

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

Virtausmittauksen optimointi Kaukaan tehtailla
Optimization of flow measurement on Kaukas plant site

Työn tarkastaja: Pekka Punnonen
Työn ohjaaja: Cay Gunnila, Pekka Punnonen
Lappeenrannassa 12.3.2021
Senni Auvinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Senni Auvinen

Virtausmittauksen optimointi Kaukaan tehtailla

Kandidaatintyö 2021

Tarkastaja: Pekka Punnonen

Ohjaaja: Cay Gunnila, Pekka Punnonen

27 sivua, 2 taulukkoa

Hakusanat: virtausmittaus, metsäteollisuus, prosessihöyry

Tämä kandidaatintyö on tehty UPM-Kymmene Oyj:lle Kaukaan tehdasalueella Lappeenrannassa. Työn lähtökohtana oli tarkastella UPM-Kymmene Oyj:n tehtaiden ja Kaukaan Voima Oy:n biovoimalaitoksen välisessä 3,5-bar matalapainehöyrylinjassa sijaitsevan virtausmittalaitteen mittaustarkkuutta taselaskennan keinoin.

Aluksi työssä vertailtiin erilaisia höyryvirtauksen massa- ja tilavuusvirran mittaamiseen soveltuvia laitteita työssä tarkasteltavan höyrylinjan ominaisuudet huomioon ottaen. Taselaskenta rajattiin Kaukaan Voima Oy:n biovoimalaitoksen korkeapaineturbiiniin. Turbiinille laaditun vesi-höyrytaseen avulla voitiin 3,5-bar matalapainehöyrylinjan massavirtaukselle päätellä laskennallinen arvo. Laskennallista arvoa verrattiin käytössä olevan mittalaitteen tuottamaan mittausdataan vuoden 2020 ajalta. Työssä tarkasteltiin lopuksi myös taselaskennan tulosten vaikutusta laitoksen kokonaishyötysuhteeseen.

Tuloksista havaittiin heikkouksia tarkasteltavan mittalaitteen tarkkuudessa. Tuloksia ei voida kuitenkaan pitää täysin luotettavina, sillä työssä ei otettu huomioon muiden korkeapaineturbiinin vesi-höyrytaseeseen vaikuttavien mittausten mahdollisia epätarkkuuksia. Mittaustilannetta voitaisiin optimoida tilanteeseen sopivammaksi ultraäänivirtausmittarin käyttöönotolla ja mittauksen siirtämisellä pidemmälle suoralle putkiosuudelle.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	6
2	KAUKAAN TEHTAAT	7
2.1	UPM-Kymmene Oyj	7
2.2	Kaukaan Voima Oy	7
2.3	Sellutehtaan ja biovoimalaitoksen välinen yhteys.....	7
3	VIRTAUSMITTAUS.....	9
3.1	Venturiputki.....	9
3.1.1	Venturiputken mittausalue	11
3.1.2	Venturiputken hyödyt ja haitat.....	12
3.2	Ultraäänivirtausmittaus.....	12
3.3	Magneettinen virtausmittaus	13
3.4	Vortex-mittari	14
3.5	Mittalaitteen asennus	15
4	TASETARKASTELU.....	17
4.1	Turbiinitase.....	17
4.2	Taselaskennan tulokset.....	19
5	HYÖTYSUHDEVERTAILU	22
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	24
7	YHTEENVETO	25
8	LÄHDELUETTELO.....	26

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

<i>B</i>	magneettivuon tiheys	[Wb/m ²]
<i>C</i>	purkauskerroin	[-]
<i>D</i>	halkaisija	[m]
<i>e</i>	jännite	[V]
<i>E</i>	lähestymisnopeustekijä	[-]
<i>v</i>	nopeus	[m/s]
<i>f</i>	taajuus	[Hz]
<i>h</i>	entapia	[kJ/kg]
<i>p</i>	paine	[Pa], [bar]
<i>P</i>	sähköteho	[W]
<i>Q</i>	teho	[W]
<i>q_m</i>	massavirta	[kg/s]
<i>Re</i>	Reynoldsin luku	[-]
<i>T</i>	lämpötila	[°C]
<i>x</i>	matka	[m]
<i>η</i>	hyötysuhde	[%]

Kreikkalaiset

<i>ε</i>	laajenemiskerroin	[-]
<i>Δ</i>	muutos	[-]
<i>β</i>	putken ja kurkun halkaisijoiden suhde	[-]
<i>ρ</i>	tiheys	[kg/m ³]
<i>μ</i>	dynaaminen viskositeetti	[Pa·s]

Alaindeksit

brutto	brutto-
esil	syöttöveden esilämmitin
HMP	3,5-bar prosessihöyry
HVP	10,5-bar prosessihöyry
ind	indusoitunut
k	kurkku
KL	kaukolämmön paisuntasäiliö
KLT	kaukolämpöturbiini
kok	kokonais
lauhde	lauhde-
LT	lauhdeturbiini
luvo	palamisilman esilämmitin

netto	netto-
PA	polttoaine
rv	ruiskutusvesi
SYVE	syöttövesi- ja päälauhdesäiliö
th	tuorehöyry
UP	ulospuhallusventtilit
vk	virtauskanava

Lyhenteet

DN1000	putken standardikoko (englannin kielestä: <i>diameter nominal</i>)
KauVo	Kaukaan Voima Oy:n biovoimalaitos
KLV	kaukolämmönvaihdin
KP	korkeapaine
LUVO	palamisilman esilämmitin (saksan kielestä: <i>luftvorwärmer</i>)
UPM	UPM-Kymmene Oyj

1 JOHDANTO

Vesihöyryllä ja sen virtauksella on suuri rooli monen eri alan tuotantolaitoksissa. Energiantuotantolaitoksissa vesihöyryä käytetään väliaineena energian muuttamisessa polttoaineen palamislämmöstä turbiiniin mekaaniseksi energiaksi. Vesihöyryllä voidaan kuljettaa energiaa myös erilaisiin materiaalien tuotantolaitoksiin laitteiden ja toimintojen tueksi, esimerkiksi paperi-, vaneri- tai sellutehtaan kuivauskoneille. Tätä toimitettua höyryä kutsutaan prosessihöyryksi. Höyryn eri ominaisuuksia, kuten painetta, lämpötilaa, kosteutta ja virtausmäärää halutaan myös seurata erilaisilla mittalaitteilla, jotta ne olisivat optimaaliset tarkoitetuille käyttökohteille.

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltava kohde on prosessihöyrylinja Kaukaan Voima Oy:n biovoimalaitoksen (KauVo) ja UPM-Kymmene Oyj:n (UPM) tehtaan välillä, Lappeenrannassa Kaukaan tehdasalueella. KauVo toimittaa tehtaalle höyryä linjaa pitkin 3,5 bar painetasolla vaihtelevia määriä tehtaan tarpeiden mukaan. Jotta höyryn toimitukseen liittyvä energialaskutus oli paikkansa pitävä, täytyy mittauksen olla mahdollisimman tarkka. Kyseisen höyryvirran mittaus vaikuttaa myös muiden KauVon voimalaitosprosessin kohtien seurantaan, kuten toimitustehoon ja sitä kautta kokonaishyötysuhteeseen.

Höyrylinjassa on virtausmittalaitteena käytössä venturiputki. On yleisesti tiedossa, että pienillä virtausnopeuksilla mittauksen epätarkkuus lisääntyy. Tämän työn tavoitteena on vertailla tasetarkastelun avulla lasketun höyryvirran ja mittalaitteen tulosten eroja.

Venturiputki sijaitsee DN1000-standardikokoisessa 3,5-bar painetason höyryputkessa KauVon turbiinirakennuksessa. Käsiteltävät paineet ilmoitetaan mittari- eli ylipaineina. Höyryvirtausten analysointi tasetarkastelulla rajataan ainoastaan KauVon ja tehtaan väliseen 3,5-bar prosessihöyrylinjaan. Todellisuudessa näin suurissa laitoksissa prosessien taseet ovat useiden toisistaan riippumattomien tekijöiden ja pisteiden summa.

2 KAUKAAN TEHTAAT

2.1 UPM-Kymmene Oyj

UPM-Kymmene Oyj (jatkossa UPM) on suomalainen metsäteollisuusyhtiö, joka perustettiin vuonna 1995 Kymmene Oyj:n, Repola Oy:n ja Yhtyneet paperitehtaat Oyj:n fuusioituttua. Yhtiöllä on liiketoimintaa useilla metsäteollisuuden osa-alueilla. (UPM 2021a.) Lappeenrannan Kaukaan integraatissa toimii sellutehdas, biojalostamo, paperitehdas, saha, tutkimuskeskus ja metsäpalvelutoimisto (UPM 2021b).

2.2 Kaukaan Voima Oy

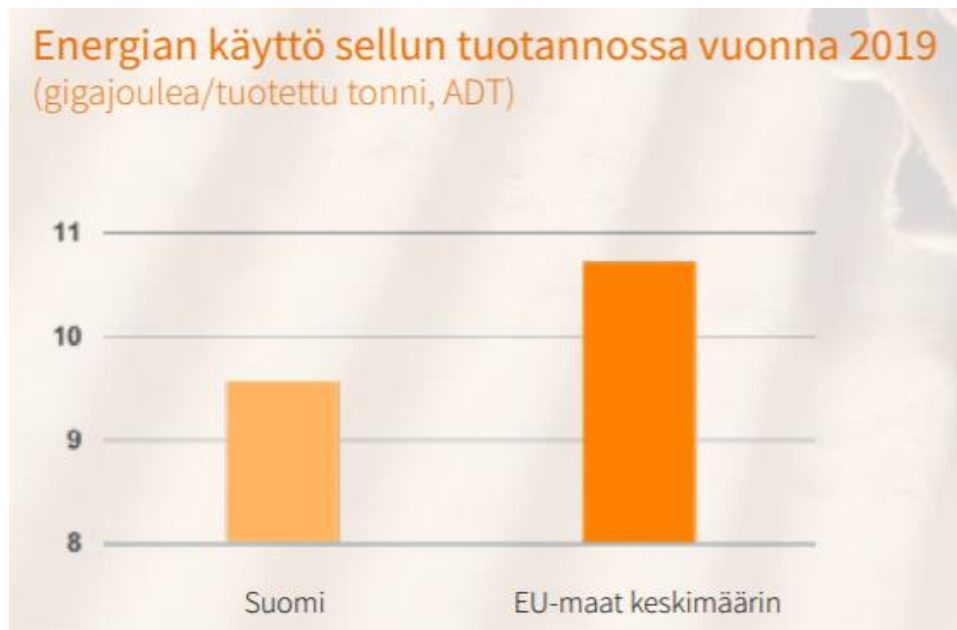
Kaukaan Voima Oy:stä Pohjolan Voima Oyj omistaa 54 % ja Lappeenrannan Energia Oy 46 %. Yhtiön biovoimalaitos (jatkossa KauVo) on sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos ja se otettiin käyttöön Lappeenrannan Kaukaalla vuonna 2009. KauVolla on oma voimalaitospäällikkö ja tuotantojohtaja, mutta UPM:n henkilökunta hoitaa käyttö- ja kunnossapitotoimet. KauVo tuottaa noin 85 % Lappeenrannan kaupungin tarvitsemasta kaukolämmöstä, prosessihöyryä UPM Kaukaan toiminnoille ja sähköä. (Pohjolan Voima 2021.) KauVolla käytössä oleva kattila käyttää polttoaineenaan kuorta, hakkuutähdettä ja muita puuperäisiä polttoaineita sekä turvetta (Pohjolan Voima 2021).

2.3 Sellutehtaan ja biovoimalaitoksen välinen yhteys

Sellu on puun kuiduista koostuva biomateriaali, jota käytetään muun muassa kartongin, erikoispaperien ja pehmapaperien valmistukseen (Metsäteollisuus 2019. 2-3). Sellupohjaiset paperi- ja kartonkituotteet olivat vuonna 2018 Suomen tärkein vientituote vientitulojen oltua 9,7 miljardia euroa ja osuus koko metsäteollisuuden viennin arvosta oli 74 % (Metsäteollisuus 2019. 3-4). Kansainvälisellä tasolla Suomi on tuotantokapasiteetiltaan maailman kahdeksanneksi suurin selluntuottajavaltio (Metsäteollisuus 2019. 7).

Ennen kuin puu keitetään kemiallisesti selluksi, se on kuorittava ja haketettava. Tästä syntyvä kuori- ja haketusjäte voidaan käyttää sellutehtaan yhteydessä olevan biovoimalaitoksen polttoaineena. (UPM 2021c.) Biovoimalaitoksen höyryllä tuotetaan sähköä turbiinilaitoksella ja sitä toimitetaan prosessihöyryksi sellutehtaalle (Pohjolan Voima 2021).

Kuvasta 1 nähdään, että suomalaisella sellutehtaalla kulutetaan energiaa vähemmän kuin muissa EU-maissa keskimäärin. Suuri osa Suomen sellutehtaista muodostaa integraatin samalla tehdasalueella sijaitsevan paperi- ja/tai kartonkitehtaan kanssa, jolloin selluntuotannossa sivutuotteina syntyviä energiavirtoja voidaan hyödyntää jatkojalostuksessa. (Metsäteollisuus 2019. 9.) Myös kuori- ja hakejätteen käyttäminen energiantuotannon polttoaineena mahdollisimman lähellä sellutehdasta säästää logistiikka- ja polttoainekuluja.



Kuva 1: Suomen selluntuotannossa kulutettava energia verrattuna muiden EU-maiden keskiarvoon (Metsäteollisuus 2019. 9.)

3 VIRTAUSMITTAUS

Tässä luvussa esitellään erilaisia höyryvirtauksen mittaamiseen soveltuvia laitteita. Tarkasteltavassa kohteessa tällä hetkellä käytössä olevaa venturiputkea esitellään muita laitteita laajemmin. Mittalaitteiden mittausalueita kuvataan suhdeluvulla, esimerkiksi 50:1. Tämä suhdeluku kertoo, kuinka laajalla alueella mittalaite kykenee antamaan luotettavan tuloksen. Mittausalue määritetään (Motiva 2012. 20.):

$$\text{Mittausalue} = \frac{\text{Maksimiarvo}}{\text{Minimiarvo}} \quad (1)$$

Virtauksen luonnetta kuvataan Reynoldsin luvulla. Virtauksen luonne vaikuttaa kohteeseen sopivan mittalaitteen valintaan. Reynoldsin luku määritetään (LaNasa & Upp 2014. 26-27.):

$$Re = \frac{\rho D_{vk} v}{\mu} \quad (2)$$

jossa ρ on fluidin tiheys [kg/m³]
 D_{vk} on virtauskanavan halkaisija [m]
 v on virtauksen nopeus [m/s]
 μ on fluidin dynaaminen viskositeetti [Pa·s]

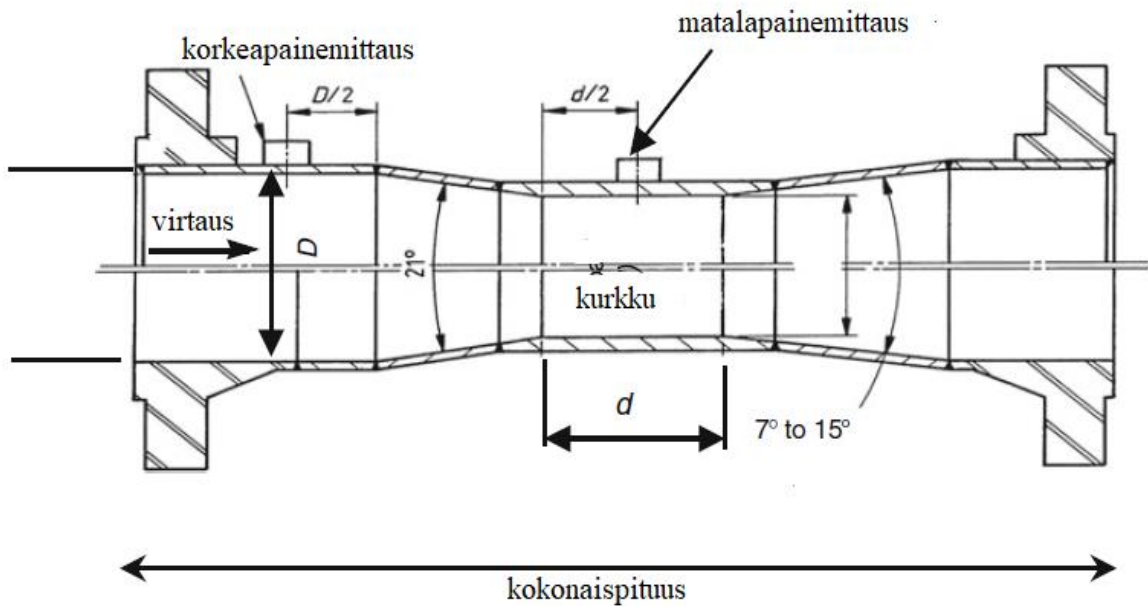
Jos virtauksen Reynoldsin luku on alle 2000, puhutaan laminaarisesta virtauksesta. Tällön virtaus pysyy tasaisena ja suoraviivaisena. (LaNasa & Upp 2014. 14.) Turbulenttisessa virtauksessa fluidin osien liikeradat vaihtelevat ja Reynoldsin luvun arvo on yli 4000. Siirtymäalueella Reynoldsin luku on 2000-4000, jolloin virtauksessa on sekä laminaarisen että turbulenttisen virtauksen ominaisuuksia. (LaNasa & Upp 2014. 22.)

Reynoldsin luku ja virtauksen luonne täytyy ottaa huomioon virtausmittarin valinnassa. Tässä työssä tarkasteltavan venturiputken tyyppin purkauskertoimen C arvo alkaa muuttua epätarkemmaksi kun Reynoldsin luku alittaa arvon $2 \cdot 10^5$ (SFS-EN ISO 5167-4: 2003, 20).

3.1 Venturiputki

Venturiputki on mittalaite, jolla voidaan selvittää sen läpi virtaavan fluidin tilavuus- ja massavirta paine-eron avulla. Venturiputkessa on kurkku, jonka halkaisija on fluidin

sisääntuloaukkoa pienempi. Kuvassa 2 on esitetty venturiputken rakenne.



Kuva 2: Venturiputken rakenne (mukaillen: Reader-Harris 2015. 78.)

Bernoullin yhtälön mukaan fluidin nopeus kasvaa ja paine pienenee venturiputken kurkussa. Fluidin massavirta q_m [kg/s] saadaan johdettuna Bernoullin yhtälöstä, kun oletetaan että fluidi täyttää putken kokonaan. (Reader-Harris 2015. 4.):

$$q_m = \frac{C\varepsilon}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi D_k^2}{4} \sqrt{2\rho_1 \Delta p} \quad (3)$$

jossa	C on purkauskerroin	[-]
	ε on laajenemiskerroin	[-]
	β on halkaisijoiden suhde	[-]
	D_k on kurkun halkaisija	[m]
	ρ on fluidin tiheys	[kg/m ³]
	Δp on paine-ero	[Pa]

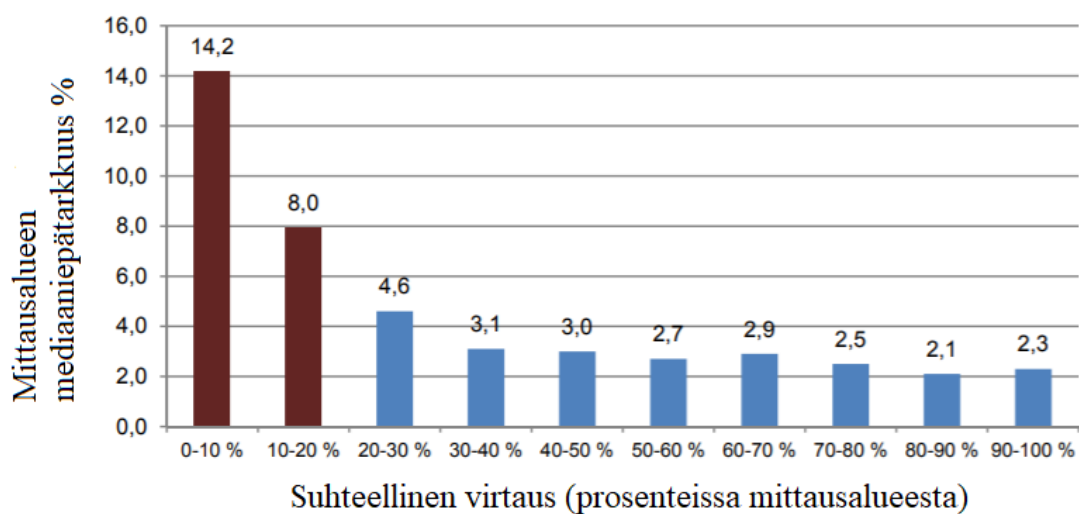
Taulukossa 1 on esitettyinä tässä työssä tarkasteltavaan venturiputkeen ja sen läpi virtaavaan höyryyn liittyviä parametrejä, kun höyryn massavirtaus on 70 kg/s, lämpötila T 155 °C ja paine p 3,5 bar.

Taulukko 1: Venturiputkeen liittyviä parametrejä

Purkauserroin C [-]	0,985
Laajenemiserroin ε [-]	0,964
Lähestymisnopeustekijä E [-]	1,0151
Virtauskanavan halkaisija D_{vk} [mm]	997
Kurkun halkaisija D_k [mm]	414
Halkaisijasuhde β [-]	0,4146
Höyryn tiheys ρ [kg/m ³]	2,37

3.1.1 Venturiputken mittausalue

Tässä työssä käsiteltävä 3,5-bar prosessihöyrylinjassa sijaitseva venturiputki on mitoitettu 70 kg/s virtaukselle. Indmeas Oy:n tekemän selvityksen mukaan virtausmittaus on luotettavalla tasolla, kun virtaus on vähintään noin 30 % putkelle optimoidusta virtauksesta (Motiva 2012. 34). Kuvassa 3 tämän selvityksen tulokset on esitetty graafisesti. Tässä työssä tarkasteltavan venturiputken tapauksessa tämä tarkoittaisi mittauksen muuttuvan merkittävän epätarkaksi, kun massavirta alittaa 20 kg/s. 20 kg/s virtauksella syntyvä paine-ero on 8,2 % venturiputkelle mitoitetulla virtauksella syntyvästä paine-erosta. Bernoullin yhtälön (3) mukaisesti massavirta on verrannollinen paine-eron neliöjuureen. Koska venturiputken toiminta perustuu paine-eron mittaukseen, myös tulosten epätarkkuus kasvaa paine-eron pienentyessä.



Kuva 3: Virtausmittauksen epätarkkuuden riippuvuus mittausalueesta, Indmeas Oy. (mukaillen: Motiva 2012. 34.)

Taulukossa 2 on esitetty tarkasteltavan venturiputken läpi kulkevan virtauksen Reynoldsin luvun arvoja eri massavirtauksilla, kun höyryn lämpötila T on 155 °C ja paine p 3,5 bar.

Taulukko 2: Reynoldsin luvun arvoja eri massavirroilla

Massavirta q_m [kg/s]	Virtauksen nopeus v [m/s]	Reynoldsin luku Re [-]
20	10,8	$1,80 \cdot 10^6$
35	19	$3,14 \cdot 10^6$
45	24,4	$4,04 \cdot 10^6$
87	47,2	$7,82 \cdot 10^6$
100	54,3	$8,98 \cdot 10^6$

3.1.2 Venturiputken hyödyt ja haitat

Venturiputkien ja muiden paine-eroon perustuvien virtausmittalaitteiden edut perustuvat edulliseen hankintahintaan ja yksinkertaisuuteen. Yksinkertaisen rakenteen ja vähäisten liikkuvien osien vuoksi huolto ja ylläpito on vähäistä. Erityisesti suuren kokoluokan putkien tapauksissa venturiputki on usein edullisin vaihtoehto myös hankintahinnaltaan. Venturiputki myös soveltuu useimpien kaasujen ja nesteiden mittaamiseen erilaisissa paineissa ja lämpötiloissa. (Reader-Harris 2015. 14–15.) Oikeaoppisella asennuksella venturiputkella voidaan saavuttaa ± 1 % tarkkuus (LaNasa & Upp 2014. 184). Tässä työssä tarkasteltavalle venturiputkelle on mitoitettu noin 3 % mittaustarkkuus.

Venturiputki ja muut paine-eroon perustuvat mittalaitteet aiheuttavat virtaukseen painehäviötä. Venturin aiheuttama painehäviö on kuitenkin pienempi kuin muilla paine-eromittareilla. (Basu 2018. 210.) Tietyille mittariyksilölle on aina mitoitettu mitta-alue, jonka ulkopuolella virtauksesta ei saada luotettavaa mittaustulosta. Putkiston asettelu ja virtauksen luonne voivat myös vaikuttaa venturiputken mittaustulokseen. Laite on myös altis osien kulumiselle ikääntyessään. (Reader-Harris 2015. 14–15.)

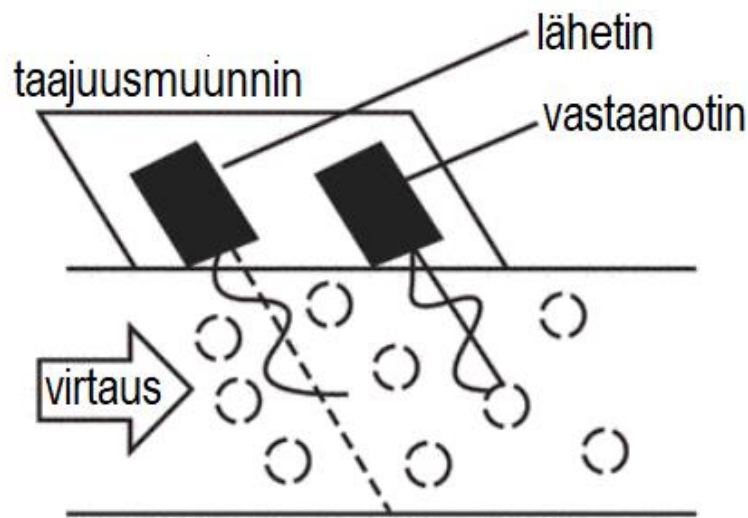
3.2 Ultraäänivirtausmittaus

Ultraäänivirtausmittarin toiminta perustuu anturin fluidin virtauksen läpi lähettämän värähtelyn taajuuden muutokseen. Fluidin virtausnopeus aiheuttaa tietynsuuruisen taajuudenmuutoksen perustuen Dopplerin ilmiöön: (Lynnworth 1989. 19.)

$$v = \frac{x\Delta f}{2} \quad (4)$$

jossa v on fluidin virtausnopeus [m/s]
 x on ultraääniäallon kulkema matka [m]
 Δf on taajuuden muutos [Hz]

Kuvassa 4 on esitetty värähtelyn kulku anturista putken poikkipinta-alan läpi ja heijastuminen takaisin anturiin.



Kuva 4: Ultraäänivirtausmittarin toiminta (mukaillen: LaNasa & Upp. 2014. 192)

Mittalaite kiinnitetään putken ulkopuolelle, joten se ei häiritse virtausta eikä aiheuta painehäviötä. Laitteen huolto tai siirto ei myöskään vaadi putken avaamista. (Flexim GmbH 2020.) Ultraäänimittareita on tarjolla laaja kokovalikoima ja mittausalue on suurimmillaan 120:1 (Basu 2018. 1163-1164). Mittaustekniikan heikkous on perinteisempiin mittareihin verrattuna korkea hankintahinta (LaNasa & Upp 2014. 196), mutta asennus- ja huoltokustannukset tulee ottaa huomioon elinkaarikustannuksia arvioitaessa, jolloin ultraäänimittari voi tulla pidemmällä aikavälillä perinteisiä mittareita edullisemmaksi.

3.3 Magneettinen virtausmittaus

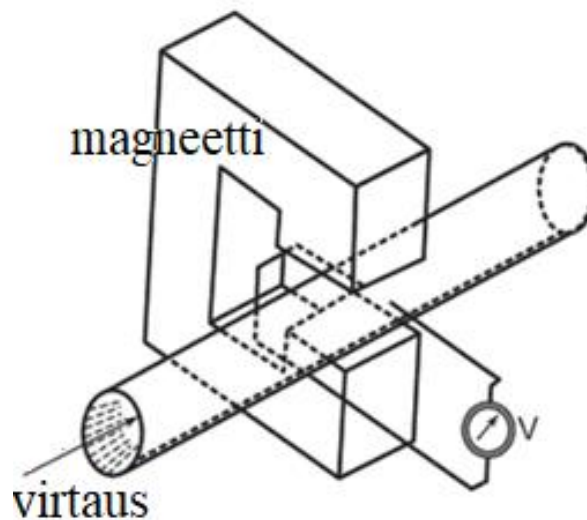
Magneettisessa virtausmittarissa putken ympärille on asetettu sähkömagneetit, jotka luovat magneettikentän, jonka läpi fluidi virtaa. Mittarin rakenne on esitetty kuvassa 5. Fluidin

täytyy olla sähköä johtavaa ainetta, jotta mittari toimii. Virratessaan kentän läpi fluidi aiheuttaa magneettivuon muutoksen, joka indusoi jännitteen, joka voidaan mitata. Ilmiötä kuvaa Faradayn laki, joka on esitetty yhtälössä (5). Tilavuusvirta on verrannollinen syntyvän jännitteen suuruuteen. (Konwell 2020.)

$$e_{ind} = Bxv \quad (5)$$

jossa	e_{ind} on indusoitunut jännite	[V]
	B on magneettivuon tiheys	[Wb/m ²]
	x on elektrodien etäisyys toisistaan	[m]
	v on virtaavan aineen nopeus	[m/s]

Magneettisen virtausmittauslaitteiston asetuksia voi säätää sopivaksi tietynsuuruisille massavirtauksille. Tulosten tarkkuus on $\pm 0,2 \%$. (Basu 2018. 469.) Laite kestää parhaimmillaan 160 °C lämpötilan (Basu 2018. 468).

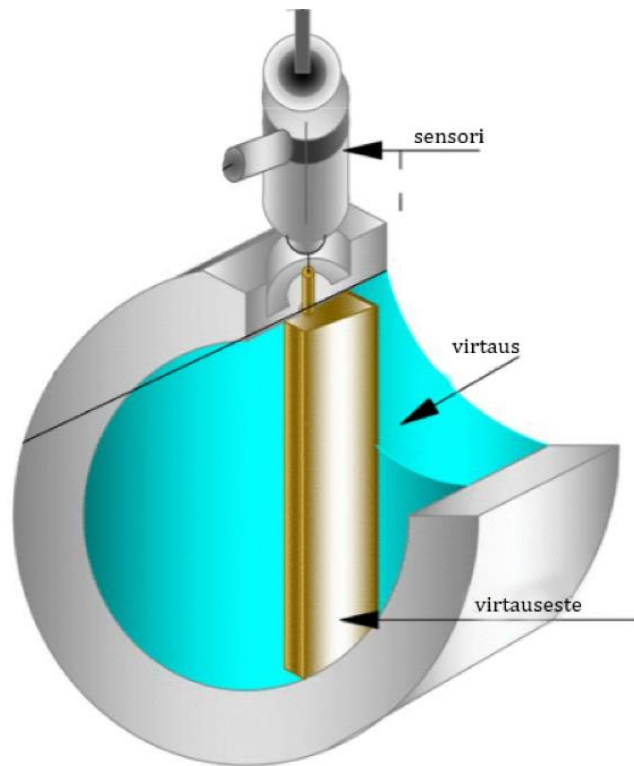


Kuva 5: Magneettisen virtausmittarin rakenne. (mukaillen: LaNasa & Upp 2014. 190.)

3.4 Vortex-mittari

Vortex-virtausmittarin toiminta perustuu ilmiöön nimeltä von Karmanin pyörteet. Vortex-virtausmittarissa on virtauksen kulkusuunnan vastainen fyysinen este, joka on esitetty

kuvassa 6. Esteeseen törmääminen aiheuttaa virtaukseen pyörteitä, joiden esiintymistaajuus on riippuvainen virtauksen nopeudesta. (LaNasa & Upp 2014. 208.)



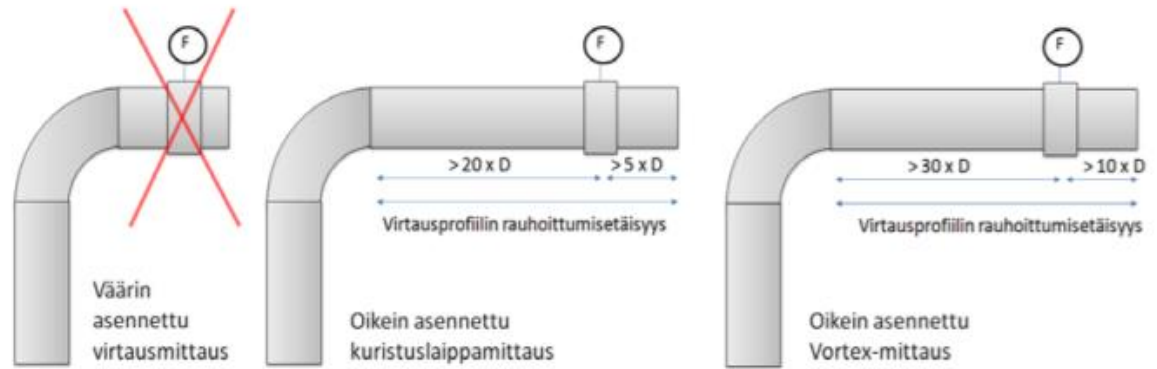
Kuva 6: Vortex-mittarin rakenne (mukaillen: Basu 2018. 433.)

Vortex-mittari vaatii toimiakseen tasaisen ja pyörteettömän virtauksen, joka voidaan saavuttaa pitkillä häiriöttömillä putkipituuksilla. Mittarin lähettämässä datassa voi olla epätasaisuutta ja/tai vaimentumista tietyillä toiminta-alueilla. (LaNasa & Upp 2014. 210.) Vortex-mittarin mittausalue on 20:1, joka on paine-eromittareita laajempi. Vortex-mittaria ei kuitenkaan voi käyttää linjassa, jossa virtauksen nopeus ylittää 40 m/s. (Motiva 2021. 21-22.)

3.5 Mittalaitteen asennus

Epätarkka mittaus ei aina johdu mittausalueen alittamisesta tai laitteiston vikaantumisesta. Myös mittalaitteen epäoptimaalinen asennuskohta voi häiritä virtausta mittauksen kannalta merkittävästi. Putkistossa mittalaitteistoa tulisi edeltää riittävä rauhoittumisetäisyys, sillä liian lähellä mittauspistettä sijaitsevat komponentit (esimerkiksi venttiilit, hitsausseamit tai suodattimet), risteykset tai mutkat häiritsevät ja muuttavat virtausta. (Motiva 2012. 26.)

Kuvassa 7 on kuvattu kuristuslaippa- ja Vortex-mittarin oikeaoppinen asennusetäisyys putkimutkasta.



Kuva 7: Virtausmittarin oikea asennus putkimutkan jälkeen (Motiva 2012. 26.)

4 TASETARKASTELU

Tasetarkastelun tarkoituksena on selvittää ja eritellä systeemiin menevät, sen sisällä syntyvät ja siitä poistuvat virtaukset. Voimalaitoksia tarkastellessa voidaan käsitellä esimerkiksi polttoaine-, energia- tai massataseita. Tässä työssä käsiteltävä mittaus koskee höyryvirtausta, joten tarkastelun kohteena on KauVon vesi-höyrytase.

Tase pitää sitä paremmin paikkansa, mitä lähempänä nollaa sisään- ja ulosvirtauksien erotus on. Erotus voi koostua esimerkiksi prosessivuodoista tai mittausten epätarkkuudesta. Erotuksella voidaan arvioida epätarkkuuden absoluuttista suuruutta tietyllä mittausajankohdalla. Erotus täytyy kuitenkin esittää prosenttiosuutena tarkasteltavan ajanhetken arvosta. Esimerkiksi jos todellinen massavirta on 10 kg/s ja mittaustulos 8 kg/s, on epätarkkuus jopa 20 %. Toisaalta sama 2 kg/s ero todellisen ja mitatun arvon välillä on suuremmassa, 120 kg/s virtauksessa vain 1,6 %. (Motiva 2012. 4.) Näin ollen pelkästään absoluuttinen erotus ei anna todellista kuvaa prosessista.

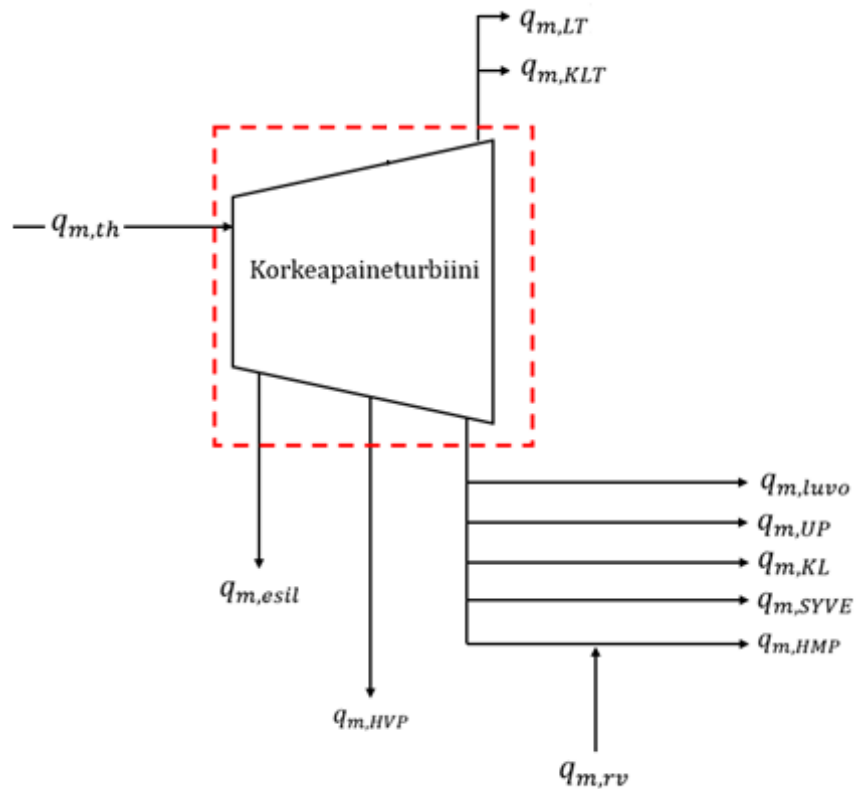
Eri tahot voivat määrittellä luotettavan mittauksen eri tavoin. Saksassa valtion laitos *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* määrittää mittauksen olevan korkean tarkkuuden alueella, kun epätarkkuus pysyy +/- 0,5–3 % alueella (Motiva 2012. 22).

4.1 Turbiinitase

Taselaskentaa varten täytyy rajata systeemi, johon meneviä ja josta poistuvia virtauksia voidaan tarkastella. KauVon koko prosessikaavio on esitetty kuvassa 9. Tarkastelu päätettiin rajata KauVon korkeapaineturbiiniin (KP). KP-turbiiniin tuleva massavirta on tuorehöyryä voimalaitoksen kattilasta. KP-turbiinista poistuvat höyryvirrat 10,5-bar välipaineprosessihöyrylinjaan, syöttöveden esilämmittimille, palamisilman esilämmittimille, ulospuhallusventtiileille, kaukolämmön paisuntasäiliöön, syöttövesi- ja päälahdesäiliöön, 3,5-bar matalapaineprosessihöyrylinjaan, kaukolämpöturbiinille ja lauhdeturbiinille. Turbiinilta tulevan höyryvirtauksen lisäksi 3,5-bar prosessihöyrylinjaan tulee ruiskutusvettä höyryn lämpötilan säätämiseksi, joka täytyy lisätä yhtälöön. Nämä vesi-höyrylinjat on esitetty korkeapaineturbiinin massatasekuvassa, kuvassa 8. Virroista voidaan laatia KP-turbiinin massatase:

$$q_{m,th} = q_{m,HVP} + q_{m,esil} + q_{m,luvo} + q_{m,UP} + q_{m,KL} + q_{m,SYVE} + (q_{m,HMP} - q_{m,rv}) + q_{m,KLT} + q_{m,LT} \quad (6)$$

jossa	$q_{m,th}$ on tuorehöyryn massavirta	[kg/s]
	$q_{m,HVP}$ on 10,5 bar prosessihöyryn massavirta	[kg/s]
	$q_{m,esil}$ on massavirta syöttöveden esilämmittimille	[kg/s]
	$q_{m,luvo}$ on massavirta palamisilman esilämmittimelle	[kg/s]
	$q_{m,UP}$ on massavirta ulospuhallusventtiileille	[kg/s]
	$q_{m,KL}$ on massavirta kaukolämmön paisuntasäiliöön	[kg/s]
	$q_{m,SYVE}$ on massavirta syöttövesi- ja päälauhdesäiliöön	[kg/s]
	$q_{m,HMP}$ on 3,5-bar prosessihöyrylinjan massavirta	[kg/s]
	$q_{m,rv}$ on ruiskutusvesi 3,5-bar prosessihöyrylinjaan	[kg/s]
	$q_{m,KLT}$ on massavirta kaukolämpöturbiinille	[kg/s]
	$q_{m,LT}$ on massavirta lauhdeturbiinille	[kg/s]

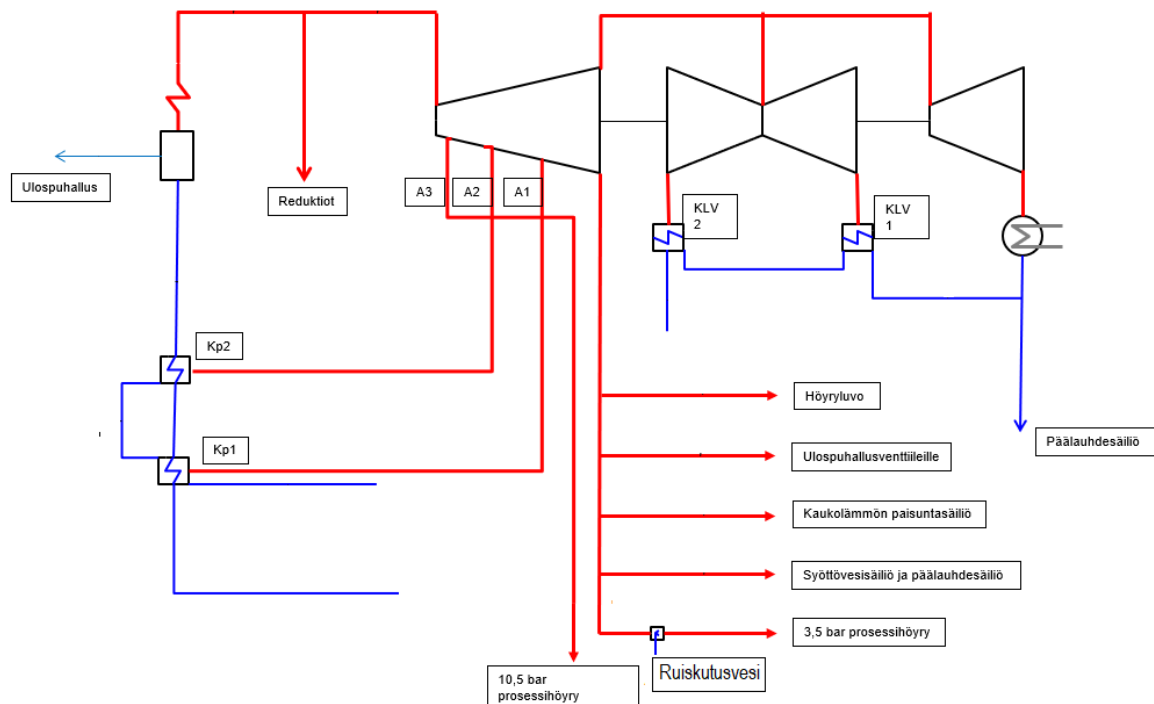


Kuva 8: Korkeapaineturbiinin massatasekuva

Kun yhtälöstä (6) ratkaistaan 3,5 bar -prosessihöyrylinjan massavirta, voidaan se esittää laskennallisesti muiden virtausmittauspisteiden avulla.

$$q_{m,HMP} = q_{m,th} - (q_{m,esil} + q_{m,HVP} + q_{m,luvo} + q_{m,UP} + q_{m,KL} + q_{m,SYVE} + q_{m,KLT} + q_{m,LT}) + q_{m,rv} \quad (7)$$

Yhtälön (7) ratkaisusta saadaan 3,5-bar prosessihöyrylinjan massavirralle laskennallinen arvo, jota verrataan mittaustulokseen. Mittausdataa tarkasteltiin ajanjaksoilta 1.1. – 30.4.2020 ja 10.9. – 30.11.2020. Datassa on nähtävillä kaikkien yhtälön (5) suureiden keskiarvot tunnin välein.

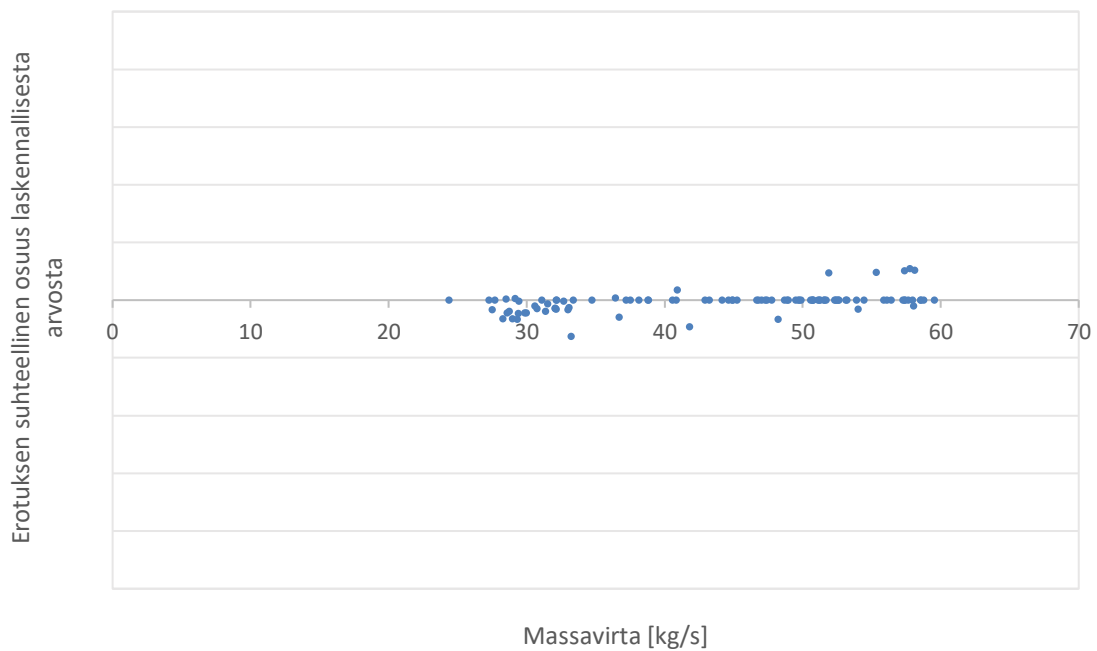


Kuva 9: KauVon yksinkertaistettu prosessikaavio (Mukaiillen: Pohjolan Voima 2021. Yhtiön sisäinen materiaali.)

4.2 Taselaskennan tulokset

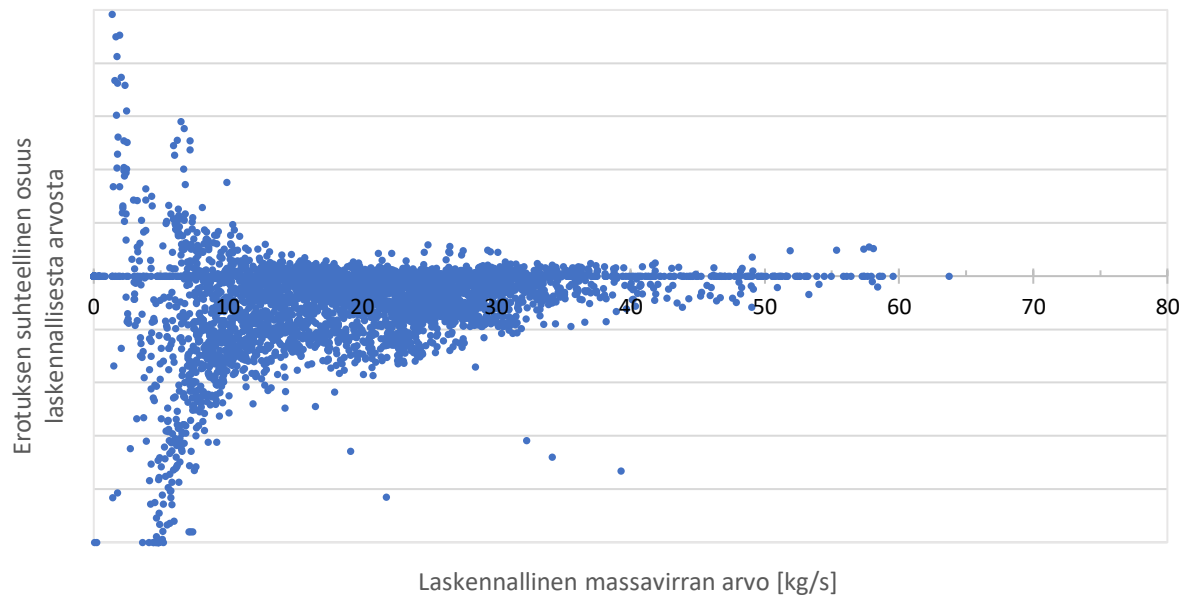
Kuvissa 10 ja 11 y-akselien arvot eivät ole näkyvissä, mutta ne ovat keskenään samanlaiset. Kuvassa 10 on laskennallisen ja mitatun massavirran erotusta tarkasteltu kahdella sellaisella aikavälillä, kun virtauksen teoriassa kuuluisi olla venturiputken mittausalueella. Kaikki

massavirrat ovat suuruudeltaan yli 24 kg/s. Tilanteet liittyivät sellutehtaan vuosihuoltoon. Erotus on suhteutettu laskennallisen massavirran suuruuteen. Erotuksen ollessa x-akselin alapuolella on laskennallinen massavirta suurempi kuin mitattu, ja x-akselin yläpuolella mitattu massavirta on suurempi kuin laskennallinen. Mittaus on huomattavasti tarkempi kuin mittausalueen ulkopuolisilla virtauksilla (kuva 11). Suurin osa taseen erotuksista on lähellä x-akselia.



Kuva 10: Epätarkkuus massavirran mittauksessa aikaväleillä 30.10. - 1.11.2020 ja 20.11. - 22.11.2020

Kuvassa 11 laskennallisen ja mitatun massavirran erotusta on tarkasteltu koko vuoden 2020 saatavissa olleen datan osalta, 1.1. – 30.4.2020 ja 10.9 – 30.11.2020. Mittaustuloksista on karsittu tilanteet, jolloin kattilasta tulevan tuorehöyryn virtaus on ollut 0. Kuvasta voidaan huomata pisteiden suurempi etäisyys x-akselista, eli suurempi laskennallisen ja mitatun arvon suhteellinen erotus pienillä massavirtauksilla. Käyrä on jokseenkin samanmuotoinen x-akselin molemmin puolin. Kaukana x-akselista olevat pisteet vähentyvät radikaalisti massavirran arvon ylittäessä 10 kg/s ja niiden määrän vähentyminen jatkuu noin massavirtaan 40 kg/s asti. Käyrä on yhteensopiva Indmeas Oy:n selvityksestä (kuva 3) johdetun teorian kanssa, jonka mukaan tarkasteltavan venturiputken mittaustarkkuus kasvaisi huomattavasti massavirran ylittäessä 20 kg/s.



Kuva 11: Epätarkkuus massavirran mittauksessa koko käytettävissä olevan datan osalta

5 HYÖTYSUHDEVERTAILU

Taselaskennan tuloksia verrataan mittaustuloksiin voimalaitoksen kokonaishyötysuhteen kautta. Jotta voidaan verrata taselaskennan tuottaman höyrymassavirran vaikutusta hyötysuhteeseen, täytyy selvittää muuttunut toimitusteho laskennallisesti. KauVolta tehtaalle toimitettavan 3,5-bar prosessihöyryn bruttoteho $Q_{\text{HMP,brutto}}$ [MW] määritetään:

$$Q_{\text{HMP,brutto}} = \frac{q_{m,\text{HMP}} \cdot h(p_{\text{HMP}}, T_{\text{HMP}})}{1000} \quad (8)$$

jossa h on 3,5 bar prosessihöyryn entalpia [kJ/kg]
 p_{HMP} on 3,5 bar prosessihöyryn paine [kPa]
 T_{HMP} on 3,5 bar prosessihöyryn lämpötila [°C]

Höyryn nettoteho Q_{HMP} [MW] lasketaan vähentämällä bruttotehosta 3,5-bar höyryn KauVolle palaavan lauhteen teho:

$$Q_{\text{HMP}} = Q_{\text{HMP,brutto}} - \frac{q_{m,\text{lauhde}} \cdot h'(T_{\text{lauhde}})}{1000} \quad (9)$$

jossa $q_{m,\text{lauhde}}$ on voimalaitokselle palaavan lauhteen massavirta [kg/s]
 $h'(T)$ on kylläisen veden entalpia lämpötilassa T [kJ/kg]
 T_{lauhde} on voimalaitokselle palaavan lauhteen lämpötila [°C]

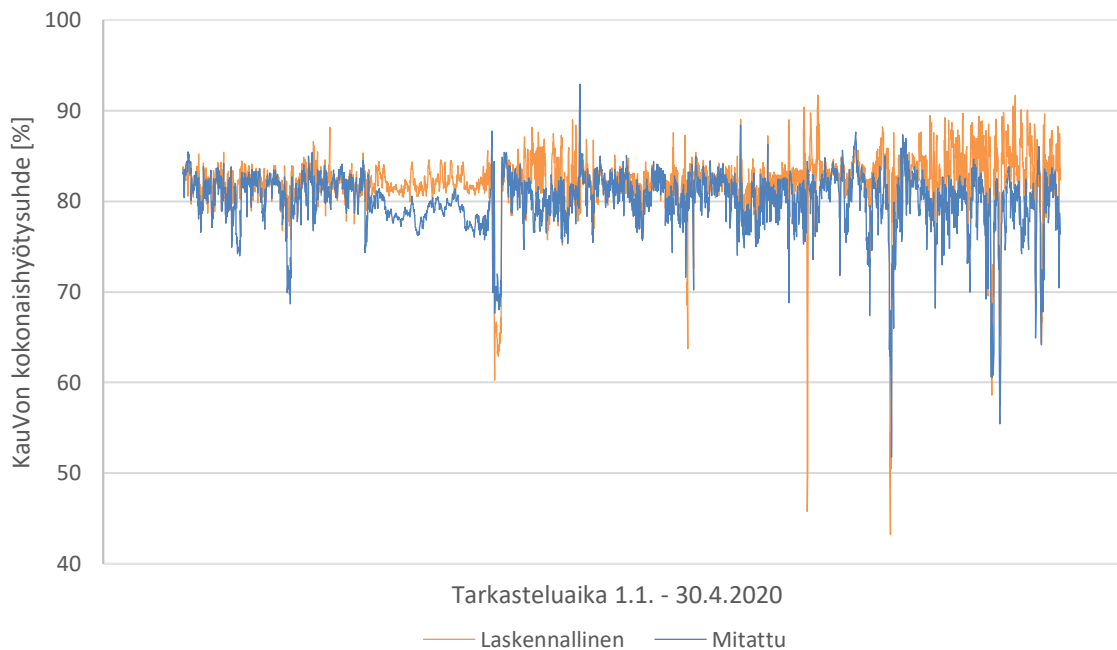
Nyt KauVon kokonaishyötysuhde η_{kok} [%] voidaan laskea:

$$\eta_{\text{kok}} = \frac{P_{\text{netto}} + Q_{\text{KL}} + Q_{\text{HVP}} + Q_{\text{HMP}}}{Q_{\text{PA}}} \cdot 100 \% \quad (10)$$

jossa P_{netto} on KauVon nettosähköteho [MW]
 Q_{KL} on kokonaiskaukolämpöteho [MW]
 Q_{HVP} on 10,5-bar nettohöyryteho sellutehtaalle [MW]
 Q_{PA} on kokonaispolttoaineteho [MW]

Kuvassa 12 on esitettyä korkeapaineturbiinin tasetarkastelun perusteella lasketun 3,5-bar prosessihöyrylinjan massavirran vaikutus KauVon kokonaishyötysuhteeseen. Kuvassa oranssilla käyrällä on laskennallisten ja sinisellä mitattujen arvojen perusteella laskettu

kokonaishyötysuhde aikavälillä 1.1.2020 – 30.4.2020 jolloin KauVo on ollut käytössä vallitsevaa lämpökuormaa varten. Kuvasta huomataan, että kokonaishyötysuhde on laskennallisella höyryvirralla suurimman osan ajasta parempi kuin mitatulla arvolla.



Kuva 12: 3,5-bar prosessihöyryn tasetarkastelun vaikutus KauVon laskennalliseen kokonaishyötysuhteeseen

Hyötysuhdekäyristä voidaan kuitenkin havaita myös epä johdonmukaisuuksia. Vuoden alussa KauVoa on ajettu suuremmalla teholla kuin keväällä, mutta kuvan 12 perusteella laskennallinen hyötysuhde olisi ollut keväällä parempi kuin vuoden alussa. Täten hyötysuhdekäyrien erotusta ei voida selittää pelkästään 3,5-bar prosessihöyrylinjan mittauksen erotuksella, vaan käyrien erotus on todennäköisesti useiden tase laskentaan vaikuttaneiden mittausepä tarkkuuksien summa.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Taselaskennan tulosten analysoinnin perusteella laskennallisten tulosten ja käytössä olevan venturiputken mittaustulosten suhteellinen erotus pysyy pienenä virtauksen ollessa yli 40 % venturiputkelle mitoitetusta optimaalisesta massavirtauksesta. Taseen epätasapainoon vaikuttavat todellisuudessa myös monet muut prosessin kohdat kuin vain tässä työssä tarkasteltu mittaus. Prosessin häiriö-, huolto- tai koeajotilanteet ovat myös voineet vaikuttaa käytössä olevaan mittausdataan. Lisäksi monet muutkin laskentataseessa käytetyistä virtausmittauksista eivät todellisuudessa täytä laskutukseen tarvittavan mittauksen tarkkuutta. Tarkasteltu mittauspiste sijaitsee KauVon turbiinirakennuksessa sijaitsevassa putkistossa. Rakennuksen koko aiheuttaa rajoitteita myös luotettavan mittauksen vaatimien häiriöttömien putkipituuksien saavuttamiseksi.

Venturiputken epäluotettavuus sen mittausaluetta pienemmillä virtauksilla on yleisesti tiedossa oleva asia. Mittausdataa tarkastelemalla huomataan, että tarkastellussa 3,5-bar prosessihöyrylinjassa vuonna 2020 virtausmittauksista 47 % oli venturiputken teoreettisen mittausalueen (yli 21 kg/s) sisällä. Mittausjärjestelyä voitaisiin parantaa esimerkiksi luvussa 3.2 esitellyllä ultraäänivirtausmittarilla, jonka mittausalue on merkittävästi laajempi kuin venturiputkella. Toistaiseksi iso putkikoko on ollut esteenä ultraäänimittauksen kokeilemiselle. Mahdollisuuksia mittauksen siirtämiseksi suuremmalle putkiosuudelle, esimerkiksi putkisillalle, tulisi tarkastella.

Virtausmittauksen epätarkkuus vaikuttaa myös muuhun laitoksen prosessista kerättävään dataan. Luvussa 5 huomattiin, että laskennallisen ja mitatun höyryvirtauksen erotus vaikuttaa KauVon toimitustehoon ja sitä kautta laskennalliseen kokonaishyötysuhteeseen. Laskennallinen ja mittauksiin perustuva kokonaishyötysuhdekäyrä eroavat toisistaan, laskennallisen hyötysuhteen ollessa suurimman osan ajasta parempi kuin mitattu. Hyötysuhdevertailun tuloksista kuitenkin havaittiin myös epä johdonmukaisuuksia liittyen toimitustehoon, joka heikentää vertailun luotettavuutta.

7 YHTEENVETO

Tämä kandidaatintyö tehtiin UPM-Kymmene Oyj:lle. Työn tarkoituksena oli selvittää Lappeenrannassa Kaukaan tehdasalueella sijaitsevien Kaukaan Voima Oy:n biovoimalaitoksen ja UPM:n tehtaiden välisen 3,5-bar prosessihöyrylinjan virtausmittauksen epätarkkuuden suuruutta taselaskennan keinoin.

Alussa esiteltiin työn lähtökohdat ja tehtiin tarvittavat oletukset. Tämän jälkeen käytiin läpi työhön liittyvät yhtiöt ja niiden Kaukaalla sijaitsevat laitokset. Teoriaosuudessa käsiteltiin myös selluntuotannon merkitystä Suomelle ja alalla yleisesti käytössä olevia käytäntöjä energiatehokkuuden parantamiseksi. Lisäksi esiteltiin tarkasteltavassa kohteessa sijaitseva venturiputki ja kolme muuta virtausmittalaitetta, sekä tarkan virtausmittauksen vaatimuksia.

Taselaskentaa varten tarkasteltiin vuoden 2020 dataa KauVon korkeapaineturbiiniin tulevista ja siitä lähtevistä virtausmittauksista. Turbiinille muodostettiin vesi-höyrytase, jonka avulla ratkaistiin 3,5-bar prosessihöyrylinjan höyryvirtaukselle laskennallinen arvo. Laskennallista arvoa verrattiin mitattuun arvoon koko vuoden 2020 osalta ja laadittiin kuvaajia vertailun havainnollistamiseksi.

Saatujen tulosten vaikutusta prosessin kokonaiskuvaan tarkasteltiin KauVon kokonaishyötysuhteen kautta. Laskennallisilla arvoilla laskettiin toimitusteholle arvo, josta saatua kokonaishyötysuhdetta verrattiin mitattuun arvoon vuoden 2020 kevätkuukausilta. Hyötysuhdekäyriä analysoitaessa havaittiin kuitenkin toimitustehoon liittyvä epäjohdonmukaisuus, joka vaikuttaa virtausmittausvertailun luotettavuuteen.

Tehty tarkastelu osoitti 3,5-bar prosessihöyrylinjan mittauksen heikkouksia pienillä virtauksilla, joka tuki jo aiemmin yleisessä tiedossa olevaa teoriaa venturiputken toiminnasta. Kuitenkaan saatuja laskennallisia arvoja ei voida pitää jokaisessa toimintatilanteessa luotettavina, sillä työssä tehdyt oletukset eivät ota huomioon muiden taseeseen vaikuttavien mittalaitteiden mahdollisia epätarkkuuksia. Ultraäänivirtausmittarin käyttöönotto ja mittauksen siirtäminen pidemmälle suoralle putkiosuudelle voisivat parantaa mittaustulosten tarkkuutta.

8 LÄHDELUETTELO

Basu, Swapan. 2018. Plant Flow Measurement and Control Handbook: Fluid, Solid, Slurry and Multiphase Flow. San Diego: Elsevier Science & Technology. 210, 468, 469, 1163, 1164 s. 012-812-4377

Flexim GmbH. 2020. The World's Only Clamp-On Steam Meter FLUXUS® ST. [tuotesite, pdf]. [viitattu 11.2.2021]. Saatavissa: <https://www.flexim.com/us/products/steam-flowmeters/fluxus-g601-st>

Konwell. 2020. Magneettiset mittarit prosessivälineille. [verkkajulkaisu]. [viitattu 23.12.2020]. Saatavissa: <https://www.konwell.fi/fi/tuotteet/prosessi/prosessin-kenttalaitteet-ja-instrumentit/virtausmittaus/magneettiset-mittarit>

LaNasa, Paul J. Upp, E. Loy. 2014. Fluid flow measurement: a practical guide to accurate flow measurement. Waltham, Massachusetts; Oxford, England: Butterworth-Heinemann. 14, 22, 26, 27, 184, 192, 196, 208, 210 s. 978-0-12-409524-3

Lynnworth, Lawrence C. 1989. Ultrasonic Measurements for Process Control. San Diego: Academic Press Inc. 17–19 s. 0-12-460585-0

Metsäteollisuus. 2019. Sellu, uusiutuva innovaatioiden sampo. 2, 3, 4, 7, 9 s. [verkkoaineisto, pdf]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavissa: <https://www.metsateollisuus.fi/uutishuone/sellu-uusiutuva-innovaatioiden-sampo>

Motiva Oy. 2012. Höyry-lauhde-siirtojärjestelmän energiatehokkuuden mittausopas. 4, 20-22, 26, 34 s. [verkkoaineisto, pdf]. [viitattu 15.11.2020]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/6319/Hoyry-_lauhdesiirtojarjestelman_energiatehokkuuden_mittausopas_verkkoon.pdf

Pohjolan Voima Oy. 2021. Kaukaan Voima Lappeenranta. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavissa: <https://www.pohjolanvoima.fi/tuotanto/lampovoima/kaukaan-voima-lappeenranta>

Reader-Harris, Michael. 2015. Orifice Plates and Venturi Tubes. Sveitsi: Springer International Publishing. 6, 14–15 78 s. 978-3-319-16880-7.

Sage Metering Inc. 2014. Ultrasonic Meter Reviewed. [verkkoaineisto]. [viitattu 24.11.2020]. Saatavissa: <https://sagemetering.com/natural-gas-flow-measurement/natural-gas-flow-meter-types-ultrasonic-meter/>

ISO 5167-4. 2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular crosssection conduits running full - Part 4: Venturi tubes. Sveitsi: ISO. 20s.

UPM. 2021a. Yhtiön historia. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavissa: <https://www.upm.com/fi/tietoa-meista/yhtion-historia/>

UPM. 2021b. UPM Kaukas. [verkkoaineisto]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavissa: <https://www.upmpulp.com/fi/upm-kaukas/>

UPM. 2021c. Kuinka sellua valmistetaan? [verkkoaineisto]. [viitattu 10.2.2021]. Saatavissa: <https://www.upmpulp.com/fi/vastuullinen-sellu/kuinka-sellua-valmistetaan/>