

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Coriolis-virtausmittari

Coriolis flowmeter

Työn tarkastaja: Pekka Punnonen

Työn ohjaaja: Pekka Punnonen

Lappeenranta 15.3.2019

Sami Hulkkonen

## **TIIVISTELMÄ**

Opiskelijan nimi: Sami Hulkkonen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Pekka Punnonen

Kandidaatintyö 2019

32 sivua, 11 kuvaa ja 1 taulukko

Hakusanat: Coriolis-virtausmittari, virtausmittaus, massavirtamittaus

Tässä kandidaatintyössä perehdytään coriolis-virtausmittariin, jolla mitataan massavirtaa. Mittarin toiminta perustuu coriolisilmiön hyödyntämiseen.

Työssä esitellään mittarin toimintaperiaatetta, historiaa, toteutuksen yksityiskohtia ja käyttökohteita, sekä selvitetään mittausperiaatteen etuja ja heikkouksia. Työssä on käytetty lähteinä alan kirjallisuutta ja aiheesta tehtyjä tieteellisiä tutkimuksia. Eri lähteiden tietoja yhdistelemällä on pyritty saamaan aikaan kattava suomenkielinen kokonaisuus coriolis-virtausmittauksen perusteista.

Mittausmenetelmän vahvuuksia ja heikkouksia tarkastellessa havaittiin, että suurin ongelma mittauksen tarkkuuden kannalta on mittausputken herkkyys värinälle ja virtauksen sykkimiselle. Muuten periaatteen mittaustarkkuus todettiin erittäin hyväksi.

Coriolis-virtausmittarilla todettiin olevan heikkouksia, mutta toisaalta myös erityisiä vahvuuksia. Mittarin tarkkuus ja soveltuvuus monenlaisien virtaavien aineiden massavirran suoraan mittaamiseen ovat sen suurimpia etuja. Edut huomioiden coriolis-virtausmittari on yksi potentiaalinen vaihtoehto, jota kannattaa tapauskohtaisesti harkita massavirran mittaamiseen.

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

<b>Symboli- ja lyhenneluettelo</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>5</b>
<b>2 Coriolis-virtausmittaus</b>	<b>6</b>
2.1 Coriolisilmiö.....	6
2.2 Coriolis-virtausmittauksen periaate.....	8
2.3 Historia .....	12
<b>3 Mittarin toteutus ja tarkkuus</b>	<b>15</b>
3.1 Putken geometria.....	15
3.2 Lähetin.....	17
3.3 Vasteaika ja signaalin käsittely .....	18
3.4 Monifaasivirtaus .....	19
3.5 Sykkivä virtaus .....	20
3.6 Mittarin virhe.....	21
3.7 Tarkkuus.....	22
<b>4 Soveltuvuus</b>	<b>24</b>
4.1 Kokoluokat ja virtausalueet.....	24
4.2 Edut ja heikkoudet.....	25
4.3 Vertailua muihin mittausvaihtoehtoihin .....	26
<b>5 Yhteenveto ja johtopäätökset</b>	<b>28</b>
<b>Lähdeluettelo</b>	<b>30</b>

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset aakkoset

$a$	kiihtyvyys	$\text{m/s}^2$
$F$	voima	N
$m$	massa	kg
$r$	säde	m
$t$	aika	s
$v$	nopeus	$\text{m/s}$

### Kreikkalaiset aakkoset

$\Delta$	ero	-
$\theta$	kulma	$^\circ$
$\omega$	kulmanopeus	$\text{rad/s}$

### Alaindeksit

A	sisääntulopuoli
B	ulosmenopuoli
c	coriolis

### Lyhenteet

FSD	mittausalueen ylärajan näyttämä (full scale deflection)
-----	---

## 1 JOHDANTO

Energiateknisissä mittauksissa kiinnostaa usein virtaavan aineen massavirta, jota tarvitaan massa- ja energiataseiden laskennassa. Suorassa mittauksessa mittausanturi reagoi massavirtaan. Epäsuorassa mittauksessa massavirta määritetään laskennallisesti useamman muun mittauksen perusteella. Coriolis-virtausmittari on käytännössä ainoa yleisesti käytetty mittari, jota voidaan pitää aitona massavirtamittarina (Baker 2002, 109).

Yleensä massavirtaa mitataan epäsuorasti, useaa erillistä mittausta käyttäen. Tällöin mitataan erikseen virtauksen tilavuusvirtaus, ja määritetään virtaavan aineen tiheys joko erillisillä mittauksilla tai oletuksilla. Vastaavasti lämmönsiirtoon ja virtaavan aineen lämpötilan nousuun perustuvan termisen massavirtamittarin tapauksessa virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti on tunnettava riittäväällä tarkkuudella.

Massavirtamittareilla mitataan suoraan massavirtaa, jolloin virtaavan aineen tiheyttä ei ennalta tarvitse tuntea. Coriolis-virtausmittarin tapauksessa aineen tiheys voidaan määrittää massavirtamittauksen yhteydessä täydelle mittausputkelle muodostuvan ominaisvärähtelytaajuuden perusteella.

Tässä kandidaatintyössä perehdytään coriolis-virtausmittarin historiaan, toimintaperiaatteeseen, teknisiin toteutuksiin ja soveltuvuuteen eri käyttökohteisiin. Työssä esitellään coriolis-virtausmittauksen etuja ja haittoja vaihtoehtoisin ratkaisuihin verrattuna.

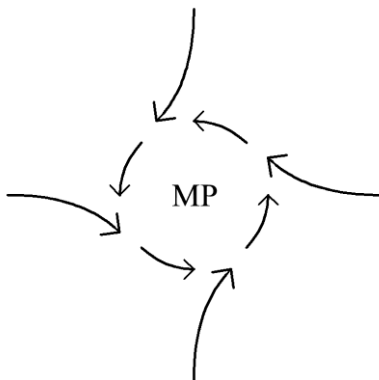
Hyvänä lähteenä työlle on toiminut Wangin ja Bakerin (2014) artikkeli, jossa on koottuna coriolis-virtausmittauksen historiaa, kehitystä ja tulevaisuudennäkymiä. Artikkelin tarjoaa tiivistetyssä muodossa runsaasti tietoa, sekä laajan kokoelman viitteitä aiheesta tehtyihin tieteellisiin tutkimuksiin ja muihin aiheistoihin.

## 2 CORIOLIS-VIRTAUSMITTAUS

Coriolis-virtausmittarin toiminta perustuu nimensä mukaisesti coriolisilmiöön. Coriolisvoima on näennäisvoima, joka ilmenee vapaasti liikkuvan kappaleen radan poikkeamana tarkasteltaessa sitä pyörivästä koordinaatistosta. Coriolis-voiman määritteli ensimmäisenä ranskalainen Gaspard-Gustave de Coriolis, jonka mukaan ilmiö on nimetty (Hibbeler 2001, 358).

### 2.1 Coriolisilmiö

Tunnetuimmat esimerkit coriolisilmiön vaikutuksesta liittyvät maapallon pyörimisen aiheuttamiin maan pinnalla havaittaviin ilmiöihin. Näitä ovat vaikutukset ilmavirtausten ja merivirtojen kiertoliikkeisiin, sekä ballistisiin lentoratoihin. Coriolisvoiman vaikutuksesta matalapaineen alueen ympärille syntyy pohjoisella pallonpuoliskolla vastapäivään, ja eteläisellä pallonpuoliskolla myötäpäivään pyörivä pyörre (Marion 1970, 347). Kuvassa 2.1 havainnollistetaan yksinkertaistetusti pyörteen syntyä pohjoisella pallonpuoliskolla. Matalapaineen alueelle ympäröivältä korkeapaineen alueelta virtaava ilma kaartaa coriolisvoiman vaikutuksesta myötäpäivään, ja synnyttää vastapäivään kiertävän pyörteen matalapaineen alueen ympärille.



Kuva 2.1: Matalapaineen alueen (MP) ympärille syntyvän pyörteen periaate.

Ballistiikassa coriolisvoima joudutaan huomioimaan ammuksien lentoratoja laskettaessa sillä se saa ammuksen lentoradan kaareutumaan oikealle pohjoisella, ja vasemmalle eteläisellä pallonpuoliskolla. Vaikutus on sitä merkittävämpi mitä pidempään kappale

liikkuu. Tästä syystä lyhyillä matkoilla vaikutus jää usein merkityksettömäksi, mutta esimerkiksi tykistön on huomioitava coriolisilmiö pidemmän matkan ammunnoissa.

$$\vec{F}_c = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad (1)$$

$$\vec{a}_c = 2(\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad (2)$$

Liikkuvaan kappaleeseen vaikuttava coriolisvoima  $F_c$  voidaan laskea yhtälöllä 1 kulmanopeuden  $\omega$ , kappaleen massan  $m$  ja nopeuden  $v$  perusteella (Marion 1970, 346). Corioliskiihtyvyys  $a_c$  saadaan laskettua yhtälöllä 2 (Beer et al. 2007, 974). Coriolisvoiman ja -kiihtyvyyden suunta määräytyy nopeuden ja kulmanopeuden ristitulon perusteella, jolloin sen suunta on kohtisuora niin nopeuteen että pyörimisakseliin nähden. Maan pinnan suuntaisia liikkeitä tarkasteltaessa coriolisvoima vaikuttaa voimakkaimmin napa-alueilla. Päiväntasaajalla coriolisvoimalle ei muodostu pinnan suuntaista komponenttia.

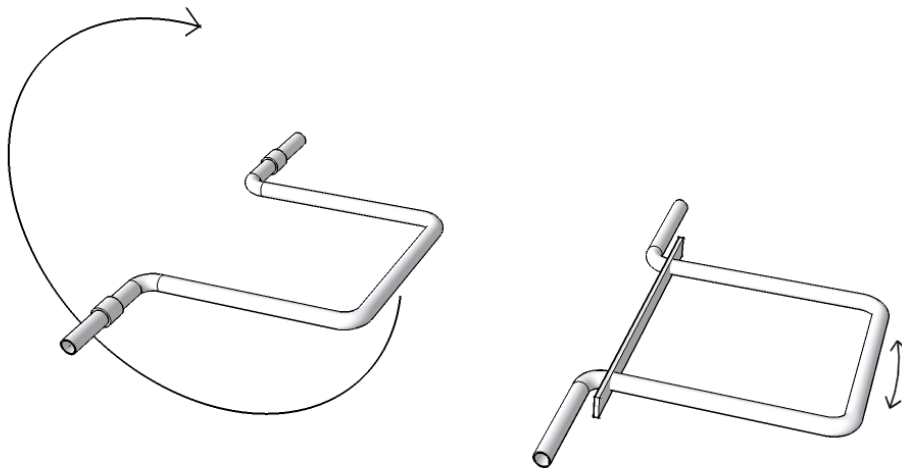
Corioliskiihtyvyyden suunnan määrittelemisen riippuu asiayhteydestä. Edellä mainituissa vapaasti liikkuvien kappaleiden tapauksessa coriolisvoima ja -kiihtyvyys suuntautuvat yhtälöiden 1 ja 2 mukaisesti ja vaikuttavat liikkuvan kappaleen rataa. Mekaniikassa corioliskiihtyvyyttä kuitenkin käsitellään yleensä mekaanisten laitteiden toiminnassa sellaisissa yhteyksissä, joissa jokin kappale liikkuu putkea, sauvaa, raidetta tai muuta ohjaavaa rakennetta pitkin pyörimisliikkeen mukana. Kappaleen rata ei tällöin pääse kaareutumaan, vaan se liikkuu pyörivässä koordinaatistossa suoraviivaisesti määrättyä rataansa pitkin. Tällöin kappaleen corioliskiihtyvyys on itseisarvoltaan sama, mutta suunnaltaan päinvastainen vapaasti liikkuvan kappaleen tapaukseen verrattuna. (Beer et al. 2007, 973–975; Hibbeler 2001, 354–360)

$$\vec{a}_c = 2(\vec{\omega} \times \vec{v}) = -2(\vec{v} \times \vec{\omega}) \quad (3)$$

Corioliskiihtyvyys pyörivän koordinaatiston mukana suoraa rataa liikkuvalla kappaleella saadaan laskettua yhtälöllä 3 (Hibbeler 2001, 358). Yhtälö on muuten sama kuin yhtälö 2, mutta etumerkki on vaihtunut.

## 2.2 Coriolis-virtausmittauksen periaate

Coriolis-virtausmittari voidaan toteuttaa joko pyörivällä tai värähtelevällä mittausputkella. Näissä vaikuttavat voimat ovat periaatteellisesti samoja, mutta jälkimmäisessä tapauksessa liike on jatkuvan pyörimisliikkeen sijaan värähtelyä (Baker 2016, 563). Kuva 2.2 havainnollistaa pyörivän ja värähtelevän ratkaisun periaatetta. Käytännön mittalaitteissa pyörivää ratkaisua ei epäkäytännöllisyyden vuoksi käytetä. Pyörivän ratkaisun ilmeinen ongelma on sen vaatima suuri tila. Lisäksi virtaus joutuu kulkemaan pyörivän liitoskohdan kautta, ja pyörimisliikkeen tuottaminenkin on pientä värähdysliikettä monimutkaisempaa.



Kuva 2.2: Pyörivällä ja värähtelevällä putkella toteutetut coriolis-virtausmittarit.

Coriolis-virtausmittarissa virtaus kulkee mittausputken lävitse. Mittausputken päät on tuettu liikkumattomiksi. Putki saatetaan värähtelemään kohdistuen poikkeuttava voima sen keskiosaan. Värähdystaajuudeksi haetaan yleensä virtaavan aineen täyttämän putken ominaisvärähtelytaajuus, tai joissakin tapauksissa tämän harmoninen kerrannaistaajuus (Cheesewright et al. 1999, 207). Täyden putken ominaisvärähtelytaajuuden perusteella voidaan laskea virtaavan aineen tiheys. Käytännön coriolis-virtausmittareissa värähtelyn amplitudi on hyvin pieni, vain millimetrin murto-osa. Värähtelyn taajuus asettuu

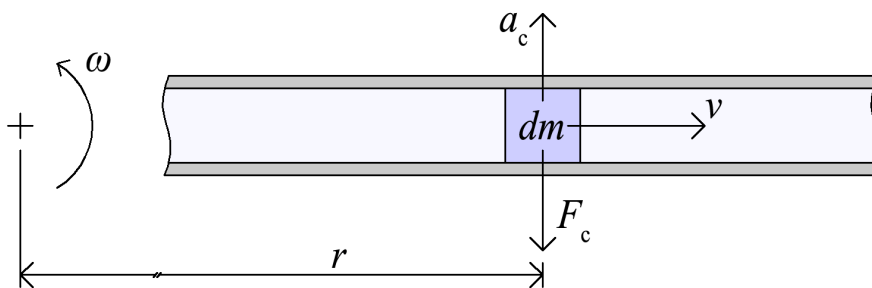


tyypillisesti välille 75 – 1000 Hz (Baker 2002, 123). Värähtelyä ei yleensä näe paljaalla silmällä, mutta sen voi tuntea putkea koskettamalla.

Kahden puolen putkea poikkeuttavaa voimaa on sijoitettu symmetrisesti putken liikettä mittaavat anturit. Virtauksen ollessa pysähtynyt, molemmat puolet liikkuvat yhdenmukaisesti putken värähtelyn tahdissa.

Aineen virratessa mittausputkessa, sisään tuleva massa-alkio joutuu ensin kasvattamaan pyörimisliikemääräänsä putken liikuessa. Putkea poikkeuttava voima vaikuttaa massa-alkioon putken välityksellä, ja tämän vastavoimana massa-alkio kohdistaa putkeen kiihtyvyyttä vastustavan voiman.

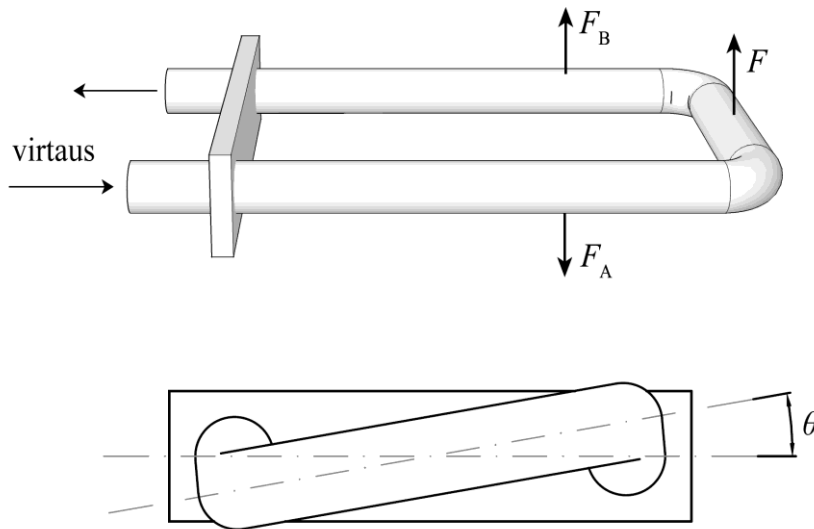
Kuvassa 2.3 havainnollistetaan coriolis-virtausmittauksen periaatetta. Putki kääntyy kulmanopeudella  $\omega$  ripustuspisteensä suhteen. Massa-alkion  $dm$  liikuessa nopeudella  $v$  kokee se putken pyörimisliikkeen aiheuttamana corioliskiihtyvyyden  $a_c$ . Corioliskiihtyvyys aiheutuu putken massa-alkioon kohdistamasta voimasta, jonka vastavoimana massa-alkio kohdistaa putkeen vastakkaissuuntaisen coriolisvoiman  $F_c$ . Coriolisvoiman ja -kiihtyvyyden suuruuden voi laskea aiemmin esitellyillä yhtälöillä 1 ja 3.



Kuva 2.3: Coriolis-virtausmittauksen periaate.

Vastaavasti lähestyessään mittausputken ulosmenoa liikkeessä olevan massa-alkion pyörimisliikemäärä vähenee, minkä seurauksena voimavaikutukset tällä puolella ovat vastakkaissuuntaiset sisääntulopuoleen nähden. Näiden voimien takia putkeen kohdistuu vääntöä, joka saa sen taipumaan (Baker 2016, 563). Putkeen kohdistuvia coriolisvoimia

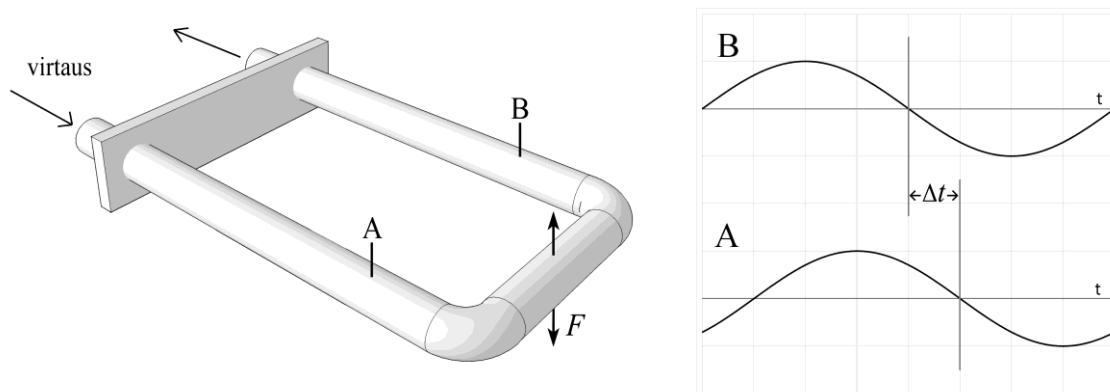
ja putken taipumista on havainnollistettu kuvassa 2.4. Kuvaan on merkitty putkea poikkeuttava voima  $F$ , ja coriolisvoimat  $F_A$  ja  $F_B$  ja putken taipumakulma  $\theta$ . Putken taipuminen on kuvassa esitetty havainnollisuuden vuoksi huomattavasti todellista suurempana.



Kuva 2.4: Mittausputkeen kohdistuvat voimat ja putken taipuminen.

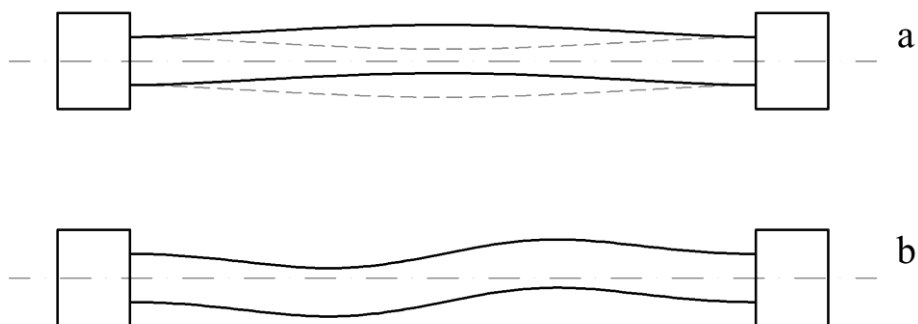
Värähtelevän putken kulmanopeus on suurimmillaan sen ohittaessa perusasentonsa (Halko et al. 1998, 124). Putkea taivuttavien coriolisvoimien suuruus on verrannollinen kulmanopeuteen, joten myös putken taipuma tällöin suurin. Vastaavasti putken käydessä värähdysliikkeen ääri-asennoissa sen kulmanopeus käy nollassa ennen suunnan vaihtumista.

Taipuminen näkyy värähtelevän putken liikkeitä mittaavien antureiden signaalin vaihe-eron, ja vaihe-eron suuruus ilmaisee virtauksen suuruuden. Signaalien vaihe-ero voidaan ilmaista joko asteina, tai aikaerona. Kuvassa 2.5 on havainnollistettu putken mittauspisteistä A ja B virtauksen tapahtuessa saatavaa signaalia ja tässä ilmenevää vaihe-eroa aikaerona  $\Delta t$  ilmaistuna.



Kuva 2.5: Mittauspisteet ja vaihe-ero.

Suoralla mittausputkella toteutettu coriolis-virtausmittari toimii vastaavalla tavalla. Päistään tuettua putkea poikkeutetaan keskeltä, ja värähtelyn vaihetta mitataan poikkeutuskohdan kummaltakin puolelta. Suoran putken taipumista havainnollistetaan kuvassa 2.6. Tässäkin havainnollistavassa kuvassa taipuminen on esitetty liioitellun suurena.



Kuva 2.6: Suoran mittausputken värähtely ilman virtausta (a), ja virtauksen aikaansaama putken taipuminen (b).

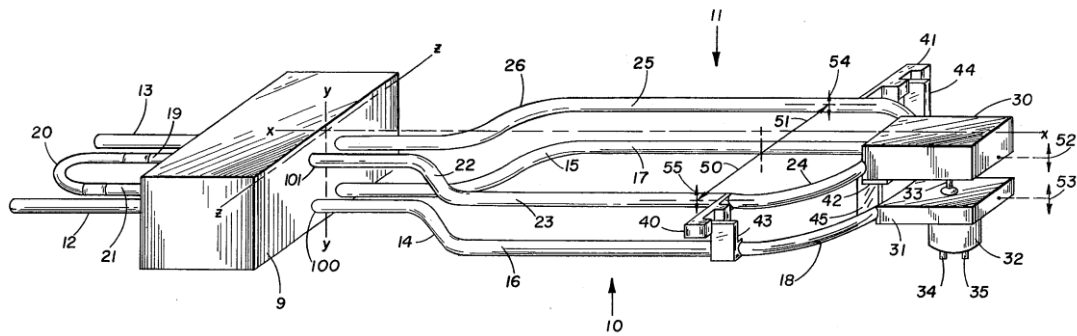
## 2.3 Historia

Ensimmäiset tunnetut coriolisilmiötä toiminnassaan hyödyntävät virtausmittarit on esitelty 1950-luvulla (Wang & Baker 2014, 100). Aluksi mittareissa käytettiin pyöriviä osia, mutta nopeasti havaittiin edestakaisen värähtelyn olevan teknisesti helpompi ratkaisu. Alkuun värähteleviä mittausputkia poikkeutettiin käyttäen moottoreita ja näihin liitettyjä epäkeskoja ja erilaisia vipuvarsia. Näistä edettiin kuitenkin nopeasti suoraan mittausputken kiinnitettyjen sähkömagneettisten poikkeutuskäämien käyttöön.

Suoralla putkella toteutetun mittarin kehityksen alkuvaiheessa kokeiltiin rakennetta, jossa mittausputki on katkaistu keskeltä ja puoliskot yhdistetty joustavalla liitoksella. Molemmat mittausputken puoliskot saatettiin värähtelemään omilla ohjaukäämeillään samassa vaiheessa vakioamplitudilla. Vaihe-eron mittauksen sijaan virtauksen määrä saatiin selville samanvaiheisen värähtelyn ylläpitämiseen vaadittavien voimien perusteella. (Wiley et al. 1963)

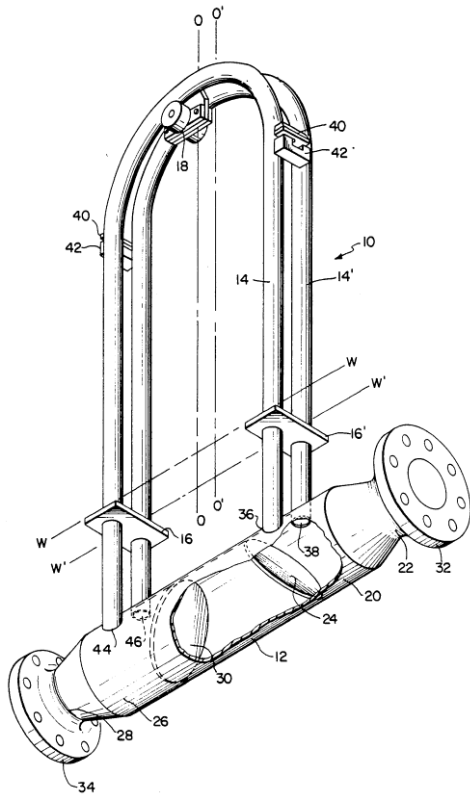
Suoran massavirtamittauksen lisäksi coriolis-virtausmittareiden merkittävänä etuna pidettiin periaatteen soveltuvuutta monenlaisille virtaaville aineille. Nesteen ja kaasun lisäksi useassa patentissa mainitaan erikseen mittausmenetelmän soveltuvan myös lietteille tai kiintoainepartikkeleita sisältäville virtauksille. (Sipin, 1967; Smith & Cage, 1985)

Coriolis-virtausmittari kehitettiin periaatteessa nykyiseen muotoonsa pitkälti 1970- ja 1980-luvuilla. Eräänä merkittävänä virstanpylväänä kehitystyössä mainittakoon 1978 myönnetty patentti, jossa Cox ja Gonzalez (1978) esittävät perusratkaisuiltaan hyvin pitkälti nykyisiä muistuttavan coriolis-virtausmittarin (kuva 2.7). Tässä mittarissa yhtenäinen putki muodosti kaksi silmukkaa, jolloin muodostui tyypillinen kahden mittausputken symmetrinen rakenne. Putkia poikkeutettiin solenoidilla, ja värähdyksiä mitattiin kahden optisen anturin avulla.



Kuva 2.7: Vuonna 1978 patentoitu coriolis-virtausmittari (Cox & Gonzalez, 1978).

Smith ja Cage (1985) puolestaan esittelivät ratkaisun, jossa virtaus jaettiin tasan kahteen rinnakkaiseen putkeen (kuva 2.8). Etuna aiempiin kahden sarjaan kytketyn putken ratkaisuihin verrattuna esitettiin suurempaa herkkyyttä virtauksen jakamisen mahdollistamien ohuempien putkien ansiosta. Mittarista voitiin täten tehdä myös pienempi, ja rakenteesta symmetrisempi.



Kuva 2.8: Kahdella rinnakkaisella u-putkella toteutettu coriolis-virtausmittari (Smith & Cage, 1985).

Smithin ja Cagen mittarissa käytettiin toiseen putkeen kiinnitettyä kestmagneettia ja toiseen putkeen kiinnitettyä käämiä putkien värähdysten mittaamiseen. Putkien liikkua toistensa suhteen nämäkin liikkuvat vastaavasti ja käämiin indusoitui liikettä vastaava jännite. Tämä periaate on vakiintunut ja sitä käytetään edelleen yleisesti.

Coriolis-virtausmittarin konseptin vakiinnuttua merkittävää kehitystyötä on tehty kuitenkin usealla eri osa-alueella. Mittausputkelle on kehitetty lukuisia vaihtoehtoisia muotoja, ja tutkittu näiden soveltuvuutta erilaisiin sovelluksiin. Putkien värähtelyitä mitataan entistä tarkemmin, ja erityisesti näin saadun signaalin käsittely on edistynyt merkittävästi tietotekniikan kehityksen myötä. Alkuaikojen analogisen ohjaus- ja mittauselektroniiikan tilalle ovat tulleet digitaaliset sulautetut järjestelmät.

### 3 MITTARIN TOTEUTUS JA TARKKUUS

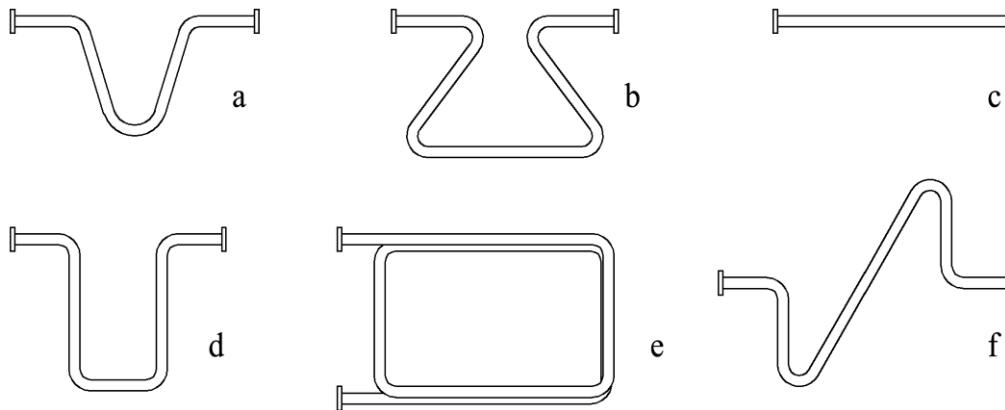
Käytännön coriolis-virtausmittari voidaan jakaa kahteen osakokonaisuuteen. Mittausputki on näistä ensimmäinen. Toinen on mittaukseen tarvittava elektroniikka, joka ohjaa putken poikkeutusta, määrittää putken värähtelyn, ja laskee tietojen perusteella virtausmäärän. Nämä kaksi erillistä osaa mahdollistavat molempiin liittyvän tutkimustyön tekemisen erikseen. Esimerkiksi signaalinkäsittelyyn liittyvässä tutkimus- ja kehitystyössä voidaan käyttää valmista kaupallista mittausputkea, ja keskittyä pelkästään elektronisen puolen kehittämiseen. Tällöin putki on materiaali- ja värähtelyominaisuuksiltaan valmiiksi tarkoitukseen optimoitu, ja alkuperäisellä ohjauselektroniikalla saatavaa tarkkuuden ja häiriöherkkyyden tasoa voidaan käyttää vertailukohtana kehitettävälle uudelle toteutukselle.

#### 3.1 Putken geometria

Coriolis-virtausmittareissa käytetään sekä suoraa, että mutkia tekeviä putkia. Molemmat voidaan toteuttaa joko yksiputkisena, tai kahdella tai useammalla rinnakkaisella putkella.

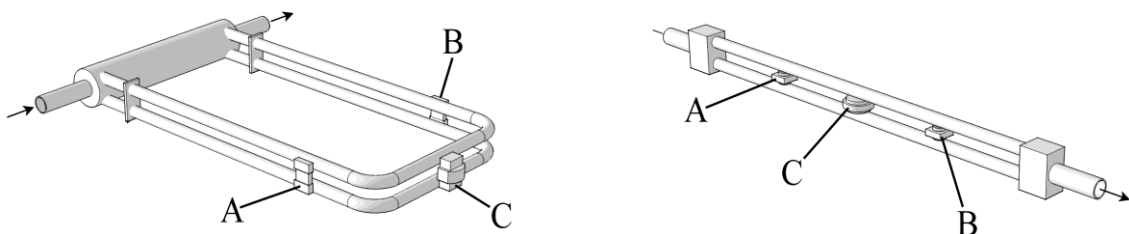
Suoran putken etuja ovat sen yksinkertaisuus ja puhdistettavuus. Yksittäisen suoran putken tapauksessa myös painehäviö jää minimaaliseksi. Useammalla putkella toteutettu symmetrinen ratkaisu taas puolestaan vaatii osan, joka jakaa virtauksen putkien välille.

Usein putkien muotoilulla pyritään vahvistamaan coriolisvoiman vaikutusta. Tyypillisesti putki tai putkipari muodostaa laajan lenkin. Mutkia tekevä putki ratkaisee toisaalta myös mittausputken lämpölaajenemisesta aiheutuvia ongelmia. Suoran mittausputken tapauksessa kuuma virtaava aine aiheuttaa helposti lämpötilaeroja mittausputken ja mittalaitteen rungon välille. Tällöin näiden erilaisen lämpölaajenemisen vuoksi putkeen kohdistuu pituussuuntaisia voimia. (Anklin et al. 2006, 319) Kuvassa 3.1 on esitetty joitakin tyypillisiä käytännön coriolis-virtausmittareissa käytettyjä mittausputkien muotoja. Nykyään yleisimmin käytettyjä ovat v-putki (a),  $\Omega$ -putki (b), suora putki (c) ja u-putki (d) (Wang & Baker 2014, 114).



Kuva 3.1: Esimerkkejä tyypillisistä kaupallisissa coriolis-virtausmittareissa käytetyistä mittausputkien muodoista.

Yleisesti käytetyssä rakenteessa on kaksi rinnakkaista putkea, joihin virtaus jaetaan. Putket saatetaan värähtelemään suhteessa toisiinsa yleisemmin sähkömagneettisesti ohjaukskämin avulla. Putkien taipumaa mittaavat anturit on sijoitettu niin, että ne mittaavat putkien liikettä toistensa suhteen. Tällä symmetrisellä järjestelyllä vähennetään mittauksen herkkyyttä ulkopuolisen värähtelyn aiheuttamille häiriöille. (Baker 2016, 568-569) Virtauksen ei tarvitse jakautua putkiin täysin tasaisesti, sillä saatava anturien signaali muodostuu molempien putkien signaaleista yhdessä. Kuvassa 3.2 on esitetty symmetrisenä rakenteena kahdella rinnakkaisella u-putkella ja suoralla putkella toteutetut coriolis-virtausmittarit.



Kuva 3.2: Kahden u-putken ja suoran putken periaatteella toteutetut coriolis-virtausmittarit. Merkittävänä anturit A ja B, ja poikkeutuskäämi C.



Virtauksen jakaminen kahteen putkeen saattaa kuitenkin joissain tapauksissa aiheuttaa ongelmia. Jakaja muodostaa putkeen epäjatkuvuuskohdan, joka osaltaan lisää painehäviötä ja saattaa tarjota paikan virtauksen mukana kulkevan kiintoaineksen kertymiselle.

Kahdesta rinnakkaisesta putkesta muodostuva symmetrinen rakenne voidaan myös toteuttaa siten, että yksi yhtenäinen putki muodostaa kaksi vierekkäistä silmukkaa (Wang & Baker 2014, 115). Tässä ratkaisussa virtaava aine joutuu kiertämään pidemmän matkan mittarin sisällä, mutta toisaalta vältytään virtauksen jakamiselta kahteen erilliseen putkeen.

Yksittäinen mittari voidaan toteuttaa myös suuremmalla rinnakkaisella putkimäärällä. Tällöin yleensä putkien määrä on parillinen, ja putket toimivat pareittain kuten kahden putken tapauksessa.

### **3.2 Lähetin**

Lähetin on mittausputken yhteyteen asennettava laite, joka sisältää tarvittavan elektroniikan putken poikkeutuksen ohjaamiseen, anturisignaalien analysointiin, virtaustietojen laskentaan, ja tietojen välittämiseksi eteenpäin. Tieto virtauksen suuruudesta voidaan välittää joko perinteisesti standardin mukaisena virtaviestinä, tai nykyään yleistyneellä tavalla digitaalimuodossa väyläpohjaisesti.

Kaupalliset coriolis-virtausmittarit ovat käytännössä aina mittausputken ja lähettimen muodostamia kokonaisuuksia (kuva 3.3). Valmistajat voivat tarjota mittareita valmiina yhdistelminä. Vaihtoehtoisesti mittausputkelle voidaan tarjota useita lähetinvaihtoehtoja, joista tapauskohtaisesti voidaan valita tarvittavilla ominaisuuksilla varustettu malli.



Kuva 3.3: Coriolis-virtausmittari. Koteloitu mittausputki ja lähetin. (Emerson 2019)

### 3.3 Vasteaika ja signaalin käsittely

Coriolis-virtausmittarin vasteen aikavakion pienin mahdollinen arvo on poikkeutustaajuuden jaksonaika (Clark & Cheesewright 2003, 275). Tästä syystä putken resonanssitaajuuden kasvattaminen mahdollistaa nopeamman reagoinnin virtauksen muutoksiin.

Taajuuden ohella oleellista on myös anturisignaalien käsittely, joka vaikuttaa oleellisesti sekä mittarin tarkkuuteen että vasteeseen virtauksen muuttuessa. Käytännössä kun mittausputken ominaisvärähdystaajuutta ei voida tai haluta nostaa, ainoa keino parantaa mittarin vasteaikaa on kehittää lähettimen toimintaa.

Oleellinen kehityssaskel coriolis-virtausmittauksen tarkkuuden parantamisessa on ollut siirtyminen analogisesta ohjauselektroniikasta digitaaliseen. Digitaalinen signaalinkäsittely parantaa niin vaihe-eron määrittämisen tarkkuutta, kuin myös putken poikkeutuksen ohjauksen tarkkuutta. Digitaaliseen järjestelmään voidaan ohjelmoida tarpeen mukaan erilaisia korjauskertoimia virtauksen mittaustarkkuuden parantamiseksi. (Henry et al. 2000, 504-505)

Digitaalinen signaalinkäsittely mahdollistaa myös mittausta häiritsevän kohinan ja muiden häiriösignaalien vaikutuksen tehokkaan vähentämisen. Kehittyneillä algoritmeilla voidaan erottaa anturien signaalista tarpeellinen vaihesignaali ja jättää muut häiriökomponentit huomioimatta.

Digitaalinen signaalinkäsittely tuo kuitenkin mukanaan myös omat haasteensa. Signaalinkäsittelyyn kuluva aika riippuu käytetyistä algoritmeista ja käytössä olevasta laskentatehosta. Lähetin vastaanottaa tietoa antureilta tietyllä tiedonkeruunopeudella. Seuraavaksi saatua tietoa esikäsitellään muun muassa häiriösignaalien poistamiseksi. Tämän jälkeen prosessointi jatkuu vaihetiedon erottelemisella ja virtaustietojen laskemisella, minkä jälkeen saatu tieto virtauksesta lähetetään eteenpäin. Jokaiseen vaiheeseen kuluu oma aikansa, ja näiden vaiheiden nopeuttamisen kautta mittarin vasteaikaa voidaan parantaa. (Clark et al. 2006, 392)

### **3.4 Monifaasivirtaus**

Coriolis-virtausmittarilla voidaan mitata virtausta, joka muodostuu useammasta aineesta. Monifaasivirtaus muodostuu eri olomuodoissa olevien aineiden seoksesta. Esimerkiksi nestevirtauksessa voi olla kaasukuplia tai kiintoainepartikkeleita. Virtaus voi myös muodostua kahdesta tai useammasta nesteestä, jotka eivät muodosta keskenään homogeenistä seosta.

Useasta aineesta muodostuvassa virtauksessa ongelmaksi muodostuu se, että sen osat voivat liikkua toistensa suhteen. Mittausputken sisältö ei tällöin värähtele yhtenäisenä massana putken mukana, mikä aiheuttaa virhettä sekä tiheyden että massavirran määrittämiseen. Tämä koskee erityisesti nesteen ja kaasun seoksia, mutta vaikuttaa myös toisiinsa sekoittumattomissa nesteissä. Tiheydeltään toisiaan vastaavien aineiden yhteydessä ongelmaa taas ei pitäisi muodostua (Wang & Baker 2014, 110).

Tyypillisesti ongelmia aiheuttavat nesteessä olevat kaasukuplat, jotka ovat nestefaasiin verrattuna tiheydeltään pieniä ja kokoonpuristuvia. Kaasukuplien osuuden noustessa mittauksen tarkkuus heikentyy. Vaikutuksen suuruus riippuu sekä mittarin ominaisuuksista että virtaavien aineiden ominaisuuksista. Reiznerin (2003, 28) artikkelin mukaan 2 % kaasuosuuden on havaittu aiheuttaneen jopa 20 % virheitä mittauksiin. Virtausnopeudella on myös suuri merkitys, sekä sillä onko kaasu nesteen joukossa

pieninä vai koko putken läpimitan täyttävinä kuplina (Hemp & Yeung 2003, 36). Samoin mittarin asennusasento vaikuttaa mittarikohtaisesti.

Nesteen mukana kulkeutuvat kiintoainepartikkelit puolestaan eivät aiheuta kaasukuplien tapaukseen verrattavia ongelmia. Oleellista on kuitenkin se, että kiintoaine kulkeutuu tasaisesti virtauksen mukana ja ei kasaudu mittausputkeen. Mittausputkeen kertyvä paikallaan pysyvä kiintoaine lisää mittausputken massaa, tyypillisesti epätasaisesti, joten sekä tiheyden että virtauksen määrittäminen häiriintyy. Virtauksen mukana kulkevan kiintoaineen määrä, partikkelikoko ja ominaisuudet vaikuttavat mittausvirheen suuruuteen, kuten myös käytetyn mittarin ominaisuudet.

### 3.5 Sykkivä virtaus

Eräs merkittävä epätarkkuutta coriolis-virtausmittauksiin aiheuttava tekijä on virtauksen sykkiminen, jota voivat aiheuttaa esimerkiksi positiiviset syrjäytyspumput, kompressorit sekä resonoivat putkistot ja venttiilit (Svete et al. 2015, 31). Sykkivä virtaus voi saada aikaan mittausputken ei-toivottuja liikkeitä, jotka häiritsevät putken normaalia värähtelyä ja siten myös saatavaa anturitietoa putken värähtelystä. Näitä liikkeitä voi syntyä joko siten, että sykintä saa putken värähtelemään suoraan sykintätaajuudella. Vaihtoehtoisesti putken liikkeitä voi syntyä taajuudella, joka on sykintätaajuuden ja putken resonanssitaajuuden summa tai erotus (Cheesewright et al. 1999, 215).

Sykkivän virtauksen haitallisuuden kannalta merkitystä on siis sen sykkimistaajuudella. Erityisen ongelmallisia taajuuksia ovat putken resonanssitaajuus ja tämän harmoniset kerrannaiset. Ensimmäiselle kerrannaiselle osuvalle sykkimistaajuudelle voi testien perusteella saada aikaan jopa  $\pm 100$  % virheen mittarin näyttämässä, ja resonanssitaajuudelle tai toiselle kerrannaiselle osuvalle  $\pm 50$  % virheen (Svete et al. 2015, 31).

Sykkivän virtauksen vaikutusten suuruus erimerkkisiin ja -mallisiin coriolis-virtausmittareihin vaihtelee merkittävästi (Svete et al. 2015, 31). Poikkeutuksen ohjaukseen ja vaihe-eron määrittämiseen käytetty tekniikka ja menetelmät vaihtelevat, kuten myös mittausputken muu fyysinen toteutus.

Sykkivän virtauksen aiheuttamaa ongelmaa voidaan ratkaista signaalinkäsittelyn keinoin. Sykkimisen taajuus vaikuttaa huomattavasti siihen, kuinka helposti signaalista pystytään

erottamaan todellinen mittaussignaali ja jättämään huomiotta häiritsevät taajuuskomponentit. Lisäksi mittariin voidaan helposti lisätä varoitustoiminto, joka ilmoittaa, mikäli mittari havaitsee merkittävää virtauksen sykkimistä. (Cheesewright & Clark 1998, 1038)

Mittariin johtuva värinä voi myös aiheuttaa ongelmia samaan tapaan kuin virtauksen sykkiminen. Vaikka mittareiden rakenteen suunnittelussa pyritään ehkäisemään ulkoisen värinän vaikutuksia, voi etenkin taajuudeltaan putken resonanssitaajuuden lähelle osuva ulkoinen värinä aiheuttaa suhteellisen suuria virhettä mittaukseen (Anklin et al. 2006, 322).

### **3.6 Mittarin virhe**

Virtausmittareiden virherajojen suhteen on huomioitava, missä muodossa virhemarginaali ilmaistaan. Virhe voidaan esimerkiksi ilmoittaa suhteellisena virheenä mittarin näyttämälle sen hetkisellem virtausmäärälle, tai virhe voidaan ilmoittaa prosenttiosuutena mittarin mittausalueen ylärajan näyttämästä (FSD, full scale deflection). Mikäli virheraja on ilmoitettu suhteessa mittarin ylärajaan, kasvaa prosentuaalisesti ilmaistu virhe virtausmäärän pienentyessä merkittävästi.

Virhe voidaan myös ilmoittaa osissa erilaisille virtausmäärille. Erilaiset yhdistelmät ovat myös yleisesti käytettyjä. Virherajat voidaan esimerkiksi ilmoittaa prosentuaalisena virheenä näyttämälle tietyillä virtausmääräalueilla, ja lisäksi ilmoittaa tämän päälle tuleva virheosuus ilmaistuna osuutena ylärajan näyttämästä.

Virtausmittareille määritellään toiminta-alue tai mittausalue (turndown ratio), jolla virtausmittarin toimintaan voidaan luottaa (Baker 2002, 5). Tällä alueella virtausmittauksen virhe pysyy ilmoitetuissa ja mittarin valinnan yhteydessä sovellukseen hyväksytyissä rajoissa. Toiminta-alue ilmoitetaan usein mittausalueen suurimman ja pienimmän virtausarvon suhteena. Coriolis-virtausmittareille ilmoitetaan tyypillisesti toiminta-alueelle suhteeksi 100:1 (Baker 2002, 40).

Coriolis-virtausmittarin yhteydessä oleellinen huomioitava virhe on myös mittarin nollakohdan vakaus ja ryömintä (zero stability, zero drift). Esimerkiksi mittausputken epäsymmetrisyys, väsyminen, vauriot ja lämpötilan muutokset voivat aiheuttaa mittarin

nollakohdan siirtymistä. Tällöin mittari ei näytä nollaa virtauksen ollessa täysin pysähtynyt, vaan tietynsuuntaisella pienellä virtauksella. Nollakohdan suhteen voi myös esiintyä satunnaista vaihtelevaa virhettä. Mittalaitteen valmistaja voi määrittää mittarilleen virherajat myös nollakohdan vakaudelle, jolloin tämä epävarmuustekijä tulee huomioida mittalaitteen kokonaisvirhettä arvioitaessa.

Putken mekaanisen symmetrian ohella myös putken värähtelyyn vaikuttavat tekijät aiheuttavat virhettä. Mikäli putken värähtelyä vaimennetaan epäsymmetrisesti, tästä aiheutuu vastaavaa vaihesiirtoa kuin virtauksesta. Riittävän suuri epäsymmetrisesti värähtelyä vaimentava tekijä voi saada mittarin näyttämään tyypillistä mittausalueen virtausta, vaikka todellisuudessa virtausta ei olisi. (Enz et al. 2011, 8)

Mittausputki on kaupallisissa mittareissa yleensä koteloitu. Tämä suojaa putkea ulkoisilta vaurioilta ja likaantumiselta.

### 3.7 Tarkkuus

Coriolis-virtausmittarin tarkkuus on lähtökohtaisesti erittäin hyvä, mutta sykkivän virtauksen ja ulkopuolisen tärinän aiheuttamat virhemahdollisuudet tulee kuitenkin huomioida. Taulukossa 3.1 on esitetty kirjallisuudessa annettuja tyypillisiä ylärajoja virheelle mittarin näyttämästä erilaisilla virtausmääräalueilla. Näistä huomataan, että periaate mahdollistaa tarkan mittauksen hyvin laajalla mittausalueella.

Taulukko 3.1: Coriolis-virtausmittarin tyypillisiä virherajoja (Baker 2002, 124).

Osuus nimellisestä maksimivirtauksesta	Virheraja
1 – 10 %	±1,0 %
10 – 50 %	±0,5 %
50 – 100 %	±0,35 %

Kaasujen osalta mittaustarkkuus on hieman nesteitä heikompi. Coriolis-virtaustaus toimii sitä paremmin, mitä suurempi massavirtaus on. Kaasujen tiheys on nesteitä pienempi, joten mittausputkessa syntyvät coriolisvoimat ovat myös vastaavasti pienempiä. Tästä syystä myös putken värähtelyjen tarkka mittaaminen on

haasteellisempaa. Mittauksen tarkkuutta voidaan parantaa nostamalla kaasun painetta, ja siten sen tiheyttä. (Anklin et al. 2006, 320)

Kaupallisten mittareiden valmistajat ilmoittavat massavirtamittauksen tarkkuudeksi tyypillisesti  $\pm 0,05 - 0,5$  % nesteille ja  $\pm 0,35 - 0,75$  % kaasuille (Wang & Baker 2014, 114). Tiheyden mittaukselle virherajoiksi ilmoitetaan arvoja  $\pm 0,2 \text{ kg/m}^3$  ja  $\pm 10 \text{ kg/m}^3$  väliltä (Baker 2016, 581).

## 4 SOVELTUVUUS

Coriolis-virtausmittarin käyttö on jatkuvasti lisääntynyt, vaikka se edelleen on hieman vähemmän tunnettu ratkaisu virtausmittauksen alalla. Teollisessa käytössä coriolis-virtausmittari käytetään yleisesti ruoka- ja juomateollisuudessa, kemianteollisuudessa, lääketeollisuudessa, ja öljy- ja kaasuteollisuudessa (Anklin et al. 2006, 317). Mittareita on saatavilla useilta mittalaitevalmistajilta osana näiden tuotevalikoimaa.

Suoran massavirtauksen vuoksi coriolis-virtausmittaus on herättänyt laajaa kiinnostusta, mutta toisaalta esiteltyjen heikkouksien vuoksi siihen on myös suhtauduttu varauksella. Mittaustarkkuuden ja häiriönsiedon kehittyminen on kuitenkin jatkuvasti parantanut sen asemaa mittausvaihtoehtoja harkittaessa.

### 4.1 Kokoluokat ja virtausalueet

Wangin ja Bakerin (2014, 103) mukaan Coriolis-virtausmittareita on perinteisesti käytetty keskisuurille virtauksille suuruusluokassa 1 – 1000 t/h (noin 0,28 – 280 kg/s), putkikokojen vaihteluvälin ollessa 6 – 125 mm.

Eräänlaiseksi käytännön kokorajaksi coriolis-virtausmittarityypeille on esitetty putkikokoluokkaa DN 100 (Reizner 2003, 28). Suoralla putkella toteutettua coriolis-virtausmittaria lukuun ottamatta rakenne alkaa suuremmissa kokoluokissa nopeasti muuttua sekä liian kalliiksi että kooltaan suureksi. Suurempien coriolis-virtausmittareiden osalta niin tutkimus kuin kaupallinen tarjontakin painottuu tästä syystä suoran putken ratkaisuihin (Wang & Baker 2014, 113). Suurimpien kaupallisten suoralla putkella toteutettujen coriolis-virtausmittarien mittausalue ulottuu jopa 4600 tonniin tunnissa (noin 1280 kg/s) putkikoon ollessa DN 400 (Krohne 2017).

Pienimmät esitellyt coriolis-virtausmittarit mittaavat massavirtoja suuruusluokassa mikrogrammoja sekunnissa. Esimerkiksi Sparreboom et al. (2013, 22) on esitellyt artikkelissaan mikrokokoisen coriolis-virtausmittarin, jonka mittausalueen yläraja on 1 g/h (noin 278 µg/s), nollakohdan vakaus 2 mg/h (noin 0,6 µg/s), ja tarkkuus 0,5 % näyttämystä sekä nesteiden että kaasujen virtausta mitattaessa. Näissä mikrokokoisissa coriolis-virtausmittareissa mittausputket voivat olla kooltaan vain muutamien millimetrien pituisia (Monge et al. 2016, 745).



Mikrokokoisten coriolis-virtausmittareiden osalta on meneillään jatkuvaa tutkimus- ja kehitystyötä. Näille hyvin pienille mittalaitteille on suunniteltu sovelluksia esimerkiksi lääketieteessä lääkeaineiden annostelussa. Teknisempinä sovelluksina on mainittu erilaiset kemialliset analyysilaitteet ja muut tutkimuslaitteet.

## 4.2 Edut ja heikkoudet

Coriolis-virtausmittarin ensisijainen etu on sen mahdollistama massavirran suora mittaaminen. Muihin merkittäviin etuihin lukeutuvat sen tarkkuus ja laaja toiminta-alue. Mittaus ei ole herkkä virtaavan aineen paineen, viskositeetin tai tiheyden muutoksille. Virtauksen nopeusprofiililla mittausputkessa ei ole myöskään merkitystä. Asennuksen kannalta etua on siitä, että coriolis-virtausmittari ei tarvitse pitkiä suoria putkiosuuksia ennen mittaria tai sen jälkeen.

Coriolis-virtausmittausta voidaan käyttää monenlaisten aineiden virtauksen mittaamiseen riippuen mittarin toteutustavasta. Puhtaiden kaasujen ja nesteiden lisäksi voidaan mitata kiintoaineita sisältävien liuosten virtauksia. Monifaasivirtaukset aiheuttavat kuitenkin edelleen ongelmia kaikesta kehitystyöstä huolimatta. Virtaavan aineen lämpötilan suhteen tyypilliseksi ylärajaksi on ilmoitettu 400 °C (Baker 2016, 590).

Virtauksen suunnalla ei coriolis-virtausmittauksessa merkitystä. Mittari voidaan helposti toteuttaa mittaamaan virtausta, jonka suunta voi vaihtua. Tämä ei ole mahdollista kaikilla virtausmittarityypeillä.

Putki on yksinkertaisena rakenteena myös helppo toteuttaa korroosiota kestävästä materiaalista virtavan aineen vaatimusten mukaisesti. Mutkia lukuun ottamatta putkessa ei ole virtausta häiritseviä esteitä. Pientä painehäviötä vaadittaessa yksittäisellä suoralla putkella toteutettu mittari vastaa painehäviöltään tavallista vastaavankokoista putkea. Suora putki on myös puhdistettavuuden kannalta erinomainen ratkaisu. Muilla putkimuodoilla painehäviö on vedelle nimellisellä maksimivirtauksella tyypillisesti luokkaa 0,5 – 1,5 bar (Anklin et al. 2006, 321). Painehäviön suuruuteen vaikuttavat mittausputken geometria, ja virtauksen jakamiseen käytetyt virtauskanavan rakenteet. Mittausputken mutkat ja virtauksenjakaja tekevät myös putken puhdistamisesta erittäin hankalaa.

Coriolis-virtausmittari on hankintahinnaltaan moneen muuhun yleisesti käytettyyn virtausmittariin verrattuna kalliimpi. Muut coriolis-virtausmittarin merkittävimmät heikkoudet pohjautuvat sen mekaaniseen toteutukseen. Värähtelevä mittausputki on herkkä sekä virtauksen sykkimiselle että ulkoisille värähtelyille. Vaikka kehitystä on tapahtunut, tämä seikka on edelleen mittarin suurimpia heikkouksia.

### **4.3 Vertailua muihin mittausvaihtoehtoihin**

Massavirta voidaan määrittää tilavuusvirran ja tiheyden perusteella. Näin ollen mikä tahansa virtaukselle sovelias tilavuusvirtamittaus yhdistettynä tiheyden määrittämiseen tuottaa tarpeelliset tiedot massavirran laskemiselle. Massavirtamittauksen tarkkuus riippuu tällöin molempien mittausten tarkkuuksista, jolloin kokonaisvirhettä arvioitaessa molempien virheet tulee huomioida yhdessä.

Paine-eroon perustuvat virtausmittaukset ovat teollisuudessa yleisesti käytettyjä, ja edustavat perinteistä tekniikkaa virtausten mittaamisessa. Mittauksen tarkkuus on tyypillisesti coriolis-virtausmittausta heikompi, ja toiminta-alue pienempi. Edullinen hinta ja periaatteen tunnettuus ovat kuitenkin menetelmän etuja, vaikka massavirran määrittäminen näillä vaatiikin oheen muita erillisiä mittauksia.

Sähkömagneettinen virtausmittari tarjoaa hyvän tarkkuuden jo hyvin pienistä osavirtauksista lähtien. Etuna on myös lyhyt suora ja esteetön mittausputki. Menetelmä soveltuu kuitenkin vain riittävän suuren sähkönjohtavuuden omaaville nesteille.

Tilavuuslaskijatyypisillä mittareilla päästään hyvään mittaustarkkuuteen tilavuusvirran mittauksessa. Nämä ovat kuitenkin herkkiä virtauksen mukana kulkeutuville epäpuhtauksille, jotka voivat vahingoittaa mittaria (Halko et al. 1998, 93). Tilavuuslaskijoita voidaan siksi käyttää vain riittävän puhtaille nesteille ja kaasuille, mikä on coriolis-virtausmittariin verrattuna selkeä heikkous. Nesteiden mittaamiseen tarkoitettujen tilavuuslaskijain voi myös ilmoittaa virheellisiä virtausarvoja, mikäli nesteen joukossa on kaasukuplia (Baker 2002, 75).

Mikäli taas virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti tunnetaan tai saadaan määritettyä riittävällä tarkkuudella, voidaan harkita termistä massavirtamittaria. Termisen massavirtamittarin toiminta perustuu virtaavan aineen lämmittämiseen tunnetulla teholla,

ja tästä aiheutuvan lämpötilamuutoksen mittaamiseen. Menetelmä ei tällöin luonnollisesti sovellu tilanteisiin, joissa aineen lämpötilan nousua ei voida hyväksyä. Termisen massavirtamittarin tarkkuus ei kuitenkaan ole yhtä hyvä kuin coriolis-virtausmittarin, ja toiminta-alue on pienempi (Baker 2002, 116).

## 5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli perehtyä coriolis-virtausmittarin historiaan, toimintaperiaatteeseen, teknisiin toteutuksiin ja käyttökohteisiin. Työn alussa tarkasteltiin coriolis-ilmiötä yleisesti, ja edettiin tästä coriolis-virtausmittarin toimintaperiaatteeseen. Historiakatsauksessa keskityttiin muutamiin periaatteen kannalta oleellisiin keksintöihin, joiden kautta nähtiin, kuinka coriolis-virtausmittarin konsepti vakiintui nykyiseen muotoonsa.

Taustatiedoista edettiin nykyaikaisen coriolis-virtausmittarin toteutuksen yksityiskohtiin, sekä mittarin tarkkuuteen ja siihen vaikuttaviin seikkoihin. Lisäksi perehdyttiin saatavilla olevien mittareiden kokoluokkiin, etuihin ja heikkouksiin, ja vertailtiin lyhyesti coriolis-virtausmittausta muihin yleisiin tapoihin massavirran määrittämiseksi.

Coriolis-virtausmittaukseen liittyen on tehty paljon tieteellistä tutkimusta. Tieteellisissä artikkeleissa on käsitelty kaikkia mittaukseen liittyviä osatekijöitä. Lähdemateriaalia olisi ollut tarjolla huomattavasti laajempaan esitykseen, mutta kandidaatintyön luonteesta johtuen aiheita ja niiden käsittelyn syvällisyyttä jouduttiin rajaamaan.

Työstä rajautuivat pois myös tarkemmat arvioinnit erilaisten mittausratkaisujen kokonaiskustannuksista, ja coriolis-virtausmittareiden hinnasta näihin verrattuna. Myöskään tarkempaa selvitystä kaupallisten mittarien saatavuudesta erilaisiin käyttökohteisiin ei tehty, vaan saatavuutta käsiteltiin yleisesti kokoluokkien kautta. Molemmat näistä tarjoaisivat kiinnostavan aiheen jatkoselvityksille.

Coriolis-virtausmittarin todettiin olevan hyvin potentiaalinen vaihtoehto massavirran mittaamiseen. Mittausmenetelmä omaa kuitenkin ainakin toistaiseksi myös tiettyjä vakavia heikkouksia, joiden vuoksi mittalaitteen valinnassa on oltava tarkkana. Sykkivä virtaus ja värinä häiritsevät mittarin toimintaa, joten näiden mahdollisuus tulee huomioida mittaria valittaessa. Mittareiden häiriintymisherkkyys vaihtelee, joten sykkimisen ja värinän suuruudesta ja taajuudesta riippuen coriolis-virtausmittari voi myös soveltua kohteeseen, jossa näitä häiriötekijöitä esiintyy.

Mikäli tunnettuja ongelmia aiheuttavia tekijöitä ei esiinny, coriolis-virtausmittari tarjoaa mahdollisuuden luotettavaan ja tarkkaan massavirran mittaukseen. Tällöin yhdellä

mittarilla saadaan mitattua suoraan sekä massavirta, että myös virtaavan aineen tiheys. Coriolis-virtausmittari on vähemmän tunnettu kuin moni muu virtausmittarityyppi, mutta etujensa ansiosta sen käyttö saattaa tulevaisuudessa yleistyä. Rajoitteistaan johtuen coriolis-virtausmittaria ei siis voi pitää yleispätevänä ratkaisuna kaikkiin massavirran mittaustarpeisiin, mutta vahvuuksiensa ansiosta sen käyttöä kannattaa kuitenkin tapauskohtaisesti harkita.

## LÄHDELUETTELO

Anklin, Martin & Drahm, Wolfgang & Rieder, Alfred. 2006. Coriolis mass flowmeters: Overview of the current state of the art and latest research. *Flow Measurement and Instrumentation*, volume 17, Issue 6, pp. 317-323. ISSN 0955-5986.

Baker, R. C. 2002. *An introductory guide to flow measurement*. 2nd ed. London: Professional Engineering Publishing. ISBN 1-86058-348-2.

Baker, R. C. 2016. *Flow measurement handbook: Industrial designs, operating principles, performance, and applications*. Second edition. New York, NY: Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-04586-6.

Beer, F. P. & Johnston Jr., E. R. & Clausen, W. E. & Cornwell, P. J. 2007. *Vector mechanics for engineers: Dynamics*. 8th ed. in SI units. New York: McGraw-Hill. 601-1287 s. ISBN: 978-007-125875-3.

Cheesewright, R. & Clark, C. 1998. The effect of flow pulsations on coriolis mass flow meters. *Journal of Fluids and Structures*, Volume 12, Issue 8. pp. 1025-1039. ISSN 0889-9746.

Cheesewright, R. & Clark, C. & Bisset, D. 1999. Understanding the experimental response of Coriolis massflow meters to flow pulsations. *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 10, Issue 4. pp. 207-215. ISSN 0955-5986.

Clark, C. & Cheesewright, R. 2003. Coriolis Flow Meters/The Potential for Outstanding Dynamic Performance. *Measurement and Control*, 36(9), pp. 275–281.

Clark, C. & Zamora, M. & Cheesewright, R. & Henry, M. 2006. The dynamic performance of a new ultra-fast response Coriolis flow meter. *Flow Measurement and Instrumentation*, volume 17, Issue 6, pp. 391-398. ISSN 0955-5986.

Cox, Bruce M. & Gonzalez, Floyd A. 1978. Coriolis mass flow rate metering means. Hak. US05/804,478, 7.6.1977. Julk. 28.11.1978. Pat. US4127028A.

Emerson. 2019. [verkkoaineisto]. [viitattu 4.3.2019]. Saatavissa: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/automation-solutions/measurement-instrumentation/micro-motion-density-viscosity/micro-motion-r-series-coriolis-meter>

Enz, Stephanie & Thomsen, Jon Juel & Neumeyer, Stefan. 2011. Experimental investigation of zero phase shift effects for Coriolis flowmeters due to pipe imperfections. *Flow Measurement and Instrumentation*, Volume 22, Issue 1, pp. 1-9. ISSN 0955-5986.

Halko, Pekka & Härkönen, Sakari & Lähteenmäki, Ilkka & Välimaa, Taisto. 1998. *Teollisuuden mittausmekaniikka: Perusmittauksia*. 6.-7. painos. Helsinki: Oy Edita Ab. 143 s. ISBN 951-37-0229-4.

Hemp, J. & Yeung, H. 2003. Coriolis meters in two phase conditions. *Computing & Control Engineering Journal*, 14(4), pp. 36. ISSN: 0956-3385.

Henry, M.P. & Clarke, D.W. & Archer, N. & Bowles, J. & Leahy, M.J. & Liu, R.P. & Vignos, J & Zhou, F.B. 2000. A self-validating digital Coriolis mass-flow meter: an overview. *Control Engineering Practice*, Volume 8, Issue 5. PP. 487-506. ISSN 0967-0661.

Hibbeler, R. C. 2001. *Engineering mechanics: Dynamics*. 9th ed. Upper Saddle River (NJ): Prentice Hall. 672 s. ISBN: 0-13-020004-2.

KROHNE Messtechnik GmbH. 2017. New large line size Coriolis mass flowmeters. [verkkojulkaisu]. [viitattu 20.01.2019]. Saatavissa: <https://krohne.com/en/newsdetail/article/new-large-line-size-coriolis-mass-flowmeters-610/>

Marion, J. B. 1970. *Classical dynamics of particles and systems*. 2. ed. New York: Academic Press. 573 s. ISBN: 0-12-472252-0.

Monge, Rosa & Groenesteijn, Jarno & Alveringh, Dennis & Wiegerink, R.J. & Lötters, Joost & Fernandez, Luis J. 2017. SU-8 micro coriolis mass flow sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 241, pp. 744-749. ISSN 0925-4005.

Reizner, J. 2003. Coriolis-the almost perfect flowmeter. *Computing & Control Engineering Journal*, 14(4), pp. 28-33. ISSN: 0956-3385.

Sipin, Anatole J. 1967. Mass flow metering means. Hak. US406238A 26.10.1964. Julk. 04.07.1967. Pat. US3329019A.

Smith, James E. & Cage, Donald R. 1985. Parallel path Coriolis mass flow rate meter. Hak. US06439035 03.11.1982. Julk. 01.01.1985. Pat. US4491025.

Sparreboom, W., Geest, J.V., Katerberg, M., Postma, F., Haneveld, J., Groenesteijn, J., Lammerink, T., Wiegerink, R. & Lötters, J. 2013. Compact Mass Flow Meter Based on a Micro Coriolis Flow Sensor. *Micromachines*, vol. 4, no. 1, pp. 22-33.

Svete, A. & Kutin, J. & Bobovnik, G. & Bajsić, I. 2015. Theoretical and experimental investigations of flow pulsation effects in Coriolis mass flowmeters. *Journal of Sound and Vibration*, volume 352, pp. 30-45. ISSN 0022-460X.

Wang, Tao & Baker, Roger. 2014. Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions. *Flow Measurement and Instrumentation*, volume 40, pp. 99-123. ISSN 0955-5986.

Wiley, William C. & Goodrich, George W. & Adams, Franklin L. 1963. Oscillating mass flowmeter. Hak. US785839A 09.01.1959. Julk. 12.03.1963. Pat. US3080750A.