

Optisen mittalaitteen iskunkestävyyden tutkiminen

Säätöjousien kehitys- ja testaustyö

LAB-ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK), Konetekniikka

2022

Tommi Salonen

Tiivistelmä

Tekijä(t) Salonen, Tommi	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 25	Valmistumisaika 2022
Työn nimi Optisen mittalaitteen iskunkestävyyden tutkiminen		
Tutkinto Insinööri (AMK)		
Toimeksiantajan nimi, titteli ja organisaatio Yritys X		
Tiivistelmä Tässä opinnäytetyössä tutkittiin optisen mittalaitteen iskunkestoja. Iskunkeston tutkiminen tuli ajankohtaiseksi, kun toimeksiantajayritys halusi selvittää vaihtoehtoja olemassaoleville ratkaisuille. Mittalaitteelle tehtiin isku- ja lämpötestejä yrityksessä valmistetuilla testauslaitteilla. Tuloksia saatiin anturimittauksilla, visuaalisella tarkastellulla, mittalaitteen omilla mittalaitteilla ja matemaattisin menetelmin. Opinnäytetyön aikana kehitettiin 5 erilaista jousimallia, joista viimeisin täytti kaikki annetut vaatimukset.		
Asiasanat iskutesti, testaaminen, mittalaite, analysaattori, spektroskopia		

Abstract

Author(s) Salonen, Tommi	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2022
	Number of Pages 25	
Title of Publication Investigating shock resistance of an optical measurement device Possible subtitle(s)		
Name of Degree Engineer (UAS)		
Name, title and organization of the client Company X		
Abstract <p>The purpose of this thesis work was to investigate various solutions for improving shock absorption in an optical measurement device. Company wanted to study different solutions for existing absorption methods. Various shock and heat tests were performed to the device with inhouse built test equipment. Test results were acquired via sensor measurements, visual examination, and mathematical methods. Five different solutions were designed and tested, and the last design fulfilled all the required criteria.</p>		
Keywords shock resistance, optical measurement, analyser, spectroscopy		

Sisällys

1	Johdanto.....	1
2	FTIR –kaasuanalysointimet ja niiden käyttökohteet.....	2
3	FTIR –Analysointimet toimintaperiaate.....	3
3.1	Spektroskopia.....	3
3.2	Infrapunaspektroskopia.....	4
3.3	Fourier-muunnos infrapunaspektroskopia (FTIR).....	6
4	FTIR –kaasuanalysointimet rakenne ja komponentit.....	9
5	Testausmenetelmät.....	11
5.1	Iskunkestävyyden testauksessa käytetyt työvälineet.....	11
5.2	Säteenjakkajan asennon säätäminen.....	11
5.3	Analysointimet kohdistuvat iskutyypit ja niiden vaikutus.....	11
5.4	Anturimittaukset.....	12
5.5	Visuaalinen tarkastelu.....	12
5.6	Jousivakio.....	15
5.7	Lämmönkestokyky.....	16
6	Jousien suunnitteluprosessi.....	17
6.1	Välyksenpoisto, ruuvilukitteet ja jousimateriaalit.....	17
6.2	Ensimmäiset kokeilut.....	18
6.3	Mikkihiiri.....	18
6.4	E-jousi.....	18
6.5	Ghost.....	19
6.6	8-jousi.....	19
7	Jousimallien suorituskyvyn vertailu.....	20
8	Yhteenveto ja pohdinnat.....	22
	Lähteet.....	24

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan kannettavan optisen mittalaitteen, tarkemmin FTIR –kaasuanalysaattorin säteenjakajan säätäjousien iskunkestävyyttä. Iskunkestävyyden tutkiminen tuli ajankohtaiseksi, kun yrityksessä haluttiin tutkia vaihtoehtoja olemassa oleville jousille. Yrityksen toivomuksesta, yrityssalaisuuksiin vedoten, yrityksen nimeä ei julkaista tässä opinnäytetyössä. Lisäksi kehitetyt jousimallit ja tarkka testausdata kuuluvat yrityssalaisuuden piiriin, joten niistä ei ole kuvia tässä opinnäytetyössä.

Säteenjakajan säätöruuvien jousille annettiin vaatimuksiksi vähintään yhtä hyvä iskun- ja lämmönkestävyys, sekä vähintään yhtä toimiva asennustapa, kuin jo olemassa oleville referenssijousille. Säteenjakajan asennusrunkoon ja -tapaan ei haluttu tehdä suuria muutoksia, joten uuden jousimallin tuli toimia mahdollisimman yksinkertaisena jälkiasennuksena. Iskunkestävyyden testausmenetelmiä olivat iskutestit, pudotustestit, suorituskykytestit ja visuaalinen tutkiminen mikroskoopilla.

Analysaattorin muun iskunkestävyyden tutkiminen on rajattu tämän opinnäytetyön ulkopuolelle. Muita iskunkestävyyteen vaikuttavia seikkoja ovat esim. kuljetuslaatikon pehmusteet, analysaattorin kuorien rakenne ja kuorien kiinnitys itse analysaattoriin, interferometrin iskunkestävyys, materiaalivalinnat yms.

Opinnäytetyön kirjoittaja tuli mukaan projektiin noin puoli vuotta sen aloittamisen jälkeen, vaiheessa, jossa ensimmäisten uudenmallisten ripustusjousien testaus oli juuri alkanut. Kirjoittajan roolina projektissa on ollut säätäjousien asennuksen ja iskunkestävyyden testaaminen, sekä toimia osana jousien kehitystiimiä.

2 FTIR –kaasuanalyssaattorit ja niiden käyttökohteet

Infrapunaspektroskopiaa on käytetty materiaalintunnistussovelluksissa laboratorio-olosuhteissa jo yli 70 vuoden ajan. Infrapunaspektroskopian suosio materiaalientunnistuksessa perustuu sen korkeaan tarkkuuteen ja nopeuteen. Jokaisella aineella on yksilöllinen atomikoostumus ns. sormenjälki, joka pystytään näkemään infrapunaspektrissä. Spektrin piikimuodoista ja -korkeuksista voidaan myös tunnistaa, kuinka paljon tutkittavaa ainetta on näytteessä. Lisäksi yhdestä spektristä voidaan lukea kaikki näytteessä olevat aineet ja niiden pitoisuudet. Infrapunaspektroskopian muita hyötyjä ovat:

- Ei destruktiivinen, eli materiaalia hajottava analysointitapa. Tutkittava materiaali ei hajoa, kulu tai häviä tutkimusprosessissa.
- Tarkka tutkimusmenetelmä, johon ei tarvita erillistä kalibrointia.
- Nopeuttaa materiaalintutkimusprosessia, koska näytteitä voidaan analysoida esim. joka sekunti.
- Tutkimusprosessin herkkyys kasvaa, koska usean sekunnin mittauksen yhdistämisellä voidaan vähentää epätarkkuutta luovaa ”kohinaa”.
- Mekaanisesti tutkimuslaite on yksinkertainen, koska siinä on vain yksi liikkuva osa. Tämän ansiosta analyssaattoria ei tarvitse huoltaa usein. (Thermo Fisher a.)

FTIR –kaasuanalyssaattoreista on olemassa usealla kaupallisella toimittajalla erilaisia paikalleen asennettavia ja kannettavia versioita. Kaasuanalyssaattoreita käytetään:

- Turvallisuuden ja työsuojelun sovelluksissa, kuten kuljetuskonttien myrkyllisten kaasujen mittaamiseen, sisäilman mittaamiseen, pelastustyöntekijöiden HAZMAT yksiköiden työkohteiden myrkyllisten kaasujen mittaamiseen sekä palamiskaasujen mittaamiseen tulipaloissa. (Gasmeter c.)
- Ympäristön kaasujen mittaamiseen, kuten maaperän kasvihuonekaasujen mittaamiseen, märehitijöiden ruuansulatusprosessissa muodostuvien kaasujen mittaamiseen sekä hiilidioksidin takaisinottojärjestelmien toiminnan varmistamiseen. (Gasmeter d.)
- Teollisuuden päästöjen mittaamiseen esimerkiksi sementin, alumiinin, lannoitteiden tuotantolaitoksissa, raakakaasujen mittauksessa, jätteenpolttolaitoksissa ja voimalaitoksissa. Teollisuuden päästöjä rajoittaa IE-direktiivi (Industrial Emission Directive, IED), joten analyssaattoreiden on pystyttävä mittaamaan direktiivissä vaaditulla tarkkuudella. (Gasmeter a,b.)

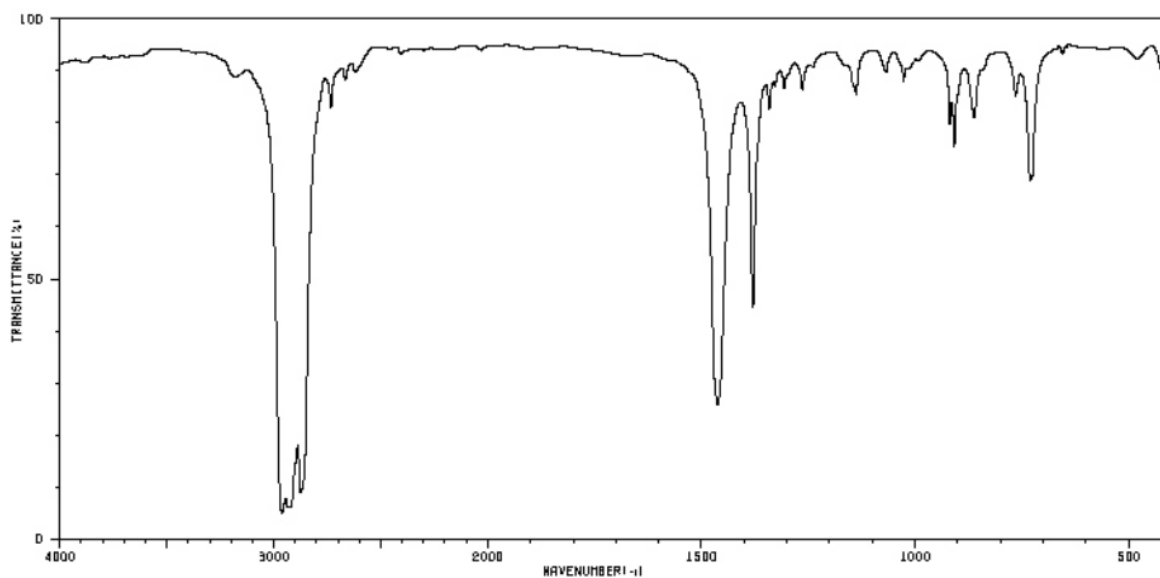
3 FTIR –Analysaattorin toimintaperiaate

3.1 Spektroskopia

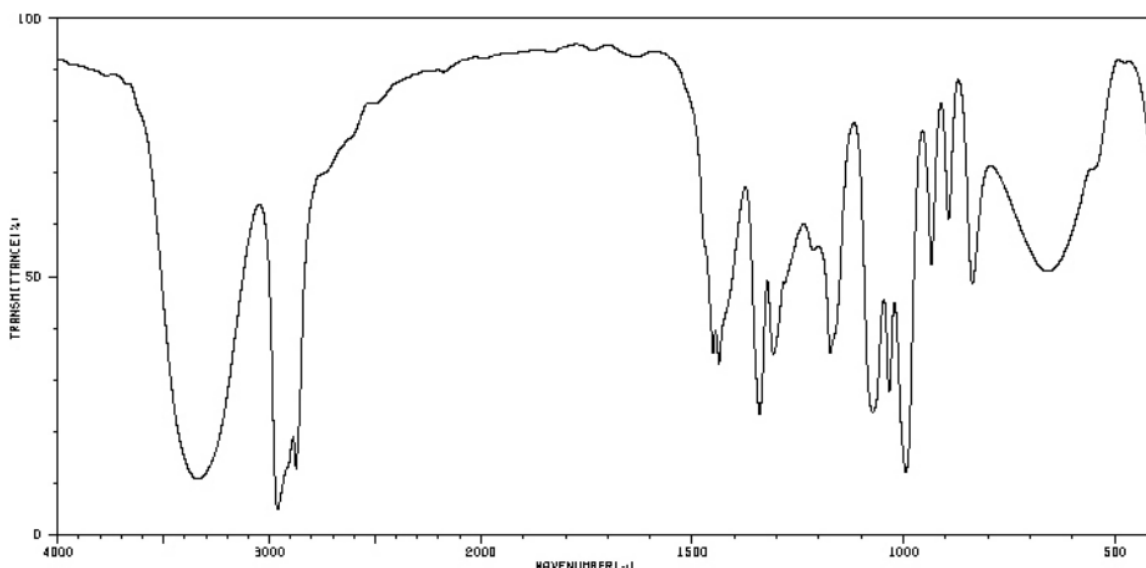
Spektroskopiassa tutkitaan ja analysoidaan kohteesta saatua säteilyä esim. valoa. Spektroskopiassa säteily hajotetaan aallonpituus- tai taajuuskomponentteihinsa. Tätä hajotelmaa kutsutaan spektriksi. Tästä spektristä voidaan selvittää esim. aineen alkuainekoostumus. (Salminen ym. a.)

Aineet voivat varata (absorptio) tai luovuttaa (emissio) energiaa. Spektroskopian hyvä erotelukyky perustuu materiaalien absorptiossa tai emissiossa tapahtuviin värähtely- ja pyörimisilmiöihin, jotka ovat taajuuden suhteen spesifejä eri materiaaleille ts. eri materiaaleilla on erilaiset spektrit. (Peda.net b.)

Kuvioissa 1 ja 2 on esimerkkeinä pentaanin ja syklopentanolin spektrit.



Kuvio 1. Pentaanin spektri. (maol.fi)

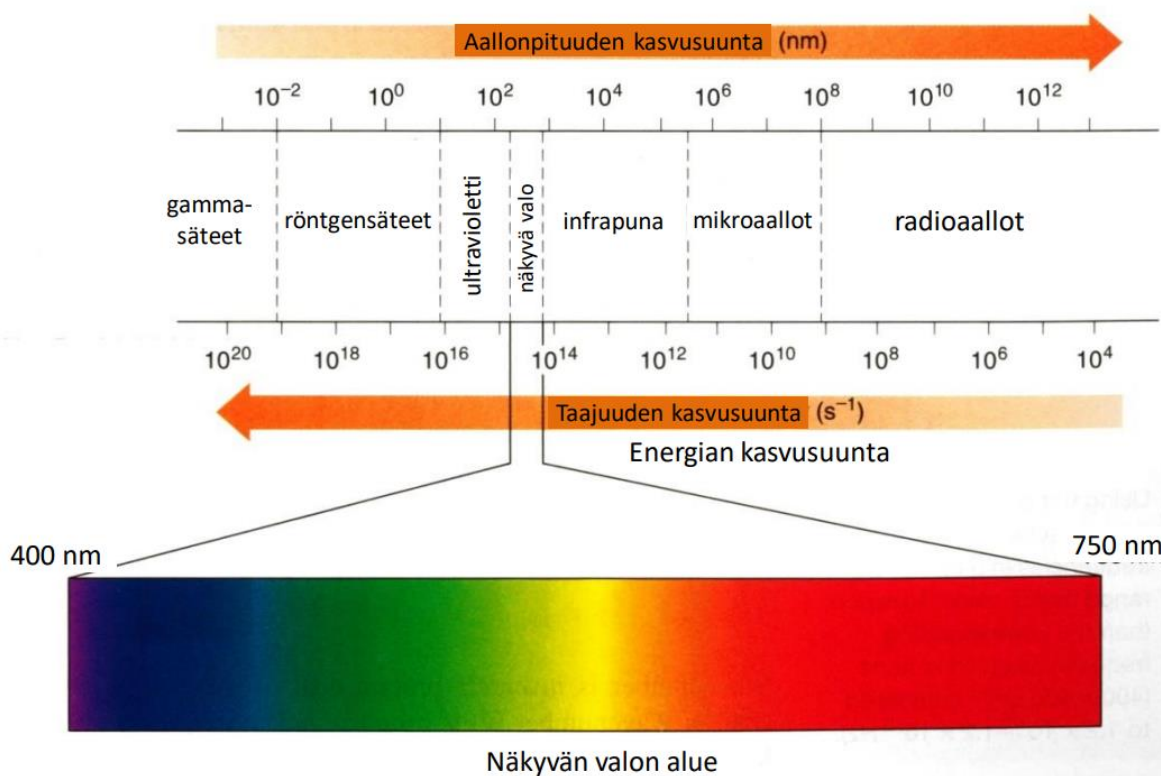


Kuvio 2. Syklopentanolin spektri. (maol.fi)

3.2 Infrapunaspektroskopia

Infrapunaspektroskopiassa näytteeseen absorboituva sähkömagneettinen säteily on infrapunasäteilyn aallonpituusalueella (Salminen ym. b). Näytteen molekyylien sidokset alkavat värähtelemään infrapunasäteilyn vaikutuksesta ja tämä värähtely voidaan havaita. Mitä suurempi dipolimomentti molekyylien sidoksella on, sitä suurempi on myös säteilyn absorptio. (Salminen ym. b.) Mikäli molekyylillä ei ole dipolimomenttia, se ei absorboi säteilyä. Tällaisia molekyylejä ovat symmetriset kaksiatomiset molekyylit esim. happi O_2 , typpi N_2 ja kloori Cl_2 . (Nikula 2016, 4.)

Kuviossa 3 on esitetty sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueet, taajuudet ja tarkemmin näkyvän valon alue. Aallonpituus ja taajuus ovat kääntäen verrannollisia, koska valon nopeus on vakio. (peda.net a.)



Kuvio 3. Säteilyn aallonpituusalueet. (peda.net a.)

Infrapunaspektroskopia jaotellaan kolmeen alueeseen käytetyn infrapunasäteilyalueen perusteella:

- Lähi-infrapunaspektroskopia. Aallonpituus on 0,78–2,5 μm ja aaltoluvut 12 800–4 000 cm^{-1} .
- Keskialueen infrapunaspektroskopia. Aallonpituus on 2,5–50 μm ja aaltoluvut 4 000–200 cm^{-1} .
- Kaukoinfrapunaspektroskopia. Aallonpituus on 50–1 000 μm ja aaltoluvut 200–10 cm^{-1} . (Encyclopedia Britannica a, b.)

Keskialueen infrapunaspektroskopia on käytössä kaasuanalyyseissä. Aallonpituutta merkitään kreikkalaisella symbolilla pikku lambda, λ ja sen avulla voidaan laskea taajuus kaavalla 1:

$$v = \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

v = säteilyn taajuus [1/s]

c = valonnopeus = 2,998*10⁸ m/s

λ = aallonpituus [nm]

Sähkömagneettisen säteilyenergian määrä voidaan laskea kaavalla 2:

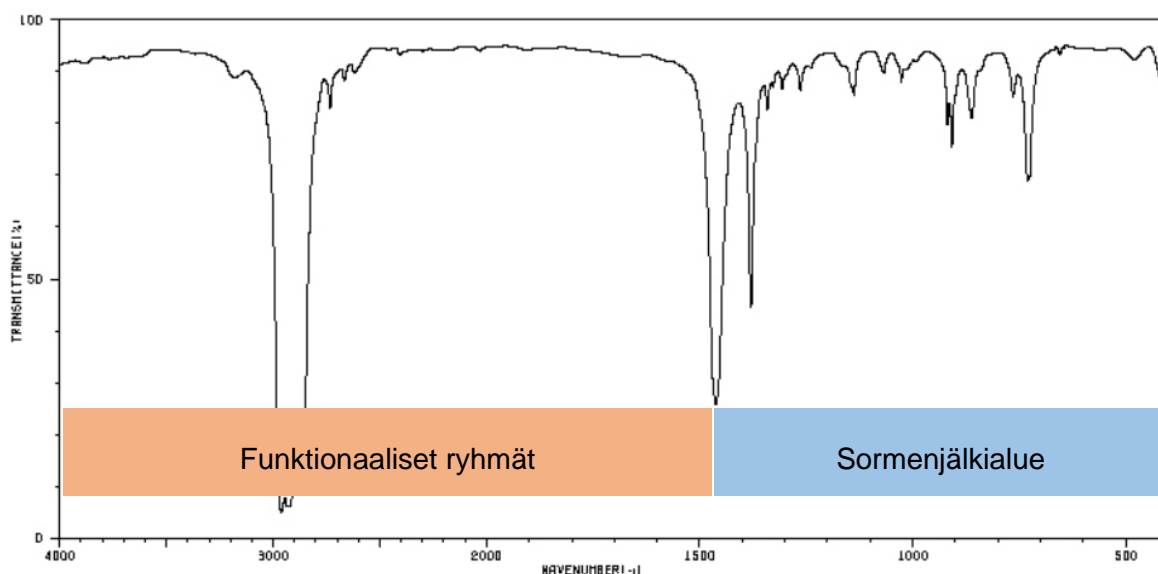
$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

E = säteilyn energia

h = Planckin vakio = $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js

Spektroskooppisissa tutkimuksissa käytetään aallonpituuden sijaan aaltolukua, koska se on energian kanssa suoraan verrannollinen. Esimerkiksi 2,5–50 μm on sama kuin 4 000–200 cm^{-1} . (Nikula 2016, 2.)

Infrapunaspektrejä tutkittaessa, kiinnitetään huomiota absorptiopiikin paikkaan, intensiteettiin ja muotoon. Spektristä voidaan tulkita mitä atomeja ja atomiryhmiä näytteessä on ja millaisia sidoksia atomien välillä on. Tutkimuksen helpottamiseksi, spektri voidaan jakaa funktionaalisten ryhmien alueeseen ja sormenjälki-alueeseen. Funktionaalisten ryhmien juovat näkyvät aaltoluvusta 1500 cm^{-1} ylöspäin ja sormenjälki-alue 1500 cm^{-1} alaspäin. (Salmi-
nen ym. b.) Kuvion 4 pentaanin spektriin, on merkitty funktionaaliset ryhmät ja sormenjälki-
alue.



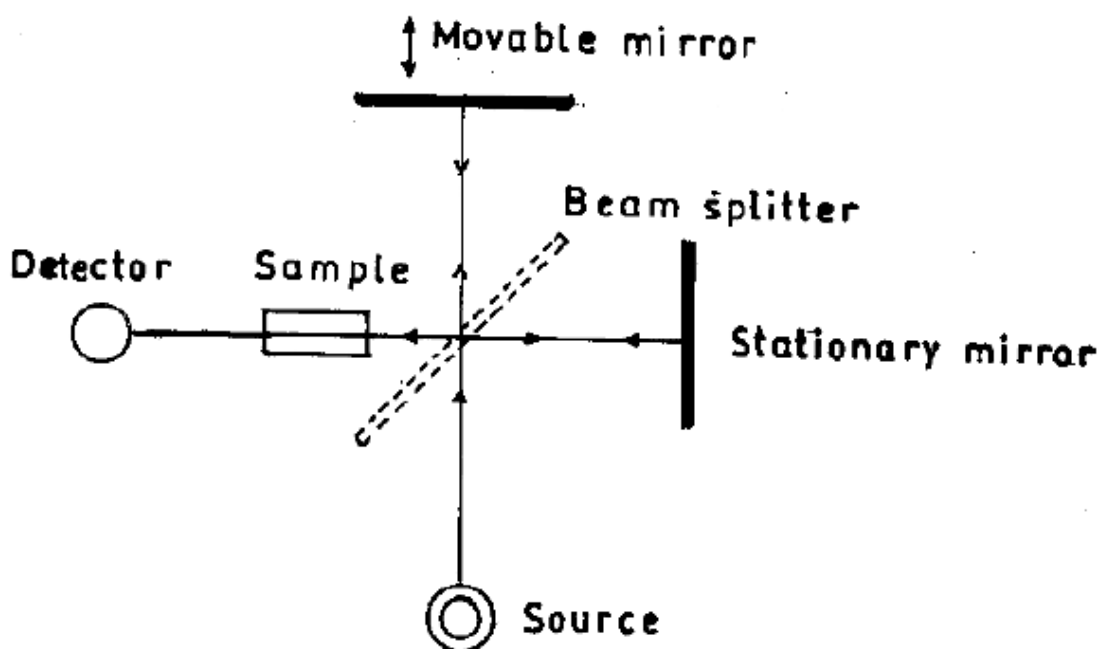
Kuvio 4. Funktionaaliset ryhmät ja sormenjälki-alue pentaanin spektrissä. (maol.fi)

3.3 Fourier-muunnos infrapunaspektroskopia (FTIR)

Fourier-muunnos infrapunaspektroskopia (FTIR) on laajin käytössä oleva infrapunaspektroskopian sovellus. FTIR –tekniikan etuja ovat nopeus, tarkkuus, ympäristöystävällisyys, koska se ei tuota jäämiä, erittäin hyvä signaali-kohinasuhde eli SNR (Signal Noise Ratio) ja

sillä voidaan mitata kaasumaisia, nestemäisiä ja kiinteitä näytteitä näytettä vahingoittamatta. (Nurmi 2020, 6.)

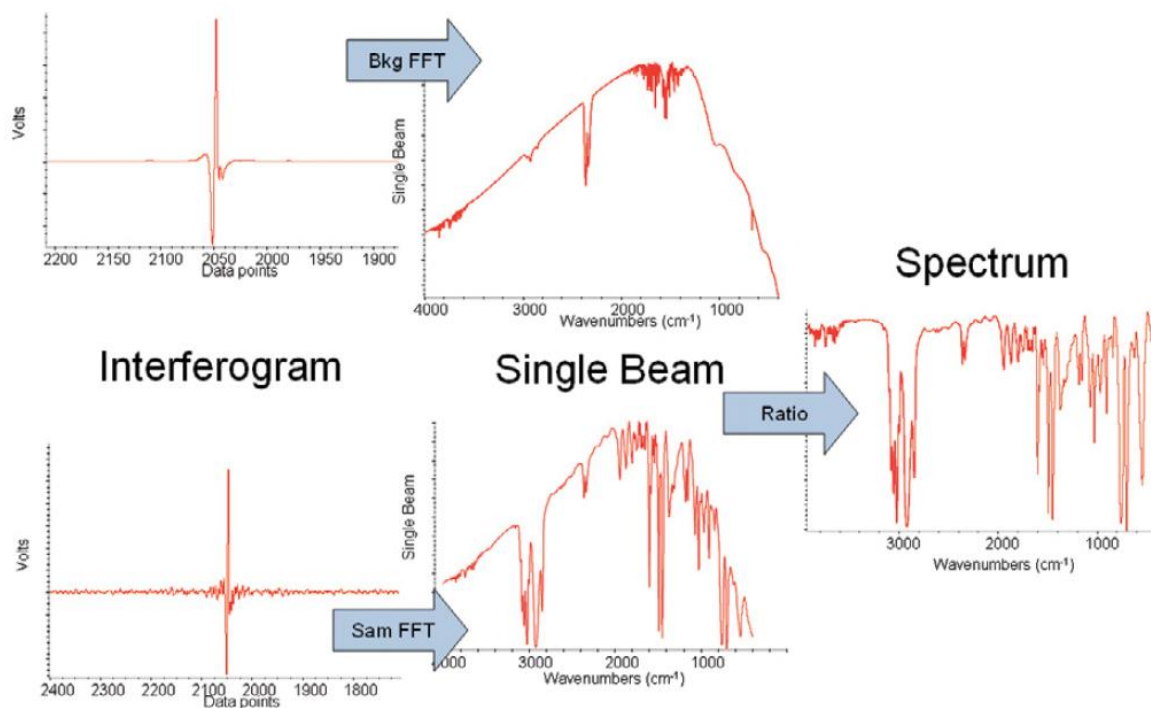
FTIR –tekniikka perustuu valon interferenssiin eli valoaaltojen yhteisvaikutukseen ja Michelsonin interferometriin. Interferometri koostuu säteenjakajasta (Beam splitter) sekä tasopeileistä, joista toinen on kiinteä ja toinen liikkuva. Peilien kulma toisiinsa nähden on yleensä 90 astetta, mutta muutkin kulmat ovat mahdollisia. Kuviossa 5 on esitetty interferometrin toimintaperiaatteen kaavakuva. Lähde (Source) lähettää lasersäteen peilien ja säteenjakajan kautta näytteen läpi detektorille (Detector). Signaali vahvistetaan, digitalisoidaan ja muutetaan Fourier-muunnoksen avulla spektriksi. (Nurmi 2020, 10–11.)



Kuvio 5. Michelsonin interferometrin toimintaperiaatteen kaavakuva. (Researchgate.net)

Säteenjakaja heijastaa lähteen lasersäteen puoliksi kiinteälle ja puoliksi liikkuvalle peilille. Säteiden heijastuessa takaisin peileistä säteenjakajalle, tapahtuu interferenssi, joka vaikuttaa valon voimakkuuteen eli intensiteettiin (Nurmi 2020, 12). Osa valosta absorboituu näytteeseen ja loput pääsevät detektorille, jonka pohjalta muodostuu interferogrammi. Kuviossa 6 on esitetty prosessi interferogrammista spektriksi. Interferogrammin interferenssikuvio sisältää tiedon näytteeseen absorboituneiden ja ei absorboituneiden valon aallonpituuksista. Tämän pohjalta lasketaan näytteen spektri Fourier-muunnoksen avulla. Kun näytteen läpi

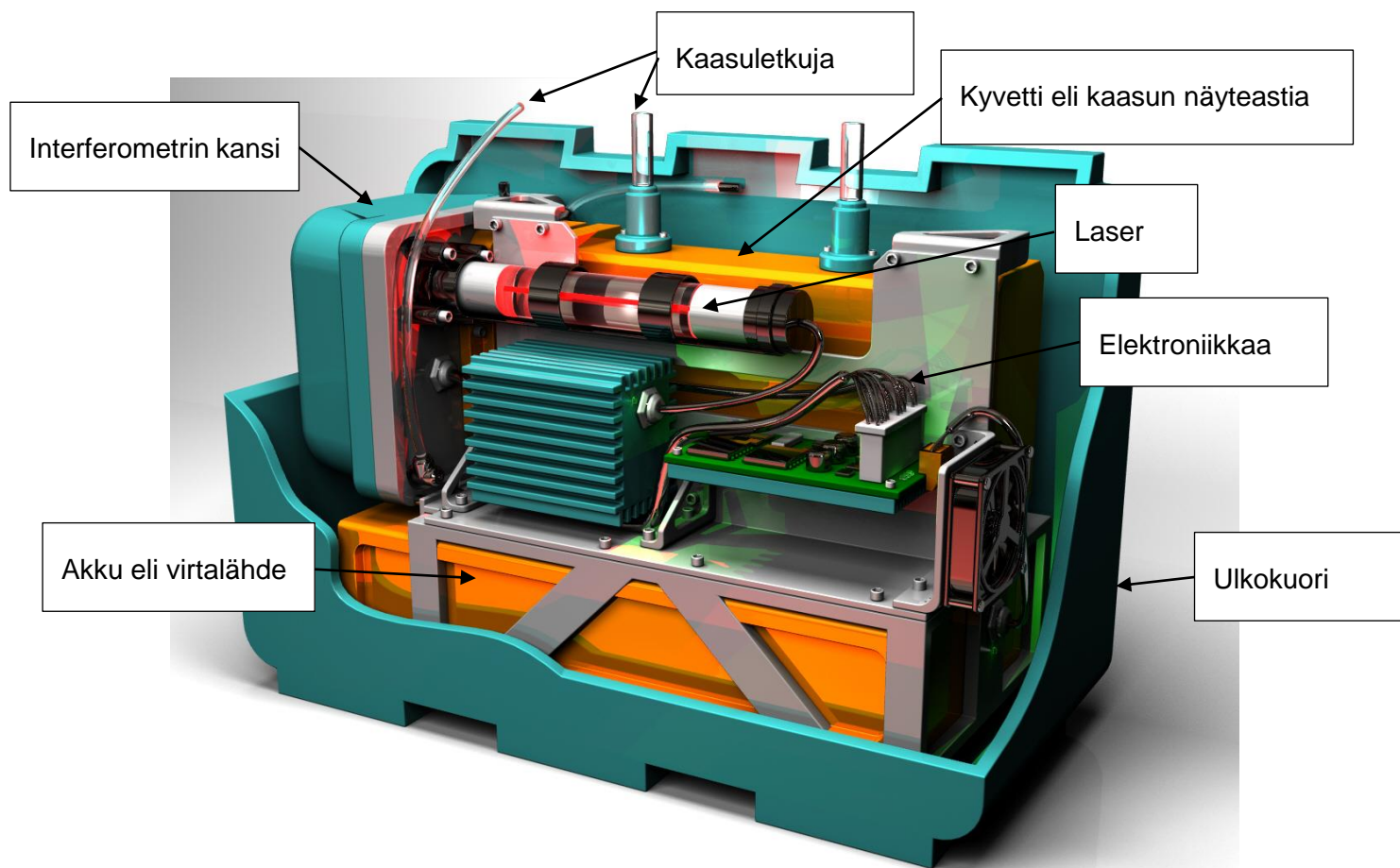
saatua spektriä verrataan referenssispektriin, eli näytteettömään "taustaan", saadaan näytteestä tarkka spektri, joka paljastaa näytteen sisällön. (Thermo Fisher Scientific b.)



Kuvio 6. Interferogrammista Spektriäsi. (Thermo Fisher Scientific b)

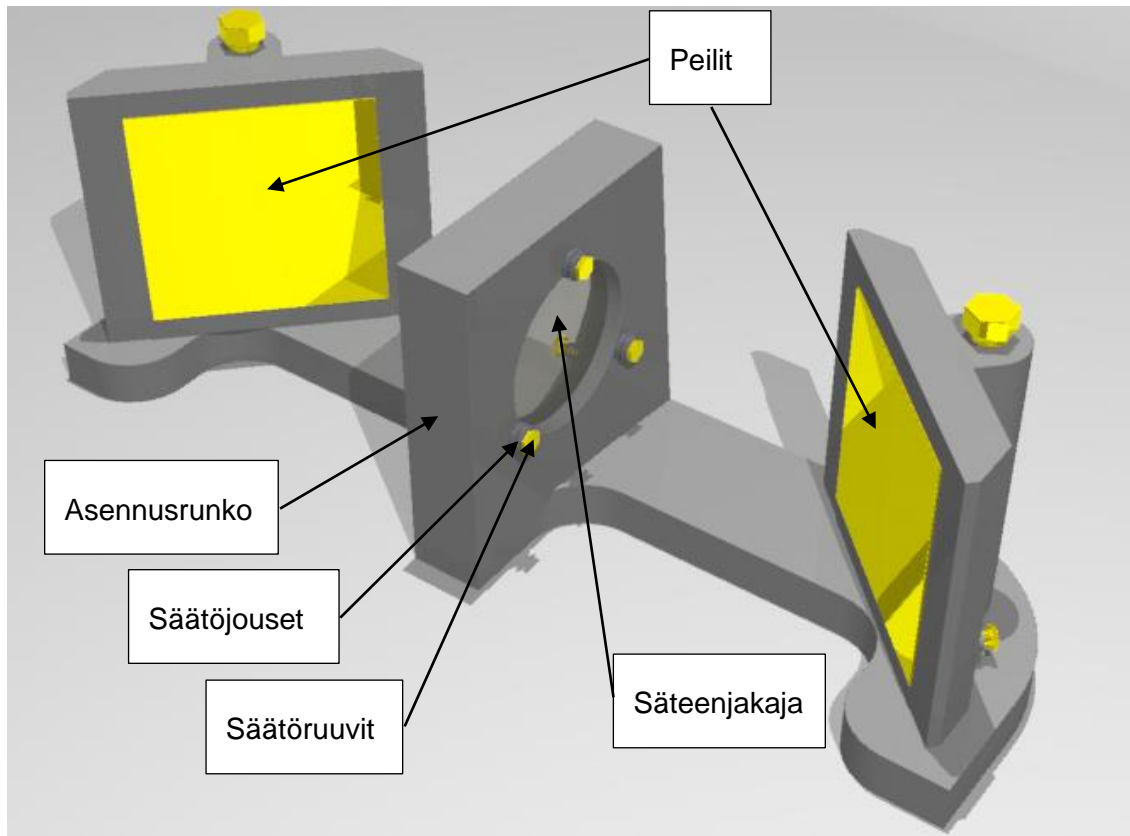
4 FTIR –kaasuanalysaattorin rakenne ja komponentit

Kannettava FTIR –kaasuanalysaattori koostuu monesta komponentista. Kuvan 1 mallinnettuun havainnekuvaan on merkitty analysaattoriin liittyvät keskeisimmät komponentit.



Kuva 1. Kannettavan kaasuanalysaattorin havainnekuva. (Salonen 2022)

Interferometrin kannen sisällä ovat IR –lähde, detektori, elektroniikkaa ja säteenjakajan asennusrunko osineen. Säteenjakajan asennusrungon muoto perustuu Michelsonin interferometriin. Kuvaan 2 on merkitty asennusrunkoon liittyviä osia.



Kuva 2. Säteenjakajan asennusrungon havainnekuva. (Salonen 2022)

5 Testausmenetelmät

5.1 Iskunkestävyyden testauksessa käytetyt työvälineet

- Yrityksessä rakennettu heilurimallinen iskuntestauslaite
- Muistiinpanovälineet Excel, muistio, Word
- Digitaalimikroskoopit ja -kamerat
- Kaasuanalysaattorin omat mittalaiteet
- Analog Devices EVAL-ADXL377 kiihtyvyyssanturi
- 3D tulosteet jousista, kiiloista yms.
- Työntömitat ja muut mittavälineet
- Jyrsinkone
- Käsityökalut esim. ruuvimeisselit, taskulamput, Dremel -käsijyrsin, viilat, hiomapaperit yms.
- Momenttiavaimet
- Suojavälineet

5.2 Säteenjakajan asennon säätäminen

Yrityksen analysaattorissa säteenjakajan ripustuksen säätäminen on erittäin herkkä toimenpide ja se tehdään toimenpidettä varta vasten muotoilulla työkalulla. Säteenjakaja on ripustettu asennusrunkoon kolmella ruuvilla, joita säätämällä säteenjakaja säädetään oikeaan kulmaan suhteessa laser- ja IR-säteisiin. Ripustuksen asennus tehdään kiristämällä säätöruuvit -jousien kanssa tiettyyn momenttiin. Säteenjakaja asennetaan tarkasti paikoilleen, jonka jälkeen säteenjakajan kansi kiinnitetään kannenruuveilla kiinni. Tämän jälkeen säteenjakajalle tehdään esisäätö interferenssin löytämiseksi, esisäätöä varten suunnitellussa jigissä. Lopuksi säteenjakajan asento hienosäädetään kohdilleen säätötyökalulla, yrityksen hienosäätötietokoneohjelmaa noudattaen.

Ruuvien asentoa hienosäädettäessä, yksi ruuvien täysi kierros 360° , muuttaa ruuvien syvyyttä 0,45 mm, mutta hienosäätövaiheessa ruuvia käännetään yleensä $1\text{--}45^\circ$. Harvoissa tapauksissa säätämistä joutuu tekemään yli 90° . Yli 90° säädöissä on suuri riski rikkoa säteenjakajan pintakerros, jolloin säteenjakajasta voi tulla epästabiili ja iskunkesto vähenee merkittävästi.

5.3 Analysaattoriin kohdistuvat iskutyypit ja niiden vaikutus

Mekaniikassa iskulla tarkoitetaan yleisesti lyhytaikaista voimaa, joka ilmenee, kun kaksi kappaletta törmää toisiinsa (Glamox). Kannettavaan analysaattoriin kohdistuu erilaisia

iskuja ja tärinää sen käytön aikana esimerkiksi toimituksen, kuljetuksen ja kantamisen aikana, laitetta laskiessa ja paikoilleen laitettaessa, sekä laitteen mahdollisesti kaatuessa.

Yrityksessä analysaattoreita testataan sekä yksittäisillä kovilla iskuilla, että pitkäkestoisella tärinällä. Säteenjakajan toiminnan kannalta yksittäisten, kovien iskujen ovat havaittu olevan haitallisempia säteenjakajan stabiiliudelle, kuin tasaisen tärinän. Iskujen vaikutuksia analysaattorin toimintaan seurattiin testien aikana anturimittauksilla ja visuaalisesti tarkastelemalla iskujen aiheuttamia jälkiä säteenjakajaan. Testeistä saadun tiedon perusteella määritettiin jousien jousivakio ja tehtiin tarvittavia muutoksia jousimallien muotoiluun.

5.4 Anturimittaukset

Kehitystyön alkuvaiheessa, referenssisäätäjousien iskunkestokykyä testattiin kaatamalla ja pudottamalla analysaattoria kovalle betonilattialle. Säteenjakajan asennusrunkoon, säteenjakajan sijaan, kiinnitetyllä kiihtyvyyssanturilla voitiin määrittää kiihtymisarvot putoamis- ja kaatumistesteille. Lisäksi kiihtyvyyssanturin avulla voitiin määrittää verrokkiarvot, joilla tuotannossa tehtiin iskunkestävyytestit. Testien arvoja vertaamalla näihin arvoihin voitiin määrittää arvot, jotka uusien jousimallien tuli ylittää. Arvot ovat millivoltteja, mV.

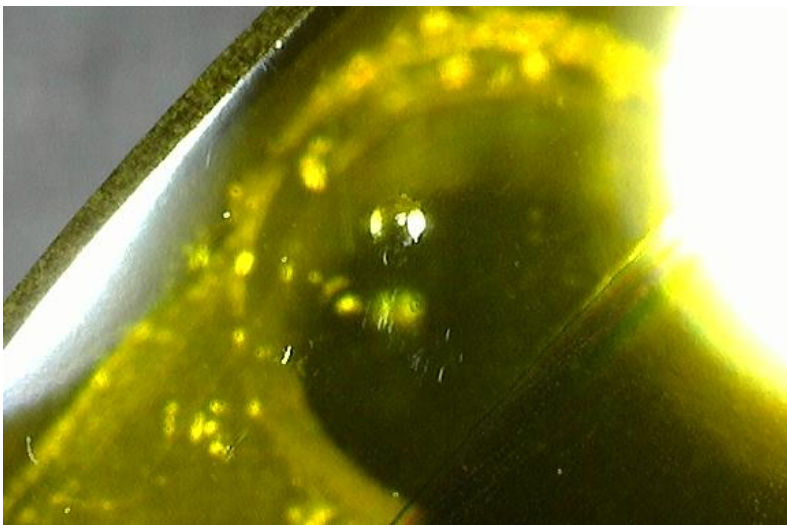
Tutkimustyön kehittämiseksi ja tulosten analysoinnin helpottamiseksi, kehitettiin painovoimalla toimiva iskuntestauslaite, johon analysaattori kiinnitetään. Iskuntestauslaitteessa on heilurimallinen vasara, jolla iskuja voitiin antaa portaattomasti eri voimakkuuksilla. Analysaattori voitiin kiinnittää testauslaitteeseen eri kulmissa ja testata iskujen vaikutuksia eri suunnista. Havaittiin, että edestäpäin tulevat iskut vaikuttavat voimakkaammin kuin takaapäin tulevat iskut. Mittausten perusteella takaapäin tulevien iskujen ylärajaksi asetettiin 375 mV ja edestäpäin tulevien iskujen ylärajaksi 250 mV. Nämä arvot vastaavat analysaattorin kaatamista betonilattialle ts. vapaapudotusta. Näiden arvojen ylittäminen aiheutti murtumia ja säröjä säteenjakajaan.

5.5 Visuaalinen tarkastelu

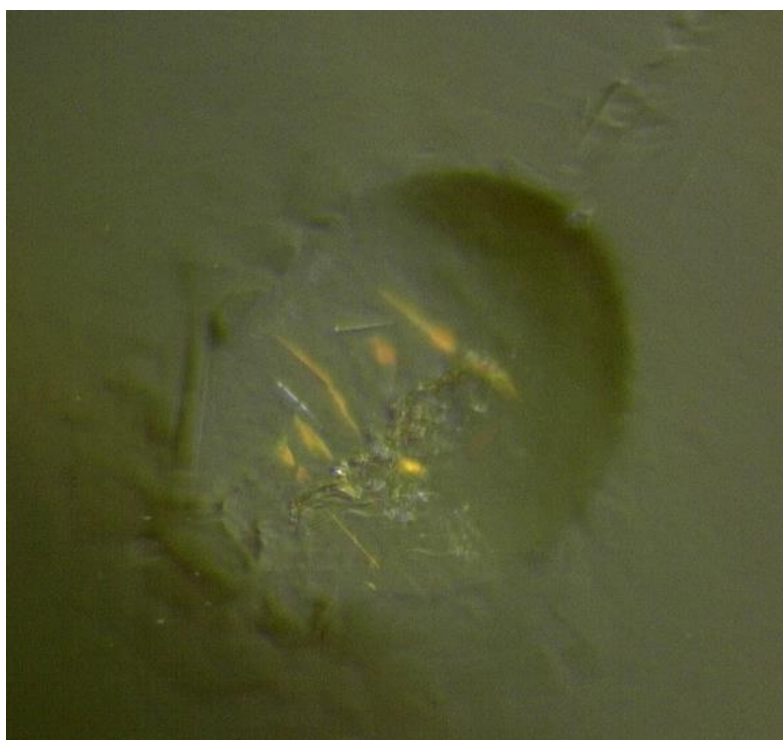
Säätöruuvit aiheuttavat erilaisia jälkiä säteenjakajaan iskujen ja tärinän seurauksena. Iskujälkiä vertailemalla, pystyttiin tekemään päätelmiä siitä, mihin suuntaan jousen muotoilua ja jousen kiristykseen käytettyä vääntömomenttia tulisi kehittää. Lisäksi mikroskoopeilla pystyttiin tarkasti tutkimaan iskujen aiheuttamia asentomuutoksia ruuveissa ja jousissa.

Kuvissa 3 ja 4 näkyy sama säätöruuvien aiheuttama jälki säteenjakajassa. Kuvassa 3 suurennos on 70 –kertainen ja kuvassa 4 suurennos on 680 –kertainen. Jälki on hieman ovaali ja sen pohjalla on pieniä epäsäännöllisiä murtumia ja ovaalia kohtisuoraan vastaan olevia

halkeamia. Nämä jäljet ovat tulleet säätöruuvien säätämisestä ja säteenjakajan liikahtamisesta iskun aikana.

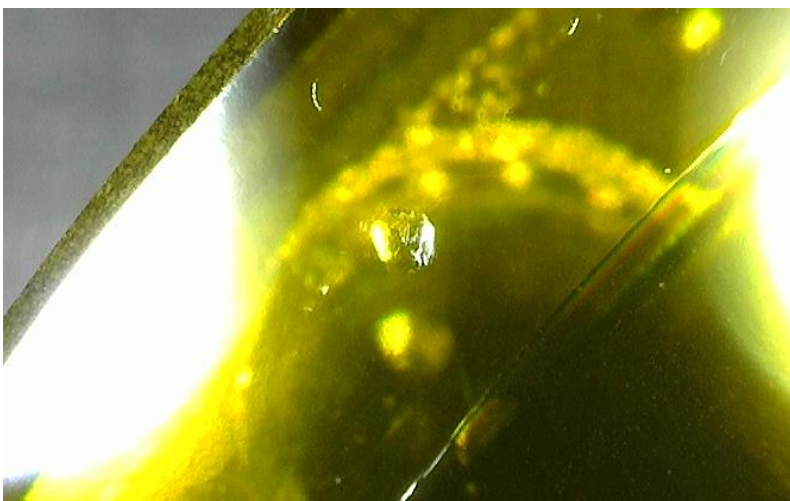


Kuva 3. Säätöruuvien aiheuttama jälki säteenjakajassa. 70 –kertainen suurennos. (Salonen 2022)

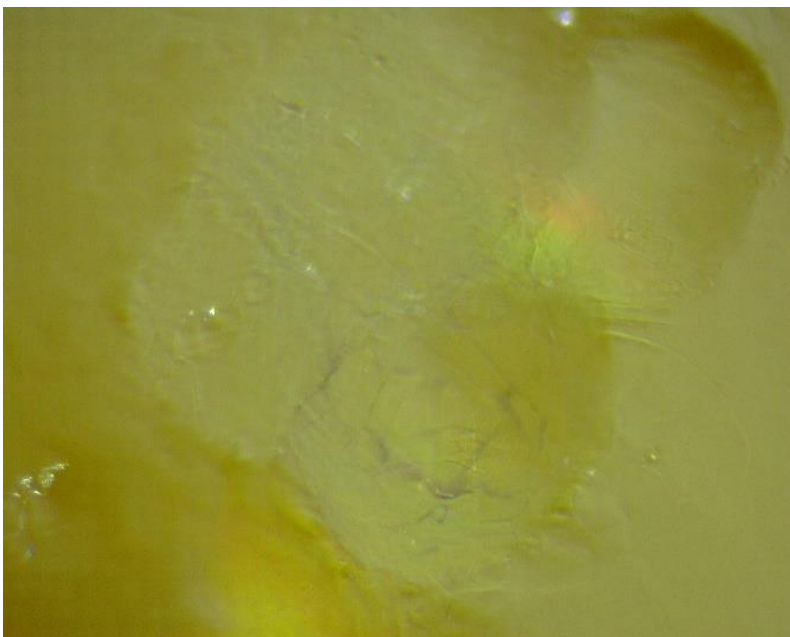


Kuva 4. Säätöruuvien aiheuttamia murtumajälkiä säteenjakajassa. 680 –kertainen suurennos. (Salonen 2022)

Kuvissa 5 ja 6 on 70 ja 680 –kertaiset suurennokset samasta säätöruuvista aiheuttamasta jäljestä säteenjakajaan. Jälki on rypälemäinen ja hiukan murtunut pohjasta. Tällainen jälki on aiheutunut, joko löysästä säätöruuvista, löysästä säätöjousesta tai löysästä kannen ruuvista. Kannenruuvit ovat aina samalla tiukkuudella kiristettyjä, joten todennäköisimmin vika on ollut löysässä säätöjousessa.



Kuva 5. Säätöruuvista aiheuttama jälki säteenjakajassa. 70 –kertainen suurennos. (Salonen 2022)



Kuva 6. Säätöruuvista aiheuttama rypälemäinen jälki säteenjakajassa. 680 –kertainen suurennos. (Salonen 2022)

5.6 Jousivakio

Koska jousimallit suunniteltiin yrityksessä, niille ei ollut saatavilla valmiita jousivakioita. Jousivakioita tarvittiin jousien suunnitteluun ja niiden toiminnan simulointiin tietokoneohjelmassa. Jousivakio voidaan määrittää kaavalla 3:

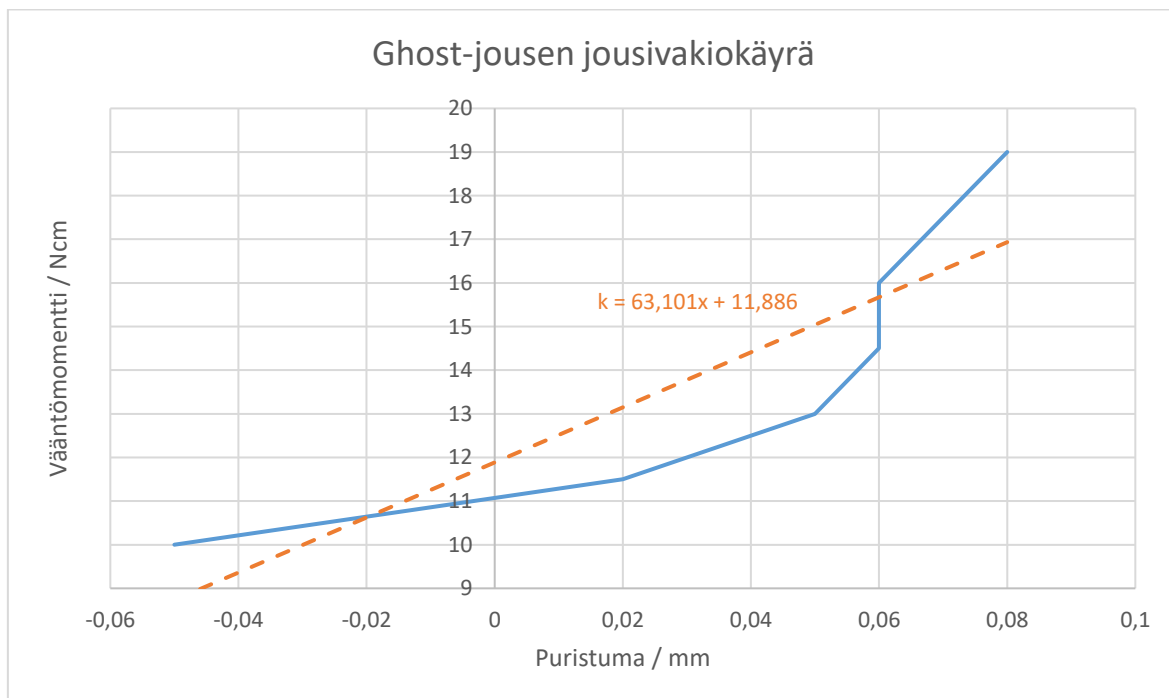
$$k = \frac{\Delta F}{\Delta x} \quad (3)$$

ΔF = Voiman muutos

Δx = etäisyyden muutos

(Opetus.tv)

Jousivakio käytetylle materiaalille mitattiin Ghost-jousta kiristämällä momenttivääntimellä. Kuviossa 1 on esitetty kiristystestin tulokset ja jousivakio y . Kiristystestejä tehtiin kolme ja kuvio on tehty toisen testin pohjalta, koska jousivakion muutos oli siinä kaikkein selkein. Käsini tehtyihin mittaustuloksiin sisältyy aina mittavirheen mahdollisuus ja tämä selittää miinusmerkkiset arvot.



Kuvio 7. Ghost -jousen jousivakioikäyrä. (Salonen 2022)

5.7 Lämmönkestokyky

Varsinaisten iskutestien lisäksi, lämmönkestokyky on tärkeä osa analysaattorin suorituskykyä. Jousimalleja suunniteltaessa ja iskutestejä suoritettaessa, on myös huomioitava iskunkesto parantavien ratkaisujen vaikutukset analysaattorin lämmönkestokykyyn.

Kannettavan analysaattorin käyttökohteet sijaitsevat ympäri maailmaa erilaisissa ilmas- toissa ja lämpötiloissa. Eri lämpötilojen aiheuttamat lämpölaajenemiset ja -supistumiset materiaaleissa interferometrin sisällä, säteenjakajanasennusrungossa ja säätöruuveissa, aiheuttavat suoraan muutoksia mittaustuloksiin. Myös kylmän laitteen käynnistymisestä aiheutuva lämpöshokki interferometrin sisällä on suuri suorituskykyyn vaikuttava tekijä. Materiaalien lämpölaajenemisesta johtuvia muutoksia haasteellisempia ennakoida ovat kuitenkin monet rajapinnat, jotka muodostuvat eri komponenttien välille. Säteenjakajan referenssisäättöjousissa on useita rajapintoja. Uusia jousia suunniteltaessa pyrittiin vähentämään näitä rajapintoja, jolloin niiden vaikutus pyrittiin minimoimaan. Lisäksi lämpölaajenemisen järkevä suuntaaminen jousissa on otettava huomioon.

Lämmönkestävyyttä testataan sitä varta vasten valmistetulla ”lämpöpesällä”. Lämpöpesässä ajetaan reilun tunnin pituinen lämpösykli, jossa analysaattorin lämpötilaa nostetaan useilla asteilla, jonka jälkeen se jäähdytetään takaisin lähtökohtaan. Samanaikaisesti analysaattori mittaa koko ajan testikaasuna käytettävää tyyppiä. Lämpötila vaikuttaa mitattavaan spektriin ja näitä syklin aikana tapahtuvia muutoksia mitataan ja verrataan lähtökohtaan. Onnistuakseen laitteen arvot saavat muuttua lämpösyklin aikaan enintään 4,5 % ja jälkeen 0,5 % verrattuna lähtöarvoihin.

Pitkää lämpötestaamista varten käytettiin erityistä lämpökaappia, jonka lämpösykli kesti 4 tuntia. Analysaattoria pidetään lämpökaapissa vähintään yön yli, mutta yleensä useita päiviä. Lämpökaapissa oli mahdollista testata myös laitteen käyttäytymistä eri kaasujen vaikutuksessa, esim. yleinen testattava kaasu oli 12 % vesihöyry.

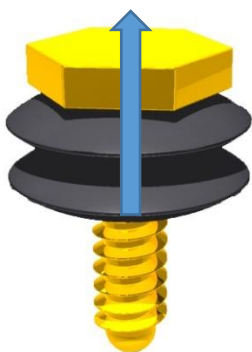
6 Jousien suunnitteluprosessi

6.1 Välyksenpoisto, ruuvilukitteet ja jousimateriaalit

Kokemuksen perusteella oli tultu siihen johtopäätökseen, että säätöruuvien sivuttaisliikkeet ja välykset kierteissä aiheuttivat säteenjakajan menemisen pois säädetyltä paikaltaan. Tällainen paikoiltaan poismeno voi johtua riittävän suuresta tärähdyksestä esim. analysaattorin kuljetuksessa tai käytössä.

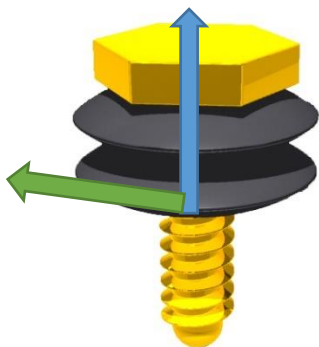
Mahdollisten nestemäisten ruuvilukitteiden käyttöä ei lähdetty tarkemmin tutkimaan, koska interferometrin sisään ei haluttu uusia, ajan kanssa mahdollisesti herkkien peilien pintaan höyrystyviä materiaaleja. Lisäksi nestemäisten ruuvilukitteiden pysyvyys kierteissä interferometrin sisällä vaatisi pitkän ajan kuluessa tapahtuvaa testaamista, johon tämän tutkimustyön puitteissa ei voitu lähteä. Tästä syystä päätettiin, että ruuvien mahdollinen liikkuminen ja välykset pyrittiin estämään mekaanisesti säätöjousien muotoilua parantamalla.

Uusien säätöruuvien ja -jousien materiaalin oli määrä olla sama kuin referenssijousissa, koska referenssiruuvi- ja jousimateriaalit on testattu vuosien saatossa toimiviksi ratkaisuksi. Referenssijouset suuntasivat voimansa kohtisuoraan poispäin säteenjakajasta mahdollistaen ruuvien pienen välyksen. Kuvan 7 mallinnuskuvaan referenssijousista on merkitty sinisellä nuolella jousivoiman vaikuttava suunta.



Kuva 7. Referenssijouset ja niiden aiheuttaman voiman suunta. (Salonen 2022)

Uusissa jousissa välyksen mahdollistama heilunta haluttiin estää muotoilemalla uudet jouset siten, että kohtisuoran voiman lisäksi, ruuveihin kohdistuisi myös heilumisen estävä ja välystä pienentävä sivuttaisvoima. Kuvaan 8 on merkitty sinisellä nuolella jousen aiheuttama kohtisuoravoima ja vihreällä nuolella jousen aiheuttama sivuttaisvoima.



Kuva 8. Muotoillun jousen aiheuttamat voimat. (Salonen 2022)

6.2 Ensimmäiset kokeilut

Ensimmäiset kokeilut jousimallin parantamiseksi tehtiin muokkaamalla tuotannossa olevia jousia. Tämän pohjalta kehittyi jousimalli 3S, jossa 3 referenssi jousia kasattiin eri tavalla kuin aikaisemmin ja pohjalle lisättiin yksi kaareva jousi painamaan ruuvia sivuttaissuuntaan.

3S –mallin jatkokehittelyssä kokeiltiin 3D printattuja kiiloja aiheuttamaan suurempaa sivuttaisvoimaa. Kokeilujen suurimmaksi ongelmaksi havaittiin 3D printin vaihteleva käyttäytyminen etenkin lämpötesteissä.

6.3 Mikkihiiri

Toisessa mallissa, Mikkihiiri, kaksi tuotannon jousia oli tuettuna erillistä ortta vasten, jolloin orsi aiheutti ruuviin sekä sivuttais-, että kohtisuoranvoiman.

Mikkihiiri oli alkupään testeissä suorituskyvyltään hyvä sekä iskutesteissä, että lämpötesteissä. Mallin asennus oli kuitenkin haasteellista asennusrunkoon johtuvien jälkien takia ja herkän asennusasennon takia.

6.4 E-jousi

Mikkihiiren orren pohjalta kehitettiin E-jousi, jossa oli vain yksi orsi jousena, joka tuotti sekä kohtisuoran-, että sivuttaisvoiman. Prototyypit valmistettiin yrityksen tuotekehityslaboratoriossa käsityönä. Positiivisten testitulosten myötä, erä kunnolla valmistettuja jousia tilattiin alihankkijalta, käytännön testejä varten.

Yhden jousen mallissa hyvinä ominaisuuksina helppo asennus, vähäiset rajapinnat ja siten myös hyvä lämpötestikestävyys. Mallin suurimmaksi haasteeksi osoittautui syvien jälkien ja naarmujen kaivautuminen säteenjakajan asennusrunkoon.

6.5 Ghost

E-jousen seuraajassa, Ghost –jousessa, oli myös vain yksi osa. Ghost oli muotoiltu siten, että jousi itsessään muodosti kiilan, jolla ruuvia painettiin sivuun ja kohtisuoraan. Säteenjakajan asennusrunkoon aiheutuvien jälkien estämiseksi jousen kontaktipinta asennusrunkoon oli kaareva, jolloin jäljet olivat enemmän liukujälkiä, kuin kaivuujälkiä.

Ghostin ongelmiksi muodostuivat vaihtelevat tulokset lämpötesteissä (johtuneet monimutkaisesta muodosta), liian korkea säätöruuvien asennusmomentti, jolloin asennusruuvi vääntyi mutkalle ja ruuvikannan hioutuminen jousen pintaan. Näiden ongelmien vähentämiseksi Ghostia muokattiin viilaamalla ja liimaamalla kaksikomponenttiliimalla erilaisia välilevyjä jousen ja ruuvien paremmin asemoimiseksi. Lisäksi joustia muokattiin litistämällä ruuvien läpimenoreikä ruuvipenkissä jigien avulla.

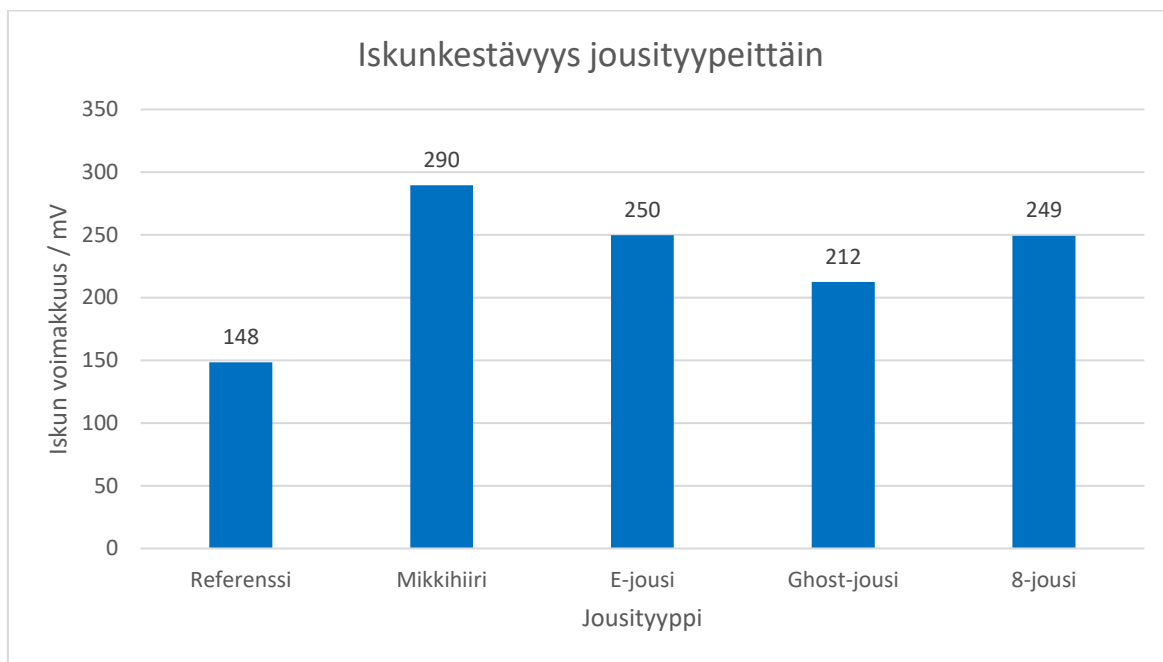
6.6 8-jousi

8-jousessa on Ghost –mallin tapaan vain yksi orsi. Orren lisäksi ruuvien ja jousen väliin asennettiin 0,9 mm paksu priikka estämään ruuvikannan kulumista joustia vasten. Priikka myös lisäsi momenttia, jolla aiheutettiin tarvittava sivuttaisvoima.

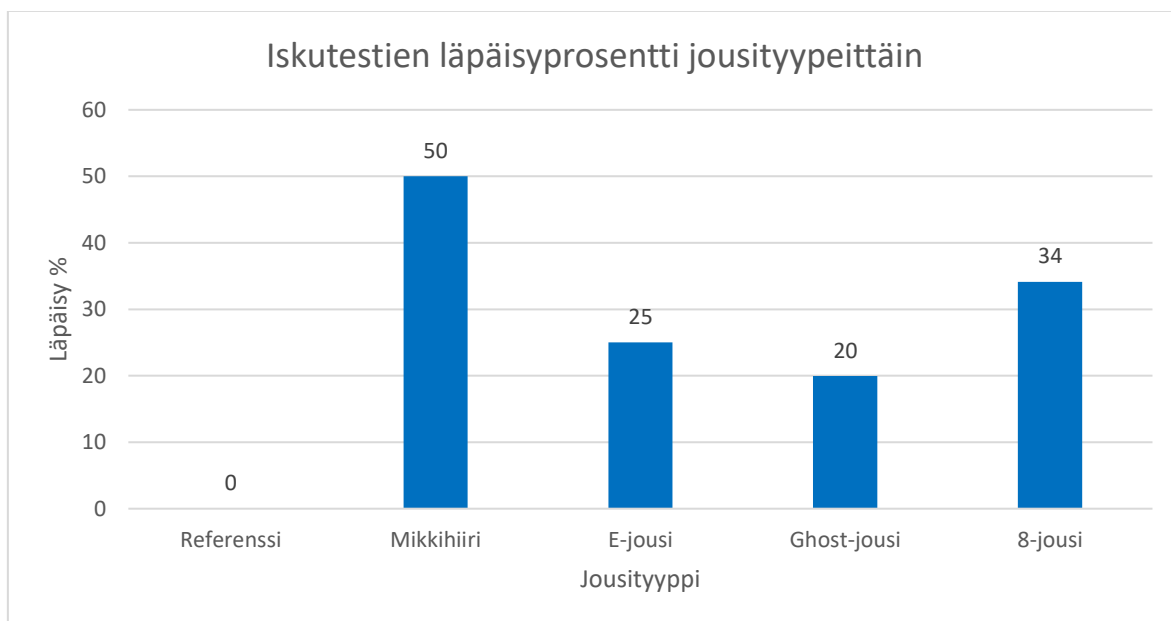
Jousivakion tarkan määrittämisen ja simuloinnin perusteella, 8-jousen kiristystiukkuus alennettiin samalle tasolle referenssinä olevien joustien kanssa. Tällöin kohtisuora- ja sivuttaisvoimat muodostuivat riittäviksi pitämään säätöruuvi paikoillaan tärähdyksissä ilman, että ruuvi itsessään vaurioitui. 8-jouset 3D mallinnettiin ja tilattiin testeihin alihankkijalta.

7 Jousimallien suorituskyvyn vertailu

Kuvioissa 8 on esitetty testattujen jousityyppien iskunkestävyys jousityypeittäin. Kuviossa 9 on esitetty iskutestien läpäisyprosentti jousityypeittäin. Iskun voimakkuudeltaan ja läpäisyprosenttiltaan parhaiten kokonaisdatan vertailun perusteella selvisi Mikkihiiri.



Kuvio 8. Iskunkestävyys jousityypeittäin.



Kuvio 9. Iskutestien läpäisyprosentti jousityypeittäin.

Taulukossa 1 on eritelty tarkemmin jousityyppien korkein keskimääräinen iskunkesto millivoltteina, kokonaistestausmäärät ja testien läpäisyprosentit.

Taulukko 1. Jousityyppien iskunkesto, testimäärä ja läpäisyprosentti			
	korkein iskun keskiarvo /mV	testien lkm. /jousi- tyyppi	testien läpäisyprosentti
Referenssi	148	15	0
Mikkihiiri	290	8	50
E-jousi	250	9	25
Ghost-jousi	212	104	20
8-jousi	249	80	34

Taulukko 1. Jousityyppien iskunkesto, testimäärä ja läpäisyprosentti

Taulukkoon 2 on koottu yhteenveto testien lukumääristä, läpäisyprosentteista ja parhaiten testeistä selviytyneistä yksittäisistä jousista. Iskujen kokonaislukumäärä on raaka matemaattinen arvio.

Taulukko 2. Iskutestien yhteenveto ja parhaat tulokset		
Testien lukumäärä / kpl	337	
Testatut säteenjakajan asennusrungot / kpl	12	
Iskutestien keskiarvo kpl / asennusrunko	11	
Iskujen kokonaislukumäärä testeissä	16909	Arvio
Läpäisyprosentti	25	
Keskimääräinen iskun voimakkuus / mV	229	
Korkein läpäisyprosentti / jousimalli	92	8-jousi2
Korkein kestäetty iskun voimakkuus / mV	313*	8-jousi2
Paras läpäisyprosentti / jousimalli	34	8-jousi2
<i>*Teoreettinen maksimi, kun takaiskun yläraja on 375mV ja etuiskun yläraja 250 mV</i>		

Taulukko 2. Iskutestien yhteenveto ja parhaat tulokset

8 Yhteenveto ja pohdinnat

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin kannettavan FTIR –kaasuanalysaattorin säteenjakajan säätäjousien iskunkestävyyttä. Kehitystyö tuli ajankohtaiseksi, kun yrityksessä haluttiin tutkia vaihtoehtoja olemassa oleville referenssijousille.

Suurin osa säätäjousien kehitystyöstä oli uusien jousimallien iskuntestausta, tulosten analysointia ja uusien mallien kehittämistä. Paljon aikaa käytettiin myös erilaisten pienten variaatioiden tekemiseen uusiin jousimalleihin ja kiinnitystapoihin, joita ei tähän opinnäytetyöhön kirjattu niiden lopputuloksen kannalta vähäisen merkityksen takia. Säätäjousien kehitystyön ohessa kehitettiin ja tutkittiin myös muita ripustukseen vaikuttavia asioita kuten säteenjakajan liikkumisen, suojakannen kiristyksen ja säteenjakajan kannen jousien rakenteen vaikutuksia.

Iskutestejä tehtiin karkeasti arvioiden n. 17 000 kpl ja testausaikaa käytettiin n. 10 kuukautta. Edellisessä kappaleessa olevista taulukoista voidaan lukea, että parhaiten testeistä suoriutui viimeiseksi suunniteltu 8-jousi. Taulukoista voidaan myös lukea, että paras iskunkestävyydeskeskiarvo oli kuitenkin mallilla Mikkihiiri. Taulukkoa tarkemmin tulkitessa voidaan kuitenkin huomata tilastoharha, sillä Mikkihiiri -jousta on testattu huomattavasti vähemmän, kuin Ghost ja 8-jousia.

8-jousi täyttää kaikki jousien iskunkestävyyskehitysprojektille annetut vaatimukset ja tavoitteet. Lisäksi 8-jousi suoriutui erittäin hyvin myös lämpötesteissä. Pitkäaikaista lämpötestaamista voidaan kuitenkin suositella mahdollisten komplikaatioiden välttämiseksi. 8-jousta voidaan näiden testien puolesta suositella käytettäväksi iskunkestävyyden näkökulmasta.

Jousimallien jatkokehitystä varten olisi hyvä testata muita jousi- ja ruuvimateriaaleja. Esimerkiksi säätöruuvien materiaaliksi olisi hyvä testata jotain kovempaa materiaalia, jotta ne eivät säädettäessä kuluisi tai taipuisi niin herkästi. Ruuvien kärjen ja säteenjakajan kosketuskohtaan voitaisiin myös kokeilla erilaisia ratkaisuja, sillä nyt säteenjakajan itsensä kestävyys asettaa rajat iskunkestolle ts. säteenjakaja särkyy, jos se saa kovempia iskuja kuin 375 mV.

Omat pohdinnat opinnäytetyöprosessista

Opinnäytetyön kirjoittaja aloitti insinööriopintoihin kuuluvan harjoittelujakson yrityksessä keväällä 2021. Nopeasti selvisi, että kirjoittaja voisi tehdä yritykselle opinnäytetyönsä sopivasta aiheesta. Kirjoittajalla ei ollut aikaisempaa kokemusta tai ymmärrystä FTIR –prosessista, laitteista tai tekniikastakaan, joten oppimiskäyrä oli erittäin jyrkkä. Tärkeimpinä yksittäisinä asioina kirjoittajalle prosessin aikana nousivat yksityiskohtaisen dokumentoinnin

merkitys kehitystyössä, "mittaa – älä oletta" –toimintatapa ja "fail fast" –mentaliteetti. Fail fast –mentaliteetilla kirjoittaja tarkoittaa suunnitelmien ja ideoiden nopeaa ja tehokasta testaamista, jotta toimimattomat ja toteutuskelvottomat ideat voidaan nopeasti karsia pois kehitystyöstä. Fail fast –ideoiden toteutuksessa ja "mittaa – älä oletta" –toimintavan omaksumisessa, kirjoittajan aikaisempi kokemus ja osaaminen käsityöstä, hienomekaniikasta ja tuotesuunnittelusta tulivat erittäin hyvään käyttöön.

Lähteet

Encyclopedia Britannica a. Infrared radiation. Viitattu 15.4.2022. Saatavissa <https://www.britannica.com/science/infrared-radiation>

Encyclopedia Britannica b. Infrared spectroscopy. Viitattu 15.4.2022. Saatavissa <https://www.britannica.com/science/spectroscopy/Infrared-spectroscopy>

Gasmet. a. Teollisuuden päästömittaus. Viitattu 22.2.2022. Saatavissa <https://www.gasmet.com/fi/sovellukset/teollisuuden-paastomittaus/>

Gasmet b. Teollisuuden päästömittaus. Päästömittaus muissa laitoksissa. Viitattu 22.2.2022. Saatavissa <https://www.gasmet.com/fi/sovellukset/teollisuuden-paastomittaus/#otherfacilites>

Gasmet c. Turvallisuus. Viitattu 22.2.2022. Saatavissa <https://www.gasmet.com/fi/sovellukset/turvallisuus/>

Gasmet d. Ympäristö. Viitattu 22.2.2022. Saatavissa <https://www.gasmet.com/fi/sovellukset/ymparisto/>

Glamox, iskunkestävyys. Viitattu 9.2.2022. Saatavissa <https://glamox.com/fi/iskunkestvyys>

maol.fi. Spektroskopiaa -IR NMR ja MS. Viitattu 28.3.2022. Saatavissa [Spektroskopiaa_IR_NMR_MS.pdf \(maol.fi\)](https://maol.fi/Spektroskopiaa_IR_NMR_MS.pdf)

Nikula, M. 2016. Päästömittaus Gasmet FTIR kaasuanalysaattorilla: Laitteen käyttöönotto. Centria-ammattikorkeakoulu. Viitattu 15.4. Saatavissa https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/120395/Nikula_Miia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Nurmi, T. 2020. Näyteseoksen FTIR-spektrien erottelu. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö. Saatavissa https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161045/kandidaatintyo_nurmi_tiina.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Peda.net a. Infrapunaspektroskopia, 2018. Viitattu 28.3.2022. Saatavissa [Ihminen ja elinympäristön kemiaa KE2 LUKU 3.4 IR.pdf \(peda.net\)](https://peda.net/ihminen-ja-elinympariston-kemiaa-ke2-luku-3.4-ir.pdf)

Peda.net b, 2020. Spektroskopia. Viitattu 15.4. Saatavissa <https://peda.net/kuopio/lukiot/kym/oppiaineet/kemia/k2ijek/spektroskopia>

Opetus.tv. Harmoninen voima. Viitattu 7.5.2022. Saatavissa <https://polku.opetus.tv/node/517>

Researchgate.net. Schematic diagram of Michelson interferometer. Haettu 22.2.2022. Saatavissa https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-Michelson-interferometer_fig1_226147743

Salminen, S; Sinikallio, V; Kämppe, V; Infrapunaspektroskopia. Helsingin yliopisto. Viitattu 15.4.2022. Saatavissa https://www2.helsinki.fi/sites/default/files/atoms/files/ir_diaesitys.pdf

Salminen, S; Sinikallio, V; Kämppe, V; Spektroskopia: johdanto. Helsingin yliopisto. Viitattu 15.4.2022. Saatavissa https://www2.helsinki.fi/sites/default/files/atoms/files/spektroskopia_johdanto.pdf

Thermo Fisher Scientific b. 2008—2015, Advantages of a Fourier Transform Infrared Spectrometer, s.2. Viitattu 22.2.2022. Saatavissa <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/CAD/Technical-Notes/tn-50674-ftir-fourier-transform-infrared-spectrometer-tn50674-en.pdf>

Thermo Fisher Scientific a. Introduction to Fourier Transform Infrared Spectroscopy. Viitattu 8.5.2022. Saatavissa <http://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/brochures/introduction-fourier-transform-infrared-spectroscopy-br50555.pdf>