

**Elli-Maria Linna**

# **ABSORPTIOKOLONNIN OPTIMOINTI**

**Opinnäytetyö**

**CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU**

**Kemiantekniikan koulutusohjelma**

**Toukokuu 2014**

**TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ**

<b>Yksikkö</b> Kokkola-Pietarsaari	<b>Aika</b> Huhtikuu 2014	<b>Tekijä/tekijät</b> Elli- Maria Linna
<b>Koulutusohjelma</b> Kemiantekniikka		
<b>Työn nimi</b> ABSORPTIOKOLONNIN OPTIMOINTI		
<b>Työn ohjaaja</b> Staffan Borg		<b>Sivumäärä</b> 41 + 5
<b>Työelämäohjaaja</b>		
<p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli löytää absorptio-desorptiolaitteiston ajoasetukset, joilla saavutetaan paras absorptiotulos. Työn toimeksiantaja oli Centria-ammattikorkeakoulu ja kohdelaitteistona Kokkola-Pietarsaari yksikön absorptio-desorptiolaitteisto.</p> <p>Teoriaosuudessa tarkastellaan absorptiota ilmiönä, erilaisia absorptiolaitteistoja sekä absorptioon vaikuttavia tekijöitä sekä perehdytään Taguchi-menetelmän käyttöön prosessin kehittämisessä ja optimoinnissa.</p> <p>Laitteiston optimointi vaati koeajojen suorittamista. Koeajoissa tutkittiin absorptiokolonniin syötettävän kaasun ja nesteen virtauksia, sisään tulevan hiilidioksidin pitoisuutta sekä stripperin esilämmittimen tehoa.</p> <p>Parhaaseen absorboitumiseen päästään, kun huomioidaan kolonnin poistokapasiteetti. Kaasuseoksen sekä hiilidioksidin syötön kolonniin tulee olla riittävän pieni, jotta kolonni kerkeää absorboida. Mitä isommaksi syötöt kasvavat, sitä huonommin hiilidioksidi absorboituu. Tutkituista parametreista stripperin esilämmittimen teholla on pienin vaikutus lopputulokseen. Myöskään nestevirtauksen vaikutus ei ollut kovin suuri.</p>		
<b>Asiasanat</b> absorptio, kolonni, optimointi, parametri		

## ABSTRACT

<b>Unit</b> Kokkola-Pietarsaari	<b>Date</b> April 2014	<b>Author/s</b> Elli- Maria Linna
<b>Degree programme</b> Chemical engineering		
<b>Name of thesis</b> ABSORPTIOKOLONNIN OPTIMOINTI		
<b>Instructor</b> Staffan Borg		<b>Pages</b> 41+5
<b>Supervisor</b>		
<p>The purpose of this thesis work was to determine the settings to achieve the best results of absorption with apparatus for absorption and desorption. The work was commissioned by Centria University of Applied Sciences and the target apparatus was the absorption and desorption apparatus of the Kokkola-Pietarsaari unit.</p> <p>The theory part of the thesis examines the phenomenon of absorption, different apparatus for absorption and the factors that affect to absorption. The thesis discusses the Taguchi-method on the use of development and optimization to process.</p> <p>The apparatus had to be tested with series of trial run test to optimize the apparatus. Test runs were examined gas and liquid feeds into the absorption column, the concentration of carbon dioxide and the preheater power for the stripper.</p> <p>The best absorption was achieved when the removal capacity of column is considered. The gas mixture and carbon dioxide feed into the column must be sufficiently small so that the column has time to absorb. The more the feed grows the less carbon dioxide absorbed. From the examined parameters, the power of the preheater had the least effect on the final result. Moreover, the effect of the liquid flow is not very considerable.</p>		

<b>Key words</b> absorption, column, optimization, parameter
---

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 ABSORPTIO</b>	<b>2</b>
2.1 Absorptio laitteistoja	2
2.1.1 Pohjakolonnit	3
2.1.2 Tankit	3
2.1.3 Täytekappalekolonnit	3
2.2 Absorptioon vaikuttavat tekijät	5
2.2.1 Lämpötilan vaikutus	5
2.2.2 Paineen, painehäviön ja kaasuvirtaaman rajanopeuden vaikutus	7
2.2.3 Kaasu- ja nestevirtaamien suhteen vaikutus	8
2.3 Kemikaalit	9
<b>3 TAGUCHI-MENETELMÄ</b>	<b>12</b>
3.1 Taguchin peruskäsitteet	12
3.2 Taguchi-filosofia	13
3.3 Systeemis suunnittelu	15
3.4 Parametrisuunnittelu	16
3.5 Toleranssisuunnittelu	21
3.6 Ortogonaalimatriisit ja lineaarikuvaajat	22
3.7 Laadun hävikkifunktio	24
3.8 Signaali-kohinasuhde	26
<b>4 KOESUUNNITTELU</b>	<b>29</b>
<b>5 KOELAITTEISTO</b>	<b>31</b>
<b>6 ANALYYSIT</b>	<b>34</b>
6.1 Vapaan monoetanoliamiinin määrittäminen	34
6.2 Hiilidioksidin määrittäminen	34
<b>7 TULOKSET JA PÄÄTELMÄT</b>	<b>36</b>
<b>8 YHTEENVETO</b>	<b>40</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>41</b>
<b>LIITTEET</b>	
Liite 1. Tasoittumisenäytteet	
Liite 2/1–2/2. Koeajoarvot	
Liite 3/1–3/2. Laskut ja tulokset	
Liite 4. Optimoidut parametriarvot. Parametrien vaikutus absorptioon lopputulokseen	
Liite 5. Tulosten hajonta	

## KUVIOT

KUVIO 1. Täytekappalekolonnin rakennetta	4
KUVIO 2. Tasapainokuvaaja	5
KUVIO 3. Lämpötilaprofiili	6
KUVIO 4. Täytekappalekolonnin painehäviö	7
KUVIO 5. Tasapainokuvaajan ja käyttösuoran välinen yhteys	9
KUVIO 6. QFD:n vuokartta	16
KUVIO 7. Ohjaus- ja häiriötekijöiden asettelu	17
KUVIO 8a. Parametrisuunnittelun tapa	19
KUVIO 8b. Perinteisen suunnittelun tapa	19
KUVIO 9. Eri parametrien mallinnus	20
KUVIO 10. Häiriöiden luokittelu	21
KUVIO 11. Ortogonaalimatriisi $L_{16}(2^{15})$	23
KUVIO 12. Ortogonaalimatriisi $L_8(2^7)$ ja sen lineaarikuvaajat	24
KUVIO 13. Hajonnan ja tavoitearvon riippuvuus toisistaan	27
KUVIO 14. Koelaitteisto	32
KUVIO 15. Kaaviokuva koelaitteistosta	32
KUVIO 16. Absorptio-desorptiolaitteiston ohjaustaulu	33
KUVIO 17. Hiilidioksidin määrittelyn analyysilaitteisto	35
KUVIO 18. Kolonnin poistokapasiteetti	39

## TAULUKOT

TAULUKKO 1. Koesuunnitelma	30
TAULUKKO 2. Parametrien arvot	30
TAULUKKO 3. Sijoitusesimerkit. Sarja 1. Koeajo 1.	37
TAULUKKO 4. Koeajojen keskiarvot tuloksista	38
TAULUKKO 5. Varmistusajon laskut ja tulokset	39

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Centria-ammattikorkeakoulu. Centria-ammattikorkeakoulu on Keski-Pohjanmaalta löytyvä monipuolista koulutusta tarjoava korkeakoulu. Koulun kampukset sijaitsevat Kokkolassa, Pietarsaassa ja Ylivieskassa. Ammattikorkeakoulussa on viisi eri koulutusala ja 21 koulutusohjelmaa, joissa opiskelee noin 3000 opiskelijaa. Keskimäärin 500 opiskelijaa saa tutkintonsa valmiiksi vuosittain ja saman verran aloituspaikkoja avautuu uusille opiskelijoille. Opetuskielinä koulussa toimivat suomi, ruotsi ja englanti.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli optimoida Centria-ammattikorkeakoulun Kokkola-Pietarsaaren yksikön prosessilaboratorion absorptio-desorptiolaitteiston ajoparametrit ja hakea raja-arvot. Tarkemmin sanottuna tarkoituksena oli selvittää absorptiokolonnin ajoasetukset ja parametrien arvot, joilla kolonni absorboisi mahdollisimman tehokkaasti. Selvitettiin mitkä ovat absorption ylä- ja alarajat, mitkä parametrit vaikuttavat toisiinsa ja kuinka niitä muutamalla saadaan haluttu lopputulos.

## 2 ABSORPTIO

Absorptio on prosessi, jossa jokin ainesosa liukenee kaasusta nesteeseen. Tällainen prosessi on useimmiten hyvin hidas, ja siihen vaikuttavat monet eri tekijät kuten prosessiolosuhteet, aineensiirron rajapinnan suuruus sekä aineominaisuudet. Kun absorptio tapahtuu liian hitaasti yhdessä laitteistossa, voidaan haluttu aine absorboida monivaiheisesti. Tällä tarkoitetaan sitä, että absorptiolaitteiston yksikköjä, esimerkiksi täytekappalekolonneja, voidaan laittaa peräkkäin useampia. Jokaisen yksikön yläosasta poistettava kaasu johdetaan seuraavan yksikön alaosaan. Vastaavasti neste johdetaan yksikön alaosaan edeltävän yksikön yläosaan. Toisin sanottuna edellisen yksikön poistuva kaasu on jäljempään yksikön syöttökaasu. Vastaavasti toisen poistuva neste on toisen syöttöneste. (Pihkala 2003, 105,107.)

Absorptiolle vastakkainen tapahtuma on desorptio. Desorptiossa nesteestä liuennuttua kaasua poistetaan saattamalla neste kosketuksiin inertin kaasun kanssa. Desorptiota kutsutaan myös strippaukseksi. Desorptiota käytetään usein absorptioväliaineen regeneroimiseen eli palauttamaan se takaisin alkuperäiseen tilaansa ja näin uudelleen käytettäväksi. (Borg 2013a, 20.)

### 2.1 Absorptiolaitteistoja

Absorptioon käytettyjä laitteistoja on monia. Useimmiten käytetty laite on täytekappalekolonni, mutta käytettävissä on myös muun muassa välipohjakolonneja, tankkeja, suihkutorneja sekä venturipesureita. (Borg 2013a, 1.)

### **2.1.1 Pohjakolonnit**

Pohjakolonnissa on perätysten aineenvaihtopohjia, joissa kaasu- ja nestevaiheet joutuvat läheisiin kosketuksiin. Pohjakolonne on yksi absorptioon yleisimmin käytetyistä laitteista. (Pihkala 2003, 107.) Neste virtaa kolonnissa ylhäältä alaspäin ja kaasu alhaalta ylös. Nesteen virtaukseen vaikuttaa painovoima ja kaasuun pohjien välinen paine-ero. Kolonnissa olevissa pohjissa on reikiä, joiden läpi kaasu virtaa ja sekoittuu näin pohjalla olevaan nesteeseen. (Pihkala 2003, 101.)

### **2.1.2 Tankit**

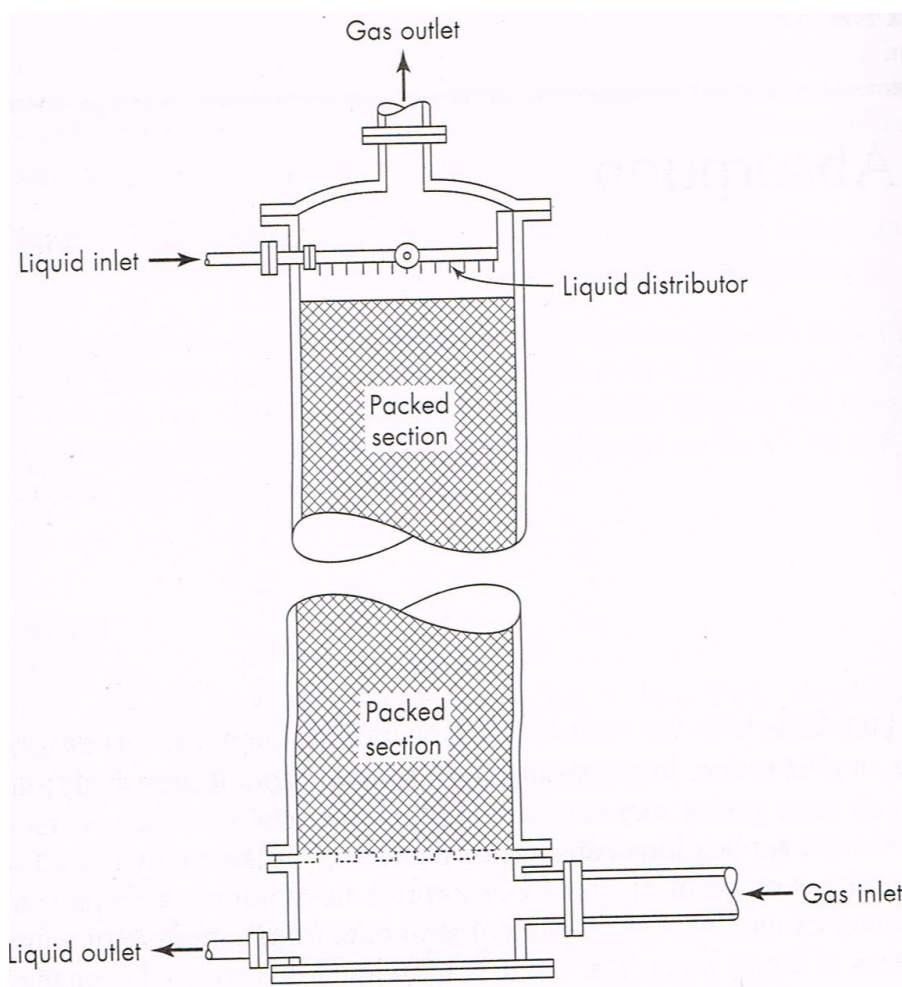
Tankissa toteutetussa absorptiossa kaasukuplat ovat hajallaan nestefaasissa. Nestettä pyritään sekoittamaan hyvän kontaktin aikaansaamiseksi käyttäen joko sekoittimia tai nesteessä olevia kaasukuplia. Käytettäessä kuplia sekoittamiseen on vaarana takaisin sekoittuminen, jolloin konversio laskisi. Reagoimaton kaasu voidaan kierrättää uudelleen käytettäväksi. Lisäksi etuna on se, että kaasu on halpaa, joten kustannukset eivät kohoa suuriksi. (McCabe, Smith & Harriot 2005, 609.)

### **2.1.3 Täytekappalekolonnit**

Täytekappalekolonnissa kaasu virtaa alhaalta ylöspäin ja neste vastaavasti ylhäältä alaspäin (Pihkala 2003, 106). Erilaisilla täytekappaleilla pyritään saamaan nesteelle ja kaasulle mahdollisimman paljon kontaktipinta-alaa. Täytekappaleet jaetaan irtotäytekappaleiksi, systemaattisesti pakatuiksi ja strukturoiduiksi täytteiksi. Irtotäytekappaleiden ideana on mahdollisimman epäsäännöllinen pakkaus, ja niitä löytyy kaikissa mahdollisissa muodoissa, mutta yleisimpiä ovat renkaat ja satulat. Systemaattiset täytekappaleet on pakattava muotonsa takia tietyllä tavalla kolonniin. Yleisimmin kappaleet ovat sellaisia, että ne pinotaan päällekkäin. Strukturoidut kappaleet ovat metallista tai muovikuidusta, ja kappaleista käytetään monia eri nimityksiä. Näillä kappaleilla on irtokappaleita parempi kapasiteetti sekä pienempi paine-ero. (Borg 2013a, 1–3.)



Kolonnit on yleensä rakennettu niin, että niissä voidaan käyttää erilaisia täytteitä, mutta tavanomaisesti tarvitaan vain yhdenlaista tätekappaletta. Kolonni on sylinterin muotoinen. Nesteenjakaaja löytyy tornin yläosasta, ja se on tätekappaleiden jälkeen tärkein kolonnin osa, sillä nesteen jakautuminen määrää tätekappaleiden toimivuuden ja siten koko kolonnin tehokkuuden. Nesteenjakaajan jälkeen tulee tätekappaleiden paikallaan pitäjä, ja tämän alta löytyvät luonnollisesti tukirakenteen päällä lepäävät tätekappaleet. Tätekappaleiden jälkeen tulee kaasunjakaaja, nesteen kerääjä sekä uudelleen jakaja. Alimmaisena kolonnissa on tulevan kaasun jakaja ja tämän päällä ritiloita sekä näiden tukirakenne. Näin ollen kaasu ja neste voidaan syöttää kolonniin eri korkeuksille prosessin sitä tarvitessa. (Borg 2013a, 3–4.) Kuviossa 1 on tätekappalekolonnin rakennekuva, josta näkyvät kaasun ja nesteen sisään-tulo sekä ulosmenokohdat. Lisäksi kuva havainnollistaa tätekappaleiden sijoittumisen kolonniin sekä nesteenjakaajan.



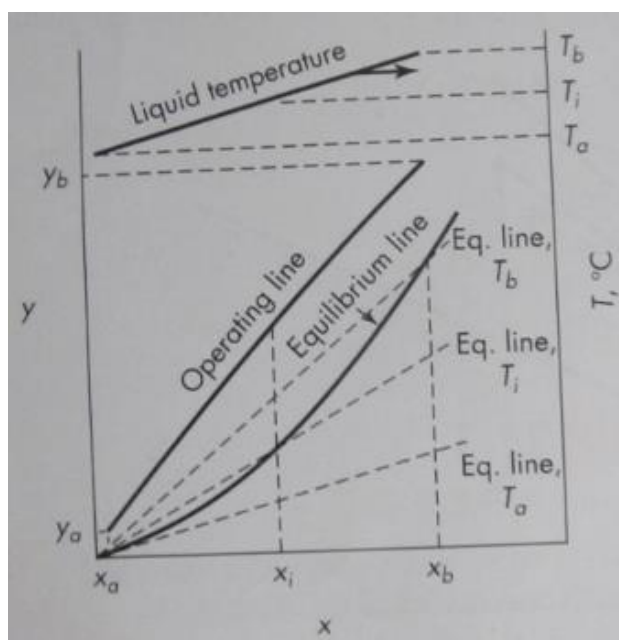
KUVIO 1. Tätekappalekolonnin rakennetta (McCabe ym. 2005, 566.)

## 2.2 Absorptioon vaikuttavat tekijät

Absorptioon vaikuttaa moni eri tekijä, kuten lämpötila, paine, absorptiionopeus sekä laite, jossa absorptio tapahtuu.

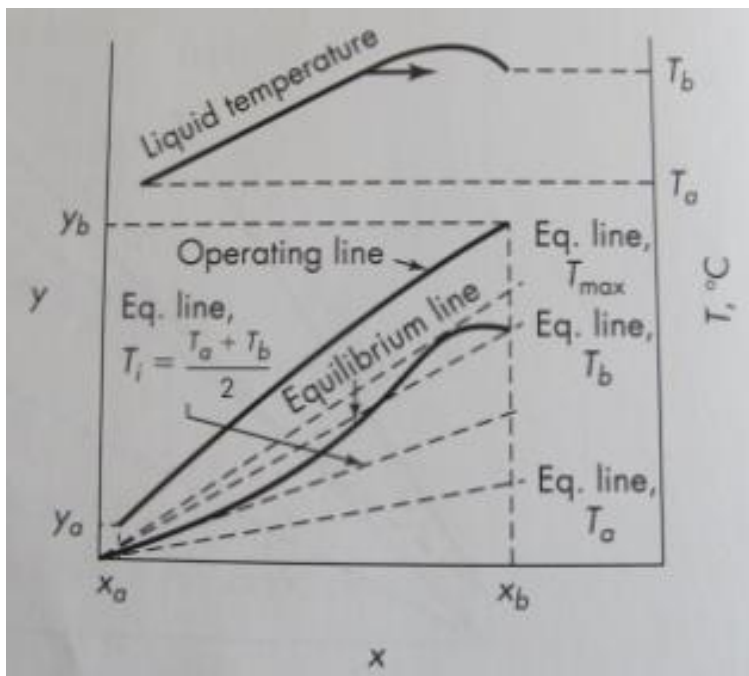
### 2.2.1 Lämpötilan vaikutus

Pesunesteen haihtuminen tai kondensoituminen, absorptiionopeus sekä kaasun ja nesteen välinen lämmönsiirto muodostavat lämpötilan kokonaisvaikutuksen absorption lopputulokseen. Vaikutus on aina tapauskohtainen. Jos sisään tuleva kaasu on kylläistä ja lähellä poistuvan nesteen lämpötilaa, pesunestettä haihtuu vain vähän. (Borg 2013a, 12–13.) Tasapainokuvaaja (KUVIO 2) kaartuu ylöspäin ja nesteen lämpötilan nousu on verrannollinen liukenevan aineen määrään.



KUVIO 2. Tasapainokuvaaja (McCabe ym. 2005,586)

Kun saapuva kaasu on poistuvaa nestettä kylmempää, lämpötilaprofiili on mahdollisesti maksimissaan. Edellytyksenä maksimille on se, että neste on helposti haihtuvaa. Lämpötilaprofiili ja lämpötilamaksimi ovat näkyvissä kuviossa 3. Kylläistä kaasua käytettäessä lämpötilapiikillä ei juuri ole merkitystä. Absorptiossa vapautuva lämpö nostaa kolonnin lämpötilaa ja johtaa siihen, että kolonnin lämpötilavaihtelut ovat suuria. Lämpötila kasvaa ylöspäin mentäessä, sillä virtaava kaasu vie lämpöä mukanaan. Pesuveden lämpötila on suurimmillaan kolonnin alaosassa absorption vapauttaman lämpötilan vuoksi. Tähän ei huomattavasti vaikuta edes se, että pesuveden haihtuminen alentaa kolonnin lämpötilaa. (Borg 2013a, 13–14.)

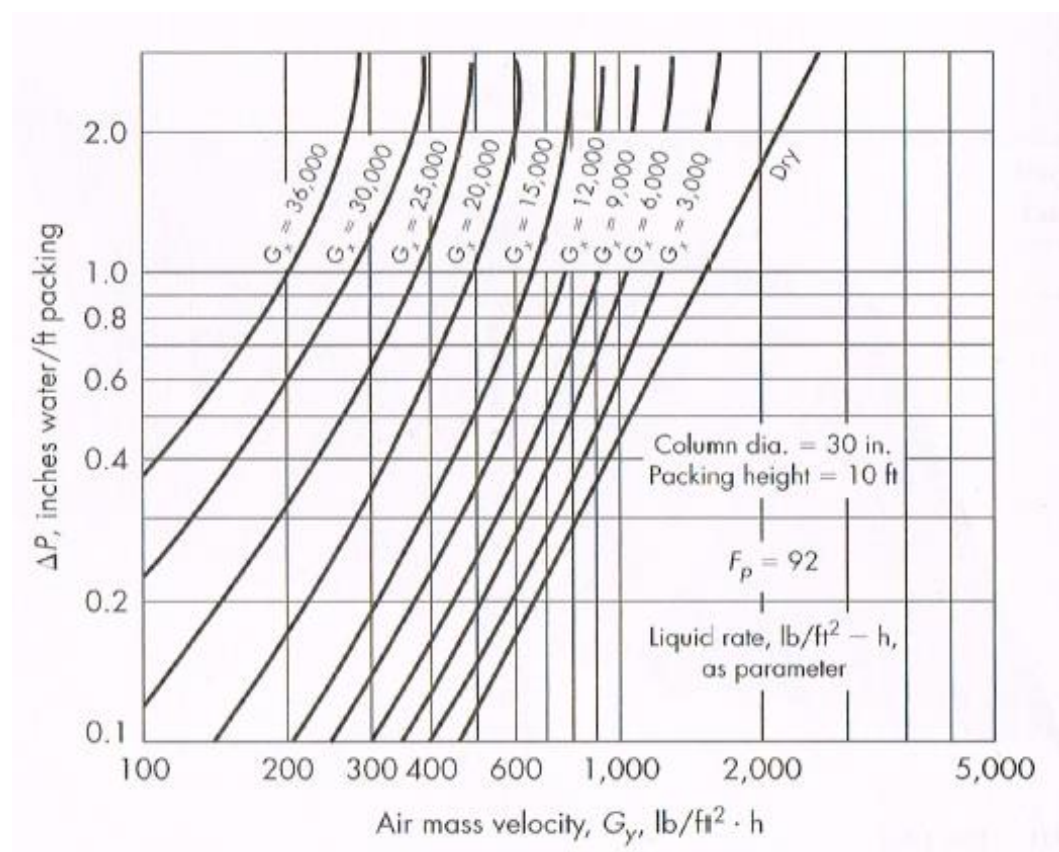


KUVIO 3. Lämpötilaprofiili (McCabe ym. 2005, 586)

Miniminnostemäärää voidaan arvioida tasapainokuvaajasta, koska nestemäärän pieneminen nostaa nesteen lämpötilaa. Tämä vastaavasti muuttaa tasapainokuvaajan sijaintia koordinaatistossa. (Borg 2013a, 14.)

### 2.2.2 Paineen, painehäviön ja kaasuvirtaaman rajanopeuden vaikutus

Kun kolonnissa olevat täytekappaleet ovat kuivia, kuuvaaja on kulmakertoimella 1,8 oleva suora. Jos taas täytettä on huuhdeltu vakiovirtauksella, painehäviö lopulta kasvaa suuremmaksi kuin kuivan täytteen painehäviö. Tämä johtuu siitä, että neste vähentää kaasuvirtaamalla olevaa tilaa kolonnissa. Kun kaasun nopeus on maltillinen, se vähitellen kasvattaa nesteen viipymää kolonnissa ja täten myös kustannuksia. Patopiste, painehäviön kaltevuu-den muutos, on kohta, jossa nesteen viipymä alkaa kasvaa. (McCabe ym. 2005, 569–570.) Tämän pisteen tarkka arvo on kuitenkin hankala selvittää. Kuviossa 4 näkyvät nämä edellä mainitut painehäviön vaikutukset.



KUVIO 4. Täytekappalekolonnin painehäviö (McCabe ym. 2005, 570.)

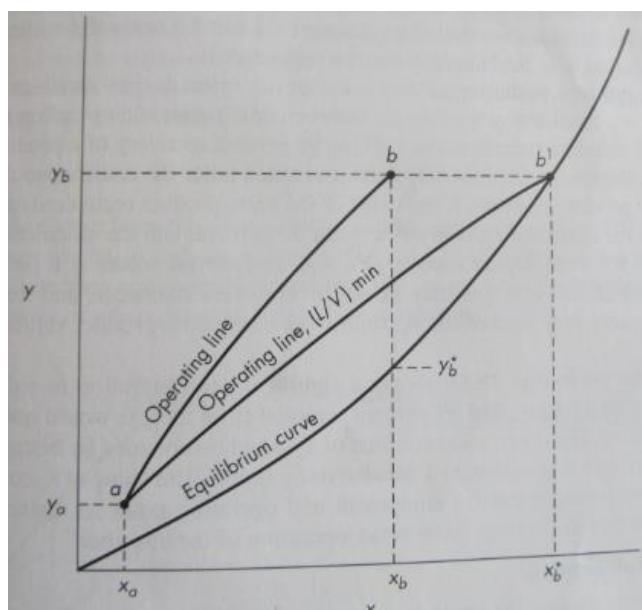
Kun kaasun nopeus jatkaa kasvuaan, myös painehäviö kasvaa. Painehäviön kasvu on kaasun nopeuden kasvua nopeampi, ja tämän vuoksi kuviossa 4 näkyvät suorat nousevat lähes pystysuoriksi, kun painehäviö on 150–250 mm vettä metriä kohden. Tällöin kolonni saavuttaa tulvimispisteensä, sillä neste on joillakin kolonnin alueilla jatkuvana faasina. Jotta kolonni olisi toimiva, täytyy kaasunnopeuden olla tulvimisnopeutta pienempi. Suunnittelijalla on tärkeä tehtävä valita sopiva kaasun nopeus kolonniin, sen tulee olla kaukana tulvimisnopeudesta turvallisen käytön takaamiseksi, mutta toisaalta nopeus ei saa olla liian hidas, sillä myös aineensiirto pienenee. (McCabe ym. 2005, 570–571.)

Jotta aineensiirto olisi nopeampaa ja kolonnin kapasiteetti suurempi, voi absorptiokolonniissa vallita korotettu paine. Nesteen koostumuksesta ja lämpötilasta riippuu kolonnissa olevan liuoksen paine. Näin ollen moolivirtaama kaasussa on kääntäen verrannollinen kolonnin kokonaispaineeseen. Käyttösuora pysyy muuttumattomana silloin, kun kaasu- ja nestevirtauksen suhde pysyy vakiona. Tällöin suurempi paine kasvattaa moolivirtaamaa, ja näin ollen se vähentää tarvittavien siirtoyksiköiden määrää. Tarvittava nestevirtaus on korkeassa paineessa pienempi, joten käyttösuoraksi voidaan valita toinen suora. Näin saadaan samalla siirtoyksikkömäärällä rikkaampaa tuotetta. (McCabe ym. 585–586.)

### **2.2.3 Kaasu- ja nestevirtaamien suhteen vaikutus**

Nesteen ja kaasun moolivirtaamien suhde on käyttösuoran kulmakerroin. Kun kaasuvirtaama pidetään vakiona ja samalla pienennetään nestevirtaamaa, pienenee myös käyttösuoran kulmakerroin. Kohta, jossa käyttösuora ja tasapainokuvaaja leikaavat, kertoo suurimman mahdollisen liuoskonsentraation. Tällöin, teoreettisesti, nestevirtaama on minimissään, mikä tarkoittaa myös sitä, että kolonnin alaosassa konsentraatio ero on nolla. Tämä johtaa siihen, että aineensiirtoa faasien välillä ei tapahdu ja täytekappaleen korkeuden tulisi näin olla suhteettoman suuri. Näin ollen todellisuudessa kolonnissa ei voida käyttää nesteelle minimivirtausta. (Borg 2013a, 10–11.)

Kun nesteen ja kaasun virtaamien suhdetta kasvatetaan, se lisää konsentraatioeroa kolonnissa, huippua lukuun ottamatta. Tämä johtuu siitä, että ajava voima eli konsentraatioero on verrannollinen tasapainokuvaajan ja käyttösuoran etäisyyteen toisistaan pystysuorassa tarkasteltuna (KUVIO 5). Konsentraatioeron kasvu vaikuttaa myös kolonnin korkeuteen, tällöin riittää pienempi torni. Nesteen lisäämisessä joutuu kuitenkin huomioimaan sen, että pesuliuos laimenee nesteen lisääntyessä. Tällöin liuenneen aineen talteenotto ja jatkokäsittely mahdollisesti hankaloituu ja kallistuu. (Borg 2013a, 11.)



KUVIO 5. Tasapainokuvaajan ja käyttösuoran välinen yhteys (Borg 2013a, 11.)

## 2.3 Kemikaalit

Monoetanoliamiini, toiselta nimeltään myös 2-aminoetanoli, on absorptiossa usein käytetty emäs, joka toimii absorboivana reagenssina (Borg 2013b, 9). Molekyyli­massaltaan monoetanoliamiini (MEA) on 61,1 g/mol, suhteellinen nesteen tiheys on 1,02 g/cm<sup>3</sup> ja höyryn 2,1 g/cm<sup>3</sup>. 2-aminoetanoli liukenee erittäin hyvin veteen, ja sitä käytetään usein vesiseoksena. Kun MEA kuumenee ja palaa, se muodostaa myrkyllisiä ja syövyttäviä kaasuja. Aine

syövyttää hyvin muun muassa kumia sekä alumiinia ja kuparia ja näiden seoksia. MEA tulee varastoida kuivassa, hyvin ilmastoidussa tilassa. Sen lähellä ei myöskään saa säilyttää alumiinia tai kuparia, elintarvikkeita ja eläinravintoa, vahvoja happoja tai hapettimia. Yli 85 °C:n lämpötilassa voi muodostua herkästi räjähtäviä höyry-ilmaseoksia. MEA aiheuttaa ihmiselle muun muassa yskää, hengenahdistusta, ihon ja silmien punoitusta sekä kipua. Jos MEA syttyy palamaan, tulee se sammuttaa alkoholia kestävällä jauheella, hiilidioksilla, vesisumulla tai jauheella. (WHO 2005.)

Fosforihappo on väritön ja hajuton aine. Huoneenlämpötilassa 100-% fosforihappo esiintyy kiinteänä. Fosforihapon molekyylimassa on 98 g/mol, tiheys vaihtelee välillä 1,05 g/cm<sup>3</sup>–1,86 g/cm<sup>3</sup> hapon pitoisuuden mukaan. 50-% fosforihapon tiheys on 1,33 g/cm<sup>3</sup>. 100-prosenttinen hapon kiehumispiste on 213 °C ja sulamispiste 42,4 °C. Joidenkin aineiden, kuten syanidin, kanssa reagoidessaan fosforihappo muodostaa myrkyllisiä kaasuja. Alumiinin kanssa reagoidessaan se muodostaa vetykaasua, joka on herkästi syttyvää. Fosforihappo syövyttää useimpia metalleja hitaasti. Fosforihappo syövyttää ihoa voimakkaasti sekä vaurioittaa silmiä joutuessaan kosketuksiin. Työskentelyilmassa fosforihappo on haitallista, jos pitoisuus on 1 mg/m<sup>3</sup> silloin, kun oleskeluaika on kahdeksan tuntia. 15 minuuttia kohden raja on 2 mg/m<sup>3</sup>. Fosforihappoa käytetään muun muassa lannoitteissa, elintarviketeollisuudessa sekä jäteveden puhdistuksessa. (Työterveyslaitos 2013.) Fosforihappoa käytetään hajoitushappona, kun tutkitaan hiilidioksidin määrää nesteessä. (Borg 2013b, 10.)

Rikkihappo (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) on syövyttävä kemikaali, jota käytetään melkein kaikilla teollisuuden alueilla (Kemira 2014). Näin ollen rikkihappo on käytetyin kemikaali maailmassa. Rikkihapon käytössä ja säilömisessä on huomioitava, että aine voi syövyttää metalleja ja reagoidessaan niiden kanssa muodostaa herkästi räjähtävää vetyä. Palaessaan ja höyrystyessään ilmaan vapautuva kaasu on vaarallista. Rikkihapon lyhytaikaisen altistumisen raja-arvo on 1 mg/m<sup>3</sup> ja pitkäaikaisen 0,2 mg/m<sup>3</sup>. (Merck KGaA 2012.) Rikkihappoa käytetään vapaan MEA:n määrittämiseen titraamalla. (Borg 2013b, 9.)

Hiilidioksidia käytetään teollisuudessa paljon. Sitä voidaan käyttää mm. testikaasuna, kalibroitikaasuna ja hitsauksen suojakaasuna (Oy AGA AB 2013). Hiilidioksidi voi esiintyä kaikissa kolmessa olomuodossa: kiinteänä, nesteinä tai kaasuna. Hiilidioksidi esiintyy ilmakehän paineessa kaasumaisena, jolloin se on väritön ja hajuton. Työskentelyilmassa suurin kaasumaisen hiilidioksidin sallittu pitoisuus on 0,5 %. Suuri määrä kaasua hengitysilmassa aiheuttaa tukehtumisvaaran. (Oy AGA AB 2014.) Hiilidioksidia käytetään absorptiossa kaaseoksessa. Hiilidioksidi on se ainesosa, joka seoksesta absorboidaan pois.



### 3 TAGUCHI-MENETELMÄ

Taguchi-menetelmän on kehittänyt vuonna 1924 syntynyt japanilainen tohtori Genichi Taguchi. Tohtori Taguchin ensimmäinen koulutus oli tekstiili-insinööri. Koulusta saadut tilastotekniikan opit olivat varsin vähäiset. Tilastomatematiikan taitojaan hän paransi sodan aikana lukemalla muun muassa tilastomatematiikan kirjoja vapaa-ajallaan. Kuitenkin suurimman osan tilastollisista tiedoistaan ja taidoistaan Taguchi saavutti käytännön työskentelyssä. Tilastollisten menetelmien ja kokeiden pariin hänet opasti herra M. Masuyaman, jonka kanssa Taguchi työskenteli lääketieteen alalla toimivassa yrityksessä. Taguchi sovelsi kehittämänsä menetelmää tuloksellisesti vuosina 1949–1961 kehittäessään Nippon Telephone & Telegraphin Electrical Communications Laboratoryn (ECL) mm. releen suunnittelussa, jota tarvittiin puhelinkeskusteluiden toteuttamiseen. Tämä kehitetty rele oli huomattavasti ympäri maailmaa olevien kilpailijoiden releitä parempi. Taguchi ja hänen menetelmänsä olivat jo tuolloin saavuttaneet suosiota ja tunnettavuutta Japanissa. (Karjalainen 1999, 10–11.)

Vuonna 1957 ilmestyi ensimmäinen versio Design of Experiment -kirjasta, jossa esiteltiin Taguchi-menetelmä silloisessa muodossaan. Tällöin menetelmä käsitti ortogonaalimatriisit ja luokiteltujen tietojen analyysin. Seuraava versio kirjasta ilmestyi vuonna 1962, ja sen keskeiset ajatukset olivat signaali-kohinasuhde ja tämän käyttäminen suunnittelussa. Vuonna 1976 Taguchi-menetelmän matemaattinen pohja muuttui neliölliseen järjestelmään oltuaan aikaisemmin tilastollinen järjestelmä. Samana vuonna julkaistu kirja on uusin versio. (Karjalainen 1999, 10–11.)

#### 3.1 Taguchin peruskäsitteet

Menetelmässä käytetään monia erilaisia käsitteitä kuvamaan tuotteita ja niiden suunnittelua sekä prosessia ja sen suunnittelua.

Hävikkifunktio: Kuinka käyttäjätoleranssit ja tuotteen suoritusarvot muutetaan rahamitaksi?

Systeemis suunnittelu (QFD): Kuinka asiakkaiden tarpeet muutetaan systemaattisesti tuotteiden ominaisuuksiksi, ominaisuudet spekseiksi jne.?

Parametrisuunnittelu: Kuinka komponentti- ja materiaaliarvot valitaan niin, että niillä voidaan vaikuttaa ei-toivottujen vaikutusten esiintymiseen?

Häiriö: Tekijä, joka aiheuttaa ilmiön.

Ortogonaalimatriisi: Koesuunnitelma, jolla voidaan löytää enemmän vaikuttavia tekijöitä vähemmällä määrällä kokeita.

Lineaarikuvaajat: Kuinka tekijät valitaan ja sijoitetaan ortogonaalimatriisiin siten, että tekijöiden keskinäiset vaikutukset otetaan huomioon?

ANOVA: Kuinka mittaustuloksista tehdään tilastollinen analyysi ja sen perusteella päätöksiä, jotka koskevat parametrien tärkeyttä ja vaikutusta toleranssiin?

Toleranssisuunnittelu: Kuinka määritetään, mitä toleranssia on tiukennettava ja mitä löysennettävä. (Karjalainen 1999, 9.)

### 3.2 Taguchi-filosofia

Taguchi menetelmä auttaa yrityksiä, yhteisöjä ja yksittäisiä henkilöitä optimoimaan tuotteet ja prosessit. Taguchi-menetelmä on keskeinen osa Taguchin laatufilosofiaa. Perusajatukseltaan laatufilosofia voidaan kiteyttää seuraaviin asioihin. Yleisestä käsityksestä poiketen laadun parantaminen samanaikaisesti kustannusten alentamisen kanssa on mahdollista, jos vaihtelua tuotteen ominaisuuksissa pienennetään samalla. Näitä vaihteluita pienennetään käsittelemällä erillisinä tekijöinä ohjaus- ja häiriötekijöitä niin, että tuote kestää häiriöitä eli siitä tulee robusti. Niiden tekijöiden, joihin ei suoraan voida vaikuttaa, vaikutukset minimoidaan sellaisten tekijöiden avulla, joita suunnittelija pystyy ohjaamaan ja käsittelemään, sen sijaan että häiriö eliminoidaisiin kalleilla komponenteilla. Laatu on ainoastaan tavoitearvo eikä nykyisen käytännön mukaan toleranssirajan sisällä oleva arvo. (Karjalainen 1999, 7.)

Taguchin laatufilosofia perustuu hävikin näkökulmaan, siihen kuinka paljon hävikkiä koituu käyttäjälle tuotteen ominaisuuksien ollessa vaihtelevia. Taguchi määrittelee laadun seuraavasti:

Laatu on hävikki, jonka tuote aiheuttaa yhteisölle sen jälkeen, kun se on toimitettu käyttäjälle.

Taguchin esittämä laadun määritelmä mahdollistaa sen, että tuotteita ja toimintaa voidaan kehittää entistä asiakaslähtöisemmiksi. Näin ollen määritelmä poikkeaa huomattavasti muista laadun määritelmistä, joita pääasiassa nykyään käytetään. Taguchin filosofiassa hävikin mittana on raha ja se, kuinka paljon rahallista menetystä käyttäjälle, yhteisölle tai yritykselle syntyy. Hävikki on jaettu kahteen osaan Taguchin filosofiassa. Hävikkiä on ominaisuuksien vaihtelu optimi- tai tavoitearvosta. Toisaalta hävikkiä on myös se, mikä aiheuttaa tuotteen ei-toivotut sivuvaikutukset. (Karjalainen 1999, 13–14.)

Tuotteen ominaisuudet ja laatuominaisuudet erotellaan selkeästi toisistaan Taguchi-ajattelussa. Ne tekijät, joilla tuote kilpailee tietyllä markkinasegmentillä, ovat tuotteen ominaisuuksia. Ominaisuuksien minimipoikkeamat optimiarvostaan markkinasegmentillään puolestaan ovat laatuominaisuuksia. Voidaan todeta, että tuotteen markkinaosuuden segmentillään määrää laatu. (Karjalainen 1999, 13.)

Asiakkaan sekä käyttäjän odotukset tuotteen laadusta on myös jaettu kahteen osaan ja niille henkilöryhmät, joiden vastuulle ongelmat kuuluvat. Arvomaailman ongelmat kuuluvat johdon sekä markkinoinnin alaisuuteen, toisin sanoen tässä toteutuu QFD. Tuotteen fyysisen maailman laatuongelmat taas ovat insinöörien ongelmia. Taguchin menetelmässä käsitellään nimenomaan insinööreille annettuja fyysisen maailman ongelmia. (Karjalainen 1999, 15.)

Taguchille tuotteen kustannus on sen tärkein luonteenominainen piirre. Useimmissa nykyään vallalla olevissa tuotefilosofioissa käytetään tuotteelle tiettyä toleranssirajaa, jonka sisäpuolella tuote on hyväksyttävä ja ulkopuolella hylättävä. Eli toisin sanoen, jos tuote on juuri ja juuri toleranssirajan sisäpuolella, se kelpaa, mutta aavistuksen rajan ulkopuolella ollessaan se hylätään, vaikka ero näiden kahden tuotteen välillä on minimaalinen. Luotettavuuskäyrä kääntyy siis pystysuoraksi toleranssirajalla. Taguchin mukaan tuotteen kustannuksia tulee tarkastella myös toleranssirajan sisäpuolella, koska vain tuote, joka on optimissaan, on laadukas eikä aiheuta hävikkiä. Taguchin laatu-kustannusajattelu lyhykäisyydessään on se, että

kustannus on tärkein luonteenominainen piirre ja kustannuksia ei voida pienentää ilman vaikutusta laatuun. (Karjalainen 1999, 19–20.)

Taguchin ajattelun mukaan asiakas tahtoo omistaa tuotteen, joka on miellyttävä, toteuttaa tarkoituksensa ja jonka poikkeamat ovat minimissään, jolloin tuote toimii niin kuin pitääkin ja on parempi kuin kilpailijoiden vastaava tuote. Nämä asiat voidaan saavuttaa asiakaslähteisellä tuotekehityksellä, prosessisuunnittelun ja tuotteen optimoinnilla sekä laatuhävikkiä käyttämällä laadun parannustoimenpiteitä valittaessa. (Karjalainen 1999, 25–26.)

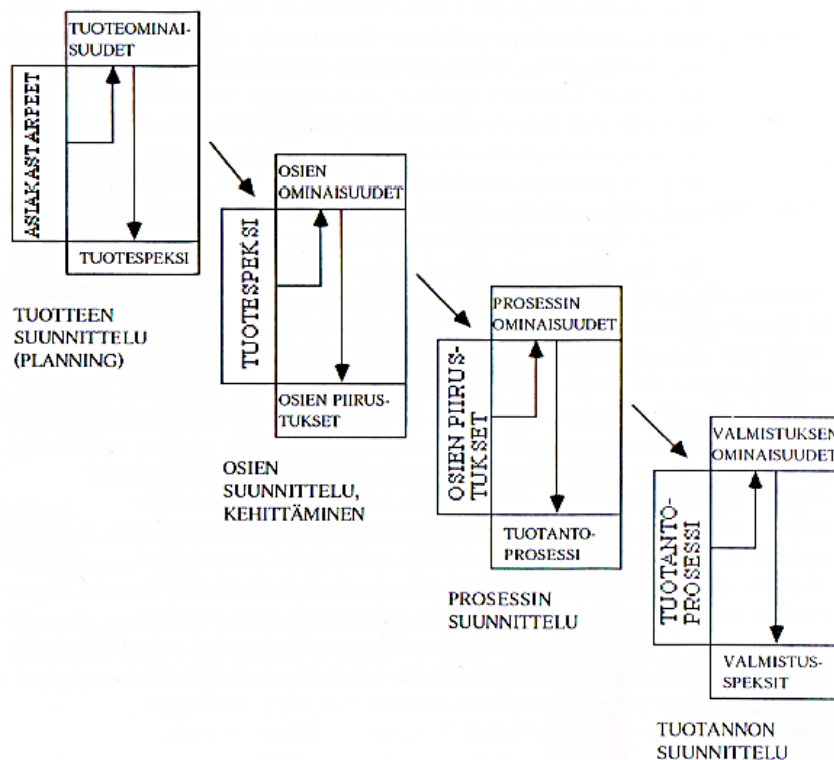
Taguchi-menetelmällä päästään vaadittuihin tavoitteisiin. Taguchi-menetelmään sisältyvät seuraavat vaiheet: systeemi-, parametri- ja toleranssisuunnittelu sekä itse menetelmät, jotka ovat ortogonaaliset matriisit, lineaariset kuvaajat, laadun hävikkifunktio sekä signaali-kohinasuhde. (Karjalainen 1999, 26.)

### 3.3 Systeemisuunnittelu

Systeemisuunnittelu on tuotteen suunnittelua, joka lähtee asiakkaiden tarpeista. Siinä pyritään selvittämään, millainen on asiakkaiden mielestä oikea tuote sekä millaisia eri tuotekonseptit ovat. Systeemisuunnittelulla pyritään yhdistämään suunnittelijoiden luovuus tieteseen. Koska erilaisia yhdistelmiä on äärettömästi, on kehitetty systeemisuunnittelun apuvälineeksi Quality Function Deployment -menetelmä (QFD). Menetelmä kuuluu kiinteästi Taguchi-menetelmään, vaikkei Taguchi itse ole sitä kehittänyt. QFD:n ovat kehittäneet Yoji Akao, Shigero Mizuno ja Osamu Fukuhara. (Karjalainen 1999, 42–43.)

QFD:n perustarkoituksena on saada suunnittelun lähtökohdaksi asiakkailla olevat odotukset ja tarpeet sekä toteuttaa kaikki prosessit tämän mukaan. Toisena tarkoituksena menetelmällä on saada aikaiseksi johtamisjärjestelmä, joka takaisi tuotteen suunnitteluun käytettävän vain oikeita menetelmiä sekä dokumentoinnin olevan oikean laista. QFD koostuu erilaisista mat-

riiseista ja taulukoista, jotka muodostavat työohjeen. Tätä noudattamalla saadaan tuotekehityksen perusajatuksiksi asiakkaan tarpeet. Työohjeen lisäksi matriisit ja taulukot tarjoavat standardoidun dokumentointitavan tuotteen ja prosessin kehittämiseksi. Hyvä ja toimiva dokumentointi on välttämätöntä tuotekehitysprosessin parantamisen ja uusien tuotteiden kehittämisen kannalta. Tuotekehityksen tärkeimmät vaiheet muodostuvat matriisien ja taulukoiden luomasta vuokartasta. Tätä on kuvattu kuviossa 6. Nämä vaiheet ovat tuotannon, prosessin ja tuotteen suunnittelu. Kaavioita ja matriiseja on menetelmässä yhteensä yli kolmekymmentä ja niillä voidaan hyvin kehittää toiminnan luotettavuutta, kustannuksia, laatua ja teknologiaa. (Karjalainen 1999, 43–44.)

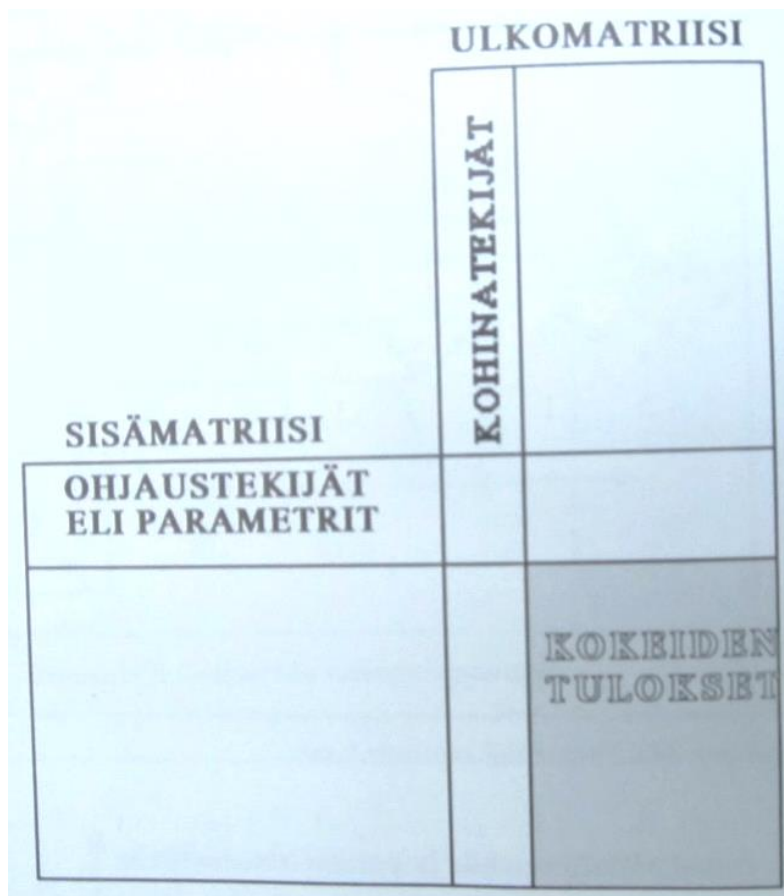


KUVIO 6. QFD:n vuokartta (Karjalainen 1999, 44.)

### 3.4 Parametrisuunnittelu

Parametrisuunnittelun tavoite on suunnittelijan ohjattavissa olevien tekijöiden ominaisarvojen määrittäminen siten, että niillä saavutetaan tuotteen maksimaalinen suoritusarvo sekä

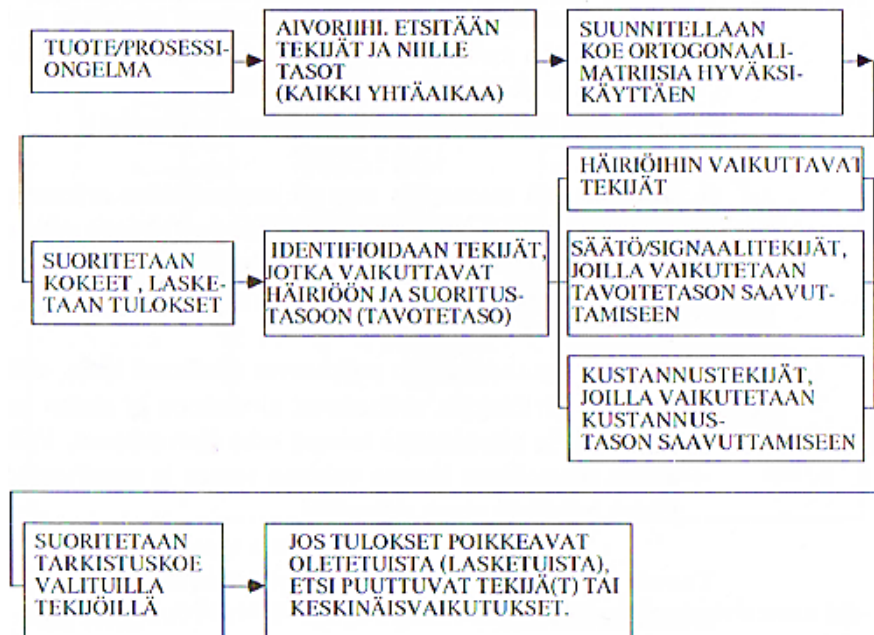
minimoidaan kustannukset ja häiriötekijät. Parametrisuunnittelu on Taguchi-menetelmän tärkein osa. Perusasiana on suunnittelua ohjaavien sekä häiriötekijöiden määrittäminen. Näitä tekijöitä tulee kuitenkin käsitellä erillisinä osinaan. Keskinäisvaikutusten etsiminen ohjaustekijöiden ja häiriötekijöiden väliltä on tärkeää, ja sillä saadaan pienennettyä tuotteen hävikkiä. Täysin tarkkaa tekijää ei tarvitse löytää, kunhan ohjaustekijöiden asetusarvot osuvat sellaiseen kohtaan, että hävikki ja häiriötekijöiden vaikutus pienenee. Myös niiden tekijöiden, jotka parantavat tuotteen suoritusarvoja, ohjaustekijöitä etsitään parametrisuunnittelussa. Nämä tekijät ovat nimeltään signaali-, skaalaus- tai tasotekijä. Parametrisuunnittelulla saadaan suoritusarvo-hintasuhdetta paremmaksi, sekä useimmiten myös kustannukset alenevat ja hinta-laatusuhde paranee, sillä suoritusarvoon ja hävikkiin vaikuttavat parametrit vaikuttavat myös näihin. (Karjalainen 1999, 45.) Kun ohjaus- ja häiriötekijät on eroteltu toisistaan, sijoitetaan ohjaustekijät sisämatriisiksi ja häiriötekijät ulkomatriisiksi. (Karjalainen 1999, 66.) Kuviossa 7 on kuvattu tekijöiden asettelua ja sitä miten näin saadaan testattua häiriötekijöiden vaikutus ohjaustekijöihin.



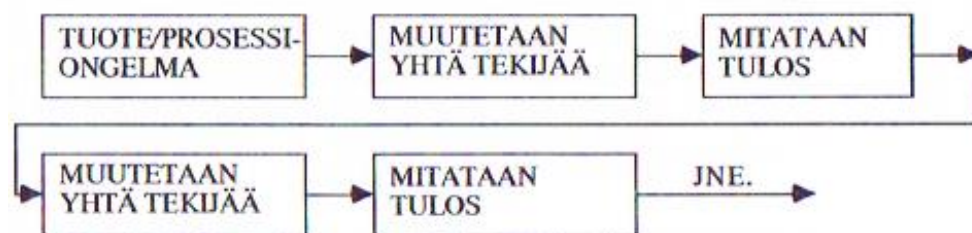
KUVIO 7. Ohjaus- ja häiriötekijöiden asettelu (Karjalainen 1999, 66.)

Tuote tai prosessi suunnitellaan käyttämällä optimaalisia parametreja, jotka pienentävät tuotteen herkkyyttä häiriöille. Parametrisuunnittelussa lähdetään liikkeelle siitä, että suunniteltavaan kohteeseen käytettäisiin karkeimpia ja halvimpia mahdollisia komponentteja sekä raaka-aineita. Näitä materiaaleja korvataan paremmilla materiaaleilla tarpeen mukaan myöhemmin. Parametrisuunnittelu pyrkii pienentämään hävikkiä ilman sen aiheuttajan poistamista, koska poistaminen on yleensä erittäin kallista. Lisäksi suunnittelijan valitessa käytettävät parametrit, mikään ei lisää kustannuksia ja häiriötekijä voidaan tarkkaan tunnistaa koesuunnittelua hyväksi käyttäen. (Karjalainen 1999, 46.)

Taguchi-menetelmän parametrisuunnittelu eroaa perinteisestä suunnittelusta juuri siinä, että perinteisessä suunnittelussa pyritään etsimään ongelmia ja poistamaan niiden syitä. Parametrisuunnittelun etuja perinteiseen suunnitteluun on useita, mm. se, että parametrisuunnittelussa huomioidaan epälineaarisuus ja keskinäisvaikutukset ohjaus- ja häiriötekijöissä. Kun perinteisessä suunnittelussa käsitellään vain keskiarvoja, parametrisuunnittelussa ovat samaan aikaan käsittelyssä myös poikkeamat. Näin pystytään arvioimaan virheellisten tuotteiden määrä. Parametrisuunnittelun yksi suurimmista eduista on se, että kustannukset eivät lisäänny laatua parannettaessa. Lisäksi sitä voidaan soveltaa moneen erilaiseen suunnitteluun, kuten tuotteen, prosessin ja organisaation systeemin suunnitteluun sekä tuotteen- tai prosessin parantamiseen. (Karjalainen 1999, 46.) Parametrisuunnittelun ja perinteisen suunnittelun eroja on kuvattuna kuviossa 8a ja 8b.



KUVIO 8a. Parametrisuunnittelun tapa (Karjalainen 1999, 47.)

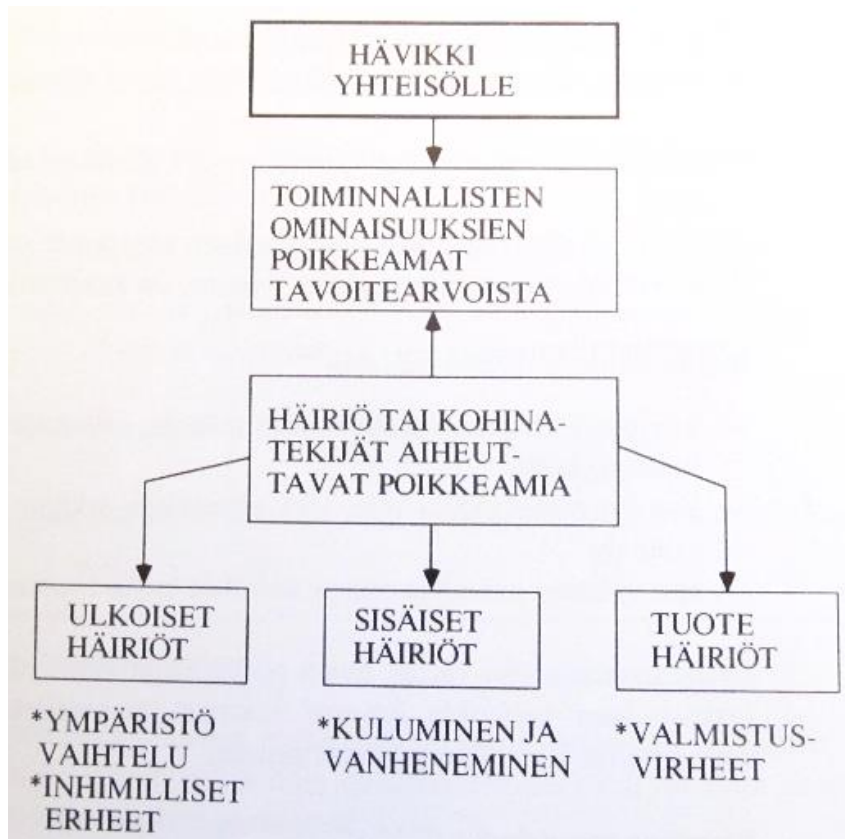


KUVIO 8b. Perinteisen suunnittelun tapa (Karjalainen 1999, 47.)

Mitä parametrit sitten oikeastaan ovat? Ne ovat erilaisia tekijöitä, jotka aiheuttavat jonkin tietyn toiminnon ja siihen liittyvän häiriön. Parametrit on jaettu neljään erilaiseen luokkaan. Ohjaustekijät ovat suunnittelijan tuotteelle asettamia parametrien arvoja, joita voi yhtä ohjaustekijää kohden olla useampia. Tällöin niitä nimitetään tasoiksi. Signaalitekijät ovat operaattorin asettamia arvoja prosessin tai koneen ulostulolle eli outputille. Skaalaustekijät ovat toiselta nimeltään tasotekijöitä, eli ne ovat erikoistapaus ohjaustekijöistä. Skaalaustekijöillä voidaan säätää signaalitekijän ja ulostulon välille haluttu yhteys. Viimeinen ryhmä on häiriötekijät. Näitä tekijöitä suunnittelija ei voi ohjata, ja ne vaikuttavat tuotteen tai prosessin ulostuloon. Niiden todellista arvoa ei pystytä tuntemaan, ainoastaan tilastollinen luonne on







KUVIO 10. Häiriöiden luokittelu (Karjalainen 1999, 51)

### 3.5 Toleranssisuunnittelu

Toleranssisuunnittelun tarkoituksena on määrittää eri parametreille ne rajat, joiden puitteissa vaihtelua saa esiintyä. Taguchi-menetelmä on yksi tärkeimmistä toleranssisuunnittelun menetelmistä. Toleranssisuunnittelussa pyritään käyttämään laajoja toleransseja, halpoja materiaaleja sekä komponentteja ja parasta parametriyhdistelmää. Jos näillä keinoilla tuotteessa ilmenee liikaa vaihtelua, aloitetaan parantaminen vaihtamalla materiaalit tai komponentit parempiin sekä kiristämällä kriittisten osien toleransseja. Parametreissa esiintyvälle vaihtelulle määritetään hävikkifunktio, jolla voidaan arvioida vaihtelun aiheuttamia kustannuksia. Myös jokaisen parametrin kokonaisvaihtelu määritetään ja näin pystytään paremmin kohdistamaan muutokset niihin parametreihin, jotka aiheuttavat suurimman osan hävikistä. (Karjalainen 1999, 75–76.)

Taguchin toleranssisuunnittelu eroaa muista siinä, että lähtökohtana on aina yhteisölle aiheutuva hävikki. Toleranssi määritellään pisteeksi, jossa asiakkaan ja tuottajan hävikkikustannukset ovat yhtä suuria. Taguchin yleinen hävikkifunktio laatuominaisuudelle ”ominaisarvo on paras” on muotoa

$$L = \frac{A_0}{\Delta_0^2} * (y - m)^2,$$

jossa  $y$  on laatuominaisuus

$m$  on optimimitta,

$A_0$  on asiakkaan kokema hävikki

$\Delta_0$  on poikkeama  $m$ :stä.

Karjalaisen (1999, 76–79.) mukaan alemman tason toleranssi saadaan, kun sen tekijää merkitään  $x$ :llä ja yhden yksikön muuttuessa sen aiheuttamaa muutosta  $y$ :hyn  $\beta$ :lla. Alemman tason ylittäessä toleranssirajan siitä aiheutuva hävikki on muotoa  $A = \frac{A_0}{\Delta_0^2} * (\beta * (x - m))^2$ .

Merkittäessä alemman tason poikkeamaa  $\Delta$  saadaan yhtälö muotoon  $A = \frac{A_0}{\Delta_0^2} * (\beta \Delta)^2$ . Kun tästä yhtälöstä ratkaistaan  $\Delta$ , on alemman tason toleranssi muotoa  $\Delta = \sqrt{\frac{A}{A_0}} * \frac{\Delta_0}{\beta}$ .

Kaavassa  $A_0$  on hävikki silloin, kun korkeampi taso ei täytä speksejä,  $\Delta_0$  on korkeamman tason toleranssi,  $A$  on hävikki silloin, kun alempi taso ei täytä speksejä ja  $\beta$  on vaikutus korkeampaan tasoon, kun alempi muuttuu yhden yksikön verran.

### 3.6 Ortogonaalimatriisit ja lineaarikuvaajat

Kun kokeiden suunnittelussa tahdotaan, että kokeessa pystyttäisiin käsittelemään harvoilla testeillä suuri määrä muuttujia ja arvioimaan yksittäisen tekijän vaikutusta sekä sitä, että koe pystytään toisintamaan sekä soveltamaan tuotantoon, on ortogonaalimatriisin käyttäminen paras ratkaisu. Ortogonaalimatriisin keksi ranskalainen 1800-luvun lopulla Jacques Ha-

damarde, joka oli ranskalainen matemaatikko. Ortogonaalimatriisit olivat alun perin neliöpelejä, ja niitä käytettiin erityisesti määrittäessä pelijärjestystä joukkuepeleihin. Ortogonaaleja alettiin soveltaa ja käyttää kunnolla kuitenkin vasta toisen maailmansodan jälkeen muun muassa Taguchin toimesta. (Karjalainen 1999, 52–53.)

Ortogonaalimatriisit pystyvät käsittelemään suuria muuttujamääriä säilyttäen kuitenkin koemäärän pienenä. Kokeet pystytään toisintamaan sekä saadut tulokset ovat luotettavia. Matriiseilla päätekijät pystytään erottelemaan ja kaikki parametrit on tasapainotettu samaan asemaan. Kuviossa 11 on esitettyä yksi yleisimmistä ortogonaalimatriiseista, joka havainnollistaa samalla sitä, kuinka kokeiden määrä pysyy suhteellisen pienenä vaikka eri parametreja on viisitoista erilaista. (Karjalainen 1999, 55.)

	$L_{16}(2^{15})$														
KOE/TEKIJÄ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

KUVIO 11. Ortogonaalimatriisi  $L_{16}(2^{15})$  (Karjalainen 1999, 91)

Ortogonaalimatriiseissa käytetyt parametrit voivat olla toisistaan riippuvaisia, niin että kaksi tekijää aiheuttaa keskinäisvaikutuksen kolmannelle parametrille. Lineaarikuvaaja on kehitetty graafisen esityksen avulla näyttämään tämän keskinäisvaikutuksen kohde, jotta keski-

näisvaikutukset voidaan huomioida kokeita tehtäessä. Lineaarikuvaaja valitaan koejärjestyksen mukaan. Jos ominaisuudelta löytyy ainoastaan yksi pää parametri, käytetään kuviossa 12 esiintyvää oikeanpuoleista lineaarikuvaaja. Jos päätekijöitä on useampi, käytetään puolestaan vasemmanpuoleista kuvaajaa. Jos kokeen parametrien keskinäisvaikutuksia ei tunneta, kannattaa koe suorittaa ensin päätekijöillä. Kokeen epäonnistuessa tai ollessa toisintamaton tulee siirtyä keskinäisvaikutusten tutkimiseen. (Karjalainen 1999, 59–61.)

KOE- NUMERO	TEKIJÄ							KOETULOS
	1	2	3	4	5	6	7	
1	1	1	1	1	1	1	1	Y1
2	1	1	1	2	2	2	2	Y2
3	1	2	2	1	1	2	2	Y3
4	1	2	2	2	2	1	1	Y4
5	2	1	2	1	2	1	2	Y5
6	2	1	2	2	1	2	1	Y6
7	2	2	1	1	2	2	1	Y7
8	2	2	1	2	1	1	2	Y8



KUVIO 12. Ortogonaalimatriisi  $L_8(2^7)$  ja sen lineaarikuvaajat (Karjalainen 1999, 60.)

### 3.7 Laadun hävikkifunktio

Laadun hävikkifunktio (Quality Loss Function eli QLF) on keino tuotteen tai prosessin laadun mittaamiseksi, ja sen tuotefunktio on aina rahassa työtavasta riippumatta. On tutkittu, että uuden asiakkaan houkuttelemiseksi vaaditaan markkinakuluja ym. viisinkertaisesti siihen nähden, että tuotetta myytäisiin vanhalle asiakkaalle. Vielä kalliimpaa on houkutella takaisin asiakas, joka joskus on pettynyt tuotteen laatuun tai yrityksen toimintaan. Tämän on

tutkittu vievän kuluja noin 25-kertaisesti. Tämän vuoksi on tärkeää, että asiakkaalle toimitettava tuote on mahdollisimman laadukas, sillä siitä koituu aina hävikkiä tuottajalle, vaikka tuote ei olisi takuun piirissä. Yleensä laatua kuvataan ainoastaan toleranssirajoilla. Tietyn pisteen kohdalla tuote muuttuu laadukkaaksi tai laaduttomaksi, mitkä eivät ole tarpeeksi tarkkoja. Juuri tästä syystä Taguchi kehitti laadun hävikkifunktion käytettäväksi laadun mittaamiseen. Muita syitä uuteen laadunmittaukseen olivat hävikin funktionaalisuus sekä se, että hävikki tulee kytkeä eri ominaisuuksiin. Laadun hävikkifunktio auttaa jo suunnittelun alkuvaiheessa arvioimaan hävikin määrää. (Karjalainen 1999, 27–32.)

Laadunhävikkifunktiota määritettäessä kehitetään tietyn laatuominaisuuden suhteen syntyvää hävikkiä optimipisteen ympärillä Taylorin sarjaksi. Laatuominaisuutta merkitään  $y$ :llä ja sitä vastaavaa hävikkiä  $L(y)$ :llä. Optimipisteen merkki on  $m$ . Taylorin sarjaa  $L(y) = L(m + y - m)$  eteenpäin kehitettäessä havaitaan, että ensimmäinen merkittävä termi sarjassa ja samalla itse hävikkifunktio, on sarjan kolmas termi. Hävikkifunktio on siis muotoa  $L(y) = k * (y - m)^2$ . Kun tunnetaan tietyssä  $y$ :n pisteessä yhteisön kokema hävikki, voidaan vakio  $k$  määrittää. Yleensä määrittämiseen käytetty pistettä, jossa 50 %:n todennäköisyydellä ilmenee tuotteessa tai prosessissa ongelmia. Tätä pistettä kutsutaan LD 50 -pisteeksi. Tämä piste merkitään  $y_0$ :ksi ja sen poikkeamista pisteestä  $m$  merkitään  $\Delta_0$ :lla. Kyseisessä pisteessä syntyvää rahallista hävikkiä merkitään kirjaimella  $A_0$ . Näin saadaan vakion kaavaksi  $k = A_0 / \Delta_0^2$ . Kokonaisuudessaan hävikkifunktio on siis muotoa  $L(y) = \frac{A_0}{\Delta_0^2} * (y - m)^2$ . Vakio  $k$  on riippuvainen siitä, kuinka tärkeä laatuominaisuus on taloudellisesti. Mitä kriittisempi se on, sitä suuremmaksi vakio kasvaa. Samalla myös hävikki lisääntyy nopeasti, kun tavoitearvosta poiketaan. Vastaavasti taas, jos laatuominaisuus ei ole taloudellisesti kovin tärkeä, pysyvät vakio ja hävikki pieninä. (Karjalainen 1999, 32–33.)

Edellä esitelty hävikkifunktio on määritelty vain yhdelle kappaleelle. Jos kappaleita on useampi, voidaan niille laskea keskimääräinen hävikki yhtä tuotetta kohden. Tällöin hävikkifunktio muuttuu muotoon

$$L(y)_{av} = k * \{s^2 - (Y_{av} - m)^2\}$$

jossa  $s$  on standardipoikkeama

$Y_{av}$  on joukon keskiarvo

$m$  on optimiarvo.

On olemassa tilanteita, joissa poikkeama ei synny optimiarvon molemmille puolille. Esimerkiksi optimiarvoksi tavoiteltaessa mahdollisimman pientä tai suurta arvoa hävikkiä syntyy vain arvon toiselle puolelle. Näille tapauksille on olemassa omat hävikkifunktionsa niin yhdelle kuin useallekin kappaleelle. Laatuominaisuuden ollessa ”pienempi on parempi” hävikkifunktio yhdelle kappaleelle on muotoa

$$L(y) = k * y^2,$$

$$\text{jossa } k = \frac{A_0}{\Delta_0}$$

ja useammalle kappaleelle

$$L(y)_{av} = k * (s^2 + (Y_{av})^2),$$

jossa  $s$  on standardipoikkeama ja

$Y_{av}$  on ominaisuuden  $y$  keskiarvo.

”suurempi on parempi” -ominaisuudelle yhden kappaleen QLF on

$$L(y) = k/y^2,$$

$$\text{jossa } k = A_0 * \Delta_0^2$$

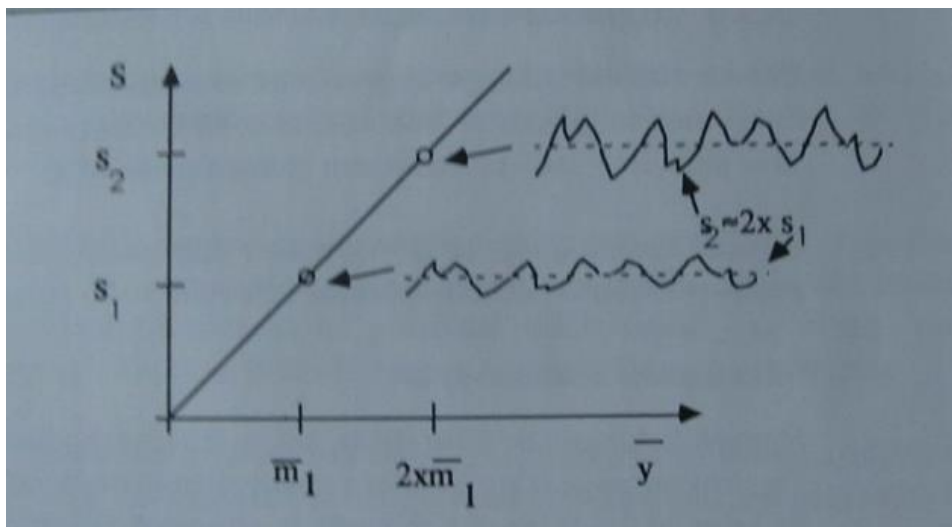
ja useamman kappaleen hävikkifunktio on muotoa

$$L(y)_{av} = \frac{k}{Y_{av}^2} * (1 + 3 * \frac{s^2}{Y_{av}^2}). \text{ (Karjalainen 1999, 36–40.)}$$

### 3.8 Signaali-kohinasuhde

Signaali-kohinasuhde on elektroniikassa ja radiotekniikasta tuttu käsite. Taguchi on tuonut käsitteen myös muille tekniikan ja palvelun aloille. Signaali-kohinasuhde  $S/N$  huomioi häiriöitä aiheuttavat tekijät. Eri parametrien suhteen pyritään löytämään paras mahdollinen  $S/N$ -

suhde. Signaali-kohinasuhteella mitataan logaritmisena tavoitearvon ja hajonnan suhdetta. Logaritmisuutta käytetään sen takia, että se vähentää pääparametrien keskinäisvaikutuksia. Tavoitearvo ja hajonta ovat riippuvaisia toisistaan; toisen muuttuessa myös toinen muuttuu samassa suhteessa (KUVIO 13). Jos tuotteen parametrit valitaan oikein, voidaan häiriötä pienentää, sillä aina löytyy epälineaarisuuksia, jotka vaikuttavat myös hajontaan. (Karjalainen 1999, 63.)



KUVIO 13. Hajonnan ja tavoitearvon riippuvuus toisistaan (Karjalainen 1999, 63.)

Signaali-kohinasuhde on tärkeä mittari parametrisuunnittelussa. Kun suunnittelussa pyritään samaan suunnitelma mahdollisimman robusti ohjaus- ja häiriötekijöiden keskinäisvaikutuksia tutkimalla, on S/N-suhde mittarina. Hävikkifunktio ja signaali-kohinasuhde ovat sidoksissa toisiinsa. S/N-suhteen kasvaessa hävikki pienenee, ja vastaavasti suhteen pienetessä hävikki nousee. Kun hävikki pienenee, ominaisuudesta tulee vakaampi, hävikin noustessa stabiilius pienenee. Niin kuin hävikkifunktiolla, myös S/N-suhteella on jokaiselle kolmelle laatuominaisuudelle omat laskentakaavansa. Kun suurempi on parempi, kaava esiintyy muodossa

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n \cdot \sum_i} * \frac{1}{y_i^2} \right),$$

jossa  $y_1, y_2, y_3 \dots$  on yhden kokeen tuloksia



ja  $n$  on koetoistojen määrä.

Ominaisuudelle ”pienempi on parempi” kaava on

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n \sum_i} * y_i^2 \right).$$

Kun tavoitearvon on paras, kaava on muotoa

$$S/N = 10 \log \left( \frac{y_{av}^2}{s^2} - \frac{1}{n} \right),$$

jossa  $Y_{av}$  on mittaustulosten keskiarvo,

$s$  on standardipoikkeama ja

$n$  on koetoistojen määrä.

Edellä esitelty kaava voidaan kirjoittaa myös muodossa:

$$S/N = 10 \log \left( \frac{1}{n} * \frac{S_m - V_e}{V_e} \right),$$

jossa  $S_m = T^2/n$ ,

$V_e = \sum (y_i - Y_{av}) / (n-1)$  ja

$T$  on kaikkien mittaustulosten summa.

Signaali-kohinasuhteen yksikkönä käytetään desibeliä, dB. (Karjalainen 1999, 65–69.)

## 4 KOESUUNNITTELU

Koeajoissa lähdettiin tavoittelemaan mahdollisimman hyvää absorptiota kolonnissa. Koeajoissa pyrittiin siihen, että parhaimmillaan saataisiin absorboitua vähintään 90 % saapuvan hiilidioksidin määrästä. Tavoiteltiin parasta mahdollista lopputulosta. Taulukossa 1 näkyvä koesuunnittelu toteutettiin MODDE-ohjelmistoa hyväksi käyttäen. MODDE:n toiminta perustuu teoriaosiossa esitettyyn Taguchi-menetelmään.

Tutkittavat parametrit olivat tulevan hiilidioksidin pitoisuus kaasuvirrassa, tulevan nesteen ja kaasun virtausnopeus sekä stripperin esilämmittimen teho. Koelaitteistossa ei ollut monta säädeltävää parametria, jotka olisi voitu valita kokeen kohteeksi. Hiilidioksidin pitoisuus valittiin, koska voidaan olettaa, että laitteisto pystyy absorboimaan vain tietyn verran kohdeainetta. Tahdottiin selvittää, kuinka paljon hiilidioksidipitoisuus vaikuttaa. Samasta syystä valikoitui myös kaasun virtausnopeus. Nopeudesta riippuu, kuinka paljon todellisuudessa hiilidioksidia laitteistoon syötetään. Teoriaosuudessa todettiin nesteen ja kaasun virtaamien suhteella olevan vaikutusta absorption lopputulokseen. Näin otettiin muutettavaksi parametriksi myös nesteen virtausnopeus. Laitteiston desorptitopuolta täytyy ajaa samanaikaisesti absorption kanssa, sillä desorptio puhdistaa absorptiossa käytetyn nesteen. Desorptiokolonnin esilämmittimen teho valittiin parametriksi, koska se todennäköisesti vaikuttaa nesteen puhdistumiseen. Taulukossa 2 on näkyvillä parametreille valitut arvot. Arvot saatiin mukaillen laitteistossa suoritettua laboratorio-ohjeistusta. Lisäksi päädyttiin kolmeen tasoon, jotta koeajomäärät saatiin pidettyä järkevinä. Koeajoja suoritettiin yhdeksän kappaletta ja koe toistettiin kolme kertaa. Parhaimman tuloksen antaneen koeajon arvoilla suoritettiin lopuksi varmistusajo.

TAULUKKO 1. Koesuunnitelma

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	Liquid	Gas	CO2	Stripperi
2	1	N1	23	Incl ▼	2, 5	3, 5	10	2
3	2	N2	20	Incl ▼	2, 5	7	15	4
4	3	N3	3	Incl ▼	2, 5	10, 5	20	6
5	4	N4	9	Incl ▼	3	3, 5	15	6
6	5	N5	25	Incl ▼	3	7	20	2
7	6	N6	18	Incl ▼	3	10, 5	10	4
8	7	N7	4	Incl ▼	3, 5	3, 5	20	4
9	8	N8	10	Incl ▼	3, 5	7	10	6
10	9	N9	2	Incl ▼	3, 5	10, 5	15	2

TAULUKKO 2. Parametrien arvot

Parametri	Yksikkö	Arvot		
Kaasun virtausnopeus	kg/h	3,5	7	10,5
Nesteen virtausnopeus	l/min	2,5	3	3,5
Hiilidioksidin pitoisuus	%	10	15	20
Stripperin esilämmitin	kW	2	4	6

## 5 KOELAITTEISTO

Koelaitteistona toimi Centria-ammattikorkeakoulun prosessitekniikan laboratoriossa oleva absorptio-desorptiolaitteisto. Laitteisto koostuu absorptio- ja desorptiokolonneista (KUVIO 14), putkistosta, lämmönvaihdinlaitteistosta sekä näiden vesisäiliöistä sekä esilämmittimestä. Laitteistossa on myös kaksi pumppua, yksi kummallekin kolonnille. Kuviossa 15 on esitetty kaaviokuva koelaitteistosta. Laitteisto käynnistetään ja ohjataan tietokoneelta. Ainoastaan stripperin esilämmittimen teho tulee muuttaa käsin. Näytöltä (KUVIO 16) saadaan tietää seuraavat asiat: absorptiokolonnein tulevan kaasun todellinen virtaus, tulevan hiilidioksidin todellinen virtaus sekä sen tilavuusprosentti tulevasta ja lähtevästä kaasuvirrasta, tulevan ja lähtevän kaasun sekä nesteen lämpötila ja absorptiokolonnin paine. Laitteiston todelliset nestevirtaamat löytyvät myös näytöltä. Desorptiokolonnin puolelta saadaan tietää stripperiin tulevan nesteen lämpötila, stripperin paine sekä ulos tulevan nesteen lämpötila. Lisäksi näytöllä on lämmönvaihtimeen tulevan ja poistuvan nesteen lämpötila. Kuviossa 14 näkyvät laatikot kertovat ne parametrit, joita pystyy muuttamaan.

Koelaitteiston tekniset tiedot:

Absorptiokolonne:

Kolonnin halkaisija	100 mm
Täytekappaleiden halkaisija	10 mm
Tyhjän tilan osuus	63 %
Täytekerroksen korkeus	1700 mm
Kolonnin maksimipaine	3,5 bar

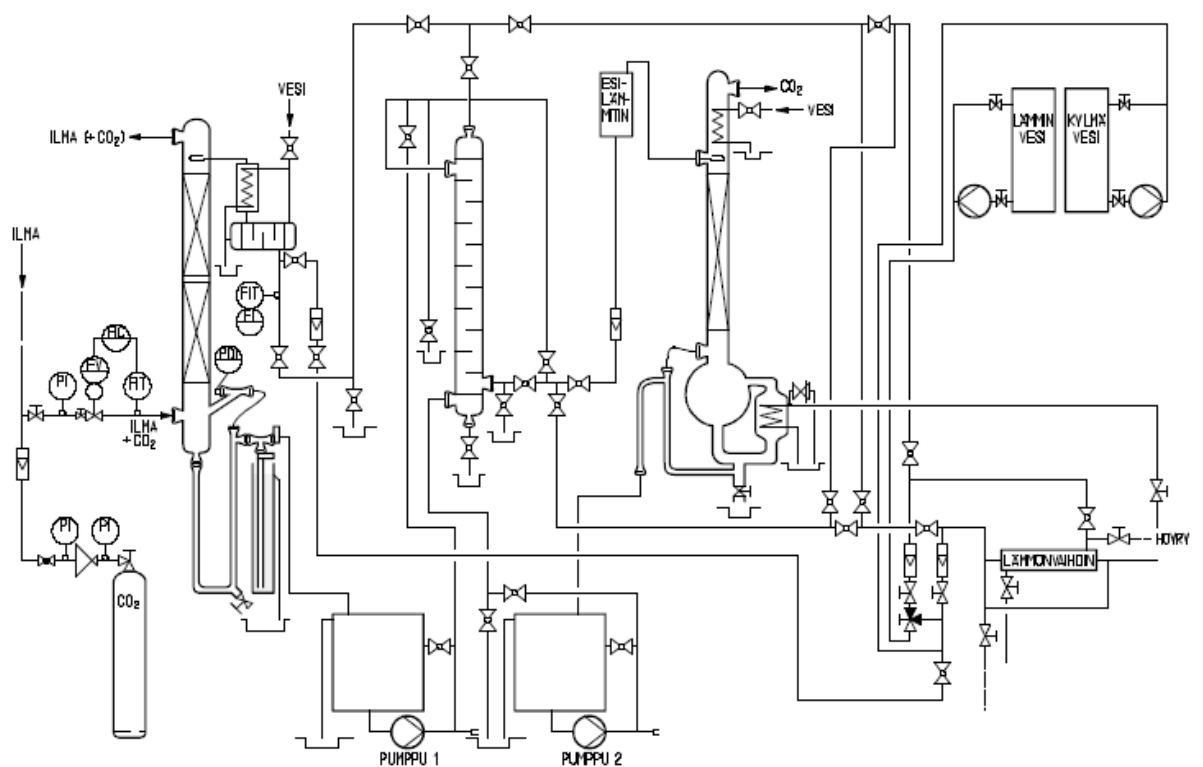
Desorptiokolonne:

Kolonnin halkaisija	80 mm
Täytekerroksen korkeus	840 mm

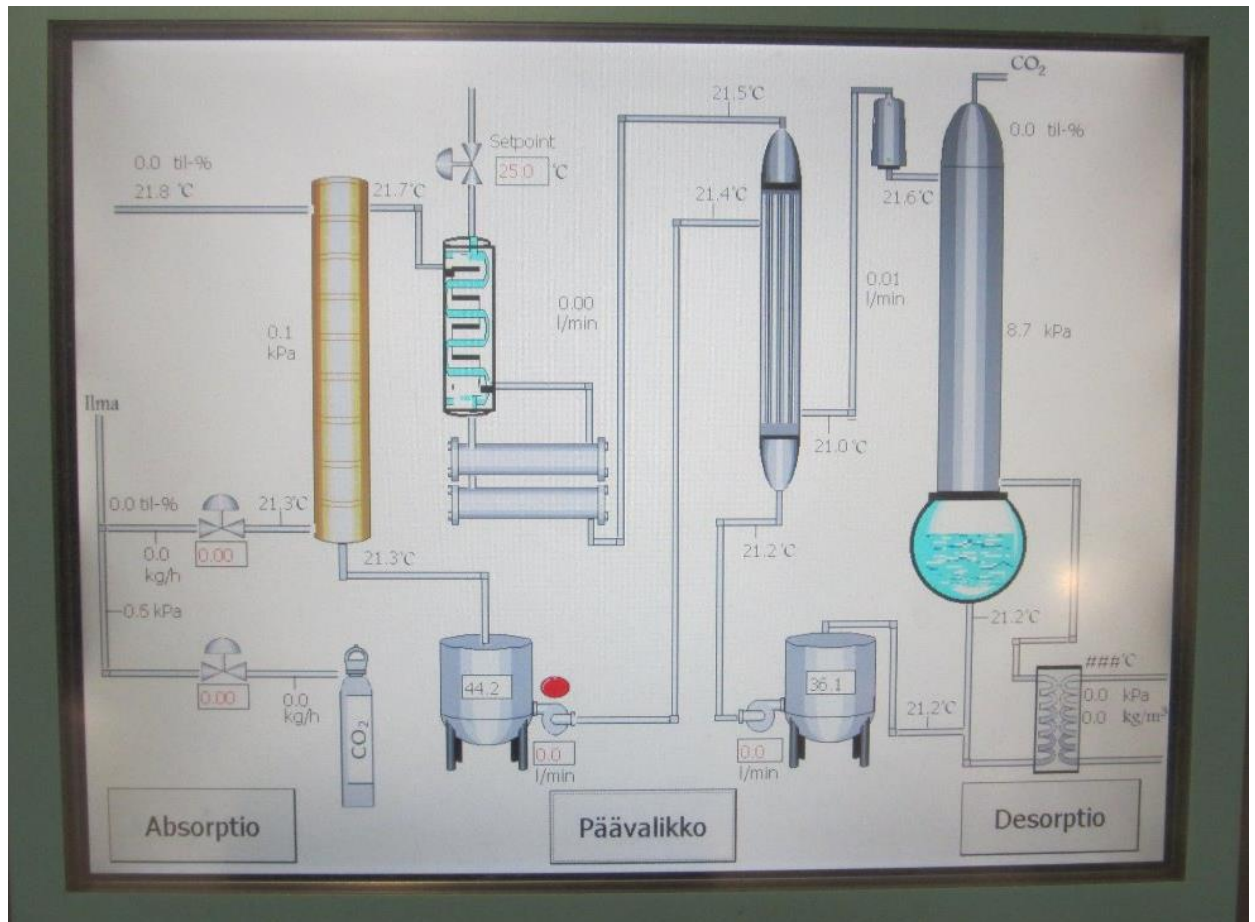
Absorboivana reagenssina toimii monoetanoliamiini.



KUVIO 14. Koelaitteisto



KUVIO 15. Kaaviokuva koelaitteistosta (Borg 2013b, 12)



KUVIO 16. Absorptio-desorptiolaitteiston ohjaustaulu

## 6 ANALYYSIT

### 6.1 Vapaan monoetanoliamiinin määrittäminen

Näytteissä olevan monoetanoliamiinin (MEA) pitoisuus määritettiin titraamalla näyte 0,1-N rikkihapolla. Indikaattorina käytettiin metyylinpunaista. Ennen titrausta MEA:a sisältävä liuos oli laimennettava laittamalla 2 ml liuosta 100 millilitraan vettä. Kun rikkihapon kulutus oli selvillä, voitiin MEA:n normaalisuus selvittää seuraavasta kaavasta:

$$V_a * N_a = V_b * N_b$$

jossa  $V_a$ = rikkihapon tilavuus

$N_a$ = rikkihapon normaalisuus

$V_b$ = MEA:N tilavuus

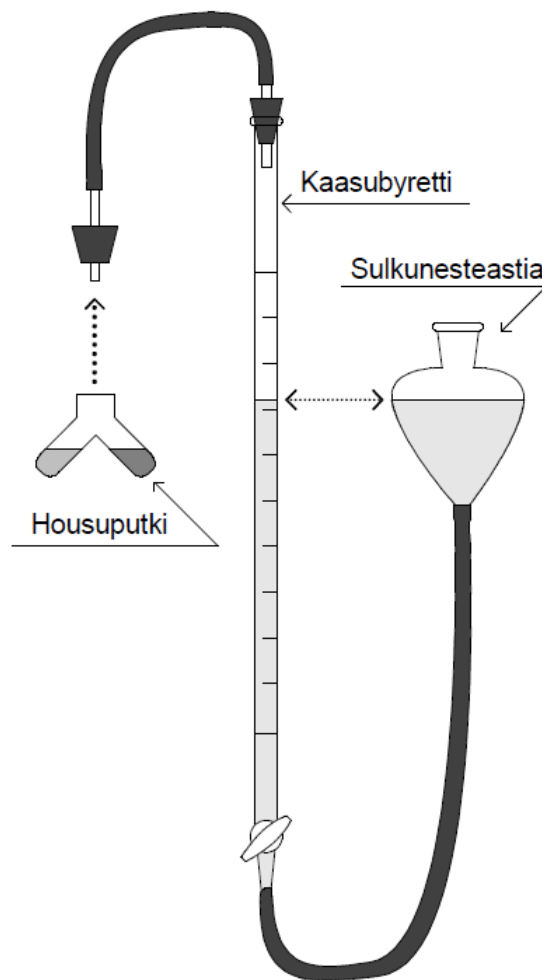
$N_b$ = MEA:N normaalisuus

(Borg 2013b, 9.)

### 6.2 Hiilidioksidin määrittäminen

Monoetanoliamiiniliuokseen sitoutuneen hiilidioksidin  $\text{CO}_2$  määrä saatiin selville, kun sekoitettiin MEA-liuosta ja fosforihappoa. Tämä sekoitus vapautti liuoksessa olevan hiilidioksidin kaasuna. (Borg 2013b, 10.) Vapautunut  $\text{CO}_2$  kaasu kerättiin talteen kaasubyrettiin. Byretin lisäksi analyysissä tarvittiin myös housuputkea sekä sulkuastiaa (KUVIO 17). Housuputkeen pipetoitiin tutkittavaa liuosta ja hajoitushappona toimivaa fosforihappoa, kumpi-

kin omaan haaraan, eikä niitä saanut sekoittaa keskenään, ennen kuin housuputki oli liitetty kaasubyrettiin. Hajoitushappoa laitettiin housuputkeen vähintään yhtä paljon kuin MEA-liuosta. Ennen liuosten sekoittamista luettiin sulkunesteastian pinnankorkeus ja tarkistettiin että se on samassa tasossa byretin nestepinnan kanssa. Sekoitettaessa liuoksia housuputkessa tuli sulkunesteastialla seurata byretissä laskevan nesteen pintaa. Kun pinnan lasku pysähtyi, oli tulos MEA-liuoksen hiilidioksidin pitoisuus kaasumuodossa. Oli suotavaa suorittaa kaksoismääritys. (Borg 2013b, 10.)



KUVIO 17. Hiilidioksidin määrittämisen analyysilaitteisto (Borg 2013b, 11)



## 7 TULOKSET JA PÄÄTELMÄT

Laskelmiin ja MODDE-ohjelmistoon tarvittavat tiedot saatiin pääasiassa koelaitteiston ohjausnäytöltä. Jokaisesta koeajosta kuitenkin suoritettiin hiilidioksidimääritys absorptikolonnista sekä desorptiokolonnista poistuvalla nesteelle. Määrityksellä seurattiin ja todettiin laitteiston tasoittuminen parametrien muutosten jälkeen. Jokaisesta koeajosta otettiin vähintään kaksi näytettä, tarvittaessa kolme. Ensimmäinen näyte otettiin 20 minuutin päästä siitä, kun hiilidioksidin pitoisuus oli tasoittunut halutulle tasolle. Loput näytteet otettiin aina n. 10 minuutin päästä edellisestä. Jos heittoa edellisen näytteen tulokseen oli noin yhden millilitran verran, todettiin laitteiston tasoittuneen tarpeeksi. Koeajojen alkuun ja loppuun suoritettiin vapaan monoetanoliamiinin määritys nesteestä, jotta tiedettiin sen olevan sallitulla pitoisuusvälillä. Ohjaavan opettajan neuvosta tuli MEA:n olla 0,5–1 normaalista.

Liitteestä 1 nähdään, että laitteiston tasoittuminen oli epäsäännöllistä. Kahdessa ensimmäisessä koeajosarjassa viidessä koeajossa tasoittuminen kesti 40 minuuttia eli kolmen näytteen verran. Lisäksi puolessa tunnissa tasoittuneet koeajot olivat, kahdeksatta koeajoa lukuun ottamatta, erit. Viimeisessä sarjassa kaikkien koeajojen todettiin tasoittuneen 30 minuutin aikana. Hiilidioksidin määrittämisen käytetty analyysi suoritettiin käsin, joten tästä saattoi tulla pientä epätarkkuutta. Kuitenkin virhe on niin pieni, että sen ei todeta vaikuttavan siihen, olisiko koeajo tasoittunut 30:ssä vai 40 minuutissa.

Liitteessä 2 ovat näkyvissä koeajoista kerätyt tiedot, joista tärkeimmät ovat hiilidioksidin pitoisuus tulevassa ja poistuvassa kaasuvirrassa sekä tulevan kaasun virtausnopeus. Näitä tietoja hyödyntäen on saatu laskettua jokaiselle koeajolle poistoaste eli se kuinka paljon hiilidioksidia on absorboitunut kaasusta nesteeseen. Poistoasteen laskemiseen käytettiin hyväksi absorptiokolonnin kaasutaseita. Tuloksista on nähtävissä, että paras poistoaste saavutettiin koeajossa 1. Ainoastaan siinä saavutettiin koesuunnittelussa asetettu tavoite vähintään 90 % absorptiosta. Poistoastetta laskettaessa ensimmäinen asia oli muuttaa koeajoista saadut tulevan ja poistuvan hiilidioksidin pitoisuudet tilavuusprosentteista massaosuuksiksi. Tämä onnistui hyödyntämällä hiilidioksidin ja ilman moolimassoja. Laskussa käytetty kaava oli

$y_b = \frac{x_b M_{CO_2}}{x_b M_{CO_2} + (1 - x_b) M_{ilma}}$ , jossa  $y_b$  on hiilidioksidin massaosuus,  $x_b$  on hiilidioksidin tilavuusosuus,  $M_{CO_2}$  on hiilidioksidin moolimassa ja vastaavasti  $M_{ilma}$  on ilman moolimassa.

Tämän jälkeen laskettiin, mikä on hiilidioksidin virtaus sisälle kolonniin kertomalla kaasun kokonaisvirtaus juuri lasketulla massaosuudella:  $V_{bCO_2} = y_b V_b$ , jossa  $V_b$  on kaasun massavirta sisään.

Kun hiilidioksidin osuus oli laskettu, selvitettiin, mikä on ilman virtausosuus sisään. Tämä kävi yksinkertaisesti vähentämällä koko virtauksesta hiilidioksidin virtaus. Koska absorptiossa voidaan olettaa vain yhden komponentin absorboituvan, tässä tapauksessa hiilidioksidin, voidaan todeta, että ulos tuleva ilman virtaus  $V_{a,ilma}$  on yhtä suuri kuin kolonniin sisään virtaava ilmamäärä  $V_{b,ilma}$ . Jotta saadaan selville kolonnista ulosvirtaavan hiilidioksidin määrä  $V_{aCO_2}$ , sievennetään kaava

$$y_a = \frac{V_{aCO_2}}{V_{aCO_2} + V_{a,ilma}} \text{ muotoon } V_{aCO_2} = \frac{y_a V_{a,ilma}}{1 - y_a}.$$

Kaavoissa  $y_a$  on ulos tulevan hiilidioksidin massaosuus.

Viimeisenä laskettiin kolonnin poistoaste  $= \frac{V_{bCO_2} - V_{aCO_2}}{V_{bCO_2}}$ . Kaikkien edellä esitettyjen laskujen tarkat tulokset löytyvät liitteestä 3. Taulukossa 3 puolestaan on nähtävillä sijoitusesimerkit laskuista käsittelyjärjestyksessä. Sijoitusesimerkit on suoritettu ensimmäisen koeajosarjan ensimmäisen koeajon arvoilla.

TAULUKKO 3. Sijoitusesimerkit. Sarja 1. Koeajo 1

$y_b = \frac{x_b M_{CO_2}}{x_b M_{CO_2} + (1 - x_b) M_{ilma}} = \frac{0,1 * 44 \text{ g/mol}}{0,1 * 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + (1 - 0,1) * 28,97 \text{ g/mol}} = 0,144$
$V_{bCO_2} = y_b V_b = 0,144 * 3,5 \text{ kg/h} = 0,51 \text{ kg/h}$
$V_{a,ilma} = V_b - V_{bCO_2} = 3,5 \text{ kg/h} - 0,51 \text{ kg/h} = 2,99 \text{ kg/h} = V_{b,ilma}$
$V_{aCO_2} = \frac{y_a V_{a,ilma}}{1 - y_a} = \frac{0,0106 * 2,99 \text{ kg/h}}{1 - 0,0106} = 0,03 \text{ kg/h}$

$$Poistoaste = \frac{V_{bcO_2} - V_{acO_2}}{V_{bcO_2}} * 100\% = \frac{0,51 \frac{kg}{h} - 0,03 \frac{kg}{h}}{0,51 \frac{kg}{h}} * 100\% = 93,66\%$$

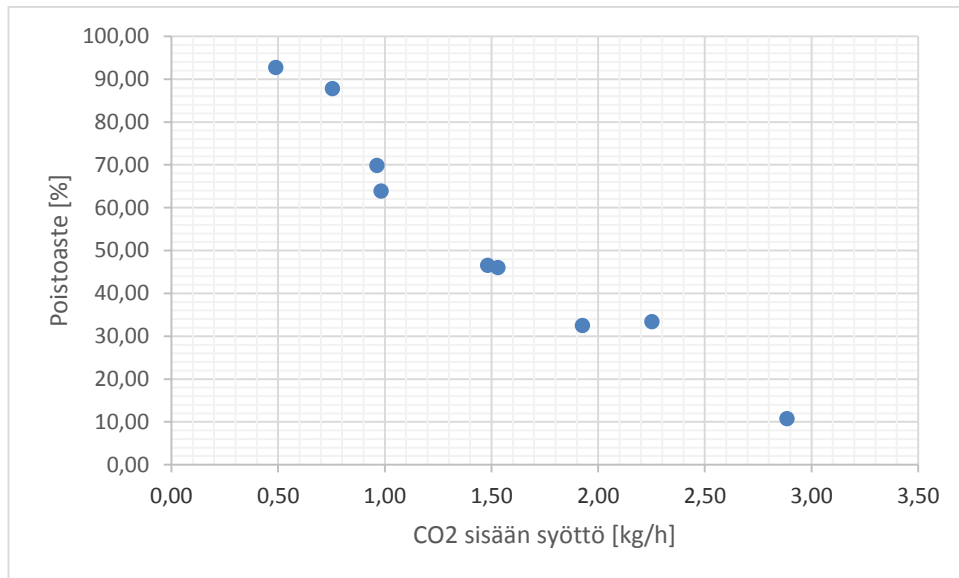
Koeajossa 3 kaasun syöttö ja hiilidioksidin pitoisuus olivat korkeimmillaan. Tämä näkyy tuloksissa, sillä koejaossa saatiin huonoin poistoaste, parhaimmillaan vain noin 14 % (TAULUKKO 4). Kun tarkastellaan hiilidioksidin syöttömäärän suhdetta poistoasteeseen, voidaan todeta, että kolonnin absorptiokyky on melko vakio, keskimäärin noin 0,6 kg/h (KUVIO 18). Näin ollen mitä suurempi on hiilidioksidin syöttö, sitä huonommin kolonni kerkeää sitä absorboidaan. Koeajossa 1 syöttö oli pienimmillään ja kolonnin absorptio kyky oli vielä riittävä. Varmistusajo (TAULUKKO 5) suoritettiin kokeen 1 arvoilla ja tarkastettiin, että tulokset ovat sen suhteen pitäviä. Tosin koeajoista saadut tulokset ovat luotettavia, sillä jokainen koeajo toistettiin kolme kertaa, ja tulokset olivat yhteneviä. Varmistusajossa koelaitteiston absorptiokolonnin jäähdytysvesijärjestelmän venttiili oli rikki joten koeajon aikana ei saatu jäähdytystä ja lämpötilat absorptiokolonnin puolella olivat yli 30 °C korkeammat kuin varsinaisten koeajojen aikana. Tästä johtuen voidaan olettaa, että kaasuanturi ei ole saanut analysoitua ulostulevan hiilidioksidin pitoisuutta täysin oikein, sillä nestettä on päässyt kolonnissa haihtumaan tai kaasu on ollut liian kuumaa. Kuitenkin varmistusajossa otetut tasoittumisnäytteet sijoittuivat hyvin samalle alueelle koeajojen näytteiden kanssa. Näin voidaan olettaa varmistusajon paikkansapitävyys.

TAULUKKO 4. Koeajojen keskiarvot tuloksista

Koeajo	CO2 sis. Ka	Poistoaste ka.	Poisto kapasiteetti [kg/h]
1	0,49	92,73	0,45
2	1,48	46,56	0,69
3	2,89	10,79	0,31
4	0,98	63,89	0,63
5	2,25	33,45	0,75
6	0,96	69,85	0,67
7	1,53	46,08	0,71
8	0,75	87,80	0,66
9	1,93	32,52	0,63

TAULUKKO 5. Varmistusajon laskut ja tulokset

Kaasu sisään [kg/h]	Ilma sisään ja ulos [kg/h]	CO2 sis. Til- %	CO2 ulos Til- %	CO2 sis. Mas- %	CO2 ulos Mas- %	CO2 sis. [kg/h]	CO2 ulos [kg/h]	Poistoaste
3,50	2,99	10,20	0,10	14,71	0,15	0,51	0,005	99,12



KUVIO 18. Kolonnin poistokapasiteetti

Liitteessä 4 on näkyvillä MODDE-ohjelmalla saatu kolonnin optimointi tulos. Tämän mukaan parhaaseen poistoasteeseen, noin 97 %:iin, päästäisiin valitsemalla nesteen virtaukseksi n. 3,4 l/min, kaasun syöttö olisi 4,2 kg/h, hiilidioksidin pitoisuus syötössä 10 % ja stripperin esilämmittimelle teho 3 kW. Käytännössä ainakaan stripperin esilämmittimen teho ei tule toteutumaan, sillä kohdelaitteistossa esilämmittimelle on säädöt 2,4 ja 6 kW. Liitteestä 4 kuitenkin nähdään, kuinka suuri vaikutus milläkin parametrilla on lopputulokseen. Näin voidaan todeta, että esilämmittimen teho ei juuri vaikuta lopputulokseen. Suurin vaikutus on hiilidioksidin pitoisuudella ja kaasun kokonaisvirtauksella. Koeajoilla oli hyvä toistettavuus, mikä näkyy liitteessä 5. Ainoastaan koeajoissa 5 ja 2 on havaittavissa hieman suurempaa poikkeamaa tuloksissa, muuten hajonta on erittäin pientä.

## 8 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli löytää absorptiokolonnille ne ajoasetukset, jotka tuottaisivat parhaan lopputuloksen. Teoriaosuudessa keskityttiin tarkastelemaan absorptiota sekä laitteen optimoimista ja suunnittelua Taguchi-menetelmällä. Taguchi-menetelmä oli keskeinen osa työtä, sillä optimointiin käytetty ohjelmisto, MODDE, perustuu menetelmään. Koeajoissa selvitettiin, kuinka kaasun ja nesteen syöttönopeus, hiilidioksidin pitoisuus ja stripperin esilämmittimen teho vaikuttavat absorption lopputulokseen. Tärkeimmät parametrit olivat kaasun nopeus sekä hiilidioksidin pitoisuus, sillä kolonnilla on tietty poistokapasiteetti.

Koeajoista havaittiin, että parhaimpaan absorptioon päästiin jokaisen koeajosarjan ensimmäisessä koeajossa. Ainostaan näillä arvoilla poistoaste ylitti 90 %. Optimoinnilla saadut arvot olivat ensimmäisen koeajon arvoista poikkeavia, mutta niiden mukaan poistoaste kasvaisi noin 4 %. Koeajoista kerätyistä tiedoista saatiin selville myös kolonnin poistokapasiteetti. Kolonni pystyi keskimäärin poistamaan hiilidioksidia n. 0,6 kg/h. Tämä oli hyvin riittävä kapasiteetti vielä silloin, kun liikuttiin pienimmissä virtauksissa ja pitoisuuksissa. MODDE-ohjelmistoa apuna käyttäen saatiin myös hyvin selville millaiset vaikutukset eri parametreilla oli. Luonnollisesti eniten vaikuttavat kaasun syöttönopeus sekä hiilidioksidin pitoisuus. Kaikista pienin vaikutus oli stripperin esilämmittimen teholla, noin 0,63 %.

## LÄHTEET

- Borg, S. 2013a. Aineensiirtoprosessit/ Kaasuabsorptio. Kurssimateriaali. Centria-ammattikorkeakoulu. Kokkola-Pietarsaaren yksikkö.
- Borg, S. 2013b. Prosessiteknikan harjoitustyöt/ Absorptio- Desorptiotyöohje. Kurssimateriaali. Centria-ammattikorkeakoulu. Kokkola-Pietarsaaren yksikkö.
- Karjalainen, E. 1999. Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla: Taguchi-menetelmä. 2. painos. Tampere: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- Kemira. 2014. Rikkihappo. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.kemira.com/fi/toimialat-sovellukset/Sivut/rikkihappo.aspx>. Luettu: 23.3.2014.
- McCabe, W.L., Smith, J.C., Harriot, P. 2005. Unit Operations of Chemical Engineering. 7. painos. New York. McGraw-Hill Company.
- Merck KGaA. 2012. Käyttöturvallisuustiedote. Pdf- dokumentti. Saatavissa: <http://www.merck-chemicals.com/products/109074?attachments=MSDSdetail&doc-country=FI&doclanguage=FI>. Luettu: 23.3.2014
- Oy AGA AB. 2013. Käyttöturvallisuustiedote. Www-dokumentti. Saatavissa: [http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/repositorybyalias/2teollisuus\\_hiilidio/\\$file/hiilidioksidi.pdf](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/repositorybyalias/2teollisuus_hiilidio/$file/hiilidioksidi.pdf). Muutettu: 28.1.2013. Luettu: 24.3.2014.
- Oy AGA AB. Hiilidioksidi turvallisuusohje. Www-dokumentti. Saatavissa: [http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/repositorybyalias/safetysh\\_hiilidio/\\$file/Hiilidioksidi\\_turvallisuusohje.pdf](http://www.aga.fi/international/web/lg/fi/like35agafi.nsf/repositorybyalias/safetysh_hiilidio/$file/Hiilidioksidi_turvallisuusohje.pdf). Luettu: 24.3.2014.
- Pihkala, J. 2003. Prosessiteknikan yksikköprosessit. 3. painos. Helsinki: Hakapaino Oy.
- Työterveyslaitos. 2013. Onnettomuuden vaaraa aiheuttavat aineet – turvallisuusohjeet, fosforihappo. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.ttl.fi/ova/fosforih.html>. Luettu: 3.4.2014.
- WHO, IPCS-ohjelma. 2005. Kemikaalikortti, etanolamiini. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0152.htm>. Suomennettu: 2006, Työterveyslaitos. Luettu: 9.4.2014.

TAULUKKO 1. Sarja 1. Tasoittumisnäytteet

Hiilidioksidin määrä millilitroina näytteessä						
Koeajo	Näyte 1		Näyte 2		Näyte 3	
	Absorp-tio	Desorp-tio	Absorp-tio	Desorp-tio	Absorp-tio	Desorp-tio
1	10,7	5,1	12,2	6	12,2	6
2	15,5	8,6	17,6	9,3	17,1	9,2
3	17,5	9,1	18,1	9,5	18,8	11
4	15,5	10,8	16,6	10,3	17,3	9,7
5	18,8	11	18,4	11,2		
6	15,7	4,4	17	7,7	16,8	10,2
7	16,7	10,5	16,8	10,5		
8	15,6	8,2	16,5	8,7		
9	18,1	12	19	12,4		

TAULUKKO 2. Sarja 2. Tasoittumisnäytteet

Hiilidioksidin määrä millilitroina näytteessä						
Koeajo	Näyte 1		Näyte 2		Näyte 3	
	Absorp-tio	Desorp-tio	Absorp-tio	Desorp-tio	Absorp-tio	Desorp-tio
1	15,7	10,6	16,7	11,4	16,2	9,7
2	19	11,5	19,3	12,2		
3	24,5	17,2	26,3	15,6	24,5	17,1
4	22,2	15,6	23,1	16,7		
5	25,8	14,3	20,1	13,5	20,3	12,3
6	19,8	12,9	19,6	13,6		
7	19,5	12,1	19,1	13,6	19	13,3
8	20,3	12,4	17,1	12,7		
9	21,1	18,5	20,7	16,2	21,7	16,5

TAULUKKO 3. Sarja 3. Tasoittumisnäytteet

Hiilidioksidin määrä millilitroina näytteessä						
Koeajo	Näyte 1		Näyte 2		Näyte 3	
	Absorp-tio	Desorp-tio	Absorp-tio	Desorp-tio	Absorp-tio	Desorp-tio
1	16,5	13,2	16	12,8		
2	20	11,7	19,3	12,4		
3	21,4	12,8	22,1	13,9		
4	19,4	13,6	19,2	13,5		
5	21,3	14,6	22,5	14,5		
6	20,5	14,5	20,7	14,5		
7	21,3	14,5	21	15,1		
8	20,6	12,5	19,4	12,5		
9	21	13,1	20,5	13,4		

TAULUKKO 4. Sarja 1. Koeajoarvot

Koe- ajo	Kaasu sis.	Kaasu ulos	Neste sis.	Neste ulos	Stripperi neste sis.	Stripperi paine	Absorber paine	CO2 sis.	CO2 pois
yk- sikkö	oC	oC	oC	oC	oC	kPa	mbar	%	%
1	17,2	21	19,4	25,2	74,9	9,2	1,2	10	0,7
2	22,1	25,5	26,8	23,9	86,6	9,1	3,5	15,2	9,2
3	23,5	28,6	30,6	27,1	87,6	9	7,4	19,9	17,6
4	20,7	27,1	21,5	30,6	82,9	9,3	4,2	9,8	4
5	23,4	25,3	19,7	27,8	73,6	9,1	1	15,2	10,2
6	22	23,8	18,5	32,3	84,7	9,1	1,5	20	7,2
7	19,6	24,4	25,5	23,5	82,4	9,5	11,6	10	6,1
8	18,9	27,8	32	27	82,5	9,4	2,6	15,7	2,2
9	22,1	23,3	19	32,8	73,4	9,1	6,9	20	14,5

TAULUKKO 5. Sarja 2. Koeajoarvot

Koe- ajo	Kaasu sis.	Kaasu ulos	Neste sis.	Neste ulos	Stripperi neste sis.	Stripperi paine	Absorber paine	CO2 sis.	CO2 pois
yk- sikkö	oC	oC	oC	oC	oC	kPa	mbar	%	%
1	17,3	24,6	27,1	23	74,6	9,1	1,2	9,8	0,7
2	21,1	20,7	19,4	26,4	86,8	9,2	3,8	14,9	9,1
3	23,4	19,9	16,5	29,2	86,2	9,1	7,6	20	19,1
4	17,1	25,4	26,9	23,5	84	9,4	4,8	9,4	3,6
5	23,6	21,5	17	31,5	74	9,1	10,4	15	11,6
6	19,1	22,8	21,4	26,4	85,5	9,7	2,5	20	8
7	19,8	21,7	18,2	28,4	82,4	9,5	17,7	9,9	5,8
8	17,1	24,3	26,9	23,6	83	9,1	2,7	14,4	1,9
9	21,2	29,6	32,1	31,2	73,2	9,3	6,1	20	14,1



TAULUKKO 6. Sarja 3. Koeajoarvot

Koe- ajo	Kaasu sis.	Kaasu ulos	Neste sis.	Neste ulos	Stripperi neste sis.	Stripperi paine	Absorber paine	CO2 sis.	CO2 pois
yk- sikkö	oC	oC	oC	oC	oC	kPa	mbar	%	%
1	18,4	21,4	19,2	25,6	74,7	9,3	1,7	9,2	0,9
2	21,2	20,6	19,4	26,5	86,8	9,1	3,6	15	7,6
3	24	30,5	31,1	28,4	78,6	8,9	8,1	20	17,9
4	24,2	29,2	31,1	29,4	84,9	9	4,5	9,9	3,6
5	23,6	29,6	32	29,3	74,8	9	9,9	15,5	10,2
6	22,2	25,3	19,6	31,9	85,5	9	2,2	20	5,8
7	22,9	23,2	24,5	23,3	84	9,3	8	10,4	5,2
8	21,8	22,6	22	23	81,5	9	0,7	15,9	2,4
9	22,3	29,1	32,1	33,3	74	9,5	2,5	20	14,7

TAULUKKO 7. Sarja 1. Laskut ja tulokset

Ko eaj o	Kaasu si- sään [kg/h]	Ilma sisään ja ulos [kg/h]	CO2 sis. Til %	CO2 ulos Til- %	CO2 sis. Mas- %	CO2 ulos Mas-%	CO2 sis. [kg/h]	CO2 ulos [kg/h]	Pois- toast e
1	3,50	2,99	10,00	0,70	14,44	1,06	0,51	0,03	93,6 6
2	7,00	5,50	15,20	9,20	21,40	13,34	1,50	0,85	43,4 7
3	10,50	7,62	19,90	17,60	27,40	24,49	2,88	2,47	14,0 3
4	7,00	6,01	9,80	4,00	14,16	5,95	0,99	0,38	61,6 5
5	10,50	8,25	15,20	10,20	21,40	14,71	2,25	1,42	36,6 3
6	3,50	2,54	20,00	7,20	27,52	10,54	0,96	0,30	68,9 7
7	10,50	8,98	10,00	6,10	14,44	8,98	1,52	0,89	41,5 3
8	3,50	2,73	15,70	2,20	22,05	3,30	0,77	0,09	87,9 2
9	7,00	5,07	20,00	14,50	27,52	20,48	1,93	1,31	32,1 6

TAULUKKO 8. Sarja 2. Laskut ja tulokset

Ko eaj o	Kaasu si- sään [kg/h]	Ilma sisään ja ulos [kg/h]	CO2 sis. Til %	CO2 ulos Til- %	CO2 sis. Mas- %	CO2 ulos Mas- %	CO2 sis. [kg/h]	CO2 ulos [kg/h]	Pois- toast e
1	3,50	3,00	9,80	0,70	14,16	1,06	0,50	0,03	93,5 1
2	7,00	5,53	14,90	9,10	21,01	13,20	1,47	0,84	42,8 2
3	10,50	7,61	20,00	19,10	27,52	26,39	2,89	2,73	5,56
4	7,00	6,05	9,40	3,60	13,61	5,37	0,95	0,34	64,0 1
5	10,50	8,28	15,00	11,60	21,14	16,62	2,22	1,65	25,6 4
6	3,50	2,54	20,00	8,00	27,52	11,67	0,96	0,34	65,2 2
7	10,50	9,00	9,90	5,80	14,30	8,55	1,50	0,84	43,9 6
8	3,50	2,79	14,40	1,90	20,35	2,86	0,71	0,08	88,4 9
9	7,00	5,07	20,00	14,10	27,52	19,96	1,93	1,26	34,3 4

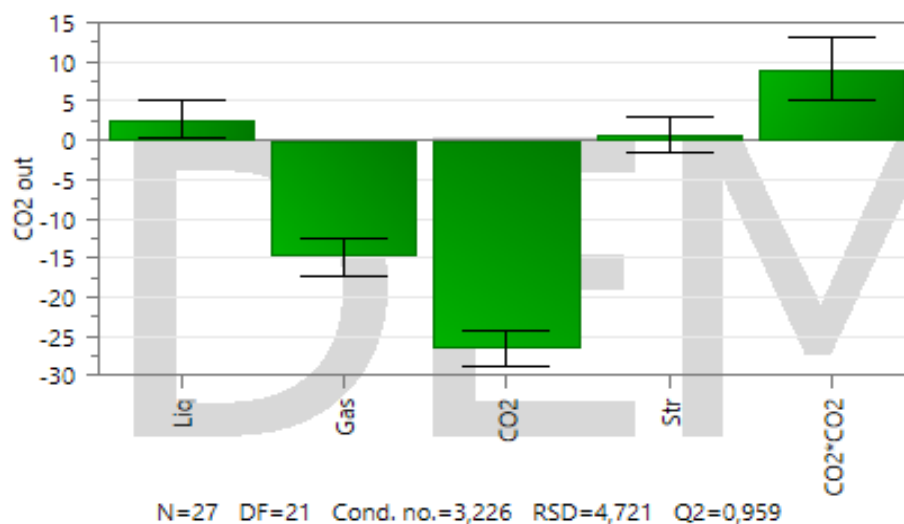
TAULUKKO 9. Sarja 3. Laskut ja tulokset

Ko eaj o	Kaasu si- sään [kg/h]	Ilma sisään ja ulos [kg/h]	CO2 sis. Til %	CO2 ulos Til- %	CO2 sis. Mas- %	CO2 ulos Mas- %	CO2 sis. [kg/h]	CO2 ulos [kg/h]	Pois- toast e
1	3,50	3,03	9,20	0,90	13,34	1,36	0,47	0,04	91,0 4
2	7,00	5,52	15,00	7,60	21,14	11,11	1,48	0,69	53,3 9
3	10,50	7,61	20,00	17,90	27,52	24,88	2,89	2,52	12,7 9
4	7,00	6,00	9,90	3,60	14,30	5,37	1,00	0,34	66,0 1
5	10,50	8,21	15,50	10,20	21,79	14,71	2,29	1,42	38,0 8
6	3,50	2,54	20,00	5,80	27,52	8,55	0,96	0,24	75,3 7
7	10,50	8,93	10,40	5,20	14,99	7,69	1,57	0,74	52,7 4
8	3,50	2,72	15,90	2,40	22,31	3,60	0,78	0,10	86,9 9
9	7,00	5,07	20,00	14,70	27,52	20,74	1,93	1,33	31,0 7

TAULUKKO 10. Optimoidut parametriarvot


	Response	Criterion	Value	Graph	log(D)	DPMO	Cpk
1	CO2 out	Maximize	94,3544		-10	0	10,1053
	Factor	Role	Value	Graph	Factor contribution		
1	Liquid	Free	3,43972		6,04961		
2	Gas	Free	4,21698		33,1996		
3	CO2	Free	10,0028		59,3513		
4	Stripperi	Free	3,0203		1,39948		


TAULUKKO 11. Parametrien vaikutus absorptioon lopputulokseen

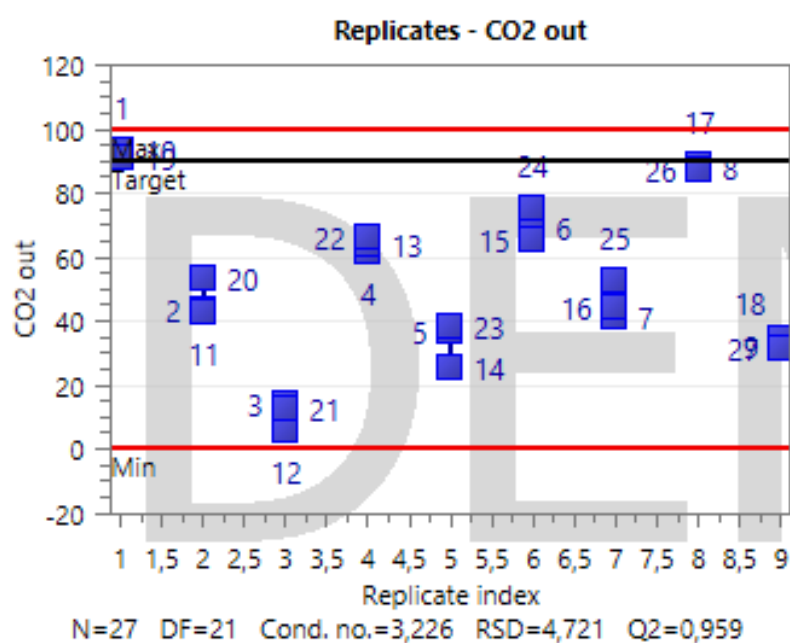


### Coefficient plot

A graphical presentation of the significance of the model terms.

 A significant model term.

 A non-significant model term.



KUVIO 1. Tulosten hajonta.