

Eetu Tiiro

KUITUOPTISET LÄMPÖTILA-ANTURIT

paineriippuvuus ja käyttökohteet

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Eetu Tiiri: Kuituoptiset lämpötila-anturit: paineriippuvuus ja käyttökohteet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2022
Tarkastaja: Jussi Aaltonen
Ohjaaja: Kalle Hakonen

Työn tavoitteena oli selvittää kuituoptisten lämpötila-anturien paineriippuvuutta joillekin optisia kuituja käyttäville anturityypeille. Toisena tavoitteena oli esittää mahdollisia käyttökohteita kuituoptisille lämpötila-antureille. Tutkimuksen teoria pitkälti pohjautuu K.T.V. Grattanin ja B.T. Meggittin kirjasarjaan nimeltä Optical fiber sensor technology. Tarkempaa tutkimustietoa on etsitty Andor- ja Scopus-tietokannoista. Tiedot kaupallisista optisia kuituja käyttävistä anturijärjestelmistä on etsitty niitä tarjoavien yritysten omista esitteistä.

Työn alussa lukijalle selostetaan perusteita lämpötilasta, sen mittaamisesta sekä optisista kuiduista. Työssä esitellyt anturityypit ovat FBG, spektrometrinen ja luminesenssiin perustuva anturityppi. Työssä esiteltiin kattavasti ominaisuuksia, jotka erottavat kuituoptiset lämpötila-anturit perinteisistä elektronisista lämpötila-antureista. Kaupallisia edellä mainittuja menetelmiä käyttäviä lämpötilanmittauslaitteistoja käsiteltiin kaksi kappaletta.

Yhdellekään optista kuitua käyttävälle anturityypille ei voitu osoittaa kvantitatiivista paineriippuvuuden arvoa tutkimustiedon puutteen vuoksi. Käyttökohteiksi teknologialle esitettiin vesistöjen ja merivirtojen lämpötilan seuranta, vedenpinnan alainen kaivostoiminta ja suurjännitemuuntajien operointilämpötilan seuranta. Parhain suorituskyky tutkituista antureista oli optista kuitua käyttävällä lämpötila-anturilla, joka käytti lämpötilan aistimiseen Fabry-Perot'in interferometriä. Sillä todettiin olevan hyvä, alle 1 mK:in resoluutio ja sen antamien tulosten todettiin olevan verrattavissa kaupalliseen anturin tuottamiin tuloksiin.

Kuituoptisten anturien paineensietokykyä tutkittiin ja sen todettiin olevan eräälle anturille 7 Mpa:ta. Erittäin korkeita paineita kestävä FP-interferometriin perustuvan lämpötila-anturin hypoteettista toteutusta pohdittiin kuorella suojattuun paineanturiin pohjautuen.

Aiheen lisätutkimus on tervetullutta, jotta voidaan tarkemmin kartoittaa teknologian mahdollisuuksia ja rajoitteita. Paineammiossa suoritettavat testit vaikuttavat olevan välttämättömiä uudenlaisten optisten lämpötila-anturien paineriippuvuuden todentamiseksi.

Avainsanat: lämpötila, anturi, valokuitu, optinen kuitu, FBG, paineriippuvuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUTKIMUSMENETELMÄT	2
3. LÄMPÖTILA-ANTURIEN TOIMINTAPERIAATTEET	3
3.1 Lämpötila ja mittaus	3
3.2 Optiset kuidut	4
3.3 Kuituoptiset lämpötila-anturit	6
3.3.1 Braggin hila-anturit	10
3.3.2 Spektrometrinen mittaus	13
3.3.3 Luminenssiin perustuva mittaus	14
3.3.4 Kaupalliset anturit	15
3.3.5 Useista tunnistinelementeistä koostuvat anturit	16
4. OPTISTEN LÄMPÖTILA-ANTURIEN KÄYTTÖKOHTEET	17
4.1 Valtameren ja merivirtojen lämpötilojen tutkimus	17
4.2 Vedenalainen kaivostoiminta	18
4.3 Suurjännitemuuntajien seuranta	19
5. TULOKSET	21
6. YHTEENVETO	24
LÄHTEET	26

LYHENTEET JA MERKINNÄT

WDM	engl. Wavelength Division Multiplexing, aallonpituutta jakava multipleksaus
TDM	engl. Time Division Multiplexing, aikaa jakava multipleksaus
SDM	engl. Spatial Division Multiplexing, välimatkaa jakava multipleksaus
CDM	engl. Coherence Division Multiplexing, koherenssia jakava multipleksaus
FBG	engl. Fibre Bragg Gratings, Braggin hila
NIST	engl. National Institute of Standards and Technology
BWD	engl. Bragg's wavelength detector, Bragging aallonpituuden tunnistin
FP	Fabry-Perot
n	valon taitekerroin
T	Lämpötila
λ, Λ	Aallonpituus
α	kulma, asteina; myöhemmin terminen diffusiviteetti
ξ	termo-optinen kerroin
R	säde

1. JOHDANTO

Lämpötila on yksi keskeisimmistä suureista, joita aikojen kuluessa on pyritty mittaamaan. Lämpötilan mittaus on aloitettu jo 1600-luvulla, jolloin ensimmäiset laitteet lämpötilan arviointiin on keksitty (McGee 1988; A Brief History of the Temperature Sensor, s. 4–6). Nykyään tätä suuretta mitattaessa voi kyse olla teollisista prosesseista (Jha, 2015 s. 1) tai vaikkapa ympäristön lämpötilan ennustamisesta, niin lyhyellä kuin pitkälläkin aikavälillä. Myös merien lämpötila vaikuttaa maanpäällisiin sääilmiöihin sen lämmönsitomiskyvyn kautta.

Perinteisempien elektronisten, usein resistanssiin perustuvien anturien rinnalle ovat tulleet optisia kuituja niin sanottuja valokuituja käyttävät anturit. Kuituoptisista antureista on kirjoitettu useita kirjoja ja tieteellisiä julkaisuja. Kuituoptisten lämpötila-anturien soveltuvuutta merien lämpötilan tutkimiseen ei ole julkaistu paljoa, eikä olemassa oleva tutkimusaineisto sisällä kattavaa tietoa siitä, mikä on suurin paine, jota kuituoptiset anturit pystyvät sietämään mittausten aikana. Tämä tieto on tärkeää, sillä maksimipaineensietokyky on suoraan yhteydessä suurimpaan syvyyteen, johon anturit voidaan sijoittaa.

Tässä kandidaatintyössä analysoin olemassa olevaa tutkimustietoa, jonka pohjalta esittelen joitakin yleisiä optisia lämpötila-anturityyppejä ja havainnollistan niiden toiminnan perusteita. Pyrin selvittämään, mikä on kuituoptisten lämpötila-anturien paineriippuvuus. Työ esittelee merkittävimmät ominaisuudet, mitkä erottavat optiset anturit perinteisistä sähköisistä antureista. Työn toinen tavoite on tuottaa katsaus tämän hetken kuituoptisiin lämpötilanmittausmenetelmiin ja -antureihin ja arvioida niiden suorituskykyä verrattuna tällä hetkellä käytössä oleviin elektronisiin menetelmiin.

Työ kokoaa yhteen tutkimustietoa kuituoptisten lämpötila-anturien käyttökohteista ja esittelee teknologian vahvuuksia sekä sen haittapuolia muodostaen lukijalle laajan yleiskäsityksen kuituoptisesta lämpötilan mittauksesta. Lisäksi työssä esitellään muutamia kaupallisia mittausjärjestelmiä, jotka soveltavat esiteltyä teknologiaa.

Yleistä tietoa lämpötilasta, mittaamisesta sekä optisista kuiduista annetaan raportin alussa selkeyttämään kuvaa kuituoptisten anturien toiminnasta, niiden vaatimuksista ja niihin vaikuttavista prosesseista. Tutkimuksen ulkopuolelle on rajattu laitteistojen signaalinkäsittely, sillä tämä työ keskittyy optisiin kuituihin aistinelementteinä ja datan välittäjinä.

2. TUTKIMUSMENETELMÄT

Työ on kirjallisuusselvitys. Tietoa on etsitty Andor- ja Scopus-tietokannoista sekä Google scholarista. Ei-tieteellisiä lähteitä, kuten yritysten sivuja on löydetty internet-hakukoneilla esimerkiksi käyttäen hakusanoja ”fiber optic temperature sensor system”.

Työn teoriaosuus pohjautuu pitkälti K. T. V. Grattanin ja B. T. Meggittin kirjoittamaan kuituoptisten anturien kirjasarjaan ”Optical Fiber Sensor Technology”. Sarjasta käytössä ovat olleet ensimmäinen volyymi: Fundamentals, toinen volyymi: Devices and technology, kolmas volyymi: Applications and systems sekä neljäs volyymi: Chemical and environmental sensing. Olen syventänyt aiheiden tietoa käyttämällä lähteinä yksittäisiä tutkimuksia tai konferenssijulkaisuja.

3. LÄMPÖTILA-ANTURIEN TOIMINTAPERIAATTEET

3.1 Lämpötila ja mittaus

Lämpötila on fysikaalinen suure, joka johtuu atomien liikkeestä. Mitä enemmän esimerkiksi metallista esinettä kuumennetaan, sitä enemmän metalliatomit saavat liike-energiaa, joka ilmenee lämpötilana. Lämpötilan mittaaminen on erittäin yleistä niin arkielämässä kuin teollisuudessakin. Saatetaan haluta tietää sisäilman lämpötila, ulkona vallitsevaa lämpötila tai vaikkapa prosessissa käytettävän höyryn lämpötila. Lämpötila onkin yleisin mitattava suure maailmassa. (Wilson, 2004, s. 531)

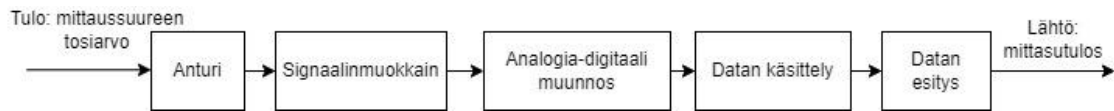
Lämpötilan mittauksen tarkkuus ja luotettavuus korostuvat, kun lämpötilan aistiminen on yhteydessä valmistettavan tuotteen tai palvelun laatuun. Antureilla voidaan pitää silmällä prosessien parametrejä tarkasti turvallisten välimatkojen päässä esimerkiksi kemianteollisuudessa. Lämpötilan mittausta tarvitaan myös erittäin monella alalla, kuten valmistavassa teollisuudessa, ruoantuotannossa ja lääketieteessä. Näiden seikkojen takia lämpötilanmittaus on vuositasolla satojen miljoonien dollarien liiketoimintaa. (Grattan, 2000, s. 87, 133) Tämän arkisen suureen mittaamiseen kohdistettujen investointien rahallinen määrä kertoo lämpötilan tuntemisen tärkeydestä paljon.

Lämpötilan mittaaminen perustuu anturin aistinelementin *fyysiseen muutokseen* lämpötilan vaikutuksesta, joka ilmenee signaalista, joka usein on sähköinen signaali (Jha 2005 s. 5). Mittausprosessin vaiheita havainnollistaa sen prosessikaavio kuvassa 1. Esimerkiksi kaikille tuttu elohopealämpömittari perustuu elohopean tilavuuden muutokseen lämpötilan vaikutuksesta. Signaali tässä yhteydessä olisi näköhavainto tilavuuden muutoksesta eli elohopean sijainti mittarin asteikossa. Itse anturi on nestemäinen elohopea. Lämpömittarin asteikosta voidaan havaita, että tietty tilavuus vastaa tiettyä ympäröivän ilman lämpötilaa. Termodynamiikan 2. pääsäännön mukaan mittausanturi tulee saavuttamaan saman lämpötilan kuin sen ympäristö.

Myös tässä työssä esiteltävät kuituoptiset lämpötila-anturit toimivat samalla peruseriaatteella: optisen kuidun *fyysinen* ominaisuus muuttuu lämpötilan vaikutuksesta, ja tätä muutosta eli signaalia tulkitaan erilaisilla laitteilla kuten interferometreillä.

Mittausjärjestelmiä kalibroitaessa ne voidaan yhdistää jäljitettäviksi kansainvälisiin standardeihin, kuten NIST:iin (Wilson, 2004, s. 30). Jokaiseen mittaukseen sisältyy siis aina tapauskohtainen toleranssi, joka eroaa standardeista. Kalibroinnista huolimatta

mittauksissa esiintyy häiriötä, mikä voi johtua laitteesta itsestään tai mitattavasta prosessista. (Jha, 2005, s. 30)



Kuva 1. Lämpötilan mittauksen prosessikaavio (mukaillen: Tampereen yliopisto, Mittaus(1))

Tilavuus ei ole ainoa fysikaalinen muutos, jonka lämpötila saa aikaan. Lämpötila voi myös muuttaa metallien resistanssia eli kykyä vastustaa niissä kulkevaa sähkövirtaa. Perinteiset lämpötilan mittaussanturit, kuten vastuslämpötila-anturit ja termistorit, joista vastuslämpötila-anturi on yleisemmin käytetty, perustuvat tähän ilmiöön (Jha, 2015, s. 1).

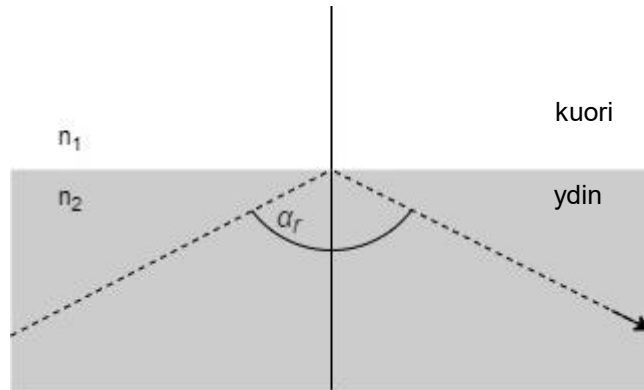
Antureilla on myös muita ominaisuuksia, joiden perusteella voidaan valita sopivimmat eri käyttökohteisiin. Herkkyys määrittää, kuinka paljon anturin lähettämä signaali muuttuu fyysisen parametrin muuttuessa jonkin yksikön verran. Täsmällisyys tarkoittaa satunnaisten virheiden ilmenemistä eli keskiahajontaa. Täsmällisen anturin hajonta on pientä useiden mittausten aikana. Hyvä anturin dynamiikka tarkoittaa anturin nopeutta mitata korkeataajuisia muutoksia. Esimerkiksi korkeataajuiset värähtelyt tarvitsevat korkeataajuisen anturin, jotta fysikaalinen suure ei laskostu signaalissa. Erilaiset suojakuoret ja anturin suuri koko huonontavat lämpötila-anturien dynamiikkaa, sillä ne varastoivat energiaa muun muassa lämpönä tai liike-energiana. Anturien ei siis tulisi vaikuttaa fysikaalisiin ominaisuuksiin, joita ne mittaavat. Lisäksi lämpötila-anturien valintaan vaikuttavat anturin hinta, käytön helppous ja kilpailevien tuotteiden saatavuus. (Dincer et al., 2019, s. 6), Tampereen yliopisto, Mittaus (2))

3.2 Optiset kuidut

Optiset kuidut eli valokuidut ovat tiedonvälitykseen kehitettyjä välineitä, jotka koostuvat ohuesta, läpinäkyvästä lasi- tai muoviytimeistä ja toisesta, myös läpinäkyvästä ydintä ympäröivästä kuoresta. Ydintä ympäröivän kuoren tarkoituksena on mahdollistaa valon kokonaisuheijastuminen. Kuorella on pienempi taitekerroin kuin ytimellä, mikä aiheuttaa valon heijastumisen kahden kerroksen rajapinnalta takaisin ytimeen. Ulompien kerrosten tarkoitus on antaa sisemmille kerroksille suojausta muun muassa kulumista, taittumista ja kosteutta vastaan. (Augousti, Grattan & Parry, 1998, s. 349; *The FOA Reference For Fiber Optics - Optical Fiber*, (viitattu 13.3.2022))

Optisen kuidun toiminta perustuu valon ohjaamiseen ydintä pitkin käyttäen hyväksi valon kokonaisuheijastumista väliaineesta toiseen. Optisen kuidun käyttö tiedonvälityksen

väliaineena mahdollistaa erittäin suurten datamäärien siirron paikasta toiseen pitkien välimatkojen päähän. (Mitschke, 2010, s. 10) Kokonaisheijastuminen ilmiötä havainnollistaa kuva 2.



Kuva 2. Kokonaisheijastuminen (mukaillen Mitschke 2010, s. 16)

Kokonaisheijastuminen tapahtuu, mikäli taitekerroin n_2 on suurempi kuin n_1 . Mikäli valonsäde ei osu ytimen ja kuoren rajapintaan tarpeeksi suurella kulmalla, ei kokonaisheijastumista tapahdu. Kaikki kulmaa α_r suuremmassa kulmassa tulevat säteet heijastuvat takaisin optisesti tiheämpään väliaineeseen. (Mitschke, 2010, s. 16)

Kokonaisheijastumisen matemaattinen kaava on

$$\sin \alpha_r = \frac{n_1}{n_2}, \quad (1)$$

jossa α_r on valon kriittinen tulokulma ja n_1 ja n_2 ovat väliaineiden valon taitekertoimia.

Valokuidut voidaan luokitella monimuoto- sekä yksimuotokuituihin. Yksimuotokuidulla on pieni, vain 9 mikrometrin ydin, jolla on yksi taitekerroin. Monimuotokuidun ydin on suurempi, 50 mikrometriä, ja näin se voi kuljettaa useampaa sädettä (moodia tai muotoa) samaan aikaan kun yksimuotokuitu pystyy vain yhtä. Monimuotokuidut voidaan edelleen jaotella niiden ytimen taitekertoimen avulla. Asteittaisindeksikuidussa ytimellä on yksi taitekerroin. Asteittaisindeksikuidulla on useampia taitekertoimia ytimessään, keskellä suurin, reunoilla pienin. Koska yksimuotokuidussa ei kulje useita valon aallonpituuksia, ei siinä tapahdu muotodispersiota. (*The FOA Reference For Fiber Optics - Optical Fiber*, verkkosivu, saatavissa: (viitattu 13.3.2022))

Heijastuminen valokuidussa ei kuitenkaan ole täydellistä ja siksi myös valokuidun sisällä kulkeva signaali heikkenee pitkien välimatkojen aikana. Monimuotokuiduilla suurin datanlähetyksen matka on satoja metrejä ilman signaalinvahvistimia. Monimuotokuiduissa ei myöskään voida kuljettaa mukana valon polarisaation suuntaa eikä vaihetta. Yksimuotokuiduilla lähetyksen matka on pidempi, jopa kymmeniä kilometrejä. (Uzairue et al., 2018)

Signaalin heikkenemistä aiheuttavat valon siroaminen kuidussa, muotojen eli moodien vuoto, kuidun mikro-, sekä makrotaittumiset, muotodispersio sekä valon säteily ulos ytimestä. Kuiduille on mahdollista laskea kriittinen taittumissäde R_t , jota pienemmillä taittumissäteillä signaalit kuidussa säteilevät ulos erittäin voimakkaasti. (Meggitt & Grattan, 1995, s. 28–30) Kriittisen taittumissäteen kaava on:

$$R_t = \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

jossa n_1 ja n_2 ovat ytimen ja sitä ympäröivän kuoren taitekertoimet ja λ optisessa kuidussa liikkuvan säteen aallonpituus.

Lasiytimisissä yksimuotokuiduissa kulkevilla signaaleilla voi olla alhainen, jopa 0.2dB/km tai pienempi vaimeneminen. Yksimuotokuitujen datansiirtomatkat ovat pidemmät kuin monimuotokuitujen. (Grattan & Meggitt, 1999, s. 17; Mitschke, 2010, s. 76) Yksimuotokuidun käyttö teollisuudessa on harvinaisempaa, sillä kuidun ytimen pieni halkaisija vaatii asennuksessa erittäin suurta tarkkuutta. Nämä seikat nostavat huoltotöiden kustannuksia ja niihin käytettävää aikaa. (Chen et al., 1992)

Optisilla kuiduilla on myös merkittävä mittakaavaetu verrattuna sähköiseen kommunikaatioon. Tietoa eli kaapeleissa kulkevaa signaalia voidaan multipleksoida, mikä tarkoittaa useamman aallonpituuden lähettämistä saman optisen kuidun kautta niiden interferoimatta toistensa kanssa. (Kiniry, 1998) Signaalien multipleksaus voi perustua signaalien erottelemiseen ajan (TDM), aallonpituuden (WDM), taajuuden (FDM), välimatkan (SDM), tai koherenssin perusteella (CDM). (Augousti, Grattan & Parry, 1998, s. 133–154)

Kaupallinen OM3-monimuotokuitu on sisätiloihin sijoitettava tiedonsiirtoon suunniteltu kuitu, jonka ytimen halkaisija on 50 mikrometriä ja kuoren halkaisija 125 mikrometriä. Sitä suojaava kuori on valmistettu palamattomasta LSZH-materiaalista (low smoke zero halogen), joka jakelijan mukaan on palonkestävää eikä palaessaan eritä myrkyllisiä kaasuja (*Oy Nylund Group*, verkkosivu, saatavissa: (viitattu 21.2.2022) www.blackbox.fi). Optisten kuitujen raaka-aineet ovat halpoja, ja siksi kuitujen hinta on alhainen (Mitschke, 2010, s. 7).

3.3 Kuituoptiset lämpötila-anturit

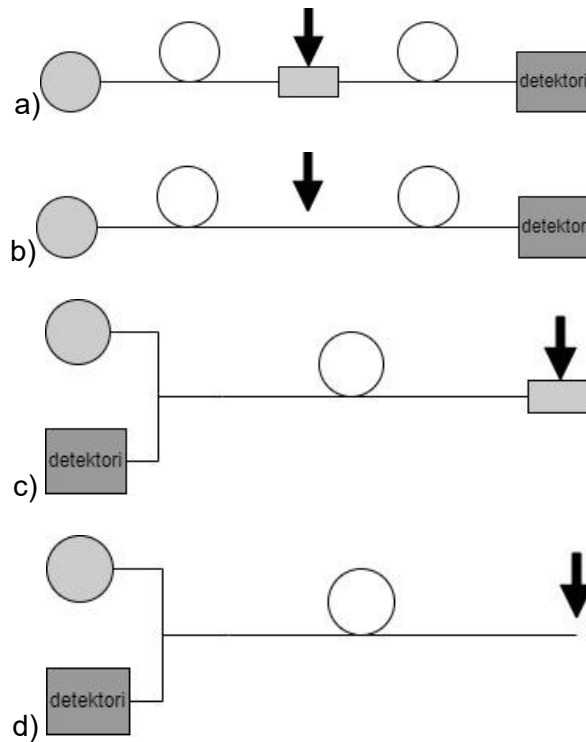
Kuituoptiset anturit ovat laitteita, jotka moduloivat optista tulosignaalia mitattavan suureen (fysikaalisen, kemiallisen, tai muun) mukaan, sillä tavalla, että mitattavan suureen arvo on luettavissa lähtösignaalista sen prosessoinnin jälkeen. (Augousti,

Grattan and Parry, 1998, s. 20) Ensimmäiset yritykset mitata lämpötilaa optisten kuitujen avulla sijoittuvat 60-luvulle, jolloin ensimmäiset nykykäsityksen mukaiset kuituanturit saapuivat markkinoille. Myöhemmin aikoina, kehittyneempien optisten laitteiden kuten kuitujen, valonlähteiden ja liitinten keksimisen jälkeen optiset anturit ovat kehittyneet huomattavasti. Tämän lisäksi laaja aiheesta tehty kirjallisuus on tukenut optisten anturien kehitystä. Perinteisen lämpötilan mittauksen lisäksi optisin keinoin suoritettu hajautettu mittaus voi antaa uniikkia informaatiota, joihin muut lämpötilanmittausmenetelmät eivät kykene.

Kuituoptiset lämpötila-anturit ovat siis fysikaalisia suureita mittaavia antureita, jotka käyttävät aistinelimenään tai datan välittäjänään optisia kuituja. Antureiden tulosignaali lähetetään laitteesta optiseen kuituun, jossa sijaitsee sisäisiä tai ulkoisia antureita. Kuituoptiset anturit luokitellaan muokkaimiksi, sillä ne eivät tarvitse erillistä virtaa signaalia muokatakseen. (Tampereen yliopisto, Mittaus (2))

Koska optisilla kuiduilla on erittäin paljon lämpötilariippuvia ominaisuuksia, on lämpötila-antureissakin huomattavan paljon diversiteettiä, toisin kuin elektronisissa antureissa, joista yleisesti käytettyjä anturityyppejä on seitsemään. Optisia antureita oli vuonna 1999 jo 150 erilaista, joista 28 olivat lämpötila-antureita. Eri mittausjärjestelmät perustuvat erilaisiin ilmiöihin kuten valon intensiteettiin, aallonpituuteen, polarisaatioon tai vaiheeseen. (Grattan & Meggitt, 1999, s. 5–6,9,133)

Antureita voidaan lajitella sen perusteella, että onko aistiva elementti kuitu itse vai onko anturi liitetty kuituun ja kuitu näin toimii vain signaalin välittäjänä. Kuidun aistiessa lämpötilaa jollain menetelmällä käytetään anturista nimitystä sisäinen. Kun anturi on kuidun toisessa päässä tai yhdistettynä kahteen kuituun niiden välissä, on anturi ulkoinen. Esimerkiksi Braggin hiloja käyttävissä antureissa lämpötilariippuvat heijastukset tapahtuvat kuidun sisällä, joten tällaiset anturit olisivat sisäisiä. On huomattavaa, että jos anturi on sisäinen, on valokuitu samaan aikaan sekä anturi, että tiedon välittäjä. Antureita voidaan myös jaotella niillä perusteilla, kulkeeko signaali kuidun läpi, vai tapahtuuko toisessa päässä heijastuminen. Nämä eri jaottelut ilmenevät kuvasta 3. Heijastuminen luonnollisesti vaatii, että signaali ohjataan erillisellä optisella komponentilla detektoriin. Anturi on siis heijastava tai läpäisevä.



Kuva 3. mittausjärjestelmä, jossa a) läpäisevä ulkoinen anturi, b) läpäisevä sisäinen anturi, c) heijastava ulkoinen anturi, d) heijastava sisäinen anturi (mukaillen Mitschke 2010 s. 249)

Kuituoptyisilla antureilla kerrotaan olevan korkeat dynaamiset ominaisuudet. Tutkimustulokset kertovat anturien hystereesin olevan pientä ja vasteen olevan lineaarinen (Dengpan, Wang & Yongjie, 2018). Myös anturien vasteajan nähdään olevan pieni, vain millisekuntien luokkaa (Hou, Liu & Han, 2015). Pienempi vasteaika sallii mittauksessa korkeamman taajuuden ja näin ollen mittauksessa voidaan havaita nopeampia muutoksia.

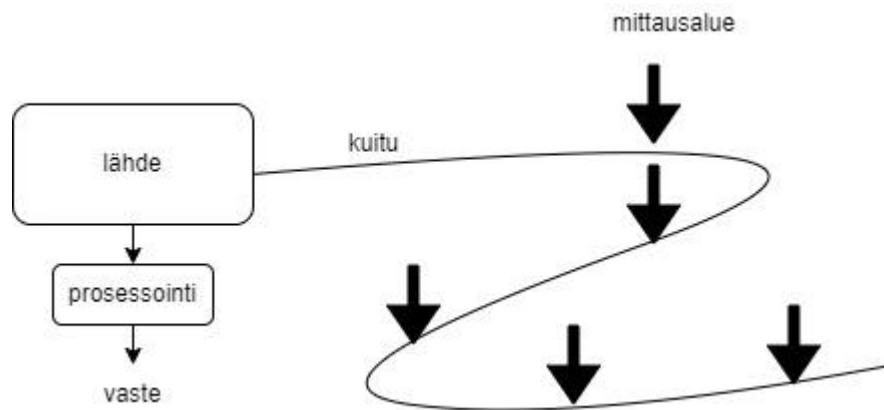
Kuituoptyiset anturit eivät myöskään reagoi elektromagneettisiin häiriöihin. Koska optisten anturien kautta ei kulje ollenkaan virtaa eivät sähkökentät näin aiheuta elektromagneettisia häiriöitä mittaustuloksiin. (Grattan, 2000, s. 1) Koska elektromagneettinen häiriö ei vaikuta mittaustulokseen voidaan anturi asettaa havaitsemaan suurten muuntajien lämpötilaa. (Grattan & Meggitt, 1999, s. 15,133)

Optisten kuituanturien lähettimet sekä lukijat kuten interferometrit voidaan sijoittaa pitkien lähetyksmatkojen ansiosta kauas itse mitattavan suureen luolta, tehden huoltotoimenpiteet helpommaksi. Anturien luku voidaan myös suorittaa etäältä, jos mittauspaikalle pääsy on vaikeaa tai vaarallista (Grattan & Meggitt, 1999, s. 133)

Multipleksauksen ansiosta samaa kuitua voidaan käyttää yhden kuin myös useammankin suureen mittaamiseen. Mikäli halutaan tietää yhden pisteen useampaa

suuretta esimerkiksi paine ja lämpötila, voidaan optiset paine- ja lämpötila-anturit sijoittaa toistensa viereen ja multipleksoida signaali. Tämän kerrotaan kuitenkin olevan harvinaisempaa. Usein multipleksausta hyödynnetään saman suureen mittaamiseen kuidun matkalta eri paikoista. (Augousti 1998, s. 157)

Laajojen yksi- kaksikulotteisten alueiden lämpötilan mittaus on mahdollista suorittaa vain yhden kuidun avulla, mikäli sovelletaan Distributed Sensing, DS, suomeksi hajautettu mittaus tekniikkaa, jossa kuituun asetetaan sisäisiä tai ulkoisia antureita useaan kohtaan. DS-tekniikan mukaiset anturit voivat olla esimerkiksi FBG-antureita, jotka ovat valmistettu samaan kuituun kuten esimerkiksi kuvassa 4. Tekniikkaa voidaan käyttää esimerkiksi boilerien, paineastioiden, öljy- ja kaasuputkien ja suurten muuntajien lämpötilan tarkkailuun. DS-systeemillä, jossa kuituna toimi neodyymillä kyllästetty 140 metrin pituinen kuitu, jolla pystyttiin havaitsemaan lämpötiloja 15 metrin välein. (Grattan & Meggitt, 1999, s. 4, 15, 133, 174; Grattan, 2000, s. 2–4, 14, 20–21)



Kuva 4. hajautettu mittaus, nuolet edustavan pistemittauksia (mukaillen Grattan 2000 s. 3)

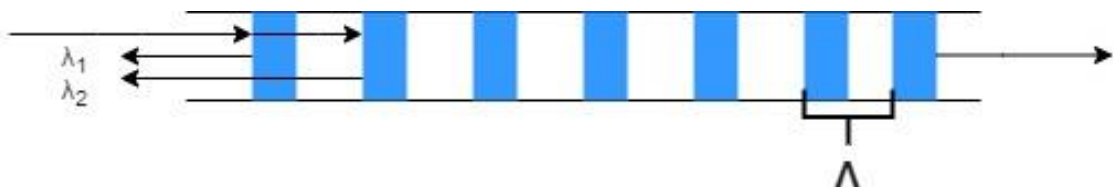
Kuituoptiset anturit eivät kuitenkaan ole immuuneja kaikille vioille eivätkä ne sovi joka käyttötarkoitukseen. Teknologialla on muun muassa seuraavia haittapuolia. Tietoliikennekuidut eivät usein sovi anturien osiksi ytimen halkaisijan takia. Kuitujen taipuminen aiheuttaa valon intensiteettiin perustuvissa antureissa häiriöitä taipumishäviöiden takia. Laserlaitteiden ominaisuudet eivät aina riitä mittausjärjestelmille asetetuille vaatimuksille. Tyypillisten optisten kuitujen lämmönkestävyys on alhainen vain noin 100–150 celsiusastetta. Ulkoisten anturien asentaminen optisiin kuituihin ei aina ole luotettavaa. (Grattan & Meggitt, 1999, s. 7) Joihinkin mittaustekniikoihin käytetyt kyllästetyt kuidut ovat kalliita. Optisten anturien periaatteita tai käyttöä ei välttämättä tunneta asiakasyrityksissä, joiden

mittausjärjestelmät ovat aiemmin perustuneet esimerkiksi elektronisiin antureihin. (Grattan & Meggitt, 1999, s. 7)

Optiset anturit ovat herkkiä ympäristön häiriöille pois lukien elektromagneettiset häiriöt. Myös itse kuidut ovat myös hauraita. (Dincer et al., 2019) Yksimuotokuidut ovat herkkiä lämpötilan vaihteluille. Yksimuotokuituja käyttävät anturit ovat stabiileja sekä niiden vaihehäiriö ei ole suuri. Referenssikuidun käyttö yksimuotokuiduilla on yleistä, sillä monet mittausjärjestelmät perustuvat vaihe-eroon. Interferometreihin voi välittyä virhettä, mikäli kuitujen tarkkaa pituutta ei tiedetä. Nämä vaikutukset on pyrittävä minimoimaan sekä kompensoimaan. (Grattan 1995 s. 197)

3.3.1 Braggin hila-anturit

Eräs interferometrinen optinen mittausmenetelmä lämpötilan mittaamiseen on Braggin hilojen (engl. Fibre Bragg Gratings, FBG) käyttäminen kuidun sisäisesti. FBG-anturit ovat siis sisäisiä antureita. Kuituun sijoitettu Braggin hila tarkoittaa lyhyttä taitekertoimeltaan muokattua muutamien millimetrien tai senttimetrien osuutta germanium-puolimetallilla kyllästetyn yksimuotovalokuidun ytimestä. Taitekertoimeltaan muokattua osuutta esittää kuvassa 5 sininen väri.



Kuva 5. FBG-anturin rakenne.

Braggin hilat saavat tietyt hilalle ominaiset valon aallonpituudet heijastumaan tulosuuntaansa. Hilan aiheuttama takaisinheijastuvan aallon spektri on ympäristön muutoksille kuten lämpötilalle sekä kuormitukselle herkkiä. Lämpötilan muutos aiheuttaa muutoksia myös hilan pituuteen, mutta tämä vaikutus on termo-optista vaikutusta huomattavasti pienempi, eikä näin vaikuta mittaustuloksiin merkittävästi. Braggin hilat ovat siis aallonpituutta moduloivia antureita. (Augusti 1998, s. 132, 350; Mitschke, 2010, s. 124)

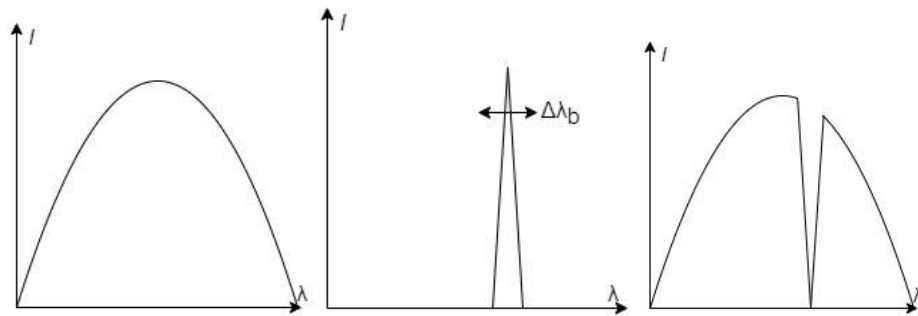
Takaisinheijastuvan säteen aallonpituus eli Braggin aallonpituus voidaan esittää kaavalla

$$\lambda_b = 2n\Lambda, \quad (3)$$

jossa Λ on hilojen välimatka, n on moduloidun optisen kuidun taitekerroin. Takaisinheijastuvan aallonpituuden λ_b suuruus riippuu kuidun lämpötilasta sekä kuormituksesta. Kuva 6 havainnollistaa Braggin aallonpituuden siirtymää, sekä niitä valon säteitä, jotka tulevat anturille ja niitä, jotka jatkavat matkaansa eteenpäin kuidussa. FBG-antureilla on mahdollista mitata myös kuormitusta. Keskimääräisen aallonpituuden siirtymä on suuruudeltaan:

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b(1 - \xi)\Delta T, \quad (4)$$

jossa ξ on optisen kuidun termo-optinen kerroin ja ΔT on lämpötilan muutos. Kuva 6 havainnollistaa braggin aallonpituuden siirtymää. Mittaus perustuu termo-optisen kertoimen muuttumiseen lämpötilan vaikutuksesta. Optisten kuitujen termo-optisen kertoimien arvot ovat välillä 30–40ppm/K. (Augousti 1998, s. 132–133; Mitschke 2010, s. 251–252)



Kuva 6. Vasemmalla: laajakaista valonlähteen spektri, keskellä: heijastuvan säteen spektri eli Braggin aallonpituus, oikealla: FBG-anturin läpäisseen säteen spektri. (mukaillen Grattan, 2000 s. 21)

Hilat kestävät 300 celsiusasteen lämpötilan muuttumattomina, eli ne ovat stabiileja kyseiseen lämpötilaan saakka. Hajautetussa mittauksessa on mahdollista käyttää Braggin hiloja lämpötilan aistimiseen laajoilta alueilta. Samassa kuidussa sijaitsevat braggin hilat, jotka ovat erotettu välimatkaltaan toisistaan, erotetaan myös niin, että jokaisen pisteen hilat tuottavat eri aallonpituuksia Braggin heijastuksen tapahtuessa. Menetelmässä hyödynnetään siis multipleksausta, koska eri signaalit kulkevat samassa optisessa kuidussa. Multipleksaus hila-antureiden tapauksessa voi perustua aallonpituuteen, anturien välimatkaan (SDM) tai signaalien saapumisajan erotukseen (TDM). (Meggitt & Grattan, 1995, s. 307–310; Augousti 1998, s. 355–356; Mitschke, 2010, s. 251–252)

Aallonpituuksien erottamisella (wavelength division multiplexing) tarkoitetaan, että jokaisen anturin Braggin aallonpituus on omalla kaistallaan, eli sillä on oma aallonpituusalue. Tämä menetelmä on yleinen hila-antureita käytettäessä, mutta se vaatii laajakaistaisen laserin. (Grattan, 2000, s. 21–22).

Stabiilius in hila-antureille tyypillinen piirre. On havaittu, että suurin osa hilan heijastumisen tehosta häviää nopeasti, jonka jälkeen anturista tulee stabiili. Valmistajat hehkuttavat antureitaan päästäkseen eroon nopeasti tapahtuvasta heijastuksen häviöstä stabiloidakseen niitä. Sisäiset hilat ovat stabiileja noin 300 C saakka. (Augousti 1998, s. 348–349, 366)

Hiloja voidaan valmistaa lähettämällä kuituihin muutaman minuutin ajan voimistuvaa signaalia, joka heijastuu kuidun toisesta päästä. Signaali siis interferoi itsensä kanssa puolikkaan aallonpituuden välein. Tämän menetelmän haittapuolia on se, etteivät hilat heijasta tehokkaasti muita aallonpituuksia, kuin niitä mitä hilojen valmistukseen on käytetty. Ulkoiset hilojen valmistustekniikat ovat syrjäyttäneet tämän sisäisen tekniikan. Hilojen käyttö antureissa on yleistynyt ulkoisten valmistustekniikoiden myötä.

Ulkoisia valmistusmenetelmiä on kolmea erilaisista: Holografinen, litografinen ja ”point-by-point”-menetelmä. Holografista menetelmää käytettäessä koherenttia UV-valoa interferoidaan kuidussa, jolloin voidaan ”kirjoittaa” kuituun hila. Braggin aallonpituutta λ_b voidaan muunnella UV-valon aallonpituutta tai säteilytyskulmaa muuttamalla. Se siis on paljon joustavampi menetelmä kuin aiemmin käsitelty sisäinen menetelmä. Litografiamenetelmällä hilojen valmistaminen on luotettavampaa, koska tässä menetelmässä ei käytetä liikkuvia peilejä säteen ohjaamiseen niin kuin edellä mainitussa holografiassa menetelmässä, vaan piilevyä, jonka taakse kuitu sijoitetaan. ”point-by-point”-menetelmässä kuitua käsitellään laservalolla yksi kohta kerrallaan. (Augousti 1998, s. 132–133, 344–348)

Myöskin braggin hiloilla on mahdollista mitata useampaa suuretta samaan aikaan, mikäli tulkitaan saman hilan heijastamaa kahta aallonpituutta, ensimmäistä heijastusta, sekä toista harmonista aaltoa. Toinen harmoninen aalto on usein heikko, mikä lisäksi heikentää tämän tekniikan soveltamista mittauksiin. Kahden aallonpituuden kuljettaminen yksimuotokuidussa on vaikeaa ilman suuria häviöitä. On kuitenkin käytännöllisempää valmistaa kuituun lähekkäin kaksi Braggin hilaa, joiden takaisinheijastuvan säteen aallonpituus λ_b on eri. (Augousti 1998, s. 160–161)

Braggin hilat tuottavat lineaarisen vasteen, jolla on hyvä hystereesi. Joissain toteutuksissa Braggin hila-antureita käyttämällä on saavutettu sellainen herkkyys, jolla Braggin aallonpituuden siirtymä on muutamia kymmeniä pikometrejä per celsiusaste (Li

et al., 2016; Dengpan 2018). Braggin hila-antureiden sovelluksiin kuuluu muun muassa hajautetut mittausjärjestelmät (Augousti 1998, s. 355,370–373).

Braggin hiloilla on ominaisuuksia, jotka erottavat ne muista optisista kuituanturitekniikoista. Koska mittaustulos on Braggin aallonpituuden tulkintaa, ei mittaus ole herkkä laserlaitteiden häiriöille tai niissä tapahtuvalle kohinalle. Anturin minimaalisen koon sen sisäisyyden myötä se voidaan sijoittaa useampiin käyttökohteisiin. Niiden hinta on kilpailukykyinen elektronisten anturien kanssa. Antureilla on todella alhainen yhden mikrosekunnin vasteaika. (Augousti 1998, s. 366)

3.3.2 Spektrometrinen mittaus

Termo-optista kerrointa voidaan hyödyntää monilla tavoilla. Yksi tapa on yhdistää optiseen yksimuotokuituun pieni piistä valmistettu kristallirakenteinen kalvo, jonka avulla on mahdollista käyttää piin termo-optista sekä termoelastista kerrointa lämpötilojen mittaukseen. Liittämällä piikalvo yksimuotokuidun päähän, muodostuu siihen Fabry-Perot'in interferometri.

FP-interferometri on optinen rakenne, jossa sijaitsee kaksi toisiaan kohtisuorasti olevaa heijastavaa pintaa. Onkalon pituus vaikuttaa takaisinheijastuvaan signaalin vaiheeseen, joka interferoi ennen onkaloa sijaitsevasta heijastavasta pinnasta takaisinlähetettyyn signaalin osaan (Zhao et al., 2017). FP-interferometriä ei tule sekoittaa signaalinkäsittelylaitteisiin, joita myös kutsutaan interferometreiksi. FP-interferometri on siis rakenne kuituoptisessa anturissa.

Lämpötilan muutokset aiheuttavat optisen paksuuden muutoksia FP-interferometriin. Nämä muutokset vaikuttavat takaisinheijastuvan aallon spektriin. Myös onkalon pituus muuttuu lämpötilan muuttuessa. Anturi on siis ulkoinen ja heijastava. Koska piikalvosta heijastuvan valon aallonpituus muuttuu, toimii signaalinkäsittelylaitteena spektrometri. Heijastuvan signaalin aallonpituutta voidaan mallintaa matemaattisesti yhtälöllä

$$N\lambda_N = 2nL, \quad (5)$$

jossa λ_N on heijastuva aallonpituus, n on onkalon valon taittokerroin, N on heijastetun aallonpituuden minimin kertaluku ja L on FP-interferometrin pituus. (Hunger et al., 2010; Hou, Liu & Han, 2015)

Koska pii johtaa lämpöä hyvin ja kappale on massaltaan pieni, muuttuu myös heijastusspektri nopeasti ja saavutetaan nopea vasteaika. Antureita voitaisiin suojata

esimerkiksi muovi- tai keraamikuorilla, mutta se hidastaisi vasteaikaa. Pienet, massaltaan ja kooltaan pienet anturit ovat ihanteellisia kaikissa tapauksissa, sillä ne eivät aiheuta häiriöitä prosesseihin, joita ne mittaavat. Taulukko 1 sisältää piin sekä muiden yleisesti käytettyjen anturimateriaalien lämpötilanjohtavuuskertoimet.

Taulukko 1: Yleisien lämpötila-antureissa käytettävien materiaalien terminen diffuusiokerroin tai niin sanottu ”lämpötilanjohtavuuskerroin”, muokattu lähteistä (material-properties.org - *Platinum - Herman Properties - Melting Point - Thermal Conductivity; Engineers Edge-Thermal Diffusivity Table*)

Materiaali	terminen diffuusiokerroin (mm^2/s)
Pii, Si	88
Kulta, Au	127
Platina, Pt	25
Kupari, Cu	111

FP-interferometriin perustuvalla, piistä valmistetuilla valokuituantureilla on saavutettu nopea, kahden millisekunnin vasteaika, joka vastaa 500 Hz mittaustaajuutta, sekä 84 pm/K herkkyys. Mittausjärjestelmän resoluutioksi saatiin 0.9 mK. Anturi oli valmistettu liimaamalla ohut piistä valmistettu peili yksimuotokuidunpäähän, jossa kuidun katkaistu pää, sekä liitetty peili muodostivat FP-interferometrin. (Hou 2015) FP-interferometriin perustuvilla, kuten muillakin kuituoptyisilla antureilla on hyvä hystereesi, vain 0.01 %, ne ovat stabiileja sekä niillä on hyvä toistettavuus.

Saman kaltaista tekniikka voidaan myös käyttää asettamalla jokin valon aallonpituutta absorboiva aine optisen kuidun halkaistun pään ja dielektrisen peilin väliin. Tässä tapauksessa takaisinheijastuvaan aallonpituuteen vaikuttaa valon absorboivan aineen lämpötila. Myöskään spektrometriset mittausjärjestelmät eivät kärsi taitehäviöitä aiheutuvasta häiriöstä, sillä mitattava suure, aallonpituus on absoluuttinen suure. Tämä eliminoi muun muassa laserlaitteista peräisin olevia häiriöitä.

3.3.3 Luminenssiin perustuva mittaus

Luminesenssiin perustuva optinen mittaus perustuu säteilytettävän aineen, niin sanotun ”fosforin” elektronien energiatiloihin. Molekyylejä voidaan virittää fotoneilla, josta voi

seurata elektronin nouseminen suurempaan ja spontaani lasku matalampaan energiatilaan, jonka seurauksena syntyy säteilyä, jota tulkitaan detektorilla. (Grattan & Meggitt, 1999, s. 134–135)

Optisella kuidulla ohjataan valoa anturiin, jonka koostuu aineesta, jonka elektronien viritystilat pystytään virittämään valonlähteellä. Yksi tämän tyyppisiin käytetty materiaali on galliumarsenidi, GaAs. Galliumarsenidi on yleisesti tietotekniikassa ja optiikassa käytössä oleva puolijohde. Viritystilan purkautuessa syntyvä valonsäde ohjataan optiseen kuituun, jossa se päättyy detektoriin. Galliumarsenidin säteilyspektrin tiettyjen aallonpituuksien intensiteetti on galliumarsenidikiteen lämpötilasta riippuva suure, jota tulkitaan spektrometrin avulla. Koska fosfori on sijoitettu kuidun ulkopuolelle, on anturi ulkoinen ja heijastava. (Meggitt & Grattan 1995, s. 445–446; Rai, 2007; Mitschke, 2010 s. 251)

Vineet Kumar Rai suosittelee käyttämään kahta eri aallonpituusaluetta lämpötilan havainnointiin ja muodostamaan lämpötila-arvion näiden kahden aallonpituuden spektrien funktiona, koska joillain aallonpituuksilla absorptio anturissa lisääntyy lämpötilan noustessa. Absorption lisääntyminen johtaa fotoluminesenssin eli tulkittavan signaalin heikkenemiseen. (Rai, 2007,)

Luminenssiin perustuvien anturien maksimilämpötila on noin 200 celsiusastetta eli tyypillinen optisille kuituantureille. Niiden tarkkuus on yhden celsiusasteen luokkaa. (Meggitt & Grattan, 1995, s. 446–448)

3.3.4 Kaupalliset anturit

Markkinoilla on kaupallisia kuituoptisia lämpötilan mittausjärjestelmiä, joihin markkinoilla toimivat yritykset usein toimittavat antureita ja signaalinkäsittelylaitteistoja. (Engonic, Micronor sensors)

Esimerkiksi Engonic-niminen saksalaisyritys toimittaa M-kokoista kuituoptista lämpötilanmittausjärjestelmäänsä hintaan 13 160 euroa. Järjestelmä sisältää neljä kuituanturihaaraa, joista jokaisessa on kymmenen FBG-anturia. Järjestelmässä on siis 40 lämpötilaa aistivaa pistettä. Anturien välimatkat ovat räätälöitävissä asiakkaan tarpeisiin. Engonic lupaa anturien maksimi käyttölämpötilan olevan 300 celsiusastetta. Keskusyksikkö on ohut 20x30cm laatikko, johon neljä optista kuitua yhdistetään.

Engonic ilmoittaa mittausjärjestelmiensä sovelluksiksi prosessiteollisuuden, ilmailuteollisuuden, öljy- ja kaasuteollisuuden, suurten rakenteiden kuten tuuliturbiinien,

patojen ja tunnelien kunnonvalvonnan, ydinvoimaloiden lämpötilan mittauksen ja lääketieteeseen.

Yhden aistinpisteen hinnaksi tulee Engoinicin mukaan 329 euroa. Engoinic valmistaa FBG-anturinsa point-by-point prosessia hyödyntäen. Anturien herkkyydeksi ilmoitetaan 12 pikometrin braggin aallonpituuden siirtymää yhden celsiusasteen muutosta kohti. Vasteajaksi on ilmoitettu 100 millisekuntia. Tarkimman ST150 Standard-anturin tarkkuus on +/- 0.5 celsiusastetta.

Micronor sensors on yhdysvaltalainen yritys, joka valmistaa monenlaisten kuituoptisten antureiden ja laitteistojen lisäksi TS-sarjaksi nimettyjä galliumarsenidiantureita lämpötilan mittaukseen. Antureita on kuusi erilaista, jotka eroavat käyttökohteiltaan. Micronorin tarjoamat anturit sopivat prosessiteollisuuteen, muuntajiin, lääketieteellisiin tarkoituksiin sekä säteilyä sisältäviin tiloihin. Micronor ei ilmoittanut laitteistojensa hintaa tuote-esitteissään. (Micronor kotisivut)

Antureiden käyttöalue on -200 celsiusasteesta, +200 tai +300 celsiusasteeseen. Jokaiselle anturille luvataan yrityksen esitteiden mukaan +/- 0.2 celsiusasteen tarkkuutta ja 2–10 sekunnin vasteaikaa, mikä on verrattain korkea lämpötila-antureille.

3.3.5 Useista tunnistinelementeistä koostuvat anturit

Kappaleen 3.3 alaotsikoissa käsitellyt menetelmät eivät sido mittausjärjestelmää vain kyseisen anturin käytölle. Todellisuudessa, kuten edellä sanottua, voidaan yhdellä kuidulla mitata useita suureita. Samaa suuretta voidaan mitata kahdella tai useammalla anturilla.

Esimerkeiksi nostan germanium-kalvoon perustuvan ulkoisen ja heijastavan anturin, joka määrittää lämpötilansa sekä termo-optisen kertoimen, että lämpötilariippuvan absorption avulla (Li & Li, 2011), kuituoptisen samanaikaisesti lämpötilaa ja painetta FBG-tekniikalla ja akustisia signaaleja Michaelsonin interferometrillä havaitsevan anturin (Liu et al., 2018) ja FBG:n avulla lämpötilakompensoidun ulkoisella FP-interferometrillä varustetun paineanturin. (Duraibabu et al., 2014)

4. OPTISTEN LÄMPÖTILA-ANTURIEN KÄYTTÖKOHTEET

4.1 Valtameren ja merivirtojen lämpötilojen tutkimus

Tämä kappale ja sen alaotsikot käsittelevät kuituoptisten lämpötila-anturien soveltuvuutta merien lämpötilan seurantaan. Kappaleessa käsitellään vesistöihin sijoitetuille antureille asetettuja vaatimuksia.

Lämpötila on yksi useimmin mitatuista parametreistä, kun kerätään tietoa merien tilasta. Lämpötilan tunteminen on tärkeää sekä meteorologisten ilmiöiden ennustamisen kannalta. Nykyään voitaisiin olla kiinnostuneita ilmastonmuutoksen vaikutuksesta merivirtoihin, tai merien lämpötilaan. Maailman merien lämpötilojen jakauma on kapea, negatiivisesta kahdesta celsiusasteesta noin positiiviseen 35 celsiusasteeseen. Mittauksia vaikeuttavat merien ankarat olosuhteet, mittaustulosten etäluenta, ruostuminen, virtajohtojen tehohäviöt ja vaatimuksen nopealle vasteajalle hyvän lämpötilaprofiilin saamiseksi. Stabiilius on hyvä ominaisuus antureille, kun mittaukset ajoittuvat laajoille ajanjaksoille. (Dauphinee, 1983)

Jopa neljäkymmentä prosenttia maapallon lämpöenergiasta on sitoutuneena meriin. Tällä energialla on suurta vaikutusta sääilmiöihin, sekä ilmastonmuutokseen. Jopa 3000 metrin syvyydessä oleva lämpö vaikuttaa sääilmiöihin ja on siksi tärkeää saada dataa riittävän syvältä merestä, korkean paineen alta. (Kouketsu et al., 2011)

Lähes kaikki merissä käytettävät anturit olivat vuonna 1983 Dauphineen mukaan termistoreja ja niillä on vaikeuksia suorittaa tarkkoja mittauksia niiden vasteen epälineaarisuuden vuoksi. Lisäksi niillä on tapana olla epästabiileja ajan kanssa. Arvioin, ettei tämä tieto nykyään pidä enää paikkaansa. Muun muassa tässä työssä mainittu SBE35-anturi on termistoriin pohjautuva elektroninen lämpötila-anturi.

Kuituoptisia antureita on kehitetty merenalaiseen käyttöön muun muassa hydrofoneiksi sekä lämpötilan, paineen ja veden suolaisuuden mittaamiseen. (Hou, Liu & Han, 2015; Liu et al., 2018)

Valtamerien lämpötilaa tutkiessa on tärkeää, että anturi pystyy suorittamaan mittauksia korkeasta paineesta huolimatta. Antureiden on näin täytettävä joitain vaatimuksia, jotka määräytyvät niiden toimintaympäristön mukaan. Anturit tarvitsevat siis riittävän paineensietokyvyn sekä niiden vasteen paineriippuvuus täytyy olla tunnettu tai pieni. Koska merien lämpötilojen muutokset, joista ollaan kiinnostuneita ovat pieniä, vaaditaan

antureilta näissä käyttötarkoituksissa suurta herkkyyttä. Optisia kuituja voidaan suojata paineelta, kuten on tehty mannertenvälisille valokuitukaapeleille, mutta itse anturit joutuvat kokemaan korkeita paineolosuhteita.

Anturit eivät saa sisältää osia, jotka voivat ruostua merivedessä. Anturien tulee olla stabiileja, eli niiden toiminta ei saa muuttua pitkien aikojen esimerkiksi huoltovälien aikana. Anturien tulee toimia pienellä teholla, esimerkiksi aurinkopaneeleja hyödyntäen, jotta ne voivat toimia autonomisesti.

Jos halutaan seurata merien lämpötilanmuutoksia ja saada varmuutta ilmastonmuutoksen vaikutuksista esimerkiksi merivirtoihin tulee käytettävillä antureilla olla jonkinlaisia vaatimuksia niiden herkkyyden suhteen. Yhtä millikelviniä pidetään epävarmuutena, joka on hyväksyttävä meren lämpötilan tutkimuksessa. (Uchida et al., 2015) Merivirtojen tarkkailuun hyväksyttävän epävarmuuden suuruus on kaksi millikelviniä. (Joung, Gam & Pearce, 2020)

Yleisesti käytetty meriolosuhteisiin kehitetty SeaBird-Electronics SBE35-thermistori omaa $25\mu\text{K}$ resoluution ja ± 0.001 celsiusasteen tarkkuuden. (sbe35 pdf) sekä $+41$ mK/MPa paineriippuvuuden. (Peruzzi, Ober & Bosma, 2017) Anturin maksimisyvyys, johon se voidaan sijoittaa, on 6800 metriä. (Joung, Gam & Pearce, 2020) Tätä anturia voitaisiin pitää parhaana tämänhetkisenä teknologiana, johon kuituoptisia lämpötila-antureita merenalaiseen käyttöön voitaisiin vertailla ja jonka suorituskykyyn tulisi tulevaisuudessa pyrkiä.

Jos haluttaisiin aistia edellä mainitun kolmen tuhannen metrin syvyydestä lämpötilaa, täytyisi anturien kestää noin 30 MPa:n paine. Mikäli mittaukset haluttaisiin suorittaa 700 metrin syvyydestä riittäisi maksimipaineensietokykyksi antureille noin 7 MPa.

Interferometriin perustuvalla paineanturilla, joka on suojattu kvartsikuorella, on suoritettu mittauksia jopa 62 MPa paineessa. (Zhao et al., 2017) FP-antureilla on myös suuri herkkyyys, jonka avulla voidaan saavuttaa suuri resoluutio, sekä pieni vasteaika lämpötilaa mitatessa. (Hou, Liu & Han, 2015) Merien lämpötilan ja paineen tutkimiseen on kehitetty kuituoptinen Mach-Zehnder interferometriin perustuva painetta sekä lämpötilaa referenssikuidulla mittaava anturi, jonka paineensietokyky on vähintään 7 MPa. (Lei et al., 2020)

4.2 Vedenalainen kaivostoiminta

Robominers on 14 eri toimijan yhteistyöprojekti, jossa yritetään kehittää uudenlainen luonnon inspiroima robotti, jonka tarkoitus on kaivaa mineraaleja Euroopan Unionin alueelta, parantaen EU-maiden mineraaliomavaraisuutta. Mineraaliomavaraisuus

vähentäisi Euroopan Unionin riippuvuutta tuontimineraleista ja parantaisi saatavuutta poikkeuksellisten poliittisten jännitteiden aikana. Tuontiriippuvuudesta huolimatta Euroopan teollisuuden kollektiivinen mineraalitarve on kasvava.

Robotin ylivertaisuus konventionaalisiin kaivosmenetelmiin on, että sen mahdollisesti valmistuttua sillä voisi olla suuremmat edellytykset päästä vaikeakulkuisille mineraaliesiintymille. Esiintymät voivat olla vaikeakulkuisia tai sijaita vedenpinnan alapuolella. Kauko-ohjattujen ajoneuvojen käyttö alentaa henkilövahinkojen riskiä.

Tampereen yliopiston mukaan Euroopan Unionin alueella on merkittävä määrä vanhoja, hylättyjä kaivoksia, jotka vielä sisältävät muun muassa kriittisten materiaalien listalle kuuluvia mineraleja. (Robominers | Tampere universities, 'Press corner – Robominers', saatavissa (viitattu 8.4.2022))

Kuituoptisten mittausjärjestelmien verrattain korkea, useiden wattien tehonkäyttö ei ole suositeltava ominaisuus kauko-ohjattaville ajoneuvoille, joiden käyttövoima sijaitsee akustoissa tai muissa energianlähteissä ajoneuvon mukana. Lisäksi datan tulkintalaitteiston suuri fyysinen koko rajoittaisi sen käyttöä pienissä ajoneuvoissa. Kuituoptisten anturien pieni koko sen sijaan mahdollistaisi anturien asettamisen mahdollisesti vaikeakulkuisiin kaivostunneleihin datankeräystarkoituksessa. Kuituoptiikalla toteutettu hajautettu mittaus olisi pitkien tunneleiden paineen ja lämpötilan tarkasteluun soveltuva menetelmä, joka on käytössä infrastruktuurin tilan tarkkailussa.

Tämä sovelluskohde on ainoastaan hypoteettinen. Toisaalta kuituoptiikan käyttö putkien ja tunnelien tilan seurannassa on jo olemassa oleva menetelmä. Valokuitujen käyttö tarjoaa erittäin yksinkertaisen, huoltovapaan ja edullisen ratkaisun sijoitettavaksi tällaisiin rakennelmiin. (Bremer et al., 2014)

4.3 Suurjännitemuuntajien seuranta

Muuntajat ovat sähkömagneettisia laitteita, jotka siirtävät sähköenergiaa yhdestä piiristä toiseen käyttäen magneettista kenttää. Magneettisia kenttiä vahvistetaan usein rautaisilla sydämillä. Kaksi piiriä eivät fyysisesti kosketa toisiaan eivätkä ne ole yhdistettyjä. Kaksi piiriä on yhdistettynä ytimeen käämeihin. Käämejä kutsutaan ensiö- ja toisiokäämeiksi. (Harlow, 2012, chap. 1.1–1.3) Sähköverkon jakelumuuntajat ottavat korkeajännitteisen sähkövirran ja muuntavat sen matalammaksi jännitteeksi, jota voidaan käyttää kotitalouksissa.

Muuntajilla on hyötysuhde eivätkä ne toimi häviöttömästi kuten eivät mitkään muutkaan laitteet. Häviöt ilmenevät muuntajan lämpenemisenä. Lämpöhäviö aiheutuu kahdesta komponentista, pyörre- sekä hystereesihäviöstä. Hystereesihäviötä aiheuttaa syklinen

magneettivuon suunnan vaihtuminen muuntajan toiminnan aikana. Pyörrehäviön taas aiheuttavat pyörrevirrat, jotka indusoituvat ytimeen sen leveyden normaalin suuntaisista magneettikentistä. Lämpeneminen aiheuttaa ikäänymistä muuntajan komponenteissa, joten sitä on vältettävä. Tyypillisesti muuntajien käämien lämpötila on alle 65 celsiusastetta ympäröivää lämpötilaa korkeampi. Kuumat pisteet voivat sen sijaan olla vielä korkeammassa lämpötilassa. Useat standardit myös määrittelevät hyväksyttävät rajat lämpötiloille, joissa muuntajat saavat sijaita ennalta määritellyn ajan verran. (Harlow, 2012, kpl. 1.3, 2.2.2)

Useat suuret muuntajat ovat öljyjäähdytteisiä. Muuntajien lähellä sijaitsevat voimakkaat magneettikentät aiheuttavat häiriötä elektronisiin antureihin, jotka on sijoitettu muuntajaan. Siksi suurin osa muuntajissa käytettävistä antureista on mekaanisia. Mekaaniset lämpötila-anturit eivät tarvitse toimiakseen sähkövirtaa, eivätkä ne kärsi sähkökenttien aiheuttamasta häiriöstä. Myös optisia menetelmiä voidaan soveltaa tällaisissa mittausjärjestelmissä, sillä voimakkaat kentät eivät aiheuta niihin häiriötä vaan niiden vaste on riippuvainen vain anturin lämpötilasta kuten edellisissä kappaleissa on todettu. (Harlow, 2012, kpl. 15) Muuntajien lämpötilan tarkastelu ei vaadi millikelvinasteiden tarkkuutta, vaan riittävän nopeaa vasteaikaa kuumien pisteiden havainnointiin. Kuituoptiikka soveltuu lämpötilankestoltaan muuntajien tilan kartoittamiseen, jotka tutkimuksen mukaan olivat 0–130 celsiusasteen välillä. Myös hajautettua mittausa on käytetty käämien lämpötilan mittaukseen kiertämällä kuitu käämin ympärille. (Betta, Pietrosanto & Scaglione, 2001; Haque et al., 2015)

5. TULOKSET

Kuituoptisten sensorien käyttö tarjoaa merkittäviä menetelmiä ympäristön suureiden tarkasteluun. Kuituoptiikka soveltuu käyttöön, jossa vaaditaan säännöllisiä mittauksia halvalla hinnalla. Kuituoptiikka erottuu edukseen elektronisista mittausslaitteista, kun tarvitaan mittaustuloksia paikoista, joissa on voimakasta elektromagneettista häiriötä, säteilyä, palavia aineita tai joihin välimatka on erittäin pitkä. (Meggitt & Grattan, 1995, s. 87–88) Merien kapean sekä matalan lämpötilahaarukan ansiosta optisia kuituantureita voidaan sijoittaa vesistöihin.

Hajautetun mittausmenetelmän käyttö tuo mittakaavaetua verrattuna useisiin pistemittauksiin, jotka supritetaan useilla antureilla. Hajautettua mittausta käytettäessä jokaisen anturin signaali luetaan ja lähetetään samaa kuitua pitkin hyödyntäen multipleksausta. Vaikka optisia kuituantureita voidaan käyttää yksittäisten pisteiden mittaukseen, erottuu kuituoptiikka edukseen, kun mittausalue sijaitsee suuren välimatkan päässä, tai kun mittauspisteitä on erittäin monta. Tällaisissa tilanteissa valonlähteet ja detektorit voidaan sijoittaa keskitetysti ja turvallisesti ja hyödyntää multipleksausta, jolla voidaan yksinkertaistaa järjestelmän toimintaa, minimoida osia ja pienentää energiankulutusta.

Kuituoptiset anturit antavat mittausjärjestelmille mahdollisuuden suorittaa etämittauksia, sekä niiden uniikit, hajautetun mittauksen mahdollistavat optiset ominaisuudet erottavat ne perinteisistä elektronisista antureista antaen niille kustannustehokkuutta verrattuna elektronisiin mittalaitteisiin. Yhden valokuidun asentaminen myös tekee mittausslaitteistosta hyvinkin yksinkertaisen. Kustannuksia energiansäästöjen muodossa lisää valokuituteknologian ominaisuuksista anturien alhainen käyttöteho Valon lähettäminen optisia kuituja pitkin on erittäin energiatehokas tiedonsiirtomenetelmä. Yksimuotokuitujen lähetysmatkat ovat jopa 30 kilometriä (Uzairue et al., 2018).

Mittausalueet voivat valokuituja käyttämällä sijaita virranlähteistä, LED-laitteista, akuista ja datan tallennuspaikoista kaukana. Optisten kuituanturien käyttö mahdollistaa mittaustulosten etäluennan. (Grattan & Meggitt, 1999, s. 16)

Optiset kuidut sekä optiset anturit ovat soveltuvia lämpötilankestoltaan käytettäväksi merissä, sillä merien lämpötila ei ole erityisen korkea. Sen sijaan suurempaa epävarmuutta tuo kuituoptisten lämpötila-antureiden paineriippuvuus sekä maksimipaine, jossa ne voivat operoida.

Kuorilla suojatut anturit vaikuttavat kestävän korkeitakin paineita kuten todettiin kappaleessa 4.1.1. Tämä anturi ei mitannut lämpötilaa, mutta testit demonstroivat FP-anturin suurta paineensietokykyä. On myös huomattava, että FP-anturin käyttö soveltuu myös lämpötilan havainnointiin eikä se ole ainoastaan painetta aistiva anturi.

Juuri ulkoisella FP- ja FBG-tekniikkaa hyödyntävillä anturilla varustetulla mittausjärjestelmällä on saatu mittaustuloksia, joiden laatu on tutkimuksen laatijoiden mukaan verrattavissa kaupalliseen SeaBird Electronics SBE9plus-laitteistoon. Laitteisto kiinnitettiin vedenalaiseen robottiin. Laitteiston ulkoinen FP-anturi mittasi painetta ja FBG-anturi lämpötilaa. Lämpötila-anturin herkkyudeksi saatiin kalibroinnin perusteella 12.5 pm/K. Tällä herkkyydellä laitteiston resoluutio on 0.1 celsiusastetta. Myös herkkyys paineen suhteen määritettiin. Laitteiston testien maksimisyvyys oli matala, vain noin 12 metriä. Tämän anturin herkkyys ei ole riittävän korkea edellä esitettyihin vaatimuksiin merivirojen havainnoinnista.

Kappaleessa 3.3.2 mainitulla FP-anturilla oli anturin kehittäjien mukaan lupaava herkkyys. Anturin herkkyudeksi oli määritetty 84pm/K, jolla saavutettiin 0.9 mK resoluutio. Tämä resoluutio on tarpeeksi suuri edellä esitettyihin vaatimuksiin merien lämpötilan sekä merivirtojen mittauksesta, jotka olivat suuruudeltaan 1 ja 2 mK. Tämä resoluutio on myös samaa suuruusluokkaa verrattuna edellä mainittuun termistoriin perustuvan kaupallisen anturin resoluutioon. Tutkimus ei ottanut kantaa siihen, kuinka suurta painetta anturi pystyy kestämään yhtäjaksoisesti. Vaikka edellä esitin, että FP-anturilla on suoritettu painemittauksia jopa 62 MPa:n paineessa en usko, että täysin 3.3.2 kappaleen mukainen anturi, jonka Weihin Hou, Guigen Liu ja Ming Han ovat kehittäneet, kestäisi näin korkeaa painetta. Syyksi esitän, että kuorella suojatun FP-anturin FP-interferometri oli kiinnitetty suoraan kuoreen, kun taas Hou yms. kehittämässä anturissa FP-interferometri on sekä erittäin lyhyt, että asetettu kuidun päähän liimaamalla. Suojakuori venyy paineen aiheuttamasta puristuksesta, jolloin kuoren sisään liimatun kuidun pään ja heijastavan elementin välimatka kasvaa. Myöskään anturin herkkyys ei voida olettaa pysyvän yhtä hyvänä, jos anturille asennettaisiin suojakuoria. Kuituoptisilla lämpötila-antureilla vaikuttaa tutkimustiedon valossa olevan kuitenkin jonkin verran maksimipaineensietokykyä, jolla päästäisiin operoimaan lähes kilometrin syvyyteen.

Kuituoptisten lämpötila-antureiden vasteen paineriippuvuudesta ei ole tarjolla tutkimustietoa. FP-antureilla tosin voidaan mitata sekä painetta, että lämpötilaa samanaikaisesti. Molempia suureita mittaavia järjestelmiä on jo kehitetty, joissa toinen anturi on olemassa ainoastaan kompensoidakseen toisen anturin mittaustuloksen

virhettä. (Duraibabu et al., 2014) Kuituoptisten lämpötila-anturien vasteen paineriippuvuutta ei onnistuttu määrittämään yhdellekään yksittäiselle anturityypille.

Ottaen huomioon kaikki käsitellyt vaatimukset, joita merien tutkimukseen vaaditaan uskon suurimman resoluution omaavan FP-anturin sopivan merien pintavesien tutkimiseen suorituskyvyllä, joka on verrattavissa parhaaseen tämänhetkiseen termistoriteknologiaan. Parhaan FP-anturin suorituskyky ei kuitenkaan ole yhtä korkea termistorin, mutta niiden suuruusluokat ovat samat. Tutkimustietoa tällaisen FP-anturin paineriippuvuudesta ja sen maksimipaineensietokyvystä ei vielä ole, joten jatkotutkimukset optisten anturien paineriippuvuudesta ja maksimipaineesta hyödyttäisivät tällaisten anturien soveltuvuuden arvioimista vaativammissa olosuhteissa, kuten korkeassa paineessa. Myös selvitystä anturien pitkän aikavälin stabiiliudesta tarvittaisiin kokonaisvaltaisemman ja pitkän aikavälin analyysin tekemiseen.

6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli esitellä kuituoptisten lämpötila-anturien käyttökohteita, selvittää anturien vasteen paineriippuvuus sekä esitellä eri kuituoptisia anturitekniikoita. Lukijalle alustettiin yleistä tietoa lämpötilasta, sen mittaamisesta ja kuituoptiikasta. Työssä esiteltiin Braggin hila-anturien (FBG), spektrometrinen sekä luminesenssiin perustuvien lämpötila-anturien toimintaa. Työssä esiteltiin kahden valmistajan kaupallisia optisiin kuituihin perustuvia lämpötilanmittausjärjestelmiä.

Työn teoriaosuus perustui pitkälti K.T.V Grattanin ja B.T. Meggittin Optical fiber sensor technology -kirjasarjaan. Tarkempaa tietoa haettiin yksittäisistä tutkimuksista muun muassa Scopus-tietokannasta.

Tutkimuksessa selvitettiin mitkä ovat sellaisia kuituoptisille antureille uniikkeja ominaisuuksia, jotka erottavat ne elektronisista antureista. On havaittu, että lämpötiloja mitatessa korkeissa paineissa, tulee anturien vasteeseen virhettä korkean paineen johdosta. Pyrkimyksenä oli selvittää tämän riippuvuuden suuruus joillekin optisia kuituja käyttäville lämpötila-antureille, mutta tutkimustuloksien puuttumisen johdosta tässä ei onnistuttu. Myös suurinta mahdollista painetta, johon optiset lämpötila-anturit voidaan sijoittaa, yritettiin tutkia. Voidaan todeta, että työssä käsiteltyjen anturien kestävän joidenkin satojen metrien vedenalaista painetta. Tutkimuksessa pohdittiin kuorilla suojattujen lämpötila-anturien paineensietokykyä, pohjautuen tietoon suurta painetta kestävästä paineantureista, jotka perustuvat optisiin kuituihin.

Optiset lämpötila-anturit ovat pienen kokonsa, herkkyytensä, hyvien metrologisten ominaisuuksiensa sekä häiriöimmunitaettinsa ansiosta sopivia käytettäväksi lämpötila-antureissa. Suorituskykyisimmäksi anturiksi todettiin Fabry-Perot'in interferometriin perustuva lämpötila-anturi, joka kehitettiin sijoitettavaksi vesitöihin. Anturin tuottama resoluutio oli alle 1 mK. Se myös omasi erittäin nopean vasteajan. Anturin suorituskyvyn todettiin olevan verrattavissa kaupallisiin elektronisiin antureihin, jotka on kehitetty samaan käyttökohteeseen. Kaikille kuituoptisille antureille tyypillisiä ominaisuuksia ovat stabiilius, hyvä hystereesi ja lineaarisuus sekä immuniteetti sähkökenttien aiheuttamalle häiriölle.

Mahdollisiksi käyttökohteiksi kuituoptisille lämpötila-antureille on esitetty merien lämpötilan seuranta, vedenalainen kaivostoiminta sekä suurjännitemuuntajat. Lisätutkimukset edellä mainitun korkean suorituskyvyn anturin ominaisuuksista varmistaisivat sen käyttökohteiden rajoitteet ja mahdollisuudet. Mikäli sen ominaisuudet

osoittautuvat hyväksi, sen saaminen laajempaan käyttöön voisi auttaa esimerkiksi merivirtojen kartoittamisessa. On selvää, että optisissa mittausmenetelmissä on lukemattomia erilaisia tekniikoita, joista ei vielä ole jalostunut tiettyjä markkinoiden suosimia anturimalleja tai aistimistekniikoita.

LÄHTEET

A Brief History of the Temperature Sensor (no date) <https://www.omega.com/en-us/>. Available at: <https://www.omega.com/en-us/resources/history-of-the-temperature-sensor> (Accessed: 27 February 2022).

Betta, G., Pietrosanto, A. and Scaglione, A. (2001) 'An enhanced fiber-optic temperature sensor system for power transformer monitoring', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50(5), pp. 1138–1143. doi:10.1109/19.963173.

Bremer, K. et al. (2014) 'Sewerage tunnel leakage detection using a fibre optic moisture-detecting sensor system', *Sensors and Actuators A: Physical*, 220, pp. 62–68. doi:10.1016/j.sna.2014.09.018.

Chen, S. et al. (1992) 'Extrinsic optical-fiber interferometric sensor that uses multimode optical fibers: system and sensing-head design for low-noise operation', *Optics Letters*, 17(10), p. 701. doi:10.1364/OL.17.000701.

Dauphinee, T. (1983) 'Deep ocean temperature profile measurements', *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 8(3), pp. 184–195. doi:10.1109/JOE.1983.1145564.

Dengpan, Z., Wang, J. and Yongjie, W. (2018) 'Experimental study on fibre Bragg grating temperature sensor and its pressure sensitivity', *International Journal of Information and Communication Technology*, 13(4), pp. 509–517. doi:10.1504/IJICT.2018.095029.

Dincer, C. et al. (2019) 'Disposable Sensors in Diagnostics, Food, and Environmental Monitoring', *Advanced Materials*, 31(30), p. 1806739. doi:10.1002/adma.201806739.

Duraibabu, D.B. et al. (2014) 'Novel miniature pressure and temperature optical fibre sensor based on an extrinsic Fabry-Perot Interferometer (EFPI) and Fibre Bragg Gratings (FBG) for the ocean environment', in: *Proceedings of IEEE Sensors*, pp. 394–397. doi:10.1109/ICSENS.2014.6985017.

Grattan, K.T.V. (2000) *Optical fiber sensor technology, Volume 1. Fundamentals*. Available at: <https://r3.vlreader.com/Reader?ean=9781475760811> (Accessed: 25 February 2022).

Grattan, K.T.V. and Meggitt, B.T. (eds) (1999) *Optical Fiber Sensor Technology, Volume 4, Chemical and Environmental Sensing*. 4th edn. Dordrecht: Springer Netherlands. doi:10.1007/978-94-017-2484-5.

Grattan, K.T.V., Parry, G. and Augousti, A.T. (1998) *optical fiber sensor technology, vol.2 devices and technology*. Boston: Springer US. Available at: <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3080332> (Accessed: 10 March 2022).

Haque, N. et al. (2015) 'Temperature monitoring of power transformer using fiber-optic sensor', in *2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN)*. *2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN)*, pp. 1–5. doi:10.1109/ICPDEN.2015.7084488.

Harlow, J.H. (2012) *Electric Power Transformer Engineering*. Baton Rouge, UNITED STATES: Taylor & Francis Group. Available at: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=911982> (Accessed: 9 April 2022).

Hou, W., Liu, G. and Han, M. (2015) 'A novel, high-resolution, high-speed fiber-optic temperature sensor for oceanographic applications', in *2015 IEEE/OES Eleventh Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM)*. *2015 IEEE/OES Eleventh Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM)*, pp. 1–4. doi:10.1109/CWTM.2015.7098149.

Hunger, D. *et al.* (2010) 'A fiber Fabry–Perot cavity with high finesse', *New Journal of Physics*, 12(6), p. 065038. doi:10.1088/1367-2630/12/6/065038.

Jha, C., (2015) 'Thermal Sensors', Springer New York, ISBN: 978-1-4939-2580-3 978-1-4939-2581-0, Saatavissa: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-1-4939-2581-0.pdf>

Joung, W., Gam, K. and Pearce, J.V. (2020) 'Pressure dependence of reference deep-ocean thermometers', *Meteorological Applications*, 27(1), p. e1870. doi:10.1002/met.1870.

Kiniry, J.R. (1998) 'Wavelength division multiplexing: ultra high speed fiber optics', *IEEE Internet Computing*, 2(2), pp. 13–15. doi:10.1109/4236.670678.

Kouketsu, S. *et al.* (2011) 'Deep ocean heat content changes estimated from observation and reanalysis product and their influence on sea level change', *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C3). doi:10.1029/2010JC006464.

Lei, X. *et al.* (2020) 'Underwater Pressure and Temperature Sensor Based on a Special Dual-Mode Optical Fiber', *IEEE Access*, 8, pp. 146463–146471. doi:10.1109/ACCESS.2020.3015195.

Li, C. *et al.* (2016) 'Liquid level and temperature sensor based on an asymmetrical fiber Mach–Zehnder interferometer combined with a fiber Bragg grating', *Optics Communications*, 372, pp. 196–200. doi:10.1016/j.optcom.2016.04.025.

Li, M. and Li, Y. (2011) 'Fiber-optic temperature sensor based on interaction of temperature-dependent refractive index and absorption of germanium film', *Applied Optics*, 50(2), p. 231. doi:10.1364/AO.50.000231.

Liu, P. *et al.* (2018) 'A fiber-optic combined acoustic temperature and pressure sensor for ocean observation', in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. doi:10.1117/12.2501322.

McGee, T.D. (1988) *Principles and Methods of Temperature Measurement*. John Wiley & Sons.

Meggitt, B.T. and Grattan, K.T.V. (1995) *Optical Fiber Sensor Technology*. Available at: <https://r3.vlreader.com/Reader?ean=9789401112109> (Accessed: 13 March 2022).

Micronor sensors, TS temperature sensors, Saatavissa (viitattu 15.5.2022): <https://micronor.com/products/ts-temperature-sensors/>

Mitschke, F. (2010) *Fiber Optics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-03703-0.

OM3 R&M monimuotokaapelit Nylund yritys (no date) Nylund. Available at: <https://nylund.fi/tuotteet/tietoverkot/valokuitutuotteet/om3-monimuotokaapelit/> (Accessed: 21 February 2022).

Peruzzi, A., Ober, S. and Bosma, R. (2017) 'Effect of Pressure on Deep-Ocean Thermometers', *International Journal of Thermophysics*, 38(11), p. 163. doi:10.1007/s10765-017-2297-4.

Platinum - Thermal Properties - Melting Point - Thermal Conductivity - Expansion (2020) *Material Properties*. Available at: <https://material-properties.org/platinum-thermal-properties-melting-point-thermal-conductivity-expansion/> (Accessed: 16 March 2022).

'Press corner – Robominers' (no date). Available at: <https://robominers.eu/media-corner/> (Accessed: 9 April 2022).

Rai, V.K. (2007) 'Temperature sensors and optical sensors', *Applied Physics B*, 88(2), pp. 297–303. doi:10.1007/s00340-007-2717-4.

Robominers | Tampere universities (no date). Available at: <https://www.tuni.fi/en/research/robominers> (Accessed: 8 April 2022).

Tampereen yliopisto, Mittaus (1), luento 1, s. 17 (viitattu 19.2.2022), Pääsy rajoitettu.

Tampereen yliopisto, Mittaus (2), luento 5, s. 12–13 (viitattu 19.2.2022), Pääsy rajoitettu.

The FOA Reference For Fiber Optics - Optical Fiber (no date). Available at: <https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html> (Accessed: 21 February 2022).

Thermal Diffusivity Table (no date). Available at: https://www.engineersedge.com/heat_transfer/thermal_diffusivity_table_13953.htm (Accessed: 23 April 2022).

Uchida, H. *et al.* (2015) 'Deep Ocean Temperature Measurement with an Uncertainty of 0.7 mK', *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32(11), pp. 2199–2210. doi:10.1175/JTECH-D-15-0013.1.

Uzairue, S.I. *et al.* (2018) 'Experimental Analysis of Cable Distance Effect on Signal Attenuation in Single and Multimode Fiber Optics', *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8(3), pp. 1577–1582.

Wilson, J.S. (2004) *Sensor Technology Handbook*. Oxford, UNITED STATES: Elsevier Science & Technology. Available at: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=226781> (Accessed: 27 February 2022).

www.blackbox.fi, B.B.F.O. (no date) 3769 - *LSZH (Low Smoke Zero Halogen) and PVC cables*, *Black Box*. Available at: https://www.blackbox.fi/fi-fi/page/27274/Resursit/Tekniset-resurssit/Seikkaperäiset_selvitykset_tekniikoista_terministä_ja_kytkennoistä/copper-cable/lszh-and-pvc-cables (Accessed: 21 February 2022).

Zhao, Q. *et al.* (2017) 'Optical fiber pressure sensor based on F-P cavity in the oil and gas well', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 64, p. 012007. doi:10.1088/1755-1315/64/1/012007.