



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Alexi Virtanen

Tiivistevalmistuksen laadun parantami- nen koesuunnittelun avulla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

14.4.2021

Tekijä Otsikko	Aleksi Virtanen Tiivistevalmistuksen laadun parantaminen koesuunnittelua käyttäen
Sivumäärä Aika	41 sivua + 1 liitettä 14.4.2021
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneiden suunnittelu
Ohjaajat	Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Työssä tavoitteena oli selvittää koesuunnittelua käyttäen, mitkä tekijät vaikuttavat palloventtiilin tiivisteiden lopulliseen laatuun. Tutkittaviksi tekijöiksi valittiin tiivistepinnan viimeistelysorsausnopeus, sorsauksen puristusvoima, ja kiinnitysleukojen tarkkuus. Tekijöille valittiin kaksi tasoa ja niistä muodostettiin 2^3 faktorisuunnitelma, eli kaikki yhdistelmät sisältävä koesarja.</p> <p>Työ sisälsi alun perin kaksi kahdeksan kappaleen koesarjaa, mutta viivästysten takia toinen erä jätettiin myöhemmillä resursseilla toteutettavaksi. Työn toteutus sisälsi arvojen keräämisen ja koneistajien ohjeistamisen kaikissa valmistusvaiheissa, eli hitsaamisessa, sorsauksessa, ja hionnassa. Lopuksi valmistetut kappaleet mitattiin Neleksen mittahuoneella, josta saadut tulokset analysoitiin Minitab-ohjelmistolla.</p> <p>Yhtä kappaletta valmistettaessa työkalun terä hajosi sorsauksen toisen vaiheen rouhinnan aikana, joten sen arvoja ei käytetty tuloksia analysoidessa. Tämä laskee hieman tulosten tarkkuutta, muttei kuitenkaan huomattavasti.</p> <p>Tulosten analyysissä kävi ilmi, ettei tekijöillä ole tilastollisesti merkittävää vaikutusta vastaisiin. Mikään päävaikutus, tai yhteisvaikutus, ei ylittänyt merkittävyyden rajaa, kun α oli 0,05.</p> <p>Seuraavaa erää voidaan käyttää ensimmäisen erän replikaationa, kasvattaen tulosten tarkkuutta huomattavasti. Siihen on myös mahdollista lisätä neljäs tekijä, joka kuitenkin laskee tulosten resoluutiota tasolle IV. Siihen voidaan myös valita uudet, jos halutaan tutkia muiden prosessin osien vuorovaikutuksia. Ensimmäisen erän tulosten perusteella on hankala nostaa yhtä vaihtoehtoista selkeästi parhaaksi.</p>	
Avainsanat	Koesuunnittelu, Palloventtiili, Tilastollinen analyysi

Author Title	Aleksi Virtanen Improving the quality of the seat manufacturing using design of experiments
Number of Pages Date	41 pages + 1 appendices 14 April 2021
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Design of Machines
Instructors	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>The goal of this project was to find out which factors in the manufacturing process effect the final quality of a seat of a ball valve. The selected design factors were the seal surface finishing turning speed, mounting force during turning, and the accuracy of the jaws that hold the part in the lathe. Two levels were chosen for the factors, and they were made into a full 2^3 factorial design that included their all possible combinations.</p> <p>The project originally included two eight-part runs, but because of delays, the second part was left to be done with other resources later. The actual implementation of this project was done by collecting data and briefing the machinists during all phases of the manufacturing process. That means plasma welding, turning, and final grinding. Finally, the completed parts were brought to the Neles measurement department, which produced the data for the statistical analysis using Minitab-software.</p> <p>During the manufacturing of one of the parts, the lathe tool bit broke while roughing. The data from this part was not used for the analysis, which lowers the accuracy of the results, but not significantly.</p> <p>Analysis of the data reveals that none of the factors has a statistically significant effect on the outputs. None of the main effects or interactions were significant with α-value of 0,05.</p> <p>The next experiment run can be used to as a replicate run of the first, and thus increasing the accuracy and reliability of the results greatly. A fourth factor can also be added, but that will decrease the resolution into level IV. Also a possibility is to change some or all the factors to bring out new interactions which might be significant. Because of the results of the first batch, it is difficult to recommend one of these possibilities over the rest.</p>	
Keywords	Design of Experiments, Ball valves, Statistical analysis

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tilastollinen analyysi	1
2.1	Lineaariregressio	2
2.2	Varianssi	4
2.3	Vapausasteet	6
2.4	Nollahypoteesi, α , ja p-arvo	7
2.5	F-jakauma ja F-testi	9
2.6	ANOVA	10
3	Koesuunnittelu, Design of Experiments -teoria	12
3.1	Perusperiaatteet	13
3.2	Muuttujat	14
3.3	Koetyypit	15
3.3.1	2 ^k Faktorisuunnitelma, Factorial Design	16
3.3.2	Osittainen faktorisuunnitelma, Fractional Factorial Design	25
3.3.3	Vastepinta, Response Surface	27
4	Palloventtiili, tiivisteet, ja valmistus	29
4.1	Palloventtiili	30
4.2	XA-sarjan venttiili	32
4.3	Tiiviste	34
5	Projektin koesuunnittelun toteutus	36
5.1	Koesarja	36
5.2	Tulokset	39
6	Yhteenveto	40

Liitteet

Liite 1. Koesarjan pareto-diagrammit

Lyhenteet

DOE Design of Experiments, Koesuunnittelu

DOF Degrees of Freedom

ANOVA Analysis of variance

1 Johdanto

Projekti tehtiin venttiiliyritys Neles Oyj:n toimeksiannosta. Sen tarkoituksena on saada tietoa palloventtiilin tiivisteiden valmistuksessa tapahtuvasta vaihtelusta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Neles on suomalainen virtausventtiilisäätöratkaisujen ja -palveluiden toimittaja. Se muuttui itsenäiseksi pörssiyhtiöksi 1.7.2021. Tätä ennen se toimi vuodesta 2001 saakka osana Metso Oyj:tä nimellä Metso Flow Control. Vuonna 2019 yrityksen liikevaihto oli 660 miljoonaa euroa, ja henkilöstöä 2866 (Neles Oyj, 2020).

Neles tuottaa sulku- ja säätöventtiileitä muun muassa kemian-, sellu-, paperi-, kaivos-, ja meriteollisuuden tarpeisiin. Sen tuotevalikoimaan kuuluvat erilaiset ja kokoiset pallo-, läppä-, istukka-, segmentti-, sekä kiertoistukkaventtiilit. Lisäksi se valmistaa venttiilien hallintaan toimilaitteita, rajakytkimiä, ja venttiiliohjaimia.

Neleksellä on menossa suuri Robust Product -projekti, jonka pieni osa tämä projekti on. Sen lopullisena tarkoituksena on nostaa venttiilien tiiviysluokkia vastaamaan tulevaisuuden vaatimuksia, sekä vähentää tuotteiden laadun vaihtelua. Siinä tarkastellaan kaikkia tuotteen valmistukseen liittyviä vaiheita: suunnittelun yhtenäisyyttä, tuotannon vaihtelua, ja testauksen luotettavuutta.

Teoriapohjan tälle projektille muodostaa koesuunnittelu eli design of experiments. Tässä raportissa käydään läpi toteutuksen kannalta sen tärkeimmät osa-alueet, sekä sen ymmärtämiseen tarvittavat käsitteet tilastollisesta analyysistä.

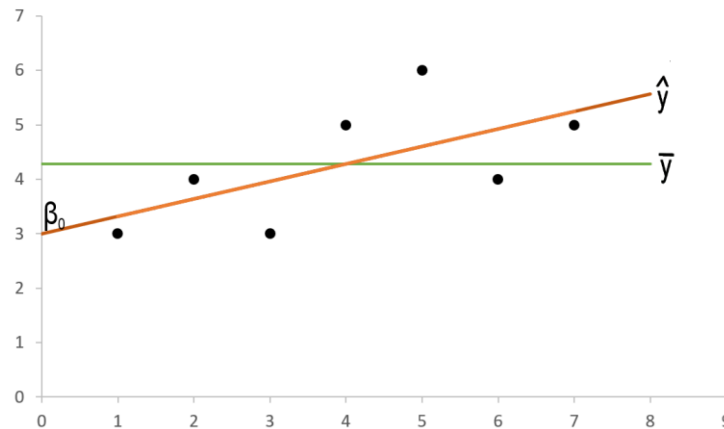
Projektin käytännön toteutus sisälsi yhden koesarjan valmistuksen ja niiden tulosten analysoinnin koesuunnittelua käyttäen. Näiden vaiheiden sisältö löytyy yksityiskohtaisesti raportin lopusta.

2 Tilastollinen analyysi

Koesuunnittelu perustuu erittäin perustavanlaatuisesti tilastollisiin malleihin ja analyysiin, joten sitä on hyvin vaikea ymmärtää tuntematta tiettyjä käsitteitä tilastotieteestä. Tässä osiossa käydään läpi koesuunnittelun kannalta oleellimmat asiat läpi.

2.1 Lineaariregressio

Regressio tarkoittaa yksinkertaisimmillaan parhaiten sopivan kuvaajan sovittamista otosdataan. Regressiomallia sanotaan lineaariseksi, jos siinä ei ole yhtään ensimmäistä astetta korkeampaa termiä, eli se tuottaa suoran linjan. Kuvassa 1 näkyy yksinkertainen kuvaaja, jossa mustat pisteet ovat otosdatasta saatuja syötteitä, \hat{y} on regressiosuora, \bar{y} otosten keskiarvo, ja β_0 y-akselin leikkauspiste.



Kuva 1. Näytepisteet, keskiarvosuora ja regressiosuora

Yhden muuttujan lineaariregressiosuoran yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon

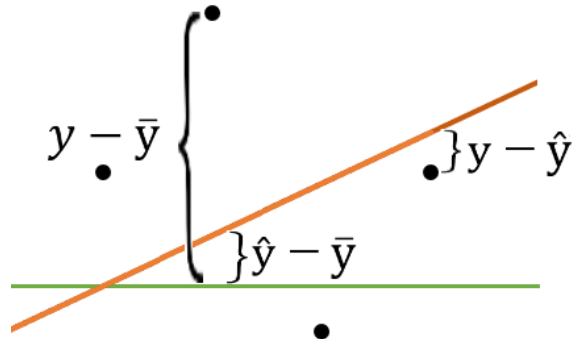
$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \epsilon \quad (1)$$

ja monen muuttujan mallinnetaan kaavalla

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (2)$$

joissa \hat{y} on mallin vaste, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ kiinteitä parametrejä, x_1, \dots, x_k riippumattomia muuttujia eli regressoreja, ja ϵ virhetermi. Mallista tulee sitä moniulotteisempi, mitä useampi regressori siinä on.

Mallin tarkkuutta voidaan arvioida selityksasteen r^2 (merkitään myös R^2) avulla, joka kertoo kuinka vahvasti data korreloi regressiomallin kanssa. Mallista lasketaan kuvan 2 havainnollistamat otospisteiden etäisyyksien summan neliö keskiarvosta ja regressiosuorasta, sekä regressiosuoran etäisyyksien summan neliö otospisteiden kohdalta. Summat korotetaan toiseen potenssiin, jotta ne muuttuisivat positiivisiksi, estäen toistensa kumoamisen.



Kuva 2. Pisteiden etäisyydet regressiosuorasta ja keskiarvosta

Kokonaisneliösumma SST (sum of squares total), regression neliösumma SSR (sum of squares of regression) lasketaan kaavoilla, ja virheneliösumma SSE (square sum of errors) lasketaan kaavoilla (Walpole, et al., 2012: 407)

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (3)$$

$$SS_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad (4)$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

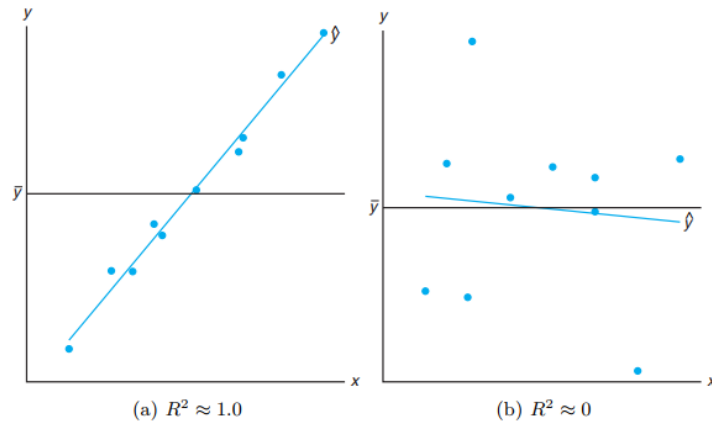
Neliösummat voidaan myös johtaa toisistaan kaavalla

$$SS_T = SS_E + SS_R \quad (6)$$

Arvoilla saadaan laskettua selityksaste r^2 kaavalla

$$r^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (7)$$

r^2 saa arvoja välillä 0 ja 1. Mitä lähempänä arvo on 1:stä, sitä paremmin regressiomalli sopii yhteen mallinnettavan datan kanssa. Jos taas r^2 lähenee 0:aa, se sopii hyvin huonosti. Kuvassa 3 mallina hyvin sopiva (a), sekä huonosti sopiva (b) malli.



Kuva 3. Hyvin sopiva ja huonosti sopiva regressiomalli (Walpole, et al., 2012: 429)

2.2 Varianssi

Varianssi on yksi tilastotieteen keskeisiä käsitteitä. Se kertoo kuinka suuri hajonta otoksella sen keskiarvon ympärillä. Kuvassa 4 näkyy eri varianssin omaavia normaalijakaumia. Varianssia merkitään kahdella eri symbolilla riippuen mitä sillä kuvataan. Jos kyseessä on kokonaispopulaatio, merkitään se σ^2 , ja lasketaan kaavalla

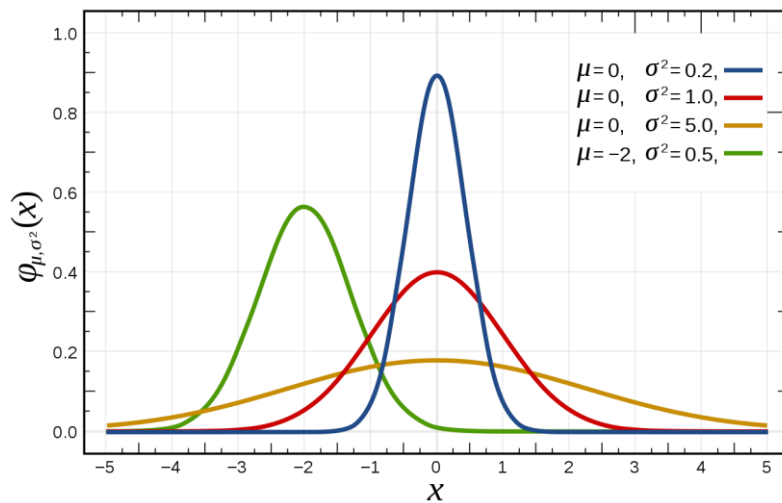
$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \\ &= \frac{SS_T}{N} \end{aligned} \quad (8)$$

jossa SS_T on kokonaisneliösumma, \bar{y} populaation keskiarvo, ja N on populaation lukumäärä.

Jos taas kyseessä on jostain populaatiosta otetun näytteen varianssi, merkitään sitä s^2 , ja lasketaan kaavalla

$$S^2 = \frac{SS}{n-1} \quad (9)$$

jossa SS on näytteen neliösumma, ja n näytekoko. Kaavan nimittäjää sanotaan myös sen vapausasteiksi, josta lisää tietoa osiossa 4.3.



Kuva 4. Eri varianssin omaavia normaalijakaumia (Wikimedia Commons)

Variansseista voidaan laskea populaation ja näytteen keskihajonnat (standard deviation) kaavoilla

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (10)$$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (11)$$

Joskus tuloksia analysoidessa tarvitaan standardisoitua muuttujaa, jota merkitään z. Se kertoo kuinka monen standardijakauman päässä näytteen keskiarvo on populaation keskiarvosta. Se voidaan laskea kaavalla

$$z = \frac{\bar{y} - \bar{Y}}{\sigma} \quad (12)$$

jossa \bar{Y} on populaation keskiarvo, \bar{y} näytteen keskiarvo.

2.3 Vapausasteet

Vapausasteilla (Degrees of Freedom, DOF) tarkoitetaan arvojen määrää, jotka ovat vapaita muuttumaan, kun on voimassa yksi tai useampi matemaattinen rajoite, kun jotain näytettä käytetään arvioimaan populaation ominaisuuksia. (Witte & Witte, 2017: 75.)

Yksinkertainen esimerkki, joka auttaa havainnollistamaan ideaa olisi kolikonheitto. Jos kolikkoa heitetään ja tulos on klaava, tiedämme myös ettei tulos ole kruuna. Muuttujalla on siis kaksi arvoa, mutta vain yksi vapausaste. Jos toinen arvo tiedetään (klaava = totta), toinen ei ole vapaa muuttumaan (kruuna = epätotta). Jos kolikkoa heitetään 100 kertaa ja tuloksissa ilmoitetaan vain kruunien määrä, tiedetään automaattisesti myös klaavojen määrä. Jos esimerkkinä olisi muuttuja, jolla on kolme mahdollista tilaa, tarvitsisi siitä tuntea vain kaksi, jotta kolmannen tilan voisi päätellä. Vapausasteet esimerkeissä voidaan siis kirjoittaa kaavamuotoon

$$DOF = k - 1 \quad (13)$$

jossa k on muuttujan tilojen määrä.

Tilastollisessa analyysissä vapausasteet tulevat erityisesti esille, kun tehdään varianssi-analyysi ANOVA:a. Se löytyy myös näytteen standardijakauman kaavasta (9), jossa nimittäjänä toimii $n-1$, joka on myös sen vapausasteiden määrä. Tämä johtuu siitä, että jos tiedetään jonkin joukon keskiarvo, ei joukon viimeinen luku ole vapaa muuttumaan. Kaavamuodossa havainnollistettuna:

$$\bar{x} = 2 + 3 + 4 + x_4 = 3.5 \quad (14)$$

jossa \bar{x} on joukon keskiarvo, ei x_4 voi olla mitään muuta kuin 5. Täten joukolla on 3 vapausastetta.

Vapausasteet ovat tärkeä osa tulosten merkittävyyden analysointia, varsinkin koesuunnittelun yhteydessä.

2.4 Nollahypoteesi, α , ja p-arvo

Nollahypoteesi, joka merkitään H_0 , on oletamus, että tutkittava tekijä ei ole muuttanut joukkoa mitenkään. Esimerkiksi lääketutkimuksessa koehenkilöjoukko jaetaan kahteen ryhmään, jonka jälkeen toiselle ryhmälle annetaan lumelääkettä ja toiselle testilääkettä. Nollahypoteesi väittää, ettei ryhmillä ole mitään tilastollista eroa. Nollahypoteesia pidetään oletusarvoisesti kaikissa kokeissa oletusarvoisesti totena. Tämän voidaan sanoa edustavan vallitsevaa tilaa, eli uusien ideoiden vastustusta. Kokeet yleensä tarjoavat nollahypoteesin vastaisen vaihtohtoisen hypoteesin H_1 , joka väittää, että esimerkiksi lääke aiheuttaa muutoksen koejoukossa. Kokeilla ei kuitenkaan voi koskaan todistaa vaihtohtoista hypoteesia todeksi, vaan voidaan ainoastaan hylätä tai olla hylkäämättä nollahypoteesi (Walpole, et al., 2012: 320-321). Suoran kausaliteetin todistaminen on siis käytännössä mahdotonta. Analyysillä voi kuitenkin todeta, että kerätty otos tuloksia olisi todella epätodennäköinen, jos nollahypoteesi olisi totta. Nollahypoteesia ja vaihtohtoista hypoteesia merkitään esimerkiksi

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0$$

Nollahypoteesin analyysillä voi päätyä neljään eri tulokseen, jotka näkyvät taulukossa 1. Vaihtoehdot sisältävät kaksi erilaista virhettä: tyyppin I ja tyyppin II virheet.

Taulukko 1. Hypoteesin mahdolliset tulokset

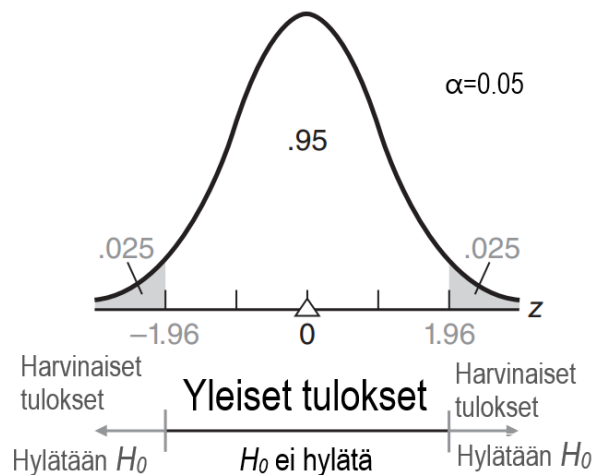
	H_0 on oikea	H_0 on väärä
H_0 ei hylätä	Oikea päätös (todennäköisyys = $1 - \alpha$)	Tyyppin II virhe "väärä negatiivinen" (todennäköisyys = β)
H_0 hylätään	Tyyppin I virhe "väärä positiivinen" (todennäköisyys = α)	Oikea päätös (todennäköisyys = $1 - \beta$)

Tyyppin II virheellä tarkoitetaan tilannetta, jossa nollahypoteesia ei hylätä, vaikka se on väärä. Sen tapahtumisen todennäköisyyttä merkitään symbolilla β . Sitä on mahdotonta

laskea, ellei ole tiedossa tiettyä vaihtoehtoista hypoteesia, koska nollahypoteesi voi olla väärä monella eri tavalla. Testin voimakkuutta (power) voidaan kuvata luvulla $1 - \beta$. Jos voimakkuus on korkea, havaitsee tutkimus herkemmin poikkeamat nollahypoteesista, ja auttaa estämään väärät negatiiviset tulokset.

Tyyppin I virhe on siis nollahypoteesin hylkäys, vaikka se on oikea. Sen tapahtumisen todennäköisyyttä kutsutaan myös merkitsevyydeksi tai riskitasoksi, ja sitä merkitään symbolilla α . Usein kokeille asetetaan suurin sallittu riskitaso α lähtöarvoissa. Riskitaso siis kertoo kynnyksen, jonka yläpuolella nollahypoteesi voidaan hylätä. Korkea α tekee kokeesta epäluotettavamman.

Esimerkiksi kuvassa 5 näkyy jonkin joukon normaali jakauma ja tummalla kriittinen alue, eli alue, jossa nollahypoteesia hylätään. Kokeen lähtöarvoissa on määritelty riskitaso $\alpha = 0.05$. Jos tulosjoukon standardisoitu keskiarvo z on alle -1.96 tai yli 1.96 , voidaan nollahypoteesi hylätä. Jos kriittiselle alueelle on valittu absoluuttiset arvot ylä- ja alarajaksi, voidaan α suuruutta säätää otoskoko muuttamalla. Mitä suurempi otoskoko, sitä pienempi α .



Kuva 5. Nollahypoteesin arviointi riskitasolla 0.05 "kaksihäntäisellä" kokeella (Mukaillen Witte & Witte, 2017: 200)

Tilastoanalyysin tuloksissa ilmoitetaan usein p-arvo. Se tarkoittaa yksinkertaisuudessaan todennäköisyyttä saada tulosdatajoukko, jos yleisellä populaatiolla ja tulosjoukolla ei ole mitään eroa, eli nollahypoteesi on totta. Esimerkiksi jos jonkin tutkimuksen p on 0.013, on 1.3 % mahdollisuus valita sattumalta saadut tulokset populaatiojakaumasta. Tuloksia analysoidessa verrataan merkittävyyttä α ja tuloksista laskettua p -arvoa. Jos

$$p < \alpha \quad (15)$$

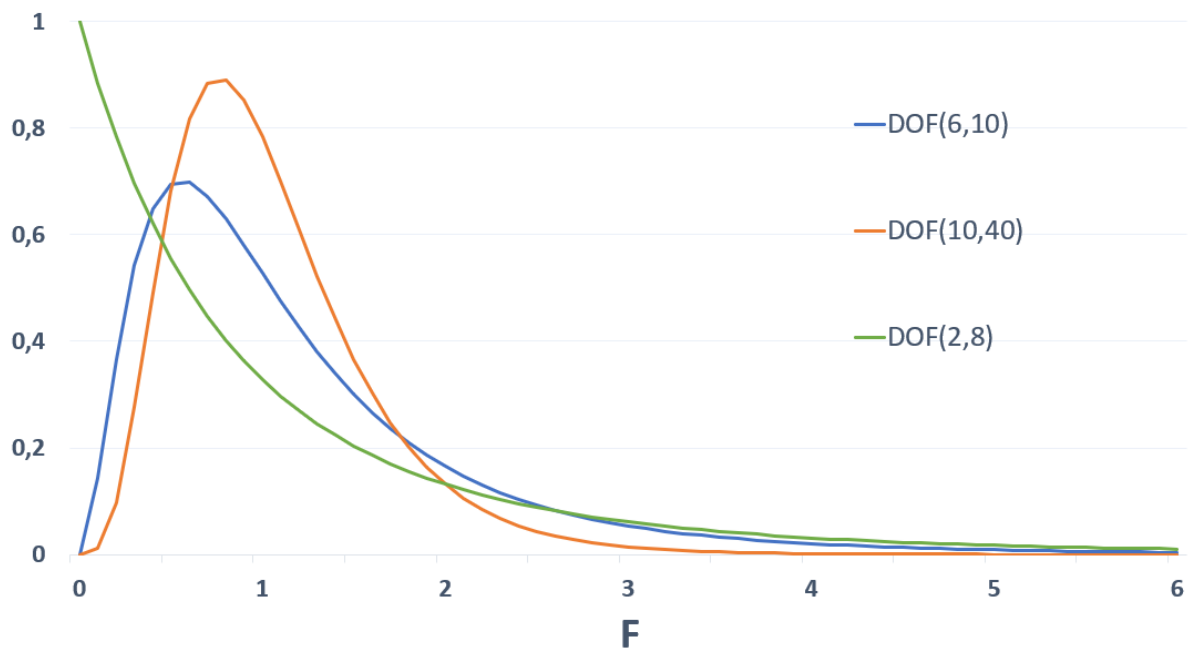
voidaan sanoa, että joukoilla on tilastollisesti merkittävä ero, ja nollahypoteesi hylätään.

2.5 F-jakauma ja F-testi

F-jakaumaa käytetään hypoteesitestaukseen ja siinä vertaillaan kahden joukon varianssin jakautumista. Sen ominaisuuksia käytetään erityisesti varianssianalyysi ANOVA:a tehdessä, josta lisää osiossa 3.6. Kuvassa 6 näkyy muutamia F-jakaumia. F ei saa koskaan negatiivisia arvoja. Sen muoto määrittyy verrattavien joukkojen vapausasteiden mukaan. F on kahden X^2 jakautuneen muuttujan suhde, ja sen tiheysfunktio vapausasteilla v_1, v_2 saadaan kaavalla

$$f(x) = \frac{1}{B\left(\frac{v_1}{2}, \frac{v_2}{2}\right)} \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\frac{v_1}{2}} x^{\frac{v_1}{2}-1} \left(1 + \frac{v_1}{v_2}x\right)^{-\frac{v_1+v_2}{2}} \quad (16)$$

jossa $B(a,b)$ on niin sanottu beta-funktio.



Kuva 6. Erilaisia F-jakaumia annetuilla vapausasteilla

F-testi on suhdeluku, joka vertaa kahden näytteen varianssia kaavalla

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (17)$$

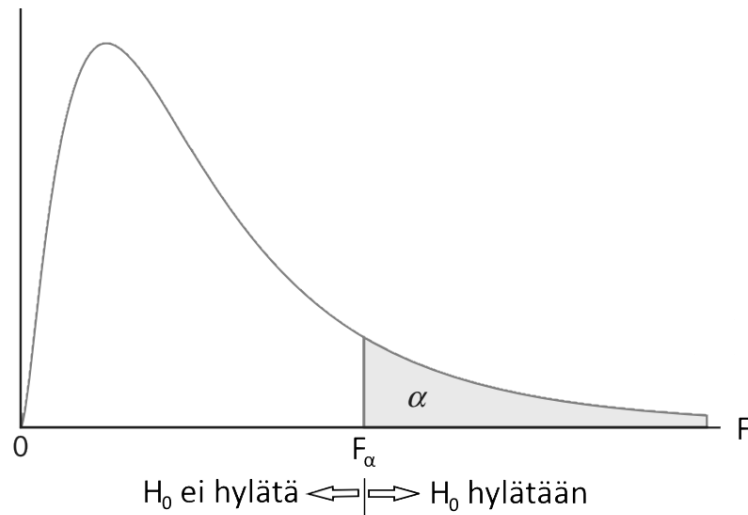
Kun kokeelle on valittu merkittävyys α , voidaan laskea F arvolle alaraja. Merkittävyysraja merkitään usein

$$F_{\alpha, v_1, v_2} \text{ tai } F_{\alpha}(v_1, v_2)$$

jossa α on kokeen merkittävyys, sekä v_1 ja v_2 verrattavien joukkojen vapausasteet. Arvo saadaan usein joko taulukosta näiden kolmen arvon avulla, tai analyysiohjelmiston laskemana. Lisää vertailun käytöstä seuraavassa osiossa.

2.6 ANOVA

Varianssianalyysi eli ANOVA (Analysis of Variance) on tapa vertailla useita eri populaatioita tai niiden alaryhmiä, ja löytää niiden mahdolliset erot suhteellisten varianssien perusteella. Sillä voidaan selvittää, onko todennäköistä, että otokset tulevat samasta vai omista yksilöllisistä populaatioistaan. Jos tiettyjen vapausasteiden joukot ovat samasta populaatiosta, on todennäköisempää, että niiden F-testin tulos on lähempänä F-jauman huippua kuin oikeaa reunaa. Mitä pidemmälle oikealle F-testin arvo sijoittuu x-akselilla, sitä harvinaisempaa se on, jos nollahypoteesi on totta. Kun F ylittää merkittävyysrajan F_{α} , voidaan nollahypoteesi hylätä, ja sanoa että joukoilla on tilastollisesti merkittävä ero.



Kuva 7. F-jakauman kriittinen alue

Se on erityisen hyödyllinen koesuunnittelussa, koska se auttaa kertomaan, onko valituilla tekijöillä tilastollista vaikutusta tutkittavaan suureeseen. Asiaa tarkastellaan käytännössä tarkemmin osiossa 4.3.2.

Varianssianalyysissä tarvitaan tutkittavien otosten neliösummia SS_A, \dots, SS_K , kokonaisneliösummaa SS_T , virheneliösummaa SS_E , sekä niiden vapausasteita. Niiden avulla lasketaan keskineliösummat (Mean squares), jotka ovat myös niiden variansseja, käyttäen kaavoja

$$MS_K = s_K^2 = \frac{SS_K}{DOF_K} \quad (18)$$

$$MS_E = s_E^2 = \frac{SS_E}{DOF_E} \quad (19)$$

Saatujen arvojen avulla lasketaan varianssien suhdeluku F_0 kaavalla

$$F_0 = \frac{\text{otosten välinen varianssi}}{\text{otosten sisäinen varianssi}} = \frac{S_K^2}{S_E^2} = \frac{MS_K}{MS_E} \quad (20)$$

Suhdelukua verrataan raja-arvoon $F_\alpha(v_1, v_2)$. Eli jos

$$F_0 > F_\alpha(v_1, v_2) \quad (21)$$

voidaan nollahypoteesi hylätä. Toisin sanoen voidaan olettaa, että otokset tulevat eri populaatioista, eli niillä on tilastollisesti merkittävä ero.

Varianssianalyysin tulokset kerätään usein taulukkoon, taulukon 2 tapaan.

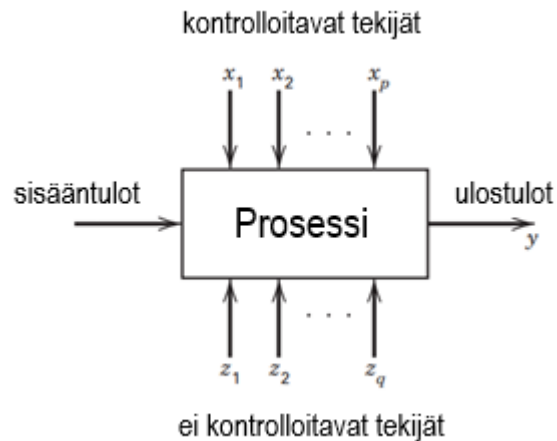
Taulukko 2. ANOVA-tilaus

Varianssin lähde	Neliösummat	Vapausasteet	Keskineliöt	F_0
Tekijä A	SS_A	$k-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{k-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
Virhe	SS_E	$k(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{k(n-1)}$	
Kokonais	SS_T	$kn-1$		

3 Koesuunnittelu, Design of Experiments -teoria

Prosessin ymmärtämiseen ei aina riitä sen pelkkä tarkkailu. Myöskään pelkät fysikaaliset mallit eivät aina tuota tarpeeksi tarkkoja tuloksia käytännössä. Esimerkiksi metalliosan valmistus on monimutkainen prosessi, johon liittyvät raaka-aineet, koneet, ihmiset, ympäristö, ja mittaus. Koneen osat kuluvat käytännössä, ihmiset saattavat vaihtua tai väsyä, ja raaka-aineen ominaisuudet saattavat vaihdella. Kaikki edellä mainitut saattavat aiheuttaa muutoksia lopputulokseen.

Koesuunnittelun tarkoitus on auttaa ymmärtämään miten prosessin lopputulos, esimerkiksi tarkkuus, reagoi syötekijöiden muutokseen. Syötekijät voidaan kuvan 8 mallin mukaisesti yleisesti jakaa prosesseissa kahteen ryhmään: hallittaviin, ja hallitsemattomiin tekijöihin. Hallittavia tekijöitä voivat olla esimerkiksi leikkuunopeus, hitsausvirta, tai keittoaika. Hallitsemattomia taas ympäristön lämpötila tai käyttäjän vireystila. Usein prosessit pyritään suunnittelemaan, ja hallittavat muuttujat säätämään niin, että hallitsemattomien muuttujien vaikutus olisi minimaalinen.



Kuva 8. Prosessimalli (mukaillen Montgomery, 2017: 3)

Koesuunnittelu on tieteeseen perustuva prosessi ja sen teoriapohjana toimii tilastollinen analyysi. Oikein suoritettuna sen tulokset ovat luotettavia ja tarkkoja. Käytännössä kokeiden tulokset kerätään ylös yleensä manuaalisesti kokeen suorituksen aikana, ja analyysin hoitaa jokin ohjelmisto, kuten esimerkiksi Minitab, Design Expert, tai JMP.

Tässä osiossa käydään läpi tarkemmin 2^k faktorisuunnitelma, koska se on projektin käytännön toteutuksen keskiössä, sekä hieman yleisemmällä tasolla muita koesuunnittelun koetyyppejä.

3.1 Peruseriaatteet

Koesuunnittelussa on kolme peruseriaatetta, jotka täytyy ottaa huomioon, jotta saadaan luotettavia ja tilastollisesti varmoja tuloksia. Nämä peruseriaatteet ovat satunnais-taminen (randomisation), replikaatio (replication), ja lohottaminen (blocking). (Antony, 2014: 8-11.)

Kokeen satunnaistaminen tarkoituksena on vähentää prosessin hallitsemattomien tekijöiden vaikutusta lopputulosten dataan. Koesarja ajetaan satunnaisessa järjestyksessä ja sille allokoidaan materiaalit satunnaisesti. Satunnaistamalla koesarja saadaan kaikille kappaleille yhtäsuuri mahdollisuus vaikuttaa näistä tekijöistä, ja näin keskiarvoistaa niiden vaikutus. Jos satunnaistamista ei suoriteta, vähennetään tulosten tilastollista merkitystä (Antony, 2014: 10).

Replikaatio on koko koesarjan tai osan siitä toistamista satunnaisessa järjestyksessä. Se voidaan tehdä koesarjan sisällä, tai omana koesarjanaan. Sen tarkoituksena on auttaa arvioimaan koevirheen suuruus ja tarkentamaan muuttujien todellisia vaikuttavuussuhteiden suuruutta.

Lohkottamisen tarkoitus on vähentää häiriötekijöitä testissä ja parantaa tulosten tarkkuutta. Esimerkiksi jos kokeessa joudutaan käyttämään materiaaleja kahdelta eri toimittajalta, tai jos koe suoritetaan usean päivän aikana, jaetaan tulokset lohkoihin, jotka omaavat samat häiriötekijät (sama päivä, sama toimittaja). Lohkojen väliset vaihtelut otetaan huomioon tuloksia analysoidessa.

3.2 Muuttujat

Muuttujien valinta koesuunnitteluprojektissa tehdään yleensä samaan aikaan koetyypin valinnan kanssa. Jos esimerkiksi päämuuttujien määrä tai tasojen lukumäärä kasvaa suureksi, voi täydellinen faktorisuunnitelma olla äärimmäisen kallista toteuttaa. Muuttujat voidaan karkeasti jakaa kahteen ryhmään: mahdolliset suunnittelutekijät ja häiriötekijät. (Montgomery, 2017: 15.)

Mahdolliset suunnittelutekijät jaetaan kokeessa kolmeen alaryhmään: suunnittelutekijät, kiinteät tekijät, ja vaihtelevat tekijät. Suunnittelutekijät ovat muuttujia, joiden vaikutuksia kokeessa tutkitaan. Niille täytyy valita arvot, tasojen lukumäärä, ja niiden etäisyys toisistaan. Kiinteitä tekijöitä ovat muuttujia, jotka saattavat vaikuttaa vasteeseen, mutta eivät ole kokeen tutkimisen kohteena. Niiden arvot pyritään pitämään vakioina koko kokeen ajan. Esimerkki kiinteästä tekijästä olisi sorvin syöttönopeus, jota ei muuteta kappaleesta toiseen. Vaihtelevat tekijät ovat muuttujia, joiden annetaan vapaasti vaihdella kokeen

aikana, vaikka niitä voisi periaatteessa kontrolloida. Niiden vaikutus tuloksiin minimoidaan satunnaistamisen avulla. Esimerkkinä vaihtelevasta tekijästä olisi aihion valmistuserä. Kokeessa saatetaan käyttää aihioita useasta valmistuserästä, ja niiden välillä saattaa olla eroja. Aihiot jaetaan satunnaisessa järjestyksessä kokeen tuotantoerälle.

Häiriötekijät ovat muuttujia, joilla on mahdollisesti vaikutus tuloksiin, mutta eivät ole kokeen tutkimisen kohteena. Ne ovat usein jaettu kolmeen alaryhmään: kovariaatteihin, lohkottaviin tekijöihin ja kohinatekijöihin. Kovariaatit ovat häiriötekijöitä, joita ei voi kontrolloida, mutta ne voi mitata. Niiden vaikutukset tuloksiin voidaan kompensoida analyysissä. Lohkotekijäksi voidaan sanoa tekijää, jonka avulla voidaan jakaa koesarja joukkoihin, joiden tulokset ovat yhtenäisiä samoilla muuttujilla, mutta eri lohkojen tulokset saattavat vaihdella, vaikka muuttujat ovat samoja. Lohkotekijän huomioonottaminen analyysissä on tärkeää, jotta tutkittavat tekijät eivät peittyisi analyysissä (Dean, et al., 2017: 305). Esimerkkinä lohkotekijästä olisi valmistuspäivä tai valmistava kone. Kohinatekijä on muuttuja, jota voidaan kontrolloida testiolosuhteissa, mutta mahdotonta tai liian kallista tuotannossa. Usein kokeen tavoitteena saattaa olla muiden tekijöiden säätö niin, että kohinatekijöiden aiheuttama vaihtelu tuotannossa saataisiin mahdollisimman pieneksi.

3.3 Koetyypit

Jokainen koesuunnittelu alkaa ongelman määrittelyllä. Mitä halutaan tietää tai saavuttaa? Ennen kuin aletaan valmistelemaan kokeita, olisi suositeltavaa tuoda yhteen kaikki prosessin sidosryhmien edustajat ja kerätä tietoa ongelmista sekä yleisesti prosessin toiminnasta. Koesuunnittelun tavoitteena voivat olla esimerkiksi (Montgomery, 2017:13-14):

- Muuttujien seulonta tai luonnehdinta. Tavoitteena on saada tietoa prosessiin vaikuttavista tekijöistä.
- Optimointi. Tehdään usein seulonnan jälkeen. Suoritetaan, kun halutaan saada prosessin vastemuuttuja tietylle arvolle.
- Varmistus. Halutaan varmistaa, että prosessi käyttäytyy teorian tai aiemmin kokemuksen kanssa yhtenäisesti. Esimerkiksi kun otetaan käyttöön uusi materiaali tai tehdas.
- Uuden löytäminen. Pyritään saamaan selville, mitä tapahtuu, kun käytetään uusia materiaaleja, tekijöitä, tai tekijöiden vaihteluväliä.

- Prosessin vankkuus. Tavoitteena saada prosessi mahdollisimman vakaaksi, eli minimoida vastemuuttujien vaihtelu.

Kun tavoite tiedetään, voidaan valita siihen sopivin koetyyppi.

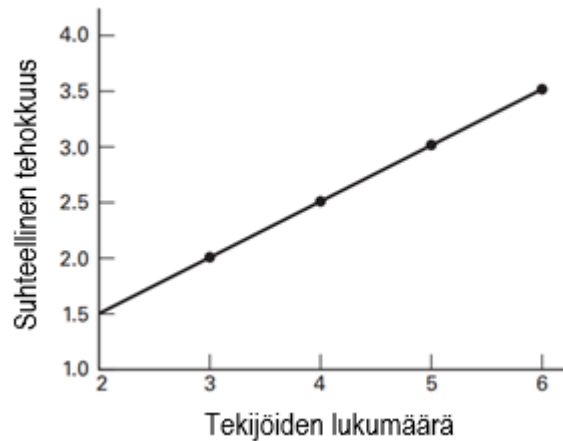
3.3.1 2^k Faktorisuunnitelma, Factorial Design

Täydellä faktorisuunnitelmalla tarkoitetaan koetta, jossa jokainen mahdollinen valittujen suunnittelutekijöiden yhdistelmä määrätyillä tasoilla käydään läpi vähintään kerran. Tasolla tarkoitetaan valmisteluvaiheessa muuttujalle annettua ns. matalaa ja korkeaa arvoa. Tasoja saattaa olla myös enemmän kuin kaksi. Esimerkki faktorikokeesta, jossa tavoitteena saada tietää miten ilmankosteus, lämpötila, ja akun materiaali vaikuttavat akun keston näkyy taulukossa 3. Tuloksista saataisiin analysoitua, mikä tekijä vaikuttaa milläkin vahvuudella keston. Arvot on keksitty mielivaltaisesti esimerkkiä varten.

Taulukko 3. Esimerkki 2³ faktorikokeesta akkujen keston arvioinnissa

Tekijä			Vaste
Lämpötila (°C)	Ilmankosteus (%)	Materiaali	Kesto (h)
25	25	NiCd	24
25	75	NiCd	18
10	25	NiCd	28
10	75	Ni-MH	17
10	75	NiCd	19
10	25	Ni-MH	22
25	25	Ni-MH	20
25	75	Ni-MH	19

Ennen kuin aletaan tutkimaan faktorisuunnitelmia tarkemmin, on hyvä kertoa miksi ne ovat hyödyllisempiä kuin kokeet, joissa yhtä tekijää muutellaan ja tutkitaan kerrallaan. Faktorisuunnitelmien avulla pystytään arvioimaan tekijöiden yhteisvaikutuksia, joihin ”yksi kerrallaan” koe ei kykene. Toiseksi se on huomattavasti tehokkaampi tapa tutkia päävaikutuksia. Kuvassa 9 näkyy kaksitasoisen faktorikokeen tehokkuus verrattuna ”yksi kerrallaan” kokeeseen, kun tekijöiden määrä kasvaa.



Kuva 9. Täydellisen faktorisuunnitelman tehokkuus verrattuna ”yksi kerrallaan” -kokeeseen (mukaillen Montgomery, 2017: 183)

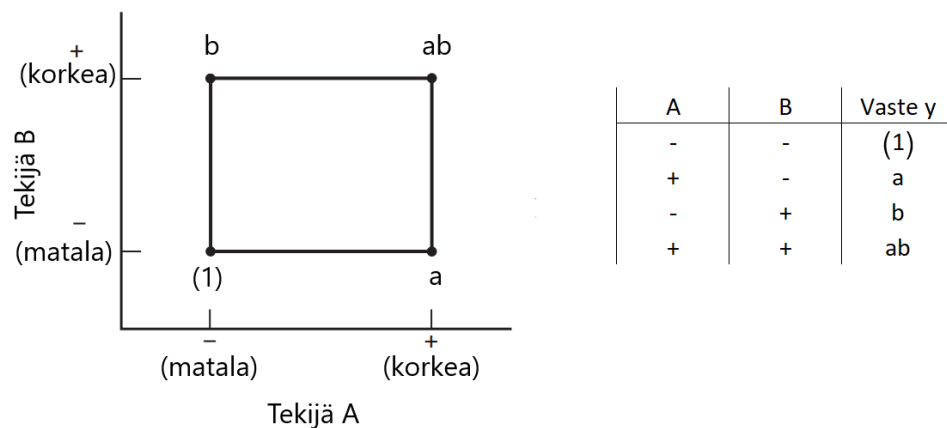
Faktorisuunnitelmassa tarvittavien koesuoritteiden määrä voidaan laskea kaavalla X^k , jossa X on tekijöiden tasojen määrä, ja k on tekijöiden lukumäärä. Koska kyseessä on eksponenttifunktio, kasvaa mahdollisten yhdistelmien määrä hyvin nopeasti tekijöiden lisääntyessä, joka näkyy laskettuna taulukossa 4.

Taulukko 4. Faktorisuunnitelmassa tarvittavien yhdistelmien määrä

Kaksi tasoa (X=2)		Kolme tasoa (X=3)	
Tekijöitä (k)	Yhdistelmiä	Tekijöitä (k)	Yhdistelmiä
2	4	2	9
3	8	3	27
4	16	4	81
5	32	5	243
6	64	6	729
10	1064	10	59 049
14	16384	14	4 782 969

Jos kuitenkin on tarpeellista tehdä koe suurella määrällä muuttujia ja tasoja, on täydellisen faktorisuunnitelman, jossa kaikki mahdolliset kombinaatiot, suorittaminen tätä varten usein liian aikaa vievää ja kallista, joten se ei ole suositeltavaa. Paremmiin tarpeeseen sopiva koetyyppi on osittainen faktorisuunnitelma, jota käsitellään tarkemmin osiossa 4.2.2. Usein kokeen suunnitteluvaiheessa on vain pakko tehdä asiantuntijoiden prosessitietämykseen ja kokemukseen perustuva päätös käytettävistä suunnittelutekijöistä resurssien säästämiseksi. Pienetkin epätarkkuudet suunnittelun aikana voivat johtaa suuriin vaihteluihin lopputuloksissa, joten on suositeltavaa tehdä seulontakokeen esisuunnitteluvaiheesta mahdollisimman formalisoitua (Davim, 2016: 12).

Tarkastellaan kahden tekijän kaksitasoista täyttä 2^2 faktorikoetta. Se voidaan esittää kuvan 10 tapaan geometrisesti, jossa näkyy myös koematriisi. Kuvassa neliön kulmat tarkoittavat arvoja, jotka vaste saa tekijän arvoilla. Ne eivät välttämättä jakaudu lukuarvon suuruuden mukaan.



Kuva 10. Kaksistasoinen kaksimuuttujatestin tulokset geometrisesti ja koematriisi

Yhden tekijän vaikutukset (A, B) vasteeseen (y), joita usein kutsutaan päävaikutuksiksi, voidaan laskea kaavoilla

$$A = \bar{y}_{A^+} - \bar{y}_{A^-} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{ab + a}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + a - b - (1)] \end{aligned}$$

$$B = \bar{y}_{B^+} - \bar{y}_{B^-} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{ab + b}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} \\ &= \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \end{aligned}$$

joissa n on replikaatioiden määrä kokeessa. Näissä tarkasteltavan tekijän korkean tason vasteiden keskiarvosta \bar{y}_+ vähennetään matalan tason keskiarvo \bar{y}_- .

Tekijöiden yhteisvaikutus (AB) vasteeseen saadaan laskemalla keskimääräinen erotus tekijän A:n vaikutuksesta vasteeseen, kun tekijä B on korkealla ja kun B on matalalla. Toisin sanoen,

$$AB = \frac{ab - b}{2n} + \frac{a - (1)}{2n} \quad (24)$$

$$= \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b]$$

Tuloksia tarkastellessa on hyvä ottaa huomioon niiden suuruus ja etumerkki. Suuruuksia vertaamalla pystyy näkemään suoraan tekijöiden suhteellisen vaikutuksen, ja etumerkki kertoo vähentääkö vai kasvattaaako tekijä mitattavaa vastesuuretta.

Seuraava vaihe tulosten analyysissä on varianssin arviointi ANOVA. Tämä alkaa käyttämällä niin sanottua kontrastia, eli kaavoissa (22), (23) ja (24) sulkujen sisällä olevaa osiota. Kontrastia sanotaan yleensä tekijän kokonaisvaikutukseksi. (Montgomery, 2017: 233.) Kahden muuttujan kaksitasoiset kontrastit ovat

$$\textit{kontrasti}_A = ab + a - b - (1) \quad (25)$$

$$\textit{kontrasti}_B = ab + b - a - (1) \quad (26)$$

$$\textit{kontrasti}_{AB} = ab + (1) - a - b \quad (27)$$

Kontrasti voidaan myös ilmoittaa yleisessä muodossa mille tahansa tekijämäärälle kaavalla

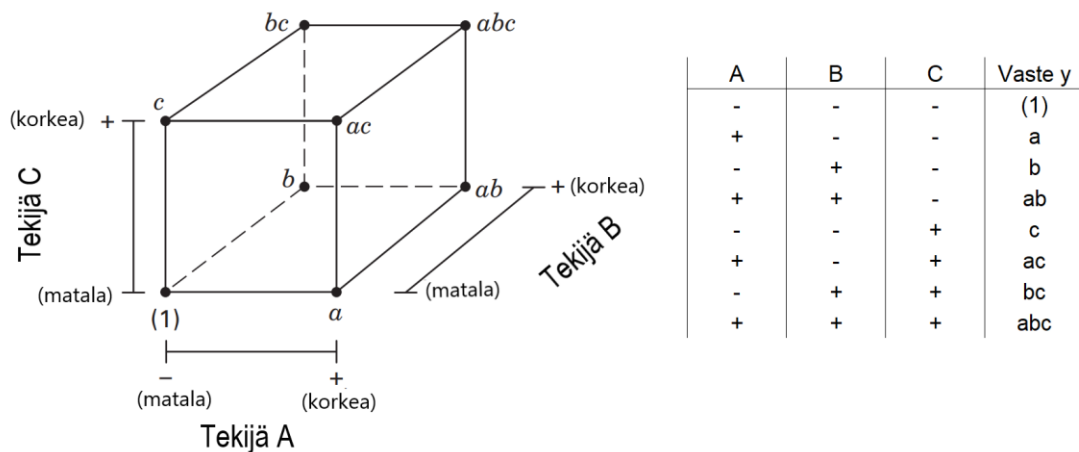
$$\text{kontrasti}_{AB\dots K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1) \quad (28)$$

jossa sulkujen sisäinen etumerkki on negatiivinen, jos se sisältää saman kirjaimen kuin vasemmanpuoleinen tekijä tai tekijät, ja muuten positiivinen. Lopullisessa sievennetyessä kaavassa numero 1 korvataan vasteella (1) sekaannusten välttämiseksi. Esimerkiksi 2^3 faktorikokeessa eräs kontrasti voisi olla seuraavanlainen (Montgomery, 2017: 254.):

$$\text{kontrasti}_{AB} = (a - 1)(b - 1)(c + 1) \quad (29)$$

$$= abc + ab + c + (1) - ac - bc - a - b$$

jonka muuttujat ovat selitettynä kuvassa 11, jossa näkyy 2^3 faktorikoe geometrisesti kuvattuna koematriisin kanssa.



Kuva 11. kolmen muuttujan kaksitasoinen (2^3) faktorikoe geometrisesti ja koematriisi (Mukaillen Montgomery, 2017: 240)

Kun palataan takaisin kahden tekijän 2^2 faktorikokeeseen, kontrastia käytetään laskettaessa vaikutusten keskiarvon neliösummia (SS). Niiden laskemisessa käytetään kaavoja

$$SS_A = \frac{(\text{kontrasti}_A)^2}{4n} \quad (30)$$

$$SS_B = \frac{(\textit{kontrasti}_B)^2}{4n} \quad (31)$$

$$SS_{AB} = \frac{(\textit{kontrasti}_{AB})^2}{4n} \quad (32)$$

Kaava on yleisessä muodossaan kokeille, jossa tekijöillä on kaksi tasoa

$$SS_{AB\dots K} = \frac{1}{n2^k} (\textit{kontrasti}_{AB\dots K})^2 \quad (33)$$

jossa n on replikaatioiden, ja k tekijöiden määrä.

Kokonaisneliösumma, joka kuvaa tulosten kokonaisvarianssia, lasketaan kaavalla

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{y})^2 \quad (34)$$

jossa a on tekijän A tasomäärä, b tekijän B tasomäärä, n replikaatioiden määrä, \bar{y} kaikkien tulosten keskiarvo.

Lopuksi lasketaan jäännöseliösumma kaavalla

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (35)$$

Kustakin neliösummasta otetaan keskineliöt (mean square), eli jaetaan ne niiden vapausteiden lukumäärillä. Kullekin tekijälle lasketaan F_0 arvo ja tiedot kerätään ANOVA-taulukkoon, taulukon 5 mukaisesti. Jokaisen tekijän kohdalla katsotaan sille taulukosta $F_\alpha(v_1, v_2)$, jossa v_1 on sen vapausaste, v_2 virheen vapausaste ja α koko kokeen merkittävyys. Tuloksissa saatua F_0 verrataan taulukosta saatuun F_α -arvoon. Jos Tekijän F_0 on suurempi kuin sen F_α , voidaan vaikutuksen sanoa olevan tilastollisesti merkittävä.

Taulukko 5. Kahden tekijän ANOVA-taulukko

Varianssin lähde	Neliösummat	Vapausasteet	Keskineliöt	F_0	p
Tekijä A	SS_A	$a-1$	$MS_A = \frac{SS_A}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$	p_a
Tekijä B	SS_B	$b-1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$	p_b
AB vuorovaikutus	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$	p_{ab}
Virhe	SS_E	$ab(n-1)$	$MS_E = \frac{SS_E}{ab(n-1)}$		
Kokonais	SS_T	$abn-1$			

Havainnolistamaan asiaa käytännössä voidaan käyttää Montgomeryn tarjoamaa esimerkkiä 2^3 faktorisuunnitelmasta kahdella replikaatiolla (Montgomery, 2017: 243-244). Esimerkissä testattiin plasmaetsauksessa elektrodien välin, kaasuvirtauksen, ja sähkövirran vaikutusta silikoninitraatin etsausnopeuteen. Tulokset näkyvät koottuna taulukossa 6.

Taulukko 6. Esimerkki 2^3 faktorisuunnitelmasta ja sen tuloksista (Mukaillen Montgomery, 2017: 243)

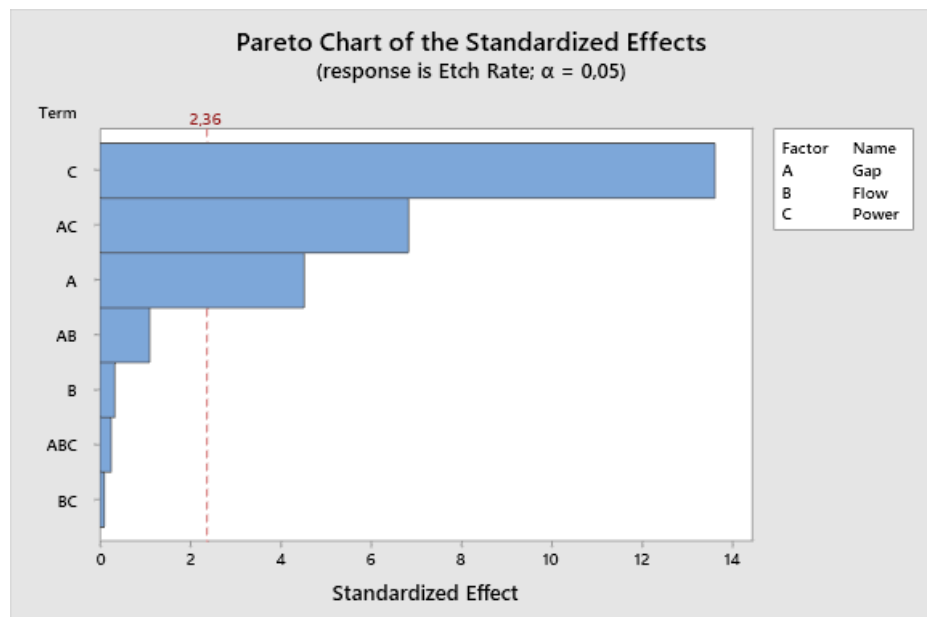
Tekijät			Etsausnopeus (Å/min)		Tekijöiden tasot			Arvio vaikutuksesta	
A (Väli)	B (Kaasuvirtaus)	C (Virta)	Replikaatio 1	Replikaatio 2	Matala (-1)	Korkea (+1)	Tekijä	Vaikutus	
-1	-1	-1	550	604	A (cm)	0,80	1,20	A	-101,625
1	-1	-1	669	650	B (SCCM)	125	200	B	7,375
-1	1	-1	633	601	C (W)	275	325	C	306,125
1	1	-1	642	635				AB	-24,875
-1	-1	1	1037	1052				AC	-153,625
1	-1	1	749	868				BC	-2,125
-1	1	1	1075	1063				ABC	5,625
1	1	1	729	860					

Tuloksista laskettiin ANOVA-taulukko 7.

Taulukko 7. Esimerkki kokeen tuloksista kerätystä ANOVA-taulukosta (mukailien Montgomery, 2017: 245)

Varianssin lähde	Neliösummat	Vapausasteet	Keskineliöt	F_0	p
Väli (A)	41 310,56	1	41 310,56	18,34	0,0027
Kaasuvirtaus (B)	217,56	1	217,56	0,10	0,7639
Virta (C)	374 850,06	1	374 850,06	166,41	0,0001
AB	2 475,06	1	2 475,06	1,10	0,3252
AC	94 402,56	1	94 402,56	41,91	0,0002
BC	18,06	1	18,06	0,01	0,9308
ABC	126,56	1	126,56	0,06	0,8186
Virhe	18 020,50	8	2 252,56		
Yhteensä	531 420,94	15			

Jos esimerkin kokeelle olisi asetettu merkittävyys α tasolle 0.05, saadaan taulukosta arvo $F_{0,05}(1,8)$, joka on 5,32. Taulukosta nähdään, että tekijät A ja C, sekä vuorovaikutus AC ylittävät tämän arvon, eli ovat tilastollisesti merkittäviä. Myös niiden p-arvot ovat hyvin pieniä, joka lisää uskottavuutta. Vaikutusten suuntaa ja suuruusluokkaa toisiinsa nähden voidaan arvioida vaikutusten kontrasteista. Ohjelmistoja käytettäessä annetaan tuloksissa usein myös pareto-diagrammi, jollainen näkyy Minitab-ohjelmiston tuottamana kuvassa 12.



Kuva 12. Minitab-ohjelmiston tuottama Pareto-diagrammi

Diagrammista näkee selkeästi, mitkä tekijät vaikuttavat vasteeseen ja millä suuruussuhteilla. Diagrammin punaisen viivan ylittävät tekijät ovat tilastollisesti merkittäviä, kun α on 0.05.

Tuloksista voidaan rakentaa regressiomalli, joka auttaa havainnollistamaan tekijöiden riippuvuutta ja vastepintoja rakentaessa. Malliin otetaan regressoreiksi ja parametreiksi vain vaikuttavia tekijöitä (A, C, AC) vastaavat x_1 , x_3 , β_1 , β_3 , β_{13} , eli kaava tulee muotoon

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_3 x_3 + \beta_{13} x_1 x_3 \quad (36)$$

jossa β_0 on kaikkien replikaatioiden keskiarvo, eli tässä tapauksessa 776,063. Muiden parametrien β arvot saadaan taulukon 6 tekijöiden vaikutuksista, jotka jaetaan kahdella. Eli regression kaavaksi saadaan

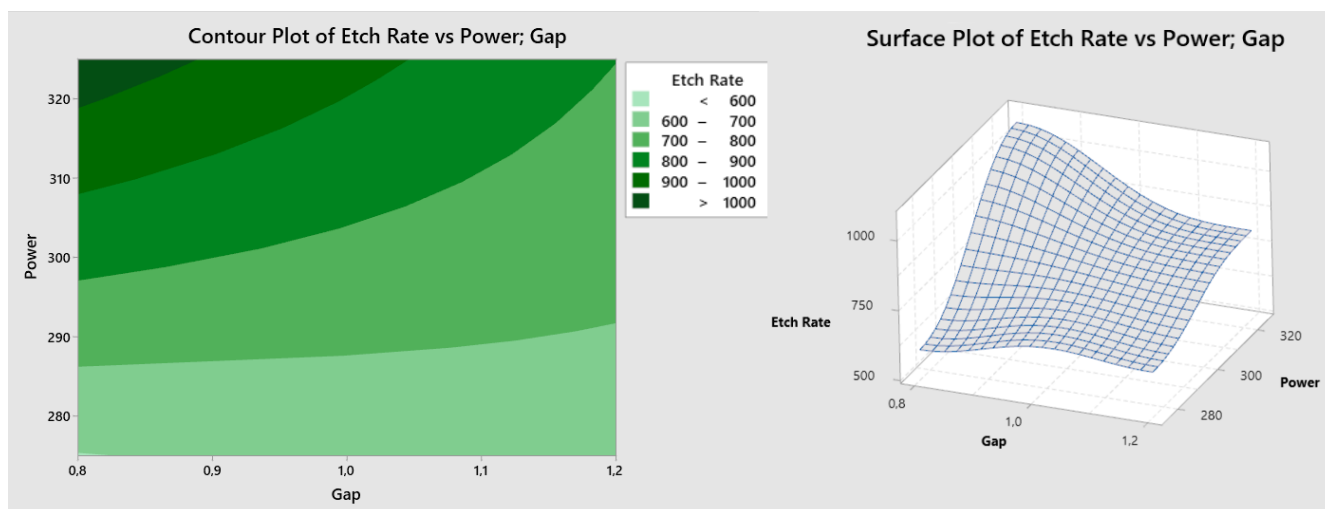
$$\begin{aligned} \hat{y} &= 776,063 + \frac{A}{2} x_1 + \frac{C}{2} x_3 + \frac{AC}{2} x_1 x_3 \quad (37) \\ &= 776,063 + \frac{-101,625}{2} x_1 + \frac{306,125}{2} x_3 + \frac{-153,625}{2} x_1 x_3 \\ &= 776,063 - 50,8125 x_1 + 153,0625 x_3 - 76,8125 x_1 x_3 \end{aligned}$$

Mallin R^2 saadaan laskettua neliösummista, jotka saa suoraan ANOVA-taulukosta 7, kaavoilla

$$SS_{MALLI} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} = 513\,400,44 \quad (38)$$

$$R^2 = \frac{SS_{MALLI}}{SS_T} = \frac{513400,4}{531420,94} = 0,9661 \quad (39)$$

Regressiomallia voidaan käyttää vastepinnan ja korkeuskäyrän piirtämisessä, kuten kuvassa 13 näkyy.



Kuva 13. Esimerkin korkeuskäyrä ja vastepinta

Vastepintaa voidaan käyttää tekijöiden optimaalisten arvojen säätämiseen, jotta päästään haluttuun vasteeseen. Kun optimointiin käytetään vastepintaa, parhaaseen tulokseen pääsy vaatii erityisen vastepintasuunnitelman käyttöä, joka eroaa faktorisuunnitelmasta.

3.3.2 Osittainen faktorisuunnitelma, Fractional Factorial Design

Osittaista faktorisuunnitelmaa käytetään erityisesti tekijöiden seulonnassa. Prosessissa saattaa olla hyvin suuri määrä tekijöitä, ja halutaan saada tietää mitkä niistä vaikuttavat vasteeseen. Sen käyttö saattaa siis säästää paljon aikaa ja rahaa verrattuna täyteen faktorikokeeseen.

Osittaisen faktorisuunnitelman keskiössä on oletus vasteiden harvalukuisuudesta (effect sparsity). Se olettaa, että vain pieni osa tekijöistä vaikuttaa vasteeseen, ja että vain murto-osa korkeamman asteen vuorovaikutuksista ovat huomattavia. Eräissä 113 tutkimuksen meta-analysissä todettiin, että kokonaisuudessaan aktiivisten päävaikutusten määrä oli noin 41 %, kahden tekijän vuorovaikutusten määrä noin 11 %, ja sitä korkeamman asteen vuorovaikutukset äärimmäisen harvinaisia. (Montgomery, 2017: 332)

Osittaista faktorisuunnitelmaa valmistellessa on hyvä ottaa huomioon haluttava tulosten resoluutio. Resoluutio kertoo miten selvästi päämuuttujien ja niiden yhdistelmien vaikutukset erottuvat analyysissä, ilmiötä kutsutaan myös laskostumiseksi. Resoluutiot merkitään yleensä roomalaisilla numeraaleilla. Koesuunnittelussa useimmiten käytetyt tasot ovat III, IV ja V. (Davim, 2016: 13-14.) Taulukossa 8 näkyy resoluutiotasot selitysten kanssa.

Taulukko 8. Resoluutiotasot ja niiden selitteet (Mukaiillen Davim, 2016: 14)

Resoluutio- taso	Selite
II	Päävaikutukset sekoittuvat toisiinsa. ($\beta_1+\beta_2$)
III	Voi arvioida päävaikutuksia, mutta ne saattavat sekoittuvat kahden muuttujan vuorovaikutuksiin. ($\beta_1+\beta_{23}$)
IV	Voi arvioida päävaikutuksia ilman häiriötä kahden muuttujan vuorovaikutuksista, mutta sekoittuvat kolmen muuttujan yhteisvaikutukseen. ($\beta_1+\beta_{234}$) Kahden muuttujan vuorovaikutukset sekoittuvat toisiinsa. ($\beta_{12}+\beta_{34}$)
V	Voi arvioida päävaikutuksia sekoittumatta kolmen tai vähemmän muuttujan yhteisvaikutuksiin. Kahden muuttujan yhteisvaikutukset sekoittuvat korkeamman asteen yhteisvaikutuksiin. ($\beta_{12}+\beta_{345}$)

Taulukkoon 9 kerättyinä kaksitasoisen faktorikokeen mahdollisia resoluutioita.

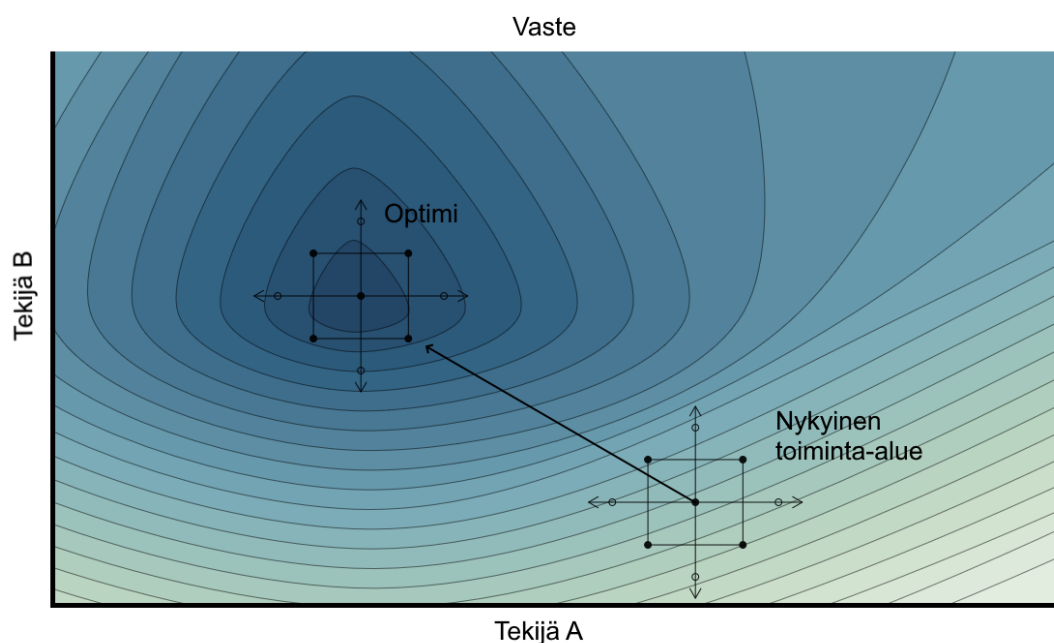
Taulukko 9. Kaksitasoisen kokeen resoluutiotasoja. (Mukaiillen Minitab, 2019)

Koesarjan suuruus	Tekijöitä									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
4	Täysi	III								
8		Täysi	IV	III	III	III				
16			Täysi	V	IV	IV	IV	III	III	
32				Täysi	VI	V	IV	IV	IV	
64					Täysi	VII	V	IV	IV	
128						Täysi	VIII	VI	V	

Pelkästään päävaikutuksia arvioitaessa, eli resoluutiotasolla III, voidaan siis pienentää koesarjassa tarvittavien suoritteiden määrää suuresti.

3.3.3 Vastepinta, Response Surface

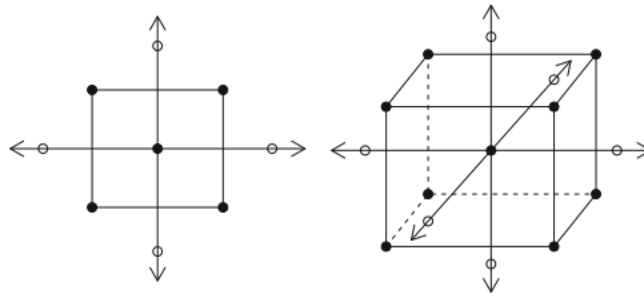
Vastepintamenetelmää käytetään erityisesti, kun halutaan optimoida vaste muuttamalla siihen vaikuttavia tekijöitä. Periaate on havainnollistettu kuvassa 14. Menetelmää voidaan käyttää esimerkiksi tuotteen määrän maksimointiin jalostusprosessissa nesteiden lämpötilaa ja aikaa säätämällä.



Kuva 14. Vastepinnan käyttö prosessin optimoinnissa

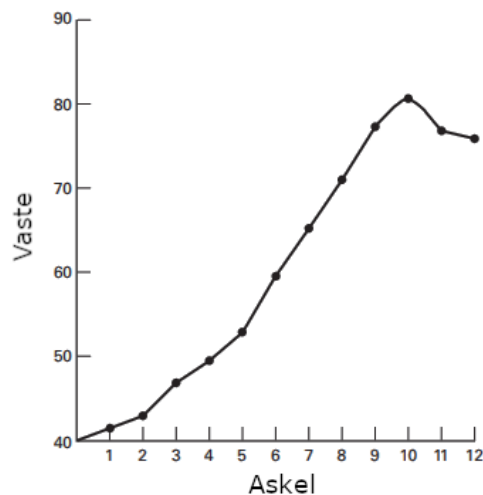
Yleinen metodi optimoinnissa on käyttää niin sanottua jyrkimmän kasvun tai laskun menetelmää. Eli kun ensin tiedetään vasteeseen vaikuttavat tekijät, otetaan niistä kuvan 15

tapaisessa kuviossa nykyisellä toiminta-alueella arvot. Kahdella tekijällä otoksia tarvitaan vähintään 9. Määrä eroaa siis faktorikokeesta, sillä tarkoituksena on saada tarkka regressiomalli.



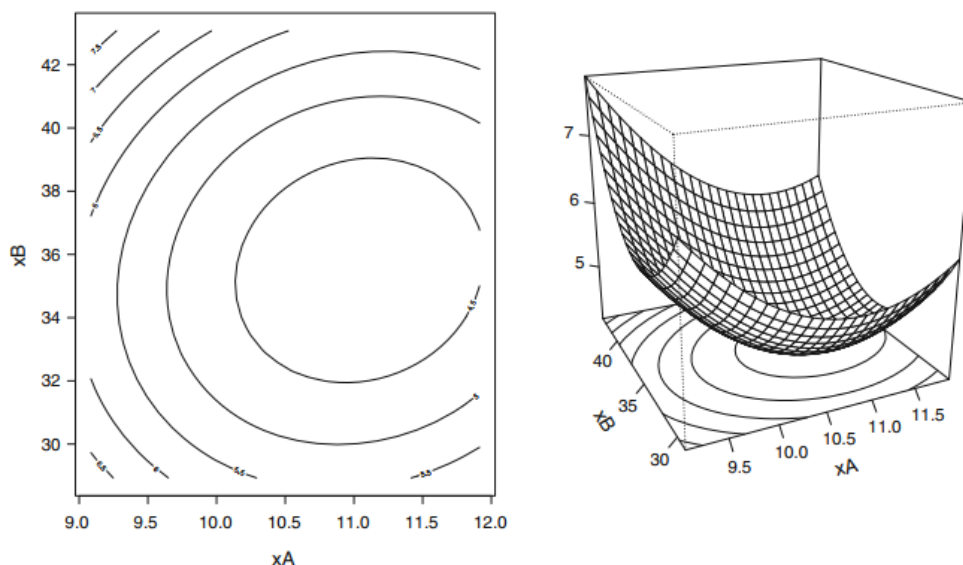
Kuva 15. Muuttujien arvot geometrisesti. Vasemmalla kahdella muuttujalla, oikealla kolmella. (Dean, et al., 2017: 579)

Kun ensimmäinen vaihe on tehty, lasketaan tuloksista regressiomalli, jonka avulla saadaan jyrkimmän kasvun tai laskun vektori eli gradientti. Gradienttia seurataan ja kokeita toistetaan tietyn matkan välein sitä pitkin kuvan 16 tapaan, kunnes maksimi- tai minimivaste on saavutettu.



Kuva 16. Koe suoritetaan askel kerrallaan gradienttia pitkin (Mukaiillen Montgomery, 2017: 495)

Kun huippu on saavutettu, tehdään toinen koe samalla kuviolla ja tuloksista rakennetaan toisen asteen regressiomalli. Mallista saadaan laskettua paikallinen huippupiste, joka kertoo tekijöiden optimaaliset arvot. Kuvassa 17 näkyy erään toisen asteen mallin korkeuskäyrä ja vastepinta.



Kuva 17. Erään toisen asteen mallin korkeuskäyrä ja vastepinta (Dean, et al., 2017: 580)

Jos kuitenkin jo ensimmäisen vaiheen aikana ollaan lähellä optimia, ei gradienttimenetelmää tai toista kuviota tarvitse tehdä, vaan voidaan suoraan käyttää toisen asteen regressiomallia optimiarvojen löytämiseksi.

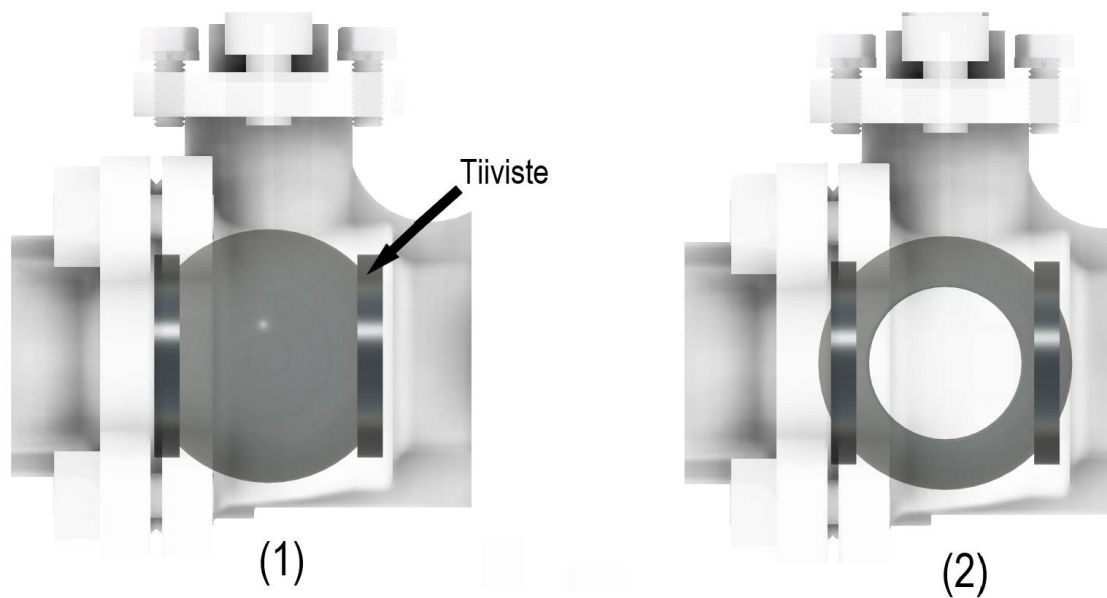
4 Palloventtiili, tiivisteet, ja valmistus

Neles valmistaa monenlaisia venttiilikokonaisuuksia, kuten pallo-, läppä-, istukka-, segmentti-, sekä kiertoistukkaventtiileitä. Projektissa kuitenkin keskityttiin Neleksen XA-sarjaiseen palloventtiiliin. Tässä osiossa käydään läpi palloventtiilin toimintaperiaate, sen käyttökohteet, millaisia Neles tuottaa, ja mitä materiaaleja niissä käytetään.

Lisäksi tarkastellaan itse tutkimuskohteena olevan tiivisteiden rakenne, miten se valmistetaan, sekä millaisia muita tiivisteitä XA-sarjassa käytetään.

4.1 Palloventtiili

Palloventtiili on nimensä mukaan venttiili, jonka sisällä olevan pallon läpi kulkee yksi reikä, eli virtausaukko. Palloa kääntämällä virtaava neste- tai kaasuvirta voidaan katkaista. Kun palloa käännetään 90 astetta, on venttiili suljetussa asennossa, joka näkyy kuvassa 18 havainnollistettuna. Venttiiliä voidaan ohjata käsikäyttöisesti, pneumaattisesti tai sähköisesti.



Kuva 18. Palloventtiili auki (1) ja suljettu (2)

Neleksen venttiilit on tarkoitettu teollisuuden raskaaseen käyttöön. Se on käytössä muiden valmistajien tekemänä yksinkertaisen rakenteensa vuoksi myös monessa muussa-

kin ympäristöissä, kuten esimerkiksi kotitalouksissa ja kaupallisissa toimitiloissa. Kuvassa 19 näkyy eräs Ferron valmistama juoma- ja käyttövedelle tarkoitettu 16 baarin ja 100°C kestävä käsikäyttöinen venttiili, jossa kromattu pallo ja muoviset tiivisteet.



Kuva 19. Pieni käsikäyttöinen palloventtiili (Ferro S.A., 2021)

Itse pallo voi olla niin sanotusti vapaasti kelluva, joka on muodoltaan pyöreä, kuten kuvan 18 ja 19 esimerkit. Vapaasti kelluvassa palloventtiilissä sen ollessa suljettuna eri puolien paine-ero auttaa painamaan pallon tehokkaasti tiivisterenkaaseen, parantaen tiivyyttä. Usein vapaasti kelluvaa versiota käytetään pienemmissä venttiileissä. Suuremmissa käytetään usein malleja, joissa on ala- ja yläosassa uloke, johon asennetaan tukilaakerit. Niissä on usein jousikuormitetut tiivisteet, jotta saadaan hyvä kontakti. On myös malleja, joissa on niin sanottu varsipallo, eli akseli ja pallo on integroitu toisiinsa yhdeksi kappaleeksi.

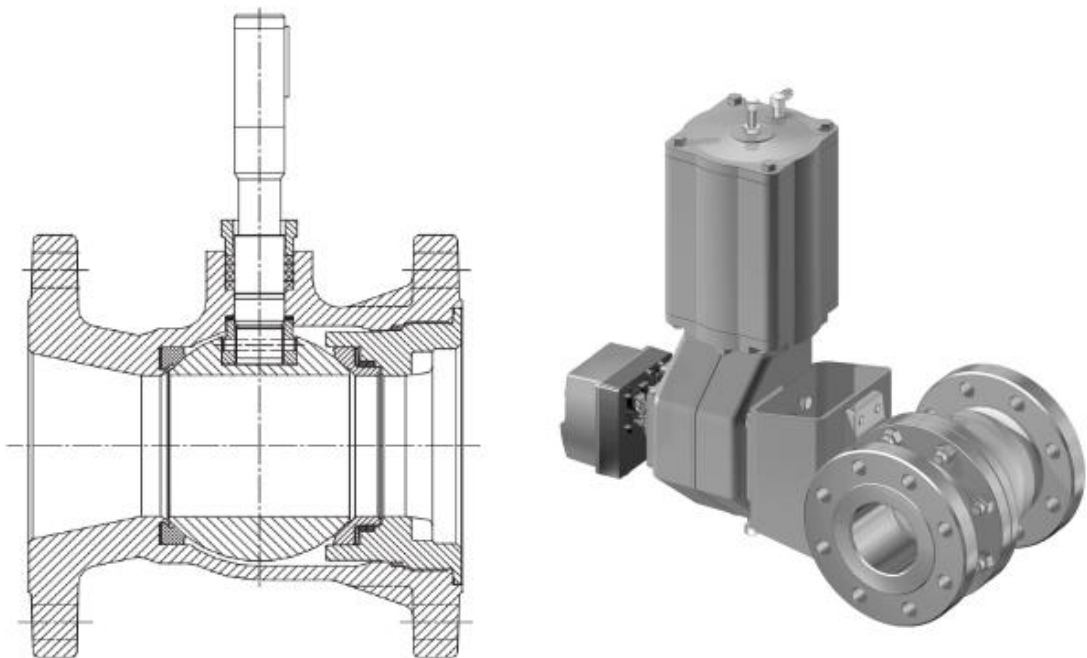
Yleisesti teollisuuteen valmistetut palloventtiilit pystyvät toimimaan -30°C ja 230°C lämpötilojen välissä korkeintaan 50 baarin paineessa. Erikoisvalmisteisena ne kykenevät toimimaan jopa 1000 baarin paine-erolla laajemmalla lämpötila-alueella. Rajoittava tekijä on usein tiivisteessä käytetyt materiaalit, koska esimerkiksi muoviset o-renkaat eivät kestä hyvin ääriämpötiloja. Liian kylmässä muovista tulee haurasta, ja liian kuumassa se sulaa. Ääriolosuhteissa käytetään usein siis täysin metallisia tai keraamisia osia.

Venttiilien koot ilmoitetaan yleensä niiden virtausaukon suuruuden mukaan, eli 4 tuumainen venttiili tarkoittaa sitä, että virtausaukon halkaisija on 4 tuumaa. Suurimmat Neleksen valmistavat palloventtiilit ovat virtausaukoltaan 36 tuumaisia, ja niiden ulkorunko on yli 1.5 metriä halkaisijaltaan.

Yleisin valmistusmateriaali Neleksen palloille on haponkestävä austeniittinen teräs CF8M. Muita usein käytettyjä materiaaleja ovat käyttötarkoituksen mukaan titaani, nikkeli-kromi-pohjainen Inconel, sekä monet muut metalliseokset. Pallo pinnoitetaan tarpeen mukaan kulutuskestävyyden takaamiseksi kromi- tai volframpohjaisilla yhdisteillä.

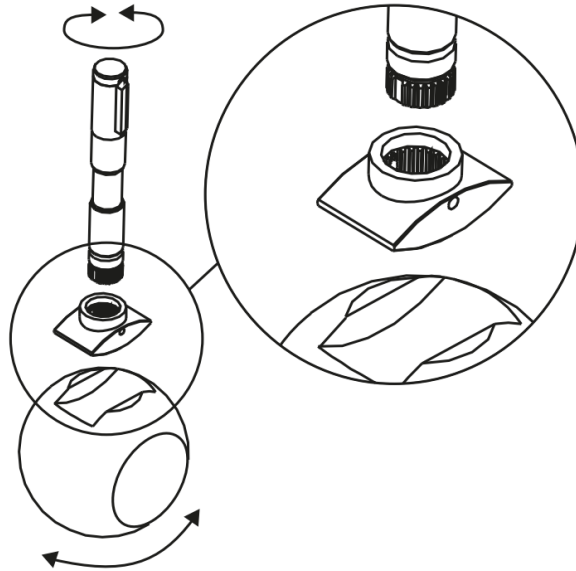
4.2 XA-sarjan venttiili

Projektissa tutkitaan Neleksen valmistamien XA-sarjan venttiilin tiivisteitä. Niitä valmistetaan 1 tuumaisesta 8 tuumaiseen asti. Venttiilin rungon ulkohalkaisija, ottamatta huomioon aktuaattoreita, akselia, tai muuta yläosaa, on 1 tuumaisessa 110 millimetriä ja 8 tuumaisessa 462 millimetriä. Niiden painot ovat 6 ja 255 kilogrammaa annetussa järjestyksessä. Kuvassa 20 näkyy XA-sarjan venttiilin profiili ja valmis venttiili, jossa aktuaattori asennettuna.



Kuva 20. Neleksen XA-sarjan venttiili. Oikeanpuoleisessa aktuaattori asennettuna. (Neles Oy, 2020.)

Venttiilien sisältämät pallot ovat vapaasti kelluvia, ja kuvassa 21 näkyy, miten kääntävä akseli liittyy lisäosan kautta palloon. Tämä suunnitteluratkaisu mahdollistaa suuremman akselin liitoskohdan käytön, joka parantaa vääntömomentin siirtoa ja kulutuksen kestoa, sekä minimoi mekaanisen takaisiniskun käytön aikana.



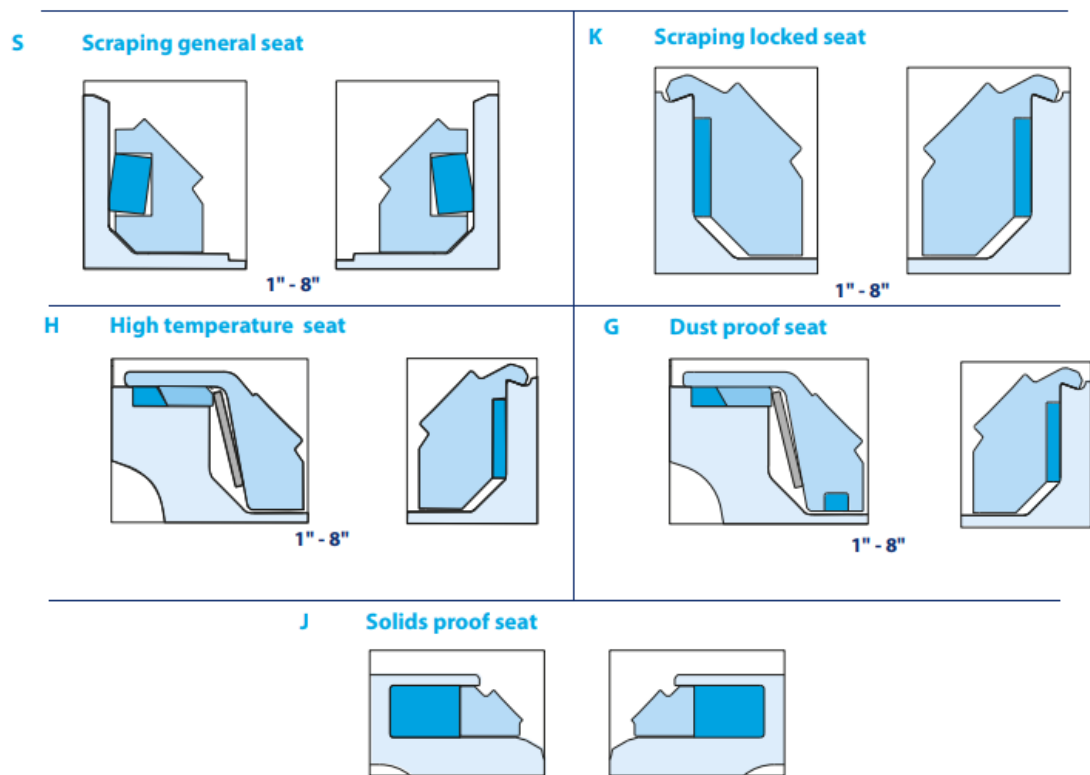
Kuva 21. XA-sarjan palloventtiin kääntävän akselin kiinnitys palloon (Neles Oy, 2020)

XA-sarjan venttiin toimintaympäristön rajat ovat äärimmillään tietyillä tiivisteillä - 200...+600°C paineluokissa ASME 150 ja 300 (Neles Oy, 2020) .

Projektin XA-sarjan venttiin pallossa käytetään haponkestävää terästä ja pinnoitteena kovakromia. Vastaavasti tiiviste valmistetaan haponkestävästä 1.4408 (ASTM CF8M) teräksestä ja tiivistepintaan hitsataan stelliittikerros tiivistävälle alueelle. (Neles Oy, 2020.)

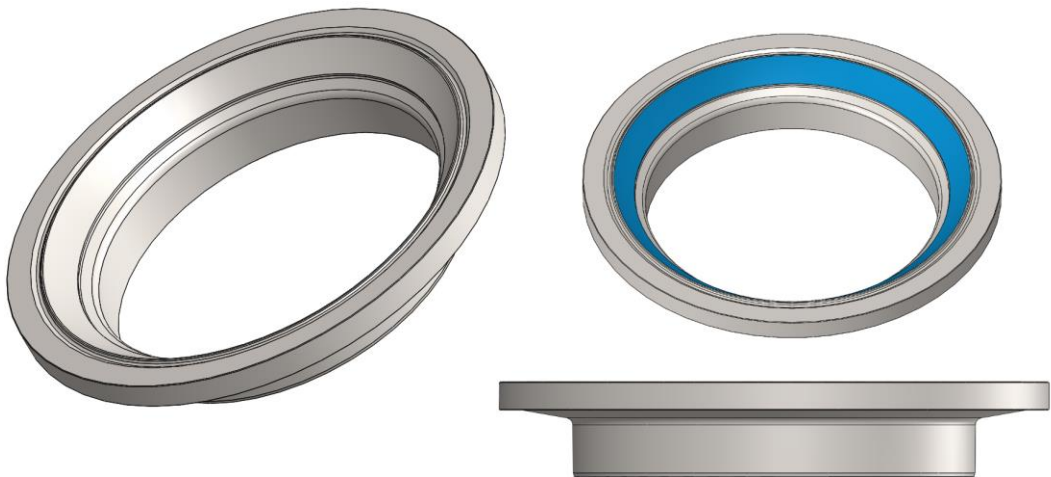
4.3 Tiiviste

Palloventtiilissä tiivisteeksi sanotaan rengasmaista osaa, jota vasten pallopinta painautuu, luoden tiiviin alueen. Tiivisteitä on kummallakin puolen palloa, ja sen materiaalit ja rakenne riippuvat venttiilin toimintaympäristön vaatimuksista. Kuvassa 22 näkyy erilaisia XA-sarjan venttiilissä käytettäviä tiivisteitä.



Kuva 22. Erilaisia XA-sarjan venttiileissä käytettäviä tiivisteitä (Neles Oy, 2020)

Projektin koesarjassa valmistettiin metallisia 4 tuuman H-mallin tiivisteitä. Sen rakenne ja palloa vasten osuva tiivistepinta näkyy kuvassa 23, jossa tiivistepinta on korostettuna sinisellä.



Kuva 23. Kokeessa valmistettava tiivistemalli. Tiivistepinta korostettuna sinisellä.

Tiivisteen aihio tulee valmiiksi leikattuna alihankkijalta tai se voidaan leikata pidemmästä putkiaihiosta materiaalin ja varastotilanteen mukaan.

Tiiviste valmistetaan kolmessa päävaiheessa. Ensimmäiseksi aihion tiivistepinnalle plas-mahitsataan haluttu pintamateriaali CNC-hitsauskoneella. Kuvassa 24 näkyy hitsattu aihio. Tämän jälkeen siihen sorvataan kahdessa vaiheessa kaikki piirteet ja geometria. Lopuksi tiivistepinta hiotaan ja lopullinen pinta saavutetaan. Tämän jälkeen tiiviste siirtyy odottamaan kokoonpanoa, tai tämän työn tapauksessa mittausta.



Kuva 24. Hitsattu aihio

5 Projektin koesuunnittelun toteutus

Projektin päätavoitteena oli saada tietää mitkä tekijät valmistusprosessissa vaikuttavat tiivistepinnan laatuun, eli ympyrämaisyyteen, pinnanlaatuun, keskitysvirheeseen, sekä säteeseen, ja kuinka paljon. Kokeen voidaan siis sanoa olevan seulontakoe. Prosessin toiminnasta oli kuitenkin hyvin paljon tietämystä, joten suunnittelutekijöiden määrä saatiin rajattua kolmeen.

Ennen projektia kiinan tehtaalla tuotettiin koesarja tiivisteitä, joiden tuotantotietojen perusteella valittiin suunnittelutekijät tälle projektille.

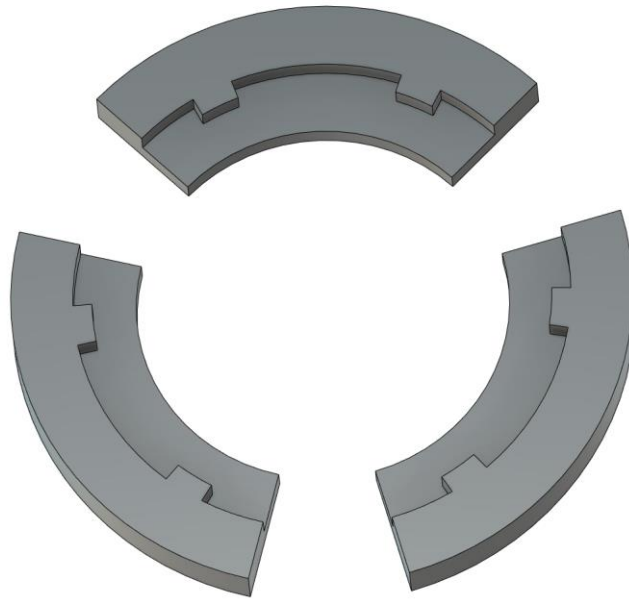
Projektiin oli varattu yhteensä 16 kappaletta aihioita, ja kokeet oli päätetty jakaa kahteen 8 kappaleen sarjaan. Ensimmäisen sarjan tulosten perusteella tehtiin päätös seuraavan sisällöstä. Erilaisten viivästysten ja aikarajoitusten takia tähän työhön päätettiin sisällyttää vain ensimmäinen sarja, ja toinen sarja päätettiin toteuttaa muilla resursseilla.

5.1 Koesarja

Ensimmäiseen koesarjaan valitut kolme suunnittelutekijää olivat tiivistepinnan viimeistelysorvauksen nopeus V_c , sorvauksessa käytetty sektorileukojen laatu, sekä sorvauksessa kappaleen kiinnitykseen käytetty puristusvoima. Koesarjan muuttujat ja tekijät näkyvät koottuna taulukossa 10.

Sektorileuoilla tarkoitetaan kuvassa 25 esitettyä kolmiosaista kiinnitinkokonaisuutta, joka pitää kappaleen kiinni sorvissa koneistuksen aikana. Leuoissa on normaalisti 60 asteen välein kiinnityspiste aihion halkaisijalla. Koesarjaa varten valmistettiin kaksi erilaista leukaa. Toinen oli tarkasti valmistettu vaatimusten mukaan, kun taas toiseen olivat kiinnityspisteiden jakauma ja niiden säde keskipisteestä väärin. Huonojen leukojen arvioitiin

aiheuttavan kiinnitysvoiman jakautumista epätasaisesti kappaleeseen koneistuksen aikana, aiheuttaen heittoa tiivistepinnan ympyrämäisyydessä. Leukoja vaihdeltiin vain ensimmäisessä vaiheessa ja toisen vaiheen leuat pidettiin samoina.



Kuva 25. Sektorileukojen periaatekuva

Sorvauksen aikana kappaletta pidetään kiinni painamalla sektorileukoja hydraulisesti kappaletta vasten. Tämä puristusvoima ilmoitetaan baareissa. Liiallisen puristusvoiman arvioitiin vaikuttavan kappaleen muotoon, joten se valittiin yhdeksi tutkittavaksi tekijäksi.

Tiivistepinnan viimeistelysorvaus tuottaa sen lopullisen muodon ennen hiontaa, joten haluttiin tietää, onko sorvausnopeuden muutoksella vaikutusta vasteisiin.

Kaikille muuttujille valittiin kaksi arvoa, korkea ja matala. Näin saatiin toteutettua täysi 2^3 faktorisuunnitelma (full factorial design), eli kaikki mahdolliset kombinaatiot. Tämän ansiosta voitiin analysoida yksittäisten tekijöiden vaikutuksia, sekä niiden yhteisvaikutuksia vastemuuttujiin.

Kiinteitä tekijöitä, jotka pidetään samoina koko koesarjalle, olivat plasmahitsauksen sekä viimeistelyhionnan parametrit. Plasmahitsauksen aikana kappale kuitenkin lämpenee huomattavasti, ja siitä aiheutuu sisäisiä voimia kappaleeseen, jotka voivat vapautua

myöhemmin ja aiheuttaa pieniä muodonmuutoksia. Voimien suuruutta on kuitenkin todella vaikeaa mitata suoraan. Ainoa indikaatio niistä arvioitiin olevan hitsatun aihion kiinnitysmitta, eli ulkohalkaisija. Tämä on myös kokeen ainoa kovariaatti.

Kaikki kokeen parametrit arvot kirjattiin ylös koneistuksen aikana myöhempiä analyysejä varten.

Taulukko 10. Koesarjan tiedot

		Taso 1	Taso 2
Suunnittelu- tekijät	Viimeistelysorvaus- nopeus (Vc)	120	180
	Sorvaus, Puristusvoima (bar)	6	10
	Sorvaus, V1 Leuat	Huono	Tarkka
Kiinteät tekijät	Plasmahitsaus parametrit		
	Loppuhionnan parametrit		
Kovariaatti	Hitsatun aihion kiinnityshalkaisija		
Vastemuuttujat	Tiivistepinnan ympyrämäisyys		
	Tiivistepinnan pinnankarheus		
	Tiivistepinnan säde		
	Tiivistepinnan keskitysvirhe		

Arvojen päättämisen jälkeen luotiin Minitab-ohjelmistoon ”full factorial” -projekti koesarjaa varten ja se arpoi satunnaisen valmistusjärjestyksen kappaleille, joka näkyy taulukossa 11.

Taulukko 11. Ensimmäisen koesarjan valmistusjärjestys

Järjestys	Viimeistelysorvaus nopeus (Vc)	Sorvaus, Leuat	Sorvaus puristusvoima (bar)
1	180	Huono	6
2	180	Huono	10
3	120	Huono	6
4	120	Tarkka	10
5	120	Huono	10
6	120	Tarkka	6
7	180	Tarkka	6
8	180	Tarkka	10

5.2 Tulokset

Koesarjaa valmistettaessa seitsemännen kappaleen toisen vaiheen rouhinnan aikana sorvin terä hajosi, ja kappale pääsi liikahtamaan leuoissa tärähdyksen voimasta. Tämän johdosta sen tulokset jätettiin huomioimatta analyyseissa.

Pinnoitteen kovuus mitattiin ennen ja jälkeen hiontaa, jotta plasmahitsauksen tuloksia voitaisiin verrata kiinan laserhitsaukseen. Kaikki arvot ylittivät keskiarvoltaan pinnoitteelle asetetun minimikovuuden.

Hitsattujen aihoiden kiinnityshalkaisijoiden keskiarvojen vaihtelu oli 0,085 millimetrin sisällä toisistaan.

Minitab-ohjelmistolla tehdyn analyysin perusteella voidaan sanoa, että millään suunnittelutekijöillä ei ole mitään tilastollisesti merkittäviä vaikutuksia vastemuuttujiin, kun α on 0,05. Liitteeseen 1 on koottu kaikkien muuttujien pareto-diagrammit, joista näkyy, ettei mikään vaikutus ylitä merkittävyyden rajaa.

Yksityiskohtaisia tuloksia, mittausarvoja, ja toleranssialueita ei käydä tässä osiossa läpi luottamuksellisuussyistä.

Kaikki tulokset lukuun ottamatta kolmea säteen arvoa olivat annettujen suunnittelutoleranssien sisällä. Niistä yksi oli seitsemäs kappale, jonka arvot voidaan olettaa johtuvan osittain rikkoutuneesta terästä.

6 Yhteenveto

Projektissa oli kyseessä koesuunnittelua käyttäen toteutettu seulontakoe kahdeksalla kappaleella. Siinä selvitettiin tiivistepinnan viimeistelysorvausnopeuden, sorvauksen puristusvoiman, ja leukojen tarkkuuden vaikutusta Neleksen 4 tuumaisen X-sarjan palloventtiin H-tiivisteiden tiivistepinnan laatuun.

Projektin toteuttamisessa tapahtui suuria viivästyksiä aihoiden saatavuuden takia ja leukojen valmistukseen liittyvien ongelmien takia. Näitä lukuun ottamatta asiat kuitenkin etenivät suunnitellusti ja hyvin ohjatusti Neleksen puolesta.

Tulosten analyysin perusteella voidaan sanoa, ettei tekijöillä ole tilastollisesti merkittävää vaikutusta vasteeseen. Tämä ei siis auta selventämään tuotannossa tapahtuvan vaihtelun päätekijöitä. On kuitenkin mahdollista, että toleranssialueet joilla liikutaan ovat niin pieniä, että vasteet voivat olla herkkiä todella monimutkaisille yhteisvaikutuksille eri vaiheista, joita on vaikeaa tuoda esille pienillä replikaatiomäärillä. Koe kuitenkin kertoo ainakin sen, että prosessi on hyvin vankka, ja pystyy suoriutumaan toleranssialueella, vaikka osia siitä muutellaan.

Projektin koesarja oli ensimmäinen kahdesta kahdeksan kappaleen koesarjasta. Tulosten perusteella seuraavalle erälle on monia eriäviä suositusvaihtoehtoja. Yksi vaihtoehto on suorittaa täysin samanlainen koesarja ja käyttää kumpaakin erää replikaationa analyysissä. Tämä lisäisi analyysin tarkkuutta ja varmistaisi ensimmäisen erän tulokset. Toinen vaihtoehto on korostaa muuttujien eroja, jotta kriittinen tekijä saadaan esille häiriöiden keskeltä. Esimerkiksi voidaan nostaa sorvausnopeuden eroja tasoille 120 ja 220, tai huonojen leukojen kiinnityssäteen virhettä. Näitä ei voi kuitenkaan käyttää analyysissä replikaationa. Koesarjaan voidaan myös lisätä neljäs tekijä, jolloin tulosten resoluutio laskee IV-tasolle, jättäen päävaikutukset esille.

Lähteet

Antony, J., 2014. Design of Experiments for Engineers and Scientists. Toinen painos. s.l.:Elsevier.

Davim, J. P., 2016. Design of Experiments in Production Engineering. s.l.:Springer International Publishing.

Dean, A., Voss, D. & Draguljić, D., 2017. Design and Analysis of Experiments. Toinen painos ed. s.l.:Springer International Publishing.

Ferro S.A., 2021. Water ball valves standard. [Verkkoaineisto]
<https://www.ferrocompany.com/family-26.html>
[Haettu 15 2 2021].

Minitab, 2019. Factorial Designs (with resolution).

Montgomery, D., 2017. Design and analysis of experiments. Yhdeksäs painos. New York: Wiley.

Neles Oy, 2020. Neles Metal seated ball valves, seat supported, full and reduced bore, Series X.

Neles Oy, 2020. Series XT/XA and XB/XC. Installation, Mainanance and Operating Instructions.

Neles Oyj, 2020. Vuosittainen data. [Verkkoaineisto]
<https://www.neles.com/fi/sijoittajat/osake/annual-data/>
[Haettu 10 Tammikuu 2021].

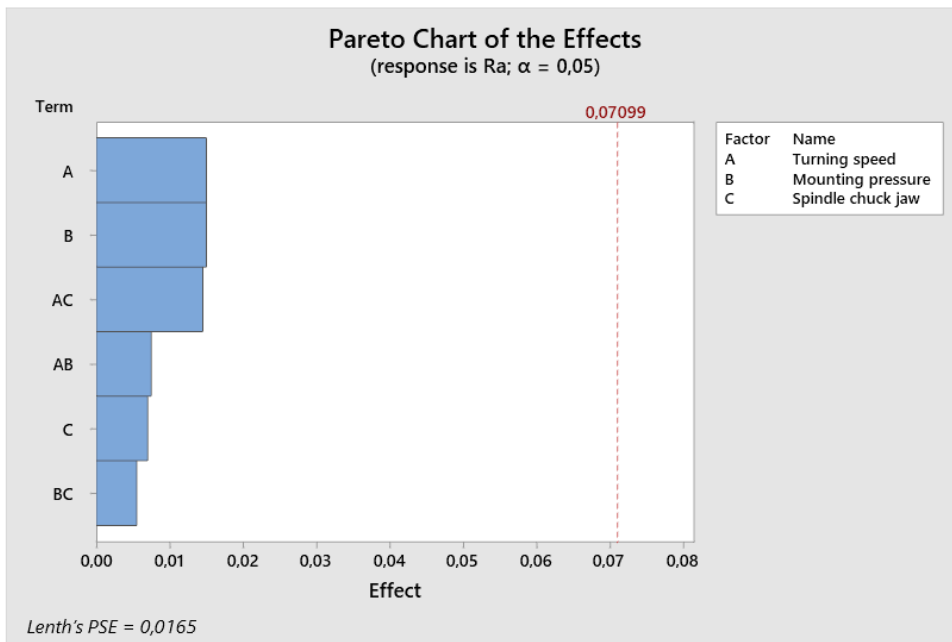
Walpole, R., Myers, R., Myers, S. & Ye, K., 2012. Probability & Statistics for Engineers & Scientists. Yhdeksäs painos. Boston: Prentice Hall.

Wikimedia Commons, 2008. A selection of Normal Distribution Probability Density Functions. [Verkkoaineisto]
https://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution#/media/File:Normal_Distribution_PDF.svg
[Haettu 21 Tammikuu 2021].

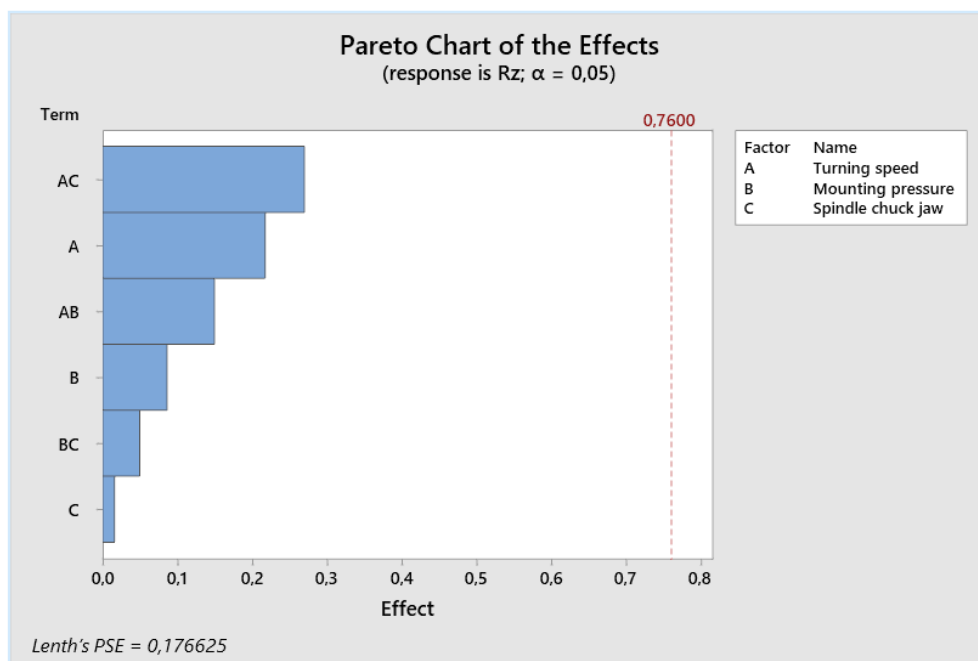
Witte, R. & Witte, J., 2017. Statistics. Yhdestoista painos. s.l.:Wiley.

Koesarjan pareto-diagrammit

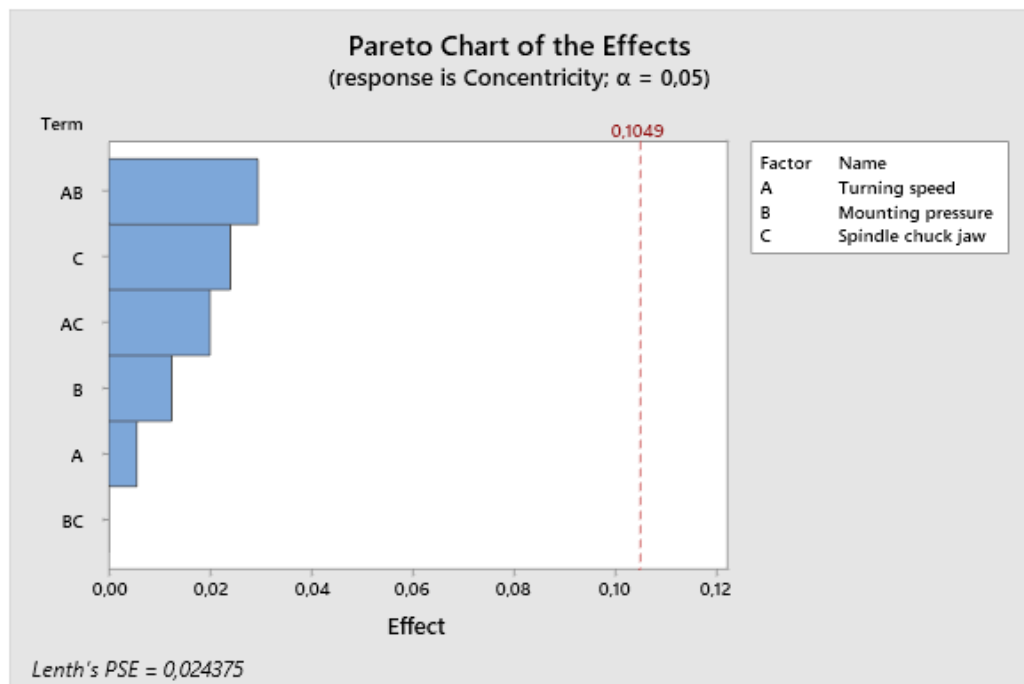
Kuvissa 1, 2, 3, 4 ja 5 näkyy tekijöiden vaikutukset pareto-diagrammeina.



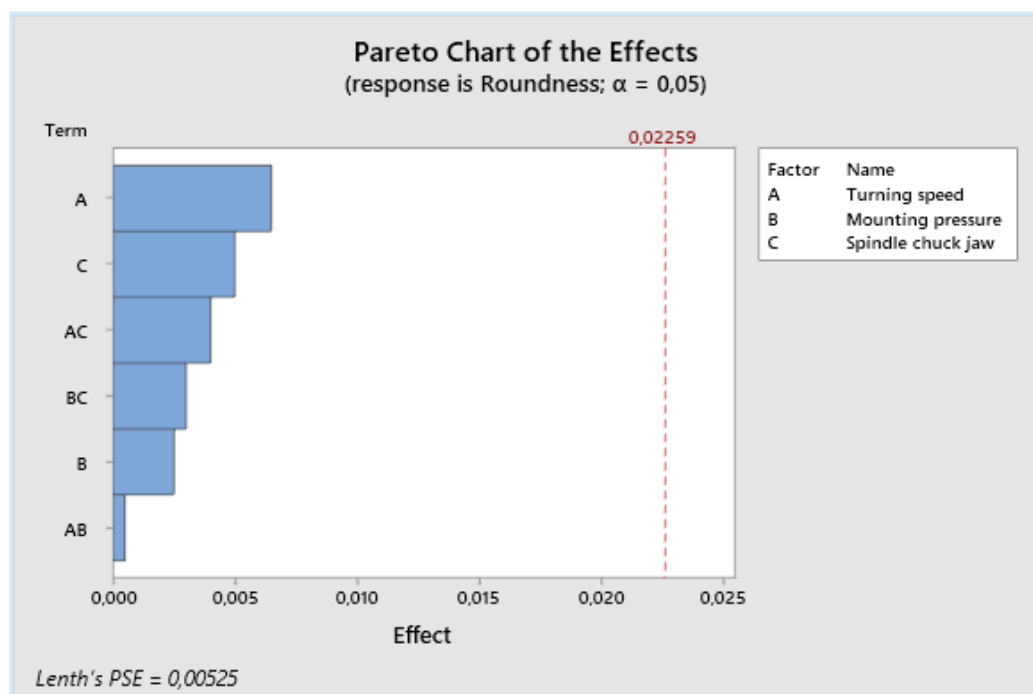
Kuva 1. Tekijöiden vaikutus Ra:han.



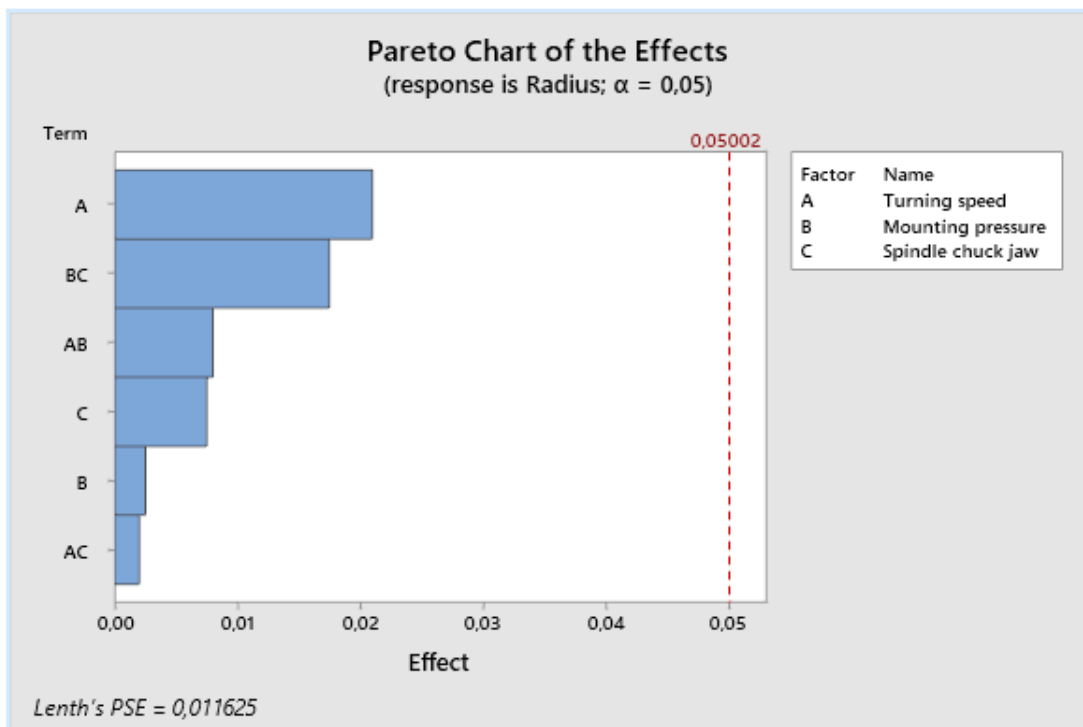
Kuva 2. Tekijöiden vaikutus Rz:aan.



Kuva 3. Tekijöiden vaikutus samankeskisyyteen.



Kuva 4. Tekijöiden vaikutus ympyrämaisyyteen.



Kuva 5. Tekijöiden vaikutus pallopinnan säteeseen.