

KOESUUNNITTELU POLTTIMEN TUOTEKEHITYSPROJEKTISSA

Case: 11,1 MW monoblock-poltin

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Kone- ja tuotantotekniikka
Tuotantopainotteinen mekatroniikka
Opinnäytetyö
14.4.2011
Elli Hoppania

Lahden ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotalouden koulutusohjelma

HOPPANIA, ELLI: Koesuunnittelu polttimen tuotekehitysprojektissa
Case: 11,1 MW monoblock-poltin

Tuotantopainotteisen mekatroniikan opinnäytetyö, 71 sivua, 4 liitesivua

Kevät 2011

TIIVISTELMÄ

Noin 75 % Suomessa nykyisin tuotetusta energiasta syntyy erilaisissa polttoprosesseissa. Samaan aikaan polttaminen on suurin haitallisten päästöjen, kuten rikin ja typen oksidien ja hiukkaspäästöjen lähde. Kansainväliset sopimukset, direktiivit ja kansalliset lait asettavat siksi rajat päästöjen sallitulle määrälle.

Kokeellista tutkimusta käytetään prosessin ymmärtämiseen ja kehittämiseen, joten se on tärkeässä roolissa tuotekehitystoiminnassa. Kokeellisen tutkimuksen avulla voidaan havaita ne vaikutukset, jotka syötemuuttujien tarkoituksellinen muuttaminen aiheuttaa. Koesuunnittelu koostuu tekniikoista joiden avulla voidaan tehdä hyviä kokeita, analysoida data tehokkaasti ja tehdä johtopäätöksiä, jotka on suhteutettu kokeiden alkuperäisiin tavoitteisiin.

Tutkimus tehtiin Oilon Oy:n toimeksiannosta uuden tuotteen lanseerauksen yhteydessä. Tuote oli monoblock -tyyppinen kaasupoltin, jonka maksimiteho oli 11,1 MW. Työn tavoite oli tutkia, soveltuuko koesuunnittelumenetelmien käyttö polttimen tuotekehitykseen. Tärkein vaste kokeissa oli typen oksidien määrä savukaasuissa, ja tavoitepäästöarvoksi polttimelle asetettiin 39 ppm. Ohjelmistot ja asiantuntija-apua saatiin Numerola Oy:ltä. Tehtiin kaksi koesarjaa: ensin tutkittiin kolmea polttimen mekaanisen puolen ominaisuuksia koskevaa muuttujaa kolmella tasolla. Neljäs muuttuja, polttoainetehto, tutkittiin kahdella tasolla, sillä haluttiin tietää, mikä oli tutkittavien kolmen muuttujan vaikutus eri tehoalueilla. Tehtiin koe, johon kuului 20 koepistettä. Kokeiden analyysissä selvisi, että tärkeimmät NO_x määrään vaikuttavat tekijät olivat primäärikaasusauvan sisähalkaisija sekä teho. Näillä tärkeimmillä muuttujilla tehtiin toinen koe, jossa koepisteitä oli 8. Lopulta alitettiin asetettu tavoiteraja maksimiteholla raja testikattilassa.

Tutkimuksen perusteella koesuunnittelu on tehokas menetelmä polttimen kehitystyössä, joskin vastaisuudessa on suositeltavaa pitäytyä klassisissa koeasetelmissä. Eriyisen hyödyllistä koesuunnittelun soveltaminen on päätöksentekijöille, koska olennainen osa koesuunnittelua on tuottaa merkityksellisiä ja täsmällisiä johtopäätöksiä kokeiden tuloksista. Koesuunnittelu näyttää säästävän rahaa ja jopa aikaa.

Avainsanat: Koesuunnittelu, DoE, poltin, tuotekehitys, päästöt, NO_x:n vähentäminen

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Engineering

HOPPANIA, ELLI:

Design of experiments in burner product
development project
Case: 11,1 MW monoblock burner

Bachelor's Thesis in Production oriented Mechatronics, 71 pages, 4 appendices

Spring 2011

ABSTRACT

About 75 % of power produced in Finland today is from different combustion processes. At the same time combustion is the main source of harmful emissions such as sulfur and nitrogen oxides or particulate matter. International agreements, directives and national law therefore control the amount of emissions combustion equipment is allowed to generate.

Experimental research is used to understand and improve a process, so it is of the essence in product development. It allows the researcher to find out the effects in output variable when an input variable is purposely changed. Design of experiments includes techniques to conduct good quality experiments, analyze the data efficiently and make conclusions that relate to the original objectives of the investigation.

The study was commissioned by Oilon Oy as a part of new product launch. The product was a monoblock type gas burner with fuel power of 11,1 MW. The objective was to investigate whether design of experiments would be a useful method in burner product development. The main response was the amount of NO_x in flue gas and target was to reach emission limit 39 ppm. Software as well as some professional help was provided by Numerola. Two series of experiment were conducted. First were three factors concerning the burners mechanical properties studied in three levels. Fourth factor, power, was applied in two levels, for the effect of the three factors in different levels of power was of interest. 20 runs were made. Analysis of the experiments showed that most important factors having effect on the amount of NO_x were the diameter of primary fuel pipe and the power. Another experiment with 8 runs was carried out with these factors, and finally the emissions limit for NO_x was obtained on maximum power in the test combustion chamber.

On basis of this study design of experiments is efficient in burner development, even though more formal application in future is recommended. Especially beneficial experimental designing is for decision makers because essential part of DoE is to generate meaningful and accurate conclusions from experiments. Applying DoE seems to save money and even time.

Key words: Design of experiments, DoE, burner, product development, emissions, NO_x reduction

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
1.1	Yritysesittely	2
1.2	Työn tavoitteet	3
2	POLTTAMINEN: ENERGIAA JA PÄÄSTÖJÄ	5
2.1	Energia Suomessa	6
2.2	Polttoaineet	7
2.3	Poltinpoltto	9
2.4	Polttamisen päästöt	11
2.5	Päästöjen vaikutus ympäristöön ja terveyteen	13
2.6	Lainsäädäntö ja kansainväliset sopimukset	14
3	KOESUUNNITTELU (DESIGN OF EXPERIMENTS)	17
3.1	Koesuunnittelun lyhyt historia	17
3.2	Koesuunnittelun tarkoitus ja logiikka	19
3.3	Koesuunnittelun perustyökälu	21
3.4	Kokeiden suunnittelu	22
3.4.1	Tutkimusongelman muotoilu	23
3.4.2	Käsittelytekijöiden, tasojen ja vaihteluvälien valinta	23
3.4.3	Koeasetelman valinta	26
3.5	Kokeiden suorittaminen	27
3.6	Tulosten analysointi	27
3.6.1	Tilastolliset testit	28
3.6.2	ANOVA, F-testi	30
3.6.3	Yksinkertaiset graafiset menetelmät	31
3.6.4	Regressioanalyysi	33
3.7	Johtopäätökset ja suositukset	36
4	CASE: 11,1MW MONOBLOCK	37
4.1	Monoblock -projekti	37
4.2	Tutkimusongelman määrittely	38
4.3	Käsittelytekijöiden valinta, tasot, hajonta	38
4.3.1	Liekkilevyn sisähalkaisija	41
4.3.2	Primäärikaasusauvan sisähalkaisija	43
4.3.3	Sekundäärikaasusauvan etäisyys palopään putkesta	44
4.3.4	Teho	45

4.4	Vaste	46
4.5	Koeasetelman määrittely	47
4.6	Mittaaminen	49
4.7	Polttokokeiden suorittamien	51
4.8	Tulosten analysointi	54
4.8.1	Typen oksidit savukaasuissa	54
4.8.2	Muita vaikutuksia	63
4.9	Johtopäätökset ja suositukset	65
4.10	Varmistuskoe	66
5	PÄÄTÄNTÄ	68
	LÄHTEET	72
	LIITTEET	74
	Liite 1: Polttoainetehon laskeminen ja kaasumäärän mittaaminen	74
	Liite 2: Koematriisi	75
	Liite 3: Toimilaitteiden asetukset	76
	Liite 4: NO _x mittaaminen	78

ALKUSANAT

Kiitän Oilon Oy:ta mahdollisuudesta tehdä tämä opinnäytetyö. Kiitos TkT Ari Saario, opinnäytetyön ohjaajana toimimisesta ja kaikesta avusta. Kiitos myös kaikille työtovereille Oilonilla avusta ja osaamisesta; erityinen kiitos ins. Jarmo Ha-veriselle, ins. AMK Jussi Vilhulalle sekä ins. AMK Ari Rautiolle. Numerola Oy:sta tahdon kiittää DI Riku Suutaria ja FM, DI Michael Harasta, joiden asiantuntemus oli korvaamatonta. Kiitos rakkaat kotijoukot Tommi, Eero ja Jouko!

SANASTO

Koesuunnittelusta on olemassa vain vähän suomenkielistä lähdemateriaalia, ja siksi tässä sanastossa annetaan käyttämilleni termeille englanninkielinen vastine (kirjoitettu kursivilla) sekä suomenkielinen määritelmä. Olen pyrkinyt tässä opinnäytetyössä käyttämään tilastotieteeseen vakiintuneita suomenkielisiä termejä sekaannusten välttämiseksi. Jollekin sanoille olen halunnut esittää englanninkielisen vastineen, mutta en sisällyttää sanastoon. Näille sanoille on tekstissä englanninkielinen termi lisätty sulkeissa suomenkielisen sanan jälkeen. Tässä esitetyt määritelmät ovat Suomen Standardoimisliitto SFS Ry:n julkaisemasta SFS-käsikirja 178: tilastollinen laatusanasto 2007.

1. lajin virhe α , *type 1 error*

Nollahypoteesin hylkääminen sen ollessa tosi

2. lajin virhe β , *type 2 error*

Vaihtoehdoisen hypoteesin hylkäämättä jättäminen, kun se on todellisuudessa epätosi

Hypoteesi, *hypothesis*

Populaatiosta esitetty väittämä

Estimaattori, *estimator* θ

Parametrin θ estimointiin käytetty tunnusluku

Estimointi, *estimation*

Menettely perusjoukon tilastolliseksi kuvaamiseksi otoksen perusteella

Faktori, *factor*

Käsittelytekijä, eli selittävä muuttujan, jonka arvoa muutetaan, jotta selvitetäisiin sen vaikutus vastemuuttujaan

Haittatekijä, *nuicance variable*

Tekijä, jonka tiedetään vaikuttavan vasteeseen, mutta jota ei haluta tutkia

Järjestysasteikko, *ordinal scale*

Mitta-asteikko, joka koostuu nimetyistä, järjestyksellisistä ryhmistä; esimerkkinä sotilasarvot

(Otoksen) keskiarvo, *sample mean, average, arithmetic mean*

Satunnaismuuttujien summa jaettuna havaintojen lukumäärällä.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

(Otoksen) keskihajonta, *sample standard deviation, S*

Varianssin positiivinen neliöjuuri

Ortogonaalinen asetelma, *orthogonal design*

Asetelma, jossa kaikki faktorit ovat pareittain ortogonaalisia, eli kaikilla i ja j

$$n_{ij} = \frac{n_i n_j}{N}$$

jossa n_{ij} on tasoyhdistelmän (i, j) esiintymiskertojen lukumäärä jossain asetelmamatriisin sarakeparissa, n_i on tason i esiintymiskertojen lukumäärä toisesta näistä saarekkeista ja n_j on tason j esiintymiskertojen lukumäärä toisessa, ja N on koeyksiköiden kokonaismäärä.

Koeasetelma, *experimental plan*

Käsittelyiden kohdistaminen koeyksikölle ja niiden toteutusjärjestys

Koeyksikkö, *experimental unit*

Yksikkö johon kohdistetaan tietty käsittely, mikä johtaa havaintoon vastemuuttujasta

Käsittelytekijä, *treatment factor*

Tekijä, jonka tason tutkija voi säätää haluamakseen kunkin havainnon kohdalla

Merkitsevyysaste, *significance level, α*

Suurin todennäköisyys hylätä tosi nollahypoteesi

Malli, *model*

Vastemuuttujan selittäviin muuttujiin liittävä kuvaus, joka sisältää myös tarvittavat oletukset. Mallissa on kolme osaa: 1. vastemuuttuja, joka mallinnetaan, 2. deterministinen osa, johon kuuluvat selittävät muuttujat, 3. satunnainen osa

Mitta-asteikko, *scale*

Ominaisuuksia kuvaavien arvojen järjestelmä. Arvo tulee ymmärtää laajasti: se voi olla laadullinen tai määrällinen.

Perusjoukko, *populaatio, population*

Kaikkien kiinnostuksen kohteena olevien yksilöiden joukko. Se voi olla todellinen tai hypoteettinen ja kooltaan äärellinen tai ääretön.

Päävaikutus, *main effect*

Yksittäisen faktorin vaikutus vastemuuttujan keskiarvoon

Suhdeasteikko, *ratio scale, proportional scale*

Tasavälinen jatkuva tai diskreetti mitta-asteikko, jolla on absoluuttinen tai luonnollinen nollakohta; esimerkkinä lämpötila Kelvin-asteina ja kappaleen massa

Taso, *level*

Käsittelytekijän mahdollinen arvo, asetus tai valinta

Tilastollinen menetelmä, *statistical method*

Satunnaisuuden vaikutuksen huomioon ottava menetelmä tiedon keräämiseksi, analysoimiseksi tai tulkitsemiseksi. Aineisto voi olla numeerista, symbolista tms.

Tilastollinen testi, *statistical test, significance test*

Menettely, jolla voidaan päättää, tuleeko nollahypoteesi hylätä

(Otoksen) varianssi, *sample variance* S^2

Otoksen keskistettyjen satunnaismuuttujien neliöiden summa jaettuna luvulla havaintojen lukumäärä miinus yksi

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

Varianssianalyysi, *analysis of variance, ANOVA*

Menetelmä vastemuuttujan kokonaisvaihtelun jakamiseksi määrättyihin vaihtelun lähteisiin liittyviin komponentteihin.

Yhdysvaikutus, yhteisvaikutus, *interaction, differential effect*

Vaikutus, joka yhden faktorin osalta riippuu yhdestä tai useammasta muusta faktorista. Yleensä yhdysvaikutuksessa on mukana vain kaksi faktoria, jolloin puhutaan pareittaisesta yhdysvaikutuksesta tai ensimmäisen asteen yhdysvaikutuksesta. Vastaavasti voitaisiin puhua toisen, kolmannen jne. asteen yhdysvaikutuksesta.

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö käsittelee tilastollisen koesuunnittelun soveltamista poltinpoltton kokeelliseen tutkimukseen tuotekehityksessä. Työ on tehty Oilon Oy:lle, joka on poltto- ja energiatekniikkaan erikoistunut suomalainen yritys. Opinnäytetyön kokeellinen osa tehtiin osana uuden poltinsovelluksen tuotekehitysprosessia. Kyseessä oli GP-1000M – tyyppinen puhallinpoltin, jonka prototyypin ensimmäiset koeajot suunniteltiin käyttäen hyväksi tilastollisia menetelmiä.

Suurin osa ihmisten käyttämästä energiasta saadaan erilaisia polttoaineita polttamalla. Kun aine palaa, se reagoi hapen kanssa ja lopputuotteeksi jää erilaisia oksideja, typpeä ja pieniä määriä muita aineita; tämä reaktio on eksoterminen eli siinä vapautuu energiaa. Polttamisen suuresta volyyymista aiheutuu myös suuri määrä päästöjä ja saasteita. Kasvihuoneilmiö, happamoituminen, raskasmetallien ja pienhiukkasten aiheuttamat terveyshaitat johtuvat kaikki osaltaan polttamisesta. Näitä haittavaikutuksia pyritään minimoimaan paitsi siirtymällä kokonaan uusiin energianlähteisiin, myös kehittämällä olemassa olevaa polttotekniikkaa vähäpäästöisemmäksi.

Lainsäädännöllä ja standardeilla on puututtu siihen, minkä määrän päästöjä polttolaitteet saavat tuottaa palamisen aikana. Polttolaitteiden ja -tekniikan standardienmukaisuus todennetaan polttokokeilla. Empiiriset polttokokeet ovat myös tärkeä osa tuotekehitystyötä. Polttimien suunnittelun apuna voidaan käyttää tietokoneavusteista mallinnusta (Computational Fluid Dynamics, CFD). Kuitenkin tarvitaan myös empiirisiä polttokokeita, jotta saadaan tietoa siitä, kuinka kehitystyössä tehdyt päätelmät käytännössä toteutuvat. Kokeet sitovat teorian todellisuuteen, ja toisaalta teoreettinen tarkastelu vahvistaa koetulosten käyttökelpoisuutta. Empiiriset kokeetkaan eivät ole tulkinnaltaan yksiselitteisiä, vaan mittausvirhettä voi aiheutua esimerkiksi mittausvälineistä, ympäristön olosuhteista tai mittaajasta. Sattunnainen virhe on mittauksissa aina läsnä. Kun kokeet halutaan tehdä mahdollisimman hyvin ja tehokkaasti, on suositeltavaa ottaa käyttöön tieteellinen lähestymistapa kokeiden suunnitteluun ja analysointiin. Koesuunnittelu-termi (Design of Experiments, DoE) viittaa käytäntöön, jossa kokeet suunnitellaan siten, että niissä kerätään tarkoituksenmukaista dataa, suoritetaan vähimmäismäärä kokeita tarvit-

tavan datan hankkimiseksi ja käytetään soveltuvia tilastollisia menetelmiä kerätyn datan analysointiin. Koesuunnittelu sisältää runsain määrin erilaisia menetelmiä koetulosten merkityksen arvioimiseksi ja soveltuvan koeasetelman luomiseksi. Luvussa 4 keskitytään koesuunnittelun ja tilastollisen testaamisen yleiseen teoriaan ja yleisimmin käytettyihin koesuunnittelumenetelmiin. Erityistä huomiota kiinnitetään tapaustutkimuksessa käytettyihin metodeihin, 3^3 - koeasetelmaan ja regressioanalyysiin.

Tämän opinnäytetyön tutkimusosassa käytettiin koesuunnittelun menetelmiä uuden poltintuotteen tutkimiseen. Tutkittiin kolmen mekaanisen osan vaikutusta kolmella tasolla sekä poltintehon vaikutusta kahdella tasolla. Vasteena oli useita muuttujia, joista tärkein oli typen oksidit eli NO_x :t. Tavoitteena oli alittaa päästöluokka 3 raja (39 ppm) typen oksidipäästöissä. Koesuunnittelun soveltaminen oli hyödyllistä lopputuloksen kannalta: koesarja jäi kohtuullisen kokoiseksi, ja sen pohjalta voitiin päätellä, mitkä tekijät olivat merkityksellisiä ja mitkä vähemmän tärkeitä. Jatkettiin kiinnostavan muuttujan tutkimista, ja lopulta saavutettiin myös päästötavoite koekattilassa. Koesuunnittelun periaatteiden käyttämisellä tuotekehityksessä on monia etuja: kokeiden hyvä suunnittelu johtaa tuloksiin, joista voidaan tehdä niitä päätelmiä, joita kehitystyössä tarvitaan. Koetulosten järjestelmällinen kirjaaminen ja tallennus toteutusvaiheessa auttavat hyödyntämään tuloksia myös myöhemmin ilmeneviin tarkoituksiin. Koesuunnittelun analyysimenetelmät ovat selkeitä ja helpottavat päätöksentekoa. Koesuunnittelun käyttäminen myös alentaa niitä kustannuksia, joita tiedon hankkiminen aiheuttaa.

1.1 Yritysesittely

Oilon on Lahdessa vuonna 1961 perustettu perheyhtiö, jonka päätuotteet ovat polttolaitteet kaasumaisille ja nestemäisille polttoaineille. Oilon Oy on emoyhtiö Oilon International Oy:n teollisuuskokoluokan polttimiin keskittyvä tytäryhtiö. Toimipaikka on Lahden Metsä-Hennalassa. Muita konserniin kuuluvia yhtiöitä ovat kotitalouksien lämmittämiseen keskittyvä Oilon Home Oy, suuriin teollisuus- ja prosessipolttimiin keskittyvä Oilon Energy Oy, ja uuden teknologian kehittäjä Ecopower Technology Oy. Oilon Oy:n tuotteita käytetään useimmiten voimalai-

toksissa, kaukolämpökeskuksissa, laivoissa ja teollisuudessa erilaisten prosessien vaatiman lämmön tai höyryn tuotantoon. (Oilon Oy 2010.)

Vuonna 2009 konsernin liikevaihto oli n. 40 miljoonaa euroa ja yhtiö työllisti noin 280 henkilöä. Hallituksen puheenjohtajana toimii Päivi Leiwo ja toimitusjohtajana Eero Pekkola. Myyntiyhtiöitä Oilonilla on ulkomailla neljä ja myyntiedustajia noin 40 ympäri maailmaa. Oilonin missio on tarjota ympäristöystävällistä energiaa asiakkailleen ja visio on tuottaa kestävän kehityksen mukaisia energiaratkaisuja asiakkailleen. (Oilon Oy 2010.)

Tuotekehitykseen Oilonin liikevaihdosta käytetään noin viisi prosenttia vuosittain. Tuotekehityksen tavoitteita ovat päästöjen vähentäminen, uusiutuvien sekä huonolaatuisten polttoaineiden poltto, energiatehokkuuden ja hyötysuhteen parantaminen, luotettavuus ja huollon helppous, sekä tyylikäs muotoilu. Tuotekehitysosastoon kuuluvassa testauslaboratoriossa on mahdollista suorittaa monipuolisia polttokokeita: myös standardienmukaisuus todetaan yleensä yhtiön omassa akkreditoitussa laboratoriossa. Oilonilla on käytössä ISO 9001-laatusjärjestelmä, sekä ISO 14001:n mukainen ympäristöhallintajärjestelmä. (Oilon Oy 2010.)

1.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön on tarkoitus antaa selkeä kuva siitä, mitä koesuunnittelu on ja minkälaiseen teoriaan se nojaa. Tutustumalla riittävän kattavasti teoreettiseen perustaan on mahdollista soveltaa koesuunnittelua poltinpoltton tutkimiseen. Tutkimusosan tavoite oli soveltaa koesuunnittelua uuden poltintuotteen tuotekehitysprosessissa. Tavoite oli löytää soveltuva menetelmä, jolla saavutettaisiin etua Oilonilla aikaisempiin toimintatapoihin nähden.

Tuotekehitys on Oilonin liiketoiminnassa keskeisessä asemassa: asiakkaat, lainsäädäntö ja ympäristön tila vaativat aina parempaa ja vähäpäästöisempää poltto-tekniikkaa. Tämä vaatii tuotekehitykseltä tehokasta toimintaa. Soveltamalla tilastollisia menetelmiä testaustoiminnassa pyrittiin saamaan hyvälaatuista tietoa kehitteillä olevan polttimen eri rakenteista ja niiden vaikutuksista esimerkiksi päästöjen tasoon. Perusteltu tieto, joka sisältää arvion virheen tekemisen todennäköi-

syydestä, helpottaa päätöksentekoa tuotekehityksen edetessä. Tavoitteena oli sekä tutkia kehitteillä olevan tuotteen ominaisuuksia, että etsiä sopivat koesuunnittelun menetelmät poltinpoltton tutkimiseen.

Teoriaosan toinen tavoite on perehdyttää lukija polttamiseen, päästöihin ja päästöjen ympäristövaikutuksiin, jotta lukijan olisi mahdollista muodostaa selkeä kuva työn taustasta ja toimintaympäristöstä energia-alalla. Myös poltinpolttoa on käsitelty yleisesti luvussa kaksi.

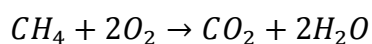
Koesuunnittelun toteutuksen apuna käytettiin kahta tietokoneohjelmaa, jotka hankittiin yritykseen tätä projektia varten. Ohjelmat olivat suomalaisen Numerola Oy:n kehittämät koeajovelho DOE koeasetelmien luontiin, sekä Datain datan analysointiin. Työn tavoitteena oli myös saada kokemusta näiden ohjelmien käytöstä ja käyttökelpoisuudesta Oilonilla.

2 POLTTAMINEN: ENERGIAA JA PÄÄSTÖJÄ

Tuli ja polttaminen ovat arkipäiväisiä asioita. Ihmisten käyttämästä energiasta suurin osa saadaan erilaisista polttoprosesseista, eikä asiaan ole näkyvissä muutosta lähiaikoina. (Raiko ym. 2002, 23.) Esiteollisella ajalla puun polttaminen oli Suomessa pääasiallinen energiantuotantomuoto, mutta teollistumisen myötä tuontienergia, kuten fossiiliset öljy ja maakaasu yleistyivät. Vesivoima on Suomessa 1800-luvulta teollisuuden käytössä ollut vaihtoehto polttamiselle, myöhemmin tulivat ydinvoima sekä tuuli- ja aurinkoenergia. Polttamisen seurauksena syntyvät päästöt ja niiden ympäristövaikutukset ovat ongelmallisia, kuten myös fossiilisten polttoaineiden rajallisuus. Polttotekniikkaa pyritäänkin jatkuvasti parantamaan niin, että päästöt jäisivät mahdollisimman pieniksi ja polttoaineen energia saataisiin hyödynnettyä mahdollisimman suurella hyötysuhteella; tämä kehitys on välttämätöntä, jotta ympäristövaikutukset saadaan rajattua kestäväälle tasolle. (VTT 2004, 14; Raiko ym. 2002, 25.)

Palaminen on kemiallinen reaktio, jossa polttoaineen sisältämät alkuaineet reagoivat hapen kanssa. Tällöin polttoaineen kemiallinen energia muuttuu lämpöenergiaksi. Atomitasolla lähtöaineiden heikot sidokset purkautuvat ja korvautuvat vahvemman sidosenergian sidoksilla palamistuotteissa. Ylimääräinen sidosenergia vapautuu ympäristöön lämpönä. Palamisreaktion edellytyksinä ovat polttoaine, happi, riittävän korkea lämpötila sekä esteetön ketjureaktio. (Raiko ym. 2002, 31.)

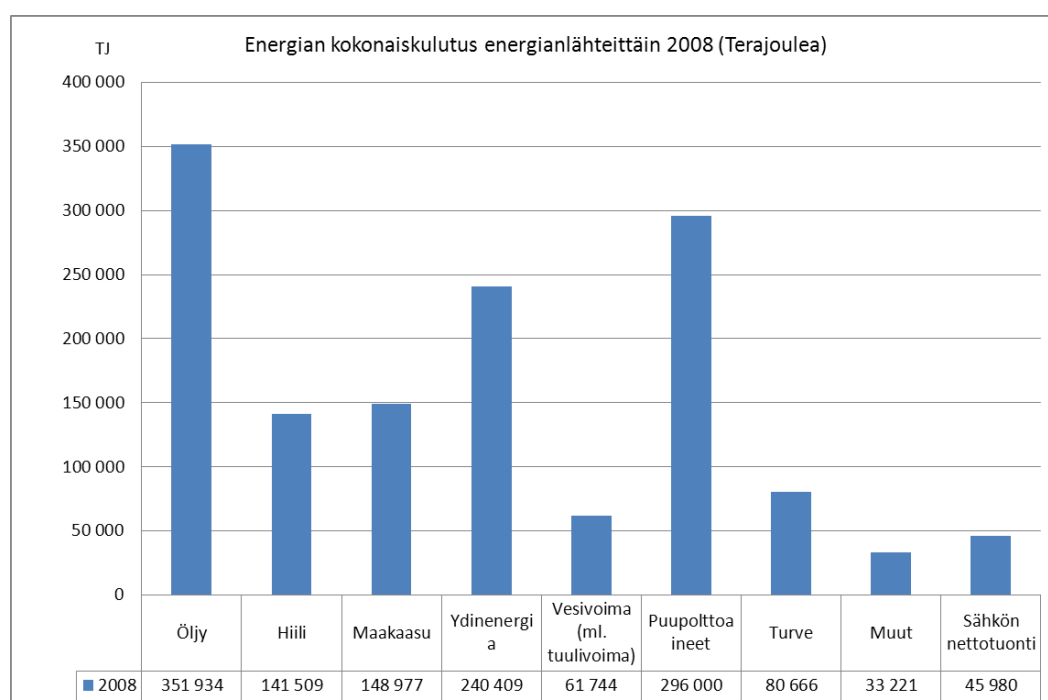
Esimerkiksi metaanin palamisen reaktioyhtälö on muotoa



Yhtälössä vasemmalla ovat lähtöaineet metaani ja happi, ja oikealla reaktiotuotteet hiilidioksidi ja vesi. Todellisuudessa reaktio on monin kerroin mutkikkaampi: lähtöaineita on lukuisa määrä riippuen polttoaineen koostumuksesta, reaktio tapahtuu monessa vaiheessa, eikä palaminen ole koskaan täydellistä. Siksi reaktiotuotteena on hapen yhdisteiden lisäksi myös kiintoaineita ja tuhkaa sekä muita päästökomponentteja. (Raiko ym. 2002, 62, 371.)

2.1 Energia Suomessa

Energiaa kulutettiin Suomessa vuonna 2008 1379,3 petajoulea. Samana vuonna noin 75 % tuotetun energian kokonaismäärästä tuotettiin erilaisissa polttoprosesseissa. Merkittävimpiä polttoaineita olivat tuontilähteistä erilaiset öljytuotteet, hiili ja maakaasu. Kotimaisia polttoaineita ovat lipeät, polttoturve sekä puu eri muodoissaan. Kuvio 1 havainnollistaa eri energianlähteiden suhteellista osuutta energian tuotannossa Suomessa vuonna 2008.

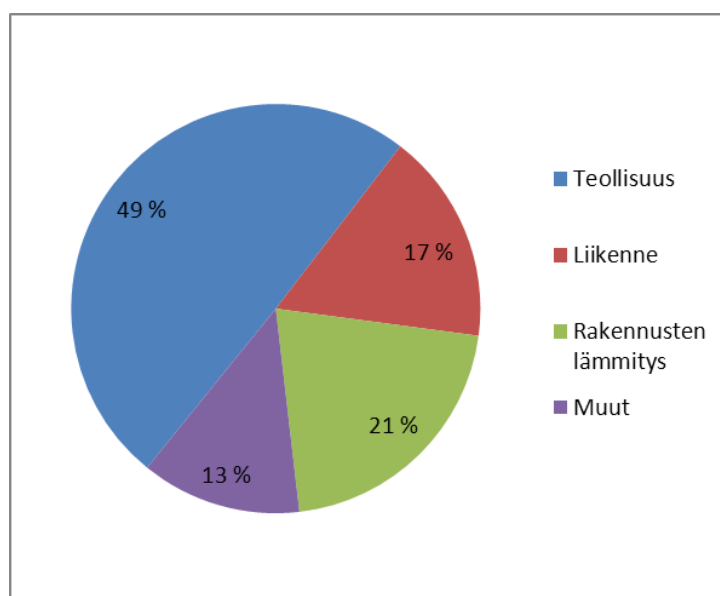


Kuvio 1: Energian kokonaiskulutus energianlähteittäin Suomessa 2008
(Tilastokeskus 2009.)

Kuviosta nähdään, että Suomi on hyvin riippuvainen tuontienergiasta. Tuontienergian suhde kotimaiseen on noin 70:30, siis yli kaksinkertainen. Uusiutumattomista energianlähteistä energiaa tuotettiin n. 73 % ja uusiutuvista noin 27 %.
(Tilastokeskus 2009.)

Energiankulutus on kasvanut Suomessa erittäin voimakkaasti viimeisen sadan vuoden aikana. Tämän on aiheuttanut samaan aikaan edennyt teollistuminen, autoistuminen ja kulutusyhteiskuntaan siirtyminen. Energian ja sen saatavuuden merkitys suomalaiselle yhteiskunnalle on erittäin suuri. Syynä tähän on kylmä

ilmasto, energiaintensiivinen teollisuus ja korkea elintaso. Kuvio 2 ilmaisee, millä yhteiskunnan sektoreilla tuotettu energia kulutettiin vuonna 2008. Teollisuus on suurin energian kuluttaja 49 %:n osuudella kokonaisenergiankulutuksesta. Lukuna tämä on 550 396 TJ. Toisena tulee rakennusten lämmitys, johon kului 21 % energiasta (233 557 TJ) ja kolmantena liikenne 13 % osuudella (185 404 TJ). Loput 140 674 TJ (13 %) kuuluivat muuhun toimintaan kuten kotitalouksien kulutukseen, palveluiden tuottamiseen ja maa- ja metsätalouteen.



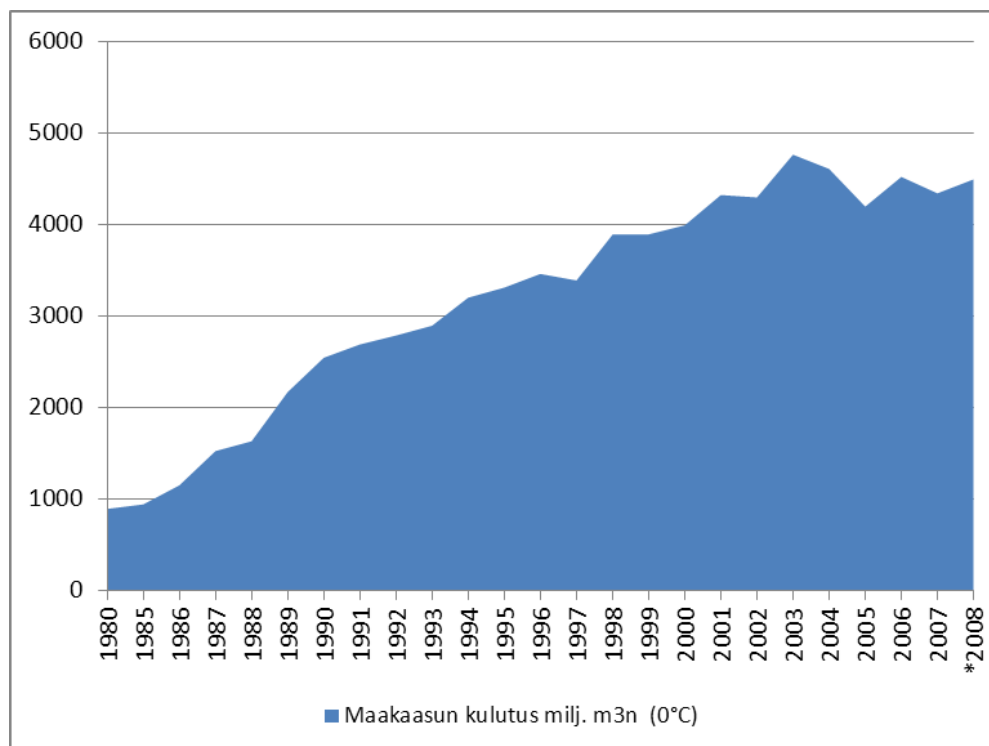
Kuvio 2: Energian loppukäyttö sektoreittain 2008 (Tilastokeskus 2009.)

2.2 Polttoaineet

Yksi palamisen edellytys on palava aine eli polttoaine. Polttoaineen laatu ja koostumus vaikuttaa merkittävästi siihen, minkälainen on palamisen tulos energiantuotannon ja päästöjen kannalta. Energianlähteet jaotellaan ryhmiin, joista käytetyin on jako uusiutumattomiin ja uusiutuviin energianlähteisiin. Uusiutumattomia polttoaineita ovat fossiiliset polttoaineet ja turve. Uusiutuvia polttoaineita ovat puu, teollisuuden jätelieimet sekä muut biopolttoaineet. Fossiililla polttoaineilla tarkoitetaan öljyä, hiiltä ja maakaasua, joiden syntyminen kestää miljoonia vuosia. Fossiilisia polttoaineita tiedetään olevan rajallinen määrä, ja eri arvioiden mukaan öljyn ja maakaasun nykyisin tunnetut ja identifioidut varannot riittävät nykyisen kulutuksen tasolla 40–100 vuodeksi. (VTT 2004, 96; Hellgrén ym. 1999, 16.)

Opinnäytetyön tutkimusosassa polttoaineena käytettiin maakaasua. Maakaasulla tarkoitetaan luonnossa esiintyvää kaasua, jonka koostumus vaihtelee esiintymän mukaan. Maakaasu on hiilivetyjen seos ja sen pääkomponentti on metaani (CH₄). Loppuosa kaasusta sisältää muita hiilivetyjä, kuten propaania ja etaania, tyypeä ja pieniä määriä muita aineita. Suomessa käytettävä maakaasu tuodaan kaasuputkea pitkin Venäjän kaasukentiltä, ja se on koostumukseltaan 98 % metaania (Raiko ym. 2002, 117). Maakaasu on syntynyt, kuten öljykin, miljoonia vuosia sitten maan alla eloperäisistä jäännöksistä paineen ja lämmön vaikutuksesta. Osan on päätelty olevan alkuperältään toisenlaista, syvältä maaperästä diffundoituvaa kaasua, siis ei eloperäistä. Maaöljyä esiintyy maankuoressa öljynten yhteydessä, mutta myös erillisinä esiintyminä. (Hellgrén ym. 1999, 20.)

Maakaasun käyttö on lisääntynyt tasaisesti siitä lähtien, kun sitä alettiin tuomaan Suomeen vuonna 1975. Maakaasu käytetään pääosin teollisuudessa prosesseissa tai lämmön ja sähkön tuotantoon. Pieni osa maakaasusta käytetään myös kotitalouksissa, ja viimeisen kymmenen vuoden aikana ovat hitaasti yleistyneet myös maakaasukäyttöiset ajoneuvot. Maakaasun käyttöä rajoittaa sen jakeluverkko, joka rajoittuu Etelä-Suomen alueelle. Kuviossa 3 on kuvattu maakaasun kulutus Suomessa vuosina 1980–2008. Kasvu on ollut tasaista, mutta se on tasaantunut 2000-luvulla. (VTT 2004, 68.)

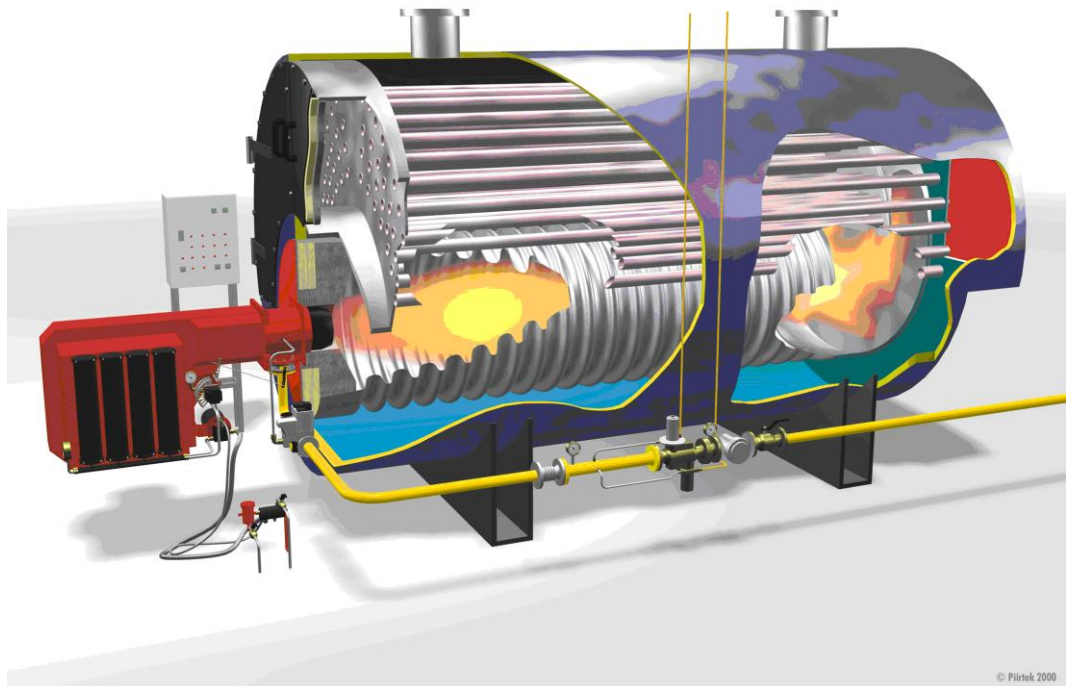


Kuvio 3: Maakaasun kulutuksen kehitys 1980-2008 (Tilastokeskus 2009.)

Haitallisia päästöjä maakaasu aiheuttaa fossiilisista polttoaineista vähiten, koska se on lähes puhdasta metaania ja sisältää vain vähän rikkiä. Maakaasun poltossa ainoa merkittävä savukaasupäästö ovat hiilidioksidin lisäksi typen oksidit. Myös hiilidioksidia syntyy tuotettuun energiamäärään suhteutettuna huomattavasti vähemmän kuin esimerkiksi hiiltä polttamalla. Tästä syystä päästörajoitusten tiukentuessa maakaasun polttaminen on lisääntynyt. (Raiko ym. 2002, 452.)

2.3 Poltinpoltto

Yleinen lämmöntuotantoyksikkö on kattilan ja polttimen yhdistelmä. Poltin on laite, jonka avulla polttoainetta voidaan polttaa hallitusti. Polttimella tuodaan sopiva määrä polttoainetta ja ilmaa liekkiin ja varmistetaan seoksen syttyminen. Polttimella voidaan polttaa erilaisia öljyjä, kaasua tai kiinteitä aineita, ja kullekin ryhmälle polttimen tekniset ratkaisut ovat erilaiset polttoaineen ominaisuuksista johtuen. Poltin on kiinnitetty kattilaan, jossa varsinainen palaminen tapahtuu (katso kuvio 4). Kattilan tulipesästä palamisessa vapautunut lämpö siirtyy seinämän läpi kattilassa kiertävään veteen.

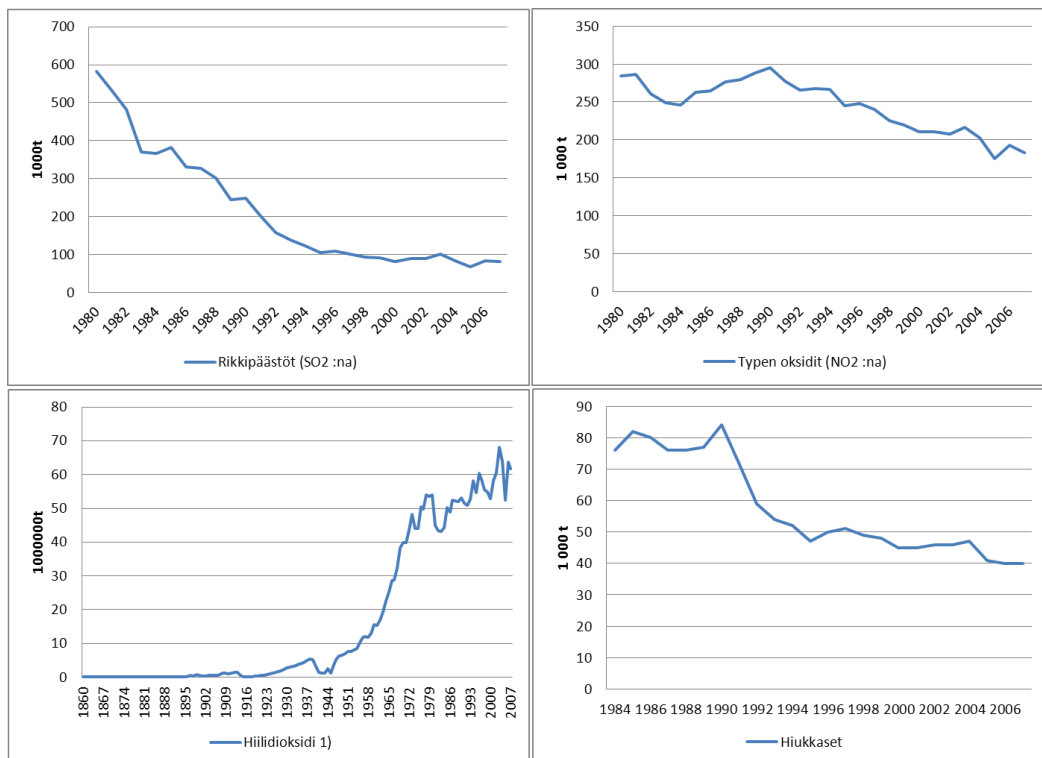


Kuvio 4: Poltin tulitorvikattilassa (Piirtek 2000)

Luvun 4 kokeissa polttimena oli monoblock-tyyppinen puhallinpolttin, jolla voidaan polttaa sekä kevytöljyä että kaasua. Monoblockissa kaikki polttimen toiminnalliset osat ovat yhtenäistä rakennetta. Puhallinpolttimessa palamisilma sekoitetaan polttoaineeseen puhaltimen avulla. Puhallinpolttimen ominaisuuksia määräävät osat ovat runko, puhallin ja palopää. Teho määräytyy siitä, kuinka suuri määrä polttoainetta ja ilmaa voidaan tuoda aikayksikössä liekkiin, eli kuinka paljon polttoainetta laitteella pystytään polttamaan. Liekin muita ominaisuuksia määräävät palopään eri osat: liekkilevy, polttoaineen syöttö, ja virtaukseen vaikuttavat rakenteet. Rungossa on ilmanottoaukko, jonka kautta tuodaan palamisilma puhallinpyörälle, jonka avulla ilma ahdetaan palopäätä kohti. Puhallinpyörää pyöritetään sähkömoottorilla, joten painetaso ja ilmakerroin ovat helposti säädettävissä halutunlaiseksi ja palamistapahtumaa voidaan hallita helposti. Palopäässä ilman sekaan lisätään polttoaine, ja nämä sekoittuvat virtauksen vaikutuksesta. Seos jatkaa matkaansa kattilaan, missä se palaa. Palaminen on jatkuvaa, sillä liekkiin tuodaan jatkuvasti lisää polttoainetta ja ilmaa. (Raiko ym. 2002, 449–451.)

2.4 Polttamisen päästöt

Polttamalla tuotetun energian tuotannon yhteydessä syntyy aina haitallisia päästöjä. Päästöillä tarkoitetaan päästölähteestä ilmakehään poistuvien hiukkasten tai kaasumaisten yhdisteiden virtaa, siis savukaasuja ja hiukkaspäästöjä. Suurimmat päästölähteet ovat energian tuotanto, liikenne ja teollisuus. Päästöt kulkeutuvat ilmavirtojen mukana kauas päästölähteistä. Toiseen valtioon kulkeutumista kutsutaan kaukokulkeutumisiksi. Esimerkiksi Suomessa vain 1/3 päästöjen laskeumasta on peräisin suomalaisista päästölähteistä. (Hellgrén ym. 1999, 39–40) Merkittävimmät päästöt, joita polttaminen aiheuttaa, ovat typen ja rikin oksidit, hiilidioksidi ja hiukkaset. Lisäksi päästöissä esiintyy häkää (CO), hiilivetyjä (C_xH_y), raskasmetallipäästöjä, näiden johdannaisia, sekä muita haitallisia yhdisteitä. Nämä päästöt kulkeutuvat ilmaan savukaasujen mukana, missä ne vaikuttavat ilmanlaatuun ja pidemmällä aikavälillä ilmastoon. Suuri osa aineista päätyy laskeumana vesistöihin ja maastoon, joissa seurauksena on muun muassa happamoitumista. Laskeumalla tarkoitetaan ilmasta maahan laskeutuvien epäpuhtauksien määrä pinta-alayksikköä kohti. (Pepper ym. 1996, 175.)



Kuvio 5: Rikki-, typpi, hiilidioksidi- ja hiukkaspäästöt Suomessa (Tilastokeskus 2009)

Kuviossa 5 on rikkipäästöjen, typen oksidien ja hiukkaspäästöjen määrän kehitystrendit vuodesta 1980 vuoteen 2007, ja hiilidioksidipäästöt ajanjaksolta 1840–2008. Kuten nähdään, on päästöjä hiilidioksidia lukuun ottamatta saatu rajoitettua, kun päästörajoituksia on saatettu voimaan vuodesta 1983 lähtien. Päästöjen vähentämiseen on kehitetty monia menetelmiä, ja etenkin rikkipäästöjä on saatu merkittävästi pienennettyä.

Ihmisen aiheuttamista päästöistä rikkioksidipäästöt ovat pääosin peräisin fossiilisten polttoaineiden polttamisesta. Rikin oksidit, rikkidioksidi (SO_2) ja rikkiatrioksidi (SO_3), ovat ensimmäiset kemialliset yhdisteet, joiden päästöjä on yleisesti rajoitettu voimalaitoksissa. Rikkipäästöjen vähentämiseen on kehitetty monia menetelmiä, joista tärkeimmät ovat polttoaineen sisältämän rikin vähentäminen ja savukaasujen puhdistaminen. Päästöjä onkin saatu rajoitettua merkitsevästi: vuoden 1980 582 tuhannen tonnin rikkipäästöistä on päästy vuonna 2007 82 tuhanteen tonniin. (Tilastokeskus 2009.)

Typen oksideihin viitataan yleensä lyhenteellä NO_x , ja tällä tarkoitetaan typpi-monoksidin NO ja typpidioksidin NO_2 yhteenlaskettua määrää. Typen oksidit ovat suurelta osin peräisin ihmisen toiminnasta, polttoprosesseista ja liikenteestä. Polttaminen on merkittävä NO_x lähde sen vuoksi, että palamisilma koostuu pääosin hapesta O_2 ja tuestä N_2 , ja riittävän korkeassa lämpötilassa nämä reagoivat muodostaen typen oksideja. Muodostumismekanismia tunnetaan ainakin kolme: Zeldovichin mekanismi (Terminen NO), Fenimore – mekanismi (nopea NO), ja NO muodostus N_2O -välituotton kautta (R6+R7) (Raiko ym. 2002, 304–308). Typen oksideja muodostuu lisäksi polttoaineen sisältämästä tuestä. Muodostumismekanismien vuoksi muodostuvien NO_x :n määrään on mahdollista vaikuttaa polttotekniikan keinoin. Typen oksidien määrää on saatu myös vähennettyä merkittävästi verrattuna vuoteen 1980. Tuona vuonna typpipäästöt Suomessa olivat 284 tuhatta tonnia, ja vuonna 2007 183 tuhatta tonnia. (Tilastokeskus 2009.)

Hiukkasilla tarkoitetaan kiinteitä partikkeleita ja nestepisaroita (aerosoleja), jotka ovat tarpeeksi pieniä leijuakseen ilmassa. Hiukkasilla ei ole mitään tiettyä koostumusta, tai koostumus voi olla hyvin monimutkainen. Esimerkiksi noki, pöly,

tuhka kuuluvat hiukkaspäästöihin, ja ne usein sisältävät haitallisia yhdisteitä ja raskasmetalleja. Halkaisijaltaan alle 10 µm hiukkasia merkitään PM₁₀ (particulate matter <10 µm), ja kutsutaan hengitettäväksi hiukkasiksi, sillä kokonsa vuoksi ne kulkeutuvat hengitysilman mukana keuhkoputkiin asti. PM₁₀ – hiukkaset luetaan karkeisiin hiukkasiin. Halkaisijaltaan alle 2,5 mikrometrin hiukkasia kutsutaan pienhiukkasiksi (PM_{2,5}) (Pepper ym. 1996, 175). Hiukkaspäästöt vuonna 2007 olivat Suomessa 40 tuhatta tonnia. (Tilastokeskus 2009.)

Hiilidioksidia CO₂ ei yleisesti pidetä ilmansaasteena, sillä niissä pitoisuuksissa missä se ilmakehässä esiintyy, aine on harmiton ihmisille ja eläimille, sekä välttämätön kasvikunnalle. Polttoprosesseissa hiilidioksidia vapautuu kuitenkin suuria määriä ilmakehään, ja koska hiiltä ei sitoudu samaa vahtia, kasvaa hiilidioksidin konsentraatio ilmakehässä vähitellen. Marraskuussa 2010 ilmakehän hiilidioksidipitoisuus maapallolla keskimäärin oli 389,28 ppm, vuonna 1980 marraskuun vastaava luku oli 337,50 ppm (Trans, P., 2011). Hiilidioksidipäästöt ovat kasvaneet käsi kädessä teollistumisen kanssa, ja vuonna 2009 hiilidioksidipäästöt olivat Suomessa noin 55,52 miljoonaa CO₂ – ekvivalenttia tonnia. (Suomen virallinen tilasto 2011.)

2.5 Päästöjen vaikutus ympäristöön ja terveyteen

Polttamisen päästöt aiheuttavat monenlaista haittaa ihmisille, eliöille ja ympäristölle. Vakavimpia ongelmia ovat ilmaston lämpeneminen, happamoituminen ja huono ilmanlaatu. Päästöt vaikuttavat ilman laatuun, sillä ilman laatu heikkenee, kun epäpuhtauksien pitoisuudet ilmassa kasvavat: ilman laatua arvioidaankin yleensä mittaamalla erilaisten ilmansaasteiden pitoisuuksia ilmassa. Paikallisesti ilman laatuun vaikuttavat monet tekijät: päästöjen määrä, niiden laatu, etäisyys päästölähteestä ja ilmasto-olosuhteet. Ilman saasteet, typen ja rikin oksidit, häkä ja muut epäpuhtaudet aiheuttavat kansanterveydelle haittaa: keuhkosairaudet ja kuolleisuus lisääntyvät ja elinajanodote lyhenee. Kansallisessa ympäristöterveysohjelmassa on arvioitu ilman epäpuhtauksien aiheuttavan Suomessa vuosittain 200 - 400 ennen aikaista kuolemaa, 30 000 astmaoireiden pahentumista ja 30 000 - 40 000 lasten hengitystieinfektiota. (Ympäristöterveystoimikunta 1997.)

Ilmastonmuutos on paljon puhuttu ilmiö, jonka nykyisen tietämyksen valossa katsotaan aiheutuvan ihmisen toimista, erityisesti fossiilisten polttoaineiden polttamisesta. Polttoaineiden sisältämä hiili vapautuu ympäristöön hiilidioksidina. Koska fossiilisten polttoaineiden muodostuminen on kestänyt miljoonia vuosia, ja palaminen taas käy sekunneissa, hiilen määrä vapaassa kierrossa siten lisääntyy ja hiilidioksidin kokonaismäärä ilmakehässä kasvaa. Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu, se siis voimistaa kasvihuoneilmiötä ja edistää ilmaston lämpenemistä. Muita merkittäviä kasvihuonekaasuja ovat metaani CH₄, typpioksiduuli eli ilokaasu N₂O, fluorihilivedyt (HFCs), perfluorihilivedyt (PFCs), rikkiheksafluoridi (SF₆), sekä yläilmakehän otsooni O₃. (Pepper ym. 1996, 183.)

Ilmasta osa päästöistä kulkeutuu laskeumana muuhun luontoon, vesistöihin ja maaperään. Erityisesti sade poistaa tehokkaasti kaasuja ja hiukkasia ilmasta. Sateen mukana tulevasta laskeumasta käytetään nimitystä märkä laskeuma. Jos ilmassa on runsaasti typen ja rikin oksideja, sadepisarat keräävät niitä ilmasta jolloin muodostuu typpi- ja rikkihappoja. Nämä hapot satavat maahan ja aiheuttavat ympäristön happamoitumista, joka vahingoittaa ekosysteemejä. Happamoitumisella tarkoitetaan ympäristön pH:n pysyvää alenemista. (Pepper ym. 1996, 183.)

2.6 Lainsäädäntö ja kansainväliset sopimukset

Koska päästöt kulkeutuvat tuulen ja virtaavan veden mukana kansallisvaltioiden rajojen yli, ja koska ilmasto on kaikille yhteinen, on kansainvälinen yhteisö tehnyt erilaisia sopimuksia, joilla pyritään suojelemaan ympäristöä ja ilmastoa. Euroopan yhteisöllä on toimivalta hyväksyä ympäristösopimuksia, mutta samassa sopimuksessa osapuolena voi olla myös yksittäinen jäsenvaltio. Kansallinen lainsäädäntö suhteutetaan sopimukseen kahdella tavalla: valtiot joutuvat usein säätämään uusia kansallisia säädöksiä sopimuksen toimeenpanemiseksi, mutta toisaalta sopimusta neuvoteltaessa siihen voidaan tehdä kansallisia poikkeuksia. (Kuokkanen & Parkkari 2004, 6.)

Polttamisen kannalta relevantit kansainväliset ympäristösopimukset ovat Ilmastosopimus (Suomessa voimaan 1994) ja Kioton pöytäkirja (voimaan 2005), sekä Kaukokulkeutumissopimus (Suomessa voimaan 1983). Ilmastosopimus on yleis-

sopimus, jonka tavoite on vakiinnuttaa kasvihuonekaasujen pitoisuudet vaarattomalle tasolle, se myös velvoittaa jäsenmaat selvittämään päästölähteet ja nielujen aiheuttamat poistumat, sekä hyväksymään kansallisia ohjelmia ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Kioton pöytäkirja asettaa selkeät tavoitteet sopimusosapuolille: päästöjen kokonaismäärän tulee vähentyä ainakin 5 % vuoden 1990 määrästä vuosien 2008 ja 2012 välisenä velvoitekautena. Maakohtaiset tavoitteet vaihtelevat, ja Suomelle tavoite on 92 % vuoden 1990 päästöistä. Kaukokulkeutumisso-
pimuksessa ja sen lisäpöytäkirjoissa annetaan yleisluontoisia periaatteita ilman-
suojeluun, mutta myös sitovia valtiokohtaisia päästörajaja eri aineille. Göteborgin lisäpöytäkirjassa määritellyt päästörajat, jotka pitää vuoteen 2010 mennessä saavuttaa, ovat Suomen osalta rikille 116 tuhatta tonnia vuodessa, typelle 170 tuhatta tonnia, ammoniakille 31 tuhatta tonnia, haihtuville orgaanisille yhdisteille 130 tuhatta tonnia. Göteborgin lisäpöytäkirjan liitteissä määritellään yksityiskohtaisesti myös sallitut päästörajat kiinteistä lähteistä peräisin oleville päästöille. Esimerkiksi typen oksidien määrälle savukaasussa asetetaan rajaksi 150 mg/Nm³ uusissa yli 50 MW kattilalaitoksissa. (Kuokkanen & Parkkari 2004, 624–631.)

Euroopan unionin tasoinen säätely tapahtuu direktiivien eli lakien välityksellä. Polttamisen päästöjä käsittelee erityisesti 6.1.2011 voimaan tullut industrial emissions directive IED (2010/75/EU). IED:n tarkoitus on ennalta estää ja vähentää päästöjä, joita teollisuus aiheuttaa noudattamalla ”saastuttaja maksaa” – periaatetta. Direktiivi sisältää päästöjen vähentämisen periaatteita, mutta myös yksityiskohtaiset päästörajat teollisuuden eri aloille.

Suomen lainsäädäntö sopeutuu myös kansainvälisten sopimusten ja EU:n sääntömiin direktiiveihin. Kansainvälisten sopimuksien määräykset ja EU-direktiivit saatetaan voimaan säätämällä kansallisia lakeja. Maat voivat säätää myös omia lakejaan, jotka voivat olla direktiivien määräyksiä tiukemmat. Esimerkiksi vuonna 2010 annettiin valtioneuvoston asetus 445/2010 polttoaineteholtaan alle 50 megawatin energiantuotantoyksiköiden ympäristönsuojeluvaatimuksista, joka sisältää päästörajat pienemmille polttolaitoksille.

Standardisoinnilla lisätään tuotteiden yhteensopivuutta ja turvallisuutta, suojellaan kuluttajaa ja ympäristöä sekä helpotetaan kotimaista ja kansainvälistä kauppaa.

Standardit ovat käyttäjilleen vapaaehtoisia, mutta niiden avulla voidaan helposti osoittaa, että tuotteet täyttävät lainsäädännön turvallisuus- ja ympäristövaatimukset; kun tuote on standardin mukainen, on se myös monimuotoisen ja usein hajanaisenkin lainsäädännön normit täyttävä. Polttimia koskevat erityisesti standardit SFS-EN 676 + A2 (Automaattiset puhallinpolttimet kaasumaisille polttoaineille) ja SFS-EN 267 (Automaattiset puhallinpolttimet nestemäisille polttoaineille). Näissä standardeissa määritellään myös polttimien päästöluokat ja niiden rajat.

3 KOESUUNNITTELU (DESIGN OF EXPERIMENTS)

Englannin kielen termi design of experiments on käännetty suomeksi sanalla koesuunnittelu. Joskus käytetään myös termiä tilastollinen koesuunnittelu. Koesuunnittelu tarkoittaa kokeellisen tutkimuksen suunnittelua ja tutkimuksella saadun datan tilastollista analysoimista. Jotta tilastollista laskentaa ja päättelyä soveltamalla saadaan merkityksellisiä tuloksia, on kokeet suunniteltava tiettyjen periaatteiden mukaisesti ja myös toteutettava suunnitelman mukaan. Koesuunnittelun voi jakaa karkeasti kolmeen vaiheeseen: kokeiden varsinaiseen suunnitteluun, suunnitelman toteuttamiseen ja tulosten analysointiin. Lopuksi muodostetaan saadun tiedon perusteella johtopäätökset ja suositukset toimenpiteiksi.

Koesuunnittelu tarjoaa soveltajalle keinon tutkia eri tekijöiden vaikutusta prosessin vasteeseen. Yksittäisestä havainnosta tai edes satunnaisesta havaintojen joukosta ei voida tehdä pitäviä johtopäätöksiä syy-seuraussuhteista, sillä suunnittemattomien kokeiden tuloksista on satunnaisvaikutuksen tai mahdollisten sekoittavien muuttujien vaikutuksen suuruutta paljon vaikeampi arvioida. Yksittäisen kokeen tuloksesta on siis mahdotonta tietää, kuinka suuri on sen sisältämä virheen osuus. Jollei koesuunnittelun avulla hallita tekijöitä tai eroteta niiden vaikutuksia toisistaan, ei eri tekijöiden vaikutuksesta silloin voida tehdä muuta kuin oletuksia. Koesuunnittelussa pyritään poistamaan sekoittavien muuttujien vaikutus ja suunnittelemaan kokeet siten, että mitatusta datasta saadaan maksimaalinen informaatio analyysivaiheessa. Tekijöiden vaikutuksen suuruudesta ja suunnasta voidaan tehdä tilastollisia päätelmiä, ja myös tekijöiden ristikkäisvaikutusten analysointi on mahdollista.

3.1 Koesuunnittelun lyhyt historia

Nykyisenkaltainen koesuunnittelu sai alkunsa 1935, kun Ronald A. Fisher julkaisi kirjansa *The Design of Experiments*. Fisherin sovellusala oli maatalous, jossa kokeiden vaatima pitkä aika johti tehokkaampien koejärjestelyjen keksimiseen. Fisher lanseerasi koesuunnittelun perusperiaatteet: satunnaistamisen, toisinnon ja lohkomisen. Nämä periaatteet ovat tänäkin päivänä koesuunnittelun soveltamisen

kulmakiviä. Fisherin menetelmiin kuului varianssianalyysin käyttö tulosten analysoinnissa. (Park & Antony 2008, 89.)

Toinen vaihe koesuunnittelun historiassa alkoi, kun valmistava teollisuus omaksui tilastollisen lähestymistavan kokeelliseen tutkimukseen. Erotuksena maatalouteen, kokeiden tulokset saatiin välittömästi, joten tuloksia voitiin käyttää heti uusien kokeiden suunnitteluun. Syntyi jaksollinen (sequential) koesuunnittelu. Vaiheen alkua siivitti myös Boxin ja Wilsonin (1951) kehittämä vastepintamenetelmä (RSM, response surface methodology). Optimaalisen asetelman teoria kehitettiin myös teollisuuden tarpeisiin 60-luvulta alkaen. (Park & Antony 2008, 89.)

1970-luvun lopusta alkaen Genichi Taguchi ja hänen laatufilosofiansa ovat vaikuttaneet suuresti koesuunnittelun tunnettuuteen ja suosioon. Syy japanilaisten yritysten menestykseen ja tuotteiden korkeaan laatuun nähtiin osaltaan olevan Taguchin menetelmissä, ja yritykset länsimaissa omaksuivat ne nopeasti. Taguchi käytti koesuunnittelua tuotteen tai prosessin robustiuden parantamiseen. Robusti tuote on vankka, kestävä eli tolerantti ympäristön vaikutuksille ja tunnoton komponenteista aiheutuvan vaihtelun vaikutukselle. Taguchi suosittelee käyttämään ortogonaalimatriiseja ja joitakin uudenlaisia tilastollisia menetelmiä. Tämä aiheutti paljon debattia, ja myöhemmin, 1980-luvun loppuun mennessä, tilastotieteilijöiden arvioissa todettiin Taguchin kokeellisissa strategioissa ja datan analysoinnin menetelmissä olevan huomattavia ongelmia. (Montgomery 2005, 20.)

Taguchin jälkeen ja osittain hänen aiheuttamiensa ristiriitojen vaikutuksesta alkoi koesuunnittelussa uusi aikakausi. Kasvavaa kiinnostusta koesuunnittelua kohtaan osoittivat sekä tutkijat ja soveltajat. Kehitettiin uusia lähestymistapoja, joilla korvattiin Taguchin metodin puutteelliset osat. Etenkin elektroniikka- ja autoteollisuus omaksuivat tilastollisen suunnittelun käytännöksi. Nykyään on jo vaikea löytää alaa, jolla koesuunnittelua ei sovellettaisi, sillä lähes kaikki laatu- ja tekniset kriteerit painottavat hyvän koesuunnittelun merkitystä ja hyödyllisyyttä. Koesuunnittelua opetetaan myös entistä laajemmin teknisissä korkeasteen kouluissa. (Montgomery 2008, 20.)

3.2 Koesuunnittelun tarkoitus ja logiikka

Koesuunnitelma tehdään, jotta tehtyjen kokeiden tuloksista voitaisiin tehdä päätelmiä eri muuttujien vaikutuksesta koeyksiköihin, ja että nämä tulokset olisivat yleistettävissä tutkittavaan perusjoukkoon eli populaatioon. Populaatio on kokeellisessa tutkimuksessa hypoteettinen, sillä sen muodostavat kaikki mahdolliset, myös tulevaisuuteen sijoittuvat, koeyksiköt. Ajoitukseltaan kokeellinen tutkimus on tosiaikainen (concurrent): havainnot ja mittaukset tehdään hankkeen aloittamisen jälkeen. Tutkimus on määritelmän mukaan kokeellinen, jos vähintään yksi tekijä on käsittelytekijä, eli sellainen tekijä, jonka tason tutkija voi säätää haluamukseen kunkin havainnon kohdalla. Monen käsittelytekijän yhdistelmä on nimeltään käsittely-yhdistelmä, ja niistä muodostuu koeyksiköiden joukko. Kutakin käsittelyä kohden muodostuu osapopulaatio, jossa ominaisuudet ovat mahdollisesti muuttuneet käsittelyn vaikutuksesta. Kokeet suunnitellaan siten, että koeyksiköiden osapopulaatiot muodostavat edustavan otoksen perusjoukosta: tällöin on perusteltua tehdä perusjoukkoa koskevia johtopäätöksiä otosinformaation perusteella. Osapopulaatioita tutkimalla tekijöiden ja mitattujen tulosten eli vasteen väliltä etsitään tilastollista yhteyttä, jossa tekijä toimii selittävänä muuttujana ja vaste selitettävänä muuttujana. Kun koe on suunniteltu asianmukaisesti, voidaan havaitut systemaattiset erot vasteiden arvoissa tulkita käsittelytekijöiden vaikutukseksi; käsittelytekijä on syy vaihteluun vasteen arvoissa. (Grönroos 2004, 11.)

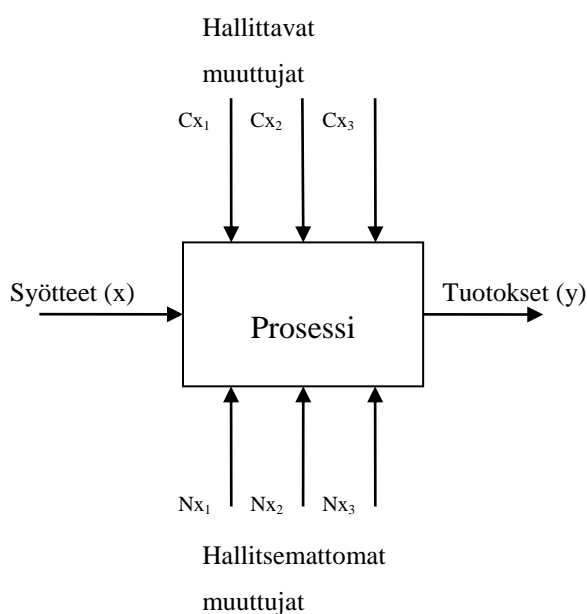
Taulukko 1: yksinkertainen koematriisi, jossa on kaksi käsittelytekijää kahdella tasolla (2^2)

	Käsittelytekijä 1(A)	Käsittelytekijä 2 (B)	Vaste (y)
Koeysikkö 1	Taso 1 (-)	Taso 1 (-)	Vaste 1 (y_1)
Koeysikkö 2	Taso 1 (-)	Taso 2 (+)	Vaste 2 (y_2)
Koeysikkö 3	Taso 2 (+)	Taso 1 (-)	Vaste 3 (y_3)
Koeysikkö 4	Taso 2 (+)	Taso 2 (+)	Vaste 4 (y_4)

Taulukossa 1 on esitetty yksinkertainen koematriisi, jossa tutkitaan kahden eri käsittelytekijän vaikutusta kahdella eri tasolla, joita merkitään ”+” ja ”-” merkeillä. Näiden tasojen yhdistelmiä on yhteensä $2^2=4$. Siksi tällaista asetelmaa kutsu-

taan usein 2^2 suunnitelmaksi. Neljää käsittely-yhdistelmää vastaa neljä eri vasteen arvoa kussakin neljässä koeyksikössä. Osapopulaatiot muodostuvat tietyn tekijän tiettyä tasoa vastaavista koeyksiköistä, esimerkiksi tekijän 1 tason 1 kohdalla koe-yksiköistä 1 ja 2. Jos vasteen arvo näissä yksiköissä on merkittävästi korkeampi, kuin koe-yksiköissä 3 ja 4, voidaan päätellä tekijän *A* aiheuttavan korkeamman vasteen arvon. Samoin voidaan menetellä käsittelytekijän *B* kohdalla. Joskus havaitaan, että ero *A* vasteiden arvossa ei ole samanlainen kaikilla *B* tasoilla. Tällöin tekijöiden välillä on yhdysvaikutusta. (Montgomery 2008, 163.)

Koesuunnittelun taustaoletuksena on, että tutkittava ilmiö noudattelee kuvio 6:n yleistä prosessimallia. Prosessi on tapahtuma, jossa syöte muuttuu tuotokseksi. Syöte on usein joku materiaali, polttoprosessissa polttoaine. Polttoprosessin tuotos muodostuu savukaasuista ja lämpöenergiasta, joiksi polttoaine palamisreaktiossa muuttuu. Tuotoksella on yksi tai useampi havainnoitavissa olevaa vastemuuttujaa. Tapahtumaan vaikuttaa lukuisa määrä muuttujia, joista jotkut, kuten prosessi-muuttujat tai materiaalin ominaisuudet, ovat hallittavissa, ja toiset muuttujat ovat hallitsemattomia. Aina voi olla myös tuntemattomia muuttujia, joiden vaikutusta ei osata ottaa huomioon. Tavoite on tietysti tunnistaa mahdollisimman moni muuttuja tutustumalla huolellisesti prosessiin ja entiseen tietoon sen käyttäytymisestä.



Kuvio 6: Yleinen prosessimalli (Mukaiillen Montgomery 2008, 3.)

Tutkittava ilmiö halutaan tavallisesti kuvata matemaattisen mallin avulla. Malleja on erilaisia, ja esimerkiksi lineaarista regressiomallia sovitettaessa malli on muotoa:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \varepsilon$$

missä β_0 edustaa havaintojen keskiarvoa ja tekijät $\beta_1 x_1$ jne. eri tekijöiden poikkeamaa keskiarvosta: siis tekijän vaikutusta. Termi ε on virhetermi ja edustaa satunnaisvaihtelua, jota ei voida selittää tekijöiden vaikutuksella.

3.3 Koesuunnittelun perustyökalut

Jotta voidaan vakuuttua siitä, että tutkittava tekijä todellakin on vaihtelun aiheuttaja, on suunnitteluvaiheessa pyrittävä varmistumaan, ettei mikään muu tekijä vaikuta vasteeseen. Muut olosuhteet pitää vakioda ja varmistaa, ettei koeyksiköiden valinta ole millään tavalla systemaattista tai tarkoitushakuista. Kolme koesuunnittelun vakiintunutta perusmenettelyä, joilla em. pulmat voidaan ratkaista, ovat satunnaistaminen (randomization), toistaminen (toisinto, replication) ja lohkominen (blocking).

Kokeiden tilastollisessa tulkinnassa lähdetään olettamuksesta, että havainnot ovat satunnaisotos kohdepopulaatiosta. Satunnaistamalla eli laittamalla käsittelyt satunnaiseen järjestykseen saadaan siis analyysille todennäköisyyspohja. Jos satunnaistaminen ei otoksen poiminnassa toteudu, ei voida puhua otoksesta, vaan kyseessä on näyte. Näytteeseen tilastoyksiköt usein valikoituvat jollakin kontrolloimattomalla tavalla, ja data voi tällöin antaa virheellisen kuvan tutkittavasta ilmiöstä. Toisinaan käytäntö asettaa rajoituksia täydelle satunnaisuudelle. On kuitenkin olemassa tilastollisia menetelmiä, jolla tämä otetaan huomioon ja vaikutus minimoidaan. (Manninen & Ylèn 2001, 15.)

Toistamalla samaa käsittelyä useamman kerran saadaan arvio satunnaisvaikutuksen suuruudesta. Tämäkin on tärkeää arvioitaessa, ovatko saadut tulokset yleensä tilastollisesti merkittäviä. Huomattava on, että tässä yhteydessä toistaminen tarkoittaa nimenomaan samaa käsittelyä eri koeyksikössä: sama koe siis toistetaan samanlaisena. Joskus käytetäänkin suomeksi tästä sanaa *toisinto*. Myös koeysi-

kön sisällä tapahtuva toisto on tärkeää, siitä saadaan käsitys mittausvirheen suuruudesta. (Grönroos 2004, 12.)

Lohkotekijä on tunnettu hallittavissa oleva häirtatekijä; siis sellainen muuttuja, jonka tiedetään vaikuttavan vasteeseen, mutta siitä ei olla kiinnostuneita suunnittelumuuttujana. Tällöin koeyksiköt voidaan lohkoa eli järjestää osajoukkoihin siten, että lohkotekijän arvo on vakio osajoukon sisällä. Tällä menettelyllä eliminoidaan lohkotekijän vaikutus vasteen analysoinnissa. Esimerkki polttokokeissa voisi olla polttoaineen laatu: jostain syystä polttoaine-erää joudutaan vaihtamaan kesken kokeiden. Tällä voi olla vaikutusta mitattuihin tuloksiin, mutta lohkomalla koeyksiköt polttoaineen mukaan systemaattinen muutos voidaan tulkita lohkotekijän vaikutukseksi ja muu vaihtelu käsittely-yhdistelmän vaikutukseksi. (Grönroos 2004, 12.)

3.4 Kokeiden suunnittelu

Koesuunnittelun on työkalu, kun etsitään ratkaisua johonkin käytännön ongelmaan. Teollisuudessa usein tutkimuksen kohteena on prosessi, josta on jo runsaasti kokemusperäistä tietoa ja mittaustuloksia. Koesuunnittelu astuu kuvaan, kun halutaan uutta, perusteltua tutkimustietoa prosessin käyttäytymisestä. Tavoitteena on usein laadunparannus tai esimerkiksi parhaiden mahdollisten parametrien löytäminen. Koesuunnittelun teoriassa kokeita jaetaan eri tyypeihin myös tarkoituksensa mukaan: erotetaan toisistaan ensinnäkin seulonta- tai karakterisointitutkimukset (screening, characterization), joiden tarkoitus on yleisellä tasolla määrittellä, mitkä tekijät ovat prosessin kannalta tärkeimmät ja mitkä vaikutukset luonteenomaisia. Toisaalta voidaan suorittaa optimointia (optimization), jolloin etsitään parhaita mahdollisia arvoja prosessin parametreille. Edelleen tarkoituksena voi olla vahvistaminen (confirmation), kuten standardin mukaisissa polttokokeissa, uuden löytäminen kun kokeillaan uusien tekijöiden vaikutusta, tai prosessin robustiuden tai vakauden (robustness, stability) parantaminen. (Montgomery 2008, 14.)

Kokeellisesti saatu tietämys on usein iteratiivista, eli tieto kasaantuu toistojen myötä. Tieto tutkittavan prosessin luonteesta ja käyttäytymisestä voi olla aluksi

hyvin epämääräistä, mutta ymmärrys syvenee kun kokeita tehdään ja analysoidaan. Tulosten avulla on mahdollista suunnitella aina parempia kokeita, joilla päästään yhä lähemmäs tutkimusongelman ratkaisua. Koesuunnittelun asiantuntijat suosittelvatkin jaksollista lähestymistapaa koesuunnitteluun, jolloin suoritetaan sarja pienempiä kokeita pikemmin kuin yksi suuri koe, jonka odotetaan vastaavan kaikkiin kysymyksiin. (Montgomery 2005, 19.)

3.4.1 Tutkimusongelman muotoilu

Tilastollisen kokeen suunnittelijan ensimmäinen tehtävä on määritellä tutkimusongelma. Tutkimusongelmaa muodostaessa on hyödyllistä tukeutua jo olemassa olevaan tietoon valittaessa mahdollisia kiinnostavia tekijöitä; vaikei entinen tietämys täyttäisikään tieteellisyyden kriteereitä, on sillä heuristista arvoa. Tutkimusongelma sisällytetään tutkimusraporttiin. Tutkimusongelman määrittelyyn kuuluu kohdepopulaation määrittely. Samoin määritellään ensisijaisesti kiinnostuksen kohteena olevat selitettävät muuttujat ja selittävät muuttujat. Tutkimuksen tarkoitukseen tulee ottaa kantaa. Lopullisen muotonsa saanut tutkimusongelma on ytimekäs, täsmällinen ja se on mahdollista testata. Sille on olemassa tapa toteuttaa ajan, kustannusten ja muiden resurssien asettamissa rajoissa. Muotoilun tulisi olla sellainen, että tutkimukseen perehtymätön henkilö pystyy sen perusteella muodostamaan oikean kuvan tutkimuksen luonteesta ja siitä, mitä tietoa se on tarkoitettu tuottamaan. (Luftig & Warren 1998, 17–19.)

3.4.2 Käsittelytekijöiden, tasojen ja vaihteluvälien valinta

Havaitut prosessiin vaikuttavat muuttujat voidaan jakaa kahteen ryhmään: potentiaaliin käsittelytekijöihin (treatment variable) ja haittatekijöihin (nuisance variable). Potentiaaliset käsittelytekijät ovat niitä tekijöitä, joiden tasoa kokeessa voidaan vaihdella. Näitä tekijöitä on usein suuri määrä, ja ne voidaan edelleen luokitella varsinaisiin käsittelytekijöihin, vakiona pidettäviin tekijöihin sekä tekijöihin, joiden tason annetaan vaihdella hallitsemattomasti. (Montgomery 2008, 15.)

Taulukossa 2 jaotellaan muuttujat luokkiinsa. Kaikenlaiset vaikuttavat tekijät halutaan tunnistaa koesuunnitelmaa varten ja luokitella. Varsinaisten käsittelytekijöiden lisäksi muihin ryhmiin kuuluvien tekijöiden huomioon ottaminen on oleellista koesuunnittelussa. Silloin niiden vaikutus vasteeseen voidaan ottaa huomioon jo koetta suunniteltaessa ja myös tulosten analysoinnissa. (Luftig & Warren 1998, 107)

Taulukko 2: Erilaisia prosessin vasteeseen vaikuttavia tekijöitä

Tunnettu muuttuja					Tunte- maton	
Potentiaaliset käsittelytekijät			Haittatekijät			
Tutki- taan	Ei tutkita		Hallit- sema- ton	Hallitta- vissa		Häiriötekijä
		Pidetään vakiona			Anne- taan vaihdella	
Koeasetelman varsi- naiset käsittelytekijät	Oletettavasti pieni vaikutus	Vaikea vakioida: an- netaan vaihdella	Voidaan mitata, mut- ta ei voida vaikuttaa arvoon	Voidaan kontrolloida: käytetään lohkoketi- jänä	Arvo vaihtelee luon- nostaan, mutta koeti- lanteessa mahdollista hallita	Kaikkia prosessiin vai- kuttavia muuttujia ei aina tunneta

Käsittelytekijät ovat niitä tekijöitä, jotka lopulta sisällytetään koesuunnitelmaan: siis niitä muuttujia, joiden vaikutuksesta ollaan ensisijaisesti kiinnostuneita ja joiden vaikutus arvioidaan suureksi. Vakiona pidettävien tekijöiden vaikutuksen taas odotetaan olevan melko pieni, mutta jotta tekijän mahdollinen vaikutus ei sekoituisi tuloksissa käsittelytekijöiden vaikutukseen, pidetään taso vakiona. Joidenkin tekijöiden tasoa taas on vaikea tai mahdoton vakioida, jolloin tason annetaan vaihdella ja luotetaan siihen, että satunnaistaminen tasoittaa tällaisen tekijän vaikutuksen eri koeyksiköissä. Viimeiseksi mainittu muuttujatyyppe kasvattaa kohinaa vastemuuttujissa. Toisin sanoen ne kasvattavat 1. tyypin virheen sattumisen

todennäköisyyttä (katso luku 3.6.1), kun tutkittavan muuttujan vaikutusta on vaikeampi erottaa sekoittavan muuttujan vaikutuksesta. (Montgomery 2008, 15.)

Haittatekijöiksi luokitellaan tekijät, joista ei olla kiinnostuneita suunnitelman puitteissa. Niiden vaikutus voi olla kuitenkin suhteellisen suurikin. Haittatekijät voidaan luokitella hallittaviin, hallitsemattomiin ja häiriötekijöihin. Hallittava haittatekijä on sellainen, jonka tason tutkija voi valita: esimerkiksi polttoaineen laatu on tällainen tekijä. Aikaisemmin mainittua lohkomista käytetään usein näiden tekijöiden vaikutuksen huomioimiseen. Jos taas tekijä on sellainen, ettei sen tasoon voida vaikuttaa, mutta taso on silti mitattavissa, on kyseessä silloin hallitsematon haittatekijä. Palamisen tapauksessa tällaisia tekijöitä voivat olla esimerkiksi ilman laatuun liittyvät tekijät kuten ilmankosteus tai lämpötila. Kovarianssianalyysillä hallitsemattomien haittatekijöiden vaikutus voidaan usein kompensoida analyysivaiheessa. Häiriötekijöitä ovat ne tekijät, joiden suuruus vaihtelee prosessissa hallitsemattomasti luonnostaan, mutta koetilanteessa sen tasoon voidaan vaikuttaa. (Luftig & Warren 1998, 110.)

Tekijät voivat olla luonteeltaan joko kvantitatiivisia tai kvalitatiivisia. Kvantitatiivisen muuttujan arvot voidaan asettaa järjestykseen numeerisella asteikolla; tällaiset muuttujat voivat olla jatkuvia tai diskreettejä. Tyypillisesti jatkuvat muuttujat ovat esimerkiksi prosessiarvoja, jonka arvo voidaan asettaa periaatteessa mielivaltaisesti. Diskreetti muuttuja voi saada vain tiettyjä arvoja asteikollaan, eli niitä voidaan säätää portaittaisesti. Kvantitatiivisen muuttujan eri tasoja taas ei voi perustellusti järjestää millekään asteikolle; polttoprosessissa tällainen muuttuja voisi olla esimerkiksi kattila. Tekijän tyyppi on huomioitava, sillä käytettävissä olevat analysointitekniikat riippuvat osaltaan myös siitä. (Montgomery 2008, 84.)

Varsinaisten käsittelytekijöiden valinnan jälkeen kiinnitetään huomio tekijöiden niihin tasoihin, jotka halutaan sisällyttää koeasetelmaan. Tärkeimmät päätökset ovat, kuinka monta tasoa kullekin tekijälle valitaan, ja mitkä nämä tasot ovat. Tasojen määrää valittaessa nyrkkisääntönä voidaan pitää sitä, että jos muuttujan vaikutuksen odotetaan tai tiedetään olevan lineaarinen, riittää kaksi tasoa, mutta mallin ollessa monimutkaisempi vähintään kolme tasoa on otettava käsittelyihin, jotta

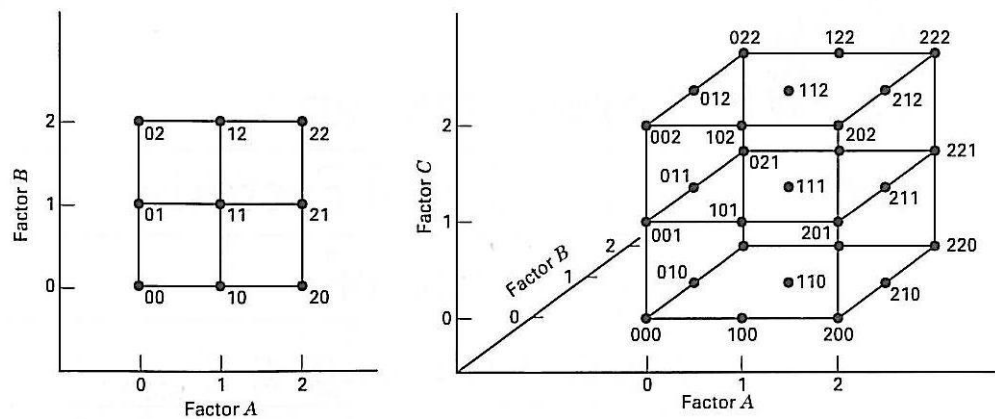
mallin sovittaminen olisi mahdollista. Suunnittelijan pitää myös päättää, mitkä tasot ovat kiinnostavia.

Edellä kuvaillut vaiheet tutkimusongelman muotoilusta käsittelytekijöiden ja niiden tasojen valintaan muodostavat yhdessä kokeen esisuunnitteluvaiheen. Montgomery (Montgomery 2005, 17) painottaa, kuinka oleellista kokeen lopputuloksen kannalta esisuunnittelu on: koko kokeen menestyminen riippuu pitkälti siitä.

3.4.3 Koeasetelman valinta

Koesuunnitelmalla tai koeasetelmalla (experimental design) tarkoitetaan suunnitelmaa siitä, missä järjestyksessä kokeet suoritetaan, mitä käsittely-yhdistelmiä koeyksiköt sisältävät ja kuinka satunnaistaminen, toistaminen ja mahdollinen lohkominen toteutetaan. Koeasetelmia löytyy kirjallisuudesta monia yleisesti käytettyjä, joilla on kullakin soveltuva käyttötarkoituksensa riippuen tutkittavien tekijöiden ja tasojen määrästä sekä siitä, minkälaista tietoa kokeen toivotaan antavan. Käytetty asetelma usein määrää myös sen, miten tulokset käsitellään.

Luvun 4 case -osuudessa päätettiin käyttää osittaista 3^3 -faktorikoetta. Kuviossa 7 nähdään, kuinka käsittely-yhdistelmät muodostuvat eri tekijöiden tasojen yhdistelminä. Käsittely-yhdistelmiä on kolmella kolmen tason tekijällä yhteensä 27. Jos kaikki nämä kokeet tehdään, on kyseessä silloin täydellinen 3^3 -koe. Usein kokeiden varsinainen suorittaminen aiheuttaa kustannuksia, ja siksi kokeiden määrää halutaan pienentää. Silloin voidaan täydellinen taulukko osittaa siten, että jäljelle jääneistä koeyksiköistä muodostuva koe on edelleen tasapainossa ja ortogonaalinen. 3^3 -kokeessa tällainen osittainen taulukko on yksi kolmasosa alkuperäisten kokeiden määrästä eli yhdeksän koetta. Muun muassa Montgomery (Montgomery 2005, 361–365) selostaa yksityiskohtaisesti, kuinka osittaisia taulukoita muodostetaan ja mitkä yhdysvaikutukset tällöin peittävät toisensa.



Kuvio 7: Käsittely-yhdistelmät. Vasemmalla kaksi muuttujaa kolmella tasolla, oikealla kolme muuttujaa kolmella tasolla. Tasot on merkitty numeroilla 0, 1 ja 2. (Montgomery 2005, 348.)

3.5 Kokeiden suorittaminen

Kokeiden varsinainen tekeminen on myös erittäin kriittistä, vaikka sitä ei aina kirjallisuudessa korostetakaan. Toteutusvaiheessa usein tulee esille sellaista mitä ei ole osattu ennakoida. Koeyksikkö voi saastua, mikä tarkoittaa sitä, että joku odottamaton tekijä on vaikuttanut vasteeseen, jolloin seurauksena on muusta aiheistosta poikkeava havainto. Kaikki mahdolliset vasteeseen vaikuttavat tapahtumat on syytä aina kirjata ylös, jotta mahdollinen poikkeava havainto voidaan huomioida analyysivaiheessa. Tulosten kirjaamisessa ja tallentamisessa moni asia voi mennä vikaan: kirjoitusvirheet ja muut inhimilliset erehdykset ovat hyvin tavallisia. Järjestelmällisyys ja suunnitelmällisyys puolustavat paikkaansa tässäkin, sillä suunnittelemalla ja valmistelemalla myös kokeiden suorittaminen virheiden mahdollisuus pienenee ja saadun arvokkaan datan laatu paranee.

3.6 Tulosten analysointi

Kokeen tekemisen jälkeen seuraa kerätyn datan analysointi. Suunnitteluvaiheessa kiinnitettiin huomiota siihen, että kerätty data kertoo jotain tutkimuskohteesta, ja että se voidaan analysoida käytössä olevilla analyysityökaluilla. Tilastotiede tuntee hyvin suuren määrän erilaisia analysointitapoja ja testejä, joihin voi tutustua

tarkemmin mm. lähteissä mainitu. Tässä keskitymme muutamiin yleisimmin koesuunnittelussa ja erikoisesti case -osiossa käytettyyn menetelmään.

3.6.1 Tilastolliset testit

Koesuunnittelussa käytetään apuna hypoteeseja tekijöiden ja vasteen välisistä suhteista. Tilastollinen testi on menetelmä, jolla voidaan päättää tuleeko nollahypoteesi hylätä. Hypoteesi on väittämä, jonka oletetaan olevan joko tosi tai epätosi. Tutkimushypoteesi voi olla muotoa:

H_0 : *Käsittely ei ole yhteydessä/vaikuta riippuviin muuttujiin*

Tutkimushypoteesista johdetaan tarvittavat tilastolliset hypoteesit, jotka voivat olla esimerkiksi muotoa:

$H_0: \mu_{VANHA} = \mu_{UUSI}$

$H_1: \mu_{VANHA} \neq \mu_{UUSI}$

H_0 , joka yleensä edustaa yksinkertaisempaa asetelmaa, on niin kutsuttu nollahypoteesi ja H_1 vaihtoehtoinen hypoteesi. Hypoteeseissa μ on populaation keskiarvo, ja nollahypoteesi sanallisesti kirjoitettuna esimerkiksi ”Esiintyvien typen oksidien määrä keskimäärin savukaasuissa on yhtä suuri vanhalla palopäällä ja uudella palopäällä”. Vaihtoehtoinen hypoteesi on sisällöltään päinvastainen. Tilastollisia hypoteeseja muodostetaan yleensä useita yhtä tutkimushypoteesia kohden. (Luftig & Jordan 1998.)

Tilastolliset hypoteesit ovat perusjoukon tunnuslukuja koskevia matemaattisia tai loogisia väittämiä, joiden totuusarvoon otetaan kantaa otoksesta saadun informaation perusteella. Päätöksen tekemiseksi otoksesta lasketaan tunnusluku, jota kutsutaan testisuureksi. Testisuure lasketaan otoksesta laskettujen kuvaavien tunnuslukujen perusteella. Näitä tunnuslukuja ovat esimerkiksi keskiarvo \bar{x} , keskihajonta s ja otoskoko n . Otoksista lasketut tunnusluvut ovat perusjoukon estimaatteja, ja siksi perusjoukkoa koskeviin päätelmiin liittyy aina virheen tekemisen mahdollisuus.

suus. Taulukko 1 havainnollistaa eri tilanteita, joita todellisuuden ja tutkijan tekemien johtopäätösten välillä voi olla.

Taulukko 3: 1. ja 2. lajin virheet (mukailtu Manninen & Ylén 2001, 67.)

		Tutkijan johtopäätös aineiston pohjalta	
		H_1	H_0
Todellisuus	H_1	Vaikutus oikein arvioitu, $1 - \alpha$	2. lajin virhe, β Vaihtoehtoinen hypoteesi on todellisuudessa tosi, mutta nollahypoteesia ei hylätä
	H_0	1. lajin virhe, α Nollahypoteesi on tosi, mutta se hylätään	Oikea johtopäätös, $1 - \beta$

1. lajin virhe eli hylkäysvirhe on kyseessä silloin, kun päätellään, että käsittely on yhteydessä selitettävään muuttujan, kun todellisuudessa se ei ole. H_0 hylätään ja sen sijaan päädytään H_1 :n kannalle. 1. lajin virheen sattumisen todennäköisyyttä kutsutaan riskitodennäköisyydeksi ja sen tunnus on α . Hypoteesien testauksessa arvolle α :n asetetaan haluttu taso. Yleisesti käytetään arvoa $\alpha=0,05$, jolloin riski väärästä tulkinnasta on siis 5 %. Päinvastainen virhe (hyväksymisvirhe), eli nollahypoteesissa pitäytyminen silloin kun se tulisi hylätä, on 2. lajin virhe. Sen todennäköisyyttä kutsutaan β :ksi. $1-\beta$:tä kutsutaan testin voimakkuudeksi. Testin voimakkuus on riippuvainen suurelta osin otoskoosta: suuressa aineistossa pienetkin erot ovat tilastollisesti merkittäviä. Testisuureta verrataan teoreettiseen jakaumaan ja päätellään ylittääkö testisuureen arvo ennalta päätetyn riskitodennäköisyyden rajan. Jos raja ylittyy, voidaan nollahypoteesi hylätä ja tulkita testin tulos esimerkkitapauksessa niin, että vanhalla ja uudella palopäällä typen oksidien esiintymisessä on eroa tilastollisesti merkitsevästi. (Grönroos 2004, 109–110.)

3.6.2 ANOVA, F-testi

Tilastollisia testejä on paljon, koska myös erilaisia aineistoja ja erilaisia selittäviä muuttujia on monenlaisia. Klassisessa koesuunnittelussa paljon käytetty testi on varianssianalyysi, joka on eräänlainen keskiarvotesti. Varianssianalyysistä käytetään yleisesti lyhennystä ANOVA. Varianssianalyysissa havaittujen vasteiden arvojen kokonaisvaihtelu jaetaan vaihtelun lähteisiin liittyviin komponentteihin tai luokkiin. Luokkien sisäistä vaihtelua verrataan luokkien väliseen vaihteluun, ja tämän perusteella päätetään, onko luokkien välinen ero tilastollisesti merkittävä. Havaintoarvojen vaihtelua kuvataan keskistettyjen arvojen neliöiden summalla. Varianssianalyysissa voi selittäviä tekijöitä olla myös kaksi tai useampi, jolloin tekijöiden yhteisvaikutukselle voidaan myös laskea suuruus ja merkitsevyytaso. Tasapainoisesta aineistosta on huomattavasti helpompi laskea näitä tunnuslukuja ja myös tulkinta helpottuu. Tasapainossa aineisto on silloin, kun havaintoja on yhtä monta kussakin luokassa. Tällöin kunkin solun keskivirhe on yhtä suuri ja keskiarvokäsite yksiselitteinen, sillä kokonaiskeskiarvo $\bar{y}..$ on myös solukeskiarvojen aritmeettinen keskiarvo. Ortogonaalisia matriiseja koeasetelmassa käytettäessä tämä toteutuu. (Grönroos 2004, 183.)

Testisuurena käytetään F-testisuuretta, eli keskineliöiden suhdetta. F lasketaan jakamalla kunkin vaihtelun lähteen keskineliö virheen keskineliöllä. Saatua lukua on Fisherin F, jota verrataan F-jakaumaan vapausasteilla (df_x , df_E). Havaittu merkitsevyytaso on todennäköisyys sille, että satunnainen vaihtelu olisi aiheuttanut lasketun F:n arvon. Siis mitä pienempi p, sitä todennäköisemmin tekijällä on todellista vaikutusta vasteeseen. Yleensä käytetään tilastollisesti merkittävän tuloksen rajana arvoa 0,05, kuten luvussa 3.6.1 todettiin. ANOVA:n tulos esitetään taulukkomuodossa, ja esim. lähteessä Montgomery 2004, luvussa 5.4, on esitetty selkeästi kuinka solujen arvot lasketaan.

ANOVA:n liittyvää F-testiä kutsutaan myös päävaikutuksen testiksi. Nimitys on hieman harhaanjohtava, ja keskimääräinen vaikutus olisikin parempi ilmaus. Huomioitava on, ettei siitä aina saa vetää suoria johtopäätöksiä silloin, kun tekijöiden yhdysvaikutustermit ovat suuria; päävaikutus ei ole sama kuin vaikutus. Varianssianalyysin tulos siis kertoo, mitkä tekijöiden ja yhdysvaikutusten päävai-

kutukset ovat tilastollisesti merkittäviä. Vaikutuksen suunnasta se ei kerro mitään, eikä tekijöiden eri tasojen suhteista. Varianssianalyysi on paljon käytetty, koska sen avulla voidaan osoittaa ilmenevät erot merkitseviksi ja sen tuloksia voidaan käyttää hyödyksi mallin sovittamisessa. (Grönroos 2004, 204–205.)

3.6.3 Yksinkertaiset graafiset menetelmät

Estimointi tarkoittaa tilastotieteessä menettelyä, jolla voidaan laskea estimaatti eli arvio parametrille. Parametrin estimaatti tarkoittaa lukua, joka on havaintoaineiston perusteella laskettu parametrin arvolle. Piste-estimointi viittaa estimaatin arvon ilmaisemiseen ja väliestimointi luottamusvälien ja muiden tilastollisten välien laskemiseen. (Grönroos 2004, 102.)

Kokeiden tuloksista lasketaan estimaatteja tekijöiden ja niiden yhteisten vaikutusten suuruudelle. Halutaan tietää, kuinka monta yksikköä tekijän tason vaihtaminen toiseen vaikuttaa vasteeseen. Faktorikokeiden varsinainen etu on, että niiden tuloksista voidaan estimoida myös tekijöiden yhdysvaikutuksia, eli niitä vaikutuksia, jotka ovat riippuvaisia jonkun toisen tekijän tasosta. Tekijän päävaikutusta merkitään (kuten itse tekijääkin) isolla kirjaimella, esimerkiksi A. A:n neliöllistä vaikutusta merkitään A^2 . Tekijöiden A ja B yhdysvaikutukseen viitataan merkinällä AB. Päättelyä helpottamaan ja vaikutuksia havainnollistamaan on kehitetty monia graafisia esityksiä, moni erityisesti koesuunnittelun käyttöön. Yleisimmät ja havainnollisimmat ovat päävaikutuspiirros ja yhdysvaikutuspiirros, joista kerrotaan lyhyesti seuraavassa.

Faktorin vaikutuksen arvioimiseksi lasketaan faktorin (tässä A) keskimääräinen arvo kaikissa niissä koeyksiköissä, joissa faktori on ollut korkealla tasolla. Tästä arvosta vähennetään vastaava arvo faktorin matalalla tasolla. Tätä erotusta kutsutaan faktorin päävaikutukseksi. Päävaikutus voidaan laskea yhtälöstä

$$ME(A) = \bar{z}(A+) - \bar{z}(A-)$$

missä $\bar{z}(A+)$ on keskimääräinen vaste kyseisen faktorin korkealla tasolla ja $\bar{z}(A-)$ on keskimääräinen vaste kyseisen faktorin matalammalla tasolla. Faktori-

kokeissa koesuunnitelman symmetrian vuoksi $\bar{z}(A+)$ ja $\bar{z}(A-)$ laskemisessa huomioon otetaan muiden kokeessa mukana olevien faktorien yhdistelmät, ja tämän vuoksi päävaikutuksella on olemassa relevantti tieteellinen tulkinta, kuten Hamada ja Wu osoittavat. (Wu & Hamada 2000, 104) Päävaikutuspiirros muodostetaan piirtämällä vaaka-akselille kunkin faktorin tasot ja pystyakselille niitä vastaavat havaintojen keskiarvot. Nämä pisteet yhdistetään kunkin faktorin sisällä viivalla.

Yhdysvaikutusta faktorien välillä ilmenee silloin, kun yhden faktorin vaikutus riippuu toisen tekijän tasosta. Toisin sanoen tietyn tekijän vaikutus on erilainen toisen tekijän eri tasoilla. Pahimmassa tapauksessa faktorin B korkealla tasolla A:lla on positiivinen vaikutus ja B:n matalalla tasolla negatiivinen. Pelkkien numeroarvojen perusteella on vaikea arvioida, esiintyykö yhteisvaikutusta vai ei ja kuinka suurta se on. Hyödyllisempi onkin yhdysvaikutuspiirros, josta saadaan helposti viitteitä yhdysvaikutuksen olemassaolosta: jos viivat kaaviossa ovat yhdensuuntaiset, ei yhdysvaikutusta ole, ja jos ne risteävät tai menevät eri suuntiin, jonkinasteista yhdysvaikutusta faktorien välillä esiintyy.

Faktorien A ja B yhdysvaikutuspiirroksessa esiintyvät kaikki A ja B:n yhdistelmiä vastaavat vasteen arvot (tai keskiarvo useammasta havainnosta) pystyakselilla ja B:n tasot vaaka-akselilla. A:n matalaa tasoa vastaavat pisteet yhdistetään viivalla, samoin kuin A:n korkeaa tasoa vastaavat pisteet. Yhdysvaikutukselle voidaan kuitenkin laskea myös arvo. Kahdelle tekijälle A ja B vaikutus lasketaan seuraavasti

$$I_{A,B} = \frac{1}{2} (\bar{z}(A|B+) - \bar{z}(A|B-))$$

jossa $\bar{z}(A|B+)$ on A:n efekti niissä yksiköissä, joissa B on korkealla tasolla eli A ehdolla B+. Vastaavasti $\bar{z}(A|B-)$ on A ehdolla B-. (Wu & Hamada 2000, 110.)

3.6.4 Regressioanalyysi

Useimmiten koesuunnittelun tavoite on selvittää tekijöiden vaikutusta prosessin vasteeseen. Regressioanalyysiä käytetään muuttujien syy-seuraus suhteiden kuvaamiseen ja näitä suhteita kuvaavan mallin luomiseen. Kun kyseessä on faktori- koe ja muuttujat ovat kvantitatiivisia, usein käytetty menetelmä on regressio- analyysi. (Montgomery 2004, 389.)

Regressioanalyysissä muodostetaan aineistosta tilastollinen malli, jossa selittävän muuttujan x avulla selitetään vaihteluita vasteen y havaitussa arvossa. Malliin kuuluu myös satunnainen osa ε , joka kuvaa satunnaista virhettä. Jos y_1, y_2, \dots, y_n kuvaavat havaintoja vasteen arvosta, ja x_{ij} kuvaa muuttujan x_j i:tä havaintoa tai tasoa. Yhtälö voidaan tällöin kirjoittaa muotoon

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i$$

ja matriisimuodossa

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

jossa \mathbf{y} havaittujen vasteiden $(n \times 1)$ vektori, \mathbf{X} on $(n \times p)$ matriisi selittävien muuttujien tasoista, $\boldsymbol{\beta}$ on regressiokertoimien $(p \times 1)$ vektori ja $\boldsymbol{\varepsilon}$ on $(n \times 1)$ satunnaisten virheiden vektori, kun n on koeyksiköiden määrä ja $p=k+1$ ja k selittävien muuttujien määrä mallissa.

Yhtälössä tuntematon on $\boldsymbol{\beta}$, jonka arvo voidaan estimoida aineistosta käyttäen jotakin hyvyyskriteeriä. Yleisesti käytetään pienimmän neliösumman menetelmää, jossa etsitään sellaista vektoria, jossa virheiden $\boldsymbol{\varepsilon}$ neliösumma on mahdollisimman pieni. Etsitään siis vektoria $\hat{\boldsymbol{\beta}}$ (parametrien β_p estimaatit), joka minimoi

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta})$$

derivoimalla L :n ja β :n suhteen saadaan

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y$$

johtaminen on esitetty yksityiskohtaisesti mm. Montgomery 2004, s. 390.

Koeasetelman ortogonaalisuuden yksi etu on siinä, että ortogonaalisissa koeasetelmissa on $X^T X$ diagonaalinen matriisi, jolloin sen käänteismatriisi on helppo löytää. Tämän lisäksi ortogonaalisuuden vuoksi β :n estimaatit eivät korreloi, $\text{Cov}(\beta_i, \beta_j) = 0$. (Montgomery 2004, 383)

Sovitettu regressiomalli on

$$\hat{y} = X\hat{\beta}$$

jossa $\hat{\beta}$ on estimaatti regressiokertoimille, ja \hat{y} estimaatti vasteille.

Eroa varsinaisen havainnon y ja vastaavan sovitetun arvon \hat{y} välillä kutsutaan jäännökseksi tai residuaaliksi, ja niitä merkitään e_i . Residuaalien vektori on

$$e = y - \hat{y}$$

Mallille lasketaan jäännösten perusteella keskivirheen arvo, jota kutsutaan estimaatin keskivirheeksi. Jäännösten neliösumma SS_E voidaan saada yhtälöstä

$$SS_E = y^T y - \hat{\beta}^T X^T y$$

ja sillä on $n - p$ vapausastetta. Kun tämä neliösumma jaetaan vapausasteillaan, saadaan estimaatti mallin keskihajonnalle, joka on siis mallin estimaattien keskivirhe. (Grönroos 2004, 212.)

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SS_E}{n - p}$$

3.6.4.1 Tekijöiden valinta malliin

Kaikkia testattuja muuttujia harvoin sisällytetään lopulliseen malliin. Tilastollisesti merkitsevät tekijät etsitään tavallisesti jo ennen mallin sovitusta jollain muulla menetelmällä. Esimerkiksi graafisilla menetelmillä tai varianssianalyysillä saadaan viitteitä siitä, mitkä tekijät ovat merkittäviä ja mitkä eivät. Pienimmän neliösumman menetelmällä saadaan aina aineistoon hyvin sopiva malli, jos otetaan mukaan kaikki tekijöiden termit ja yhdystermit. On kuitenkin kaksi syytä, miksi harvoin tyydytään tähän yksinkertaiseen ratkaisuun. Ensimmäinen syy on ennustusten tarkkuus: jos kaikki mahdolliset termit otetaan mukaan aineistoon, myös mallin tuottamat ennustukset ovat epätarkkoja. Toinen syy on tulkinta: kun prediktoreita (eli termejä mallissa) on monta, niiden fyysinen tulkinta on vaikeaa. Korkeamman kuin toisen tason yhdysvaikutuksia on vaikea nähdä näiden yhdystermien yhteys todelliseen prosessiin. Sovelluksen kannalta järkevintä on löytää tärkeimmät tekijät ja poistaa mallista yksityiskohdat, joiden merkitys on epäselvä ja pieni. Tässäkin on usein havaittu pätevän klassinen Pareton periaate eli 80/20 - sääntö: 20 % tekijöistä selittää 80 % vaihtelusta. Parhaiten ilmiötä kuvaavan mallin löytämiseksi on monia menetelmiä, joista yleisimmin käytetyt lienevät best subset selection ja forward ja backward stepwise selection. (Hastie ym. 2009, 57.)

3.6.4.2 Mallin tarkastelu

Mallin tilastollinen merkitsevyys voidaan testata esimerkiksi varianssianalyysin avulla. Tällöin hypoteesit ovat

$$H_0: \beta_0 = \beta_1 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ ainakin yhdelle } j$$

H_0 :n hylkääminen merkitsee, että ainakin yksi regressiokerroin on erisuuri kuin nolla, eli malli on niin sanotusti tyhjää parempi. (Montgomery 2004, 388.)

Mallin tilastollisen merkitsevyyden yhteydessä käytetään usein myös selitysasteen R^2 arvoa. Korkea selitysasteen arvo ei aina kuitenkaan tarkoita, että malli on hyvä. Selitysaste nousee aina, kun malliin lisätään tekijä, huolimatta siitä, onko se mer-

kitsevä vai ei. Siksi on mahdollista, että R^2 arvo on mallilla suuri, ja silti malli tuottaa huonoja ennusteita. (Montgomery 2004, 389–390.)

Malli perustuu joukolle oletuksia, ja aina pitää tarkastella myös, kuinka hyvin oletusten voidaan katsoa toteutuvan havaintoaineistossa. Lopuksi tarkastellaan, ettei havaintoaineisto ole kovin suuressa ristiriidassa näiden oletusten kanssa. Erikoisesti jäännösten ominaisuuksia tutkitaan mallin diagnostisessa tarkastelussa. Pienimmän neliösumman menetelmän oletukset ovat vakiovarianssisuusoletus ja korreloimattomuusoletus. Tämä tarkoittaa, että mallin virhe-termit ovat normaalisti jakautuneesta jakaumasta, jolla on tuntematon, mutta vakio keskihajonta, ja että virheet eivät korreloi. Näitä ominaisuuksia tutkitaan erilaisten graafisten menetelmien avulla, ja suuri osa menetelmistä perustuu jäännösten tarkasteluun. (Grönroos 2004, 212) Menetelmät oletusten testaamiseksi on esitelty lähdeaineistossa, esimerkiksi Grönroos 2004, 216–217.

3.7 Johtopäätökset ja suositukset

Datan analyysistä tulisi seurata myös joku käytännön johtopäätös tai suositus toimenpiteiksi. Saatua informaatiota peilataan todellisuuteen ja kantaa voi ottaa mm. siihen, ovatko tilastollisesti merkitsevät tulokset merkitseviä myös käytännössä. Johtopäätöksissä kiinnitetään huomiota siihen, mihin populaation tulokset ovat sovellettavissa ja mihin taas ei. Jos tarvetta lisätutkimukseen ilmenee, tulisi se myös todeta lopuksi ja selventää myös, mitkä asiat ovat kiinnostavia lisätutkimuksen kannalta. Tuloksena kokeiden analyysistä pitäisi olla kirjallinen tuotos, raportti, jossa annetaan vastaus alkuperäiseen tutkimusongelmaan. (Luftig & Warren 1998, 171.)

4 CASE: 11,1MW MONOBLOCK

Koesuunnittelua sovellettiin tuotekehitysprojektissa, joka oli käynnistynyt Oilonilla 2009 vuoden jälkipuoliskolla. Tässä luvussa kerrotaan projektista ja siitä, kuinka koesuunnittelu ja koeajot käytännössä toteutettiin. Tehtävänä opinnäytetyön tekijänä oli vetää projektin koesuunnitteluosuutta. Kokeiden suunnittelussa apuna käytettiin Numerola Oy:n ohjelmistoja: DOE -ohjelmaa koeasetelman luomiseen sekä Datain-ohjelmaa tulosten analysointiin. Numerolalta saatiin myös asiantuntija-apua kokeiden suunnitteluun ja analysointiin. Tutkimuksessa päätettiin edetä asteittain siten, että ensimmäisessä vaiheessa tutkimuksessa keskitytään tutkimaan palopään erilaisia mekaanisia ratkaisuja. Opinnäytetyöni käytännön osa on rajattu käsittelemään näistä tutkimuksista ensimmäistä koesarjaa, joka toteutettiin joulukuussa 2010.

4.1 Monoblock -projekti

Tuotekehitysprojektissa tavoitteena oli suunnitella poltin, jonka teho olisi maksimissaan 13,3 MW ja rakenne silti ns. monoblock -tyyppinen. Monoblock -termi viittaa siihen, että polttimen kaikki mekaaniset osat ovat yhtenäistä rakennetta, kun aikaisemmat tämän teholuokan laitteet ovat Oilonilla muodostuneet erillisestä polttimesta, paineenkorotusyksiköstä sekä palamisilmapuhaltimesta. Tärkeimmäksi projektin tavoitteeksi tuli edullisuus sekä asiakkaalle että valmistukselle. Muita tärkeitä tavoitteita olivat päästörajojen alittaminen sekä matala melutaso. Monoblock -polttimien tarpeeksi arvioitiin kaksi teholuokkaa: vesikattilatehon ollessa 12 MW poltinteho on 13,3MW sekä vastaavasti 10 MW vesikattilateholla poltinteho on 11,1 MW (90 % hyötysuhteella). Polttimesta päätettiin tehdä moduuloiva, ja ohjaus toteutettaisiin aina erillisellä polttimenohjausautomaatiikalla.

Kyseessä on kevytöljy-kaasu yhdistelmäpoltin, eli poltin, jolla voidaan polttaa sekä kaasua, että kevytöljyä. Ensisijaisena polttoaineena on maakaasu. Maakaasukäytöllä polttimen tavoitepäästöluokaksi asetettiin luokka 3 ja kevytöljykäytöllä luokka 1. Päätettiin tehdä myös pelkkää kaasua polttava vastaava poltin. Tämän opinnäytetyön puitteissa tehtiin polttokokeita vain kaasulla, joten polttimeen ja päästömittaukseen sovellettiin SFS-EN 676 – standardia (Automaattiset puhallin-

polttimet kaasumaisille polttoaineille). Standardin mukaan hiilimonoksidipitoisuus ei saa ylittää arvoa 100 mg/kWh (93 ppm) valmistajan ilmoittamalla nimellisellä syöttöjännitteellä. Projektin määrittelyssä tavoitteeksi otettiin matalampi 80 mg/kWh maakaasukäytöllä. Typenoksidien raja-arvo on 2. ryhmän kaasuille NO_x-luokassa $3 \leq 80$ mg/kWh, mikä vastaa noin 39 ppm, kun jäännöshapen määrä savukaasussa on 3 %.

4.2 Tutkimusongelman määrittely

Tutkimusongelman määrittely oli haasteellista, sillä potentiaalisia tutkimuksen kohteita oli useita, ja kuitenkin haluttiin, että koesarja pysyisi mahdollisimman pienenä. Tavoitteena oli yhtä aikaa sekä optimaalinen mekaaninen rakenne sekä parhaat arvot palamisessa koko tehoalueella. Toisaalta koska poltin oli rakenteeltaan uusi ja uuden tuotteen prototyyppi, haluttiin tutkia yleisesti sen käyttäytymistä. Päätettiin ensin tutkia mekaanisen rakenteen kiinnostavien muuttujien vaikutusta päästöihin ja palamiseen eri tehoalueilla. Tutkimusongelma oli siis tutkia, miten kolme valittua muuttujaa vaikuttivat palamistulokseen kohteena olevassa polttimessa ja mitkä ovat tutkittavien muuttujien parhaat arvot.

4.3 Käsittelytekijöiden valinta, tasot, hajonta

Kuten luvussa 3 kuvattiin, prosessin vasteeseen vaikuttavat tekijät tulisi tunnistaa niin laajasti kuin mahdollista. Palaverissa 17.8.2010 määritettiin joukko muuttujia, joiden vaikutusta mahdollisesti haluttiin tutkia. Näillä muuttujilla tiedettiin olevan vaikutusta palamistulokseen, ja entisten sovelluksien perusteella ratkaisujen odotettiin toimivan hyvin myös tässä projektissa. Nyt vaikutusten suuruudesta ja suunnasta haluttiin tutkimukseen perustuvaa yksityiskohtaisempaa tietoa. Palaverissa muodostettiin seuraava taulukko (taulukko 4), jossa muuttujat on ryhmitelty luonteensa mukaan:

Suunnittelumuuttujiksi päätettiin valita ensin tekijät, joilla tiedettiin saadun hyviä tuloksia aikaisemmassa projektissa. Suunnittelun pohjana käytettiin aikaisemmin toteutettua kaasukäyttöistä 1600ME Low-Nox versiota. Kaasu ja öljy päätettiin

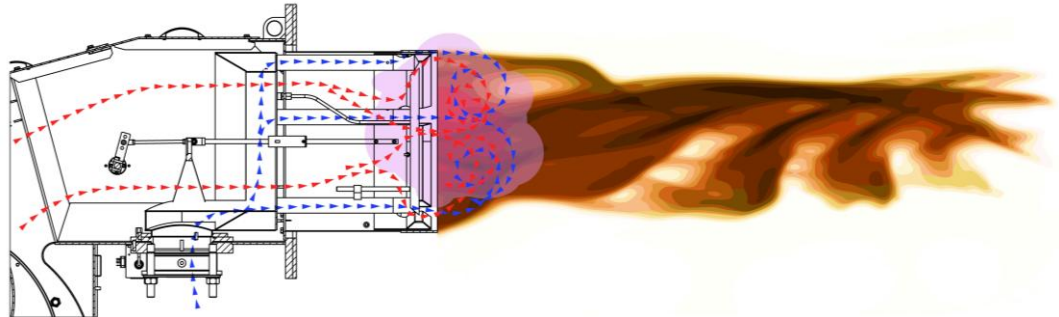
tutkia erillisesti, sillä osa muuttujista on sellaisia, että niillä on oletettavasti vaikutusta vain toisella polttoaineella.

Taulukko 4: Vasteeseen vaikuttavia tekijöitä

Tunnettu muuttuja		Hallitsematon	Tuntematon
Hallittavissa			
Tutkitaan	Ei tutkita		
Säätörenkaan asema	Kattila	Ilmankosteus	?
Liekkilevy	Polttoaine-erä ja laatu	Ilman lämpötila	
Palopää	Kaasu/öljy polttoaineena	Vastapaine	
Sekundäärikaasuputken etäisyys ulkosylinteristä	Kattilan lämpötila	Ilmanpaine	
Sekundäärikaasuputken pituus			
Primäärikaasuputken halkaisija			
Suutin öljylle			

Typen oksidien muodostumismekanismien vuoksi polttimen palopään rakenne on ratkaisevassa asemassa lopputuloksen kannalta. Palopään rakenteellisilla ratkaisuilla pyritään vaikuttamaan aineen virtaukseen. Tunnettuja ratkaisuja päästöjen vähentämiseen ovat mm. palamisilman vaiheistus, polttoaineen syötön vaiheistus ja erilaiset virtausta sekoittavat rakenteet. (Raiko ym. 2002 , 452.) Kokeen polttimessa kaasun syötön vaiheistus on toteutettu erillisillä primääri- ja sekundäärikaasusauvoilla. Tässä rakenteessa suurin osa kaasusta tulee ulkokehältä sekundäärikaasusauvoista ja suhteessa pienempi määrä keskeltä primäärikaasusauvoista. Kuviossa 8 on kuvattu palopään rakennetta yksinkertaistaen. Kuvassa siniset nuolet kuvaavat kaasun virtausreittiä liekkiin ja punaiset nuolet kuvaavat ilman virtausta. Kaasu kulkee kuvassa näkyvän kaasusuuttimen kautta ja johdetaan kaasu-

sauvoja pitkin lähelle liekkilevyä, missä se purkautuu suuttimesta ja sekoittuu ilmaan. Seos palaa liekkilevyn edessä.



Kuvio 8: GP-1000M palopään yksinkertaistettu kuva

Kuten luvussa 3 on selitetty, selittävät muuttujat jaetaan jatkuviin ja luokitteleviin muuttujiin. Tämä asia nousi suunnittelun alusta lähtien eräänlaiseksi ongelmaksi, sillä moni mekaaninen muuttuja on luonteeltaan pikemminkin luokitteleva kuin jatkuva. Ajateltiin, että tuloksia analysoidaisiin lineaarisen regression avulla, jolloin muuttujien olisi paras olla jatkuvia. Kuitenkaan mekaanisen rakenteen muuttajat eivät ole säädettävissä muulla tavalla kuin vaihtamalla osia toisiin tai muuttamalla rakennetta. Toisaalta osia voidaan valmistaa lähes millaisia tahansa, jolloin näitä muuttujia voidaan teoriassa ajatella portaattomasti säädettäviksi. Tämä asia ratkaistiin kokeissa valitsemalla muuttujiksi eri kappaleiden mittoja. Huomiotta jätettiin se seikka, että jonkin mitan muuttuessa myös polttimen osan muut ominaisuudet voivat muuttua.

Käsittelytekijöiksi valittiin kolme muuttujaa polttimen palopään mekaanisesta rakenteesta: liekkilevyn sisähalkaisija, primäärikaasusauvan sisähalkaisija ja sekundäärikaasusauvan etäisyys palopään putkesta. Nämä muuttujat päätettiin tutkia kolmella tasolla, sillä epäiltiin joidenkin muuttujien vaikutusten olevan epälineaarisia. Tasot valittiin niin, että tasojen välit olivat yhtä suuret kunkin muuttujan sisällä, jolloin keskimäinen taso edustaa siis ”matalan” ja ”korkean” tason keskikohtaa. Tasoihin viitataan tästä eteenpäin merkinnöillä ”-1”, ”0” ja ”1”. ”-1” tarkoittaa matalinta tasoa, siis arvoltaan pienintä. ”0” merkitsee keskimäistä

tasoa, ja ”1” korkeinta. Taulukkoon 5 on koottu valitut käsittelytekijät ja niiden tasot sekä muut kokeessa huomioitavat tekijät.

Taulukko 5: Käsittelytekijät, niiden tasot ja muut huomioitavat tekijät

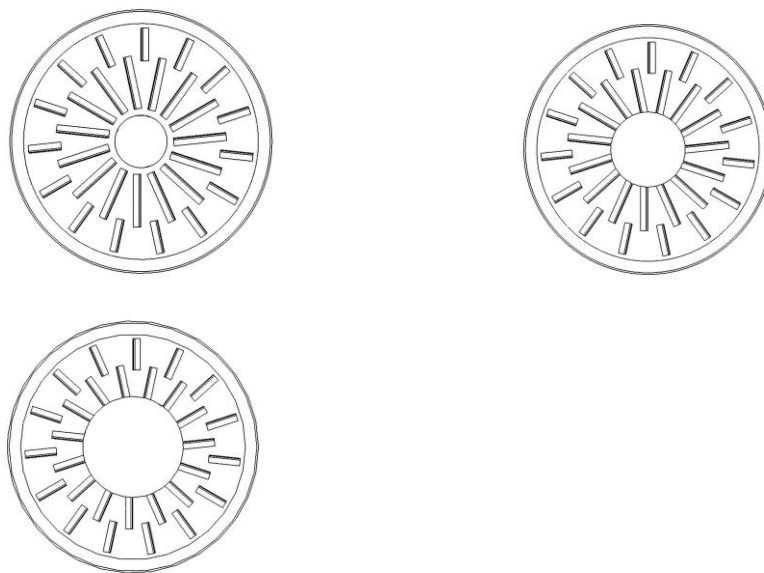
Koe 1.1: Kaasukäyttö			
Full factorial $3^3 = 27$			
1/3 fraction = 9			
Käsittelytekijät	Luokittelu	Tasojen määrä	Tasojen kuvaus
1. Liekkilevyn sisähalkaisija, d_s	kvantitatiivinen	3	-1: 80 mm 0: 120 mm 1: 160 mm
2. Primäärikaasusauvan (sisä)halkaisija, d_p	kvantitatiivinen	3	-1: 10.0 mm 0: 13.0 mm 1: 16.0 mm
3. Sekundäärikaasusauvojen etäisyys ulkolieriöstä, l_s	kvantitatiivinen	3	-1: 7 mm 0: 10 mm 1: 13 mm
Neljäs tekijä	tasot	Rajoitetut tekijät	Tasolle
1. Teho	1: 8MW 2: 3MW	1. Kattila	8 MW kattila laboratoriossa
Annetaan vaihdella:	Miten taltioidaan	2. Jäännöshappi	3 %
1: LMV:n säädöt (paitsi säätörengas)	Säätökäyrät talletetaan kunkin koepisteen kohdalla	3. Säätörengas asema	41,1° 8MW ja 15,0° 3MW
2. Ympäristö olosuhteet	Taulukoidaan kunkin koepisteen kohdalla	4. Muut mekaanisen rakenteen osat	Ei muuteta kokeen aikana
3. Kaasun paine	Gasmetilta otetaan arvot 10s välein, lasketaan keskiarvo		
4. Kattilan lämpötila	mahdollisimman vakio, merkitään arvo ylös 5min. kohdalla		

4.3.1 Liekkilevyn sisähalkaisija

Ensimmäiseksi käsittelytekijäksi valittiin liekkilevyn sisähalkaisija. Referenssitapauksessa hyviä tuloksia oli saatu hyvin pienellä keskireiällä, joten päätettiin tutkia sen vaikutusta tässä polttimessa. Liekkilevyn tehtävä polttimessa on stabiloida liekki. Liekkilevy toimii virtauksessa esteenä, joka aiheuttaa paineen muutoksen

virtauksessa ja tämän ansiosta liekkiin syntyy pyörteinen paluuvirtausalue. Liekkilevyssä on myös hahloja, jotka saattavat liekin aksiaalisesti pyörivään liikkeeseen, jolloin virtaus leviää tulipesään tullessaan.

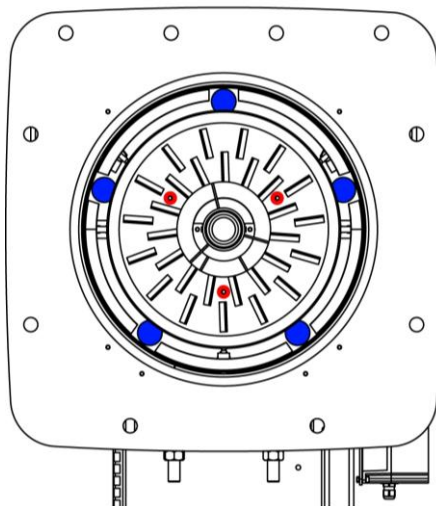
Koetta varten valmistettiin kolme erilaista liekkilevyä. Pienimmän keskireiän kooksi valittiin 80 mm. Suurimman keskireiän halkaisija, 160 mm, valittiin sen perusteella, että vastaavan tehoisessa tuotteessa oli tuo koko käytössä. Keskimäistä tasoa varten tehtiin liekkilevy, jossa keskireikä oli 120 mm. Kun keskireiän kokoa muutettiin ja levyn pinta-ala muuttui, jouduttiin muuttamaan myös liekkilevyn hahloja, koska liekkilevy ei voi olla umpinainen. Valmistusteknisistä syistä hahloja voitiin tehdä vain kahta kokoa. Ulkokehällä olevien hahlojen koko päätettiin pitää vakiona ja sisäkehällä olevia suurennettiin. Pienireikäisin liekkilevy ($d_s=80$ mm) erosi muista siinä, että sisempiä hahloja ei voitu tehdä keskireikään aukeaviksi, kuten muissa liekkilevyissä (katso kuvio 9). Keskireiän reuna oli siis koko matkalta yhtenäinen. Liekkilevyn pinta-alan kasvattaminen aiheuttaa suuremman painehäviön.



Kuvio 9: Liekkilevyt erikokoisilla sisärei'illä. Ylärivissä vasemmalla sisäreikä $d_s=80$ mm, ylärivissä oikella $d_s=120$ mm ja alarivissä $d_s=160$ mm

4.3.2 Primäärikaasusauvan sisähalkaisija

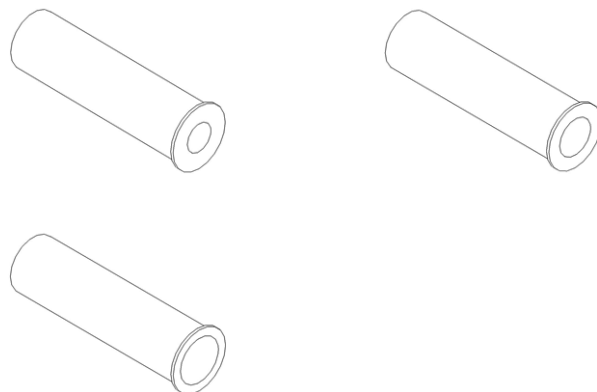
Toinen käsittelytekijä kokeissa oli primäärikaasusauvojen sisähalkaisija. Sisähalkaisijasta riippuu, kuinka suuri määrä polttoaineesta syötetään liekin sisempään osaan. Tällä ratkaisulla haetaan sitä, että palaminen tapahtuisi kahdessa eri liekki-alueessa: primäärikaasusauvoilla saadaan aikaan tyviliekki, ja sekundäärikaasusauvoista tuleva loppu kaasu muodostaa palaessaan pääliekin. Tällä palamisen vaiheistamisella pyritään vaikuttamaan typen oksidien muodostumiseen. Kuviossa 10 sekundäärikaasusauvat on merkitty sinisellä ja primäärikaasusauvat punaisella.



Kuvio 10: Sekundääri- ja primäärisauvojen paikat palopäässä

Primäärikaasusauvoina tässä polttimessa on kolme putkea, joilla johdettiin kaasua kaasunjakorenkaalta keskelle, lähemmäs liekin pitkittäistä akselia. Putket vietiin liekkilevyn läpi, jolloin kaasu purkautui suoraan liekkilevyn eteen. Primäärikaasusauvoja kokeiltiin myös kolmella tasolla. Tasojen arvoiksi päätettiin 16 mm, 13 mm ja 10 mm (putken sisähalkaisija). Aikaisemmista sovelluksista tiedettiin, että parhaat tulokset saatiin, kun tyviliekkiin syötetään noin 7 % polttoaineesta. 13 mm keskihalkaisija vastasi n. 7 % kaasumäärää. Määrän muutosta haluttiin kokeilla molempiin suuntiin, joten 13 mm valittiin 0-tasoksi. -1-tasoksi valittiin 10 mm, joka vastasi noin 4 %, ja 1-tasoksi 16 mm, jolloin primäärikaasun määrä on noin 11 %. Osuudet laskettiin yksinkertaisesti reikien pinta-alan perusteella. Jotta tasolta toiselle siirtyminen sujuisi mahdollisimman sujuvasti, toteutettiin sisähalk-

kaisijan muutos virtausta kuristavilla holkeilla, jotka asennettiin primäärikaasusauvan sisälle.

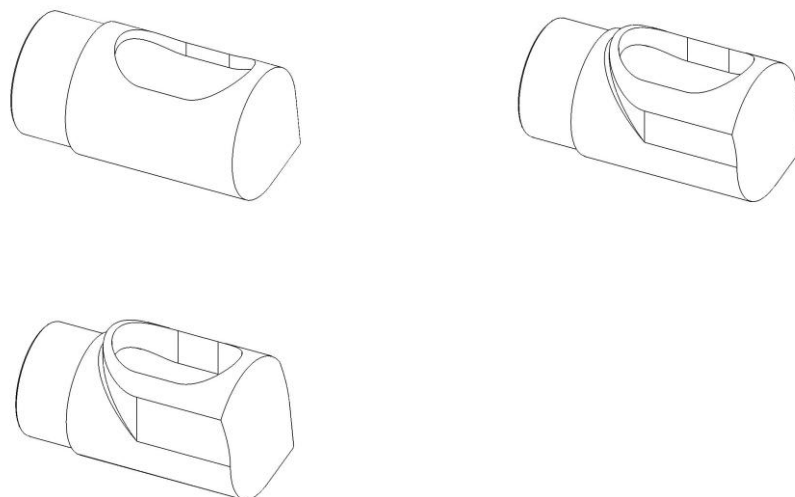


Kuvio 11: Holkit primäärikaasusauvan sisähalkaisijan muuttamiseksi, koot $d_p=10$ mm, $d_p=13$ mm, ja $d_p=16$ mm

4.3.3 Sekundäärikaasusauvan etäisyys palopään putkesta

Kolmantena tutkittiin sekundäärisauvan etäisyyttä palopään putkesta. Sekundäärikaasusauva on sauvamainen kaasusuutin, jota pitkin syötetään liekkiin suurin osa polttoaineesta. Kokeen polttimessa näitä sauvoja on viisi, ja ne on sijoitettu tasaisin välein kaasunjakorenkkaan kehälle (katso kuvio 10). Sauvasta kaasu purkautuu palopään soikeasta reiästä, joka on sauvan sivulla kohtisuorassa palopään putkeen vasten. Tutkittava muuttuja on siis kaasun purkautumiskohdan ja palopään putken välinen etäisyys; sen suuruudella on merkitystä kaasun virtaukselle ja siten sille, kuinka kaasu ja ilma sekoittuvat ennen syttymistä.

Etäisyyden muuttaminen toteutettiin taas erilaisilla holkeilla. Perustapauksessa etäisyys reiän pohjasta on 13 mm. Kiinnostuksen kohteena oli erikoisesti välin pienentäminen, joten muiksi tasoiksi valittiin 10 mm ja 7 mm. Nämä osat valmistettiin koneistamalla, jotta reiän muoto vastaisi mahdollisimman hyvin alkuperäisen 13 mm osan reiän muotoa.



Kuvio 12: Suuttimet sekundäärikaasulle. Kuvassa ylärivissä vasemmalla vakio-suutin ($l_s=13\text{mm}$), ylärivissä oikealla suutin $l_s=10\text{ mm}$ ja alarivissä suutin $l_s=7\text{ mm}$.

4.3.4 Teho

Polttimen toiminta-alue määritellään tehon ja kattilan vastapaineen avulla. Vastapaine tarkoittaa painetta kattilan polttokammiossa palamisen aikana. Teholla tarkoitetaan tässä polttoainetehoa Q_F , joka saadaan polttoaineen kulutuksen ja polttoaineen nettolämpöarvon tulona. Maakaasun nettolämpöarvo on noin $H_j = 36\text{ MJ/m}^3\text{n}$, ja kaasun kulutusta voidaan kokeessa seurata kaasumäärän muuntimen avulla. $100\text{m}^3\text{n/h}$ kaasun kulutus vastaa noin 1 MW poltintehoa.

Poltin on maksimiteholtaan $11,1\text{ MW}$, mutta laboratorion testikattila taas on nimelliseltä teholtaan vain 8 MW , ja siksi mittaukset päätettiin tehdä 8 MW teholla. Koska haluttiin tietoa käsittelytekijöiden vaikutuksista eri tehoalueilla, tehtiin mittaukset myös toisella teholla, 3 MW :lla, jonka ajateltiin olevan tarpeeksi kaukana 8 MW :n tehosta erojen havaitsemiseksi. Kattilan vastapainetta säädettiin siten, että 3 MW :n teholla vastapaine oli noin $0,2\text{ mbar}$. Tällöin 8 MW :n teholla se vaihteli välillä $9,4\text{--}11,2\text{ mbar}$ riippuen kunkin koeyksikön käsittely-yhdistelmästä. Tehosta tuli lopulta neljäs käsittelytekijä. Ennestään tiedettiin tehon yleensä vaikuttavan selkeästi NO_x päästöihin: mitä suurempi teho, sen suuremmat päästöt.

Vaikutuksen arveltiin olevan lineaarinen, joten tehoa ei haluttu tutkia kolmella tasolla kuten muita tekijöitä.

Teho haluttiin ottaa mukaan koetauluksoon, mutta samalla lailla kuin muita muuttujia sitä ei voitu käsitellä tasojen määrän vuoksi. Toisaalta tehon säätäminen täsmällisesti on vaikeaa, sillä polttoainetehto riippuu monesta tekijästä. Tehoa polttimessa säädetään neljällä eri toimilaitteella: puhaltimen moottorin nopeudella ja ilmapeltien asennolla säädellään tulevan ilman määrää, säätörenkaan asennolla liekkilevyn ja palopään välisen raon suuruutta (joka suoraan vaikuttaa virtaukseen), ja kaasuventtiilin läpän asennolla tulevan kaasun määrää. Näistä säätörenkaan asento pidettiin vakiona, ja tehoa säädettiin muiden toimilaitteiden avulla.

4.4 Vaste

Mahdollisia vastemuuttujia voi olla useita, ja poltossa lähes aina onkin. Tutkittaviksi vastemuuttujiksi koesarjassa valittiin taulukossa 6 esitetyt vasteet. Ensisijaisesti oltiin kiinnostuneita päästöarvoista, joita ovat typen oksidien määrä savukaasuissa (NO_x), hiilimonoksidin määrä savukaasuissa (CO), hiilivetyjen summa (C_xH_y). Päästöt olivat selkeä vaste, sillä niille oli olemassa hyvä mittauslaitteisto ja selkeät tavoitearvot. Painehäviöllä on suuri merkitys liekin ominaisuuksiin ja polttimen toimintaan, ja siksi mitattiin myös painehäviö palopään yli, mikä tarkoittaa polttimen sisällä ennen palopäätä mitatun ja kattilasta mitatun paineen erotusta. Mitattiin myös kaasun paine kaasusuuttimessa.

Lisäksi haluttiin arvioida syttyminen ja stabiilisuus, mutta koska näitä vasteita ei voida mitata millään mittarilla, on vasteen arvo silmämääräinen arvio kolmiporraisella asteikolla. Asteikkona on huono – kohtalainen – hyvä, koodattuna 1-3. Järjestysasteikollista vastetta voidaan tulosten käsittelyssä käsitellä kuten muitakin vasteita. Polttimen aiheuttaman äänen voimakkuus mitattiin myös jokaisessa koepisteessä.

Taulukko 6: Vasteet

Muuttuja	Yksikkö	Mittaustapa/laite
CO	ppm	Gasmet
NO _x	ppm	Gasmet
Stabiilisuus	kokonaisluku (kolme tasoa)	Arvio
Painehäviö palopään yli	mbar	Painemittari Kytola
Syttyminen	kokonaisluku (kolme tasoa)	Arvio
Hiilivedyt C _x H _y	ppm	Gasmet
Melu	dB	Desibelimittari

4.5 Koeasetelman määrittely

Palaverissa 1.9.2010 päädyttiin etenemään ensimmäisiin kokeisiin $3^{3-1} = 9$ koeasetelmalla. Tämä tarkoittaa koetta, jossa on kolme käsittelytekijää kolmella tasolla. Koeavaruuden muodostavat kaikki eri muuttujien tasojen kombinaatiot. Kokeiden määrän alentamiseksi päätettiin tehdä osittainen faktorikoe. Täysi koesarja olisi kooltaan $3 \times 3 \times 3 = 27$ erilaista koemahdollisuutta, mutta antamalla yhden toisen tason yhdysvaikutuksen sekoittua yhteen kokeen päävaikutuksista saadaan koemäärä pienennettyä yhdeksään. Informaatiota siis kadotetaan, mutta tämän informaation oletetaan olevan merkitykseltään niin vähäpätöistä, että se voidaan uhrata pienemmän koeajomäärän saavuttamiseksi. Päädyttiin ajamaan myös ensimmäinen piste toisen kerran, jotta prosessin varianssin suuruusluokasta saadaan käsitys. Ensimmäisen koesarjan jälkeen voidaan tehdä päätös näiden kolmen kokeen parhaasta vaihtoehdosta ja siirtyä tekemään uutta koesarjaa toisilla muuttujilla.

Kokeiden suorittamisen kustannusten vuoksi yksi koesuunnittelun periaatteista, toistaminen, jää lähes kokonaan suorittamatta. Ei ollut mahdollista resurssien rajoissa toistaa valittuja koeyksiköitä. Suunnitelman mukaan tehdään yksi toistomittaus: ensimmäinen koeyksikkö tehdään koesarjan lopuksi toisen kerran. Toistojen puuttuminen vaikuttaa mahdollisiin analyysimenetelmiin, mutta tärkeimpänä analysointitapana päätettiin tässä vaiheessa pitää regressioanalyysia, joka soveltuu myös toistamattoman koeasetelman analysointiin.

Taulukko 7: Koematriisi tekijöistä A, B ja C

Koe	Liekkilevyn halkaisija d_l	Primäärikaasusauvan halkaisija d_p	Sekundäärisauvan etäisyys l_s
1	80	10	7
2	120	13	7
3	160	16	7
4	120	10	10
5	160	13	10
6	80	16	10
7	160	10	13
8	80	13	13
9	120	16	13

Koesuunnitelmien tekemistä varten Oilonille on hankittu Numerola Oy:n kehittämä ohjelmisto DOE, joka ratkaisee koesuunnittelumatriiseja käyttäjän antamalla ehdoilla. Toisin sanoen ohjelma muodostaa taulukon, jossa on tarvittavat koeajot määriteltynä, eli millä tasojen yhdistelmillä koeajot suoritetaan. Koeajomatriisin muodostettiin DOE -ohjelman avulla kolmesta muuttujasta kolmella tasolla. Tässä kokeessa 9 kokeen osajoukon määrittelevä suhde on $A=BC$. Toisin sanoen A:n vaikutusta ei voida erottaa yhdystermin BC:n vaikutuksesta. Tähän taulukkoon lisättiin teho-muuttuja, ja jokaisella käsittely-yhdistelmällä toistettiin mittaukset ensin 8 MW:n teholla ja sen jälkeen 3 MW:n teholla. Valitettavasti tätä toistamista ei ollut käytännön syistä mahdollista satunnaistaa, vaikka sillä tavalla satunnaisvaikutuksen määrä olisikin ollut paremmin hallittavissa. Nyt jouduttiin jättämään se huomiotta. Kun lisätään teho koesuunnitelmaan, saadaan taulukko 8 mukainen koetaulukko.

Taulukko 8: Neljän tekijän taulukko, 18 koetta

Koe	A	B	C	D
1	+	+	-	+
2	+	+	-	-
3	-	+	0	+
4	-	+	0	-
5	-	0	+	+
6	-	0	+	-
7	0	+	+	+
8	0	+	+	-
9	0	0	-	+
10	0	0	-	-
11	+	0	0	+
12	+	0	0	-
13	-	-	-	+
14	-	-	-	-
15	+	-	+	+
16	+	-	+	-
17	0	-	0	+
18	0	-	0	-

Voidaan ajatella, että koko taulukko toistetaan kaksi kertaa, ja tällöin teho edustaisi lohkoa. Toisaalta tehoa voidaan pitää neljäntenä käsittelytekijänä, jolloin saatu koetaulukko on ortogonaalinen taulukko, jossa tekijöillä on eri määrä tasoja. Kirjallisuudessa tällaista taulukkoa voidaan merkitä $OA(18, 2^1, 3^3)$, siis 18 koetta, yksi tekijä kahdella tasolla ja kolme tekijää kolmella tasolla. (Wu & Hamada 2000, 273–274) Toteutusvaiheessa lisäksi toistetaan kokeet 1 ja 2, ja näitä toistettuja koeyksiköitä merkitään 19 ja 20.

4.6 Mittaaminen

Vasteiden mittaamisesta ja tuloksien kirjaamisesta päätettiin seuraavaa: tulokset kirjataan huolellisesti mittauspöytäkirjaan, jonka kaikki kohdat täytetään. Koeyksikön sisällä tehdään toistomittauksia: yhtä koepistettä ajetaan noin 10–15 minuutin ajan, jolloin päästöarvoja voidaan seurata koko ajan Gasmet -mittalaitteella. Muita mittauksia voidaan toistaa tarvittava määrä.

Polttoaineteho määritetään polttoaineen virtauksen perusteella. Kaasun virtausta, painetta ja lämpötilaa mitattiin jatkuvatoimisesti C&T:n GVC kaasumääränmuun-

timella. Mittaukset tehtiin 10 sekunnin välein, ja tallennettiin tiedostoon. Liitteesä 1 on selostettu tarkemmin polttoainetehon määrittäminen.

Ympäristöolosuhteet eli ilmanpaine, ilmankosteus ja ilman lämpötila kirjataan muistiin jokaisen koepisteen kohdalla. Mittaamiseen käytetään laboratorion mittaria. EN676:n sallimat virhemarginaalit ovat $\pm 0,5$ mbar paineelle ja ± 2 K ilman lämpötilalle. Näitä tietoja käytetään, kun lasketaan mitatulle NO_x -arvolle referenssiarvot.

NO_x - ja CO -arvot sekä hiilivedyt (C_xH_y) mitataan 20 sekunnin syklinä koko koeajon ajan ja tallennetaan. Tulostaulukossa ilmoitettu arvo lasketaan mittausten keskiarvona niistä arvoista, jotka on saatu palamisen tasaannuttua, eli noin 5 minuutin kuluttua siitä, kun tehotaso on saavutettu. Mittaus suoritetaan Gasmets -laitteistolla, jonka mittausten tarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa ± 2 % mittausvälistä (sisältäen kohinan ja lineaarisuuden). NO_x -arvojen, joita mitattiin välillä 0-100 ppm, virhe on siis ± 2 ppm, samoin CO:lle. EN676 sallii mittauserävarmuuden ± 5 ppm molemmille kaasuille. Hiilivedyt mitattiin välillä 0-10 ppm, jolloin mittalaitteesta aiheutuva virhe oli $\pm 0,2$ ppm.

Painehäviö mitataan kolme kertaa koeyksikössä, ja vasteena käytetään näiden keskiarvoa. EN676:n sallima epävarmuus on polttokammion paineelle ± 5 % palamisen aikana ja ± 10 % käynnistyksen aikana. Paine mitattiin Kytölän analogisella painemittarilla, jonka tarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa $\pm 2,5$ % lukemasta tai ± 10 Pa. Toiseen päähän mittarin kammiota johdettiin paine polttokammiosta, ja toiseen päähän ilmanpaine polttimen rungosta ennen palopäätä. Näin pystyttiin lukemaan paine-ero suoraan mittarista. Mittaus toistettiin kolme kertaa kussakin koeyksikössä. Mittaria oli melko vaikea lukea, sillä paine vaihtelee polttokammiossa palamisen aikana myös noin ± 10 Pa. Mitatut painehäviöt vaihtelivat välillä 3,8–36,4 mbar. Painemittausten virhearvioksi saadaan näin noin ± 20 Pa ($\pm 0,2$ mbar) alle 4 mbar paineella ja noin $\pm 1,0$ mbar suurimmalla mitatulla arvolla 36,4 mbar.

Kaasun paine kaasusuuttimessa mitattiin digitaalisella painemittarilla. Mittari luettiin kerran kussakin koeyksikössä. EN676 sallii mittaustilanteelle $\pm 0,1$ mbar vir-

heen. Valmistaja ilmoittaa laitteen mittaustarkkuudeksi $\pm 0,1$ mbar. Koska paine vaihteli suuresti ajan funktiona, eikä lukemia ollut mahdollista tallentaa suoraan laitteesta, lukemisesta aiheutuva virhe on huomattavan suuri, arviolta ± 2 mbar. Yhteensä virhe oli siis arviolta $\pm 2,1$ mbar.

Melutaso mitataan desibelimittarilla kussakin koeyksikössä metrin päästä polttimesta. Mittaukset tehdään kolmessa pisteessä polttimen ympärillä: molemmilla sivuilla ja takana, joka kerta samoissa paikoissa. Mittauspaikat merkitään maahan. Mittaamiseen käytetään analogista desibelimittaria. Tulostaulukossa ilmoitettu melun arvo on keskiarvo näistä mittauksista kussakin koeyksikössä.

Syttyminen arvioidaan järjestysasteikolla 1-3 (huono, kohtalainen, hyvä). Stabiiliisuus arvioidaan samoin asteikolla 1-3 yleisen vaikutelman mukaan viiden minuutin jälkeen. Nämä arviot suorittaa ajomies oman kokemuksensa perusteella. Tätä ei voida kutsua mittaukseksi, kyseessä on silmämääräinen arviointi siitä, täyttääkö liekki ”hyvän” liekin vaatimukset.

4.7 Polttokokeiden suorittamien

Kokeet suoritettiin Oilonin Lahden toimipisteessä tuotekehityksen laboratoriossa 1.-13.12.2010. Kokeita tehtiin keskimäärin kaksi päivässä, parhaina päivinä neljä. Osien vaihtaminen polttimeen osoittautui melko työlääksi, ja siihen kului tavallisesti noin kaksi tuntia aikaa.

Edellisessä luvussa määritellyt koeajot arvottiin satunnaiseen järjestykseen, joka nähdään taulukosta 7. Käytännön syistä tehopisteet 8 MW ja 3 MW tehtiin aina peräkkäin tasojen vaihtamisen hankaluuden vuoksi, ja lisäksi polttimen säädöt piti määrittellä uudelleen jokaiselle mekaanisten muuttujien käsittely-yhdistelmälle, mikä myös asetti rajoituksensa koejärjestykselle. Liitteessä 2 on esitetty koko koematriisi, sekä polttimen säätöön liittyvät parametrit kussakin koeyksikössä.

Koejärjestelyt näkyvät kuviossa 13. Poltin on kiinnitetty 8 MW kattilaan. Polttoaine johdetaan polttimelle kuvassa vasemmalla laidalla näkyvän kaasulinjan kautta. Poltinta ohjataan sähköisesti polttimenohjausautomaatiikan avulla. Ohjauskes-

kuksessa, joka näkyy kuvassa polttimen edessä, on ohjelmoitava rele, jonka parametreja voidaan muuttaa palamisen aikanakin koejärjestelyssämme. Polttimen ohjaus tehtiin kokeiden aikana ottamalla tietokoneella yhteys ohjelmoitavan releen ohjaukseen. Tämä tietokone näkyy kuvassa etualalla vasemmalla. Taka-alalla oikealla näkyvällä tietokoneella tallennettiin kaasun virtaus, lämpötila ja paine. Analogisella painemittarilla mitattiin puhallinpaine, kattilan vastapaine ja painehäviö eli puhallinpaineen ja kattilan vastapaineen välinen erotus. Digitaalisella painemittarilla mitattiin kaasusuutinpaine.



Kuvio 13: Koejärjestely

Kokeiden suorittaminen sujui pääosin ongelmitta. Ohjaamiseen käytetty tietokone jouduttiin vaihtamaan kerran kovalevyn rikkoutumisen vuoksi, mutta dataa ei hävinnyt varmuuskopioinnin ansiosta. Koepisteiden 9 ja 13 kohdalla jouduttiin säättämään kaasunpainerajakytkimen asetettua arvoa korkeammaksi, sillä kaasun paine nousi odottamattoman korkeaksi näissä koeyksiköissä. Syynä olivat käsittelyyhdistelmät, joiden vaikutuksesta kaasun syöttöpainetta piti nostaa riittävän polttoainemäärän saamiseksi liekkiin. Tätä käsitellään lisää luvussa 4.8.2. Kokeiden aikana koematriisi oli koko ajan nähtävillä, jotta kaikilla kokeisiin osallistujilla olisi varmasti tieto siitä, mitä käsittelyjä tehdään, missä järjestyksessä ja kuinka kokeet edistyvät. Mitatut tulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9: Mitatut vasteiden arvot

	Käsittely-yhdistelmä	NO _x	NO _x ref (ppm)	CO (ppm)	Painehäviö (mbar)	C _x H _y	Kaasusuutinpaine (mbar)	Melutaso (db)	Stabiiliuus	Syttyminen
1	160-16-7-8	53.42	47.62	0.11	18.43	0.56	66.5	94.2	2	2
2	160-16-7-3	44.79	39.73	0	4.20	0.41	9.0	89.0	2	
3	80-16-10-8	53.89	48.09	0	32.53	0.82	51.8	92.7	1	3
4	80-16-10-3	47.00	41.74	0	8.30	0.96	9.6	88.0	2	
5	80-13-13-8	54.39	48.62	0	32.53	0.70	52.1	93.0	1	3
6	80-13-13-3	42.63	37.93	0	8.60	0.77	9.6	87.8	1	
7	120-16-13-8	50.23	44.84	0	26.47	0.74	46.7	93.3	1	3
8	120-16-13-3	42.26	37.68	0	6.27	0.70	7.5	88.7	2	
9	120-13-7-8	50.74	45.47	0.1	27.20	0.41	92.6	93.5	1	2
10	120-13-7-3	43.3	38.58	0	6.93	0.38	14.6	88.8	2	
11	160-13-10-8	50.24	44.69	0	19.50	1.06	50.0	94.2	3	2
12	160-13-10-3	40.31	35.66	0	4.13	0.67	7.0	89.0	3	
13	80-10-7-8	47.83	42.87	2.2	36.40	0.85	119	94.8	2	2
14	80-10-7-3	41.98	37.51	0	9.73	0.63	19.5	88.2	2	
15	160-10-13-8	46.93	42.46	0.58	18.93	0.50	46.3	93.5	3	2
16	160-10-13-3	36.97	33.41	0	3.80	0.41	6.6	89.3	3	
17	120-10-10-8	41.3	37.10	0	27.27	0.57	56.9	93.2	2	1
18	120-10-10-3	39.41	35.42	0	6.60	0.48	9.5	88.8	2	
19	160-16-7-8	51.41	46.91	0.74	18.13	0.75	69.0	94.0	2	2
20	160-16-7-3	42.39	38.71	0	4.10	0.57	9.9	89.7	2	

4.8 Tulosten analysointi

Tuloksissa keskitytään pääasiassa typen oksideihin. Hiilimonoksidien määrä osoittautui häviävän pieneksi, ja myös mitatut hiilivedyt savukaasuissa jäivät joka koeyksikössä alle sallittujen rajojen. Typen oksidien lisäksi kiinnostavia vaikutuksia olivat painehäviö, johon vaikuttivat liekkilevy ja sekundäärikaasusauva, sekä kaasunpaine kaasusuuttimessa, johon eniten vaikutti sekundäärikaasusauva eli tekijä C.

Typen oksidien osalta tehdään laaja analyysi: saatuja mittaustuloksia tarkastellaan aluksi graafisesti päävaikutuspiirroksen avulla ja lasketaan faktoristen vaikutusten päävaikutukset. Näiden avulla saadaan viitteitä siitä, mitkä tekijät ovat merkittäviä. Aluksi tarkastellaan keskihajontaa, joka arvioidaan koepisteiden 1,2,19 ja 20 välisen eron avulla. Selittävien tekijöiden termeistä etsitään paras yhdistelmä regressiomalliin käyttämällä best subset menetelmää ja AIC -kriteeriä. Parhaiten ilmiötä selittävien tekijöiden joukkoa käytetään regressiomallin sovittamiseksi aineistoon. Mitatusta aineistosta tehdään siis yleistys koskemaan koko kyseisen polttimen palamisprosessia. Mallin pohjalta tutkittavaa prosessia voidaan simuloida ja optimoida. Mallin avulla on siis mahdollista löytää parhaat arvot kaikille suunnittelumuuttujille muodostuvien typen oksidien kannalta. Voidaan myös laskea ennusteita tuleville havainnoille.

4.8.1 Typen oksidit savukaasuissa

Kiinnostavimmaksi vasteeksi osoittautuivat typen oksidit. Mitatut arvot savukaasujen NO_x – pitoisuudelle riippuvat ympäristöstä. Talvella saadaan korkeampia arvoja, koska ilmankosteus on erittäin alhainen. Jotta eri olosuhteissa ja eri vuodenaikoina saatuja mittaustuloksia voitaisiin vertailla, mitatut arvot lasketaan referenssiarvoon. Laskutapa on esitetty yksityiskohtaisesti standardissa SFS-EN 676 (Annex G). Vertailukohtana tällöin on ympäristön lämpötila 20 °C , ilmankosteus 10 g/kg . Mitatut arvot on laskettu standardin mukaisesti referenssiin ja analyysissä on käytetty näin saatuja NO_x – pitoisuuden arvoja. Typen oksidien tulostaulukossa 9 ilmoitettu arvo on kussakin koeyksikössä laskettu viidentoista 20 sekunnin välein tehdyn mittauksen keskiarvona. Liitteessä 3 on asia selitetty tarkemmin.

Keskihajonta yksittäiselle havainnolle laskettiin koepisteiden 1, 2, 19 ja 20 perusteella. Havainnot 1 ja 19, 2 ja 20 ovat toistoja samalla käsittely-yhdistelmällä, ja siksi niiden keskihajonta voidaan tulkita yksittäisen havainnon toistettavuuden mitaksi. Keskihajonnaksi saatiin 0,43, jolloin noin 95 % todennäköisyydellä toistettavat mittaukset sijoittuvat korkeintaan kahden keskihajonnan päähän keskiarvosta, eli välille $\mu \pm 0,87$.

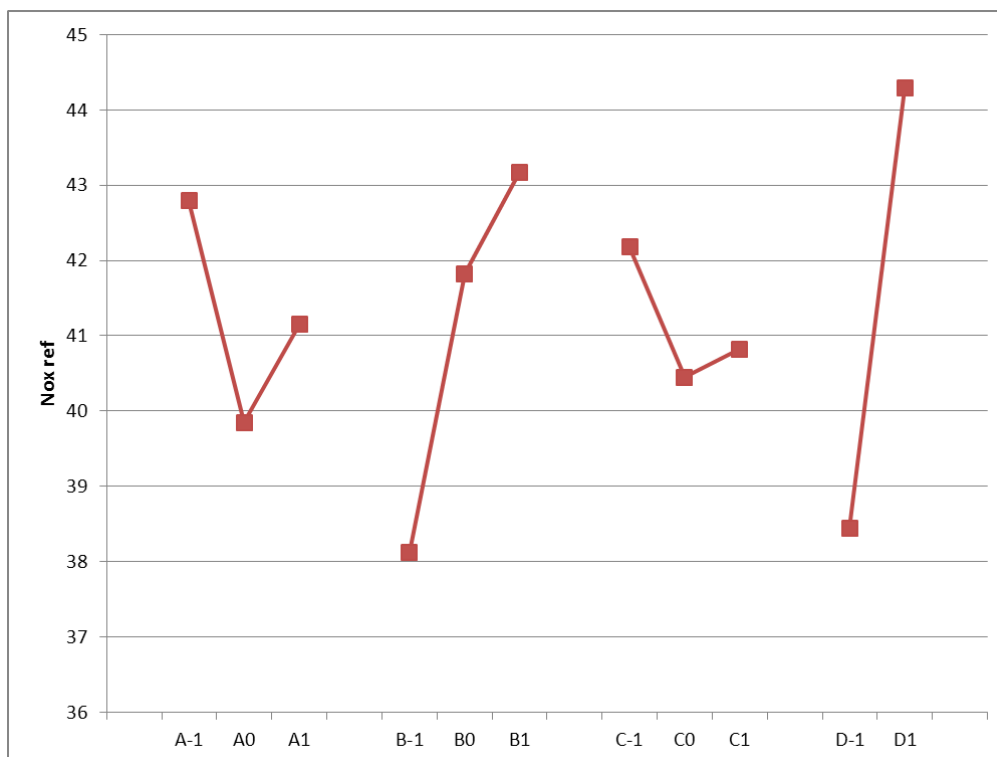
Päävaikutukset ovat lineaarisia vaikutuksia ja siksi A, B ja C tekijöille voidaan laskea lineaarinen vaikutus ääripäiden -1 ja 1 väliltä. Näin ollen päävaikutukset ovat:

$$ME(A) = 41,15 - 42,79 = -1,64$$

$$ME(B) = 43,17 - 38,13 = 5,04$$

$$ME(C) = 40,82 - 42,18 = -1,36$$

$$ME(D) = 44,28 - 38,45 = 5,83$$



Kuvio 14: Päävaikutuspiirros, vaste NO_x (laskettu referenssiin)

Kuviosta ja päävaikutusten lasketuista arvoista saa samanlaisia viitteitä: tekijöillä B ja D vaikuttaa olevan suurempi merkitys kuin tekijöillä A ja C.

4.8.1.1 ANOVA

Aineistosta tehtiin varianssianalyysi, jonka tulokset ovat taulukossa 10. Taulukossa näkyy yli 0.1 p-arvon ylittäneet tekijät joukosta A, B, C, D, AB, AC, AD, BD, CD ja ABC. BC jätettiin pois, sillä koesuunnitelman muodon vuoksi A:n päävaikutusta ei voida erottaa yhdysvaikutus BC:n vaikutuksesta. Aineisto on balanssissa, kuten varianssianalyysin oletuksiin kuuluu, sillä tässä koeyksiköt 1 ja 19 sekä 2 ja 20 yhdistettiin ja käytettiin laskennassa niiden keskiarvoa vastaamaan kyseistä käsittelyä. Koska havaintoja oli tällä menetelmällä 18, on vaikutusten estimointiin käytettävissä 17 vapausastetta.

Taulukko 10: ANOVA tuloksista, vaste referenssiin laskettu NO_x

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
D	1	229.373	229.373	1543.023	0.0006474	***
A=BC	2	29.047	14.523	97.701	0.0101316	*
AD	2	9.246	4.623	31.098	0.0311544	*
B	2	81.002	40.501	272.455	0.0036569	**
AB	4	9.631	2.408	16.198	0.0589908	.
BD	2	9.227	4.614	31.036	0.0312145	*
CD	2	8.384	4.192	28.201	0.0342453	*
Residuals	2	0.297	0.149			
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

Merkittävimäksi vaikutukseksi osoittautui D eli polttoaineteho. Seuraavaksi merkittävin oli primäärikaasusauvan halkaisija B, joka on tilastollisesti merkittävä α :n arvolla 0,001. Tilastollisesti merkittäviä α :n arvolla 0,05 olivat A=BC, AD, BD ja CD. Lisäksi α :n arvolla 0,1 merkittävä oli yhdysvaikutus AB. ANOVA antoi siis yhdenmukaisen tuloksen päävaikutusten kanssa: B ja D ovat merkittävimät tekijät.

ANOVA:sta on myös erilaisia muunnoksia, joiden tarkoitus on joissakin tapauksessa ottaa huomioon koesuunnitelmassa olevia rajoituksia. Tässäkin tapauksessa olisi voitu käsitellä kokeeseen lisättyä tekijää D kovarianttina, ja tehdä kovarians-

sianalyysi aineistosta. Kovariantti on tekijä, joka korreloi lineaarisesti vasteen kanssa, mutta ei ole suunnittelumuuttuja – siis sekoittava muuttuja. Vasteen NO_x ref ja tekijän D lineaarinen korrelaatiokerroin on noin 0,68, joten tämä lähestymistapa olisi ollut mahdollisesti myös hyvä vaihtoehto (Montromery 2004, 574-590). Toisaalta kyseeseen olisi tullut myös split-plot –asetelma, jossa koeyksiköt on jaettu alaryhmiin, tässä tapauksessa tekijän D mukaan (Montromery 2004, 540-553). Näitä menetelmiä käytetään etenkin, jos vaikutukset muutoin jäisivät virhetermiin peittoon. Tässä tapauksessa merkittäviä vaikutuksia saatiin tavallisella ANOVA:lla, joten pääteltiin sen riittävän.

Tekijät regressiomalliin valittiin mahdollisten mallien joukosta AIC (Akaike Information Criterion) – hyvyyskriteerin perusteella. Se tekijäjoukko, jonka malli tuottaa pienimmän AIC – arvon valitaan. Tekijäehdokkaana olivat ANOVA:n tuloksena merkitseviksi havaitut tekijät ja lisäksi A:n ja B:n neliölliset vaikutukset A2 ja B2. Menetelmä antoi mallille, jossa tekijöinä on A, A2, B, B2 ja BD, parhaan AIC arvon (77,31), kun vasteena käytettiin mitatuista arvoista laskettua NO_x -arvoa. Näistä tekijöistä merkitseviksi ($\alpha=0,05$) osoittautuivat BD, A ja A2, jolloin sovitetuksi malliksi saatiin

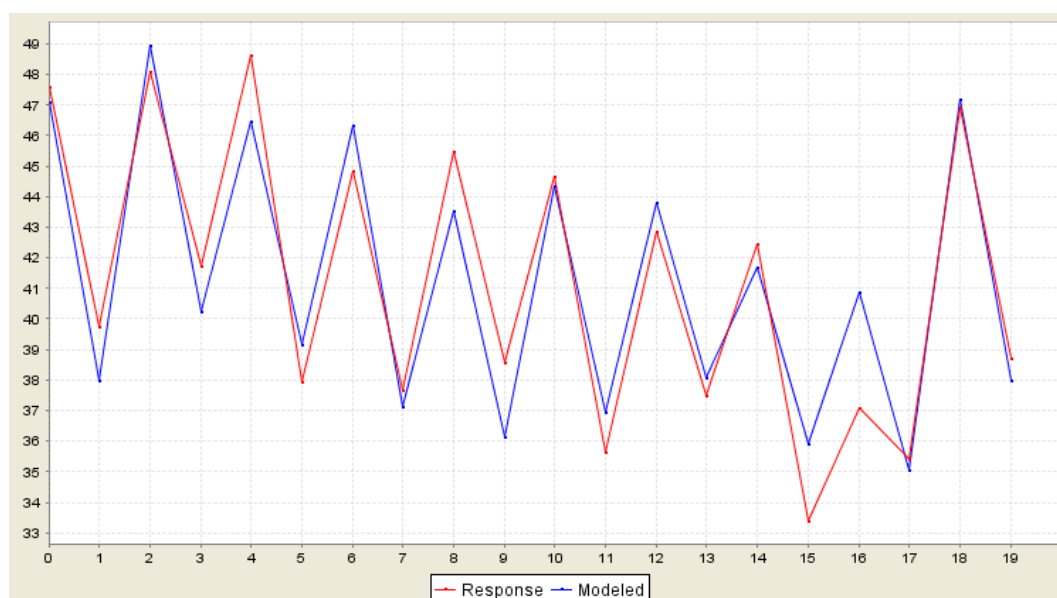
$$\hat{y} = 52,15 - 0.31 * A + 0.0012 * A^2 + 0.11 * BD$$

Myös muut tekijänvalintamenetelmät antoivat samat tekijät: BIC (Bayesian Information Criterion) – menetelmällä parhaaseen malliin kuuluivat A, A2 ja BD. CV (Cross validation) – menetelmällä malliin jäivät vain A ja BD.

Taulukko 11: Mallin termit ja niiden merkitsevyys

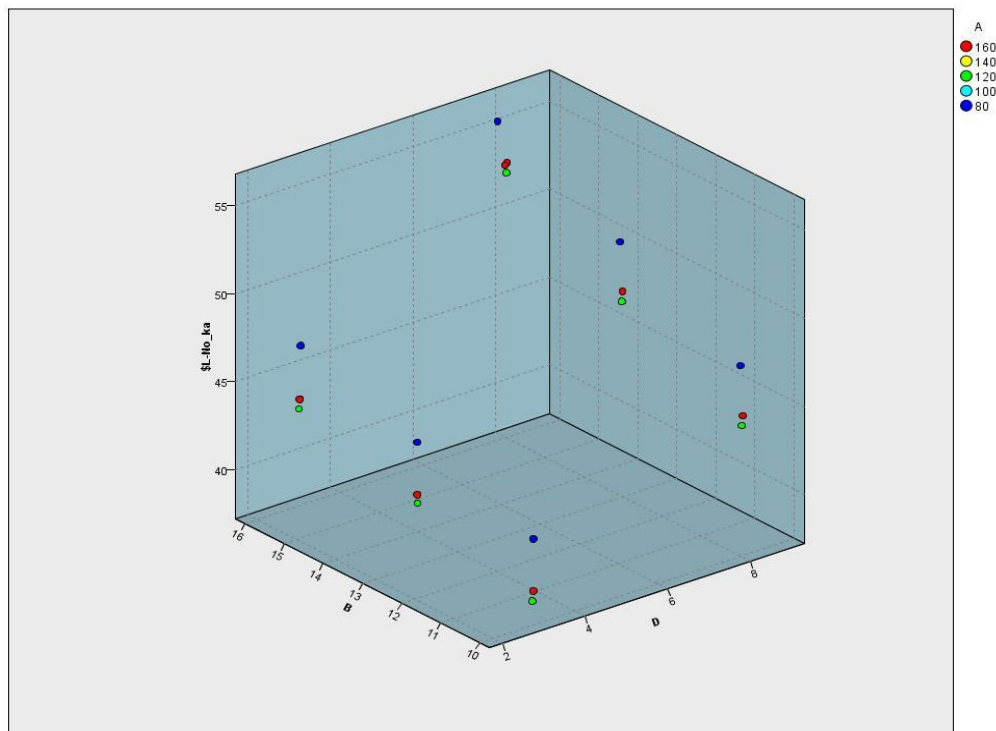
	estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	52.1535708	7.4596933	6.991	3.04e-06	***
A	-0.3142942	0.1304342	-2.410	0.0284	*
BD	0.1146329	0.0108760	10.540	1.32e-08	***
A2	0.0011951	0.0005374	2.224	0.0409	*
Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1					

Mallin tilastollisen merkitsevyyden tunnusluvuiksi saadaan mallin F-testistä 39.86 (3 ja 16 vapausasteella), p:n arvo on tällöin 1.189e-07. Malli siis on tilastollisesti erittäin merkitsevä. Selitysasteeksi R^2 saadaan 0,882 ja mukautettu R^2 on mallille 0,8599. Vasteen ja sovitettujen vastaavien arvojen välinen korrelaation on korkea, $R=0,94$, joten malli vastaa havaintoja hyvin. Kuviosta 15 tämä on visuaalisesti havaittavissa : sinisellä viivalla sovitettu vaste ja sitä punaisella sitä vastaava havainto. Kuviossa esiintyvä voimakas vaihtelu peräkkäisten koepisteiden välillä johtuu siitä, että 8 MW- ja 3MW-kokeita tehtiin vuorotellen.



Kuvio 15: Vasteen ja sovitetun arvon vastaavuus

Riippuvuus näkyy hyvin kuvion 16 kolmiulotteisesta kaaviosta: pystyakselilla on NO_x sovitettu arvo, x ja z – akseleilla ovat tekijöiden B ja D arvot ja A:n vaikutus on koodattu värillä. Kuviossa nähdään BD yhdysvaikutukselle selitys: kun polttoaineteho D kasvaa, B:n vaikutus on suurempi. Ilmiö voidaan tulkita siten, että primäärikaasusauvan vaikutus on suhteellisesti suurempi polttoainetehon kasvaessa. A:n vaikutus nähdään myös selkeästi. Kun A:n taso on ”80” on NO_x korkeampi. Toisaalta ero tasojen ”120” ja ”160” välillä on suhteessa hyvin pieni.



Kuvio 16: Tekijät B, D ja A

Jäännösneliösumma SS_E saadaan mallille seuraavasti:

$$SS_E = (y - X\beta)^T(y - X\beta) = 49.34819 \approx 49.35$$

Varianssin harhaton estimaatti $\hat{\sigma}^2$ saadaan jakamalla jäännösneliösumma vapausasteillaan $df_{SSE} = n - p$, jossa p on estimaattien lukumäärä mallissa:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{SS_E}{20 - 4} = 3.084262 \approx 3.08$$

Mallin avulla voidaan laskea ennusteita tuleville havainnoille. Yleisesti kun $x_0^T = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0k}]$ on regressorien tiettyjen arvojen vektori, tällöin sovitettu arvo on

$$\hat{y}(x_0) = x_0^T \hat{\beta}$$

Jos lasketaan ennuste referenssiin lasketulle NO_x arvolle, kun A = 160, B = 10 ja D = 8, saadaan arvoksi

$$\hat{y}(x_0) = 52,1535708 - 0.31 * 160 + 0.0012 * 10 * 8 + 0.11 * 160^2 = 41.63$$

Lasketulle ennusteelle voidaan estimoida luottamusväli, joka kuvaa sitä väliä, jolle laskettu arvo halutulla riskitodennäköisyyden arvolla asettuu. Tavallisesti käytetään riskitodennäköisyyden arvoa $\alpha=0,05$. 100(1- α) prosentin ennusteväli on

$$\begin{aligned} \hat{y}(x_0) - t_{\frac{\alpha}{2}, n-p} \sqrt{\hat{\sigma}^2 (1 + x_0^T (X^T X)^{-1} x_0)} &\leq y_0 \\ &\leq \hat{y}(x_0) + t_{\frac{\alpha}{2}, n-p} \sqrt{\hat{\sigma}^2 (1 + x_0^T (X^T X)^{-1} x_0)} \end{aligned}$$

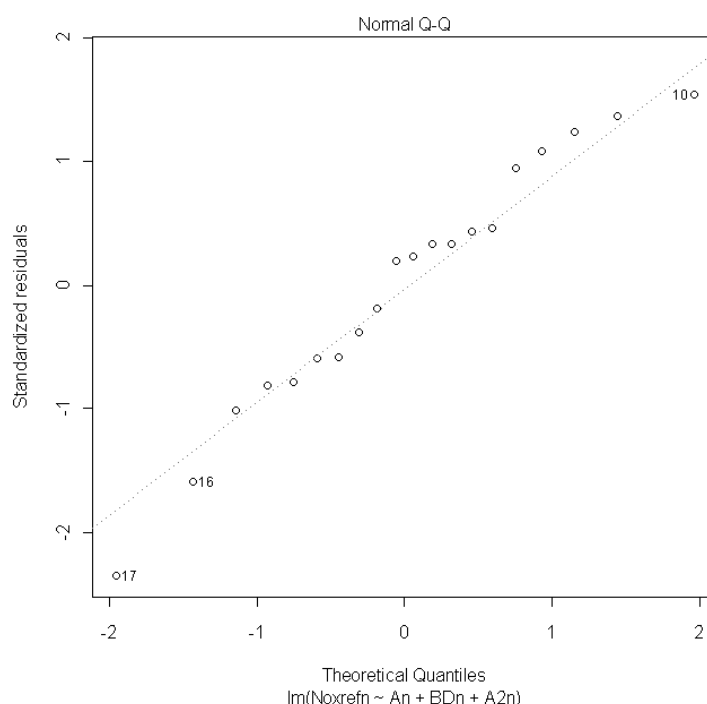
edellisestä esimerkistä kun $t_{\frac{0,05}{2}, n-p} = 2,12$ (vapausasteita 20-4)

$$\begin{aligned} 41.63 - 2,12 \sqrt{3,08(1 + 0.125 \dots)} &\leq y_0 \leq 41.63 + 2,12 \sqrt{3,08(1 + 0.125 \dots)} \\ 41.63 - 3.9474 &\leq y_0 \leq 41.63 + 3.9474 \\ 37.68 &\leq y_0 \leq 45.58 \end{aligned}$$

Jos malli on yhdenmukainen todellisuuden kanssa, tulisi seuraavien havaintojen tekijän A arvolla 160, tekijän B arvolla 10 ja tekijän D arvolla 8 olla keskimäärin 41.63, ja 95 % todennäköisyydellä osua välille 37.68 – 45.58.

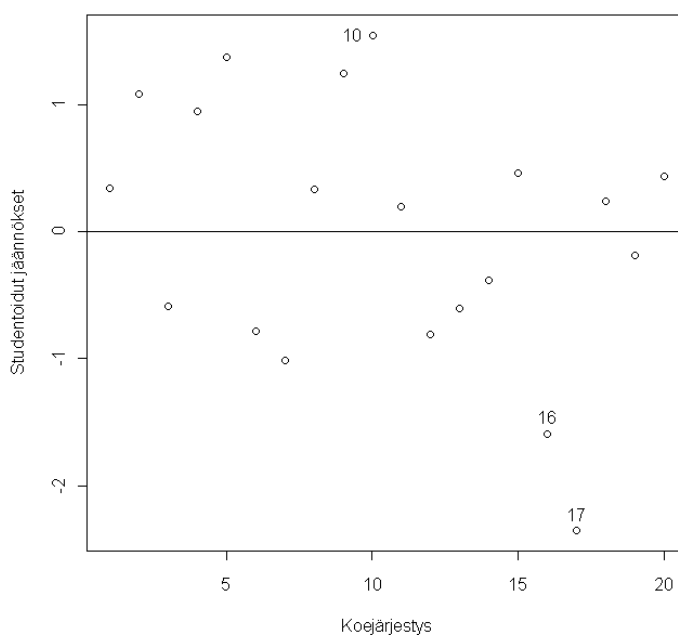
Regression oletusten toteutumista tutkitaan pääasiassa tarkastelemalla jäännöksiä. Mallin jäännökset saadaan vähentämällä sovitetun mallin arvot havaituista arvoista. Jos malli on asianmukainen, residuaalien ei pitäisi muodostaa mitään ilmeisiä kuvioita, vaan niiden tulisi olla jakautuneet kuin satunnaisluvut normaalista jakaumasta. Normaalijakautuneisuuden havaitsemiseen käytetään piirrosta, jossa standardoidut jäännökset on piirretty teoreettisia normaalijakauman kvantiileja vasten. Standardoitujen jäännösten tuli asettua suoralle viivalle, jos niiden jakauma on normaali. Kuviosta 17 nähdään, että havainnot 10, 16, ja 17 ovat tuottaneet normaalijakaumasta tilastollisesti poikkeavan jäännöksen arvon, mutta kuvio

on kuitenkin lähes suora. Kuvio ei ole karkeasti epänormaali, joten voidaan olettaa normaalijakaumaoletuksen pitävän paikkansa riittävällä tasolla.



Kuvio 17: Standardoidut jäännökset teoreettisten kvantiilien funktiona

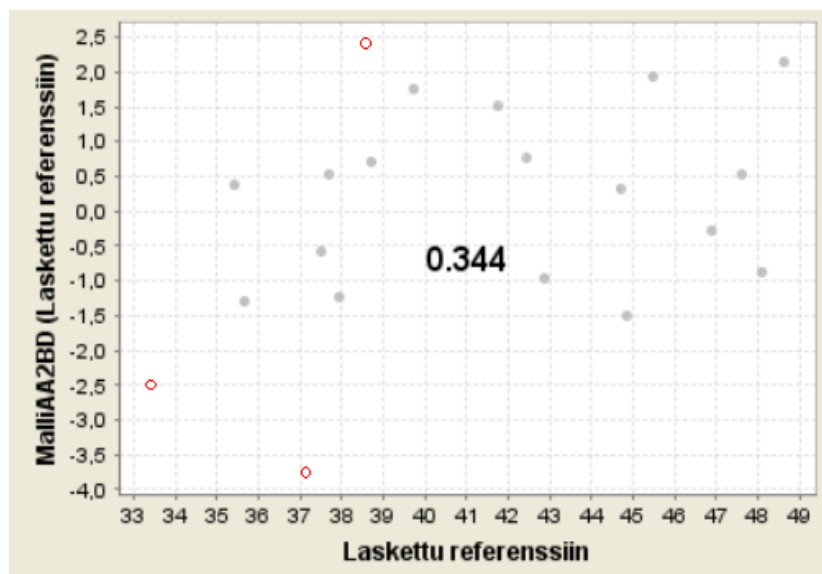
Kuviossa 18 on piirretty studentoidut jäännökset havaintojen mukaisessa aikajärjestyksessä. Kuvio näyttää olevan melko selkeästi oletuksien vastainen: varianssi vaihtelee kokeiden edetessä ja samat koepisteet 10, 16 ja 17 näkyvät selkeinä poikkeamina kuviossa. Positiiviset residuaalit painottuvat datan alkupäähän ja negatiiviset datan loppupäähän. Tämä herättää epäilyn siitä, että kokeet eivät ole olleet täysin riippumattomia; jostain syystä vasteiden arvot ovat systemaattisesti pienentyneet kokeiden edetessä. On myös mahdollista, että nimenomaan koeyksiköt 16 ja 17, jotka ovat selkeimmin poikkeavia, ovat jollain tavalla saastuneet. On saattanut tapahtua karkea virhe mittauksissa tai tulosten käsittelyssä. Mitään tällaista ei kuitenkaan havaittu kun kokeita tehtiin. Data myös tarkastettiin mahdollisen käsittelyvirheen varalta, mutta mitään poikkeavaa ei löydetty. Joudumme oletamaan, että kyse on jonkinlaisesta mittavirheestä.



Kuvio 18: Studentoidut jäännökset ja koejärjestys

Kuviossa 19 on piirretty jäännökset sovitettujen arvojen funktiona. Tästä kuviosta nähdään, että suuret residuaalien arvot painottuvat vasteen skaalan alapäähän. Punaisella on kuvioon merkitty edellisissä piirustuksissa poikkeaviksi havaitut pisteet 10, 16 ja 17. Luku 0,344 tarkoittaa korrelaatiokerrointa, jonka tulisi olla lähellä nollaa. 0,3 ei ole vielä kovin suuri korrelaatio, mutta se eroaa jo selkeästi nolasta. Näitä poikkeamia lukuun ottamatta kuvio näyttää hyvältä: jäännökset ovat tasaisesti jakautuneet pienten ja suurten lukujen kesken.

Tämän jäännösanalyysin perusteella kokeet 16 ja 17 olisi kannattanut toistaa, jotta olisi voitu päätellä olivatko nämä poikkeavia havaintoja. Jos mittaus tulokset olisi myös toisella kerralla samansuuntaiset, mallia taas tulisi muuttaa, jotta oletukset täyttyisivät.



Kuvio 19: Jäännökset vastaavia sovitettuja arvoja vasten

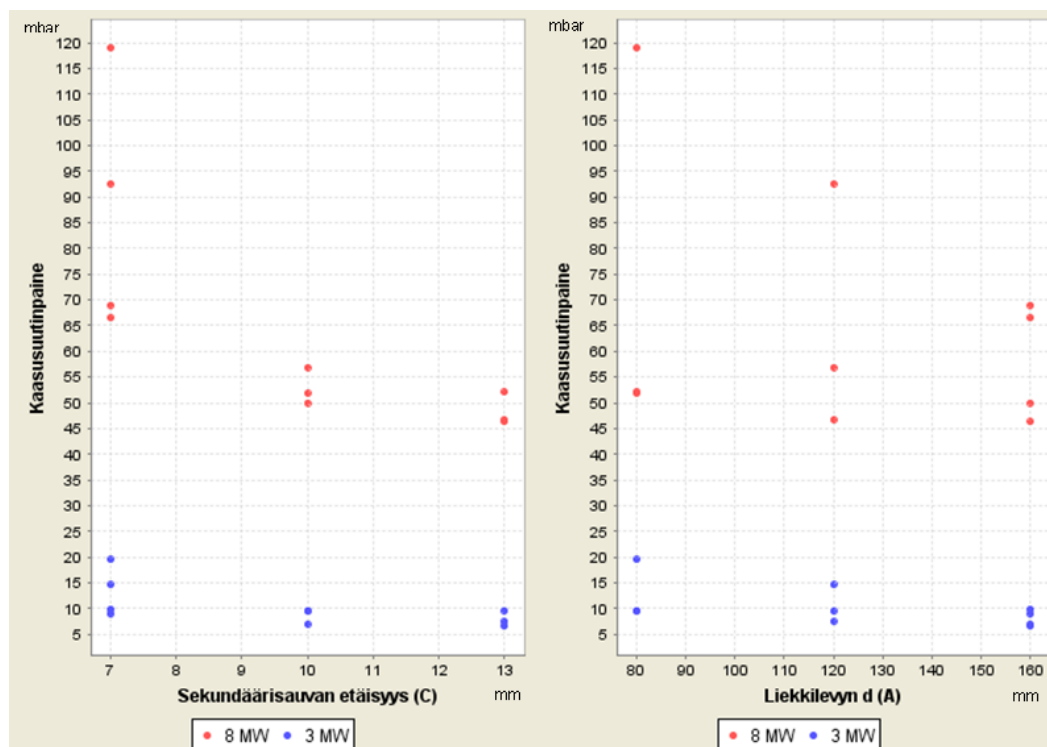
4.8.2 Muita vaikutuksia

Muita merkittäviä vaikutuksia kokeissa olivat sekundäärikaasusauvan vaikutus kaasunpaineeseen sekä liekkilevyn vaikutus painehäviöön. Tässä kappaleessa esitetään nämä vaikutukset lyhyesti, mutta yksityiskohtaisempaa analyysia ei näille vasteille tehdä.

Kaasusuutinpaine on se paine joka vallitsee kaasusuuttimen sisäpuolella olevassa tilassa. Sopiva paine on tarpeen, jotta saadaan riittävä määrä polttoainetta virtaamaan kaasusuuttimen läpi. Paine mitataan kaasurungon mittausyhteestä. Polttimen automatiikan osana on korkeapainekytkin, joka toimii siten, että kaasun paineen ylittyä ennalta asetetun rajan, automatiikka lopettaa polttimen toiminnan. Aluksi korkeapainekytkin oli asetettu 85 millibaariin, mutta kokeiden 9 ja 13 kohdalla rajaa jouduttiin nostamaan, jotta kokeet saatiin suoritettua. Näissä kokeissa mitatut kaasusuutinpaineet olivat vastaavasti 92,6 mbar ja 119 mbar.

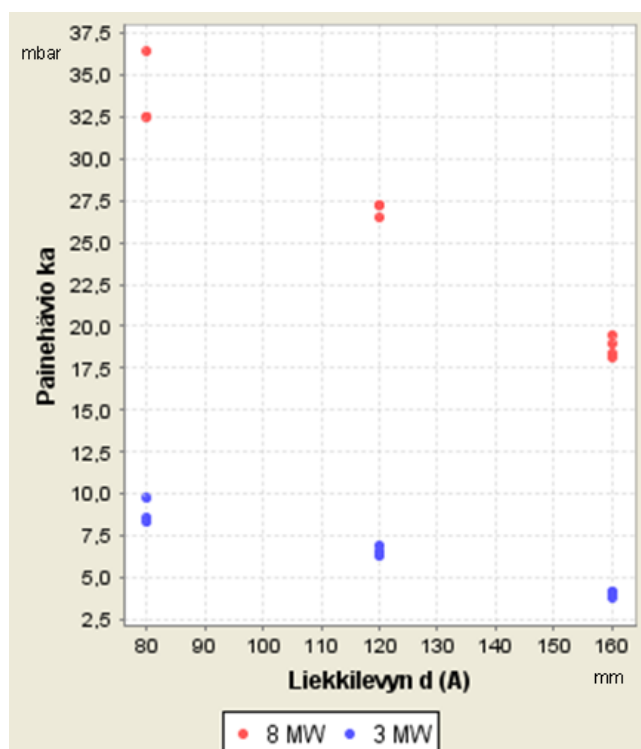
Kaasusuutinpaineeseen eniten vaikutti sekundäärisauvan etäisyys palopään putkesta (C), ja jonkin verran oli vaikutusta myös liekkilevyllä (A). Kuviosta 20 nähdään nämä vaikutukset. Pieni etäisyys sekundäärikaasusauvan ja palopään putken välillä aiheutti mitä ilmeisimmin sen, että kaasulle ei jäänyt tarpeeksi tilaa purkautua sekundäärikaasusauvoista, jolloin jouduttiin nostamaan painetta kaasusuutti-

nessa riittävän polttoainetehon aikaansaamiseksi. Kokeessa 13 liekkilevynä oli pienimmällä keskihalkaisijalla varustettu levy ($d_s = 80$ mm), ja yhdessä nämä aiheuttivat erittäin korkean kaasunpaineen (119 mbar). Vaikutti myös siltä, että 8 MW olisi lähes maksimiteho tällä yhdistelmällä.



Kuvio 20: Kaasusuutinpaine

Merkittävää vaihtelua ilmeni myös syntyvässä painehäviössä. Tähän syynä oli liekkilevyn sisähalkaisija eli muuttuja A. Tämä oli odotettavissa, sillä kuten jo mainittu, liekkilevyn tehtävä on saada aikaan riittävä painehäviö liekin stabiloimiseksi. Syntyvä painehäviö on riippuvainen liekkilevyn pinta-alaan, ja keskireiän pientyessä levyn pinta-ala kasvoi. Painehäviön tulee olla riittävän suuri, että liekki pysyy kiinni levyssä, ja palaminen on jatkuva. Kuviosta 21 nähdään tämä vaikutus. Tätä havaittua vaikutusta voidaan käyttää tarvittaessa hyväksi, jos tarvitaan suurempaa painehäviötä toisessa sovelluksessa.



Kuvio 21: Painehäviö

4.9 Johtopäätökset ja suositukset

Kokeiden tuloksista voidaan tehdä seuraavat päätelmät: NO_x – päästöjen kannalta eniten vaikuttavat tekijät olivat:

- primäärikaasusauvan halkaisija B
- polttoaineteho D

Kahden muun tekijän, liekkilevyn sisähalkaisijan A ja sekundäärikaasusauvan etäisyys C vaikutukset jäi vähäiseksi, kun vasteenä olivat typen oksidit, mutta toisaalta niillä oli merkittävä vaikutus polttimen muuhun toimintaan. Typen oksidien määrän pienentämiseksi johdonmukainen strategia on pienentää edelleen B:tä ja valita A:lle ja C:lle muiden vasteiden kannalta paras taso. Jos kaasun paineen kaasuuttimessa ei haluta nousevan tarpeettoman suureksi, C:n tasoksi tulee valita 13 mm. Liekkilevyn (A) tasolla oli tilastollista merkitystä, vaikka vaikutus olikin itseisarvoltaan pienempi kuin B:n tai D:n vaikutus. A:n vaikutus oli merkittävä myös painehäviön muodostumisessa. A:n tasoksi voidaan valita joko 160 mm tai 120 mm riippuen siitä, tahdotaanko painehäviötä kasvattaa. Tämä voisi tulla kyseeseen öljypoltolla, jossa suurempi painehäviö voi olla polttimen toiminnan

kannalta merkityksellinen. Voidaan myös valmistaa uusi liekkilevy, jonka keski-reikä olisi n. 130 mm. Tämä koko olisi optimaalinen mallin perusteella. Kuitenkaan tuloksiin liittyvän epävarmuuden vuoksi ero kokoihin 120 mm ja 160 mm tuskin olisi merkittävä.

4.10 Varmistuskoe

Seuraavaksi suoritettiin varmistuskoe tulosten validoimiseksi. Samalla päätettiin laajentaa tutkittavaa aluetta tehon osalta 11,1MW. Primäärikaasusauvan halkaisijan uudeksi tutkittavaksi tasoksi valittiin 6 mm. Kokeessa oli kaksi tekijää kahdella tasolla, kyseessä oli siis 2²-koe. Tehtiin täydellinen koetaulukko, joka päätettiin toistaa kaksi kertaa. Tekijöiden A ja C tasoina valittiin molemmille korkein taso, eli 160 mm ja 13 mm, ja nämä pidettiin vakioina kokeen ajan.

Taulukko 12: varmistuskokeen tulokset

Koepiste	B	D	Vaste 1 (ppm)	Vaste 2 (ppm)	Ennustettu vaste	95 % alaraja	95 % yläraja
1	10	8,0	42.84	43.84	41.63	37.68	45.58
2	10	11,1	38.05	38.23	45.19	41.24	49.13
3	6	8,0	42.29	43.25	37.96	34.02	41.91
4	6	11,1	35.98	36.34	40.10	36.15	44.04

Vain koepisteen 1 käsittely-yhdistelmä on edellisen kokeen alueella, ja siksi muodostettua mallia voidaan pitää pätevänä vain tässä pisteessä. Muiden koepisteiden käsittely-yhdistelmät ovat aikaisemmin tutkimattomia. Taulukossa 12 on esitetty NO_x referenssiin lasketut arvot kahdesta toistosta, mallin perusteella ennustettu arvo ja rajat, joiden sisälle vasteen tulisi 95 % todennäköisyydellä osua, jos malli kuvaa ilmiötä hyvin. Voidaan myös olettaa mallin pätevän jo tutkitun alueen ulkopuolella, ekstrapoloida, ja laskea myös pisteille 3, 4, ja 5 ennusteet, kuten taulukossa 12 on esitetty. Näihin ennustettuihin arvoihin tulee kuitenkin suhtautua varauksella: ilmiö voi olla hyvin erilainen tutkitun alueen ulkopuolella.

Vasteen arvoiksi koepisteessä 1 saatiin 42,84 ja 43,84. Arvot osuivat ennustevalille, mikä osaltaan vahvistaa mallin kuvaavan prosessia hyvin tutkitulla alueella.

Aikaisemman koealueen ulkopuolella olevat pisteet eivät olleet ennustetuilla väleillä, mistä voidaan päätellä, että tarvitaan uusi malli koko tehoalueen kuvaamiseksi. Vastoin odotuksia 11,1 MW:n teholla NO_x päästöt olivat alhaisemmat kuin 8 MW:n teholla. Tehon vaikutus päästöihin on siis todennäköisesti epälineaarinen. Toisaalta varmistuskokeen ja ensimmäisen koesarjan välillä tehtiin säätöjä polttimen ajoparametreihin, jotta päästäisiin tehoon 11,1 MW asti; aikaisemmilla parametreilla tämä ei olisi onnistunut. Mahdollisesti osa vasteen arvosta on peräisin näistä parametrien muutoksista, eikä tätä mahdollista vaikutusta ole mahdollista erottaa tai tutkia. D:n vaikutus varmistuskokeissa oli siis lähes yhtä suuri mutta päinvastainen, kuin varsinaisessa kokeessa (päävaikutus -5,91). B:n vaikutus oli samansuuntainen, mutta huomattavasti odotettua pienempi (päävaikutus 1,28). Tulokset olivat kuitenkin odottamattoman hyviä: 11,1 MW teholla päästiin alle päästötavoitteen, joka oli 39 ppm.

5 PÄÄTÄNTÄ

Tässä opinnäytetyössä koesuunnittelua sovellettiin uuden poltintuotteen tutkimisessa. Kokeessa tutkittiin ensisijaisesti kolmen käsittelytekijän vaikutusta typen oksidien määrään savukaasuissa. Nämä tekijät olivat liekkilevyn sisähalkaisija (A), primäärikaasusauvan halkaisija (B) ja sekundäärikaasusauvan etäisyys palopään putkesta (C). Lisäksi tutkittiin polttoainetehon (D) vaikutusta kahdella tasolla. Tulokset olivat lupaavia: lyhyen koesarjan jälkeen voitiin päätellä, mitkä kolmesta tutkittavasta tekijästä todella vaikuttivat palamistulokseen. Oli myös erittäin helppo valita merkitsevä tutkittava tekijä B jatkotutkimuksiin ja hylätä A sekä C tekijöinä, joiden vaikutus NO_x :n muodostumiseen on vähäinen. Näille päätöksille löytyi hyvät perustelut. Saatiin myös hyvää tietoa siitä, miten polttoainetehto vaikutti NO_x :en muodostumiseen. Lopulta alitettiin koekattilassa maksimiteholla typen oksideille tavoitteeksi asetettu päästöraja 39 ppm.

Toteutettu koesarja ei ollut aivan perinteisen koesuunnittelun sääntöjen mukainen. Ortogonaaliseen matriisiin lisättiin aluksi yksi toisto, jolloin aineisto menetti ortogonaalisuutensa ja tasapainon. Tällä toistolla saavutettiin arvio koeyksikön keskijajonnasta. Lisäksi lisättiin tekijä, polttoainetehto D, joka esiintyi vain kahdella tasolla, kun muut tekijät tutkittiin kolmella tasolla. Neljäs tekijä otettiin mukaan, sillä haluttiin tietää miten tekijät A, B ja C vaikuttavat eri tehoalueilla. Kokeen tulkinta kuitenkin vaikeutui näiden koesuunnitelman muokkauksien vuoksi. Standardikoetaulukoilla on omat standardianalyysimenetelmänsä, joita nyt ei voitu käyttää. Regressio kuitenkin soveltuu myös epätasapainoisen aineiston analysointiin, joten sitä voidaan hyvin käyttää epätasapainoisen aineiston analyysissä, vaikka tiettyjä etuja menetetäänkin. Jatkossa suositeltavaa olisi pitäytyä yksinkertaisimmassa koetaulukoissa, jotta analyysivaihe helpottuisi. Erityistä huomiota tulisi kiinnittää siihen, miten otetaan koejärjestelyssä järkevästi huomioon tehon vaikutus, sekä mahdollisesti vastapaineen vaikutus. Koska tiedetään tehon vaikuttavan suuresti päästöihin, on kokeet joko tehtävä vain yhdessä tehopisteessä, tai otettava teho mukaan koesuunnitelmaan yhtenä tekijänä.

Analyysissä saatiin malli, jossa typen oksidien määrää selittivät liekkilevyn sisähalkaisija A, A:n neliöllinen termi A^2 ja primäärikaasusauvan sekä tehon yhdys-

vaikutus BD. Merkitsevin tekijä on BD. Teorian mukaan tällöin joko B:n tai D:n tulisi olla myös merkitsevä, jos kyseessä todella on näiden kahden varsinainen yhdysvaikutus. Yhdystermin merkitsevyys voidaan tulkita toisellakin tavalla: B:n ja D:n yhteisvaikutuksesta jonkin latentin, yksiulotteisen muuttujan taso vaihtelee, ja tämä piilevä muuttuja on itse asiassa se muuttuja, joka vaikuttaa vasteen havaittuun arvoon. Tällainen fyysinen muuttuja voisi olla esimerkiksi kaasun nopeus, joka muodostuisi primäärikaasusauvan halkaisijan ja polttoainetehon yhteisvaikutuksesta. Tämän tutkimuksen perusteella emme voi kuitenkaan tarkemmin tuntea tätä oletettua tekijää, ja asian selvittäminen vaatisi jatkotutkimuksia.

On huomioitava, että tulosten epävarmuus on kohtuullisen suuri. Kokeita ei ollut mahdollista toistaa, joten on mahdollista, että saatu malli on vääristynyt, sillä yksikin mittaustulos vipuaa tulosta vahvasti omaan suuntaansa toistojen puuttuessa. Kokeiden järjestys oli myös puutteellisesti satunnaistettu, ja siksi on mahdotonta tietää, pääsikö kokeiden järjestys vaikuttamaan tuloksiin. Datan kertyessä tämä ongelma pienenee, mutta pienissä kokeissa satunnaistaminen tulisi ottaa paremmin huomioon.

Käytetyt ohjelmistot soveltuivat kokeiden suunnitteluun ja analyysiin, joskin niissä on tiettyjä puutteita. Koeajovelho DOE:lla koeasetelman luominen on hyvin helppoa, mutta rajattua; kirjallisuudesta löytyy suurempi valikoima asetelmia eri käyttötarkoituksiin. Käytännön sovelluksiin Oilonin käytössä DOE:sta löytyvät asetelmat ovat kyllä varmasti riittävät, ja erikoisesti uskon, että ohjelman toiselle toiminnolle, optimaalisille suunnitelmille, voi olla vastaisuudessa käyttöä. Datain-mallinnusohjelman hyvät puolet olivat sen käytön helppous, graafisuus ja suomenkielisyys. Ohjelmalla voidaan analysoida ja mallintaa hyvin myös suunnittemattomia kokeita. Puute Datain:ssa on, että parhaan mallin valintaan on vain yksi menetelmä: tämän vuoksi avuksi voidaan tarvita muitakin ohjelmia. Luvussa 4 käytin myös R-kieltä, joka osoittautui hyväksi apuvälineeksi laskutoimitusten suorittamiseen, sekä tilastollisten testien ja piirrosten piirtämiseen. Myös tekijät parhaiten ilmiötä kuvaavaan malliin valittiin R-kielen avulla. Jatkossa tulisikin pohtia, miten tekijät valitaan malliin. Käytetäänkö aina jotakin tiettyä menetelmää, jotakin tiettyä kriteeriä vai sovelletaanko tapauskohtaisesti.

Opinnäytetyössä saamani kokemuksen perusteella ehdotan, että jatkossa Oilonin tuotekehityksessä tehtäisi kahdenlaisia kokeita: seulontakokeita, joissa voi olla suuri määrä muuttujia kahdella tasolla. Tällaisen kokeella voidaan nopeasti löytää ne tekijät, joilla on suuri merkitys tutkittavaan vasteeseen, eivätkö toistot ole välttämättömiä. Kun kiinnostavat tekijät on löydetty, ehdotan, että näitä tekijöitä tutkitaan tarkemmin soveltamalla esimerkiksi 2^k – faktorikokeita. Vaikutusten tarkemman arvioimisen mahdollistamiseksi toistoja olisi hyvä olla vähintään kaksi. Tämän tutkimuksen perusteella tärkeimmät vaikutukset olivat lineaarisia, mutta jos on tarpeen estimoida neliöllisiä vaikutuksia, voidaan se helposti toteuttaa lisäämällä asetelmaan keskus piste, jota voidaan toistaa. Tällainen koeasetelma on ns. central composite design (CCD).

Merkittävä etu koesuunnittelumenetelmien käytössä on järjestelmällinen tiedonkeruun ja tallennuksen periaate. Koska kokeiden tekeminen ottaa aikaa, kuluttaa polttoainetta ja sitoo henkilökuntaa, tiloja ja laitteita, kannattaa mitatut tulokset nähdä hyvin arvokkaina tuotoksina. Merkittävä kehityskohde Oilonin tuotekehitystoiminnassa on kokeissa saavutetun tiedon tallentaminen yhdenmukaisesti siten, että tulokset, ja kaikki kokeeseen liittyvät tiedot olisivat helposti löydettävissä myös jälkikäteen. Tämä mahdollistaisi tiedon käytön myös tulevaisuudessa sellaisissa kohteissa, jota ei ehkä vielä osata ennakoida.

Päätöksenteko on tuotekehityksessä keskeistä: on kyettävä tekemään hyviä päätöksiä siitä, mihin rajalliset resurssit suunnataan. Klassisessa päätöksenteon teoriassa oletetaan, että päätökset perustuvat oikeaan tietoon. Jos tietoa hankitaan kokeellisen tutkimuksen keinoin, se aiheuttaa kustannuksia. Kokeiden suunnittelulla on mahdollista vähentää kustannuksia uhraamatta kuitenkaan oleellista tietoa. Päätösten tekemistä myös helpottaa koesuunnittelun analyysimenetelmät, joiden tarkoitus on tuottaa merkityksellisiä ja täsmällisiä johtopäätöksiä kokeiden tuloksista. Selkeät analyysimenetelmät, joista käyvät ilmi eri tekijöiden vaikutukset ja vaikutusten suhteellinen suuruus kertovat selkeästi, mihin toimenpiteisiin on ryhdyttävä, jotta tavoitteisiin päästään. Oikein mitoitettulla kokeella voidaan myös nopeuttaa tuotekehityksen koevaihetta: sopivalla koesarjalla voidaan nopeasti erottaa ne tekijät, joiden vaikutus on merkityksellinen ja hylätä jatkotutkimuksista

ne joilla on vain vähän tai ei ollenkaan vaikutusta. Näin myös kokeisiin kuluva aikaa on myös mahdollista lyhentää, mikä on merkittävä etu.

LÄHTEET

Hellgrén, M., Heikkinen, L., Suomalainen, L., Kala, J. 1999. Energia ja ympäristö. 3. tarkistettu painos. Helsinki: Opetushallitus.

Kuokkanen, T. & Parkkari, J. 2004. Kansainväliset ympäristösopimukset. Jyväskylä: Edita Publishing Oy.

Manninen, P. & Ylén, M. 2001. Tilastollisen päättelyn käytäntö. Toinen painos. Tampere: Tehokopiointi Oy.

Montgomery, D.C. 2005. Design and Analysis of Experiments. 6. painos. John Wiley & Sons Inc.

Oilon Oy, 2010. [viitattu 20.8.2010]. Saatavissa:

<http://netfi.oilon.com/cms400/oilonhome2010/main.aspx?LangType=1035>

Pepper, I., Gerba, C., Brusseau, M. 1996. Pollution Science. 1. painos. Academic Press, Inc.

Park, H. & Antony, J. 2008. Robust Design for Quality Engineering and Six Sigma. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

Raiko, R., Saastamoinen, J., Hupa, M. & Kurki-Suonio, I. 2002. Poltto ja palaminen. Helsinki: Teknistieteelliset akatemit - De tekniskvetenskapliga akademierna ry.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut [verkkójulkaisu].

ISSN=1797-6049. 2009, Liitetaulukko 2. Hiilidioksidipäästöt Suomessa 1990, 1995, 2000–2009 . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 7.2.2011].

Saantavissa: http://www.stat.fi/til/khki/2009/khki_2009_2010-12-10_tau_002_fi.html

Tilastokeskus 2009. Suomen tilastollinen vuosikirja 2009: 104. vuosikerta (uusi sarja). Helsinki: Tilastokeskus.

Trans, P., NOAA/ESRL. 2011. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, Global CO₂. [Viitattu 7.2.2011] Saatavissa: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

VTT 2004. Energia Suomessa. 3. täysin uudistettu painos. Helsinki: Edita Prima Oy.

Wu, C.F.J. & Hamada, M. 2000. Experiments, Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization. USA: John Wiley & Sons Inc.

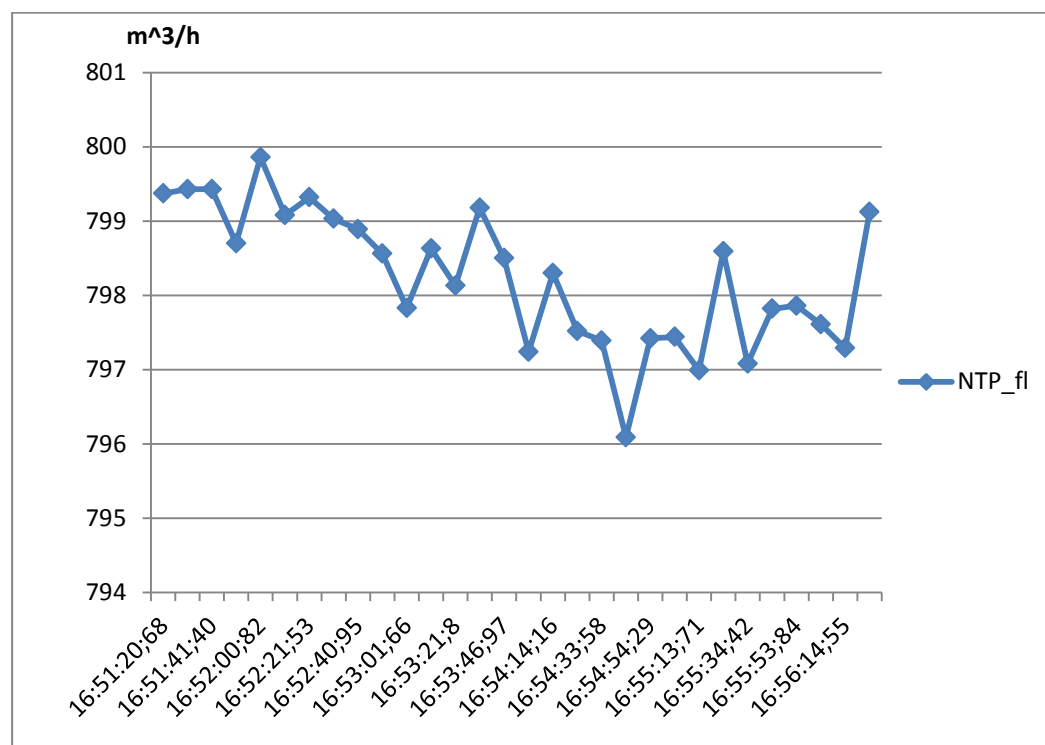
Ympäristöterveystoimikunta 1997. Suomen kansallinen ympäristöterveysohjelma = Finlands nationella miljöhälsoprogram . Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriö, Ympäristöministeriö.

LIITTEET

Liite 1: Polttoainetehon laskeminen ja kaasumäärän mittaaminen

Polttoainetehoa Q_F saadaan polttoaineen kulutuksen ja polttoaineen nettolämpöarvon tulona. Maakaasun nettolämpöarvo on noin $H_j = 36 \text{ MJ/m}^3$. $100 \text{ m}^3/\text{h}$ kaasun kulutus vastaa tällöin noin 1 MW poltintehoa. 8 MW poltintehoa vastasi siis kaasun virtaus $800 \text{ m}^3/\text{h}$ (NTP) ja 3 MW $300 \text{ m}^3/\text{h}$ (NTP). Kaasumäärää on hyvin vaikea säätää tarkkaan, ja määrä vaihtelee hiukan palamisen aikana. Tulostaulukossa ilmoitettu arvo on keskiarvo kokeen aikaisista mittauksista.

Kaasun kulutusta voidaan kokeessa seurata kaasumäärän muuntimen avulla. Laite on GVC -kaasumääränmuunnin, joka muuntaa mitatun kaasumäärän normikuuti-oiksi ottaen huomioon kaasun lämpötilan, paineen ja kokoonpuristuvuuden. Kuvassa 22 on esitetty kaasun virtaus ajan funktiona koeyksikössä 1. Tässä koeyksikössä kaasumäärän keskiarvoksi laskettiin $798 \text{ m}^3/\text{h}$, joten polttoaineteho oli 7,98 MW.



Kuvio 22: Kaasun määrä (NTP) koeyksikössä 1

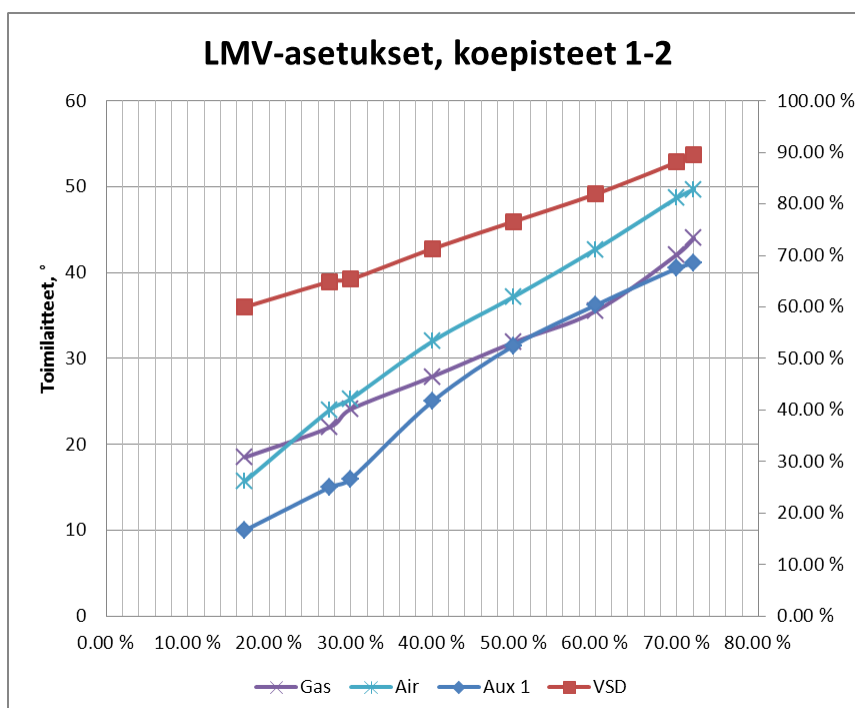
Liite 2: Koematriisi

Taulukko 13: Koematriisi

Koe	Liekki-levy	Primääriskaasusauva	Sekundääriskaasusauvan suutin	Teho
1	400×160	Holkki 3 ($d_p = 16\text{mm}$)	Variaatio2 ($l_s = 7\text{mm}$)	8 MW
2	400×160	Holkki 3 ($d_p = 16\text{mm}$)	Variaatio2 ($l_s = 7\text{mm}$)	3 MW
3	400×80	Holkki 3 ($d_p = 16\text{mm}$)	Variaatio1 ($l_s = 10\text{mm}$)	8 MW
4	400×80	Holkki 3 ($d_p = 16\text{mm}$)	Variaatio1 ($l_s = 10\text{mm}$)	3 MW
5	400×80	Holkki 2 ($d_p = 13\text{mm}$)	Suora ($l_s = 13\text{mm}$)	8 MW
6	400×80	Holkki 2 ($d_p = 13\text{mm}$)	Suora ($l_s = 13\text{mm}$)	3 MW
7	400×120	Holkki 3 ($d_p = 16\text{mm}$)	Suora ($l_s = 13\text{mm}$)	8 MW
8	400×120	Holkki 3 ($d_p = 16\text{mm}$)	Suora ($l_s = 13\text{mm}$)	3 MW
9	400×120	Holkki 2 ($d_p = 13\text{mm}$)	Variaatio2 ($l_s = 7\text{mm}$)	8 MW
10	400×120	Holkki 2 ($d_p = 13\text{mm}$)	Variaatio2 ($l_s = 7\text{mm}$)	3 MW
11	400×160	Holkki 2 ($d_p = 13\text{mm}$)	Variaatio1 ($l_s = 10\text{mm}$)	8 MW
12	400×160	Holkki 2 ($d_p = 13\text{mm}$)	Variaatio1 ($l_s = 10\text{mm}$)	3 MW
13	400×80	Holkki 1 ($d_p = 10\text{mm}$)	Variaatio2 ($l_s = 7\text{mm}$)	8 MW
14	400×80	Holkki 1 ($d_p = 10\text{mm}$)	Variaatio2 ($l_s = 7\text{mm}$)	3 MW
15	400×160	Holkki 1 ($d_p = 10\text{mm}$)	Suora ($l_s = 13\text{mm}$)	8 MW
16	400×160	Holkki 1 ($d_p = 10\text{mm}$)	Suora ($l_s = 13\text{mm}$)	3 MW
17	400×120	Holkki 1 ($d_p = 10\text{mm}$)	Variaatio1 ($l_s = 10\text{mm}$)	8 MW
18	400×120	Holkki 1 ($d_p = 10\text{mm}$)	Variaatio1 ($l_s = 10\text{mm}$)	3 MW
19	400×160	Holkki 3 ($d_p = 16\text{mm}$)	Variaatio2 ($l_s = 7\text{mm}$)	8 MW
20	400×160	Holkki 3 ($d_p = 16\text{mm}$)	Variaatio2 ($l_s = 7\text{mm}$)	3 MW

Liite 3: Toimilaitteiden asetukset

Kokeissa poltinta ohjattiin automaattisella polttimenohjausautomaatiikalla. Sovelluksen ohjausjärjestelmään kuuluu neljä toimilaitetta: puhallinmoottori, ilmaluukkuja ohjaava moottori (kuvassa ”Air”), kaasuläpän moottori (”Gas”) ja säätörenkasta säätävä moottori (”Aux 1”). Koska koeyksiköissä käsittelety olivat hyvin erilaiset, näitä toimilaitteita jouduttiin säätämään aina käsittely-yhdistelmän muuttuessa, jotta päästäisiin oikealle teholle ja saataisi jäännöshapen määräksi säädettyä 3 %. Säätörenkaan asema pyrittiin pitämään vakiona, ja tehoa säädettiin muilla toimilaitteilla. Kuviossa 23 on koepisteiden 1-2 ajoissa käytetyt säädöt. Vaaka-akselilla on ilmoitettu teho prosentteina maksimista. 8 MW vastaa 72,1 % maksimitehosta ja 3 MW 27,4 %. VSD (punainen käyrä) merkitsee puhallinmoottorin nopeutta ilmaistuna prosenttiosuutena maksimista. Oikea pystyakseli ilmaisee tämän prosenttiosuuden. Muut toimilaitteet ovat servomoottoreita, ja niiden asema on ilmoitettu asteikolla 0-90°. Taulukossa 14 on esitetty kaikkien toimilaitteiden asetukset koeyksiköissä.



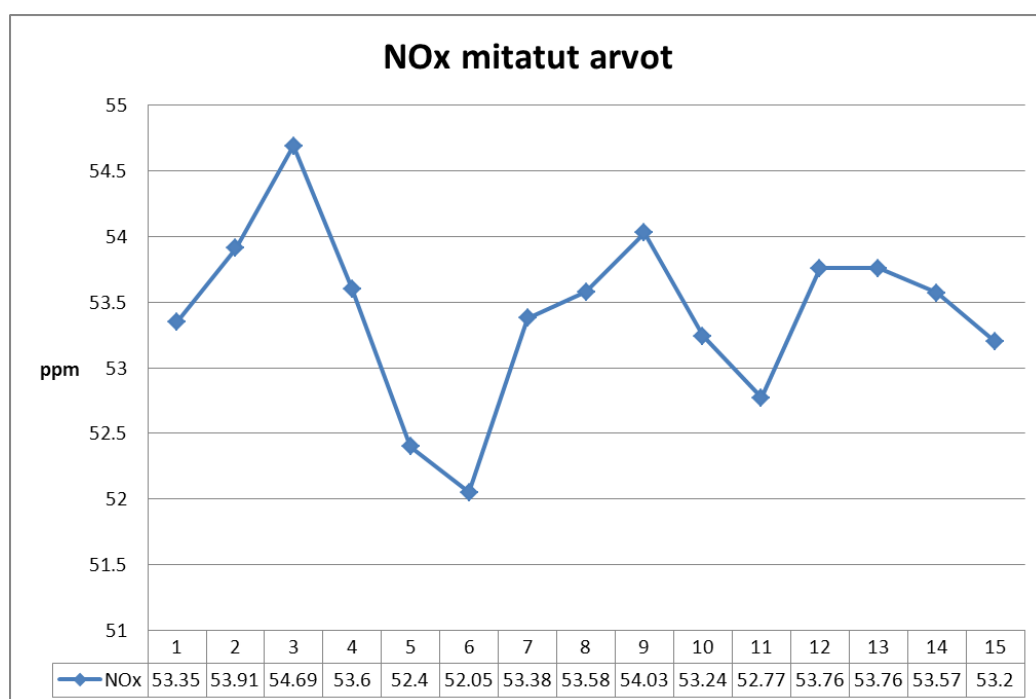
Kuvio 23: Toimilaitteiden säädöt koepisteissä 1-2

Taulukko 14: Toimilaitteiden asetukset koeyksiköissä

Koeyksikkö	Load %	Gas	Air	Aux 1	VSD
1	72.10 %	44.0	49.7	41.1	89.50 %
2	27.40 %	22.0	24.0	15.0	64.90 %
3	72.10 %	39.7	48.1	41.1	86.40 %
4	27.40 %	23.0	23.4	15.0	64.10 %
5	72.10 %	38.0	48.2	41.1	86.70 %
6	27.40 %	22.6	23.4	15.0	64.10 %
7	72.10 %	38.6	46.8	41.1	85.00 %
8	27.40 %	22.9	22.8	15.0	64.10 %
9	72.10 %	41.3	46.9	41.1	85.10 %
10	27.40 %	22.9	23.0	15.0	64.40 %
11	72.10 %	37.8	44.7	41.1	82.60 %
12	27.40 %	22.3	22.7	15.0	62.20 %
13	72.10 %	44.0	49.7	41.1	89.50 %
14	27.00 %	22.0	24.0	15.0	64.90 %
15	72.10 %	38.3	44.7	41.1	82.60 %
16	27.40 %	21.8	22.5	15.0	62.00 %
17	72.10 %	38.6	47.0	41.1	85.20 %
18	27.40 %	21.8	22.8	15.0	64.20 %
19	72.10 %	39.1	43.2	41.1	80.80 %
20	27.00 %	22.7	22.8	15.0	61.80 %

Liite 4: NO_x mittaaminen

Typen oksidien tulostaulukossa 9 ilmoitettu arvo on kussakin koeyksikössä laskettu viidentoista mittauksen keskiarvona. Mittaukset tehtiin 10 minuutin aikana 20 sekunnin välein. Kuviossa 24 on ensimmäisen koepisteen mitatut arvot. Keskiarvo on 53,42 ppm. Pienin mitattu arvo oli tässä koepisteessä 52,05 ppm ja suurin 54,69 keskihajonnan ollessa 0,65 ppm. Mittauslaitteen mittavirheeksi oli ilmoitettu ± 2 ppm, joten tämä vaihtelu voidaan tulkita mittausvirheeksi. Kaikissa kokeissa pienin koepisteen sisäisten mittausten keskihajonta oli 0,24 ppm ja suurin 0,65 ppm. Eri koeyksiköiden keskihajontojen keskiarvo oli 0,39 ppm.



Kuvio 24: Aikasarja mittausarvoista koepisteessä 1