätälöity juuri tiettyyn prosessiin tietyille prosessisuureille. VOC-hölkäkaasujen puhdistuslaitteiden ja varsinkin hönkäpesurien puhdistustulos saattaa vaihdella suurestikin, jos siihen kytköksissä oleva prosessi muuttuu tai sen ajotapaa muutetaan, kuten Nouryonin Äänekosken tehtaalla on huomattu.

Lähteet

2010/75/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi teollisuuden päästöistä (yhtenäistetty ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen). Viitattu 5.9.2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075&qid=1675614928420>

2016/902. Komission täytäntöönpanopäätös Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2010/75/EU mukaisista kemian alan jätevesien ja jätekaasujen yhdenmukaisten käsittely- ja hallintajärjestelmien parasta käytettävissä olevaa tekniikkaa (BAT) koskevista päätelmistä. Viitattu 5.9.2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A32016D0902>

Alkalointi 3-linjalla. 1997. Nouryonin virtauskaavio. Päivitetty 2019.

Alkalointi ja eetteröinti 3-linjalla. 2020. Nouryonin ohje.

Alley. 1998. Kuva täytekappalekolonnin rakenteesta. Uudelleen julkaistu McGraw-Hill, Inc.:n luvalla. Viitattu 7.7.2022. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/packed-tower>

Alzner, G., Schrader, U. 1988. Process for the cleaning of a packed column. Patentti US4952247A. Viitattu 3.3.2022. <https://patents.google.com/patent/US4952247A/en>

Argon or Nitrogen. 2016. Parkerin julkaisu. Viitattu 5.6.2022. <https://blog.parker.com/site/usa/en-US/details-home-page/argon-or-nitrogen-which-is-best-for-your-application-us>

Basics of shell & tube heat exchangers. 2015. Arveng Training & Engineering:n julkaisu. Viitattu 10.5.2021. <https://arvengtraining.com/en/basics-of-shell-tube-heat-exchangers/>

Capocelli, M. N.d. Particulate Emission & Removal Technologies. Oil&Gas portaalin tietosivu. Viitattu 5.5.2022. <http://www.oil-gasportal.com/particulate-emission-removal-technologies/>

Condenser. N.d. Encyclopedia Britannica:n tietosivu. Viitattu 9.5.2021. <https://www.britannica.com/technology/condenser-cooling-device>

CP Kelco on myyty Nouryonille. 2020. Äänekosken kaupunkisanomien julkaisu. Viitattu 10.1.2022. <https://aksa.fi/cp-kelco-on-myyty-noryonille/>

Cryo-Condap® technology for VOC recovery. 2015. Air products:n tuote-esittely. Viitattu 5.6.2022. <https://www.airproducts.co.uk/-/media/airproducts/files/en/331/331-15-003-uk-cryo-condap-voc-recovery.pdf>

CWW Bref. 2016. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector. EU:n yhtenäisen tutkimuskeskuksen raportti. Viitattu 29.2.2022. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CWW_Bref_2016_published.pdf

E466. N.d. Open Food Facts:n tietosivu. Viitattu 20.1.2022 <https://fi.openfoodfacts.org/additive/fi:e466-karboksimetyyliselluloosa>

Elomatic lyhyesti. N.d. Elomatic Oy:n tietosivu. Viitattu 5.1.2023. <https://www.elomatic.com/fi/yri-tys/elomatic-lyhyesti.html>

EPAs List of VOCs in order of toxicity. 2020. Define Instruments:n julkaisu. Viitattu 3.4.2021. <https://defineinstruments.com/blog/epas-list-of-volatile-organic-compounds-in-order-of-toxicity/>

Erityistä huolta aiheuttavat aineet. N.d. Tukesin julkaisu. Viitattu 5.3.2022. <https://tukes.fi/kemi-kaalit/reach/luvanvaraiset-aineet/erityista-huolta-aiheuttavat-aineet>

Etanoli. 2022. Työterveyslaitoksen OVA-ohje. Viitattu 17.6.2022. <https://www.ttl.fi/ova/etanoli>

Ethanol. N.d. Ethanol-Allianz:n tietosivu. Viitattu 17.6.2022. <https://ethanol-allianz.com/en/faq-2/>

FIDICin eettiset säännöt. N.d. FIDICin julkaisu. Viitattu 10.1.2023. <https://skol.teknologiateolli-suus.fi/fi/fidicin-eettiset-saannot>

Gay-Lussacin laki. N.d. Opetus tv:n tietosivu. Viitattu 5.1.2023. <https://opetus.tv/lukio-ops2016/fy-siikka/fy2/gay-lussacin-laki/>

Gorak, A., Olujic, Z. 2014. Distillation: Equipment and Processes. Elsevier Science & Technology. Viitattu 1.6.2021. <https://janet.finna.fi>, ProQuest Ebook Central.

Henryn lain esimerkkiongelman. 2020. Greelane:n julkaisu. Viitattu 20.10.2022. <https://www.greelane.com/fi/science-tech-matematiikka/tiede/henrys-law-example-problem-609500>

Hiilivetyjen päästömittaukset Äänekosken tehtaalla. 2017. Ramboll Oy:n mittausraportti 20.12.2017.

How Photocatalytic Oxidation Works. N.d. UV-Air-Purifiers:n tietosivu. Viitattu 20.5.2022. <https://www.uv-air-purifiers.info/howpcoworks.htm>

Hyvä tieteellinen käytäntö. 2023. Tutkimuseettisen neuvottelukunnan julkaisu. Viitattu 10.1.2023. <https://tenk.fi/fi/tiedevilppi/hyva-tieteellinen-kaytanto-htk>

IED key feature. N.d. Euroopan Unionin tiedote IE-direktiivistä. Viitattu 5.5.2022. https://ec.europa.eu/environment/legal/law/12/pdf/2_Grimeaud_BAT.pdf

ISY-2004-Y-261. 2006. CP Kelco Oy:n karboksimeetyliselluloosatehtaan ja Oy Polargas Ab:n typpilaitoksen ympäristölupa, Äänekoski. Viitattu 12.2.2022. <https://www.ymparisto.fi/download/isy2004y261paatospdf/%7B87EEDC1E-DC77-4918-975A-1D5572F81387%7D/83438>

Junnila, J. 2015. Paras käyttökelpoinen tekniikka (BAT) ympäristöluvituksessa. Ympäristöministeriön esitelmä. <https://docplayer.fi/35218018-Paras-kayttokelpoinen-tekniikka-bat-ymparistoluvituksessa-jaana-junnila-hallitussihteeri-ymparistoministerio.html>

Jurvelin, J. N.d. Jyväskylän ammattikorkeakoulun tutkimus ja kehittäminen -opintojakson opetusmateriaali kevät 2020.

Jyväskylän ammattikorkeakoulun eettiset periaatteet. 2018. Viitattu 10.1.2023.
<https://www.jamk.fi/fi/file/eettiset-periaatteet>

Kaasujen liukenemisen laskennallinen määrittely. N.d. Tekno-innovaation tietosivu. Viitattu 20.10.2022. <https://ti.fi/fi-fi/hapeton-taytto/teoriaa/20/>

Kananen, J. 2019. Opinnäytetyön ja pro gradun pikaopas. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 262. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Karhu, R. 2022. Projektipäällikkö. Nouryon Chemicals Finland Oy. Haastattelu 15.3.2022.

Kiss, A. 2013. Advanced Distillation Technologies: Design, Control and Applications. John Wiley & Sons, Inc. Viitattu 1.6.2021. <https://janet.finna.fi>, ProQuest Ebook Central.

Kolmetz, K., Sloley, A., Zygula, T., Ng, W., Faessler, P. 2004. Design Guidelines for Distillation Columns in Fouling Service. Viitattu 7.3.2021. https://www.academia.edu/30523717/Design_Guidelines_for_Distillation_Columns_in_Fouling_Service

Liquid distributors. N.d. MACH Engineering:n tietosivu. Viitattu 20.10.2022 <https://www.machengineering.com/liquid-distributors/>

Normal cubic meters (Nm³) and cubic meters (m³). N.d. Mecafluxin tietosivu. Viitattu 10.11.2021. <https://www.mecaflux.com/en/Normaux%20metres%20cubes.htm>

Nummela, M. 2022. Erityisasiantuntija. Caligo Industria Oy. Haastattelu 20.5.2022.

Packed-bed absorption column. N.d. PZGO LCC:n tietosivu. Viitattu 20.5.2021 <https://en.gas-cleaning.ru/product/packed-bed-absorption-columns>

Packing Height: The Method of Transfer Units. N.d. Separation Processes:n tietosivu. Viitattu 20.10.2022. http://www.separationprocesses.com/Absorption/GA_Ch04c.htm

Packing Hydraulics Calculations. N.d. Separation Technologies: n tietosivu. Viitattu 20.10.2022. <http://seperationtechnology.com/packing-hydraulics/>

Pappas, S. 2018. Oklahoma Turns to Nitrogen Gas for Executions. Live Science:n julkaisu. Viitattu 20.5.2022 <https://www.livescience.com/62037-oklahoma-executions-nitrogen.html>

Paras käyttökelpoinen tekniikka BAT. N.d. Ympäristöhallinnon julkaisu. Viitattu 20.6.2022. <https://www.ymparisto.fi/bat>

Pesurin 41K602 mittapiirustus. 1999. Nouryonin AutoCAD-piirustus.

Pihkala, J. 2011. Prosessitekniikka. 5. painos. Turenki: Hansaprint Oy.

Polypropylene. N.d. British Plastics Federation:in tietosivu. <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/polymers/PP.aspx>

Radebaugh, R. 2002. Cryogenic Technology Resources. National institute of standards and technology:n julkaisu. Viitattu 5.6.2022. <https://trc.nist.gov/cryogenics/aboutCryogenics.html>

Reaktioliuottimen erotus. 2011. Nouryonin ohje.

Ricci, F., Theodore, L. 2010. Mass Transfer Operations for the Practicing Engineer. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. Viitattu 20.10.2022. https://www.academia.edu/40242895/Mass_Transfer_Operations_for_the_Practicing_Engineer

Riistama, K., Laitinen J., Vuori, M. 2005. Suomen kemianteollisuus. Tampere: Tammer-Paino Oy.

Rotor-concentrators with zeolites. N.d. Condorchem Encitech:n tietosivu. Viitattu 20.5.2022. <https://condorchem.com/en/rotor-concentrators-with-zeolites/>

Savela, S. 2013. Valkoinen ihmeaine tepsii kotona ja kaivoksella. YLE:n julkaisu. Viitattu 20.1.2022. <https://yle.fi/a/3-6899067>

Schwab, U. 2020. Ruokien lisäaineet (E-koodit). Artikkeliterveyskirjaston sivuilla. Viitattu 20.1.2022. <https://www.terveyskirjasto.fi/dlk01152>

Slurry. N.d. Cambridgen sanakirja. Viitattu 10.3.2022. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/slurry>

Strigle, R. 1994. Packed Tower Design and Applications. 2. painos. Houston: Gulf Publishing Company. Viitattu 20.10.2022 <https://pdfslide.net/documents/packed-tower-design-and-applications-r-f-strigle-1994.html>

Säädöstyypit. N.d. Euroopan unionin julkaisu. Viitattu 4.4.2022. https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_fi

Turvallisuustiedote. 2019. Keski-Suomen pelastuslaitoksen tiedote suuronnettomuuden varalta Äänekosken seudun asukkaille. Viitattu 10.1.2022. https://www.keskisuomenpelastuslaitos.fi/sites/default/files/atoms/files/kspela_aanekosken_tehdasintegraatin_turvallisuustiedote_2019.pdf

Tutkimuksellinen kehitystyö. N.d. Jyväskylän ammattikorkeakoulun opinnäytetyön ohjeet. Viitattu 20.12.2022. <https://oppimateriaalit.jamk.fi/opinnaytetyo/toteutustavat-ja-rakenne/tutkimuksellisen-kehittamistyö/>

Vastuullinen ja kestävä Jamk. N.d. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisu. Viitattu 10.1.2023. <https://www.jamk.fi/fi/jamk/vastuullinen-ja-kestava-jamk>

VOC data. 2021. Nouryonin VOC-mittausdatataulukko.

VOC Recovery system. N.d. Nouryonin tiedote.

Voimalaitoksen energia-analyysi. 2015. Motivan julkaisu. Viitattu 20.7.2021. https://www.motiva.fi/files/10873/Motiva_150807_KAT-voimalaitosanalyysi_osat12.pdf

Water density. 2020. Usgs.gov:n tietosivu. Viitattu 7.1.2023. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/water-density>

WGC Bref. 2022. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Gas Management and Treatment Systems in the Chemical Sector. EU:n yhtenäisen tutkimuskeskuksen raportin viimeinen luonnos. Viitattu 30.5.2022. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2022-03/WGC_Final_Draft_09Mar2022-B-W-Watermark.pdf

Who's who in the Industrial Emissions Directive. N.d. Euroopan unionin julkaisu. Viitattu 20.6.2022. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/about/who_is_who

Liitteet

Liite 1. Yleiskatsaus poistokaasujen käsittelytekniikoista (CWW Bref 334–335)

Working principle	Technique	Removed pollutants											Section in this document
		Dry dust	Wet dust	Droplets/aerosols	VOC	SO ₂	H ₂ S	NO _x	NH ₃	HCl/HF	Heavy metals	Dioxins/furans	
Gravitational separation	Settling chamber/gravitational separator	◆	◆	+									3.5.1.4.2
	Cyclones	◆	◆										3.5.1.4.3
Dust scrubbing	Wet dust scrubber	◆	◆		+	+	+		+	+			3.5.1.4.5
	Spray tower	◆	◆		+	+	+		+	+			3.5.1.4.5
	Venturi scrubber	◆	◆		+	+	+		+	+			3.5.1.4.5
Filtration	Dry ESP	◆	◆										3.5.1.4.4
	Wet ESP	◆	◆										3.5.1.4.4
	Fabric filter	◆											3.5.1.3.5
	Ceramic and metal filter	◆				+		+		+			3.5.1.4.7
	Catalytic filtration	◆			+					+		◆	3.5.1.4.8
	Two-stage dust filter	◆											3.5.1.4.9
	Absolute filter (HEPA)	◆									◆		3.5.1.4.10
	High-efficiency air filter (HEAF)			◆									3.5.1.4.11
	Mist filter		◆	◆									3.5.1.4.12
Condensation	Condenser				◆				◆				3.5.1.2.2
	Cryogenic condensation				◆								3.5.1.2.2
Adsorption	Adsorption (general)				◆							◆	3.5.1.2.3
	Adsorption (active coal)				◆		◆				◆	◆	3.5.1.2.3
	Adsorption (zeolites)				◆				◆				3.5.1.2.3
	Adsorption (polymeric)				◆								3.5.1.2.3
	Dry sorbent injection					◆				+			3.5.1.5.2
	Semi-dry (or semi-wet) sorbent injection					◆				+			3.5.1.5.2
	Wet sorbent injection					◆				+			3.5.1.5.2
Absorption	Wet gas scrubber	+	+		◆	◆			◆	◆			3.5.1.2.4
	Acid gas scrubber	+	+		◆				◆				3.5.1.2.4
	Alkaline gas scrubber	+	+		◆	◆	◆			◆			3.5.1.2.4
Bioprocesses	Biofiltration				◆		+		◆				3.5.1.3.1
	Bioscrubbing				◆		+		◆				3.5.1.3.2

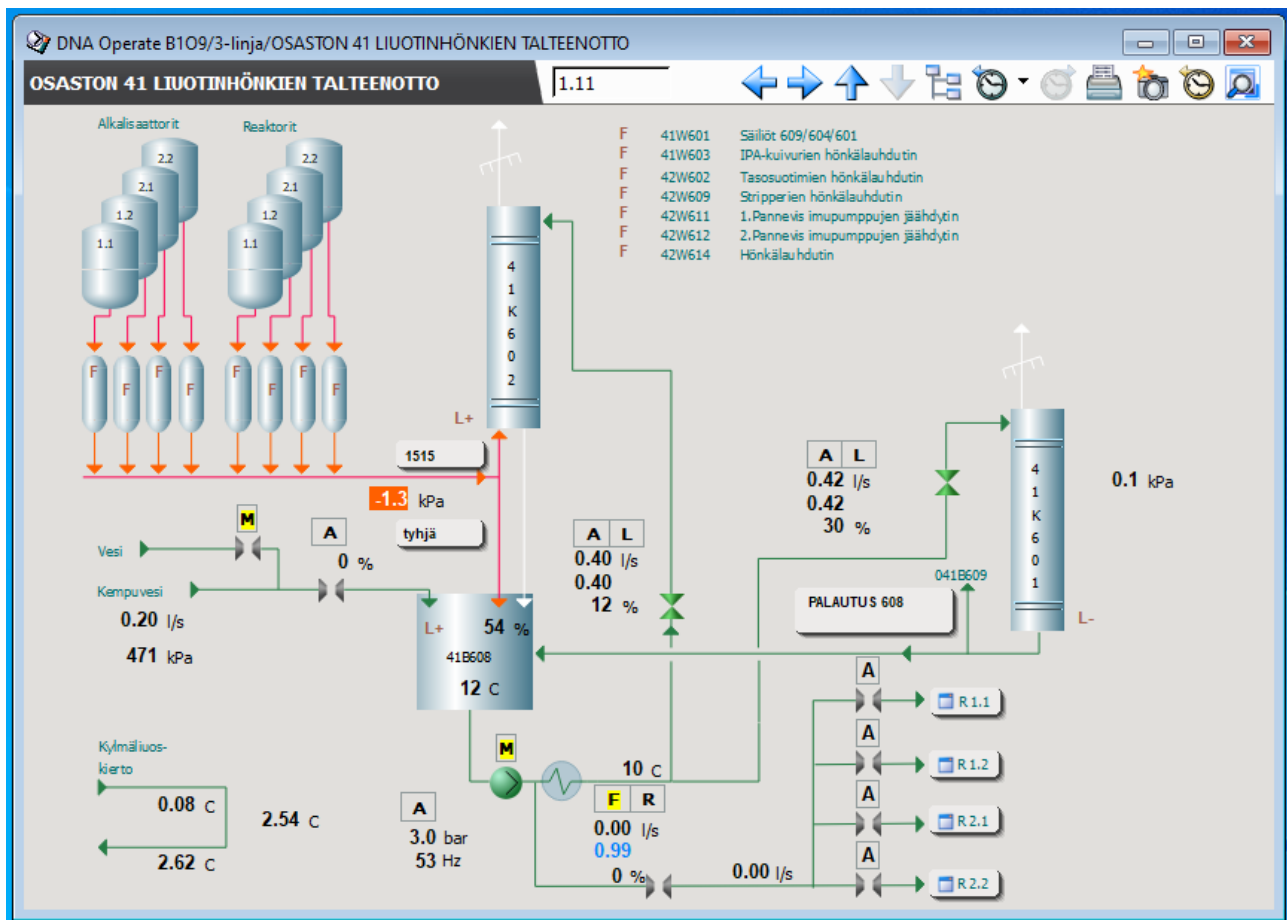
Working principle	Technique	Removed pollutants											Section in this document
		Dry dust	Wet dust	Droplets/aerosols	VOC	SO ₂	H ₂ S	NO _x	NH ₃	HCl/HF	Heavy metals	Dioxins/furans	
	Biotrickling				◆		+		◆				3.5.1.3.3
	Moving-bed trickling filter				◆		+						3.5.1.3.4
Thermal oxidation	Thermal oxidiser				◆								3.5.1.3.5
	Catalytic oxidiser				◆								3.5.1.3.6
	Flaring				◆								3.5.1.6
Cold oxidation	Ionisation				◆								3.5.1.3.7
	Photo/UV oxidation				◆		◆		◆				3.5.1.3.8
Chemical reduction	Selective non-catalytic reduction (SNCR)							◆					3.5.1.5.3
	Selective catalytic reduction (SCR)							◆					3.5.1.5.3
	Non-selective catalytic reduction (NSCR)				+			◆					3.5.1.5.4
Other techniques	Membrane separation				◆								3.5.1.2.1
	Recovery of NO _x from waste gas							◆					3.5.1.5.5

NB: ◆ = the primary goal of the technique is the removal of (a) specific pollutant(s). + = the primary goal of the technique is not the removal of specific pollutants, but these pollutants are also, in some cases partially, removed using the technique.


Liite 2. LDAR ohjelmaan kuuluvat askeleet (WGC Bref 2022, 229–230)

1. VOC-hajapäästöjen mahdollisten pistelähteiden listaus ja hajapäästöjen mittaus pistelähteistä
2. Kriteereiden määrittely:
 - laitteiden vuotoraja, eli valitaan kriteeri erilaisilla menetelmillä, milloin laite vuotaa liikaa
 - laitteiden huoltokynnys, eli mikä tapahtuma (esim. vuotorajan ylitys) aiheuttaa laitteelle huolto- ja korjaustoimenpiteitä
3. Huolto- ja korjaustoimenpiteiden suorittaminen heti tarpeen vaatiessa
 - päästölähteiden huolto- ja korjaustoimenpiteiden järjestäminen tärkeysjärjestykseen laitteen päästöjen vaarallisuuden tai suuren määrän mukaan
4. Tietokannan perustaminen ja ylläpitäminen VOC-hajapäästölähteille, sisältäen:
 - laitteiden suunnittelutiedot
 - laitteiden huoltotiedot
 - hajapäästömittausten tulokset
 - ongelmalaitteet, mitä ei voitu huoltaa/vaihtaa
5. LDAR ohjelman arvioiminen ja päivittäminen
 - laitteiden vuotorajan ja huoltokynnyksen muuttaminen
 - seurattavien laitteiden tärkeysjärjestyksen uudelleenarviointi

Liite 3. 3-linjan liuotinhölkien talteenoton valvomokuva



Liite 4. Taseen 1 laskentaraaportti

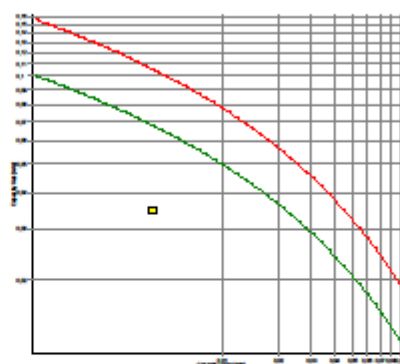
 Design Software RAPSODY for packed columns RVT Process Equipment GmbH, D-96347 Steinwiesen	VOC-järjestelmän kehittämien S. Laakkonen Pesurin 41K802 tase 1		
	21/03/2023	2.20	Tase 1

Flow Rates

	Liquid water	Gas nitrogen	Operating Temperature 10 C
Mole Weight	18 kg/kmol	28 kg/kmol	Operating Pressure 1.013 bar
Density	1E3 kg/m³	1,2 kg/m³	
Viscosity	1,33 cP	0,0171 cP	
Surface Tension	0,0743 N/m		
Vapor Pressure	1,25E3 Pa		
Mole Fraction IN	0,00125	0,00253	
Mole Fraction OUT	0,00162	0,000506	
Concentration IN	3,2E3 g/m³	5 g/m³	
Concentration OUT	4,15E3 g/m³	1 g/m³	
Diffusion Coefficient	9,36E-6 cm²/s	0,122 cm²/s	
Mass transfer coefficient	7,4E-5 m/s	2,4E-2 m/s	
Mole flow rate	80000 mol/h	14700 mol/h	
Mass flow rate	1440 kg/h	411,6 kg/h	
Volume flow rate	1,44 m³/h	343 m³/h	

Fluiddynamik


Random Packing	Hiflow metal 38-5
Surface Area	145 m²/m³
Void Fraction	98,0%
Column Diameter	348 mm
Flooding Factor	34 %
F-Factor	1,1 Pa ^{0.5}
Liquid Load	15 m³/m²/h
Dry Pressure Drop	0,7 mbar/m
Liquid Holdup	4,1 %
Operating Pressure Drop	1,2 mbar/m
Calculation model	Engel/Stichlmair

**Stoffübergang**

Transfer Component	ethanol
Mole Weight	46,1 kg/kmol
Henry Coefficient	0,209 bar
Wetted surface area	79 m²/m³
Number of transfer units (NTU)	2,3
Height of transfer units (HTU)	0,55 m
Calculated height	1,2 m
Packed height (selected)	2,5 m
Calculation model	Onda

Number of warnings 0

Liite 5. Taseen 2 laskentaraaportti

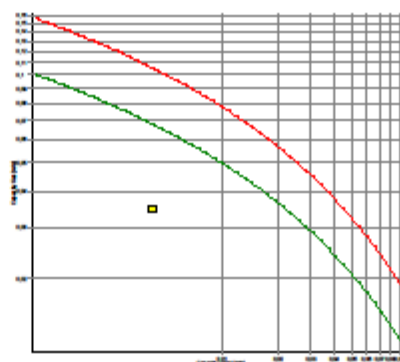
 Design Software RAPSOODY for packed columns RVT Process Equipment GmbH, D-96347 Steinwiesen	VOC-järjestelmän kehittäminen S. Laakkonen Pesurin 41K802 tase 2		
	21/03/2023	2.20	Tase 2

Flow Rates

	Liquid water	Gas nitrogen	Operating Temperature 10 C
Mole Weight	18 kg/kmol	28 kg/kmol	Operating Pressure 1.013 bar
Density	1E3 kg/m³	1,2 kg/m³	
Viscosity	1,33 cP	0,0171 cP	
Surface Tension	0,0743 N/m		
Vapor Pressure	1,25E3 Pa		
Mole Fraction IN	0,00125	0,00405	
Mole Fraction OUT	0,00194	0,000304	
Concentration IN	3,2E3 g/m³	8 g/m³	
Concentration OUT	4,95E3 g/m³	0,6 g/m³	
Diffusion Coefficient	9,36E-6 cm²/s	0,122 cm²/s	
Mass transfer coefficient	7,4E-5 m/s	2,4E-2 m/s	
Mole flow rate	80000 mol/h	14700 mol/h	
Mass flow rate	1440 kg/h	411,6 kg/h	
Volume flow rate	1,44 m³/h	343 m³/h	

Fluiddynamik


Random Packing	Hiflow metal 38-5
Surface Area	145 m²/m³
Void Fraction	98,0%
Column Diameter	348 mm
Flooding Factor	34 %
F-Factor	1,1 Pa ^{0.5}
Liquid Load	15 m³/m²/h
Dry Pressure Drop	0,7 mbar/m
Liquid Holdup	4,1 %
Operating Pressure Drop	1,2 mbar/m
Calculation model	Engel/Stichlmair

**Stoffübergang**

Transfer Component	ethanol
Mole Weight	46,1 kg/kmol
Henry Coefficient	0,209 bar
Wetted surface area	79 m²/m³
Number of transfer units (NTU)	4,5
Height of transfer units (HTU)	0,55 m
Calculated height	2,5 m
Packed height (selected)	2,5 m
Calculation model	Onda

Number of warnings 0

Liite 6. Taseen 3 laskentaraaportti

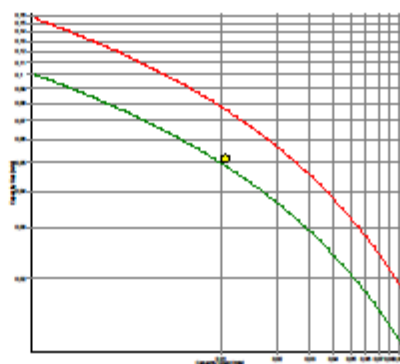
 Design Software RAPSODY for packed columns RVT Process Equipment GmbH, D-96347 Steinwiesen	VOC-järjestelmän kehittämien S. Laakkonen Pesurin 41K802 tase 3		
	21/03/2023	2.20	Tase 3

Flow Rates

	Liquid water	Gas nitrogen	Operating Temperature 10 C
Mole Weight	18 kg/kmol	28 kg/kmol	Operating Pressure 1.013 bar
Density	1E3 kg/m³	1,2 kg/m³	
Viscosity	1,33 cP	0,0171 cP	
Surface Tension	0,0743 N/m		
Vapor Pressure	1,25E3 Pa		
Mole Fraction IN	0,000164	0,00253	
Mole Fraction OUT	0,000435	5,06E-5	
Concentration IN	420 g/m³	5 g/m³	
Concentration OUT	1,11E3 g/m³	0,1 g/m³	
Diffusion Coefficient	9,36E-6 cm²/s	0,122 cm²/s	
Mass transfer coefficient	1,2E-4 m/s	3,2E-2 m/s	
Mole flow rate	2E5 mol/h	21857 mol/h	
Mass flow rate	3600 kg/h	612 kg/h	
Volume flow rate	3,6 m³/h	510 m³/h	

Fluidodynamik


Random Packing	Hiflow metal 38-5
Surface Area	145 m²/m³
Void Fraction	98,0%
Column Diameter	348 mm
Flooding Factor	68 %
F-Factor	1,6 Pa ^{0.5}
Liquid Load	38 m³/m²/h
Dry Pressure Drop	1,5 mbar/m
Liquid Holdup	7,1 %
Operating Pressure Drop	4 mbar/m
Calculation model	Engel/Stichlmair

**Stoffübergang**

Transfer Component	ethanol
Mole Weight	46,1 kg/kmol
Henry Coefficient	0,209 bar
Wetted surface area	99 m²/m³
Number of transfer units (NTU)	5,1
Height of transfer units (HTU)	0,49 m
Calculated height	2,5 m
Packed height (selected)	2,5 m
Calculation model	Onda

Number of warnings 0

Liite 7. Taseen 4 laskentaraaportti

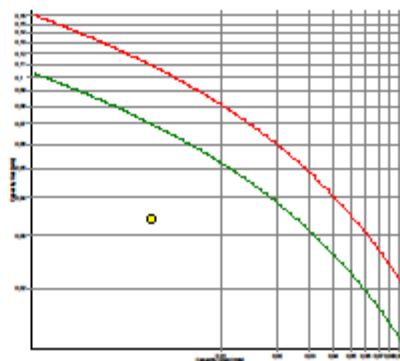
 Design Software RAPSODY for packed columns RVT Process Equipment GmbH, D-96347 Steinwiesen	VOC-järjestelmän kehittäminen S. Laakkonen Pesurin 41K802 tase 4		
	20/03/2023	2.20	Tase 4

Flow Rates

	Liquid water	Gas nitrogen	Operating Temperature 22,7 C
Mole Weight	18 kg/kmol	28 kg/kmol	Operating Pressure 1.013 bar
Density	998 kg/m³	1,15 kg/m³	
Viscosity	0,974 cP	0,0177 cP	
Surface Tension	0,0724 N/m		
Vapor Pressure	2,8E3 Pa		
Mole Fraction IN	0,00125	0,00264	
Mole Fraction OUT	0,00162	0,000528	
Concentration IN	3,2E3 g/m³	5 g/m³	
Concentration OUT	4,15E3 g/m³	1 g/m³	
Diffusion Coefficient	1,34E-5 cm²/s	0,13 cm²/s	
Mass transfer coefficient	1,1E-4 m/s	2,5E-2 m/s	
Mole flow rate	79840 mol/h	14087 mol/h	
Mass flow rate	1437,1 kg/h	394,45 kg/h	
Volume flow rate	1,44 m³/h	343 m³/h	

Fluidodynamik


Random Packing	Hiflow metal 38-5
Surface Area	145 m²/m³
Void Fraction	98,0%
Column Diameter	348 mm
Flooding Factor	33 %
F-Factor	1,1 Pa ^{0.5}
Liquid Load	15 m³/m²/h
Dry Pressure Drop	0,88 mbar/m
Liquid Holdup	3,8 %
Operating Pressure Drop	1,2 mbar/m
Calculation model	Engel/Stichlmair

**Stoffübergang**

Transfer Component	ethanol
Mole Weight	46,1 kg/kmol
Henry Coefficient	0,408 bar
Wetted surface area	82 m²/m³
Number of transfer units (NTU)	4,7
Height of transfer units (HTU)	0,53 m
Calculated height	2,5 m
Packed height (selected)	2,5 m
Calculation model	Onda

Number of warnings 0

Liite 8. Taseen 5 laskentaraaportti

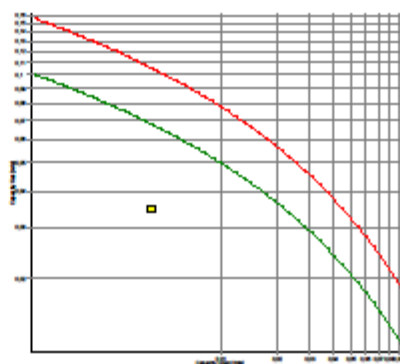
 Design Software RAPSODY for packed columns RVT Process Equipment GmbH, D-96347 Steinwiesen	VOC-järjestelmän kehittäminen S. Laakkonen Pesurin 41K802 tase 5		
	21/03/2023	2.20	Tase 5

Flow Rates

	Liquid water	Gas nitrogen	Operating Temperature 10 C
Mole Weight	18 kg/kmol	28 kg/kmol	Operating Pressure 1.013 bar
Density	1E3 kg/m³	1,2 kg/m³	
Viscosity	1,33 cP	0,0171 cP	
Surface Tension	0,0743 N/m		
Vapor Pressure	1,25E3 Pa		
Mole Fraction IN	0,00234	0,00253	
Mole Fraction OUT	0,00271	0,000506	
Concentration IN	5,98E3 g/m³	5 g/m³	
Concentration OUT	6,92E3 g/m³	1 g/m³	
Diffusion Coefficient	9,36E-6 cm²/s	0,122 cm²/s	
Mass transfer coefficient	7,4E-5 m/s	2,4E-2 m/s	
Mole flow rate	80000 mol/h	14700 mol/h	
Mass flow rate	1440 kg/h	411,6 kg/h	
Volume flow rate	1,44 m³/h	343 m³/h	

Fluidodynamik

Random Packing	Hiflow metal 38-5
Surface Area	145 m²/m³
Void Fraction	98,0%
Column Diameter	348 mm
Flooding Factor	34 %
F-Factor	1,1 Pa ^{0.5}
Liquid Load	15 m³/m²/h
Dry Pressure Drop	0,7 mbar/m
Liquid Holdup	4,1 %
Operating Pressure Drop	1,2 mbar/m
Calculation model	Engel/Stichlmair

**Stoffübergang**

Transfer Component	ethanol
Mole Weight	46,1 kg/kmol
Henry Coefficient	0,209 bar
Wetted surface area	79 m²/m³
Number of transfer units (NTU)	4,8
Height of transfer units (HTU)	0,55 m
Calculated height	2,5 m
Packed height (selected)	2,5 m
Calculation model	Onda

Number of warnings 0

Liite 9. Valintaopas kaasu-neste kontaktoreille (Kohl & Nielsen 2007)

Conditions of Application	Staged Columns		Rating of Column Internals		Pseudo-Equilibrium	
	Perforated, or Valve Trays	Bubble Cap or Tunnel Trays	Differential Columns Randomly Packed	Systematically Packed	Downcomer-less	Disc and Donut
Low pressure (<100 mm Hg)	2	1	2	3	0	1
Moderate pressure	3	2	2	1	1	1
High pressure (>50% of critical)	3	2	2	0	2	0
High turndown ratio	2	3	1	2	0	1
Low liquid rates	1	3	1	2	0	0
Foaming systems	2	1	3	0	2	1
Internal tower cooling	2	3	1	0	1	0
Solids present	2	1	1	0	3	1
Dirty or polymerized solution	2	1	1	0	3	2
Multiple feeds and sidestreams	3	3	1	0	2	1
High liquid rates (scrubbing)	2	1	3	0	3	2
Small diameter columns	1	1	3	2	1	1
Columns with diameter 3–10 ft	3	2	2	2	2	1
Large diameter columns	3	1	2	1	2	1
Corrosive fluids	2	1	3	1	2	2
Viscous fluids	2	1	3	0	1	0
Low ΔP (efficiency no concern)	1	0	2	2	0	3
Expanded column capacity	2	0	2	3	2	0
Low cost (performance no concern)	2	1	2	1	3	3
Available design procedures	3	2	2	1	1	1

Notes:
 Rating key: 0 - Do not use
 1 - Evaluate carefully
 2 - Usually applicable
 3 - Best selection

Staged columns: Tray columns with separate liquid and vapor flow paths.
Common types: Bubble cap, sieve, valve.
Proprietary types: Angle, Uniflux, Montz, Linde, Thorman, Jet.

Differential columns: True countercurrent flow of gas and liquid.
Randomly packed: Raschig rings, saddles, slotted rings, Tellerettes, Maspac.
Systematically packed: Flexipac, Goodloe, Hyperfil, Sulzer, Glitch Grid.

Pseudo-equilibrium stages: Countercurrent flow of gas and liquid with discrete trays.
Downcomerless trays: Perforated, Turbogrid, Ripple.
Low pressure drop trays: Disc and donut, shower deck.

Special devices (not rated in table):
 Venturi scrubber, turbulent contact absorber, marble bed absorber, horizontal spray chamber, cocurrent rotator.

Based on data of Frank, 1977