Aalto-universitetet
Högskolan för
ingenjörsvetenskaper

Kid Jägerskiöld

Kvalitetssäkring av mätningar i ång-kondensatsystem

Diplomarbete

Esbo 27.12.2016
Övervakare: Professor Mika Järvinen
Handledare: Ville Laukkanen, DI

Aalto-universitetet
Högskolan för
ingenjörsvetenskaper

Aalto-universitetet, PB 11000, 00076 AALTO
www.aalto.fi

Sammandrag av diplomarbetet

Författare Kid Jägerskiöld

Titel Kvalitetssäkring av mätningar i ång-kondensatsystem

Utbildningsprogram Energi- och VVS-teknik

Huvud-/biämne Energiteknik **Kod** K3007

Övervakare Professor Mika Järvinen

Handledare Ville Laukkanen, DI

Datum 27.12.2016 **Sidantal** 83+3 **Språk** Svenska

Syftet med diplomarbetet är att göra en granskning av ång-kondensatsystem i sin helhet och göra en djupare analys av flödesmätningar i lågtrycksånga och möjliga kalibreringsmetoder, som inte förlitar sig på radioaktiva spårämnen.

Ång-kondensatsystem är viktiga eftersom de spelar en stor roll i dagens och framtidens energiproduktion, -distribution och -konsumtion. Digitaliseringstrenden ställer krav på kvaliteten hos de mätdata som samlas in från allt mer invecklade processer, är den inte på en pålitlig nivå, kan ingen kontrollerad processoptimering utföras. Våt ånga orsakar de största utmaningarna för flödesmätning på grund av dess två-faskaraktär och ofta bristfällig kännedom av ångans kvalitet. Här granskas de vanligaste korrigerings-faktorerna för att kompensera för felvisningen av två-fasångflöden. Ur ett energitekniskt perspektiv granskas i diplomarbetet även vikten av tillvaratagandet på värme-energin i kondensatet och i expansionsångan.

De inaktiva flödeskalibreringsmetoderna som testats och evaluerats är baserade på transit-tidmetoden med pulser försorsakade av temperatur- och syrekoncentration-ändringar genom att injicera tryckluft och kallvatten i ånglinjen respektive matarvattenlinjen. Temperaturpulsmetoden, vilken byggde på termoelement fästa på rörets utsida vid två detektionspunkter, gav en positiv indikation av att fungera som en flödesmätningsmetod. De facto, att detektionsutrustningen gick att installera på rörets utsida visade sig vara metodens främsta egenskap, då anslutningar inte finns tillgängliga i de flesta ånglinjer, vilket avsevärt försvårar tillämpningen av kemiska spårämnen. Temperaturpulsmetoden applicerades i såväl ånglinjen som matarvattenlinjen. Det systematiska felet i flödesmätningen i ånglinjen var 1.5%, men en stor standard-avvikelse, orsakad av ångans stora naturliga temperaturfluktuationer, resulterade i en total osäkerhet på 4.4%. Som referens till de utförda flödesmätningarna och strypflänsmätaren användes en massbalanskalkyl mellan ångmätarna och den tillförda energin till ångproduktionen. Luftpulsmetoden baserad på ändringar i syrekoncentrationen fungerade inte med den detektionsutrustning som användes. Detektionen av temperaturdifferens är inte lika precis som för radioaktivitet, det betyder att mätsträckan bör vara längre än vid användning av radioaktiva spårämnen. Den längre sträckan ökar dock osäkerheten eftersom det finns risk för rörsvängar, som komplicerar mätningen av rörvolymen.

Nyckelord: ång-kondensatsystem, två-fasflöde, ångflödesmätning, flödeskalibrering, fältkalibrering, transit-tid

Aalto University
School of Engineering

Aalto University, P.O. BOX 11000, 00076 AALTO
www.aalto.fi

Abstract of master's thesis

Author Kid Jägerskiöld

Title of thesis Quality assurance of measurements in steam-condensate systems

Degree programme Energy and HVAC Technology

Major/minor Energy Technology **Code** K3007

Thesis supervisor Professor Mika Järvinen

Thesis advisor(s) Ville Laukkanen, MSc

Date 27.12.2016 **Number of pages** 83+3 **Language** Swedish

The aim of this master's thesis work is to explain the whole picture of the steam-condensate system and measurements that it includes with a deeper insight to the flow measurements as well as inactive calibration methods for flow pressure steam.

Steam-condensate systems are important as they play an essential role in production, distribution as well as consumption of energy, both today and in the future. The widening digitalization sets high quality requirements on the measurement data that is collected from increasingly complicated processes, without reliable data, no controlled process optimizing can be done. Wet steam causes the biggest challenges for the flow measurements because of its two-phase character and often inadequate knowledge of the steams quality. This work describes the most usual correcting factors for compensating the meters' error. From an energy technological point of view, the importance of utilization of the heat energy in the return condensate and expansion steam is also reviewed.

The inactive flow calibration methods developed and evaluated are based on the transit-time method and the pulses were induced using temperature and oxygen concentration differences by injecting compressed air and cold water to the steam and feed water pipes respectively. The result shows that the equipment for detecting the oxygen didn't work for this purpose, but the temperature pulse method based on thermocouple temperature measurements on the pipe surface gave strong indications of being a desirable technique. One of the biggest benefits is that the detections can be made on the outside of the pipe, since most of the steam pipes are out of connections, which complicates the use of chemical tracers. The temperature pulse method had a total systematic uncertainty of 1.5%, but the turbulent steam temperature resulted in a large standard deviation, thus the total uncertainty was 4.4%. As a reference to the flow calibration methods and the orifice plate meters, the oil and electricity consumptions in the steam production were used. As the detection of the temperature difference is not as precise as of the activity, the measuring distance needs to be longer than with radioactive tracers. The longer distance, though, increases uncertainty as there might be pipe curvature that makes the volume measuring complicated.

Keywords steam-condensate system, two-phase flow, steam flow measurement, flow measurement calibration, transit-time measurement

Förord

Bakgrunden till diplomarbetet ligger i det faktum att ång-kondensatsystem är ett stort område innefattande många oklara faktorer, även om det inte är något nyligen utvecklat koncept. Flödesmätningar i ånga hör till de mest utmanande och i synnerhet våt ånga orsakar komplikationer för noggranna mätningar. Det fanns också ett behov av en inaktiv metod för att kalibrera ångflödesmätare på anläggningar för ångleverans till livsmedels- och livsmedelsförpackningsindustrin. Diplomarbetet har finansierats i sin helhet av Oy IndMeas Industrial Measurement Ab, medan Tekniska Verken i Linköping Ab har bidragit med testfaciliteter för de presenterade kalibreringsteknikerna.

Jag vill tacka min handledare Ville Laukkanen (IndMeas) samt arbetets övervakare professor Mika Järvinen för handledning och goda råd och idéer under projektets gång. Jag vill också tacka VD Risto Kuoppamäki och övrig personal på IndMeas för all hjälp och trevlig arbetsmiljö för utförandet av projektet. Alla involverade på Tekniska Verken förtjänar även ett stort tack, främst Jon Erlingsson, Krister Johansson och Rolf Johansson, för engagemang och processinformation samt ånganläggningshjälp under mätningarna.

Slutligen vill jag rikta ett tack till Katharina och alla vänner som stött och uppmuntrat mig under mitt diplomarbete samt mina tidigare studier vid Aalto universitetet.

Esbo, 27.12.2016

Kid Jägerskiöld

Innehållsförteckning

Sammandrag
Abstract
Förord
Innehållsförteckning
Symbolförteckning
1 Introduktion 1
1.1 Bakgrund 1
1.2 Arbetets syfte 2
1.3 Avgränsningar 2
1.4 Arbetets uppbyggnad 2
2 Ång- och kondensatsystem 5
2.1 Ångproduktion och Rankine-processen 5
2.1.1 Energibalans 6
2.2 Ångans distributionsvarianter 6
2.2.1 Mättad ånga 7
2.2.2 Överhettad ånga 8
2.2.3 Våt ånga 8
2.3 Två-fas flöde 8
2.4 Kondensathantering 9
2.4.1 Kondensatbildningsproblem 9
2.4.2 Kondensatavledning/Dränering 10
2.4.3 Kondensatåtervinning 10
3 Ångans användningsområden 13
3.1 Pappersindustrin 13
3.2 Presentation av testanläggningen 14
4 Flödesmätning 15
4.1 Differentialtryckmätning 15
4.1.1 ISO 5167 16
4.1.2 Strypfläns 16
4.1.3 Venturi-rör och flödesmunstycke 17
4.1.4 V-kon 18
4.2 Övriga mätningsmetoder 19
4.2.1 Vortexmätare 19
4.2.2 Ultraljudsmätare 20
4.2.3 Turbinmätare 22

4.2.4 Coriolis 22
4.3 Två-fasflödesmätning 23
4.3.1 Homogen modell och James' ekvation 24
4.3.2 Separata flödesmodellen och Murdocks ekvation 24
4.3.3 Chisholms ekvation 25
4.3.4 Jämförelse mellan korrektionsfaktorer 26
4.4 Automationssystem 26
4.4.1 Normering av mätresultat 27
4.4.2 Densitetskompensation 27
4.5 Mätfel 28
4.5.1 Installation 28
4.5.2 Vätskeöverskott 29
4.5.3 Signal- och automationsfel 29
5 Kalibreringsmetoder 31
5.1 Spårämnesmätning 31
5.1.1 Transit-tidmetod 31
5.1.2 Utspädningsmetod 32
5.2 Val av spårämne 32
5.2.1 Radioaktivt spårämne 33
5.2.2 Utmaningar och begränsningar med radioaktivitet 33
5.2.3 Temperaturpulser 34
5.2.4 Övriga spårämnen 35
5.3 Laboratoriekalibreringar 35
6 Alternativa kalibreringsmetoder 37
6.1 Inaktivt spårämne 37
6.1.1 Kemiskt spårämne 37
6.1.2 Ljudhastighet baserat spårämne 37
6.1.3 Laserinducerad fluorescens 38
6.2 Energi- och massbalansberäkningar 40
6.2.1 Massflödesberäkning 40
6.2.2 Sekundäreffektberäkning 40
6.2.3 Injektionsmassberäkning 41
7 Mätningar 43
7.1 Temperaturpulsbaserad transittid-metod 43
7.1.1 Utrustning 45
7.1.2 Temperaturpuls framställning 45

7.1.3 Temperaturpuls detektering 46
7.2 Inaktivt spårämne 46
7.2.1 Utrustning 47
7.2.2 Luftpulsframställning 47
8 Case Tekniska Verken i Linköping 49
8.1 Presentation av anläggningen 49
8.2 Mätapparatur 50
8.3 Returkondensat 50
8.4 Kalibreringsmöjligheter 50
8.4.1 Massbalansberäkning 50
8.4.2 Spårämnesmätning i ånglinjen 51
9 Resultat 53
9.1 Testmätningar med temperaturpulsmetoden 53
9.2 Testning av luftpulsmetoden 54
9.3 Resultatanalysmetoder 55
9.3.1 Medianmetod 55
9.3.2 Tyngdpunktsmetoden 56
9.3.3 Korrelationsmetoden 56
9.3.4 Resultatets osäkerhetsmarginal 57
9.4 Temperaturpuls i ånglinje 57
9.4.1 Verkställandet av mätningen 57
9.4.2 Mätresultat i siffror 58
9.5 Luftpuls i ånglinje 60
9.6 Temperaturpuls i matarvattenlinje 60
9.6.1 Verkställandet av mätningen 60
9.6.2 Mätresultatet i siffror 61
9.7 Massbalansräkning 62
9.7.1 Ångpanna 1 62
9.7.2 Ångpanna 2 63
9.8 El- och oljepannornas verkningsgrader 63
10 Osäkerhetsanalys 67
10.1 Transit-tiden 67
10.1.1 Temperaturmätningen 67
10.1.2 Datoranalys 68
10.2 Mätsträckans volym 69
10.3 Flödets densitet 69

10.4 Total differential 69
10.5 Felanalys för temperaturpuls i matarvattenlinje 71
11 Summering av mätresultat och sammanfattning 73
11.1 Summering av mätresultat 73
11.2 Sammanfattning och slutsatser 75
12 Källförteckning 79
Bilaga 1: Resultat från temperaturpulsmätning i ånglinje
Bilaga 2: Resultat från temperaturpulsmätning i matarvattenlinje

Symbolförteckning

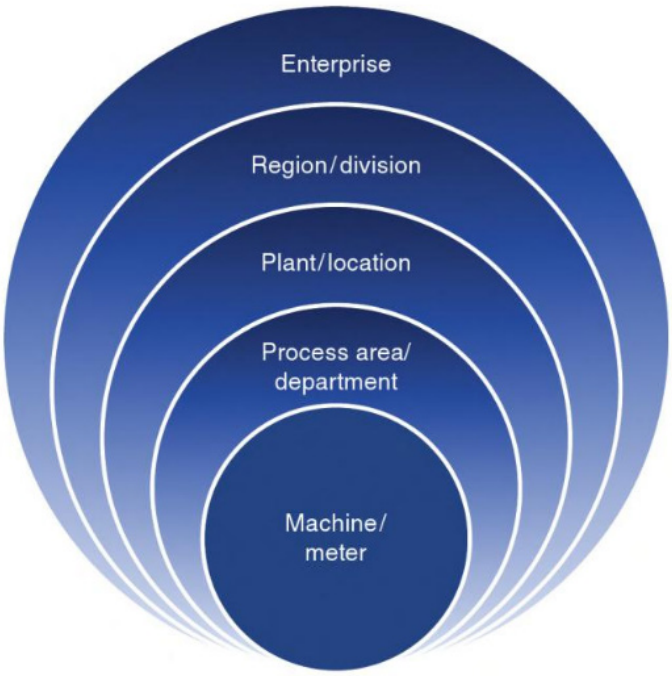
Symbol	Enhet	Förklaring
A	$[\mathrm{m}^2]$	area, rörtvärsnitt
C	-	kontraktionskoefficient
D	[m]	rörets innerdiameter
L	[m]	mätsträckans längd
P	[W]	effekt
Q	[kg/s]	massflöde
Re	-	Reynolds tal
T	[°C , K]	temperatur
V	[m/s]	flödeshastighet
X	-	Lockhart-Martinelli parametern
c	[kJ/kgK]	specifik värmekapacitet
d	[m]	diameter, stryporgan
h	[kJ/kg]	entalpi
k	-	isentropisk koefficient
o	[m]	ytteromkrets (rör)
p	[Pa, bar]	tryck (1 bar = 10^5Pa)
q	[J]	värmeenergi
s	[kJ/kgK]	entropi
t	[s, h]	tid (1 h = 3600 s)
u	[kJ]	inre energi
v	$[m^3/kg]$	specifik volym
w	[m]	rörväggens tjocklek
x	-	torrhetsfaktor (kvalitet)
$\emptyset$	[kJ/s]	värme-effekt
β	-	strypförhållande
ρ	$[\mathrm{kg}/m^3]$	densitet
ε	-	expansionskoefficient

Nedre index	Förklaring
act	verkligt flöde (actual)
aq	vatten i vätskeform (aqua)
b	ångpanna (boiler)
c	kondensor (condenser)
cal	referensmätningens värde (calibration)
g	gasform
hom	homogen blandning
l	vätskeform (liquid)
m	mass (flöde)
$meas$	flödesmätarens värde
p	pump (effekt) eller isobar (specifik värmekapacitet)
s	ånga (steam)
t	turbin
v	volym (flöde) eller isokor (specifik värmekapacitet)

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Sedan några år tillbaka har energikonsumtionen ofta varit på tapeten både bland privata konsumenter och bland industriföretag, såväl från den ekonomiska, som den miljövänliga aspekten. Det har uppmärksammats och reglerats aktivt även inom politiken, på Europeiska Unionens initiativ har under de senaste åren instiftats krävande lagar och omfattande målsättningar för energianvändningen i framtiden. Till energikonsumtionen hör starkt också energieffektiviteten, som hela tiden utvecklas till att möta nya krav från lagstiftning och miljömedvetenhet. Ett verktyg som utarbetats för att bättre följa upp energieffektiviteten är en slags digitaliseringsprocess, som eftersträvar att uppnå ett effektivt digitalt nätverk för att samla in data på bred front. Med hjälp av dessa data skall man sedan kunna optimera och effektivera själva processerna på basis av den input man har till sitt förfogande. Under digitaliseringsprocessen har det dock lagts märke till att stora brister råder för mätningskvaliteten inom energi- och processindustrin. Problematiken är att ifall den information man samlar in är opålitlig, så kan man omöjligtvis dra några faktabaserade slutsatser för vad som borde göras eller förbättras i processen. I Figur 1.1 är det grafiskt presenterat var energieffektiviteten har sitt ursprung, allt börjar från pålitliga mätningar, varvid hela processer kan analyseras och optimeras, för att sedan på nästa nivå kunna hantera en hel enhet eller ett kraftverk. På den högsta nivån kommer hela företaget eller affärsverksamheten, allt bygger i slutändan på en hög mätkvalitet på den allra lägsta nivån.



Figur 1.1 Nivåer av energihantering inom ett företag. (Rossiter et al. 2015)

Det som krävs är alltså att höja kvaliteten på mätningarna som ger de data man vill ha. För att höja kvaliteten på mätningarna bör man i första hand undersöka vilka metoder som används i mätinstrumenten som är installerade i processen och att de är installerade på rätt sätt och på rätt ställen. Sedan kan man gå vidare med att ifrågasätta mätnoggrannheten som

kan uppnås med mätinstrumenten i fråga. Alla mätinstrument är anpassade, det vill säga kalibrerade, för vissa förhållanden, men ofta inte för exakt de förhållanden som de slutligen tillämpas i. Alltså bör mätinstrumenten kalibreras i sina riktiga förhållanden i den process där de fungerar och dessa kalibreringar bör upprepas med jämna mellanrum då omständigheterna för processen kan ändras med tiden.

Det har visat sig att flödesmätningar hör till de mest utmanande mätningarna att få pålitliga resultat ifrån. Det beror på att flödet kan ha stora variationer beroende på vilken del av processen man analyserar. Flödesmätningarna är dock mycket viktiga för att uppnå en effektiv process eller materialdistribution. För stora gas- eller ångflöden handlar det även om mycket stora pengar kostnader på årsbasis, därav kan bara ett litet mätfel få avgörande ekonomiska konsekvenser för konsumenten eller producenten. Den hela tiden allmännare fjärrvärmen är ett bra exempel, ingen vill betala för mer än vad de använder, men ingen vill heller producera och leverera mera än vad de får betalt för. De flesta flödesmätare baserar sig på tryckskillnader, vilket betyder att tryckmätarna redan kan ge upphov till mätningsfel, dessutom beror massflödet också på flödets densitet, som i sin tur påverkas av både tryck och temperatur såväl som flödets aggregationstillstånd. Det orsakar stora svårigheter för ångmätningar, i synnerhet mättad ånga, då det ofta förekommer kondenserat vatten i form av som vattendroppar som färdas med ångan. Problemet är att då vattnet är i två faser, så blir det utmanande att bestämma den faktiska densiteten för flödet, då det är oklart hur stor del av flödet som är i vätskeform och i gasform. (Venugopal et al. 2011)

Ång- kondensatsystem är en mycket vanlig energikälla för många industriprocesser och i dem rör sig stora energimängder. Mätningskvaliteten för ångan och det returnerade kondensatet är dock på en mycket låg nivå, vilket försvårar bestämmandet av systemens energieffektivitet och utvecklandet av det. Oy IndMeas Industrial Measurement Ab har mycket lång erfarenhet innefattande många enskilda fältkalibreringar av ång- och kondensatflöden och det har visat sig att de största mätningstekniska utmaningarna är att bestämma flödet av våt ånga. ”Ånga är utan tvekan det svåraste flödet att mäta. Det beror på det höga trycket och att mätningsparametrarna varierar beroende på vilken typ av ånga som mäts. Huvudtyperna av ånga inkluderar våt ånga, mättad ånga och överhettad ånga.” (Yoder 2010)

1.2 Arbetets syfte

Det här diplomarbetets syfte är att utveckla, analysera och skissera alternativa metoder och tillvägagångssätt för att förbättra mätningskvaliteten för ång- och kondensatprocesser i industrin. Slutprodukten skall erbjuda ett verktyg att hålla mätningskvaliteten på en god nivå enligt den noggrannhet som processmiljön tillåter.

1.3 Avgränsningar

Det här arbetet omfattar ång- och kondensatsystem med betoning på lågtrycksånga och dess användning. Arbetet innefattar inte utförliga beskrivningar av ångproduktionen eller användningsändamål för högtrycksånga.

1.4 Arbetets uppbyggnad

Diplomarbetets uppbyggnad består av en teoridel och ett specialarbete. Teoridelen inleds med en redogörelse av ång- och kondensatsystem, dess funktion och användningsändamål.

Därefter förklaras olika slags flödesmätningar och med vilka metoder de kan kalibreras, såväl de tekniker som är i användning nu, de som testats tidigare och de som eventuellt kan användas i framtiden. I specialarbetet beskrivs närmare de mätningstekniker som kommer att testas och de industriförhållanden de kommer att testas i. Arbetet avslutas med en analys av resultatet, en osäkerhetsestimering och en diskussion om vilka metoder som kan tas i bruk för vilka ändamål eller hur utvecklingen av dem kan fortskrida.

2 Ång- och kondensatsystem

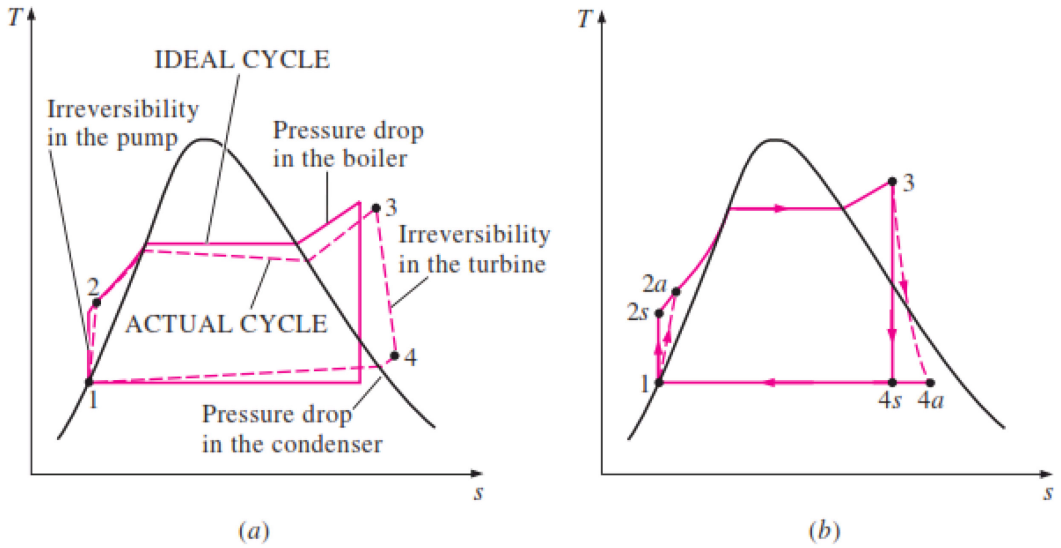
Inom industrin spelar ång- och kondensatsystem en viktig roll för energiproduktionen, -distributionen och -användningen, men det är också det mest utmanande området att utföra pålitliga flödesmätningar för, vilket också är bakgrunden till det här diplomarbetet. Ång- och kondensatsystem kan delas in i tre delar: ångproduktionen, ångdistributionen till slutanvändaren och det uppstådda kondensatets uppsamling, retur och behandling. I det här kapitlet presenteras de oftast förekommande ångprocesserna samt de tekniska specifikationerna för olika typer av ånga och ångflöden.

2.1 Ångproduktion och Rankine-processen

Vattenångans största användningsområde är i ångkraftverk och processindustrin. Vattenånga beter sig likt en idealgas under riktigt låga tryck, ca 10 kPa och lägre, men i kraftverk och andra allmänna användningsområden för ånga rör sig trycket på mycket högre nivåer, ofta 1 MPa och högre, vilket resulterar i att samtliga termodynamiska lagar för idealgaser inte längre fungerar för att analysera ångan och dess egenskaper. I ett kraftverk genomgår vattenångan flera olika faser, de flesta kraftverken baserar sig på Clausius-Rankine-processen med olika modifieringar, men samma huvudprincip. Den tidigare i historien presenterade Rankine-processen innebar att vattenångan inte överhettades i ångpannan, utan den mättade ångans expandering ledde omedelbart till bildandet av våt ånga, det vill säga det bildades vattendroppar i blandningen. Det ledde till att ångans massandel sjönk och turbinvingarna slets väldigt snabbt av vattendropparna. I de flesta turbiner tillåter man inte ångkoncentrationen understiga 88 mass-% för att inte skada turbinen. Clausius-Rankine-processen löser det här problemet med att efter att vattnet värmts och förångats till mättad ånga, så överhettas det, vilket innebär att ångans temperatur höjs över mättnadstemperaturen. Då kan ångan expandera mera utan att det bildas vattendroppar i ångan och därmed skadas inte turbinen. Clausius-Rankine-processen är alltså en vidareutvecklad variant av Rankine-processen och består av fyra olika delprocesser:

- 1 – 2a Mättat vattens tryck höjs med en pump, som använder effekten P_p.
- 2a – 3 Det mättade vattnet värms och förångas till mättad ånga i ångpannan, förångningen sker under konstant tryck. Värme-effekten $\emptyset_b$ tillförs till pannan.
- 3 – 4a Vattenångan expanderar i turbinen och utför arbetet P_t.
- 4a – 1 Vattenångan kondenseras i kondensatorn till mättat vatten, kondenseringen sker under konstant temperatur och avger värme-effekten $\emptyset_c$.

Figur 2.1(b) visar hela Clausius-Rankine-processen presenterad i ett T,s-diagram. Punkterna 2s och 4s beskriver de stadier i processen som nås ifall pumpen och turbinen skulle vara isentropiska, det vill säga inte höja på entropin. Det är dock omöjligt att uppnå, så därför är resultatet punkterna 2a och 4a, som alltså innehar samma tryck men högre temperatur- och entropinivå. I Figur 2.1(a) är en schematisk bild för att jämföra en idealprocess mot den verkliga. (Wikstén 2009)



Figur 2.1 Clausius-Rankine processen. (a) Jämförelse mellan en ideal (isentropisk) och en verklig process. (b) Exempelprocess i ett kraftverk. (Bhattacharjee 2014)

2.1.1 Energibalans

Energibalansen för Clausius-Rankine-processen innehåller processens alla fyra steg, det vill säga värmen tillfört till ångpannan, arbetet tillfört till pumpen, arbetet utfört av turbinen och värmen som ångan avger i kondensorn. Termodynamikens första grundlag säger, lite simplifierat, att värme är en form av energi och energi kan inte skapas eller tillintetgöras, utan kan bara konverteras från en form till en annan. Därav ser energibalansen för Clausius-Rankine-processen ut enligt följande

$$\emptyset_b + P_p = P_t + \emptyset_c. \tag{2.1}$$

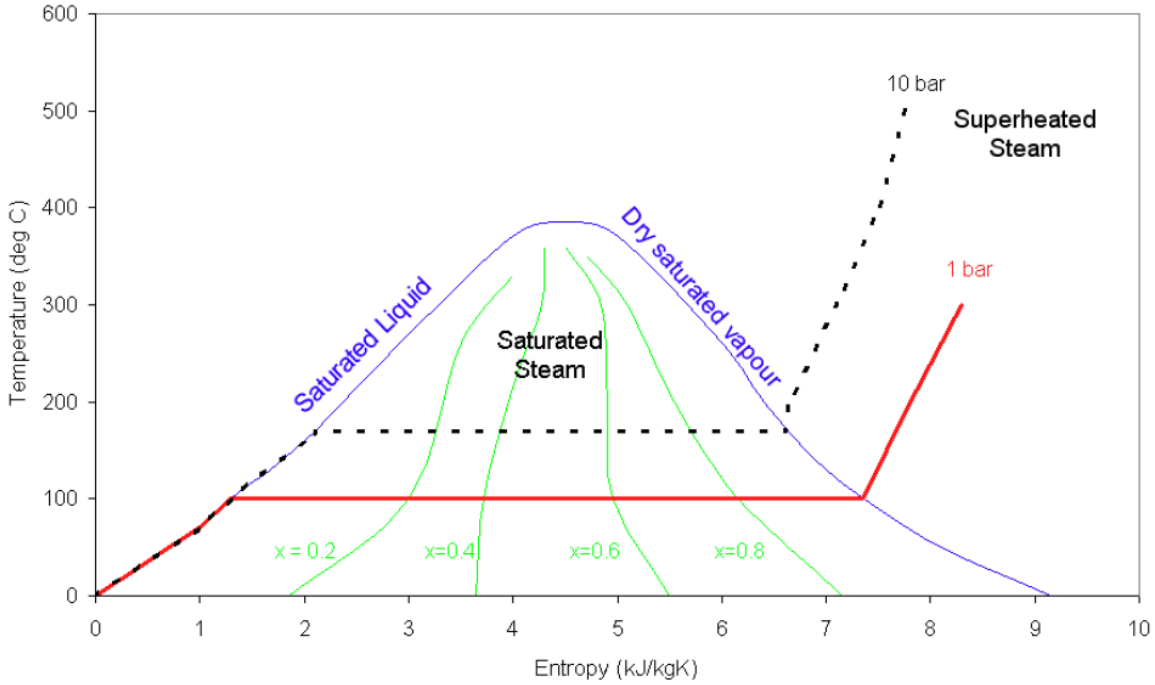
Inom termodynamiken beskrivs energinivån med hjälp av enheten entalpi, h (J/kg), som multiplicerat med massflödet Q_m (kg/s) ger energiflödet, alltså effekten. Med hjälp av vatten- och ångtabeller kan man avläsa entalpin för vattnet eller ångan i olika skeden av processen, så länge temperaturen och trycket är tillgängliga. Ifall flödet är en blandning av ånga och vatten, det vill säga våt ånga, bör även ångans och vattnets massandelar kännas till. (Wikstén 2009)

2.2 Ångans distributionsvarianter

Ånga är den vanligaste formen av energiomvandling från kemisk energi till elektricitet, då det används i de flesta kraftverk. I en ångprocess förekommer det oftast ånga i många olika former beroende på vilken del av processen man granskar. Med hjälp av parametrarna temperatur och tryck kan man bestämma vilken form ångan befinner sig i och framförallt estimera dess energi-innehåll.

För att beskriva termodynamiska processer, behövs ett antal storheter för vattenångan, som specificerar dess egenskaper under olika omständigheter. De vanligaste är mättningstemperatur, mättningstryck, specifik volym (v), entalpi (h), entropi (s) och inre energi (u). För att beskriva ångans tillstånd vid olika temperaturer och tryck, använder man sig av ett T, s-, p, h- eller h, s-diagram(beroende på vilka storheter som anges på axlarna),

var man med hjälp av två eller flera kända parametrar kan bestämma de övriga parametrarna för vattenångan. I Figur 2.2 är ett T,s-diagram presenterat, var man kan se en blå mättnadslinje, som betyder att vattnet eller vattenångan är mättat (eng. saturated). Till vänster om vattnets mättnadslinje är vattnet underkylt och till höger om ångans mättnadslinje är ångan överhettad (eng. superheated). Mellan mättnadslinjerna är ångan i ett s.k. våt ånga- stadie var en del är ånga och en del vatten, det vill säga de två faserna är i jämvikt. Torrhetsfaktorn x anger hur stor del (massandel eller mass-%) av den totala massan som är ånga, alltså gasform. Två tryckkurvor (1 bar och 10 bar) är även utsatta för referens. (TUV NEL 2004)



Figur 2.2 Vattnets T,s-diagram. (TUV NEL 2004)

Det oftast förekommande diagrammet är h,s-diagrammet, som presenterar entalpinivån på den lodräta axeln och entropinivån på den horisontala axeln, den här typen av diagram kallas för Mollier diagram, nämnt efter den tyska ingenjören Richard Mollier(1863-1935). (wikipedia.org)

2.2.1 Mättad ånga

Beroende på temperaturen, så är ånga vid ett visst tryck mättad och vice versa, det betyder att ångan har nått den lägsta möjliga energinivån vid det trycket eller temperaturen utan att kondenseras till vatten. Mättad ånga förekommer ofta i utflödet från turbinen i kraftverket, då ångan har expanderat och frigjort energi ända tills trycket inte kan sjunka mera utan att den mättade ångan delvis övergår till vätskeform. (The Babcock & Wilcox Company 2005) Mättad ånga är en mycket populär energitransportör eftersom det i många situationer inte krävs högre temperaturer för att uppfylla de krav som ställts av slutanvändaren, på så sätt kan man spara energi genom att inte överhetta ångan i onödan. (TUV NEL 2004)

2.2.2 Överhettad ånga

Överhettad ånga används främst till elproduktion i turbiner och i några enstaka processer som kräver mycket hög temperatur. (TUV NEL 2004) Vattenångan är överhettad då den har högre temperatur (eller tryck) än gränsen för mättad ånga vid det rådande trycket (eller temperaturen). Oftast beskrivs överhettningsgraden med hur många grader (K eller ^{0}C) ångan är överhettad, det vill säga hur många grader varmare ångan är än mättnadstemperaturen för det trycket. Till exempel vid trycket 400 kPa är mättnadstemperaturen ungefär 430K, vilket resulterar i att ånga i trycket 400 kPa och temperaturen 500K alltså är 70K överhettad. (The Babcock & Wilcox Company 2005)

2.2.3 Våt ånga

När mättad ånga avger energi, så kondenseras en del av ångan till vatten, det resulterar i en blandning av ånga och vatten som är i balans sinsemellan och kallas för våt ånga. För våt ånga är temperatur och tryck linjerna parallella dvs. man kan inte beskriva ångans entalpi (energidensitet) med enbart temperatur och tryck utan man bör också känna till ångans fuktighet. Ångans fuktighet bestäms med hjälp av den tidigare presenterade enheten, torrhetsfaktorn x, som bestäms av ångans massa dividerat med den totala massan ånga och vatten. Då ångans fuktighet ökar, det vill säga mera ånga kondenseras till vatten, så sjunker dess entalpi och entropi, alltså avger den energi. Det är inte bara energinivån som sjunker utan andra egenskaper ändrar också, t.ex. densiteten ökar då andelen vatten ökar. Torrhetsfaktorn x bestäms med hjälp av ekvationen

$$x = \frac{Q_{m,s}}{Q_{m,s} + Q_{m,aq}}. \tag{2.2}$$

Det innebär att då x = 1, så är 100% (mass-%) mättad ånga och då x = 0, så är 100% (mass-%) mättat vatten och allt där emellan ingår i kategorin våt ånga. Normalt för ång-kondensatsystem är att torrhetsfaktorn antar värden på ungefär 95%, alltså en liten del av ångan är i vätskeform, men egenskaperna skiljer sig redan då från dem hos 100% mättad ånga. Det här orsakar problem för mätningen av energiflödet, då det ofta också är osäkert vilken den faktiska torrhetsfaktorn är. (Owen et al. 1991)

2.3 Två-fas flöde

Våt ånga är alltså en blandning av mättat vatten och mättad ånga, vilket gör det till ett två-fas flöde och därmed behövs metoder för att beräkna parametrarna, som beskriver två-fas flöden eftersom inte samma regler gäller som för enkel-fas flöden. Det finns huvudsakligen två modeller för att beskriva två-fas flöden, den homogena modellen och modellen för separata flöden. Den homogena modellen är enkel att använda, men den innehåller några antaganden, ångan och vattnet antas ha samma temperatur och hastighet. Det stämmer inte för alla situationer, för låga vattenandelar rör sig vattnet i droppar inne i ångan och kan röra sig med nästan samma hastighet som ångan, men då andelen vatten ökar, samlas den längs rörets väggar och dess hastighet sjunker. (The Babcock & Wilcox Company 2005) Den homogena modellen går ut på att man bestämmer vatten-ånga blandningens densitet med hjälp av formeln

$$\frac{1}{\rho_{hom}} = \frac{x}{\rho_g} + \frac{(1-x)}{\rho_l}, \tag{2.3}$$

där ρ_{hom} står för blandningens densitet, ρ_g står för gasens (ångans) densitet och ρ_l står för vätskans (vattnets) densitet. Värdena för densiteten gäller för det mättade tillståndet. (Owen et al. 1991) I kapitel 4.3 presenteras mera djupgående två-fasflöden och deras mätningar. Med hjälp av den homogena densiteten kan bland annat de olika termerna som påverkar tryckförlusterna i flödet beräknas. Två-fas flödets totala tryckförlust kan beräknas utgående ifrån ekvationen

$$\Delta p = \Delta p_f + \Delta p_a + \Delta p_g + \Delta p_l, \tag{2.4}$$

där Δp_f står för den lokala tryckförlusten orsakat av väggfriktionen, Δp_a accelerations-förlusten orsakat av volymökningen på grund av avdunstning, Δp_g står för det hydrauliska tryckfallet och Δp_l står för alla lokala motstånd eller barriärer som monteringar, svängar, ventiler och flänsar etc. (The Babcock & Wilcox Company 2005)

2.4 Kondensathantering

Det viktiga med ångdistributionen är att när ångan når fram till användningsobjektet, så är den i rätt form och uppfyller de krav som användningsändamålet ställer. För våt ånga, som är ett två-fas flöde, är den väsentligaste parametern torrhetsfaktorn, vilken kan ändra under transporten, men som med olika medel även kan styras under ångans transportsträcka. När torrhetsfaktorn sjunker innebär det att en del av ångan kondenserats till vatten, så kallat kondensat, därför spelar kondensatet en viktig roll i ångsystemet och bör kontrolleras effektivt under processens gång. (Motiva 2015)

2.4.1 Kondensatbildningsproblem

Det som sker under transporten är att på grund av värmeutbytet med omgivningen, så kondenseras en del av ångan och andelen kondensat ökar, vilket betyder att ångans kvalitet sjunker.

Vanliga problem orsakade av kondensatbildning:

- Kondensatet tranporterar inte energi lika effektivt som ångan på grund av betydligt lägre energinivå
- Kondensat som samlats kan orsaka oljud och skada på rörsystemet och mätapparatur på grund av vattenslag och erosion
- Kondensatet reducerar rörvolymen, som är ämnad och dimensionerad för ångan, i värsta fall orsakar kondensatet blockader
- Svagt förverkligande av kondensatavledning kan ge upphov till läckage
- Ifall luft upplöses i kondensatet blir det korrosivt

Värmeöverföringen i ång- och kondensatsystem baserar sig huvudsakligen på latent värme hos ångan, som avges då den kondenseras till vätskeform, så det är logiskt att ifall kondenseringen sker redan under ångans transport, går en stor del av värme-energin till spillo och når inte sitt verkliga mål. Kondensatet innehar ändå fortsättningsvis mycket värme-energi som borde tas till godo för att förbättra energieffektiviteten. Vattenslag innebär att ifall det bildas kondensatblockader i röret kan det uppstå tryckskillnader och när de utjämnas uppstår tryckvågor i röret som kan orsaka rörskador och oljud. Risken för läckage i ånglinjen ökar också som följd av kondensatbildning. (Motiva 2015)

2.4.2 Kondensatavledning/Dränering

Horisontella ånglinjer skall gärna ha ett fall i ångans strömningsriktning, för att kondensatet skall rinna åt samma håll som ångan strömmar i röret. En tillräcklig lutning på ånglinjen är ca 0.5 – 1.0 %, det vill säga 0.5 – 1.0 m fall per 100 m rörparti. Dräneringsfickor bör även installeras för avledning av kondensatet, mellanrummen mellan dem beror av trycket och rördiametern. Röret kan även ha en stigande lutning i ångans strömningsriktning, men då bör ångan ha en hastighet på maximalt 15 m/s, för att kondensatet inte skall dras med i samma riktning som ångan, annars uppstår det risk för vattenslag, som kan skada ångsystemet. (Armatec 2014)

Med hjälp av rörets lutning och kondensatfällor, kan normalt största delen av kondensatet avlägsnas från rörets nedre parti. Kondensatfällor grundar sig alltså på att avleda kondensat som samlats på bottnen av röret, men ifall en hög kvalitet krävs av processen, där ångan används, räcker inte dessa metoder till, utan en skild ångavskiljare bör inkluderas i ånglinjen. En ångavskiljare avlägsnar även vattendoppar som rör sig med ångan, inte bara kondensatet som samlats nertill i röret. (Spirax Sarco 2016)

Det finns olika typer av ångfällor och – avskiljare, ångfällorna baserar sig på antingen mekaniska, termodynamiska eller termostatiska skillnader i egenskaperna hos ångan och kondensatet. Ångavskiljarnas funktion i sin tur grundar sig på cyklonteknik eller ett flertal skivor som stör ångans bana och därmed samlar till sig vattendropparna som sedan rinner ner till följd av gravitationen. En välfungerande ångavskiljare kan uppnå en verkningsgrad på 0,98 eller till och med högre. (TLV 2016)

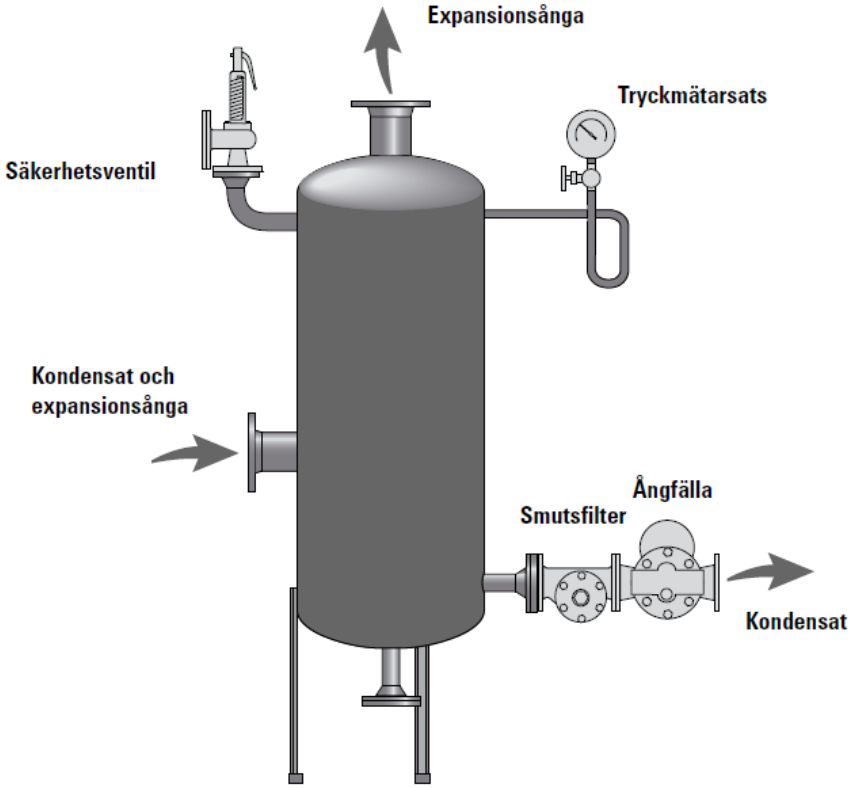
Det är att föredra, ifall det avlägsnade kondensatet kan sammanslås med det övriga kondensatet som returneras från processen, på så sätt fås dess värmeenergi till godo. Kondensatets återvinning minskar också behovet av tilläggsvatten, vars rengöring och uppvärmning konsumerar energi. Resultatet är en bränslesnålare och energieffektivare process. Mera information om kondensatåtervinning hittas i kapitel 2.4.3. (Spirax Sarco 2016)

2.4.3 Kondensatåtervinning

Trots att ångan kondenserats och redan avgett största delen av sin energi, så innehåller kondensatet fortsättningsvis en stor mängd värme-energi som bör tas till vara för att uppnå en effektiv process. Mättad ånga som producerats vid till exempel 7 bar övertryck från matarvatten med en temperatur på 10°C, så har konsumerat ca 2727 kJ/kg ånga värme-energi. Vid kondensering avges ångbildningsvärmen på 2047 kJ/kg och det innebär att kvar i kondensatet blir ca 25% av värme-energin som tillförts. Det leder till enorma förluster ifall det inte tas till godo det vill säga returneras till ångbildningsprocessen. Matarvattnet genomgår dessutom ett reningsverk för att bli dugligt för processen, så även reningsverkets konsumerade energi sparas ifall kondensatet återvinns. (Armatec 2014)

Ofta har kondensatsystemet en lägre trycknivå än vad ångsystemet har, vilket leder till att expansionsånga uppstår vid kondensatavledningen. Expansionsångan bildas alltså efter ångfällan där trycksänkningen sker. Den innehåller samma ångbildningsvärme som färskångan och är därför också energitekniskt mycket värdefull. Hur mycket expansionsånga som bildas beror av kondensatets temperatur, men vanligt är att 10 – 15% av kondensatet återförångas efter trycksänkningen. Med hjälp av ett avspänningskärl kan

expansionsångan utvinnas. Avspänningskärlet är i princip en stor ångavskiljare, vars fysiska storlek gör att kondensatet och expansionsångans hastighet sjunker såpass lågt att kondensatet faller mot kärlets botten och ångan stiger upp och avlägsnas från kärlets topp. I Figur 2.3 kan ses en visualisering av ett avspänningskärl. (Armatec 2014)



Figur 2.3 Avspänningskärl för avledning av expansionsånga. (Armatec 2014)

3 Ångans användningsområden

Ång- och kondensatsystem används på många håll inom industrin eftersom ånga är den vanligaste formen av energikonvertering. Ånga används på bred front inom industriprocesser och i normala fall används lågtycksånga på alla ställen som möjligt och bara där det behövs mycket höga temperaturer, så används överhettad högtrycksånga eftersom den är mycket värdefullare och exploateras vanligtvis för produktionen av elektricitet. Ungefär 45 % av bränslet som användes i USA år 1997 användes för produktion av ånga, vilket motsvarar ungefär 18 miljarder USD. Det beskriver rätt bra hur betydande bransch ångan är i det samhälle vi lever i. Effektiv mätning av ångflöden kan därav också bringa stora, påtagliga sparningar på flera håll, enligt en del uppskattningar kan upp till 5 – 10 % kostnadsreduceringar nås med hjälp av satsningar på ett fungerande flödesmätningssystem för ånga. (TUV NEL 2004)

Det finns otaliga orsaker till varför ång- och kondensatsystem fortsättningsvis är så populära inom industrin sedan ångan revolutionerade vårt samhälle under 1700-talet, men den största orsaken är ångans goda egenskaper:

- Ogiftig och säker att använda
- Transport i rörsystem är enkelt och kan göras effektivt
- Hög värmekapacitet
- Ångans temperatur kan enkelt justeras med hjälp av trycket
- Förmånlig i jämförelse med hetolje-system

(Motiva 2015)

Det är allt vanligare att industrin som använder ångan och ångproducenten delas i två olika företag eftersom båda verksamhetsområdena kräver stor expertis och effektiviteten kan höjas genom att de olika parterna koncentrerar sig på sitt område. Även om ångleverantören och användaren är samma företag, så delas de ofta upp i egna affärsenheter för att bättre kunna följa upp verkningsgraden för enheterna separat. Det betyder också att ångan faktureras mellan företagen, varav det är väsentligt att faktureringen sker på rätt grunder. Ofta finns det kontrakt mellan kundföretaget och leverantören som bestämmer vilken noggrannhet som krävs för ångmätningen på vars basis faktureringen sker, det kan handla om en osäkerhetsmarginal på 1% för massflödet, vilket kräver väldigt högkvalitativa mätningar för att uppnås. (TUV NEL 2004)

3.1 Pappersindustrin

Industrin stod år 2014 för 47 % av den totala energikonsumtionen i Finland, det är ungefär samma nivå, som den varit på de senaste åren, med bara någon enstaka procentenhets årsavvikelser. (Motiva 2014) Av industrins totala energikonsumtion står i sin tur pappers- och pappersvarutillverkningen för ca 52 % av industrins energianvändning och hela skogsindustrin för 49 % av elanvändningen inom industrin. (Finlands officiella statistik 2014) Det säger ganska mycket om hur betydande skogs- och i synnerhet pappersindustrin är för Finlands ekonomi. Därav är energieffektiviteten och verkningsgraden av stort intresse inom den här branschen eftersom det är nationellt den största, enskilda energikonsumtionsplatsen. Bara en liten förbättring i energieffektiviteten kan därför ha betydande ekonomiska positiva konsekvenser till och med på nationell nivå.

Största konsumtionssyftet för ånga i pappersmaskiner är torkningssektionen, där pappersmaterialet torkas efter trycksektionen, torrsubstanshalten ökar då från ca 50 % till den slutliga halten på ca 97 - 98 %. Pappret körs i torkningssektionen längs torkningscylindrarnas utsida och lågtrycksångan kondenseras på cylindrarnas insida. Värmeöverföringen effektiveras med hjälp av värmelister, som bildar virvlar i kondensatet och avlägsnar kondensatet effektivare. Ångan förs in i cylindern genom en ångkopplare och kondensatet avlägsnas med hjälp av en sifon och genomblåsningsånga. (Hyvönen 2012)

3.2 Presentation av testanläggningen

Testanläggningen för det här diplomarbetet är en av IndMeas kunder, vilken är i behov av alternativa metoder för mätkvalitetssäkring inom deras ång- och kondensatsystem. Testanläggningen är en småskalig ångproduktionsanläggning, som ägs och opereras av Tekniska Verken i Linköping AB.

Tekniska Verken i Linköping AB (publ) är ett regionalt företag som producerar, distribuerar och säljer el, fjärrvärme, fjärrkyla och ånga i Linköping(Sverige) och dess närområde. De har under senaste åren gjort stora investeringar för att utveckla ett mycket effektivt energisystem, vars grundsten är att ta tillvara resurser som annars inte skulle utvinnas. Det här syns bland annat i deras avfallsinsamling och avfall-till-energi verksamhet. Användningen och produktionen av fjärrkyla växer konstant, vilket även bidrar till ökad resursanvändning. Den nya kraftverksenheten, Lejonpannan, togs i bruk under 2015 och fungerar på multi-bränsle princip. Förutom energiverksamheten erbjuder Tekniska Verken även tjänster som dricks- och avloppsvattenhantering, biogasproduktion, infrateknik, mätteknik och energieffektivisering samt elnät och bredband på deras verksamhetsområde. År 2015 var nettoomsättningen, exkluderat punktskatter, ca 4,5 miljarder SEK (481 miljoner EUR) och rörelsevinsten 478 miljoner SEK (51 miljoner EUR). (Tekniska Verken 2016)

Tekniska Verken samarbetar med Indmeas i förverkligandet av det här diplomarbetet med anledningen att de vid sin enhet i Ljungsbro levererar lågtrycksånga till den närliggande livsmedelsproducenten Cloetta AB. För faktureringen mellan bolagen mäts ångans energiflöde och dessa mätningar har visat sig vara av flera anledningar utmanande att nå tillräckligt hög noggrannhet på. En orsak är den långa distributionslinjen utomhus, vilken orsakar att ångans kvalitet är väldigt svårkontrollerad. En annan orsak är att fältkalibreringar enligt lag inte kan utföras med radioaktiva spårämnen eftersom Cloetta är en aktör inom livsmedelsindustrin. Förbudet mot radioaktiva spårämnen väckte hos Indmeas och Tekniska Verken i Linköping intresset och motivationen att utreda möjligheterna för att verkställa fältkalibreringar med alternativa metoder.

4 Flödesmätning

Flödesmätning är ett fenomen, som många även inom industrin tar förgivet att fungerar som det skall utan vidare årgärder, men faktum är att det är en hel vetenskap i sig och en stor utmaning att tillverka flödesmätare som fungerar effektivt, speciellt för varierande omständigheter. Det finns ett fåtal olika tekniker som används för mass- och volymflödesmätning inom energi- och industriprocesser och det har på senare tid satts fokus på att utveckla nya effektivare metoder för flödesmätning. I det här kapitlet behandlas principerna för såväl volym- som massflödesmätning och de vanligaste typerna av flödesmätare presenteras och evalueras.

4.1 Differentialtryckmätning

Ett mycket vanligt sätt att mäta flöden inom industrin är mätningar baserade på tryckskillnader orsakade av olika slags stryporgan. Uppskattningsvis baserar sig cirka 80% av mätningarna av gas- och ångflöden inom industrin på differentialtryckmätning. (Menzies et al. 1999) Med hjälp av tryckskillnaden och densiteten kan man beräkna massflödet, vilket vanligtvis är av högre intresse än volymflödet vid mätning av ånga. Det finns ett antal olika mättekniker, men i det här kapitlet presenteras de oftast förekommande: strypfläns, munstycken och venturi-rör samt den aningen nyare varianten på området, V-konen.

Vid beräknandet av massflödet utgående från differentialtrycket används, den från Bernoullis ekvation härledda, formeln

$$Q_m = C\varepsilon A\sqrt{\frac{2\rho_1\Delta p}{1-\beta^4}}, \tag{4.1}$$

där C är kontraktionskoefficienten, ε är expansionskoefficienten, A är arean för flänsen eller munstycket, ρ_1 är densiteten vid temperaturen och trycket innan mätaren, Δp är den statiska tryckskillnaden innan och efter mätaren och β är strypförhållandet, d.v.s. förhållandet mellan stryporganets diameter och rörets innerdiameter. Strypförhållandet bestäms med ekvationen

$$\beta = \frac{d}{D}, \tag{4.2}$$

där d står för stryporganets diameter och D är rörets innerdiameter. Ofta antar strypförhållandet värden på ca 0,6 eftersom det ger en acceptabel kompromiss mellan mätnoggrannhet och bestående tryckfall. (Fagervik 2009) Kontraktionskoefficienten är alltid mindre än 1 och beror av strypförhållandet och flödets turbulens, som i sin tur bestäms av Reynolds tal (Re) och rörets diameter. Reynolds tal bestäms med hjälp av ekvationen

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}, \tag{4.3}$$

där μ är flödets dynamiska viskositet. Förutom viskositeten beror Reynolds tal alltså även av densiteten, flödeshastigheten och den hydrauliska diametern, vilken är innerdiametern för cirkulära rör. (The Babcock & Wilcox Company 2005)

Kontraktionskoefficienten kan estimeras med hjälp av den så kallade Reader-Harris/Gallagher ekvationen

$$C = 0{,}5959 + 0{,}0312\beta^{2{,}1} - 0{,}184\beta^{8} + 0{,}0029\beta^{2{,}5}\left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0{,}75} + 0{,}09\left(\frac{L_1}{D}\right)\left(\frac{\beta^4}{1-\beta^4}\right) - 0{,}0337\left(\frac{L_2}{D}\right)\beta^3, \tag{4.4}$$

där L_1 och L_2 bestäms baserat på avståndet mellan flänsen och tryckgivarna. (Campos et al. 2014) Kontraktionskoefficienten varierar mycket, men kan för strypflänsar anta värden på 0,5-0,8 och för venturimätare så högt som 0,995. (Fagervik 2009)

Expansionskoefficienten kan antas vara lika med 1,0 för vätskor på grund av inkompressibilitet, samma gäller för gaser vars tryckfall är väldigt litet i förhållande till det ursprungliga absoluta trycket. Expansionskoefficienten bör beaktas ifall gasen expanderar märkbart på grund av tryckfallet som orsakas av strypningen och koefficienten beror därmed av strypförhållandet, trycket innan och efter mätaren samt gasens isentropiska koefficient (k). Expansionsfaktorn kan bestämmas med formeln

$$\varepsilon = 1 - (0{,}41 + 0{,}35 \times \beta^4) \times \frac{\Delta p}{k \times p_1} \tag{4.5}$$

, där p_1 står för trycket innan flödesmätaren och k är flödets isentropiska koefficient. Formeln gäller då tryckfallet över mätaren är högst 25%. (Baker 2002) Den isentropiska koefficienten bestäms av de specifika värmekapaciteterna för gaser, c_p och c_v , enligt följande förhållande: $k = c_p/c_v$. För luft är den ca 1,4, för mättad ånga ca 1,3. (Fagervik 2009)

4.1.1 ISO 5167

Standarden ISO 5167 innehåller direktiv för flödesmätningar i fyllda cirkulära rör baserade på differentialtryck, del 1 behandlar allmänna principer och krav, del 2-4 behandlar strypflänsar, munstycken och venturi-rör. År 2016 publicerades del 5 av standarden och den behandlar V-koner, vilket kommer göra det enklare för V-kon mätare att komma in på marknaden. I standarden ingår installationsdirektiv för olika tryckbaserade flödesmätare, deras storlekskrav och användningsändamål. Första versionen av ISO 5167 utgavs 1991 och efter det har några uppdateringar utkommit. (ISO 5167 2003)

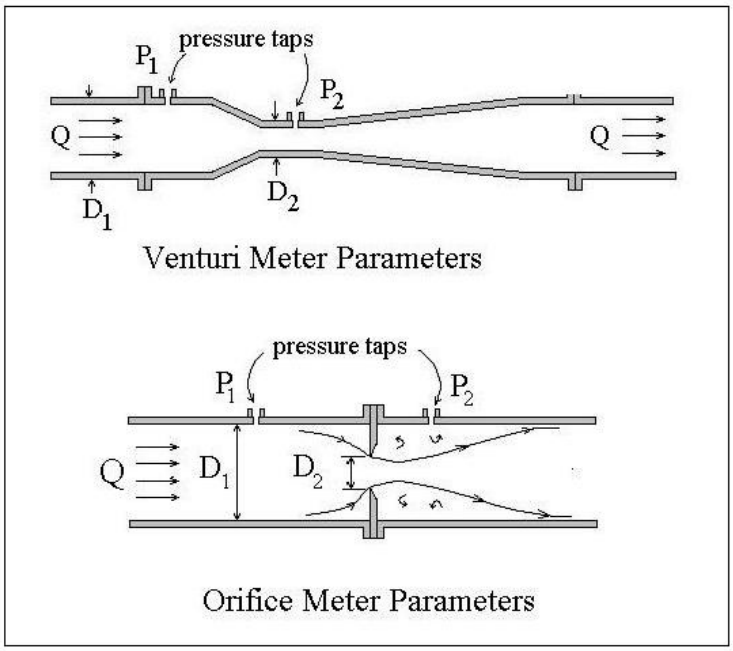
4.1.2 Strypfläns

Strypflänsmätaren använder sig av ett stryporgan med formen av en tunn skiva med ett hål i mitten och vassa kanter. När flödesytan minskar på grund av strypningen, så ökar flödeshastigheten och trycket sjunker. Trycket mäts innan och efter stryporganet, som ger tryckskillnaden man söker efter. För valet av tryckmätare är det bättre att välja en som

mäter tryckskillnaden mellan de två punkterna istället för att mäta trycket för bägge punkterna för sig och räkna skillnaden, på så vis kan man öka på noggrannheten. Strypflänsen är den oftast förekommande flödesmätaren tack vare dess låga pris och långa historia, vilket underlättar tillgången till konstanter och tillämpningen av standarder. Till exempel ingår kontraktionskoefficienter i standarden ISO 5167 för strypflänsar, vilket underlättar ibruktagandet ifall man väljer att använda strypflänsar av de dimensioner som godkänts i standarden. Strypflänsar är enkla att installera eller byta ut. De negativa aspekterna med strypflänsar är att de orsakar ett stort tryckfall som inte går att återvinna och de är relativt känsliga för dropperosion som orsakas av vattendroppar med hög hastighet. (The Babcock & Wilcox Company 2005) I installationsskedet borde också strypflänsens egenskaper tas i beaktande, vilket ofta inte görs. De installationsåtgärder som förbättrar mätkvaliteten är att det motströms från mätaren borde vara en rak sträcka på ca 100 gånger diametern och rörets inneryta borde ha en låg grovhet. (TUV NEL 2004)

4.1.3 Venturi-rör och flödesmunstycke

Flödesmunstycken och Venturi-rör är till sin funktionsprincip mycket lika strypflänsen, men endast design-aspekten som skiljer dem åt. Flödesmunstycken kan se ut på lite olika sätt, men de kan ses som en kompromiss mellan strypflänsar och Venturi-rör bestående av en förlängd avrundad hals på stryporganet. Till dess nackdelar hör att tryckfallet är förhållandevis stort, men allmänt sett mindre än för strypflänsar. Venturi-röret är längre än strypflänsen och flödesmunstycket och har den fördelen att den orsakar ett mindre tryckfall. Venturi-röret består av en cylindrisk öppning, sedan en avsmalnande konvergenszon följt av en cylindrisk halssektion och slutligen ett långt expanderande utlopp. Venturi-röret är dock betydligt dyrare och i synnerhet mycket större och tyngre än vad de övriga tryckbaserade flödesmätarna är.(The Babcock & Wilcox Company 2005) I Figur 4.1 är Venturi-rör- och strypflänsmätningar presenterade. Venturi-rör har visat sig påverkas i mindre grad av våt ånga i jämförelse med överhettad ånga än strypflänsar och flödesmunstycken eftersom det i den kan samlas kondensat i nedre delen av röret precis innan stryporganet. För höga hastigheter och tryck är flödesmunstycken populära ersättare till strypflänsar eftersom de är mindre känsliga för skadegörelse orsakade av vattendroppar i hög hastighet och dropperosion.

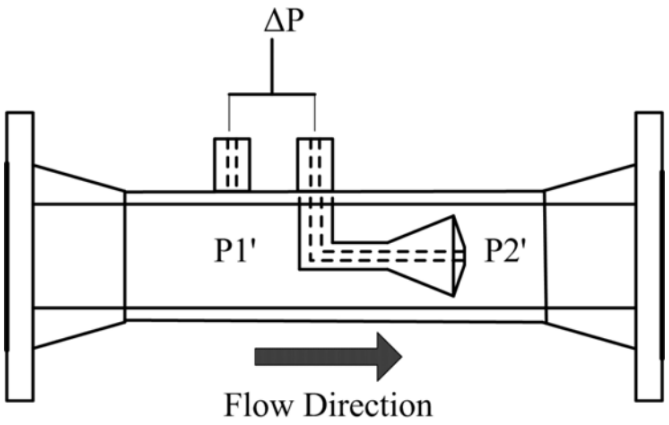


Figur 4.1 En schematisk bild av Venturi-rör och strypflänsar med utsatta punkter för tryckmätning. (engineeringexcelspreadsheets.com)

4.1.4 V-kon

V-konen är förhållandevis ny inom flödesmätaren i jämförelse med de övriga tryckbaserade flödesmätarna och har gjort sig känd under 2000-talet. Det har dock tagit rätt så länge för V-konen att på allvar slå igenom, främst på grund av obefintliga koefficienter att använda, så samtliga mätare har varit tvungna att kalibreras före ibruktagande, vilket har gått att undvika med strypflänsar och venturi-rör ända sedan IS0 5167 utgavs 1991. Det har alltså lett till att V-konmätarna har blivit dyrare att ta i bruk och populariteten har fortsättningsvis varit låg. (Hodges et al. 2009) Det kommer dock troligen att bli ändring i det, eftersom det år 2016 utgetts en ny del till ISO 5167 innehållande just V-konen, det kommer säkert ändra på marknadssituationen markant. (iso.org)

V-konens konstruktion skiljer sig aningen från de övriga differentialtryckmätarna eftersom dess stryporgan är en kon i mitten av flödet riktad mot flödets riktning, så flödet pressas inte ihop i mitten som i de övriga mätarna utan det trycks ut på kanten av röret. Den första tryckmätaren är precis som hos de andra mätarna innan stryporganet, men den andra tryckmätaren är på baksidan av V-konen , vilket syns i Figur 4.2. Jämfört med strypflänsen har V-konen ett mindre tryckfall och ett bredare användningsområde. (Hodges et al. 2009)



Figur 4.2 Genomskärningsbild av V-konmätaren. (Dong et al. 2009)

4.2 Övriga mätningsmetoder

Förutom de extensivt använda differentialtryckmätningarna, så finns det även några andra metoder som används för flödesmätning, men de är inte nära på lika populära i dagsläget. Volymflödesmätning med hjälp av flödeshastigheten är en av dem och direkt massflödesmätning genom corioliskraften är en annan. Dessa diskuteras i korthet i det här kapitlet.

4.2.1 Vortexmätare

Vortexmätare har utvecklats snabbt på den senaste tiden och har växt till en av de populäraste flödesmätarna inom industrin. Vortexmätaren baserar sig på mätningen av flödeshastigeten, med vars hjälp volymflödet kan beräknas. Deras popularitet beror främst på deras låga kostnad och litet behov av underhåll.

Funktionsprincipen hos vortexmätaren är att genom placeringen av en trubbig kropp i flödet, så skapar man virvlar (engelska: vortices) i flödet nedströms från kroppen, vars frekvens mäts för att bestämma flödeshastigheten. Med hjälp av en känslig sensor mäts alltså frekvensen och energimängden i virvlarna och signalen från sensorn konverteras om till en standard analog output, vanligtvis 4-20 mA. Den analoga outputen kan sändas via vilket som helst system vidare till en mottagare för analys och mätaravläsning. Vortexmätaren har visat goda resultat för luftflöden med hastigheten 6 – 80 m/s och vattenflöden med hastigheten 0,3 – 9 m/s. Användarområdet begränsas av Reynolds tal, som beror av bl.a. densiteten och dynamiska viskositeten, vilket är orsaken till att hastighetsintervallet skiljer sig så mycket mellan luft- och vattenflöden. Vid låga flödeshastigheter uppstår ej virvlar i flödet, varvid vortexmätaren upphör att fungera. Problemet kan lösas med att installera ett rörparti med mindre diameter där mätaren placeras, eftersom det höjer på flödeshastigheten. Vortexmätaren fungerar för flöden med Reynolds tal på 10 000 eller högre. (Venugopal et al. 2011)

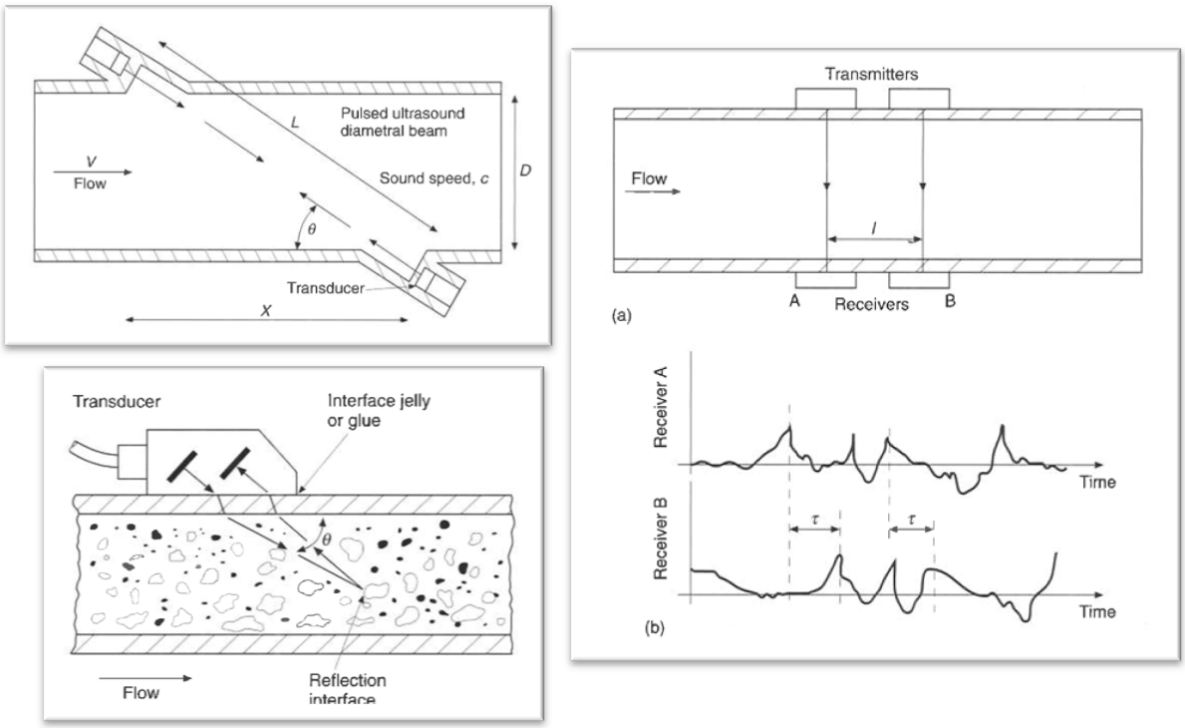
Processautomationsföretaget Endress+Hauser presenterade 2014 en vortexmätare under namnet Prowirl 200, som utöver flödeshastigheten även mäter massflödet och ångans kvalitet, vilket möjliggör bestämmandet av energiflödet. Mätaren är dock såpass ny att det inte finns andra källor att tillgå än tillverkarens produktblad och tekniska specifikationer. Prowirl 200 finns tillgängliga för rörstorlekarna DN 15 till 300. Med tanke på hur dåligt ångans kvalitet är känd i många processer, skulle det verkligen vara en revolutionerande

teknik för ångbranschen ifall det fanns ett enkelt sätt för att få reda på kvaliteten. Prowirl 200 använder sig av en teknik som fungerar enligt följande: Under ett stabilt ångflöde och stabila processomständigheter uppstår också stabila virvlar och en stadigvarande signal erhålles över en tidsperiod. Ifall ångan är våt och innehåller vattendroppar kommer de att träffa virvelsensorn och ger upphov till variationer i signalen. Den här andra signalen har en effekt på signalens kurtosis, vilket möjliggör klarläggandet av ångans kvalitet. Prowirl 200 fungerar för ångflöden med hastigheten 5 - 60 m/s och ångkvaliteten, x, 0,80 – 1,00. I Figur 4.3 är Prowirl 200 presenterad. (Endress+Hauser 2016)

Figur 4.3 Bild av Prowirl 200. (Endress+Hauser 2016)

4.2.2 Ultraljudsmätare

Det finns tre typer av ultraljudsmätare, den första baserar sig på löptidsdifferensmetoden, alltså att ljudet har olika hastighet i medström och motström. Den andra metoden baserar sig på doppler-principen alltså att frekvensen hos de reflekterade ljudvågorna varierar beroende på flödets hastighet. Slutligen finns det även ultraljudsmätare som baserar sig på korskorrelation, alltså mäter fördröjningen mellan ett mönster i signalen från två skilda givare-mottagare par placerade på ett känt avstånd från varandra. Den första varianten, alltså löptidsdifferensmetoden är den vanligaste eftersom den har visat sig uppnå högsta noggrannhet, men det finns även två mätningstekniker för den. Den ena baserar sig på tidsskillnaden och den andra på frekvensskillnaden för signalen motströms och medströms. I Figur 4.4 är alla ultraljudsmätningstekniker presenterade. (Baker 2002)



Figur 4.4 Schematiska bilder på olika typer av ultraljudsmätare, uppe till vänster löptidsdifferensmetoden, nere till vänster dopplermetoden och till höger korskorrelationsmetoden. (Baker 2002)

För löptidsdifferensmetoden kan man beräkna volymflödet med hjälp av formeln

$$Q_v = \frac{\pi D^2 L^2 \Delta t}{8 X t_u t_d}, \qquad \Delta t = t_u - t_d = \frac{D/sin\theta}{c - Vcos\theta} - \frac{D/sin\theta}{c + Vcos\theta} \tag{4.6}$$

, där t_u och t_d står för tiden för ultraljudet att röra sig motströms respektive medströms, D är rörets innerdiameter, L är avståndet mellan ultraljudsgivarna/mottagarna, X är flödets rörelsesträcka mellan ultraljudsgivarna/mottagarna, θ är vinkeln mellan linjen givare-givare och flödesvektorn, V är flödeshastigheten och c är ljudets hastighet i mediet. Det betyder också att ljudets hastighet bör kännas till med hög precision, vilket kan vara utmanande för varierande flöden, då det påverkas av bl.a. temperatur och andra flödesparametrar. Räknar man med skillnaden i frekvensen, så kan formeln

$$Q_v = \frac{\pi D^2 L^2 \Delta f}{8 X}, \qquad \Delta f = f_d - f_u = \frac{c + Vcos\theta}{D/sin\theta} - \frac{c - Vcos\theta}{D/sin\theta} \tag{4.7}$$

användas, där f_d är frekvensen medströms och f_u är frekvensen motströms.(Baker 2002)

Dopplermetoden baserar sig alltså på frekvensskillnaden mellan ultraljudvågorna som sänds och ultraljudsvågorna som reflekteras tillbaka, vilken alltså beror av hastigheten hos reflektorn. Reflektorn måste vara en partikel eller en annan fas än det övriga flödet, t.ex. luftbubblor i vätska eller vattendroppar i ånga, problemet som uppstår då är att det dels måste finnas en annan fas närvarande och dels är hastigheten för den andra fasen mycket

osannolikt den samma som för det övriga flödet. För våt ånga till exempel tenderar vattendropparna att röra sig långsammare än vattenångan. Samma utmaning gäller också för korskorrelationsmetoden, d.v.s. att källan till korrelationen härstammar från en annan fas och därmed inte beskriver den faktiska flödeshastigheten. (Baker 2002)

Det positiva med ultraljudsmätare är att de inte orsakar något tryckfall och inverkar inte heller på flödets övriga parametrar, dessutom går de att applicera på de flesta gas- och vätskeflöden. Löptidsdifferensmetoden går dock inte att tillämpa på två-fas flöden, medan dopplermetoden och korskorrelationsmetoden i normala fall kräver två faser för att fungera. (Baker 2002)

4.2.3 Turbinmätare

Turbin- eller skruvmätare har en lång historia inom flödesmätning tack vare dess enkla funktion. Turbinmätarens huvudkomponent är en propeller, vars rotationshastighet är linjär till volymflödet genom mätaren inom mätarens funktionsområde. Förutom propellern inkluderar turbinmätaren ett lager, som erbjuder lägsta möjliga friktion för propellern, och en magnetisk mottagare för att detektera rotationshastigheten. Andra slags detektionsmetoder förekommer också, men för gasflöden är den magnetiska varianten den vanligaste. Lagret är ofta ett oljesmort kullager, men även luftlager förekommer. Fördelar med turbinmätaren är att de erbjuder hög noggrannhet i tillämpningar där flödet är stabilt och mätaren avger en mekanisk eller puls-baserad signal som är direkt proportionell till volymflödet. Till nackdelarna hör att turbinmätaren överläser ett pulserande flöde och den är väldigt känslig för flödets densitet då massflödet är av intresse. (Baker 2002)

Naturgasmätare består till en stor del av turbinmätare, till exempel Gasum, som säljer och distribuerar naturgas i Finland, använder huvudsakligen turbinmätare i sina mätningar och samma sak gäller gasmätarna inom stor del av industrin var naturgas används. Gasum kalibrerar deras egna mätare, som står som faktureringsgrund, i deras eget, av FINAS ackrediterade, kalibreringslaboratorium. (Gasum 2014)

4.2.4 Coriolis

Coriolismätaren är såhär långt den ända direkta massflödesmätaren, då den direkt mäter massflödet och densiteten för flödet och inte härleder det genom volymflöde eller differentialtryck. Coriolismätaren är namngiven efter den franska matematikern Gaspard-Gustave de Coriolis(1792-1843) och baserar sig på den så kallade corioliseffekten. Det finns många olika typer av design för coriolismätare, men de baserar sig alla på samma princip. Det finns raka och böjda rör samt singel- och dubbelrör sammansättningar. Flödet genom röret(-en) får dem den(-m) att vibrera, frekvensen på vibrationen anger massflödet och varierar från ca 50 upp till 1000 Hz. Massflödet räknas med hjälp av den enkla ekvationen

$$Q_m = K \times (t_d - t_0), \tag{4.8}$$

där K är en kalibreringsfaktor som är relaterad till flödesmätningens känslighet, t_d är tidsförskjutningen mellan de två rörelsesignalerna längs mätningssektionen, då det finns flöde, och t_0 är tidsförskjutningen under nollflöde, det vill säga en referenspunkt. Under idealförhållanden antar K och t_0 konstanta värden och massflödet är linjärt proportionellt mot t_d, dock är kalibreringsfaktorn normalt inte enbart beroende av de strukturella

egenskaperna, utan också av flödets egenskaper. Den största fördelen med coriolismätaren är helt klart att den kan mäta massflödet direkt och därmed gör sig oberoende av densitet, tryck och temperaturvariationer i flödet. (Wang et al. 2014)

Det finns också nackdelar med coriolismätare, en är att de är känsliga för extern vibration, som ofta förekommer på industrianläggningar. De är också svåra att applicera på två-fas flöden av flera orsaker. En dubbelrör sammansättning kan dela två-fas flödet i olika fasproportioner och i singel- eller dubbelrör sammansättningar så följer eventuellt den andra fasen inte rörets vibration korrekt. Det kan dock eventuellt rättas till med ett enkelt rakt rör utformning. (Baker 2002)

Det största hindret för allmännare användning av coriolismätare är deras förhållandevis höga pris, speciellt för stora anläggningar med otaliga flödesmätningar blir den ekonomiska tröskeln väldigt hög för tillämpning av coriolismätare.

4.3 Två-fasflödesmätning

I många ång- och kondensatsystem är ångan i mättat tillstånd eller aningen våt. Ställvis kan den till och med variera mellan tillstånden under transportsträckan från produktionen till konsumtionen. Som redan nämnts i kapitel 2.3 är det då frågan om ett två-fasflöde eftersom det innehåller både gas och vätska, det gör flödesmätningen betydligt mer komplicerad med många aspekter att ta i beaktning. De flitigast använda flödesmätarna för ånga baserar sig på differentialtryckmätning och är praktiskt taget oftast frågan om strypflänsar, venturi-rör eller flödesmunstycken. Det är sedan länge känt att dessa ger för höga värden för gasers massflöden ifall de inte korrigeras för att kompensera för sin två-faskaraktär. Eftersom gasflödesmätningarna visar för mycket används ofta begreppet över-läsning (OR, från engelskans over-reading). OR-faktorn bestäms enligt ekvationen

$$OR = \frac{Q_{m,meas}}{Q_{m,act}}, \tag{4.9}$$

alltså genom att dividera flödesmätarens värde för massflödet ($Q_{m,meas}$) med det verkliga massflödet ($Q_{m,act}$).

För att bestämma det korrigerade massflödet för gas- och vätskefasen samt det totala massflödet, så utgår man ifrån det värde som två-fasflödesmätaren anger för gasens massflöde. Enligt nedanstående ekvationer.

$$Q_{g,m,act} = \frac{Q_{g,m,meas}}{OR}, \tag{4.10}$$

$$Q_{l,m,act} = \frac{Q_{g,m,meas}}{OR} \times \frac{1-x}{x} \tag{4.11}$$

och

$$Q_{tot,m,act} = \frac{Q_{g,m,meas}}{OR \times x}. \tag{4.12}$$

Det som oftast är av intresse är ändå totala massflödet eftersom med hjälp av det kan man få hela massbalanser för en anläggning bestämda och därför begränsas genomgången av korrigeringsfaktorerna till detta. Korrigeringsfaktorn, F, kan divideras från ekvation 4.12 och är

$$F = \frac{1}{OR \times x} \tag{4.13}$$

Det innebär även att korrigeringsfaktorn, *F*, antar värden större än 1 och att ångans och kondensatets totala massflöde är större än det som mätaren visar. Det här beror på att när torrhetsfaktorn, *x*, sjunker under 1 så stiger inte OR-faktorn i samma takt eftersom kondensatets densitet är såpass hög i förhållande till ångans.

Det har sedan 1960-talet utvecklats många slag av korrelationer för att bestämma storleken på OR-faktorn för differentialtryck baserade flödesmätare som utsätts för två-fasflöden. De kändaste är James', Murdocks och Chisholms korrelationer. Korrelationerna baserar sig dock på torrhetsfaktorn, vilken i många processer dessvärre är osäker eller helt okänd, vilket betyder att ifall man vill korrigera flödesmätaren med hjälp av dem bör man göra en uppskattning av värdet på torrhetsfaktorn för flödet ifråga. De OR-faktorer som presenteras här är anpassade för strypflänsar, men ytterligare faktorer har utvecklats för applicering på övriga differentialtryckmätare, som till exempel venturi-rör.

4.3.1 Homogen modell och James' ekvation

I kapitel 2.3 introducerades den homogena modellen för beräkningar av två-fas flöden, det vill säga innehållande det antagandet att gas- och vätskefaserna har samma hastighet och temperatur. Den homogena modellen ger då korrigeringsfaktorn

$$F = \sqrt{\frac{\rho_l}{x\rho_l + (1-x)\rho_g}}. \tag{4.14}$$

James korrelation baserar sig på den homogena modellen med det undantaget att torrhetsfaktorn är upphöjd med exponenten 1,5. Det resulterar i följande ekvation för korrektionsfaktorn

$$F = \sqrt{\frac{\rho_l}{x^{1,5}\rho_l + (1-x^{1,5})\rho_g}}. \tag{4.15}$$

(Hussein et al. 1991)

4.3.2 Separata flödesmodellen och Murdocks ekvation

Separata flödesmodellen skiljer sig från den homogena modellen på det sättet att den beräknar massflödet för gas- och vätskeflödet separat. Det ger olika felmarginaler för gasfasen och vätskefasen av det totala massflödet, men ger en bättre bild av verkligheten och en godtagbar felmarginal för det totala massflödet. Korrektionsfaktorn för den separata flödesmodellen är

$$F = \frac{1}{x + (1-x)\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}}. \tag{4.16}$$

Murdocks ekvation är baserad på den separata flödesmodellen och framställdes genom en empirisk undersökning, varifrån konstanten 1,26 erhölls. Ekvationen ser ut enligt följande

$$F = \frac{1}{x + 1{,}26(1-x)\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}}. \tag{4.17}$$

(Hussein et al. 1991)

4.3.3 Chisholms ekvation

Chisholms ekvation är precis som Murdocks ekvation baserad på den separata flödesmodellen, men den beaktar även skjuvningsspänningen, som kompenseras genom Lockhart-Martinelli parametern X. (Meng et al. 2010) Lockhart-Martinelli parametern bestäms av förhållandet mellan gas- och vätskeflödet samt flödenas densiteter. (TUV NEL 2010) Chisholms korrelation kan skrivas

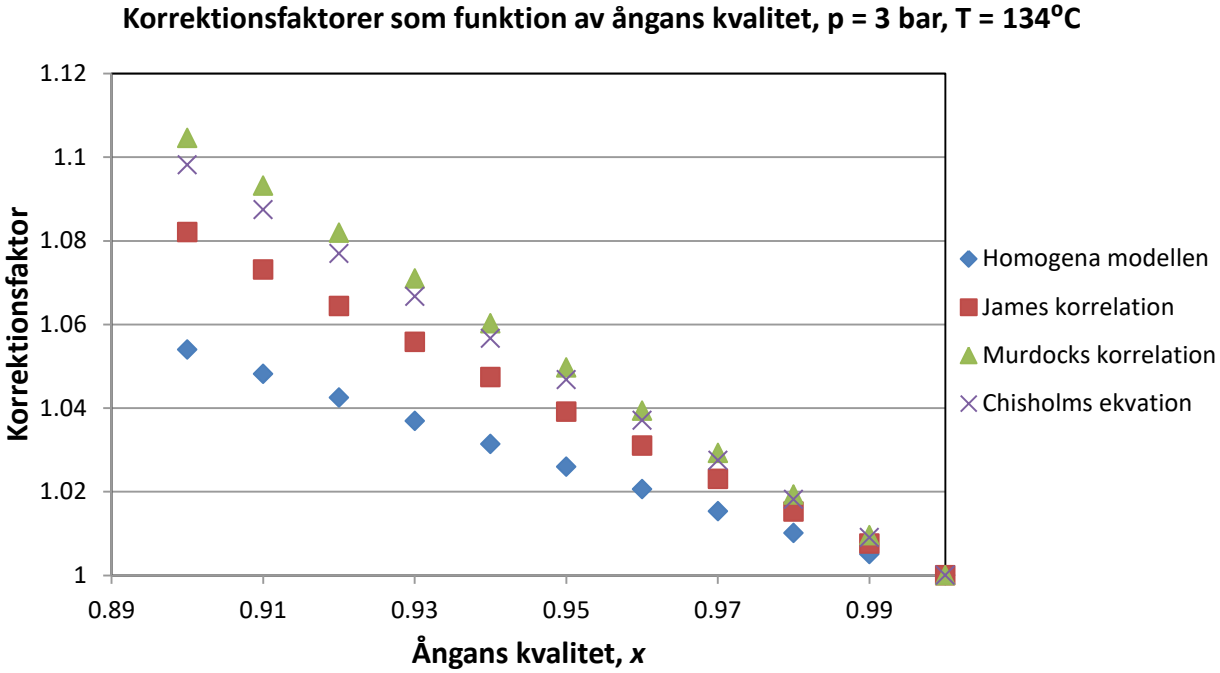
$$F = \frac{1}{x \times \sqrt{1 + \left[\left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{4}} + \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{4}}\right] X + X^2}}, \tag{4.18}$$

där Lockhart-Martinelli parametern är

$$X = \frac{Q_{m,l}}{Q_{m,g}}\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} = \frac{1-x}{x}\sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}. \tag{4.19}$$

De Leeuw utvecklade Chisholms korrelation vidare genom att ersätta exponenten ¼ med variabeln *n*. Variabeln *n* bestäms i sin tur av Froudes tal som beskriver hur kanalströmningen beter sig och dess storlek säger ifall strömningen är subkritisk, kritisk eller superkritisk. (Lide et al. 2007)

4.3.4 Jämförelse mellan korrektionsfaktorer



Figur 4.5 Korrektionsfaktorer presenterade som funktion av ångans kvalitet.

För att få en bild av hur korrektionsfaktorerna påverkar mätarens flödesvärde, så är de presenterade för lågtrycksånga i Figur 4.5 som funktion av ångans kvalitet. Densiteten för vattnet och vattenångan är tagen ur ångtabeller. (Kotiaho et al. 2004) Flödesmätaren visar alltså ett för litet värde för det totala massflödet, det här fenomenet kallas vätskeöverskott och behandlas närmare i kapitel 4.5.2. Som kan ses i Figur 4.5, så antar korrektionsfaktorerna värden på mellan 1.05 och 1.11 då ångkvaliteten är 0.9 och dessa närmar sig linjärt 1.0 då man rör sig mot ångkvaliteten 1.0, det vill säga inget kondensat i vätskefas är närvarande.

I en nyligen utförd undersökning granskades felmarginalen för några av de olika korrelationsmetoderna baserade på den separata flödesmodellen. Det visade sig att felmarginalen varierar mellan olika flödesmätare, så ingen av korrelationerna fungerar för alla situationer. En annan observation var att flödets tryck och födeshastighet hade en försumbar inverkan, medan strypelementets β-värde (strypförhållandet) och typen av flödesmätare hade en stor inverkan på resultatet. Felmarginalen för gasfasens massflöde var dock förhållandevis liten, men för vätskefasen var den stor, vilket gjorde att även felet för det totala massflödet kunde anta relativt väldigt stora värden. (Zheng et al. 2016)

4.4 Automationssystem

Givaren i flödesmätaren är kopplad till en sändare som ändrar givarens utslag till en signal som i sin tur förmedlas via ett nätverk till automationssystemet som processerar signalen. Signalen är oftast en mA (milliampere) -strömsignal i registret 4-20 mA, som är skalad för ett specifikt område, av en 20 mA signal erhålls skalans maximivärde. Strömsignaler, som baserar sig på analoga strömsignaler i en sluten krets från givaren till automationssystemet, har använts inom industrin sedan 1960-talet. (Trevathan 2006a) Under 1980-talet presenterades ett öppet HART-protokoll, som är ett digitalt kommunikationsnätverk och

fungerar i det redan existerande 4-20 mA signalnätverket parallellt med den analoga strömsignalen. HART-protokollet möjliggör bland annat att göra ändringar i instrumentens inställningar samt tillgång till feldiagnostik. (Zhang 2010)

Med termen ”smarta instrument” syftas det enligt ISA (The International Society of Automation) på instrument som baserar sig på en mikroprocessor, som kan programmeras, har ett eget minne, kan fjärrstyrt kommuniceras med och är kapabla att rapportera fel och prestanda. Smarta instrument måste alltid kommunicera digitalt, till exempel genom ett HART-protokoll. Smarta instrument medför ett flertal fördelar:

- De kan kalibreras fjärrstyrt varifrån som helst med ett instrument kopplat till signalledningen eller automationsnätverket
- Mätinstrumentet kan mäta och rapportera flera variabler, till exempel kan en tryckmätare också rapportera temperatur
- Sändaren kan eventuellt också ge information om sina specifikationer, som till exempel modellnummer, konstruktionsmaterial, kalibreringar och märke etc.
- Många typer av sändarfel kan detekteras och rapporteras av sändaren själv
- Sändaren kan även kontrollera dess interna parametrar, till exempel kan en coriolismätare också rapportera vibrationsfrekvensen, vilket underlättar en eventuell felsökningsprocess

Tas samtliga av dessa fördelar i beaktande är det lätt att konstatera att processhanteringen och – övervakningen kan effektiveras i hög grad genom implementerande av smarta mätinstrument. (Trevathan 2006b)

4.4.1 Normering av mätresultat

Inkluderat i automationssystemet brukar även finnas normeringar av flödesstorheten, bakgrunden till det är att då man jämför mätvärden med standardiserade gränsvärden som referens, bör flödesresultat ges i ett normaliserat format. Normaliseringen kan göras med hjälp av temperatur- och tryckmätningar och innebär att flödesresultaten beräknas under NTP-förhållanden, temperaturen T = 273,15 K och trycket p = 100 kPa. Normalvolymen används sedan för att kunna jämföra flöden sinsemellan. (Takeuchi et al. 2009)

4.4.2 Densitetskompensation

Tidigare nämndes att största delen av flödesmätaren för vätska och gas inom energi- och processindustrin baserar sig på differentialtryck. När massflödet eller volymflödet beräknas utgående ifrån differentialtrycket, är kvadratroten av flödets densitet en multipel i formeln. Det innebär att då trycket eller temperaturen ändrar, vilket leder till att densiteten hos flödet ändrar, så bör flödesmätarens parameter för densiteten korrigeras, alternativt kan det rättas till i automationssystemet. För ånga är densitetsfaktorn väldigt avgörande och bör därför beaktas med högsta möjliga noggrannhet, eftersom ångans densitet varierar mycket starkt enligt trycket. Massflödet kan också beräknas utgående ifrån volymflödet genom att multiplicera det med densiteten, det ger en ännu starkare korrelation mellan massflödet och densiteten eftersom det inte är kvadratroten av densiteten som används. Det innebär givetvis att ett fel i densiteten orsakar ett lika stort fel för massflödet. Beräkningen av massflödet baserat på en volymflödesmätning sker i de allra flesta fall i automationssystemet. (Takeuchi et al. 2009)

4.5 Mätfel

Där det finns mätare, så uppstår det i allmänhet även mätfel eftersom den verkliga processen mer sällan ser ut precis som den mätaren eventuellt är gjord och kalibrerad för. I det här kapitlet granskas i korthet de vanligaste felkällorna till mätfel för flödesmätare inom industrin.

4.5.1 Installation

Alla flödesmätare är beroende av flödets egenskaper och parametrar, vilka påverkas av all utrustning installerad i flödet och flödeskanalens utformning. Utrustning som installerats kan vara bland annat pumpar, temperatur-, tryck- och flödesmätaren, flänsar, ångavskiljare och ventiler. Flödeskanalens eller – rörets, utformning innefattar alla förgreningar, rörexpanderingar och kurvatur. Innan och efter en flödesmätare bör det alltid finnas ett rörparti bestående av en rak sträcka med konstant diameter, rörpartiets längd bestäms som en funktion av rörets diameter och varierar för olika slags mätare. Standarden ISO 5167, som presenterades i kapitel 4.1.1, ställer även rekommendationer för hur långa de ostörda raka rörpartierna bör vara för att uppfylla kraven för olika flödesmätare baserade på differentialtryck. En del av rekommendationerna för respektive flödesstörning, eller installerad apparatur, ur standarden kan ses i Tabell 4.1.

Tabell 4.1 Rekommenderade längder av rakt rör innan strypflänsar efter olika störningskällor. (ISO 5167 2003)

Rekommenderad längd av rakt rör innan strypflänsen efter flödesstörningar av olika källor, längd angiven som multipel av rörets innerdiameter D					
Stryp-förhållande, β	**Enkel 90° kurva**	**Två 90° kurvor i samma plan S ≤ 10D**	**Två 90° kurvor, vinkelräta plan**	**Bollventil, öppen**	**Termometer-ficka**
≤0.2	6	10	34	12	5
0.4	16	10	50	12	5
0.5	22	22	75	12	5
0.6	42	42	65	14	5
0.67	44	44	60	18	5
0.75	44	44	75	24	5

Parameter S i Tabell 4.1 syftar på avståndet mellan kurvorna. De värden som anges här skall användas ifall högsta möjliga mätnoggrannhet vill uppnås, ISO 5167 anger också mindre värden som kan användas ifall en tilläggsosäkerhet på 0,5% tillåts. Det syns klart att strypförhållandet har en stor inverkan på hur nära strypflänsmätaren flödesstörningskällorna i rörsystemet kan vara. Ju mindre strypförhållande, desto kortare avstånd krävs. Moteffekten är dock att ju mindre strypförhållande, desto större är det bestående tryckfallet över mätaren, vilket orsakar energiförluster. Därför måste dessa aspekter balanseras för att uppnå den optimala processfunktionen. (Emerson 2014)

Vanligt är också att fel slags flödesmätare används eller flödesmätaren är feldimensionerad för sitt användningsändamål. Även felinstallationer förekommer det vill säga att mätaren

inte är installerad som den borde, till exempel en strypflänsmätare som inte är fullständigt centrerad till mitten av röret. (Batra 2011)

4.5.2 Vätskeöverskott

Vid mätning av lågtrycksånga är det sannolikt att ångan är mättad eller våt, det vill säga innehåller kondenserat vatten och det är frågan om ett två-fasflöde. Det kondenserade vattnet kan ge upphov till stora mätfel i flödesmätaren ifall det ignoreras vid planeringen. Den inneslutna vätskan i två-fasflödet påverkar kraftigt flödesprofilen och ger därför upphov till mätfel. Två-fasflödesmätare har presenterats, men de har i många situationer visat sig vara opålitliga i till sin funktion. De sätt man kan lösa problemet med är att antingen sträva till en helt torr ånga det vill säga orsaka ett enfasflöde till exempel genom att installera en välfungerande ångavskiljare innan flödesmätaren eller så godtar man att det flödar en del vätska med ångan och kompenserar den med någon korrigeringsfaktor. Det som åtminstone bör tänkas på är att alla differentialtryckbaserade flödesmätares tryckgivare skall vara installerade på övre sidan av röret, så de inte fylls med kondensat. (Batra 2011) Samma gäller även för mätningar av temperatur och tryck, vilket gör att installationen av de mätarna också skall göras enligt korrekta metoder för högsta noggrannhet. De skall alltså likaså, på ett horisontellt rör, installeras på övre sidan av röret, så de inte påverkas av eventuellt kondensat som samlats i rörets nedre del. (Spirax Sarco 2016)

Det finns givetvis flera olika varianter av två-fasflöden, förutom våt ånga kan det vara frågan om ett vätskeflöde inneslutande gasbubblor eller ett avloppsvattenflöde inneslutande partiklar i fastform, de påverkar likaså flödesprofilen och stör mätinstrumenten på samma sätt som kondensatet i våt ånga.

4.5.3 Signal- och automationsfel

I kapitel 4.4 beskrevs automationssystemet och dess roll i kontrollerandet av en industriprocess. Automationssystemet utgör också en sannolik felkälla till mätfel. Felet kan vara i inställningarna för någon mätare, till exempel mätområdet eller typen av mätare, eller så kan det vara signalprocesseringen som inte är korrekt inställd. När det gäller ångmätningar, så är flödets densitet mycket beroende av temperaturen och trycket och därmed bör densitetskompensationen, som nämndes i kapitel 4.4.2, vara korrekt. Densitets-kompensationen är en av de oftast förekommande källorna till mätfel i signal-processeringen. Felkällan kan orsakas av två alternativ, antingen är kompensationen inkorrekt eller så saknas kompensationen helt från signalprocesseringen. En elektrisk signal från ett mätinstrument till automationssystemet kan även störas av starka el- eller magnetfält. Dessa kan orsakas av till exempel stora elektriska motorer eller generatorer.

5 Kalibreringsmetoder

I det här kapitlet presenteras metoder för att försäkra kvaliteten på flödesmätningar inom energi- och industriprocesser, både metoder som är nu i användning samt spekulationer kring vad som kanske kunde användas för flödeskalibreringarna i framtiden. I samband med metoderna diskuteras även vad deras för- och nackdelar är.

Målet med kalibreringen av flödesmätare är att identifiera och, ifall möjligt, reducera osäkerheten i mätningen. Det kan göras genom att avinstallera mätaren och kalibrera den i ett kalibreringslaboratorium med samma flödesmedium eller ett annat. Alternativt kan mätaren kalibreras under användning i sin egen process utan avinstallation med hjälp av ett pålitligare referenssystem, den metoden kallas för fältkalibrering. De existerande kalibreringslaboratorium använder sig vanligtvis av enkelt påtagliga medium som vatten eller luft vid kalibreringarna, det resulterar i att det kan finnas stora avvikelser i flödets egenskaper jämfört med det medium mätaren används för normalt, till exempel ånga. Antalet laboratorium som kalibrerar med ånga är få. I ett laboratorium utförda kalibreringar beaktar heller inte eventuella installationsspecifika felkällor mätaren utsätts för i sin vanliga användning. (TUV NEL 2004)

5.1 Spårämnesmätning

Spårämnesmätning är den metoden IndMeas huvudsakligen använder sig av när det kommer till fältkalibreringar av flödesmätare. Spårämnesmätningen har visat sig vara mycket pålitlig i de flesta situationer, oberoende ifall flödesmediet är vätska, gas eller ånga. Flödesmediet påverkar i princip bara vilken form av spårämne som kan användas. Spårämnesmätning utförs, som namnet säger, genom att injicera ett spårämne i flödet. Det finns två metoder för flödesmätningen med spårämnen, transittid-metoden och utspädningsmetoden, vilka redogörs grundligare i det här kapitlet.

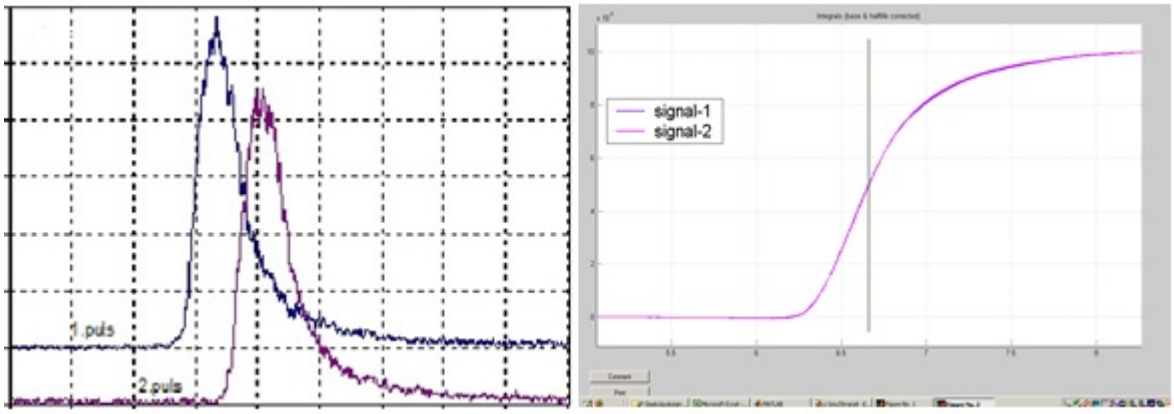
5.1.1 Transit-tidmetod

Transit-tidmetoden (även kallad pulshastighetsmetoden), är baserad på mätning av tiden det tar för en kort puls-injektion av spårämnet att röra sig sträckan mellan två detektorer, vars avstånd från varandra är känt. Flödeshastigheten fås genom att dividera sträckan mellan detektorerna, kallad mätsträckan, med transit-tiden. Volymflödet kan därefter kalkyleras genom att multiplicera den uppmätta hastigheten med rörets tvärsnittsarea på mätsträckan. Transit-tidmetoden är standardiserad i ISO 2975/VII för vätskeflöden och i BS 5857-2.4 för gasflöden. Typiska kalibreringsobjekt för transittid-metoden är fjärrvärme-, pappersmassa-, matarvatten-, kondensat-, ång- och rökgasflöden. Enligt Indmeas ackrediteringsbeslut är lägsta mätosäkerheten 0,5% för vätskeflöden och 1,0% för gasflöden.

Från injektionspunkten till mätsträckan bör spårämnet blandas fullständigt i flödet, vilket ställer krav på blandningssträckan. Ifall blandningssträckan består av endast ett rakt rör bör den anta en längd på över 100 gånger rörets innerdiameter, D, men sträckan kan förkortas avsevärt ifall den innefattar till exempel en pump, krökar, utvidgningar eller andra flödesstörningar som effektiverar omblandningen. (ISO 2975 1977)

Under kalibreringen detekteras först bakgrundsstrålningen varpå spårämnet injiceras och två toppar i aktiviteten kan urskiljas då spårämnet passerar detektorerna, dessa kallas för

pulser. I Figur 5.1 kan till vänster ses pulserna och till höger deras integraler, ifall integralerna sammanfaller, vilket de gör i Figur 5.1, så kan mätresultatet anses pålitligt eftersom det innebär att pulsernas form är likadana. Ifall de skiljer sig från varandra beror det normalt på att turbulensen har spridit ut spårämnet på en längre rörsträcka. Pulserna bör vara lätta att urskilja ur bakgrundsstrålningen och ha en aktivitet på åtminstone 3 gånger högre än bakgrunden.



Figur 5.1 Spårämnespulser samt deras integraler. (Indmeas 2015)

5.1.2 Utspädningsmetod

Den andra spårämnesmetoden, utspädningsmetoden, grundar sig på att man kontinuerligt injicerar en känd mängd spårämne i flödet och mäter spårämnets koncentration efter en förhållandevis lång blandningssträcka nedströms i flödet och därav kan bestämma det totala volym- eller massflödet. Blandningssträckan mellan injicering och provtagning bör vara lång för att man skall försäkra sig om att blandningen mellan flödet och spårämnet utvecklats till homogen vid provtagningen. (Paton 2005)

Använder man sig av ett radioaktivt spårämne kan koncentrationen i flödet följas upp i realtid genom att mäta aktiviteten, men används ett kemiskt spårämne kan det krävas att ta ett prov och skicka det till ett laboratorium för bestämning av spårämnets koncentration. I det senare fallet fås referensmätningens resultat först i efterhand.

5.2 Val av spårämne

Vid val av spårämne finns det flera aspekter som bör beaktas och de beror på såväl typen av flöde som de möjligheter processen erbjuder för val av kalibreringsmetod. För det första bör spårämnet vara termiskt och kemiskt stabilt under de förhållanden det används i, dessutom skall det gärna uppfylla följande kriterier

- Simpel injicering
- Okomplicerad detektering eller provtagning och analys
- Uppfylla säkerhets- och hälsoaspekter
- Enkel tillgång och överkomlig kostnad
- Potentiell minimering av felkällor.

Det har dock visat sig vara utmanande att hitta lämpliga spårämnen som uppfyller dessa kriterier, varvid de flesta är kompromisser mellan dem. (Paton 2005)

5.2.1 Radioaktivt spårämne

Radioaktiva spårämnen har använts redan en längre tid med tanke på att den första patenten inom området registrerades redan 1966 i USA. (Hull 1966) Radioaktiva spårämnen grundar sig på instabila isotoper av något grundämne, som avger någon form av radioaktiv strålning, ofta gammastrålning. En av de stora fördelarna är att även en mycket liten mängd radioaktivt spårämne är enkelt att detektera från rörets utsida eftersom bakgrundsstrålningen normalt är på en väldigt låg nivå. En annan fördel är att eftersom man kan detektera radioaktiviteten direkt vid kalibreringen, så betyder det att resultatet erhålls utan dröjsmål. Vid användning av kemiska spårämnen och utspädningsmetoden är man i många fall tvungen att skicka provtagningen till något laboratorium, för att få veta spårämnets koncentration i provet.

Det finns ett flertal olika varianter av radioaktiva spårämnen, de skiljer sig från varandra på flera punkter, bland annat aggregationstillstånd, halveringstid, tillgång och pris varierar mycket. För gas- och ångflöden används hos Indmeas etylbromid, barium-aerosoler och barium metanol. Etylbromidens kokpunkt är 37°C, så för att injicera spårämnet i gasform värms det upp innan injektionen. Barium har inte naturliga gasformiga föreningar, men det kan injiceras i små partiklar kallat barium-aerosol, vilket är i pulverform. Barium-aerosolen fungerar för flödeskalibreringar av torra gasflöden, men i ånga uppstår problemet att pulvret fastnar vid rörets våta innerväggar och klumpar ihop till större partiklar på grund av vattendroppar. I varma flöden (T >50°C) kan även barium i vätskeform injiceras genom ett spraymunstycke, som gör vätskan till mycket små partiklar. För att förbättra omblandningen sprayas bariumet mot flödets färdriktning. Barium (^{137}Ba) har en halveringstid på 2,5 min, vilket gör att utrustning som används för injiceringen snabbt når en låg strålningsnivå efter användning. Det samma gäller inte för etylbromiden, vilken har en halveringstid på ungefär 35 h och innebär därmed att injiceringsutrustningen avger en kraftig strålning ännu länge efter användning. Det här leder till utmaningar för transporten av utrustningen efter användning. (Indmeas 2015)

5.2.2 Utmaningar och begränsningar med radioaktivitet

Tillgång, transport och användning av radioaktiva spårämnen kräver licens av myndigheterna, vilket gör tillämpandet osmidigt och komplicerat. De spårämnen som inte är i gasform har dessutom visat sig väldigt bristfälliga vid kalibreringar av ångflöden på grund av agglutinering på rörväggarna, det vill säga att till exempel aerosoler bundit sig till vattendroppar och fastnat längs rörväggarna.

Transport av radioaktiva spårämnen styrs av lagen om transport av farliga ämnen. Spårämnena transporteras i en strålningsskyddad atmosfär, men injiceringsutrustningen som använts vid en kalibrering kan avge relativt mycket strålning och får därför eventuellt inte transporteras samma dag som mätningen utförts. (Lag om transport av farliga ämnen 1994)

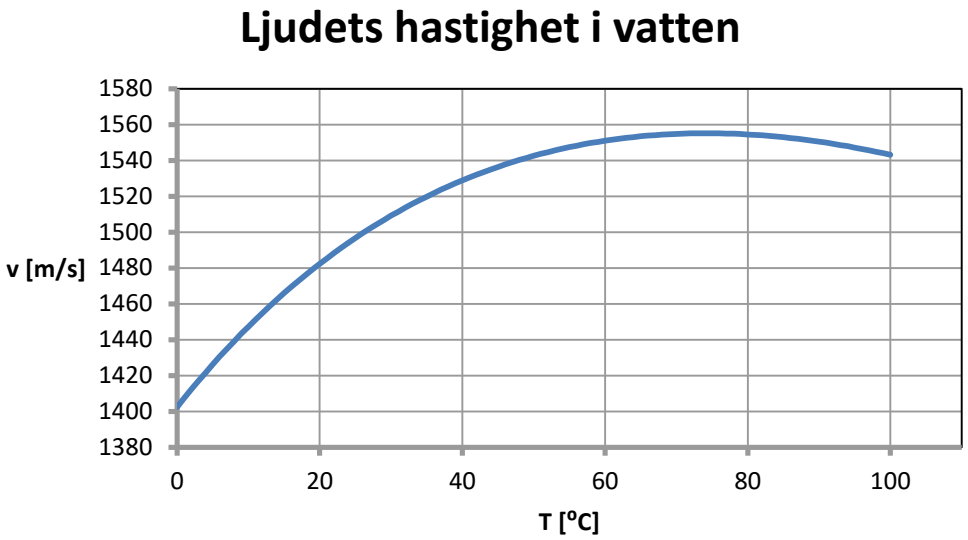
Processer inom livsmedelsindustrin är givetvis starkt begränsade när det gäller användningen av radioaktiva medel, vilket förstås påverkar likaväl användningen av radioaktiva spårämnen för flödeskalibreringar av processer inom hela den industrigrenen. Enligt finsk och svensk lagstiftning är det förbjudet att använda radioaktiva ämnen i tillverkningen av livsmedel eller dess förpackningar. (Strålskyddslag 1991) Det här är även

orsaken varför Tekniska Verken i Linköping fungerar som en testanläggning för alternativa metoder för flödesmätning, då de levererar ånga till en aktör inom livsmedelsindustrin.

Indmeas har redan använt barium-aerosoler som spårämne i gasflöden ett antal år, men för ånga levererar metoden fortsättningsvis inte pålitliga mätresultat, speciellt inte för våt ånga. Problematiken bakom aerosolerna är att trots att de är små partiklar och relativt hydrofoba, så tenderar de ändå att fästa sig vid vattendroppar och vid varandra och bilda större partiklar som inte rör sig med flödet utan fastnar på rörväggarna och motverkar därmed pålitliga mätresultat. Det här problemet uppstår i synnerhet i våt ånga eftersom den inkluderar kondensat.

5.2.3 Temperaturpulser

Fältkalibrering baserad på temperaturpulser är en variant av spårämnesmätning, som baserar sig på temperatur-växlingar istället för de mera använda radioaktiva pulserna. Temperaturpulsmetoden går i praktiken ut på att en liten mängd av flödet avlägsnas och hettas upp (alternativt kyls ner) och sedan skjuts in som en kort puls tillbaka i flödet. Temperaturvariationen kan sedan detekteras antingen med traditionella termometrar eller med ultraljudsmätare nedströms i flödet. Temperaturmätningen görs alltså på två ställen och transittid-metoden tillämpas för att bestämma flödets hastighet. Ultraljudsmätare har en klar fördel i att de kan installeras på utsidan av röret, temperaturmätningen baserar sig då på ljudets hastighet, vilken varierar som funktion av flödets temperatur. Den här metoden har utvecklats för vattenflöden, men har visat sig vara svår att tillämpa i ångflöden på grund av den låga densiteten, vilken motverkar användningen av ultraljudsmätare. I Figur 5.2 presenteras ljudets hastighet i vatten som funktion av vattentemperaturen.



Figur 5.2 Ljudets hastighet i vatten som funktion av vattnets temperatur.

Det framgår i Figur 5.2 hur ljudets hastighet i vatten ökar när vattnets temperatur stiger ända till den maximala hastigheten 1555 m/s som uppnås vid 74,1°C och sedan avtar aningen av fortsatt temperaturhöjning. Brantast lutning har kurvan vid låga temperaturer,

vilken är orsaken att metoden fungerar bäst för vattenflöden under 60°C. (Bilaniuk et al. 1993)

5.2.4 Övriga spårämnen

Det finns flera slags spårämnen som används för flödeskalibreringar för olika situationer. Radioaktiva spårämnen är bara en variant, också kemiska spårämnen och spårämnen med avvikande ledningsförmåga kan tillämpas beroende på flödets karaktär. För vätskeflöden har det visat sig fungera att injicera en temperaturpuls, vilket presenterades i kapitel 5.2.3. Temperaturmätningen baserad på ultraljud har dock varit utmanande att applicera på gasflöden på grund av att ångans låga densitet gör den akustiska impedansen enormt stor vid gränsytan mellan metallröret och vattenångan och därmed reflekteras största delen av vågorna tillbaka och fortskrider inte i det nya mediet.

Spårämnen med avvikande ledningsförmåga har också visat sig fungera för vätskeflöden, men appliceringen av dem begränsas oftast till öppna kanaler, då detektionsinstrumenten är svåra, ibland omöjliga, att installera in i ett slutet rör. Det grundar sig på att man i ett vätskeflöde, oftast vatten, injicerar t.ex. natriumklorid, som höjer på lösningens elledningsförmåga. På samma sätt som med andra spårämnen tillämpade transittid-mätningar, så mäts tiden det tar för spårämnet att röra sig mellan de två detektorerna för att bestämma flödeshastigheten. (Błotnicki et al. 2013)

Kanske den främsta fördelen vid användning av radioaktiva spårämnen är att de inte kräver några röranslutningar vid mätsträckan, utan aktiviteten kan detekteras genom rörets vägg. Det erbjuder många möjligheter för placerandet av mätsträckan och det är även högt uppskattat inom industrin, då överloppsanslutningar inte behöver installeras för flödeskalibreringen. Orsaken till detta är att alla anslutningar innebär en tilläggsrisk för läckage och tryckfall och själva installationen innebär ett avbrott i processen samt efterföljande tryck/läckage test för ånglinjen.

5.3 Laboratoriekalibreringar

Laboratoriekalibreringar innebär alltså som namnet säger att en mätare demonteras från sin process och transporteras till ett kalibreringslaboratorium, som testar mätaren ifråga och kalibrerar den, så den visar korrekt för ett specifikt givet intervall. Det kalibreringslaboratorium, där mätaren kalibreras bör vara ackrediterat av FINAS, precis som de aktörer som utför fältkalibreringar bör ha ackrediterade metoder i användning. Ackreditering erhålls för olika tjänster enligt det kompetensområde, som tjänsteleverantören fungerar inom och garanterar kunderna att den erbjudna servicen är säker och tjänsteleverantören använder sig av pålitliga metoder, som granskats av en utomstående aktör. (FINAS 2016)

I kapitel 4.5 beskrivs de vanligaste orsakerna till mätfel för flödeskalibreringar och hur man försöker motverka dem. De är också starkt kopplade till utmaningarna som påträffas med laboratoriekalibreringar av flödesmätare, det vill säga kalibreringarna utförs inte under samma förhållanden som mätaren fungerar under i den process den normalt tillämpas i. De största skillnaderna mellan laboratorieförhållandena och de verkliga processförhållandena är variationer i flödet och sättet eller platsen mätaren är installerad på. (Paton 2005)

För till exempel temperatur- och tryckmätare fungerar laboratoriekalibreringar bra eftersom skillnader i mätomständigheterna mellan laboratoriet och den verkliga processen inte påverkar dem märkbart, men för flödesmätare blir felen ofta för stora. Dessutom bör processen stannas upp för att avinstallera en flödesmätare, vilket normalt inte är nödvändigt för avinstallation av temperatur- och tryckmätare. I de allra flesta fall är en tillfällig avinstallation av en flödesmätare för kalibrering i ett laboratorium inte möjligt eftersom man skulle bli tvungen att nedmontera en stor del av distributionslinjen, då är fältkalibrering det ända alternativet. (Motiva 2012)

I varken Finland eller Sverige finns för tillfället något tillgängligt kalibreringslaboratorium som använder ånga som kalibreringsmedium, utan ångflöden bör alltså kalibreras på fältet för att uppnå tillförlitliga resultat. I Glasgow (Storbritannien) finns ett laboratorium för två-fasflöden som kan användas för ångkalibrering och i universitet i Liverpool (Storbritannien) och Texas (USA) har det presenterats ångkalibrerings-anläggningar, men dessa finns ännu inte tillgängliga för kommersiellt bruk. (TUV NEL 2004)

6 Alternativa kalibreringsmetoder

Den stora frågan är slutligen vilka metoder som kunde ersätta de nuvarande utan att negativt påverka mätnoggrannheten och ändå kunna kringgå användningen av radioaktiva spårämnen, vilket är en stor utmaning i dagens kalibreringssituationer.

6.1 Inaktivt spårämne

Spårämnesmätningar har visat sig vara mycket effektiva och mycket hög noggrannhet har kunnat uppnås, men användningen av inaktiva spårämnen har ännu inte gett resultat i gas- eller ångkalibreringar. Frågan är hurudant spårämne och med vilka egenskaper som skulle möjliggöra samma mätnoggrannhet och anlag för praktiska tillämpningar som de radioaktiva gör.

6.1.1 Kemiskt spårämne

Kemiska spårämnen av olika slag har använts, främst med utspädningsmetoden i andra gasflöden, men det finns för tillfället inget som allmänt skulle användas för ångflöden. En tanke är dock att ett enkelt tillgängligt spårämne som syre eller koldioxid kunde användas, eventuellt med transittid-metoden, men detekteringen av spårämnet är det som är utmanande. Ångflöden är ofta väldigt stora, från 150 till 20 000 l/s, så för att spårämnets volymkoncentration skall nå en detekterbar nivå, så bör även tillräckligt stor mängd av spårämnet injiceras med tillräckligt stor hastighet för att kunna mätas. Det beror förstås långt på detektionsutrustningen, kanske kunde en optisk spektrometer användas för att detektera väldigt små koncentrationer av till exempel koldioxid, men testning av det här kommer på grund av svår tillgång till utrustning inte att inkluderas i det här arbetet.

Svavelhexafluorid, SF_6, har använts för ångflödesmätningar i flera situationer, det uppfyller samtliga krav för ett bra spårämne: det har väldigt låg upplösning i vatten (ungefär samma som kväve), det är inte reaktivt och det är termiskt stabilt upp till 300°C. Svavelhexafluoridflödet bör givetvis mätas väldigt noggrant för att känna till den inducerade spårämnesmängden. Svavelhexafluorid-mätningar störs inte heller av någon bakgrundsstrålning eftersom det inte förekommer naturligt i atmosfären. (Hirtz et al. 2001)

Helium har tidigare använts som spårämne i naturgas, med de fördelarna att det är lätt att spåra även i små koncentrationer, säkert att handskas med, relativt billigt och det påverkar inte naturgasens förbränning märkbart. För spårämnesmätningar i naturgas bör dock beaktas att gasens kvalitet inte får påverkas, vilket innebär att koncentrationen av spårämnet bör hållas på en väldigt låg nivå samtidigt som den måste vara hög nog för detektorn att ge utslag. Det visade sig under samma undersökning också att en lång mätsträcka minskar på mätfelet tack vare att små tidsförskjutningar orsakar ett försumbart fel på långa sträckor, varför mätsträckorna som testades var 240m till 7,53km. (Takeuchi et al. 2009)

6.1.2 Ljudhastighet baserat spårämne

I kapitel 5.2.3 förklaras det hur en temperaturpuls kan användas som spårämne, det vill säga att genom en kort temperaturvariation bestämma flödets hastighet med hjälp av två detektionspunkter. Sättet som denna temperaturvariation mäts är med hjälp av en ultraljudsmätare, som alltså mäter temperaturen i flödet genom att mäta ljudets hastighet i

det. En annan variant av spårämne kunde då vara att istället för en variation i temperaturen, injicera ett spårämne med, från flödet, avvikande ljudhastighet. Ljudhastigheten i gaser beror av temperaturen, trycket och molekylmassan, med betoning på den sistnämnda. Ju mindre molekylmassa, desto högre ljudhastighet. I Tabell 6.1 presenteras ljudhastigheten hos några vanliga gaser i temperaturen, T = 0^0C och trycket, p = 101,325 kPa.

Tabell 6.1 Ljudets hastighet i några vanliga gaser (T = 0°C, p = 101,325 kPa). (Kurtus 2016)

Gas	Molekylmassa(g/mol)	Densitet(kg/m3)	Ljudets hastighet(m/s)
Koldioxid (CO2)	44.01	1.977	259
Syre(O2)	32	1.429	316
Luft	29	1.293	331
Helium(He2)	4.02	0.1785	965
Väte(H2)	2.016	0.0899	1290

Vätgas har den högsta ljudhastigheten, men på grund av dess reaktivitet med syre är det inte lämpligt som spårämne, nästa alternativ är då helium, vilket beskrevs redan tidigare som ett mycket bra spårämne tack vare dess stabila kemiska egenskaper. Ljudhastigheten i lågtrycksånga är aningen högre än i luft, vid temperaturen 400K är ljudhastigheten i mättad ånga ungefär 450 m/s (Šafarík et al. 2015) och ungefär 1170 m/s i helium (Nave 2016), den differensen i hastigheten hos ljudet torde vara tillräckligt stor för att kunna detekteras i flödet.

Det problem som nämndes i kapitel 5.2.4 var att den akustiska impedansen blir enormt hög vid gränsytan mellan ett metallrör och vattenångan och därmed reflekteras ultraljudsvågorna tillbaka. Den höga impedansen beror alltså av en stor skillnad hos ljudets hastighet i de olika medium, som i sin tur beror till stor del på densiteten hos materialen eller ämnena. I nuläget finns det ultraljudsmätare av General Electrics som fungerar för vattenånga ner till 8 bar, sjunker trycket under det blir densiteten för låg och impedansen oöverkomlig. Det här leder till att för lågtrycksånga, så kan transmittern inte installeras på rörets utsida, utan bör installeras så att den är i direkt kontakt med ångan. Det kunde eventuellt lösas genom att installera transmittern vid en röranslutning på sidan eller ovanpå röret, dessa röranslutningar är dock inte populära inom industrin och finns därav inte naturligt tillgängliga utan skulle kräva ett processavbrott för installation. En annan utmaning med ultraljudstransmittern är att de sällan tål så höga temperaturer, den av General Electrics utvecklade transmittern tål högst 230°C, vilket begränsar tillämpandet av den ytterligare. (General Electric 2014)

6.1.3 Laserinducerad fluorescens

Eftersom det i praktiken verkar för gaser, och vattenånga, vara endast ett radioaktivt eller eventuellt temperaturbaserat spårämne som går att detektera från rörets utsida, betyder det att tilläggsanslutningar bör installeras vid detektionspunkterna i röret. Det ger betydligt mera spelrum vid val av spårämne, i kapitel 6.1.2 introducerades en metod baserad på ljudets hastighet, vilken även kräver en röranslutning på grund av den tidigare nämnda

impedansen. Istället för ljudvågor så kunde det även vara möjligt, att med hjälp av ljusvågor detektera spårämnet i flödet.

Idén bygger på att man med hjälp av en ljuskälla, till exempel en laser, belyser flödet med fotoner(ljuskvanta) med en våglängd som den atomen, eller molekylen, man letar efter absorberar. När atomen eller molekylen absorberar en foton, så exciteras den, det vill säga förs upp på en högre energinivå. Kort därefter (några nanosekunder) återgår den till en lägre energinivå och emitterar då en foton med längre våglängd än den tidigare absorberat. Den emitterade fotonen kan då detekteras med en fluorometer. För att spårämnet skall gå att detektera bör det absorbera och emittera fotoner av andra våglängder än vad flödet självt gör, på så sätt kan eventuellt en puls i flödet observeras och transittid-metoden tillämpas för att bestämma flödeshastigheten.

I spektroskopiresultatet hos en lösning finns alltid en så kallad Ramanspridning, som är en oelastisk spridning av aktiveringsljuset och syns som en topp i spektrumet på ett visst avstånd från aktiveringsljusets våglängd. Ramanspridningen är ett resultat av lösningsmedlet i flödet eller provet som analyseras, vilket är viktigt att urskilja från det verkliga resultatet som eftersträvas med laserinducerad fluorescens av det spårämne som söks. Ramanspridningen kan bestämmas genom att använda ljus med olika våglängder och söka efter ”Raman-toppen” på ungefär samma avstånd från aktiveringsljusets våglängd i de olika situationerna. I Tabell 6.2 kan ses ”Raman-toppen” för några givna aktiveringsvåglängder i vatten, där aktiveringsvåglängden ses till vänster och Ramanspridningens medelvåglängd till höger. Ifall spårämnets fluorescens råkar bli på samma våglängd som Ramanspridningen, så kan aktiveringsvåglängden förkortas, så flyttas även Ramanspridningen till en kortare våglängd och stör inte avläsningen av resultatet då det inte påverkas av aktiveringsvåglängden. (PerkinElmer 2000)

Tabell 6.2 Ramanspridningen för några givna aktiveringsenergier i vatten. (PerkinElmer 2000)

Excitation (nm)	Raman emission (nm)
200	212
250	272
300	337
350	397
400	463
450	530
500	602

Utmaningarna med laserinducerad fluorescens är många, då det inte applicerats för det här ändamålet tidigare, men de första som kommer upp är utrustningen som skall anpassas för krävande processmiljöer, tillgången till tre röranslutningar i ånglinjen och eventuella utmaningar med installationer och riktning av aktiveringslaser. Det lär dock hittas ännu fler ifall metoden granskades närmare än så här.

6.2 Energi- och massbalansberäkningar

Ång-kondensatsystem består av många olika delprocesser och ingen anläggning ser precis ut som en annan, dock innehåller de flesta ungefär samma utrustning och användningsändamålen skiljer sig heller inte från varandra i vanliga fall. Matarvatten går oftast genom någon förvärmare och sedan in i ångpannan var det förångas, trycket och temperaturen höjs. Den överhettade ångan exploateras sedan i en ångturbin eller process som behöver högtrycksånga. Den resterande lågtrycksångan används sedan för uppvärmning eller dylikt i någon annan process där den kondenseras och ångbildningsvärmen utvinns, varefter kondensatet oftast returneras i någon grad till matarvattnet. Under den här funktionscirkeln, som ångan genomgår, finns det mätinstrument som ger information om tryck, temperatur och flöde vid olika skeden av processen. Genom att granska en eller flera av dessa skeden, så kan ibland även andra skeden, med bristande möjligheter till mätningar, estimeras och beräknas matematiskt för att ta reda på hur ångan beter sig där. Dessutom kan ångprocessen erbjuda möjligheter att göra något avvikande från den vanliga processen för att analysera processens funktion. I det här kapitlet behandlas det på en spekuleringsnivå olika metoder för att förverkliga energi- och massbalansräkningar för ång-kondensatsystem. Senare under granskningen av ång-kondensatsystemen kommer eventuellt någon av dessa metoder visa sig vara obrukbara eller värda att testas.

6.2.1 Massflödesberäkning

Det är viktigt för att kunna bestämma energimängden som levererats i form av ånga att även kvarvarande värme-energin i kondensatet, som returneras, beaktas i beräkningarna. Massflödet för ett vattenflöde är betydligt enklare att mäta i jämförelse med massflödet för ett ångflöde. Många konsumenter av lågtrycksånga använder inte ångan direkt i sin process, utan använder sig av en värmeväxlare, där till och med 100% av ångans massflöde återfinns i kondensatet. Det gör det enkelt att genom kondensatet bestämma ångans massflöde. Ifall kondensatetreturen inte uppnår 100%, så kan tilläggsvattnets flöde mätas och summeras med kondensatet från processen och från eventuella ångfällor eller -avskiljare, ifall sådana installerats, för att bestämma matarvattnets totala massflöde, vilken i en idealsituation ju är den samma som ångans massflöde. (TUV NEL 2004)

Problematiken vid användningen av den här metoden är dock att den producerade ångan i vanliga fall fördelas till många olika processer, vilket gör det svårt eller omöjligt att mäta massflödets alla delflöden. Ifall anläggningen så tillåter, kan övriga ångflöden tillfälligt stängas av och med hjälp av massbalansberäkning kan en enskild ångflödesmätare kalibreras utgående ifrån matarvattnets flöde. Det är i allmänhet möjligt dock endast för små anläggningar med ett snävt användningsområde för ångan.

6.2.2 Sekundäreffektberäkning

Sekundäreffekten avser den energin som ångkonsumenten tar emot från ånglinjen, är ändamålet uppvärmning, så avses den värme-effekten som kunden erhåller. Eventuellt kunde sekundäreffekten beräknas lättare och noggrannare än vad energiflödet i ångan kan beräknas, på så sätt kunde effekten som ångan levererar mätas, vilken skulle fungera som grund för ångans massflöde. I fjärrvärme-nätet används den här metoden, var vatten värms upp med hjälp av ångan. Vattnets massflöde är enkelt att bestämma med hög noggrannhet, likaså dess start- och sluttemperatur, varifrån sekundäreffekten beräknas som den erhållna

entalpidifferensen eller -ökningen. Det ger då ett referensvärde för ångans energi- och massflöde. Sekundäreffektberäkning blir dock svårt att tillämpa i processer där en del av ångan konsumeras, det vill säga all ånga returneras inte till ångprocessen. Den här typen av processer förekommer allmänt på bland annat pappersfabriker och andra industrier.

6.2.3 Injektionsmassberäkning

Ett intressant alternativ ur ett energitekniskt perspektiv är att injicera ett ämne i ånglinjen och göra en termodynamisk granskning av dess inverkan på flödets parametrar och utgående från resultatet kunna dra slutsatser om energiflödet och massflödet i ånglinjen. En idé för förverkligandet av den här metoden är att injicera ett känt massflöde av vatten i en aningen överhettad ånglinje. Det injicerade vattnet förångas i linjen, vilket konsumerar en del av ångans energi. Den konsumerade energin skulle mätas med hjälp av eventuellt redan installerade temperatur- och tryckgivare en längre sträcka nedströms i ånglinjen och förändringens storlek skulle ge en indikation av hur stort energiflödet i ånglinjen är. Vatten lämpar sig för injiceringen eftersom dess ångbildningsvärme är väldigt högt, vilket innebär att bara ett litet injicerat massflöde kräver en såpass stor energimängd för att förångas att det med högsta sannolikhet är möjligt att detektera temperatur- och/eller tryckskillnaden.

Den här metoden ställer förstås vissa krav på ångan som skall mätas, den bör vara överhettad, för ifall den är våt eller mättad så kommer inte det injicerade vattnet att förångas och det resulterar i att ingen termodynamisk granskning går att genomföra. Man måste alltså försäkra sig om att det inte finns vatten i vätskefas i ånglinjen varken före eller efter vatteninjektionen.

För att estimera noggrannheten för den här metoden att beräkna ångflödet har den testats, på en rent teoretisk nivå, för olika scenarier för ångflödets parametrar och resultaten begrundar sig i ångtabeller och smärre approximationer. Det visar sig att ju större massflöde av vatten som injiceras i förhållande till ångflödet, desto större noggrannhet uppnås med temperaturmätningen. Den gräns som kommer emot är dock att när för mycket vatten injiceras, så sjunker ångans kvalitet från överhettat till mättat. När mättnadstemperaturen nås, förångas inte vattnet längre och temperaturmätningen blir värdelös, alltså måste ångan kompromisslöst hållas på den överhettade sidan under mätningen. Det ställer i sin tur krav på ångans starttemperatur som därmed måste vara på en förhållandevis hög nivå, minst omkring 10 – 15 °C överhettad, men helst över 30 °C så att vatteninjektionen kan sänka temperaturen, alltså ångflödets entalpi, med en märkbar förändring, minst ungefär 5 °C, men gärna närmare 20 °C utan att ångan blir mättad.

Tabell 6.3 Utdrag ur kalkyleringar av injektionsmassberäkningen.

Ångans parametrar				
Massflöde	30	kg/s		
Temperatur	180	°C		
Tryck	4	bar		
	TEST 1		**TEST 2**	
Injicerat vattenflöde	0.3	kg/s	0.4	kg/s
Vattnets temperatur	15	°C	15	°C
Slutliga temperaturen för ångan	156.15	°C	148.67	°C
± 1°C temperatur felläsning orsakat fel i massflödeskalkyleringen	**± 4.3%**		**± 3.4%**	

Det största hindret för metoden är alltså att ångans temperatur bör vara betydligt högre än mättnadstemperaturen för att en skälig noggrannhet skall uppnås, så att ett injektionsmassflöde på över 1% av ångflödet skall kunna injiceras utan att ångan når mättnadstemperaturen. Det är ovanligt inom industrin att en ånglinje på lågtryckssidan skulle vara såpass mycket överhettad eftersom de flesta processer där bygger på att utvinna latent värme från ångan. Även om dessa faktorer beaktas, så nås ändå inte någon väldigt hög noggrannhet för mätningen av massflödet. I bästa fall kan en felmarginal på ±5% nås, då temperaturmätningens noggrannhet är inom området av ±1°C. Det gör att en riktgivande mätning av ångans massflöde kan genomföras, men som huvudsaklig kalibreringsmetod fungerar den ändå inte, såvida inte temperaturmätningen kan garanteras till en betydligt högre noggrannhet. Den största utmaningen för den här mättekniken är säkerligen ändå ångans tillstånd, eftersom ångan i de flesta fall är väldigt nära mättnadstemperaturen eller till och med aningen våt.

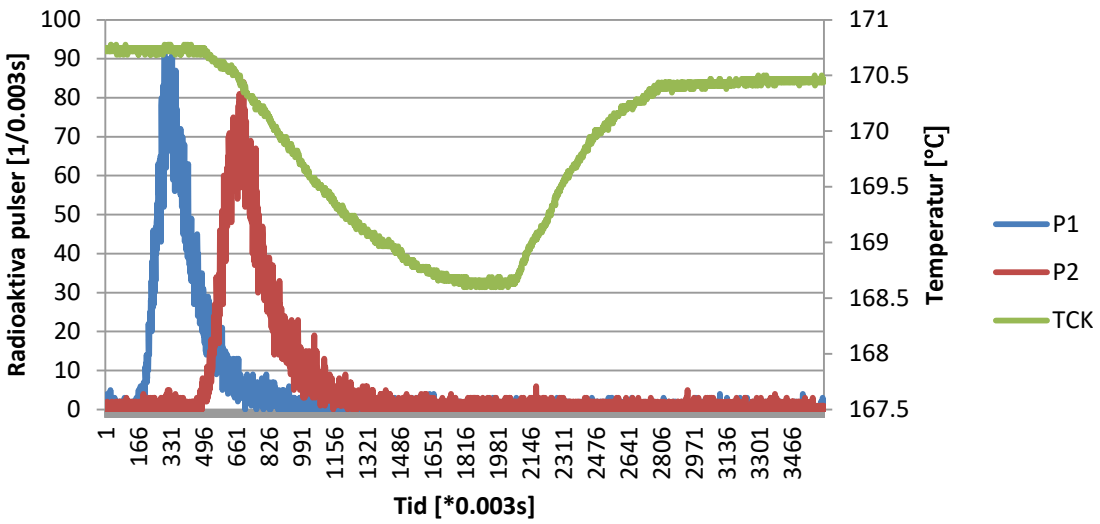
7 Mätningar

För att begränsa det här diplomarbetet från att bli för storskaligt, så kommer analysen av ång-kondensatsystemets funktionalitet och felkällor för mätningar vara i aningen mindre fokus och därmed aningen större vikt på de alternativa kalibreringsmetoderna. Mätningarna kommer alltså till en viss del at gå ut på granskning av olika ång-kondensatsystem samt deras mätapparatur och på dem baserade slutsatser om systemens funktionalitet och som mätningsmetod kommer en modifierad temperaturpulsmetod att testas och evalueras samt ett inaktivt spårämne granskas till sin funktionsduglighet. Testerna görs i industriomgivningar med en nära anknytning till de individuella processerna och aktivt involverande av anläggningspersonalen för att gemensamt utveckla och möjliggöra en fungerande metod eller åtminstone reda ut ifall de föreslagna metoderna lämpar sig för ändamålet.

7.1 Temperaturpulsbaserad transittid-metod

Det diskuterades tidigare om en värmepulsmetod för vattenflöden, som förverkligats med ultraljudsdetektorer, men att dessa inte lämpar sig för ångflöden eftersom densiteten i flödet är för låg. Då uppstod dock tanken att man inte använder ultraljudsdetektorer, utan någon form av traditionell temperaturbestämningsutrustning, till exempel en TcK (K-type Thermocouple) termometer som helt enkelt kan fästas på utsidan av röret. För att uppnå en högre noggrannhetsnivå kunde man tänka sig använda av en betydligt längre mätsträcka än vid kalibrering med radioaktivt spårämne. Idén är alltså att med hjälp av en förhållandevis lång mätsträcka mellan detektionerna kompensera för den negativa inverkan på noggrannheten, som temperaturgivarna ger upphov till. Till exempel ett ångflöde med flödeshastigheten 15 m/s och en mätsträcka på 60 m resulterar i en transittid på 4 sekunder. En svarstid på till exempel 0.1 sekunder i termometrarna orsakar i så fall bara ett totalt fel på ungefär 2.5%. En traditionell mätsträcka på ca 10 m däremot, skulle ge upphov till en transittid på 0.67 sekunder, det betyder att en temperaturmätning med 0.1 sekunders svarstid är helt oanvändbar. Det som är osäkert är dock hur lång sträcka som kan tillåtas mellan injektionspunkten och mätningen för att temperaturen inte skall hinna jämna ut sig och bli odetekterbar.

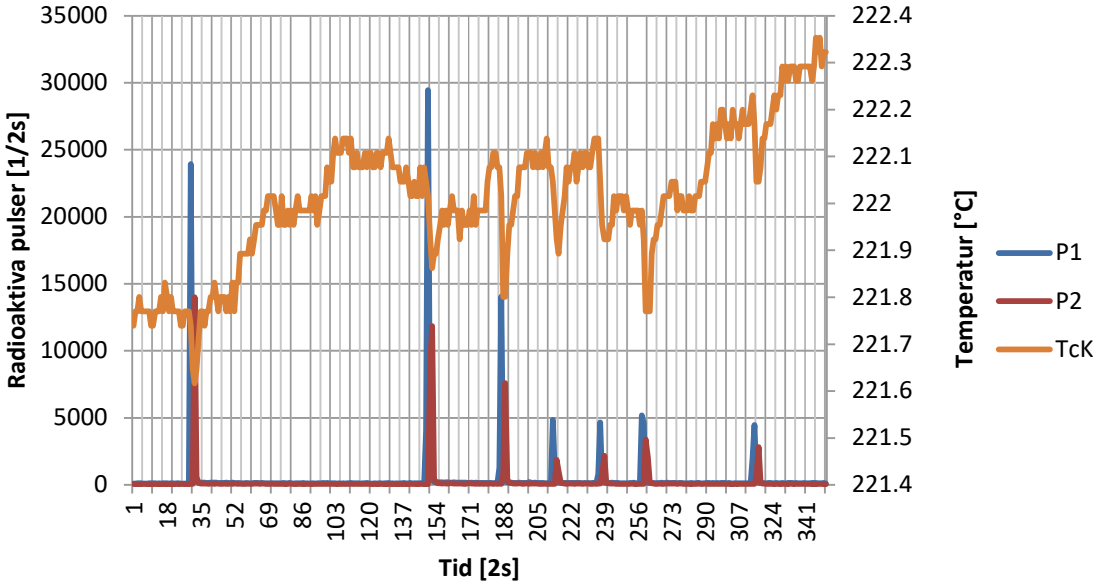
Vid några tillfällen under IndMeas tidigare ångkalibreringar, utförda med radioaktiva spårämnen, har det för små ångflöden varit möjligt att se temperatursänkningen som orsakats av kvävgasen, vilken används för att injicera spårämnet i ångflödet. I Figur 7.1 är aktiviteten (vänstra Y-axeln) presenterad vid första (P1) och andra (P2) detektionspunkten och på den högra Y-axeln är temperaturen, som mätts med en ytinstallerad TcK-givare. Temperaturmätningen ägde rum mellan aktivitetsdetektorerna.



Figur 7.1 Grafisk presentation av en ångkalibrering med radioaktivt spårämne. (Indmeas 2016)

Det syns tydligt att temperaturen börjar sjunka så fort kvävgasen når temperaturmätningen och den sjunker stadigt tills den får ett abrupt slut. I den grafiska figuren är loggnings-intervallet 3 millisekunder, det vill säga det presenterade intervallet motsvarar ca 10 sekunder.

I Figur 7.2 syns loggningen från hela den ovan nämnda ångkalibreringen, där det tydligt syns hur varje puls av radioaktivt spårämne ger upphov till en liten temperatursänkning.



Figur 7.2 Grafisk presentation av hela ångkalibreringen. (Indmeas 2016)

Ifall två eller flera TCK-mätare installerades i följd kunde den här metoden användas som referensmätning, men det finns en risk för att vara en snäv grupp av ångflöden som den här

metoden lämpar sig för. Ångan bör vara aningen överhettad så att kallpulsen orsakar en temperatursänkning och inte kondensering av ångan, vilket den skulle orsaka i mättad ånga, och ingen temperaturförändring skulle uppstå. Ångflödet bör dessutom vara tillräckligt litet, så att en liten mängd kvävgas eller luft räcker för att kyla ner röret aningen.

Ifall den självinducerade kallpulsen visar sig vara utom ramen för vad som går att förverkliga, så finns även möjligheten att inducera en temperaturväxling med hjälp av en liten, momentan ändring i processen. Till exempel kan eventuellt trycket justeras aningen med hjälp av reduktionsventilen, vilket leder till en liten temperaturväxling eller ifall de naturliga temperaturväxlingarna är tillräckligt snabba så kan dessa detekteras på två eller flera punkter i ånglinjen och flödeshastigheten bestämmas med hjälp av en korrelationsmetod.

7.1.1 Utrustning

De temperaturgivarna som används i testerna utförda inom ramen av det här diplomarbetet är 0.5 mm tjocka termoelement med en responstid på ungefär 100ms. Termoelementen är av K-typ och tillverkade av SKS Sensors. I ett termoelement av K-typ är den ena metalltråden tillverkad av chromel, som är en krom-nickel legering, och den andra metalltråden består av alumel, som är en aluminium-nickel legering. De här metalltrådarna är för övrigt isolerade från varandra, förutom i ena ändan, mätpunkten, där de är sammanfogade, så att det bildas elektrisk kontakt mellan trådarna. När mätpunkten utsätts för temperaturskillnader, uppstår en termoelektrisk spänning, som varierar med temperaturvariationen, men även beror av den absoluta temperaturen i metalltrådarna. Den termoelektriska spänningen för chromel/alumel-termoelementet är vid rumstemperatur ungefär 41µV/ºC. (Thermocoupleinfo 2011)

7.1.2 Temperaturpuls framställning

En avgörande del av den här metoden är då alltså att åstadkomma en puls i ångflödet, som går att detektera med hjälp av temperaturgivare. De tekniker som testas är alltså

1. Kvävgaspuls
2. Temperaturväxling till följd av processjustering
3. Naturliga temperaturfluktuationer

Dessa tekniker kommer att testas på åtminstone två olika anläggningar med låg- och mellantrycksångflöden av olika karaktärer beroende på de möjligheter som ångflödena erbjuder. Den första tekniken, kvävgaspulsen, förutsätter att det finns en röranslutning för injiceringen av kvävgasen. Den andra tekniken igen förutsätter att det finns en möjlighet i processen att göra någon liten justering som orsakar temperaturvariationen, medan den tredje tekniken förutsätter helt enkelt att det finns en naturlig fluktuation i ångflödet temperatur. Kvävgaspulsens funktionsduglighet är troligtvis mycket beroende av ångflödets storlek och egenskaper som till exempel tryck och temperatur samt rörets dimension. De två övriga teknikerna torde ha nära på samma förutsättningar oberoende av flödets storlek och rörets dimension, men ångans egenskaper har troligtvis även då en inverkan på hur framställnigen av en temperaturpuls går att förverkliga.

7.1.3 Temperaturpuls detektering

Då någon form av temperaturpuls har framställts i ånglinjen är nästa steg att detektera dess hastighet i ånglinjen, det vill säga ångans flödeshastighet. Det kommer göras med hjälp av termoelementbaserade temperaturgivare, som skildrades i kapitel 7.1.1. Installationen av termoelementen bör dock vara genomtänkt och väl genomförd för att minimera störningar på resultatet från omgivningen. För att uppnå bästa möjliga temperaturmätning, installeras termoelementen med en aluminiumtejp direkt på rörets yta och isoleras utifrån med ett isoleringsskikt för att minimera värmeutbytet med omgivningen.

För att kartlägga temperaturgivarnas funktion och pulsens spridning kommer givarna att testas genom att installera flera stycken på olika sidor av röret och jämföra hur temperaturvariationen ser ut från de olika givarna. Vid hög flödeshastighet kommer temperaturgivarnas responstid att bli avgörande och dess inverkan kan även analyseras med tester där flera givare är installerade parallellt.

Temperaturgivarna kommer sedan placeras på olika ställen på ånglinjen, dels på ett rakt rörparti på ca 100D (100 gånger rörets innerdiameter) avstånd från varandra och dels på ett mycket långt avstånd från varandra innehållande flödeshinder som till exempel krökar. På så vis är tanken att en bättre bild av pulsens förändring som funktion av flödessträckan skulle erhållas.

7.2 Inaktivt spårämne

Det inaktiva spårämnet som testas är något så enkelt som luft. Luft lämpar sig för ändamålet eftersom det är ogiftigt, billigt och inreaktivt, det ända problemet med injicering av luft i en ånglinje är att syret i luften gör kondensatet korrosivt. Det är också orsaken till att luftventiler finns i ångnätet, men luft som spårämne handlar ändå om mycket små mängder och ställer därmed inte till med märkbara korrosiva effekter på ånglinjen. Luftpulsen kan dock inte detekteras från utsidan av röret, utan en röranslutning krävs för detektionen och en del av flödet måste då avlägsnas från ånglinjen för provtagningen, men det gäller förstås bara för själva kalibreringstidpunkten. Luften detekteras med hjälp av en lambda-mätare som är bekant från förbränningsmotorer där de används för att optimera bränsle/luft förhållandet i förbränningsprocessen på basis av syre innehållet i avgasröken. Tillgången till röranslutningar är det största hindret för användningen av luft som spårämne i ångprocesser, men det faktum att spårämnet är gratis, så kan det vara ekonomiskt lönsamt att stänga av processen för att installera röranslutningar och möjligöra en billigare kalibrering. Speciellt i sådana situationer där ångproduktionen är ämnad för en aktör inom livsmedelsindustrin och ångmätningen kanske aldrig verifierats tidigare kan det vara värt besväret med extra rörinstallationer.

En rent praktisk aspekt gällande användningen av luft som spårämne och detekteringen av det är att då man gör en provtagning på två ställen i ånglinjen, så bör provtagningsutrustningen vara helt identisk på båda provtagningarna för att transittiden skall stämma. Det gäller allting från röranslutningens längd och ångans tryck till flödeshastigheten i provtagningarna.

7.2.1 Utrustning

För att detektera luften används en Bosch LSU 4.9 lambdagivare, som är bekant från till exempel billindustrin, där den används för att analysera luft/bränsle förhållandet på basis av syrekoncentrationen i avgasröken. Syregivaren från Bosch tål höga temperaturer som ångprocessen förutsätter och kombinerat med en ETAS 105 bredbandskabel, så erhålls en 4-20mA signal, som lämpar sig utmärkt för den loggningsutrustning som används för testerna. Provtagningsutrustningen består alltså av en röranslutning, som fästs i ångröret och genom den leds en liten del av ångflödet, för att kunna detektera syrekoncentrationens nivå i flödet. Bosch-givaren fungerar inom mätintervallet 0 – 25 % syre. I jordens atmosfär innehåller luften ungefär 21 % syre, så i ångan kommer koncentrationen vara betydligt lägre än det eftersom luften blandas med ångan, därmed räcker givarens mätområde till utan problem. Ifall ren syrgas injiceras som spårämne är det möjligt att syrehalten skulle överstiga maximigränsen för syregivaren, men det är inte aktuellt eftersom det finns större risk för korrosion i ånglinjen vid användning av rent syre.

För att bestämma luftpulsens transit-tiden, så bör injektionstidpunkten bestämmas för att kunna jämföras med detektionstidpunkten på tidsaxeln. För att injicera luftpulsen i ånglinjen behövs ett högre tryck än det i ånglinjen, så vid injektionen stiger trycket tillfälligt i injektionsslangen. Därmed kan injektionstidpunkten bestämmas med hjälp av en tryckmätning i injektionsslangen, som kopplas till samma mätdator som luftpulsdetektionsutrustningen. På så sätt kan transit-tiden från injektionspunkten till detektionspunkten bestämmas, vilken behövs för bestämmandet av volymflödets värde.

7.2.2 Luftpulsframställning

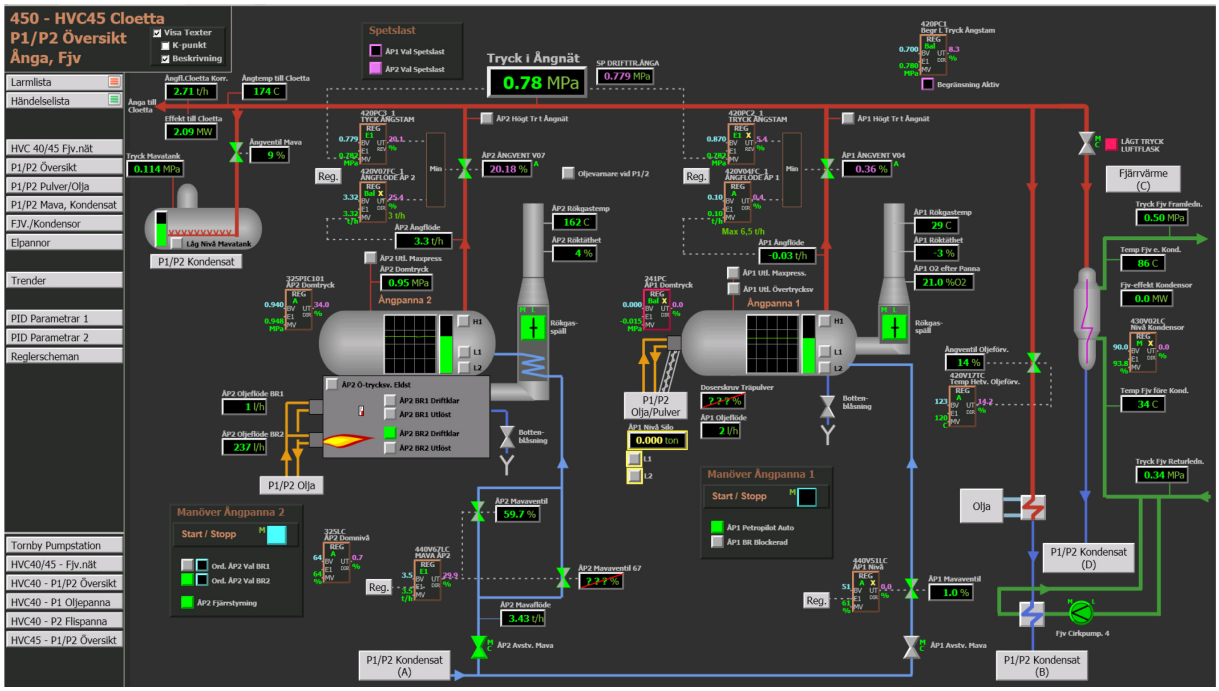
Rent tekniskt sett är luftpulsen betydligt enklare att förorsaka än vad temperaturpulsen är, luftpulsen förutsätter dock en röranslutning, var luften kan injiceras med hjälp av en kompressor eller tryckflaska. Beroende på det rådande trycket i ånglinjen bör givetvis injiceringstrycket anpassas, så det är högre än i ånglinjen. För lågtrycksånga är det dock inget problem, då de flesta kompressorer har ett maximalt arbetstryck på 6 - 10 bar, men för mellantryckånga krävs högre injiceringstryck än så och det kan uppnås med en tryckflaska eller en högtryckskompressor. I testerna som utförs i det här diplomarbetet används en högtryckskompressor med det maximala arbetstrycket 34 bar. Luftmängden som kan injiceras är dock begränsad av kompressorns tank, som är 9.7 liter. Injektionshastigheten är störst i början av injektionen, men i takt med att tankens tryck och så även tryckskillnaden sjunker, så sjunker även injektionshastigheten. Det betyder att luftpulsen får en lång svans, det vill säga syrekoncentrationen vid detekteringspunkten stiger först snabbt, men sjunker långsamt tillbaka mot noll. En sådan situation sänker förutsättningarna för en noggrann mätning av transit-tiden, eftersom tidpunkten för syrekoncentrationens högsta värde blir svårdefinierbar.

8 Case Tekniska Verken i Linköping

I kapitel 3.2 presenterades Tekniska Verken i Linköping (TV) och deras affärsverksamhet samt motivering varför de inkluderades i det här diplomarbetet. I det här kapitelet kommer deras ångproduktionsanläggning att presenteras och analyseras med betoning på mätinstrument och deras funktionsförutsättningar. Senare beskrivs och testas också eventuella kalibreringsmetoder, som kunde användas i TV:s process.

8.1 Presentation av anläggningen

I Ljungsbro vid livsmedelsproducenten Cloetta Ab:s fabrik har TV en ångproduktionsanläggning som producerar lågtrycksånga för Cloettas processer. Anläggningen består för tillfället av två stycken oljepannor, men skall utvidgas med en elångpanna, som färdigställs under hösten 2016. Ångpannorna producerar mättad ånga vid ca 9.5 bar tryck, som går genom en reduceringsventil där trycket sänks till ca 7.5 bar och ångan blir därmed aningen överhettad, ungefär 5°C över mättnadstemperaturen. Ångan distribueras sedan till Cloettas ånglinje, matarvattentanken, oljeförvärmaren och beroende på uppvärmningsbehovet även till en kondensor som producerar fjärrvärme. I Figur 8.1 är en översiktsbild av ånganläggningen i Ljungsbro.



Figur 8.1 Översikt av TV:s ånganläggning. Från vänster: Matarvattentank, Ångpanna 2, Ångpanna 1, Oljevärmare, Fjärrvärmekondensor

Ångefterfrågan hos Cloetta varierar mycket beroende på deras produktion, men ångleveransen ligger i snitt på ca 2 ton/h, vilket vid normal drift motsvarar en effekt på ca 1.6 MW. Processångan till Cloetta distribueras i ett DN 125 rör till fabriken nedsatt i en kulvert, varifrån det förgrenar sig till olika användningspositioner. Fjärrvärmekondensorn används inte sommartid, men då utetemperaturen sjunker ökar givetvis även behovet av värme och kondensorn körs vid stort behov igång för att leverera fjärrvärme till de närbelägna byggnaderna, i normala fall används dock det lokala fjärrvärmenätet så långt

som möjligt eftersom det i nuläget är oekonomiskt att producera fjärrvärme med oljebränning.

8.2 Mätapparatur

Ångflödet till Cloetta är den mest väsentliga mätningen som görs eftersom faktureringen mellan företagen sker på basis av den. Mätaren är en strypfläns differentialtryckmätare (nr 450.420K303), som installerats 2013, då mätområdet utökades från 0 - 2.5 t/h till 0 - 4.0 t/h. Flödesmätaren har därefter aldrig kalibrerats med den följden att det råder en ovisshet kring mätarens pålitlighet. Strypflänsens strypförhållande är $\beta = 0.5183$. Det finns risk för att korrigeringsfaktorn DP-faktor i mätarens flödesekvation är uppskattad och inte motsvarar det verkliga värdet som gäller för processen ifråga. Direkt intill flödesmätaren finns tryck- och temperaturgivare, med vars information densitetkorrigeringen görs för ångflödet. Tryck- och temperaturgivarna har kalibrerats årligen och kan därmed anses pålitliga. Ångpannorna har egna flödesmätare för deras produktion, men endast ånglinjen till Cloetta är försedd med egen flödesmätning på konsumtionssidan. Det innebär att varken fjärrvärmekondensorn, oljevärmaren eller matarvattentanken har flödesmätare och det innebär att någon mass- eller energibalans inte kan göras för anläggningen. Ångflödet till fjärrvärmekondensorn och oljeförvärmaren kan dock rätt enkelt kalkyleras genom sekundäreffektkalkyl, vilket innebär att matarvattentanken är den ända konsumtionsenheten, vars ånganvändning inte kan mätas.

8.3 Returkondensat

Mängden kondensat som returneras från Cloetta varierar mycket, stundvis är det mindre än ångleverensaen och stundvis är det större. Det verkar som att det ibland dessutom innehåller socker och andra ämnen som härstammar från Cloettas processer. Snarast möjligast kommer det att installeras kvalitetsmätningar på kondensatlinjen, för att få koll på vad kondensatet innehåller. Kondensatet blandas i matarvattentanken med uppvärmningsångan och eventuellt tilläggsvatten. Det kan vara väldigt skadligt för ångpannorna ifall det landar stora mängder socker och andra ämnen i matarvattnet, därför är det viktigt att få kondensatet analyserat. Kondensatflödet mäts med en strypfläns (nr 430K301) som har kalibrerats 2012.

8.4 Kalibreringsmöjligheter

Motivet till varför TV:s ångleverans till Cloetta är en del av det här diplomarbetet är att radioaktiva spårämnen inte får användas då ångan används inom livsmedelsindustrin, så i TV:s ånglinje bör det användas någon alternativ metod för att verifiera ångflödesmätaren, som är grund för faktureringen mellan företagen.

8.4.1 Massbalansberäkning

Massbalansberäkning är ett kalibreringsalternativ ifall alla andra ångkonsumtionspositioner kan uteslutas och endast Cloettas ånglinje hållas öppen. Det innebär att allt matarvatten som matas in i pannan levereras till Cloetta som ånga. I den situationen kan matarvattnets massflöde mätas och jämföras med ångflödet eftersom det inte försvinner ånga någon annanstans i systemet. För att kunna utesluta de andra konsumtionspositionerna bör ånglinjerna till dem stängas av. Fjärrvärmekondensorn är ofta avstängd då värmebehovet är litet och ångpannan går att köra även utan att förvärma oljan, matarvattnet bör dock värmas för att processen skall fungera som den skall. I TV:s ånganläggning är dock

matarvattentanken förhållandevis stor, så dess temperatur hålls på en tillräckligt hög nivå trots att man stänger av ångmatningen till tanken för en stund. Enligt anläggningschefens uppskattning kan ångmatningen stängas för ca 20 minuter utan att modifiera processen, det är en tillräckligt lång tid för att göra en referensmätning på matarvattnets massflöde. Matarvattnet kan eventuellt mätas med samma metod som används inom fjärrvärmenätet, det vill säga en temperaturavvikningspuls, som presenterades i kapitel 5.2.3 det vill säga att man injicerar en vattenpuls med avvikande temperatur, jämfört med flödet. Temperatur-skillnaden detekteras då med ultraljudsdetektorer, som baserar sig på ljudets hastighet i vattnet, vilken varierar med vattnets temperatur enligt Figur 5.2.

En utmaning med matarvattnet ifråga är dock att det har en temperatur på ca 110 °C och röret har en väldigt liten diameter, bara ca 37 mm. Den höga temperaturen ställer krav på ultraljud-transmittern ifall inte ett kylsystem för transmittern går att arrangera. Den småskaliga diametern kan i sin tur leda till svårigheter vid installationen av transmittern på rörets utsida, för att få en bra signal. Det måste också finnas en röranslutning innan högtryckspumpen, var kallvattenpulsen kan injiceras i matarvattnet.

8.4.2 Spårämnesmätning i ånglinjen

Ett annat alternativ för ångflödeskalibreringen är att göra en referensmätning i ånglinjen, alternativen är då temperaturpuls- och luftpulsmetoderna som presenterades i kapitel 7. För att utföra en temperaturpulsbaserad referensmätning borde alla pulsframställningsmetoder vara möjliga att testa. Ångflödet är förhållandevis litet, så även en självinducerad kvävgaspuls kan fungera, men också genom en processjustering kunde en temperaturpuls förorsakas. Till exempel kan eventuellt trycket sänkas med reduceringsventilen till ca 6 bar, vilket är miniminivån för att Cloettas processer skall fungera och sedan öppna ventilen snabbt och sluta den igen, för att orsaka en värmepuls i flödet. Förutom temperaturpulsen kunde också luftpulsmetoden användas. I ånglinjen finns redan ett par röranslutningar som lämpar sig för injiceringen och detekteringen av luften. Precis innan ångflödesmätaren inne i ångproduktionshallen finns en röranslutning som kan användas för injektionen och vid ånglinjens första förgrening i rörkulverten finns en röranslutning var detektionen kan göras. Sträckan mellan röranslutningarna är ungefär 50 meter (ca 380D), vilket åtminstone delvis kompenserar otillförlitligheten som orsakas av utmaningar med att detektera luften. För att transit-tidmetoden skall kunna användas förutsätts dock att både transit-tiden och ångvolymen som passerat kan bestämmas. Rörvolymen är rätt så utmanande att mäta då ångröret gör flera svängar under den använda mätsträckan, de raka rörpartierna erbjuder bra möjligheter för bestämmandet av volymen, men rörkrökarna är svåra att få noggranna mätningar på. Rörets diameter bestäms genom att mäta omkretsen vid några ställen på ånglinjen och rörväggens tjocklek bestäms med en ultraljudsmätare genom att mäta tjockleken på flera ställen och räkna ett medeltal.

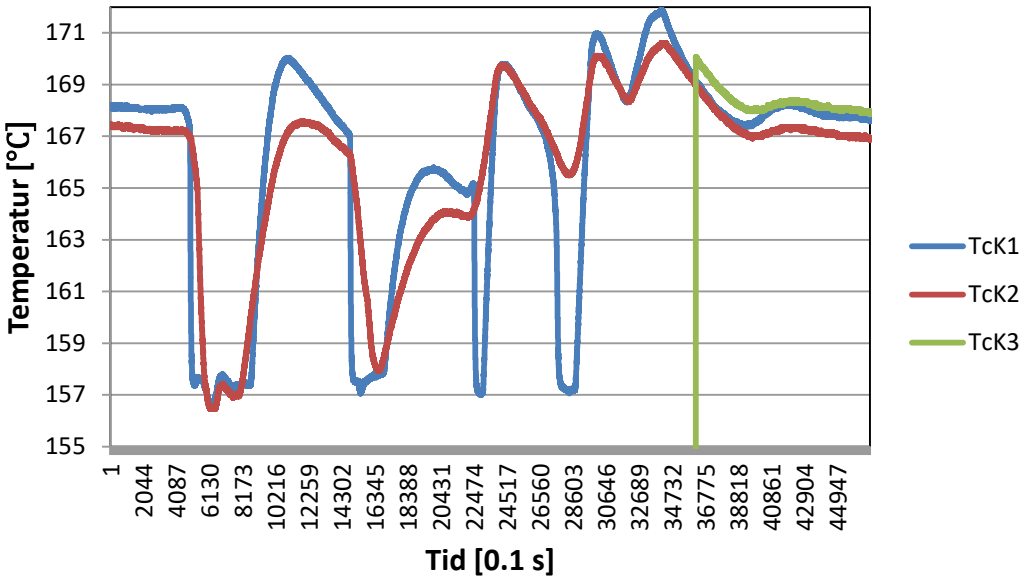
9 Resultat

9.1 Testmätningar med temperaturpulsmetoden

Några inledande testmätningar utfördes för att få en riktgivande indikation på hur utrustningen lämpar sig för ändamålet och hur de tekniska begränsningarna påverkar resultatet. Det visade sig att en del aspekter bör tas i beaktande innan temperaturpulsmetoden kan användas i en vidare utsträckning.

Testerna utfördes i en ånglinje med det absoluta trycket ungefär 5.6 bar, rördiametern 398 mm, flödet ungefär 4.7 m^3/s och temperaturen varierande mellan 157 °C och 172 °C. Det innebär att ångans flödeshastighet var ungefär 38 m/s. Temperaturmätningen gjordes med 3 stycken termoelement som installerades på utsidan av röret. En temperaturgivare installerades nära ångproduktionen och de två övriga givarna installerades ungefär 85.5 m nedströms precis intill varandra. De två sistnämnda givarna installerades bredvid varandra för att få en uppfattning av givarnas responstid. Den första givaren i sin tur installerades förhållandevis långt ifrån de andra för att ge en bild av hur en temperaturvariation utvecklas på en lång rörsträcka. Mätsträckans längd och flödeshastigheten innebär att transit-tiden borde ha varit ca 2.25 sekunder.

Under testmätningarna inducerades några självförorsakade kallpulser med hjälp av kvävgas, men dessa gick inte att identifiera ur temperaturkurvan, troligtvis på grund av så stort och turbulent flöde att kvävemängden inte räckte till för att kyla ner ångan. De värmepulser som granskades var därför naturliga fluktuationer i ångflödet, vilka visade sig vara ovanligt stora, till och med 14 graders variationer. I Figur 9.1 ses en av temperaturloggningarna från testmätningen.



Figur 9.1 Temperaturloggning från testmätningen. Temperaturen är i °C och loggningsperioden 0.1 sekunder.

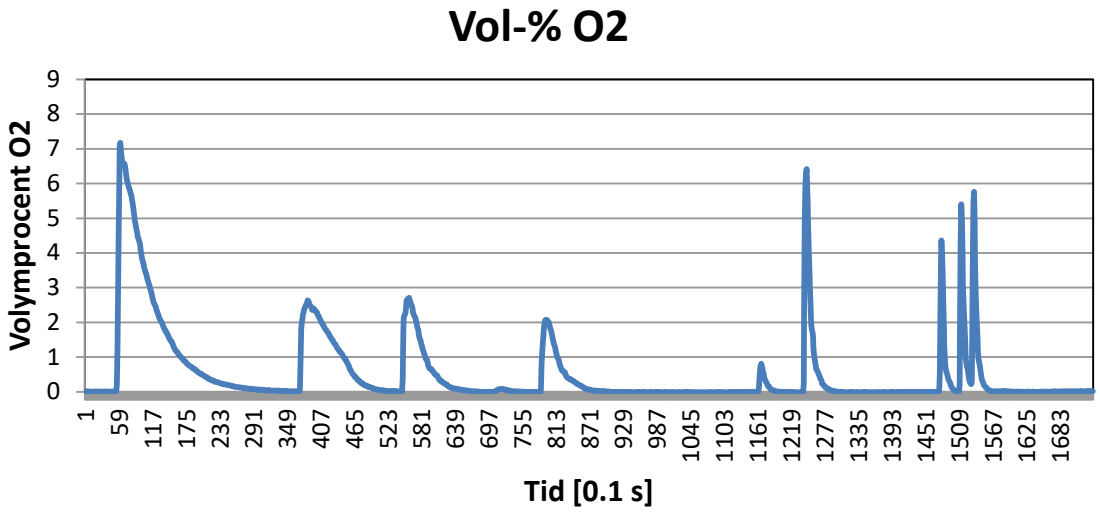
Den blåa linjen [TcK1] är den första temperaturgivaren, den röda linjen [TcK2] är en av de senare givarna och den gröna linjen [TcK3] är den andra av de senare givarna. TcK3 var

inte inkopplad förrän i slutet av testet. I processen ifråga var de naturliga fluktuationerna väldigt stora, vilket till en början antogs vara positivt för att med hjälp av dem evaluera metoden, men dessa temperaturvariationer visade sig vara alltför långsamma för att ge något resultat. Området vid det första minimi-stället (ca 5000-8000 på x-axeln) gav ändå en detekterbar transit-tid som skiljde sig ungefär ±10% från den verkliga, vilket gav en positiv indikation för metodens funktionalitet. I slutdelen av testet granskades de två temperaturgivarna som var installerade precis intill varandra. Det visade sig att temperaturvariationerna i ånglinjen var för långsamma även för detta ändamål och något resultat erhölls inte.

Slutsatsen kan alltså dras att temperaturvariationerna går att identifiera vid två från varandra avlägsna mätpunkter, men variationerna bör vara snabba för att få ett tillförlitligt resultat.

9.2 Testning av luftpulsmetoden

Luftpulsmetoden testades först i laboratorieomständigheter genom att orsaka ett konstant kvävgasflöde genom mätutrustningen och sedan med en kompressor injicera luftpulser i flödet för att se hur syregivaren reagerade på luftpulserna. Eftersom syregivaren är installerad i ett T-stycke till flödeskanalen och givaren blir precis utanför flödets mittpunkt, så hade flödeshastigheten en tydlig inverkan på hur snabbt syrenivån sjönk tillbaka till 0% efter luftpulsen. Det beror på att en del luft blir inne i T-stycket och hur snabbt det avlägsnas beror på flödets turbulens, som är direkt proportionellt mot flödeshastigheten. I Figur 9.2 är en graf från testmätningen. Mot slutet av testet ökades kvävgasvolymflödet, vilket ledde till snabbare sänkning av syrehalten efter luftinjektionen. Den nuvarande installationstypen borde dock ge en tillräcklig indikation på metodens funktionsduglighet, men ifall det visar sig vara en lovande kalibreringsmetod så kan utrustningen vidareutvecklas genom att installera syregivaren in i provtagningsflödets mittpunkt.



Figur 9.2 Testmätning med syregivaren. Syrets volymprocent som funktion av tiden, enheten 0.1 sekunder.

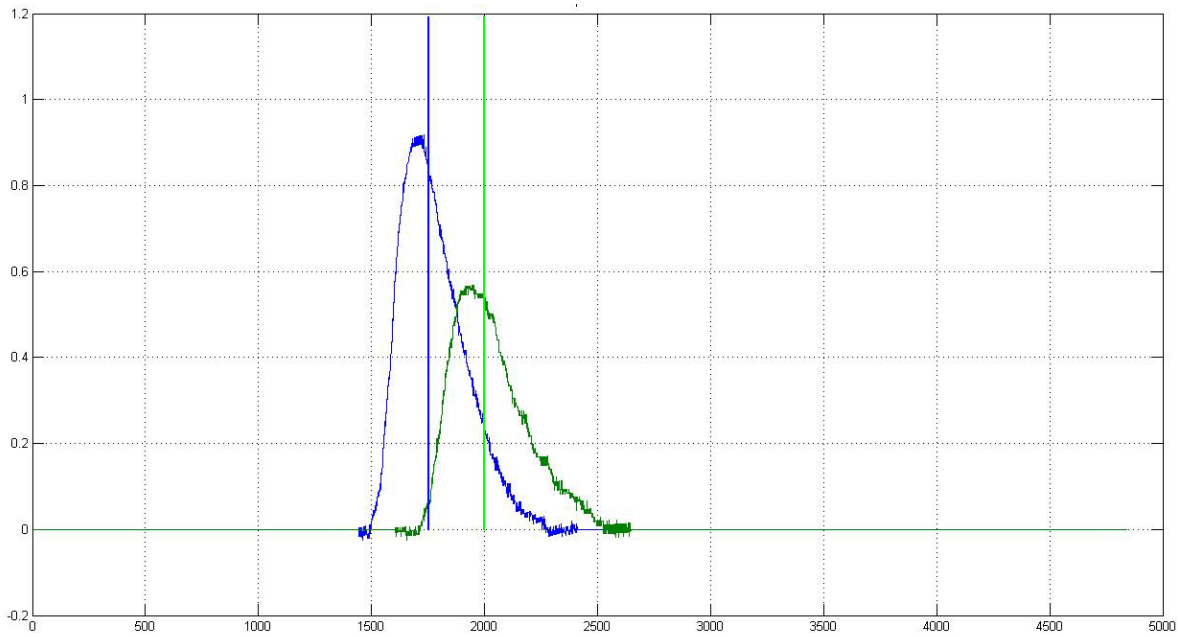
Beroende på ångans kvalitet och röranslutningens utformning, så kan syregivaren störas av vatten som övergått till vätskeform, alltså kondensat. Ifall röranslutningen är på rörets undersida finns det stor risk för att det samlas kondensat i anslutningen, eftersom det under en lång rörsträcka ofta samlas kondensat i rörets nedre del när det är frågan om lågtrycksånga. Även ifall ångan är överhettad i själva ånglinjen och röranslutningen är på sidan av röret kan det bildas kondensat i anslutningen eftersom temperaturen enkelt kan sjunka några grader i en oisolerad anslutning, vilket leder till att ångan blir mättad. Ett test som utfördes i en ånglinje visade att syregivaren störde väldigt radikalt av kondensatet som uppstod i röranslutningen. Genom att installera syregivaren på övre sidan av provtagningsslangen kunde problemet delvis undvikas, men större mängder kondensat kunde ändå orsaka stora variationer i syregivarens värde.

9.3 Resultatanalysmetoder

De resultat som erhölls från mätningar med presenterade flödesmätningsmetoderna har alla analyserats med flera olika metoder och sedan jämförts såväl sinsemellan som med den anläggningens egna mätinstrument, för att få ett så pålitligt slutresultat som möjligt. Valen av de analysmetoder som tillämpades är starkt styrda av flerårig kalibreringserfarenhet som innehas av Indmeas. De olika metoderna är alla genomförda i det av MathWorks utvecklade programmet Matlab och de ger alla transit-tiden för det använda spårämnet som resultat. Efter att transit-tiden erhållits, är proceduren för samtliga metoder densamma, rörvolymen divideras med transit-tiden för att få volymflödet och sedan bestäms massflödet med hjälp av densiteten som råder under det tryck och den temperatur som flödesmediet har på mätsträckan.

9.3.1 Medianmetod

Den oftast tillämpade metoden hos Indmeas är en så kallad medianmetod. Den baserar sig på ytarealen som bildas mellan pulsens kurva och en rak linje dragen mellan den ungefärliga nivån före och efter pulsen. Är de naturliga fluktuationerna små, så antar kurvan närapå samma värden innan och efter pulsen, vilket resulterar i en horisontal nedre kant av ytarealen. Det gör bestämningen av arealen effektivare och exaktare, men ofta förekommer det naturliga rörelser i basnivån och det komplicerar analyserandet av resultatet. När ytarealen är bestämd, så räknas dess värde ut och en median dras vertikalt över pulsen så att ytarealen halveras i två lika stora arealer. Det samma görs för bägge detektionspunkterna, det vill säga bägge signalerna och transit-tiden bestäms då som avståndet mellan medianlinjerna. I Figur 9.3 presenteras en temperaturpuls, som analyserats med hjälp av medianmetoden för att beräkna pulsens transit-tid.



Figur 9.3 Grafisk presentation av en temperaturpuls i en ånglinje granskad med medianmetoden. Medianlinjerna är de vertikala linjerna som delar pulsens areal i två lika stora delar. Enheten på den horisontella axeln är 0.01 s, vilket ger en transit-tid på ungefär 2.5 s.

Medianmetoden användes i två olika varianter. Den första varianten, som är den mera allmänna, beaktas hela pulsen från ”noll-nivån” som då består av kurvans nivå innan och efter pulsen, medan den andra varianten bara beaktar pulsens övre halva. Den första varianten av metoden, där hela pulsen analyserades, visade sig ge ett bättre resultat än då bara pulsens övre hälft ingick i granskingen.

9.3.2 Tyngdpunktsmetoden

Tyngdpunktmetoden är en annan metod som också baserar sig på ytarealen mellan kurvan och den genomsnittliga grundnivån, men istället för en median som delar ytarealen på hälften, så appliceras en tyngdpunkt på ytan och tyngdpunktens koordinat på den horisontella axeln är det värde som beaktas vid bestämningen av transit-tiden. I praktiken betyder det att ifall pulsen är helt symmetrisk, så antar tyngdpunktmetoden samma resultat som medianmetoden. I praktiken är pulsen dock aldrig helt symmetrisk, utan den tenderar att ha en skarp början och sedan avsevärt långsammare återgående till den tidigare nivån, det vill säga pulsen får en så kallad ”svans”. Pulsens svans beror på att spårämnet har blandats med flödet och koncentrationen är lägre ju längre bak i pulsen man går. Den här svansen orsakar tyngdpunktens förskjutning längre till höger jämfört med medianlinjens position.

9.3.3 Korrelationsmetoden

Den sista metoden som tillämpats vid analyserandet av mätresultaten är korrelations-metoden, vilken precis som namnet säger, bygger på en korrelation av pulserna från de två detektionspunkterna. Tekniskt sett väljer man då en viss del av pulsen vid den första detektionspunkten och flyttar den horisontalt tills den korrelerar maximalt med pulsen från den andra detektionspunkten. Transit-tiden utgörs då av det horisontella avståndet som pulsen har flyttats. Korrelationsmetoden kan vara svår att tillämpa på grund av att pulsens

form stundvis varierar kraftigt mellan detektionspunkterna. Ifall mätsträckan är lång blandas spårämnet ytterligare med flödet mellan detektionspunkterna och det bidrar till att pulsen blir plattare och mera utdragen, då är korrelationsmetoden närapå oanvändbar. I de utförda mätningarna är ofta pulsens början ända till ”toppen” väldigt lik vid de två detektionspunkterna, men efter ”toppen” av pulsen kan pulsens utseende skilja sig mycket mellan detektionspunkterna. Det är orsaken till att korrelationsmetoden bland annat bara tillämpades på den första halvan av pulsen. Det visade sig resultera i mycket mindre felmarginal än då hela pulsen beaktades.

9.3.4 Resultatets osäkerhetsmarginal

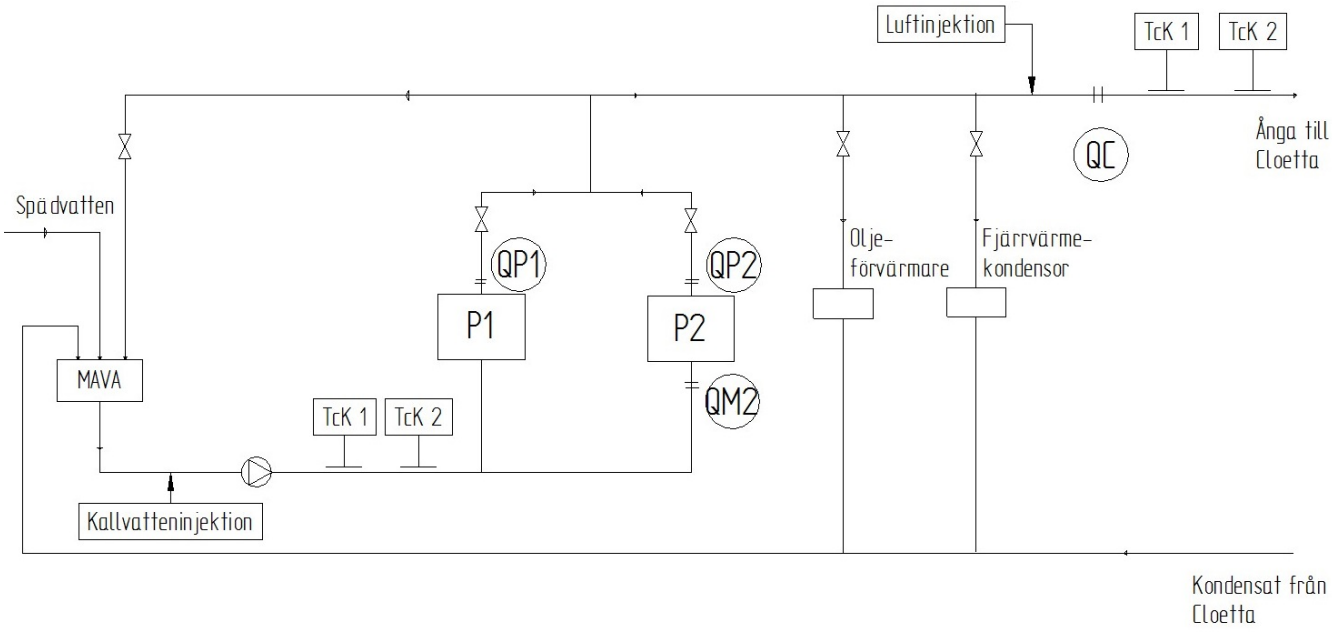
När massflödet beräknats utgående ifrån volymflödet och densiteten, så jämfördes det med värdet från anläggningens styrsystem och ett relativt slumpfel räknades ut. Eftersom väldigt varierande resultat erhölls, så behövdes ett stort antal mätningar för att reducera slumpfelmarginalen. Skillnaden mellan styrsystemets värde och referensmätningen bestämdes genom att räkna ett aritmetiskt medelvärde av det relativa felet från mätningarna. För att bestämma mätningens slumpfelmarginal användes ett konfidensintervall inkluderande standardavvikelsen, antalet mätresultat samt en normalfördelning, så att konfidensintervallet motsvarade konfidensgraden 95%.

9.4 Temperaturpuls i ånglinje

Temperaturpulsmetoden utfördes i Tekniska Verkens ånglinje till livsmedelsproducenten Cloetta AB. Under mätningarna var ångleveransen på en normal nivå då Cloetta har produktion. Ångmätningen till Cloetta har aldrig kalibrerats tidigare så under mätningen fanns inget känt referensvärde. Mätningens resultat jämfördes med ångflödesmätningen till Cloetta, vilken i sin tur jämfördes med ångflödesmätningen för den enskilda ångpannan som användes. Ångpannans ångflödesmätning jämfördes med matarvattenflödet och med en temperaturpulsmätning i matarvattenlinjen. På så sätt kunde alla flödesmätningar ställas mot varandra i en serie.

9.4.1 Verkställandet av mätningen

Mätningen verkställdes enligt beskrivningen i kapitel 7.1, alltså med två termoelementgivare för att detektera temperaturpulsens transit-tid och innan dem en injektionsanslutning, där luftpulser injicerades med en högtryckskompressor. Avståndet mellan injiceringspunkten och den första temperaturmätningen var ungefär 14 meter, som inkluderade förutom raka rörpartier även en flänsmätning och en ventil, vilka säkerställer en fullständig inblandning av spårämnet i flödet. Rörsträckan i sig är lång nog, det vill säga över 100 gånger innerdiametern, för att uppfylla de standardiserade kraven på blandningssträckan mellan injektionspunkten och mätsträckan. Termoelementgivarna installerades bägge på rörets övre sida och fästes med aluminiumtejp på rörets yta samt isolerades effektivt från omgivningen med ett tjockt lager glasull för att minimera störningar från omgivningen. Hela rörsträckan som användes i mätningen befann sig inne på panncentralen eller nere i rörkulverten, så inverkan från de omkring varande meteorologiska förhållandena var stabilt väldigt liten. I Figur 9.4 är ett väldigt förenklat PI-schema av ånganläggningen där mätutrustningens placering märkts ut, samt de relevanta flödesmätarna och ventilerna.



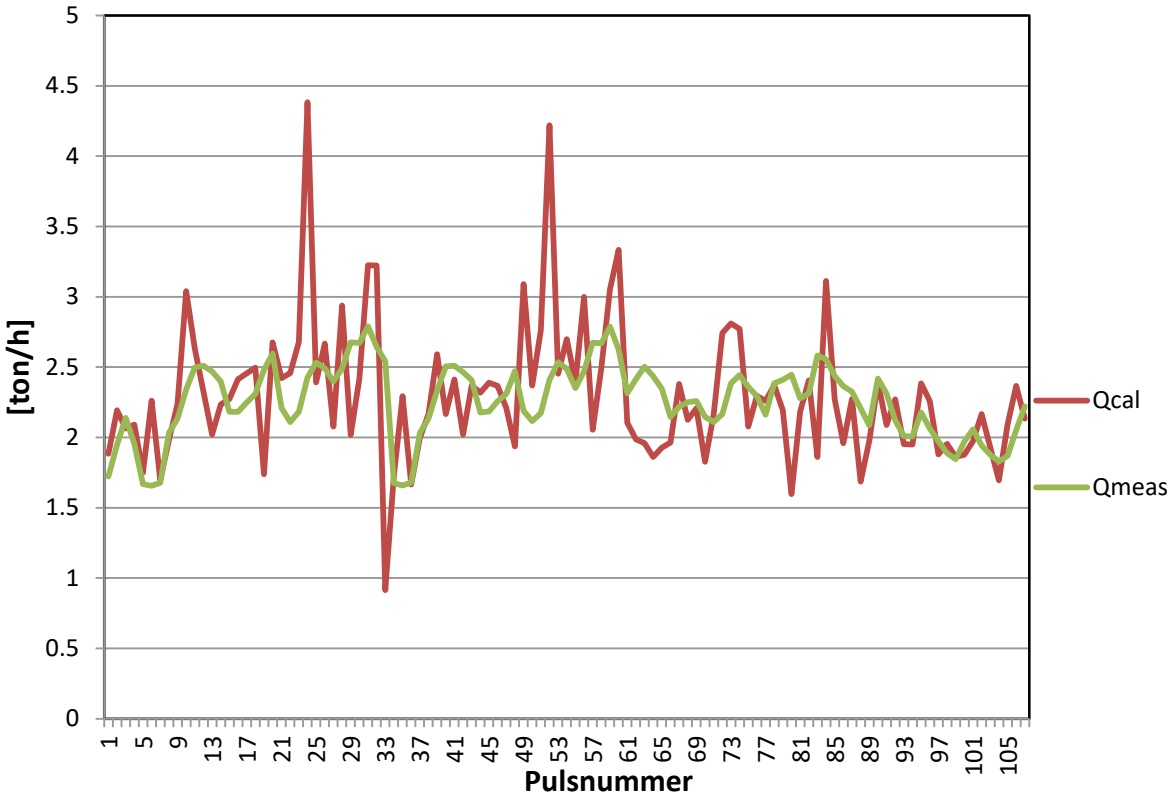
Figur 9.4 Simplifierat PI-schema av ånganläggningen, med den använda mätutrustningen inkluderad.

Som det framgår i Figur 9.4 gjordes flödesmätningen i ånglinjen efter Cloettas flödesmätare (QC i figuren). Tryckluften injicerades innan mätaren (Luftinjektion) och den åstadkomna temperaturpulsen detekterades med termoelementen TcK 1 och TcK 2.

Processinducerade temperaturförändringar testades också, men de visade sig vara för långsamma för att fungera för det här ändamålet. Det som gjordes var att maskinellt öppna reduktionsventilen och stänga den igen, ventilens mekaniska öppningshastighet var därmed ventilmotorns hastighet och den var inte tillräckligt snabb för det här ändamålet. Visst kunde de processinducerade temperaturpulserna registreras vid bägge detektionspunkterna, men de såg väldigt olika ut vid de båda temperaturgivarna och förändringarna var för långsamma för att några exakta transit-tider skulle kunna bestämmas utgående från dem. De naturliga fluktuationerna gav samma resultat som vid testmätningarna, alltså samma resultat som de processinducerade temperaturvariationerna. I dessa resultat presenteras därmed endast de självinducerade temperaturpulsresultaten.

9.4.2 Mätresultat i siffror

Under mätningen injicerades totalt 107 registrerade temperaturpulser i ånglinjen. Genom styrsystemets mA-signal loggades ångflödesmätarens värde i realtid under mätningen. Även anläggningens tryck- och temperatursignaler loggades för att kunna fastställa deras riktighet genom att jämföra med värdena från de kalibrerade givarana applicerade för mätningen. Spridningen mellan mätresultaten var väldigt stor vilket orsakades av de stora temperaturfluktuationerna i temperaturen under mätningen. Den stora spridningen är orsaken till att ett så stort antal pulser behövdes för att få ett pålitligt slutresultat. I Figur 9.5 är referensmätningen ritad parallellt med flödesmätarens värden, var det framgår tydligt hur radikalt det uppmätta massflödet varierade jämfört med anläggningens stationära ångflödesmätning.



Figur 9.5 Grafisk presentation av mätresultatet (Qcal) jämfört med anläggningens stationära flödesmätning (Qmeas).

Vid en närmare granskning av temperaturpulserna och deras position, så kan några observationer göras om vad som troligtvis är anledningen till de stora avvikelserna från flödesmätarens värde. Det finns två parametrar som ligger bakom det fenomenet, den ena är att temperaturen varierade stundvis mycket aggressivt upp och ner och den andra är att också massflödet momentant gjorde väldigt stora nivåändringar. Massflödet kunde till exempel öka eller minska med upp till 30% inom loppet av en minut. Eftersom temperaturpulsmetoden är en förhållandevis långsam mätningsmetod, så gjorde dessa fluktuationer att temperaturpulsernas form ändrade drastiskt och ett pålitligt mätresultat kunde inte erhållas utav flera av pulserna som befann sig på ett turbulent område. Pulsernas storlek hade också en tydlig koppling till resultatet, vilket till stor del beror på den instabila ångtemperaturen. Eftersom ångans temperatur varierar inom ett område av 173 – 176 °C med förhållandevis snabb frekvens, så bör temperaturpulserna skilja sig tillräckligt från bakgrundsvariationen. De minsta pulserna rörde sig om ungefär 0.2 °C, medan de största pulserna var av amplituden 0.7 °C. Amplituden har en markant inverkan på avläsningen av pulsens position eftersom ifall ångans temperatur varierar under pulsens registrering, så blir bestämmandet av pulsens yta utmanande då nollnivån är en lutande linje och pulsens topp inte sträcker sig tillräckligt högt ovanför nollnivån. Amplituden är rent logiskt också större vid första detektionspunkten än vid den andra eftersom temperaturskillnaden sakta tonas ut ju längre sträcka den färdas i röret.

Vid jämförelsen mellan det uppmätta massflödet och flödesmätarens värde så mättes den relativa skillnaden, det vill säga skillnaden erhölls som ett %-tal, + eller -, beroende på om flödesmätaren visade mera eller mindre än referensmätningen. Sedan räknades ett medelvärde av skillnaden. Resultatet varierade mellan starkt mellan pulserna, men det resultat som användes i slutändan var medelvärdet **+0.11%**. Det betyder att

ångflödesmätaren visade 0.11% för mycket, men när spridningen tas i beaktande och en 95% konfidensintervall appliceras på den erhållna standarddeviationen, så är osäkerhetsmarginalen **±3.1%**, det vill säga flödesmätaren visar korrekt inom osäkerhetsintervallet.

9.5 Luftpuls i ånglinje

Luftpulsmetoden testades i samma ånglinje som temperaturpulsen, dock med betydligt svagare utkomst. Lambda-givaren som skulle detektera syrenivån i ångflödet och på så sätt bestämma när luftpulsen passerade detektionspunkten fungerade inte önskvärt vis. Lambda givaren verkade störas av kondensatet som bildades i röranslutningen där den var installerad. Det ledde till att det tog länge innan syrenivån sjönk till 0% efter att provtagningsflödet hade öppnats. När syrenivån hade antagit värdet 0% injicerades några luftpulser, men ingen koncentrationsändring gick att identifiera i ångflödet. Troligtvis räckte den injicerade luftmängden inte till för att skapa en tillräckligt hög syrekoncentration. Uppskattningsvis var injiceringstiden ungefär 1.5 sekunder och det betyder att ungefär 200 liter ånga blandades med bara ca 6 liter luft. Det gör luft koncentrationen så låg som ca 3% och syrekoncentrationen bara 21% av det, det vill säga ungefär 0.6%. Risken finns, att då luften blandades ytterligare med ångan under den 35 meter långa rörsträckan mellan kompressorn och syregivaren, så blev koncentrationen ännu lägre och att det därför inte gick att registrera någon koncentrationsändring.

9.6 Temperaturpuls i matarvattenlinje

Förutom mätningarna i ånglinjen gjordes en mätning i matarvattenlinjen för att få någon annan referens än den okalibrerade ångflödesmätningen till Cloetta AB. Temperaturpulsmetoden i matarvattenlinjen gick till på det sättet som beskrevs i kapitel 8.4.1 och mätutrustningen installerades enligt Figur 9.4. Tanken var dock att detektera temperatursänkningen, som orsakats med en kallvatteninjektion i matarvattenlinjen, med ultraljudsdetektorer, som mäter ljudets hastighet i flödet, vilken ändrar som funktion av flödets temperatur, men det vållade problem vid registreringen av signalen. Av okänd orsak lyckades inte signalprocesseringen för det gick inte att se någon förskjutning i signalen trots att upprepade försök gjordes. Det kan bero på att temperaturen inte ändrade tillräckligt mycket för att ljudets hastighet skulle ha påverkats märkbart, men det verkar otroligt eftersom temperatursänkningen var möjlig att registreras med termoelementgivare. Ett annat alternativ är också att ultraljudstransmittern inte klarade av så höga temperaturer som matarvattenlinjen utsatte den för.

9.6.1 Verkställandet av mätningen

Trots att det inte gick att mäta transit-tiden som planerat, så erhölls ändå ett resultat genom att använda samma mätapparatur som tillämpades på ånglinjen, det vill säga termoelementgivare som tejpades på utsidan av röret och isolerades från omgivningen med glasull.

Kallvatteninjektionen skedde före matarvattenpumpen, det vill säga mellan matarvattentanken och matarvattenpumpen. Mätsträckan var sedan direkt efter mattarvattenpumpen, som säkerställde att kallvattenpulsen blandats med det övriga flödet enligt standarden ISO 2975.

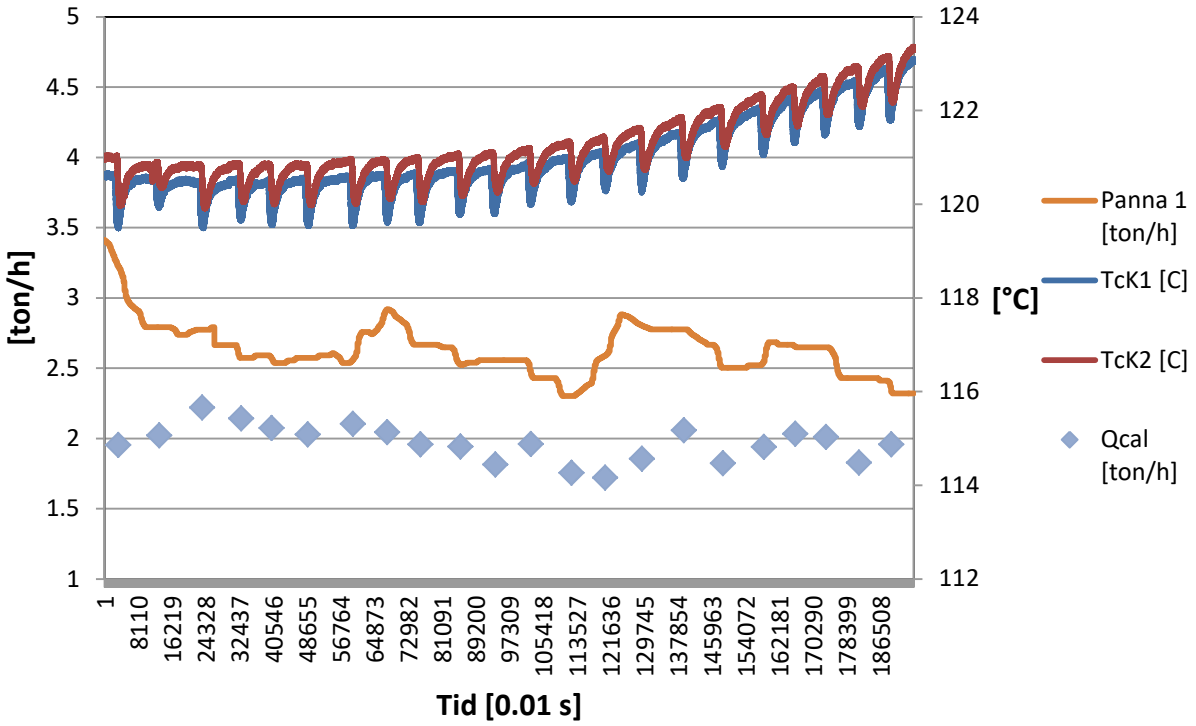
Temperaturmätningen och genom den, detekteringen av temperaturpulserna, lyckades med i stora drag samma framgång som i ånglinjen, men mätningen av mätsträckans volym visade sig vara svårt på grund av rörets små dimensioner. Mätsträckans längd, L, kunde bestämmas väldigt noggrant, men ytteromkretsen, o, varierade 1 mm beroende på var den mättes och rörets väggtjocklek, w, var svår att mäta på grund av att röret var varmt och ultraljudsgivaren svår att placera på rörets runda yta. På grund av de här utmaningarna i bestämmandet av rörets innerdiameter, så antogs röret inneha den standardiserade rörstorleken DN40, eftersom de uppmätta värdena stämde väl överens med standarden.

9.6.2 Mätresultatet i siffror

Under mätningen injicerades totalt 22 kallvattenpulser i matarvattenlinjen, varav 21 pulser gav en transit-tid som kunde kalkyleras till ett volymflöde och vidare till ett massflöde för att jämföras med ångflödesmätaren belägen direkt efter ångpannan. Under mätningen hölls pannans nivå stadig och ingen bottenblåsning utfördes vid mätningstidpunkten. Därmed kunde matarvattenflödet som gick in i pannan jämföras med ångflödet som lämnade pannan. Den ena pulsen som exkluderades från resultaten var den första efter inledandet av mätningen och orsaken varför den gav så missvisande värde är att massflödet var under en snabb minskning och flödesmätarens värde som jämfördes med var fortfarande på den tidigare flödesnivån.

Spridningen på mätresultaten var väldigt stor beroende på hur pulsens område valdes, som skulle granskas. Det beror på att pulsen blev mera utdragen mellan detektionspunkterna, vilket märktes genom att jämföra transit-tiden mellan pulsens början och pulsens topp. Jämförelsen gjordes med hjälp av Matlab och att manuellt markera pulsernas början och topparna. Från de erhållna x-värdena kalkylerades antalet tidssteg mellan detektionspunkterna. Resultatet var att transit-tiden mellan pulsernas toppar var betydligt längre än mellan pulsernas begynnelser, det vill säga volymflödet antog mindre värden då topparna eller hela pulserna korrelerades mot varandra. Det är även orsaken till varför medianmetoden inte fungerar för temperaturpulserna i matarvattnet, transit-tiden antar alltför stora värden på grund av att pulsens areas mittpunkt förskjuts så långt fram. Korrelationsmetoden användes alltså med den modifieringen att endast pulsens början valdes för korrelationen, av det här följde även att standardavvikelsen för mätningen blev mindre och osäkerhetsmarginalen givetvis likaså.

Skillnaden mellan pannans ångflödesmätning och resultatet från temperaturpulsmetoden i matarvattenlinjen är 34.1% med en osäkerhetsmarginal på ±4.3% för att 95% konfidensintervall skall uppfyllas för de erhållna mätvärdena. Osäkerheten är dock större än så på grund av det faktum att resultaten varierade så mycket beroende på hur pulserna valdes för analys och även eftersom pulserna är så få till sitt antal. Ångflödet var dessutom rätt så instabilt under mätningen vilket också försvårar ett noggrant resultat, då det uppstår fördröjningar mellan mätsträckan innan ångpannan och ångflödesmätningen efter pannan.
I Figur 9.6 kan man se temperaturpulserna, från dem kalkylerade massflödet och ångpannans flödesmätning.



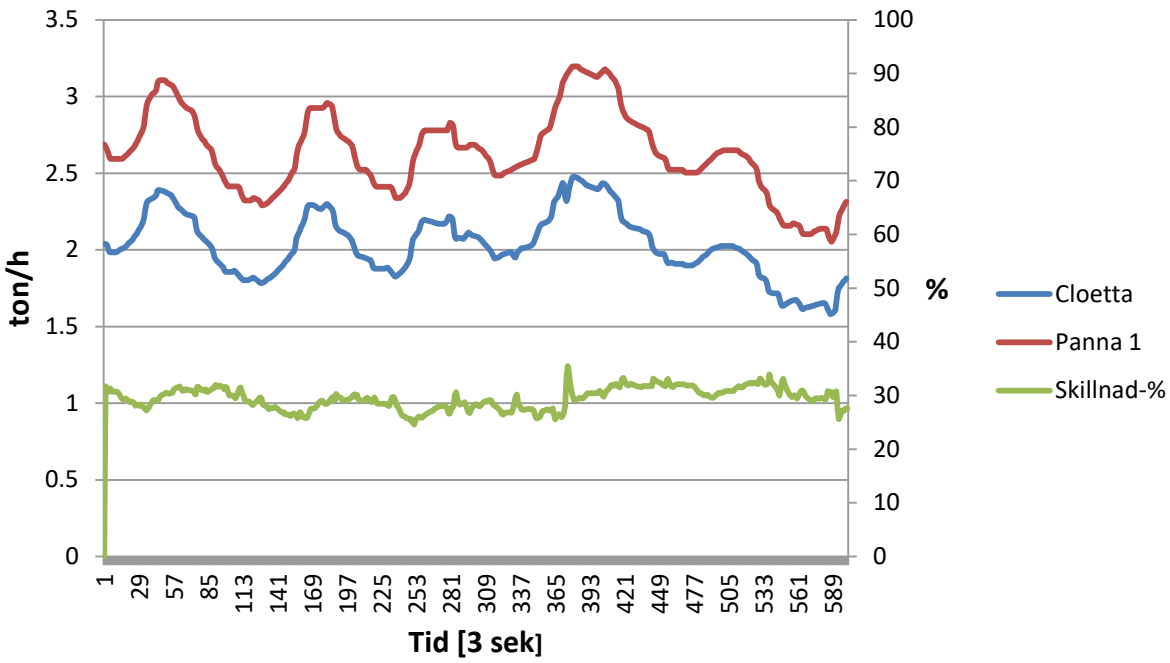
Figur 9.6 Grafisk presentation av temperaturpulserna, ångflödesmätningen vid Panna 1 och referensmätningen i matarvattenlinjen.

9.7 Massbalansräkning

När Tekniska Verken i Linköpings ångpanncentral i Ljungsbro är i normal drift distribueras ångan till ett fåtal olika konsumtionsplatser, dessa är Cloetta AB:s processånga, matarvattentankens uppvärmning, oljebränslets förvärmning och fjärrvärmekondensorn, vilket konstaterades redan i kapitel 8.4.1. För att i matarvattenflödet kunna utföra en referensmätning till Cloetta AB:s ångmätning, krävs alltså att den producerade ångan inte under mätningen konsumeras på några andra platser än i Cloetta AB. Den situationen förverkligades genom att helt enkelt stänga av ångdistributionen till alla andra förbrukningsställen än Cloetta AB för en tidsperiod på 29 minuter och 10 minuter för respektive ångpanna 1 och ångpanna 2. Mätdata från styrsystemet granskades för den här tidsperioden för att se hur de olika flödesmätarnas värden betedde sig mot varandra då de var i serie.

9.7.1 Ångpanna 1

Resultatet visade att ångpannans egen flödesmätning visade 29.5% mera än Cloettas ångmätning. Standardavvikelsen på under 2 %-enheter och ett stort antal mätvärden ger en liten osäkerhetsmarginal på ±0.15% för ett 95%-konfidensintervall. Det syns även tydligt i Figur 9.7, hur starkt ångmätningarna korrelerar men har en stor nivåskillnad. Även den procentuella skillnaden för ångpannans flödesmätning i förhållande till Cloettas ångmätning är plottad.



Figur 9.7 Jämförelse mellan ångmätningarna till Cloetta och vid Ångpanna 1.

Resultatet stämmer, inom osäkerhetsmarginalen, väl överens med mätresultatet från temperaturpulsmetoden i matarvattenlinjen. När man granskar mätresultatet från matarvattenlinjen, ångflödesmätningen vid Ångpanna 1, ångflödesmätningen till Cloetta AB och mätresultatet från ånglinjen till Cloetta, så kan man observera att inom de estimerade felmarginalerna är de erhållna mätresultaten fullt realistiska. Mätresultatet från matarvattenlinjen tydde på att ångflödesmätaren vid Ångpanna 1 visade 34.1 ±4.3 % för mycket, medan jämförelsen mellan ångflödesmätarna visade att ångflödesmätaren vid Ångpanna 1 visade 29.5 ±0.15% mera än ångflödesmätningen till Cloetta AB, vilken i sin tur visade 0.11 ±3.1% mera än mätresultatet från ånglinjen.

9.7.2 Ångpanna 2

Samma procedur utfördes även för ångpanna 2, alltså då den var i drift så stängdes ångflödet av till alla andra förgreningar än Cloettas ånglinje. Resultatet var att Ångmätningen vid ångpanna 2 visade 15.4% mera än Cloettas ångmätning, med en standardavvikelse på 1.9 %-enheter och konfidensintervallet ±0.26%.

9.8 El- och oljepannornas verkningsgrader

Eftersom mätresultatet från temperaturpulsmetoden i matarvattenlinjen och i ånglinjen var rätt så entydiga om att Cloettas ångmätning inom dess felmarginal var korrekt och massbalansräkningen visade på att ångpannornas flödesmätningar hade ett så radikalt fel, så gjordes en granskning av oljepannornas verkningsgrader, som en försäkran om att resultatet kan anses pålitligt. Vid Ljungsbro installerades under det här diplomarbetet även en elångpanna och därmed fanns också lite användardata att tillgå från dess provkörning, vilket kunde exploateras som en till referens för Cloettas flödesmätning.

Verkningsgraden för oljepannorna beräknades utgående ifrån matarvattnets och ångans entalpinivåer och oljekonsumtionen baserad på brännarnas flödesmätningar. Verkningsgraden var klart högre vid större drift, vilket är anledningen till att verkningsgraden beräknades endast vid driftsituationer där ångproduktionen var större än 1.5 ton per timme. Verkningsgraden beräknades för ångpannorna var för sig, då bara den ena pannan var i drift. Medelångproduktionen för den granskade tiden var 3 ton/h, vilket är långt ifrån pannornas maximala ångkapacitet, vilken är 6.5 ton/h och 16 ton/h för respektive ångpanna 1 och 2. Det faktum att ångpannornas utvinningsgrad är så låg, erbjuder i normala fall dåliga förutsättningar för att uppnå en väldigt hög verkningsgrad.

Ångpannornas verkningsgrad beräknades först enligt det massflödet som ångflödesmätaren gav och sedan räknades nya verkningsgrader ut efter att ha justerat massflödena enligt de utförda flödesmätningarnas resultat. Resultatet från verkningsgradberäkningarna är presenterade i Tabell 9.1.

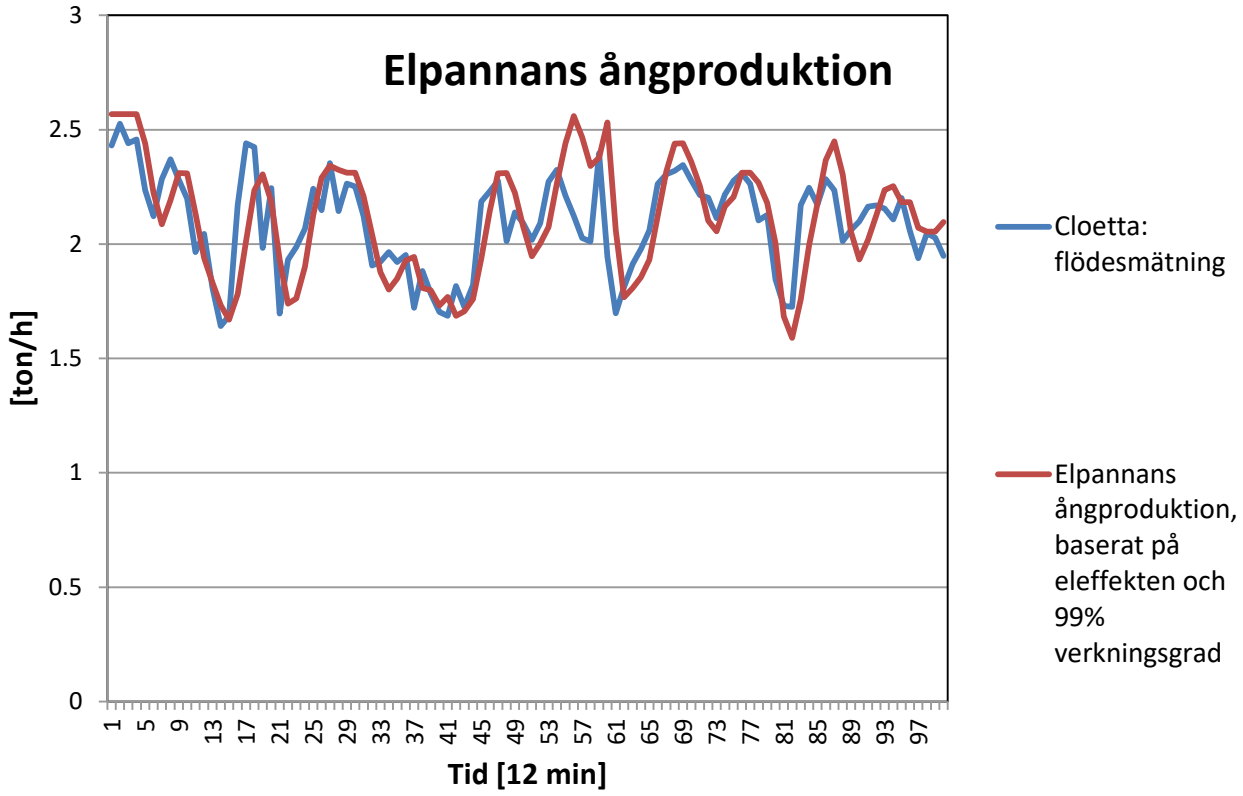
Tabell 9.1 Beräkning av verkningsgrader för Ångpanna 1 och 2.

	Ångpanna 1	**Ångpanna 2**
Data från styrsystemet		
Loggningstid	5 h	4 dagar
Medelproduktion	2.96 ton/h	3.04 ton/h
Max kapacitet	6.5 ton/h	16 ton/h
Utvinningsgrad	45 %	19 %
Ångans entalpihöjning	2.27 MJ/kg	2.27 MJ/kg
Ångeffekt	1.87 MW	1.92 MW
Oljekonsumtion	0.0435 kg/s	0.0483 kg/s
Oljans LHV	42 MJ/kg	42 MJ/kg
Olje-effekt	1.827 MW	2.029 MW
Verkningsgrad	**102.40 %**	**94.65 %**
Massflödeskorrigering		
Korrigerat ångflöde	2.29 ton/h	2.64 ton/h
Ny ångeffekt	1.44 MW	1.66 MW
Ny verkningsgrad	**78.80 %**	**81.83 %**

Vilket framgår ur Tabell 9.1, är verkningsgraden otroligt hög för ångpannorna innan massflödeskorrigeringen. Med tanke på pannornas ålder och frånvaron av rökgaskondensorer, så låter verkningsgraderna helt för bra för att vara sanna, speciellt för ångpanna 1, som har en verkningsgrad på över 100%. Efter att massflödet korrigerats enligt resultatet från ångflödesmätningen med temperaturpulsmetoden i ånglinjen, så antar ångpannorna verkningsgrader på ungefär 80%, vilket är klart mera troligt än de tidigare erhållna resultaten. Det här ger aningen mer tillförlit till de resultat som tidigare presenterats. Det att Ångpanna 2 har en aningen högre verkningsgrad än Ångpanna 1 kan motiveras med att den har en rökgaskylare, alltså en ekonomiser, som utvinner en del av värme-energin i rökgasen till att värma matarvattnet innan det leds in i själva ångpannan.

Elångpannan som installerades i Ljungsbro är tänkt att minska på oljekonsumtionen och möjliggöra ångproduktion till Cloetta med hjälp av elektrisk ström. Det ger säkerhet och

flexibilitet i ångproduktionen och är ett ekonomiskt och miljövänligt alternativ då elektriciteten är billig. Vid den ca 24h långa granskade tidpunkten låg ångproduktionen på ca 2 ton/h och inget kondensat togs tillvara från processen, utan all energi som elpannan producerade levererades som ånga till Cloetta. Vid beräknandet av ångproduktionen användes elpannans använda el-effekt och verkningsgraden på 99%, vilket är en riktgivande verkningsgrad, då pannans ända värmeförlust är pannans värmestrålning. Det här resulterade i ett massflöde på **1.03%** högre än Cloettas flödesmätare. I Figur 9.8 är grafiskt presenterat Cloettas flödesmätning parallellt med den nya elångpannans ångproduktion baserat på dess använda effekt.



Figur 9.8 Den nya elpannans ångproduktion och Cloettas ångmätning.

10 Osäkerhetsanalys

Alltid när det handlar om fysiska mätningar på fältet finns det ett flertal felkällor, vars inverkan på mätresultatet bör beaktas för att en specifik mätmetod skall kunna utvärderas och jämföras med andra mätmetoder. För att beakta alla felkällor, eller åtminstone så många som möjligt, bör varje steg av mätprocessen granskas och de upptäckta felkällornas inverkan på slutresultatet bör evalueras. I det här kapitlet redogörs, steg för steg, de väsentligaste felkällorna som inverkat vid de utförda flödesmätningarna. Som exempel lyfts här fram parametrar för flödesmätningen utförd med temperaturpulsmetoden i ånglinjen, men samma teknik har använts vid felanalysen för temperaturpulsmetoden i matarvattenlinjen. Slutligen estimeras ett totalfel med hjälp av partiella derivator. Felanalysen är utförd i enlighet med Europeiska ackrediteringskommitténs publikation: ”EA-4/02 Utvärdering av mätosäkerhet vid kalibrering”. (EA Laboratory Committee 2013)

10.1 Transit-tiden

Mätningen av det använda spårämnets transit-tid är den klart mest avgörande delen av hela flödesmätningen eftersom hela metoden grundar sig på den. Ett fel i transit-tiden resulterar i ett relativt sett lika stort direkt systematiskt fel även i resultatet. Det finns flera felkällor som påverkar mätningen av transit-tiden och i det här kapitlet kommer de väsentligaste att presenteras och dess relativa inverkan undersökas.

10.1.1 Temperaturmätningen

En av temperaturpulsmetodens största fördelar är att den kan utföras från rörets utsida utan ytterligare röranslutningar. Även om det är en stor fördel, innebär det också en stor osäkerhet, då temperaturen mitt i flödet inte kan mätas utan endast temperaturen på utsidan av röret är tillgängligt. Det är nämligen inte sagt att temperaturerna är desamma i mitten av flödet som på rörets utsida eftersom rörväggen trots sin höga värmeledningsförmåga ändå fungerar som en isolering. Det som transit-tidmetoden bygger på är dock temperaturförändringar, så den absoluta temperaturen spelar i slutändan inte så stor roll, däremot tiden det tar innan temperaturförändringen kan detekteras på utsidan av röret är väldigt avgörande.

Ånglinjen som granskats i det här diplomarbetet används för lågtrycksånga med en temperatur på ungefär 175 °C och den är givetvis isolerad med glasull för att minska värmeförlusterna från distributionslinjen. En uträkning av värmeöverföringen från ångan till omgivningen har gjorts för att beräkna temperaturförändringen från rörets mittpunkt till omgivningen. Det som beaktats i uträkningen är värmekonvektionen mellan ångan och järnröret, järnrörets värmeledning, glasullens värmeledning, aluminiumhöljets värmeledning, värmekonvektionen till omgivningen och värmestrålningen till omgivningen. Järnröret antogs ha en väggtjocklek på 5 mm, glasullen en tjocklek på 100 mm och aluminiumhöljet en tjocklek på 2 mm. Värmekonvektionen till omgivningen antogs vara fri, alltså inte påtvingad det vill säga luften runt röret rörde sig inte av andra orsaker än själva konvektionen. Omgivningens temperatur antogs vara rumstemperatur alltså 25°C.

Temperaturskillnaden mellan ångan och järnrörets yta är under 0.5°C eftersom glasullen isolerar så effektivt att största temperaturskillnaden sker i den. I bakgrunden står det faktum att järnets värmekonduktivitet är ungefär 55 W/mK, medan glasullens

värmekonduktivitet är ungefär 0.04 W/mK, dessutom är glasullen över tiofaldigt tjockare än rörväggen. Aluminiumhöljet på utsidan av glasullen är förhållandevis tunt och har dessutom en väldigt hög värmekonduktivitet på ungefär 237 W/mK, vilket gör att den inte inverkar märkbart på värmeisoleringen, utan temperaturen är närapå densamma på insidan och utsidan av höljet. Höljet fungerar därmed främst som ett skydd för glasullen.

Eftersom temperaturpulsen detekteras på rörets utsida, bör även fördröjningen som uppstår i rörväggen beaktas. För att få en bild av fördröjningen, gjordes ett enkelt experiment med de termoelementen som användes vid mätningarna. Experimentet gjordes med två järnplattor av olika tjocklek genom att fästa den ena givaren på baksidan och den andra givaren på framsidan av järnplattan. Temperaturpulserna förorsakades sedan med en varmluftspistol, varpå den främre givaren gav utslag och när värmen nått baksidan av järnplattan gav även den bakre givaren utslag, om än ett mycket mindre. Två järnplattor av olika tjocklekar granskades (3.9 mm och 6.0 mm), för att se hur fördröjningen beror av rörväggens tjocklek. Enligt de utförda testerna, var storleken av fördröjningen linjärt proportionell till väggtjockleken, vilket underlättar anpassandet av resultatet till väggtjockleken hos röret i ånglinjen. Då rörets värmeledningsförmåga antas vara på samma nivå som hos järnplattorna i experimentet, erhålls fördröjningen 0.83 sekunder för den 4.87 mm tjocka rörväggen i Cloettas ånglinje. Den garanterade toleransen för väggtjockleken i stålrör av den här storleksklassen är hos Rautaruukki -5% och +10%, men den faktiska variationen hos samma rör eller inom samma produktionssats är mindre och når i de flesta fall en osäkerhet på ±3% för väggtjockleken. Det betyder 0.0249 sekunders osäkerhet för mätningen av transit-tiden i den ånglinje där temperaturpulsmätningen utfördes.

Det här utgör den klart största osäkerhetskällan och vägtjocklekens inverkan på mätosäkerheten bör ännu granskas vidare. Det finns också en risk att på insidan av röret har bildats någon avlagring, till exempel kalk, vilket ytterligare orsakar en barriär för temperaturändringens detektion på rörets utsida.

Termoelementgivaren och –sändaren samt loggningsapparaturen ger också upphov till tidsfördröjningar, men deras storlek är okänd och dess inverkan antas vara relativt liten då identisk detektionsutrustning har använts vid bägge detektionspunkterna.

10.1.2 Datoranalys

Inte bara själva temperaturmätningens omständigheter som granskades i kapitel 10.1.1 påverkar bestämningen av transit-tiden, utan även mätresultatens behandling i Matlab, som beskrevs i kapitel 9.3, har en betydande inverkan på den uppmätta transit-tiden. Problematiken grundar sig i att ångans temperatur varierar hela tiden enstaka grader upp och ner, så kallade naturliga fluktuationer. Det leder till att ångans temperatur inte är densamma innan temperaturpulsen, som efter den. Beroende på hur området väljs för en enskild puls varierar därmed också mätresultatet. Antalet pulser måste därför vara stort, så att inverkan av dessa fluktuationer kan göras så liten som möjligt. Osäkerheten för transit-tiden som uppstår från datoranalysen är svår att bestämma, men ett estimat erhölls genom att jämföra medeltalen av transit-tiderna som bestämts genom två olika sätt att välja pulsens område. Det gav en skillnad på 0.0058 sekunder.

Den totala estimerade osäkerheten i transit-tiden är därmed summan av dessa oberoende felkällor 0.0307 sekunder (=0.0249 s + 0.0058 s).

10.2 Mätsträckans volym

Eftersom volymflödet är det primära värdet som mäts, har mätsträckans volym en stor inverkan på resultatet. När ett radioaktivt spårämne används, är mätsträckan alltid ett rakt rörparti för att försäkra sig om att volymmätningen erhåller en mycket hög pålitlighet. På grund av att temperaturmätningen utsätts för ett stort antal felkällor jämfört med aktivitetsmätningen är den absoluta osäkerheten även betydligt större vid mätningen av transit-tiden. Eftersom osäkerheten är större, så bör transit-tiden vara längre, för att den relativa osäkerheten skall hållas inom ramarna för en användbar kalibreringsmetod. För att transit-tiden skall bli längre, måste mätsträckan alltså vara längre och det i sin tur leder till att en rak rörsträcka, som uppfyller kriterierna, blir väldigt utmanande att hitta. Den mätsträckan som användes på Tekniska Verken i Linköping för utförandet av det här diplomarbetet innehöll fyra stycken kurvor. Ånglinjen var isolerad i sin helhet, vilket utgjorde ytterligare en utmaning för att mäta mätsträckans längd (L). Ånglinjens mätsträcka mättes med hjälp av ett kalibrerat måttband till 20.835 meter och felet som annars hade rört sig om ungefär 10 millimeter estimerades nu till 58 mm på grund av att måttbandet måste flyttas mellan mätningarna och att kurvorna på mätsträckan utgjorde ett direkt hinder för att göra en riktigt noggrann mätning.

Förutom mätsträckans längd inverkar även rörets innerdiameter på beräknandet av mätsträckans volym. Rörets innerdiameter bestämdes med hjälp av rörets ytteromkrets och rörets väggtjocklek. Vid mätningen av ytteromkretsen användes ett kalibrerat traditionellt måttband. Osäkerheten består då av måttbandets noggrannhetsspecifikation samt avläsningens osäkerhet, osäkerheten blir då 0.83 mm när avläsningsosäkerheten och temperaturens inverkan på måttbandet beaktats. Rörets väggtjocklek mättes med en ultraljudbaserad tjockleksmätare på 12 olika ställen på röret och utav dem räknades ett aritmetiskt medelvärde. Från de olika mätningarnas avvikelser från medelvärdet erhölls en osäkerhet på 0.12 mm.

10.3 Flödets densitet

Densiteten för ångflödet har beräknats utgående från allmänna ångtabeller för ångtemperaturen och det ansoluta ångtrycket. Värdet för temperaturen som använts är det främre termoelementets värde plus 0.4 °C för att korrigera för rörväggens isolering. Ångan befann sig under mätningarna väldigt nära mättnadstemperaturen, så vid beräkningen av osäkerheten har bara ett positivt fel beaktats eftersom densiteten för ångan ändrar radiakalt när det går på nedre sidan av mättnadstemperaturen då densiteten antar värdet för mättat vatten. Densiteten som användes vid beräknandet av massflödet var densiteten för mättad ånga vid temperaturen tidigare presenterad. Summan av osäkerhetstermerna från temperatur- och tryckmätningarna är 0.0124 kg/m^3.

10.4 Total differential

För att granska de olika mätkällorna gemensamma inverkan på resultatet och mätnoggrannheten, så tillämpas partiella derivator för varje inverkande variabel och en total differential räknas ut som en summa av dessa för att fastställa en övre gräns för mätosäkerheten.

Samtliga resultat i det här arbetet har tagits fram med hjälp av transit-tidmetoden och därför börjas felgranskingen från volymflödesekvationen, som består av mätsträckans

volym dividerat med transit-tiden. Eftersom massflödet dock är det som är av större intresse, så multipliceras volymflödet med densiteten och som resultat erhålls då uttrycket

$$Q_m = Q_v \times \rho = \frac{L\pi\left(\frac{o}{2\pi} - w\right)^2 \times \rho}{\Delta t}, \tag{10.1}$$

där L är mätsträckans längd det vill säga avståndet mellan detektionspunkterna, o är rörets ytteromkrets, w är rörets väggtjocklek och Δt är transit-tiden och ρ är flödets densitet. De partiella derivatorna för varsin variabel fås genom att derivera utrycket med avseende på variabeln i fråga och beakta de övriga variablerna som konstanter. Antalet variabler är fem, vilket givetvis ger fem partiella derivator enligt följande

$$\frac{\partial Q_m}{\partial L} = \frac{\pi\left(\frac{o}{2\pi} - w\right)^2 \rho}{\Delta t}, \tag{10.2}$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial o} = \frac{L\left(\frac{o}{2\pi} - w\right)\rho}{\Delta t}, \tag{10.3}$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial w} = \frac{-2L\pi\left(\frac{o}{2\pi} - w\right)\rho}{\Delta t}, \tag{10.4}$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial \Delta t} = \frac{-\pi L\left(\frac{o}{2\pi} - w\right)^2 \rho}{\Delta t^2} \tag{10.5}$$

och

$$\frac{\partial Q_m}{\partial \rho} = Q_v. \tag{10.6}$$

När alla partiella derivator är klargjorda, så multipliceras deras absoluta värde med variabelns felmarginal och sedan räknas kvadratsumman av produkterna för att bestämma det totala felet enligt ekvationen

$$\Delta Q_m = \sqrt{\left(\left|\frac{\partial Q_m}{\partial L}\right| \Delta L\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Q_m}{\partial o}\right| \Delta o\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Q_m}{\partial w}\right| \Delta w\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Q_m}{\partial \Delta t}\right| \Delta(\Delta t)\right)^2 + \left(\left|\frac{\partial Q_m}{\partial \rho}\right| \Delta \rho\right)^2}. \tag{10.7}$$

Vid insättning av värden i de tidigare presenterade partialla derivatorna och summerandet av dem erhålls den totala osäkerheten **±0.00979 kg/s**. Det motsvarar ungefär **±1.51%** av det genomsnittliga massflödet under mätningen.
Dessutom vid jämförelse med anläggningens stationära flödesmätning så bör mA-signalens osäkerhet beaktas, vilket nu gjordes med att införa en osäkerhet på 0.15% av mätvärdet. I

Tabell 10.1 har samtliga felkällor inkluderats i en tabell enligt riktlinjerna från EA-4/02. Där kan man se att den utvidgade osäkerheten för mätningen är **±4.4%** då både de systematiska felen och slumpfelen har beaktats och deras summa multiplicerats med täckningsfaktorn 2.01 för att mätosäkerheten skall gälla för 95% av mätningarna.

Tabell 10.1 Osäkerhetskalkylering, Qcal står för den utförda referensmätningen och Qmeas är kontrollrummets signal från styrsystemet.

EA-4/02 enlig osäkerhetskalkylering

storhet	estimat		standard osäkerhet		sannolikhets fördelning	formel/förklaring	känslighets-faktor		osäkerhet till ursprungsstorheten	
Xi	xi		u(xi)		*		ci		ui(y)	
	Resultat jämfört med stysystemet (mA-signal)								↓ y=Qref ↓	
L	20.835	m	58.39	mm	rektangulär	$[\pi(c/2\pi\text{-}w)^2]/\Delta t \times \rho$	0.029	kg/ms	0.0017	kg/s
o	442	mm	0.73	mm	rektangulär	$L(c/2\pi\text{-}w)/\Delta t \times \rho$	2.981	kg/ms	0.0022	kg/s
w	4.87	mm	0.12	mm	rektangulär/normal	$-2L\pi(c/2\pi\text{-}w)/\Delta t \times \rho$	-18.732	kg/ms	-0.0022	kg/s
Δt	2.102	s	30.70	ms	rektangulär/normal	$[-\pi L(c/2\pi\text{-}w)^2]/\Delta t^2 \times \rho$	-0.292	kg/s^2	-0.0090	kg/s
ρ	4.594	kg/m^3	0.0124	kg/m^3	rektangulär/normal	Qv	0.139	m^3/s	0.0017	kg/s
									↓ y=ero ↓	
Qcal	0.637	kg/s	0.00979	kg/s		$-100\%*Qmeas/(Qcal)^2$	-154.46	%/kg/s	-1.51	%
Qmeas	0.627	kg/s	0.001	kg/s	normal	$100\%/Qcal$	156.94	%/kg/s	0.15	%
ur			1.59	%	normal		1		1.59	%
skillnad	**0.1**	%						$u_{sammansatt.}$	**2.20**	%
Beräkning av den utvidgade osäkerheten										
n eff=	384									
k=	2.01									
U=	**4.4**	**%**								

10.5 Felanalys för temperaturpuls i matarvattenlinje

Vid estimeringen av osäkerheten för temperaturpulsmetoden i matarvattenlinjen har samma tillvägagångssätt applicerats som användes i ånglinjen och därmed redan redogjorts för tidigare i det här kapitlet. Som resultat erhölls en dylik tabell som för ånglinjen där skillnaden mellan ångpannans flödesmätare och den utförda referensmätningens resultat samt mätningens osäkerhetsmarginal presenteras. Den största skillnaden i osäkerhetsanalysen mellan mätningen i ånglinjen och mätningen i matarvattenlinjen är att mätsträckan är ett rakt rörparti, det vill säga innehåller inga kurvor, vilket ånglinjen gjorde. Det sänker osäkerheten märkbart eftersom mätsträckan, L, kan mätas utan att flytta måttbandet emellan och några kurvor orsakar inte något extra hinder för en pålitlig mätning. En annan skillnad är transit-tiden, som är betydligt längre i matarvattenlinjen, ungefär 3 gånger så lång, det torde ur ett teoretiskt perspektiv ge mera ursäkt för låg mätnoggrannhet och minska osäkerheten, men det var inte fallet. På grund av de väldigt varierande resultaten beräknade med olika metoder i datoranalysen, är osäkerheten för transit-tiden förhållandevis hög, vilket helt har sin grund i att feltermen från datoranalysen av resultatet är såpass hög. Den större rörväggstjockleken leder även till en större fördröjning av temperaturvariationens detektion på rörets utsida och bidrar till en större osäkerhet i transit-tiden. Det förhållandevis låga antalet pulser är också en stor delorsak till den stora felmarginalen. Den systematiska osäkerheten för temperaturpulsmetoden i matarvattenlinjen landade på **±1.65%** och den totala osäkerheten **±5.7%** vilket innebär att

metoden i sin nuvarande form inte lämpar sig för utförandet av kalibreringsmätningar. Osäkerhetsanalysen är presenterad i siffror i Tabell 10.2.

Tabell 10.2 Osäkerhetskalkylering för matarvattenlinjen. Qcal står för den utförda referensmätningen och Qmeas är kontrollrummets signal från styrsystemet.

EA-4/02 enlig osäkerhetskalkylering

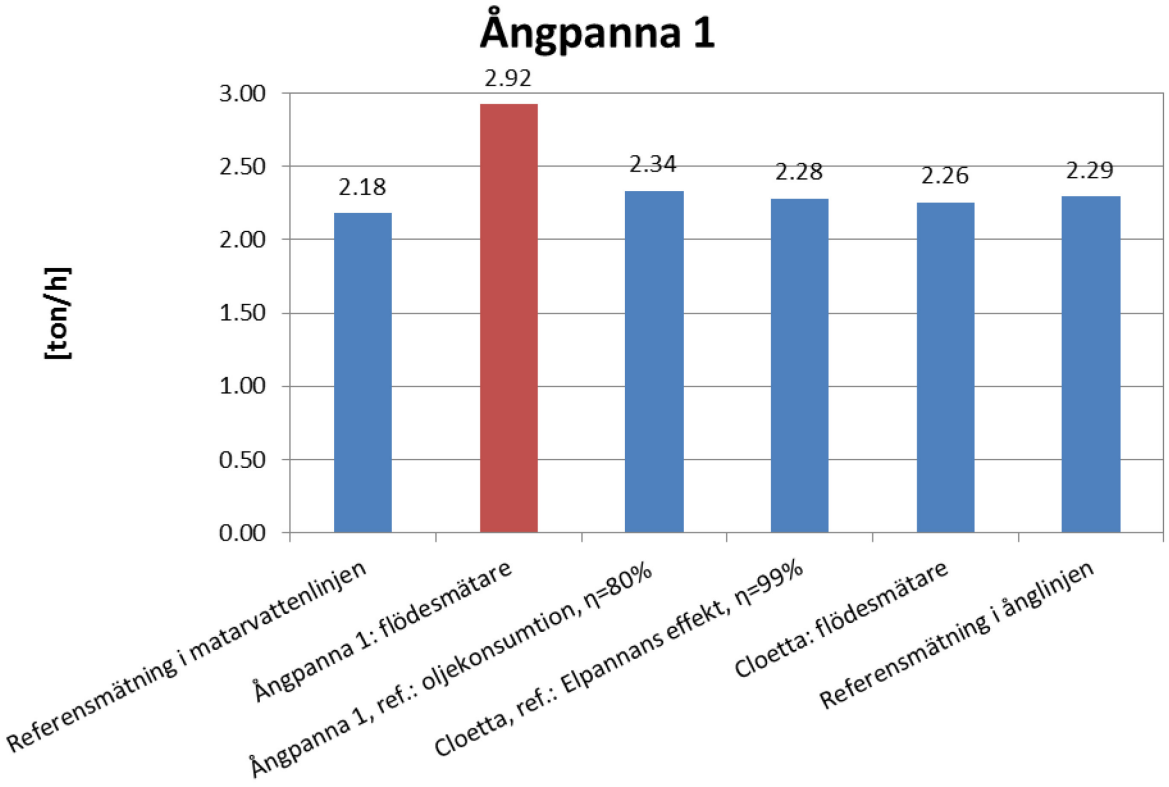
storhet	estimat		standard		sannolikhets	formel/förklaring	känslighets-		osäkerhet till	
			osäkerhet		fördelning		faktor		ursprungsstorheten	
Xi	xi		u(xi)		*		ci		ui(y)	
	Resultat jämfört med stysystemet (mA-signal)								↓ y=Qcal ↓	
L	2.535	m	3.07	mm	rektangulär	$[\pi(c/2\pi\text{-}w)^2]/\Delta t \times \rho$	0.200	kg/ms	0.0006	kg/s
o	151.7	mm	0.50	mm	rektangulär	$L(c/2\pi\text{-}w)/\Delta t \times \rho$	8.452	kg/ms	0.0042	kg/s
w	5.08	mm	0.05	mm	rektangulär/normal	$-2L\pi(c/2\pi\text{-}w)/\Delta t \times \rho$	-53.108	kg/ms	-0.0027	kg/s
Δt	5.385	s	46.00	ms	rektangulär/normal	$[-\pi L(c/2\pi\text{-}w)^2]/\Delta t^2 \times \rho$	-0.094	kg/s^2	-0.0043	kg/s
ρ	941.764	kg/m^3	1.2000	kg/m^3	rektangulär/normal	Qv	0.001	m^3/s	0.0006	kg/s
									↓ y=ero ↓	
Qcal	0.546	kg/s	0.00666	kg/s		-100% x Qmeas/(Qcal)	-248.29	%/kg/s	-1.65	%
Qmeas	0.739	kg/s	0.001	kg/s	normal	100%/Qcal	183.24	%/kg/s	0.20	%
ur			2.21	%	normal		1		2.21	%
skillnad	**34.1**	%						$u_{sammansatt.}$	**2.77**	%
Beräkning av den utvidgade osäkerheten										
n eff=	51									
k=	2.05									
U=	**5.7**	**%**								

11 Summering av mätresultat och sammanfattning

För att få en klarare bild av resultatet från mätningarna vid Tekniska Verkens ånganläggning i Ljungsbro, så har de sammanställts i ett par överskådliga stapeldiagram samt förklarats i ord. Dessutom presenteras i samband med figurerna spekulationer kring möjliga felkällor till de motstridigheter som finns bland resultaten. En kort sammanfattning av diplomarbetet följer efter resultatsummeringen.

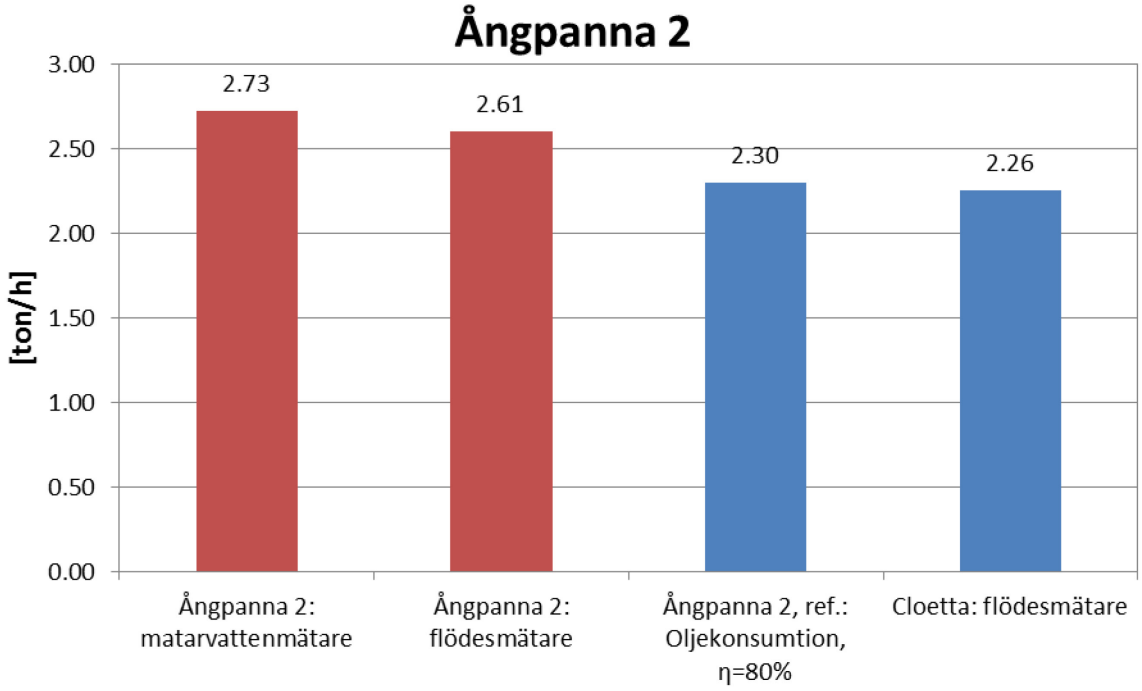
11.1 Summering av mätresultat

Resultaten är presenterade utgående den ångproduktionen som rådde vid referensmätningen med temperaturpulsmetoden i ånglinjen. Cloettas ångflödesmätning loggades i realtid under referensmätningen. Genom att granska oljekonsumtionen för samma tidpunkt, erhölls ett värde för pannans ångproduktion motsvarande en verkningsgrad på 80% för den oljeeffekten. Den nyinstallerade elångpannan är även inkluderad, med ett antagande av en verkningsgrad på 99%. Ångpannans flödesmätning är gjord utgående ifrån den relativa skillnaden mellan ångpannans och Cloettas flödesmätningar för den driftsituationen då all producerad ångas styrdes till Cloetta. Värdet för referensmätningen i matarvattenlinjen erhölls genom den relativa skillnaden mellan referensmätningens resultat och ångpannans flödesmätning. När samtliga av dessa ångflöden ställs mot varandra fås stapeldiagrammet i Figur 11.1. Så som i de tidigare presenterade resultaten konstaterats, så avviker pannans egen ångflödesmätning drastiskt från de övriga utförda mätningarna och kalkyleringarna.



Figur 11.1 Ångflödet vid Ångpanna 1 och, i serie med den, utförda mätningar.

Samma procedur utfördes för ångpanna 2, med den skillnaden att i matarvattenlinjen gjordes ingen referensmätning. Däremot hade ångpanna 2 en stationär matarvattenmätning som inkluderats i stapeldiagrammet i Figur 11.2. Skillnaden är mindre, men i samma riktning som för ångpanna 1. Det vill säga ångpannans flödesmätning visar mera än Flödesmätningen till Cloetta och referensmätningen i ånglinjen. Det som överraskar är att matarvattenmätningen visar ännu mera i förhållande till ångpannans flödesmätning. Enligt oljekonsumtionen och utgående från den estimerade ångproduktionen motsvarande 80% verkningsgrad är dock även för ångpanna 2 väl i linje med de övriga mätresultaten.



Figur 11.2 Ångflödet vid Ångpanna 2 och, i serie med den, utförda mätningar.

Möjliga orsaker till de stora avvikelserna är här på en spekulationsnivå och någon djupare analys av dem ingår därmed inte i diplomarbetet, utan lämnas kvar för vidare utredning. En sannolik orsak till avvikelsen i flödesmätningen är densitetskompenseringen. Data för hur densiteten kompenserats i flödesmätarna kunde inte nås, men till exempel för Ångpanna 1 gjordes en kortfattad jämförelseuträkning genom att använda densiteten för ångpannans maximala kapacitet. Ångpannans maximala kapacitet är 6.5 ton/h (204 °C, 16 bar) och vid det trycket och temperaturen är densiteten ca 8 kg/m^3, medan den under mätningarna var ca 4.5 kg/m^3. När man räknar förhållandet mellan dem och tar ut kvadratroten ur resultatet så får man en skillnad på 25%. Det skulle därmed förklara klart största delen av skillnaden mellan ångpannans flödesmätning och Cloettas flödesmätning som alltså var 29.5%. Möjligtvis ligger samma orsak bakom flödesmätningen vid Ångpanna 2. Densitetskompenseringen är dock fortsättningsvis oklar eftersom strypflänsens uträkningar inte finns tillgängliga. Varför matarvattenmätningen till Ångpanna 2 innehar samma stora fel i fröhållande till Cloettas flödesmätning är dock oklart. Mätaren kan ha något områdesfel eller dylikt, eftersom mätaren stannar på 1.12 ton/h trots att Ångpanna 2 inte är i bruk, men detta har inte granskats närmare.

11.2 Sammanfattning och slutsatser

Bakgrunden till diplomarbetet ligger i den redan länge aktuella digitaliseringstrenden, där allt mer data samlas in från hela tiden mer invecklade och avancerade processer för att kunna optimera och balansera råmaterial, energianvändning samt slut- och biprodukter inom industrin. En av de absolut viktigaste parametrarna ur ett kostnadsminimerings-perspektiv är energianvändningen på grund av att många processer inom industrin kräver stora mängder energi och det är i de flesta fall en direkt kostnad som utgör en stor del av slutproduktens totala produktionskostnad. Energikonsumtionen för en industriprocess består i normala fall av två delar, elektricitet och värme. Elektriciteten är givetvis alltid i samma form, men värmen kan variera, oftast är det dock frågan om ånga. Vattenånga utgör den klart största delen av energikonsumtionen inom industrin och det är bra att komma ihåg att största delen av elektriciteten också är producerad med hjälp av ånga. Det är bakomliggande orsaken till varför ång- och kondensatsystem är av så stort intresse och varför det också finns behov av en kartläggning på funktionaliteten hos dessa system.

Ång- och kondensatsystem består av produktion, distribution och konsumtion av ångan och uppsamling av kondensat samt dess retur till ångproduktionen. På stora anläggningar finns det processer som använder olika typer av ånga och den produceras därmed i flera olika trycknivåer, medan det på små anläggningar handlar om enstaka eller bara en trycknivå, vilken oftast är lågtrycksånga. Ångan kategoriseras som överhettad, mättad eller våt ånga, varav våt ånga är den mest utmanande ur ett mättekniskt perspektiv eftersom andelen ånga och kondensat ofta är okända. Flödesmätningarna är förstås väldigt viktiga för ångan, eftersom de berättar hur mycket ånga som produceras och konsumeras vid en anläggning. Ifall ångproducenten och -konsumenten är olika företag är det väldigt viktigt för faktureringen, att korrekt ångflöde är tillgängligt, men även ifall det är samma företag som producerar och konsumerar ångan är det viktigt att känna till den verkliga energikonsumtionen för en viss produkt eller vad kraftverkets verkningsgrad är.

För våt ånga är ångans kvalitet en viktig faktor för att bestämma ångans energiflöde, eftersom den anger hur stor del av flödet som är ånga och hur stor del som är kondensat, vilket har avsevärt lägre energiinnehåll än ångan. De redan tidigare utvecklade korrigeringsfaktorerna för våt ånga är i praktiken svåra att tillämpa eftersom de beror av ångans kvalitet, som i de allra flesta fall är helt okänd. Slutsatsen är därför, att ifall man vill försäkra sig om att ångmätningarna skall fungera, så bör ångan vara aningen överhettad vid mätningen eller så installeras en ångavskiljare innan flödesmätningen för att höja ångans kvalitet och där det finns behov av mättad eller våt ånga, så kan en liten mängd vatten injiceras i ångan efter ångmätningen, men innan användningen.

Kondensatet är viktigt att ta i beaktande eftersom en stor del av värmen som använts vid produktionen av ångan återfinns i returkondensatet och genom att utnyttja den energin kan stora besparingar göras vid produktionen av ny ånga. Besparingen utgörs inte bara av den värme-energi som är bundet i kondensatet utan även den energi som konsumerats vid matarvattnets behandling fås till godo. Vid kondensatfällor bildas även expansionsånga som innehåller mycket energi, vars exploatering är väldigt essentiellt för att åstadkomma en hög verkningsgrad för anläggningen.

Förutom en granskning av ång-kondensatsystem inkluderar diplomarbetet även en utredning för ångflödesmätningar exkluderande användningen av radioaktiva isotoper. Orsaken är att flödeskalibreringar i ånga som utförs på fältet, har gjorts med hjälp av ett

spårämne bestående av aktiva isotoper. Kalibreringen har utförts genom att mäta transit-tiden, alltså den tid det tar för spårämnet att röra sig en viss sträcka i ånglinjen. Volymflödet räknas utgående ifrån den volym som bildas mellan två detektionspunkter, där spårämnet detekteras och volymen divideras sedan med den erhållna transit-tiden. Eftersom massflödet är av intresse när man talar om ångflöden, så multipliceras volymflödet med flödets densitet, vilken påverkas av ångans tryck och temperatur.

Ånga används allmänt som energikälla även inom livsmedelsindustrin, vilken ställer krav på vad som får injiceras i processen, radioaktiva isotoper är givetvis inte tillåtet i dessa processer. Det leder till att en alternativ metod behövs för att säkerställa mätnings-kvaliteten i de ånglinjer som används vid produktionen av livsmedel eller livsmedels-förpackningar. Olika alternativ för det här ändamålet har i det här diplomarbetet evaluerats och diskuterats. Två metoder har även testats på fältet och dess resultat och felmarginal har kalkylerats, dessa metoder är temperaturpulsmetoden och luftpulsmetoden. Vad beträffar resultaten från de experimentellt testade metoderna fungerade inte luftpulsmetoden alls, troligen på grund av ångans omständigheter och luftens låga volymandel av flödet. Temperaturpulsmetoden testades såväl direkt i ånglinjen, vars flödesmätning krävde kvalitetssäkring, men även i matarvattenflödet i kombination med en massbalansanalys. Det här gav en stor mängd mätresultat som analyserades med ett antal olika metoder. Resultaten från ånglinjen var relativt entydiga och dessutom väldigt överens med resultaten från matarvattenlinjen och massbalansanalysen mellan ångmätningarna. Som en extra försäkran av resultatens tillförlitlighet, analyserades även ångpannornas verkningsgrader före och efter massflödeskorrigeringen.

Vid evalueringen av de testade flödesmätningsmetoderna är givetvis osäkerheten, som består av de systematiska och slumpmässiga felen, den klart viktigaste faktorn. En bra metod innebär en låg osäkerhet, eftersom en hög mätnoggrannhet är det främsta målet med alla typer av mätningar. Det är en hel rad faktorer som påverkar osäkerheten i flödesmätningen med temperaturpulsmetoden. Mätning av transit-tiden och rörvolymen mellan detektionspunkterna är det som metoden bygger på, vilket leder till att osäkerheten vid bestämmandet av dem utgör de största osäkerhetskällorna för mätningen, men även bestämmandet av densiteten innefattar en osäkerhet. För mätningen i ånglinjen visade sig mätningen av transit-tiden vara den största felkällan, men för mätningen i matarvattenlinjen gav rörets omkrets och vägtjocklek upphov till ett lika stort systematiskt fel som mätningen av transit-tiden. Det beror på att matarvattenlinjen var ett väldigt litet rör i förhållande till mätnoggrannheten som uppnås med ett måttband och rörets vägg var tjock i förhållande till innerdiametern.

För temperaturpulsmetoden kan allmänt dras den slutsatsen att ångflödeskalibreringar kan utföras med den, men samma noggrannhet som är tillgänglig med radioaktiva isotoper kan inte uppnås. Den systematiska osäkerheten för temperaturpulsmetoden i ånglinjen var 1.5%, men standardavvikelsen var väldigt stor vilket ökade den totala felmarginalen till 4.4%. Främsta orsaken är att temperaturmätningen på rörets utsida orsakar fördröjningar vilka i sin tur ger upphov till en större osäkerhet för mätningen av transit-tiden än vad loggningen av radioaktiva isotoper gör. En större osäkerhet i mätningen av transit-tiden får även den följden att mätsträckan bör vara längre för att den totala osäkerheten inte skall bli för stor, det leder till utmaningar att hitta en rak mätsträcka. Finns inte en rak mätsträcka tillgänglig, betyder det att volymmätningen drabbas av en större osäkerhet på grund av kurvatur och eventuella mätinstrument på mätsträckan. Slutsatsen kan ändå dras att i de

ånglinjer i vilka radioaktiva isotoper inte får användas, så är temperaturpulsmetoden en möjlig metod för att göra flödesmätningar för referens till den stationära flödesmätaren. Temperaturpulsmetoden kommer att fortsätta utvecklas genom att koppla flera termoelement antingen i serie eller parallellt och fästa dem på olika sidor av röret. En seriekoppling skulle resultera i en större amplitud på pulsen, medan en parallellkoppling beskriver ett medelvärde av temperaturgivarna. Metoden kommer även att granskas parallellt med radioaktiva isotoper och på så vis fås en starkare referenspunkt.

12 Källförteckning

Armatec. 2014. Handbok: Ånga och Kondensat. 2. uppl. Tillgänglig från: http://www.armatec.com/upload/handbocker/Handbok_%C3%85nga_Kondensat.pdf.

Baker, R.C. 2002. An introductory guide to flow measurement. John Wiley & Sons.

Batra, R. 2011. Flow measurement common mistakes, corrective actions. The International Society of Automation. Tillgänglig från: https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-publications/intech-magazine/2011/april/special-section-flow-level-flow-measurement-common-mistakes-corrective-actions/.

Bhattacharjee, S. 2014. Vapour & Combined Power Cycle. Rankine Cycle: The Ideal Cycle For Vapour Power Cycles. Tillgänglig från: http://sounak4u.weebly.com/vapour--combined-power-cycle.html.

Bilaniuk, N. och WONG, G.S.K. 1993. Speed of sound in pure water as a function of temperature. Journal of the Acoustical Society of America 93(3). [Hämtad 30.06.2016], s. 1609-1612 DOI 10.1121/1.406819. Tillgänglig från: https://www2.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0027469612&partnerID=40&md5=4015cd74e5bbde19d37385ddca268f86

Blotnicki, W., Wiora, J. och Walus, S. 2013. Tracer flowmeter with a conductive sensor. Przegląd Elektrotechniczny 89(3a). s. 293-297.

Campos, S.R.V., Balino, J.L., Slobodcicov, I., Filho, D.F. och Paz, E.F. 2014. Orifice plate meter field performance: Formulation and validation in multiphase flow conditions. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 58. s. 93-104 ISSN 0894-1777. Tillgänglig från: http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0894177714001599.

Dong, F., C. Tan, W. Li och F. Zhang. 2009. Flow rate measurement of oil-water two-phase flow based on V-cone flow meter. Anonymous Journal of Physics: Conference Series.

EA Laboratory Committee. 2013. EA-4/02 • Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration. European Accreditation, 18.10.2013 [Hämtad 7.11.2016]. Tillgänglig från: http://www.european-accreditation.org/publication/ea-4-02-m-rev01-september-2013.

Emerson. 2014. Rosemount 1495 Orifice Plate, 1496 Orifice Flange Union. Reference Manual. Rosemount. [Hämtad 07.07.2016]. Tillgänglig från: http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rosemount%20documents/00809-0100-4792.pdf.

Endress+Hauser. 2016. Proline Prowirl 200. The vortex revolution for steam, gas and liquid. [Hämtad 27.07.2016]. Tillgänglig från: http://www.se.endress.com/sv/Field-instruments-overview/Flow-measurement-product-overview/Vortex-flowmeter-Prowirl-F200.

engineeringexcelspreadsheets.com. [Hämtad 09.06.2016] Tillgänglig från: http://www.engineeringexcelspreadsheets.com/2011/03/excel-spreadsheets-for-orifice-and-venturi-flow-meter-calculations/.

Fagervik, K. 2009. Processindustriell Mätteknik. Tekniska fakulteten vid Åbo Akademi.

FINAS. 2016. Finnish Ackreditation Service. 11.03.2016. [Hämtad 01.08.2016] Tillgänglig från: https://www.finas.fi/sites/sv/ackreditering/Sidor/default.aspx.

Finlands officiella statistik., 2014. Statistik över industrins energianvändning [e-publikation]. Helsinki: Statistikcentralen [Hämtad 27.06.2016]. ISBN 1798-7768. Tillgänglig från: http://www.stat.fi/til/tene/2014/tene_2014_2015-11-05_tie_001_sv.html.

Gasum. 2014. Maakaasun mittaaminen. [Hämtad 22.09.2016] Tillgänglig från: http://gasum.fi/Kaasutietoutta/Maakaasu/Maakaasun-mittaus/.

General Electric. 2014. DigitalFlow™ GC868 (Clamp-On Gas Ultrasonic Flow Meter). [Hämtad 15.08.2016] Tillgänglig från: https://www.gemeasurement.com/flow-meters/ultrasonic-gas/digitalflow-gc868-clamp-on-gas-ultrasonic-flow-meter.

Hirtz, P.N., Kunzman, R.J., Broaddus, M.L. och Barbitta, J.A. 2001. Developments in tracer flow testing for geothermal production engineering. Geothermics 30(6) s. 727-745 ISSN 0375-6505. Tillgänglig från: http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0375650501000232

Hodges, C., Britton, C. , Johansen W. och Steven, R. 2009. Cone DP meter calibration issues Anonymous North Sea Flow Measurement Workshop.

Hull, D.E. 1966. Fluid flow measurement method using a radioactive tracer material. US: Google Patents. ISBN US3261976 A.

Hussein, I.B. och Owen, I. 1991. Calibration of flowmeters in superheated and wet steam. Flow Measurement and Instrumentation, 2(4) s. 209-215 ISSN 0955-5986. Tillgänglig från: http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/095559869190003A

Hyvönen, M. 2012. Sellu-ja paperi-integraatin lauhdetase. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Indmeas.2016. Indmeas arkiv för gammal mätdata från ångkalibreringar.

Indmeas.2015. Ohje virtausmittarin kalibroinnista kulkuaikamenetelmällä. Sinko, P.

ISO 2975-7. 1977. Measurement of water flow in closed conduits - Tracer methods - Part 7: Transit time method using radioactive tracers. International Standard Organization, 01.12.1977 [Hämtad 08.07.2016]. Tillgänglig från: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=8034.

ISO 5167-1. 2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices. International Standard Organization. Tillgänglig från: https://www.iso.org/obp/ui/#home.

Kotiaho, V.W., Lampinen, M.J. och Seppälä, A. 2004. Termodynamiikan ja lämmönsiirto-opin taulukoita. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, sovellettu termodynamiikka ISBN 951-22-7259-8.

Kurtus, R. 2016. Speed of Sound in a Gas. 17.02.2016. [Hämtad 03.08.2016] Tillgänglig från: http://www.school-for-champions.com/science/sound_speed_gas.htm#.V6HsgbiLSUk.

Lag om transport av farliga ämnen. 1994. Lag om transport av farliga ämnen 719/1994. , 02.08.1994, [Hämtad 08.07.2016]. Tillgänglig från: http://www.finlex.fi/sv/laki/alkup/1994/19940719.

Lide, F., Tao, Z. och Ningde, J. 2007. A comparison of correlations used for Venturi wet gas metering in oil and gas industry. Journal of Petroleum Science and Engineering, 57(3-4) s. 247-256 ISSN 0920-4105. Tillgänglig från: http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0920410506002774

Meng, Z., Huang, Z., Wang, B., Ji, H., Li, H. och Yan, Y. 2010. Air-water two-phase flow measurement using a Venturi meter and an electrical resistance tomography sensor. Flow Measurement and Instrumentation 21(3). [Hämtad 28.06.2016], s. 268-276 Tillgänglig från: https://www2.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77955844704&partnerID=40&md5=ef9b4db0782cab3a1d4f602a45d7b337

Menzies, M. och Graber, W. 1999. Measurement best practices for improving chemical plant safety, availability and efficiency (DP flow gas and steam examples). New York: Emerson Process Management.

Motiva. 2015. Energiatehokas höyry- ja lauhdejärjestelmä. Helsinki 30.07.2015. [Hämtad 27.06.2016]. Tillgänglig från: http://www.motiva.fi/files/10350/Energiatehokas_hoyry-_ja_lauhdejarjestelma_VERKKOKOULUTUSAINEISTO_2015.pdf.

Motiva. 2014. Energian Loppukäyttö. Tillgänglig från: http://www.motiva.fi/taustatietoa/energiankaytto_suomessa/energian_loppukaytto.

Motiva. 2012. Höyry-lauhde-siirtojärjestelmä. Energiatehokkuuden mittausopas. 01.10.2012

Nave, C.R. 2016. Hyperphysics: Sound Speed in Gases. Georgia State University: Tillgänglig från: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/souspe3.html.

Owen, I. och Hussein, I.B. 1991. Wet steam flowmeter correction factors. Flow Measurement and Instrumentation 2(2) s. 139-140 ISSN 0955-5986. Tillgänglig från: http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/095559869190024L
Paton, R. 2005. Calibration and Standards in Flow Measurement. In: Handbook of Measuring System Design. John Wiley & Sons, Ltd ISBN 9780471497394.

PerkinElmer. 2000. An Introduction to Fluorescence Spectroscopy. Buckinghamshire(UK): PerkinElmer Ltd [Hämtad 11.08.2016]. Tillgänglig från: http://www.chem.uci.edu/~dmitryf/manuals/Fundamentals/Fluorescence%20Spectroscopy.pdf.

Pulp-paperworld., 2012. UPM Tervasaari Mill's Rebuilt Paper Machine 8 Starts After Renewal.
Tillgänglig från:
http://www.pulp-paperworld.com/european-news/item/2484-upm-tervasaari-mill%E2%80%99s-rebuilt-paper-machine-8-starts-after-renewal.

Rossiter, A.P. och Jones, B.P. 2015. Energy Management and Efficiency for the Process Industries. John Wiley & Sons ISBN 978-1-118-83825-9.

Šafarik, P., Novy, A., Jicha, D. och Hajsman, M. 2015. On the speed of sound in steam. Acta Polytechnica 55(6). [Hämtad 03.08.2016], s. 422-426 Tillgänglig från: https://www2.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84953304986&partnerID=40&md5=67da5c39722ca861b58f9505cf6ac3f3

Spirax Sarco. 2016. The Steam and Condensate Loop. Tillgänglig från: http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/introduction/the-steam-and-condensate-loop.aspx.

Strålskyddslag. 1991. Finlex. Strålskyddslag 592/1991. 27.03.1991. [Hämtad 08.07.2016]. Tillgänglig från: http://www.finlex.fi/sv/laki/alkup/1991/19910592

Takeuchi, T. och Murai, Y. 2009. Flowmetering of natural gas pipelines by tracer gas pulse injection. Measurement Science and Technology 21(1).

Tekniska Verken. 2016. Verksamhetsredovisning och Årsredovisning 2015. Linköping [Hämtad 10.06.2016]. Tillgänglig från: http://2015.tekniskaverken.se/Tekniska_verken_arsredovisning_farg.pdf.

The Babcock & Wilcox Company. 2005. Steam : its generation and use. S.C. Stultz and J.B. Kitto. 41. uppl. Barberton, Ohio, U.S.A. The Babcock & Wilcox Company ISBN 0-9634570-1-2.

Thermocoupleinfo. 2011. Types of thermocouples. US: REOTEMP Instrument Corporation. Tillgänglig från: http://www.thermocoupleinfo.com/.

TLV. 2016. TLV - A Steam Specialist Company. Tillgänglig från: http://www.tlv.com/global/UK/products/.

Trevathan, V.L. 2006a. A Guide to the Automation Body of Knowledge. 2. uppl. Pennsylvania State University: ISA, The Instrumentation, Systems, and Automation Society.

Trevathan, V.L. 2006b. Process Instrumentation. Isa.

TUV NEL. 2010. Good Practice Guide: An Introduction to Wet-Gas Flow Metering. NEL, 08.03.2010. [Hämtad 26.06.2016]. Tillgänglig från: http://www.tuvnel.com/_x90lbm/An_Introduction_to_Wet-Gas_Flow_Metering.pdf.

TUV NEL. 2004. A Review of Steam Flowmetering Technology. London: NEL.

UPM. 2016. www.upm.fi.

Venugopal, A., Agrawal, A. och Prabhu, S.V. 2011. Review on vortex flowmeter—Designer perspective. Sensors and Actuators A: Physical 11 170(1-2). s. 8-23 ISSN 0924-4247. Tillgänglig från: http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0924424711003736

Wang, T. och Baker, R. 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 40. s. 99-123.

wikipedia.org. Richard Mollier. 30.03.2016. [Hämtad 22.06.2016] Tillgänglig från: https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Mollier.

Wikstén, R. 2009. Lämpövoimaprosessit (572). 4. uppl. Helsinki: Teknillinen korkeakoulu ISBN 978-951-672-365-8.

Yoder, J. 2010. Understanding Vortex Flow Measurement. Flow Control Solutions for Fluid Movement, Measurement and Containment. 15.02.2010. Tillgänglig från: http://www.flowcontrolnetwork.com/understanding-vortex-flow-measurement/.

Zhang, P. 2010. Advanced industrial control technology. William Andrew.

Zheng, X., He, D., Yu, Z. och Bai, B., 2016. Error analysis of gas and liquid flow rates metering method based on differential pressure in wet gas. Experimental Thermal and Fluid Science 79(12), s. 245-253 ISSN 0894-1777. [Hämtad 30.11.2016] Tillgänglig från: http://www.sciencedirect.com.libproxy.aalto.fi/science/article/pii/S0894177716301893

Bilaga 1: Resultat från temperaturpulsmätning i ånglinje

Puls	Steg	sek	m3/s	m3/kg	Qcal	Qmeas	Fel-%	
1	248	2.48	0.113152	0.216253	1.883661	1.7214	-8.61413	
2	210	2.1	0.133627	0.219258	2.194028	1.9473	-11.2454	
3	223	2.23	0.125837	0.219393	2.064848	2.1389	3.58634	
4	221	2.21	0.126976	0.218578	2.091306	1.954	-6.56558	
5	266	2.66	0.105495	0.217032	1.74989	1.6684	-4.65687	
6	205	2.05	0.136886	0.217915	2.26139	1.6566	-26.7442	
7	273	2.73	0.10279	0.21803	1.697217	1.6767	-1.20887	
8	232	2.32	0.120956	0.220005	1.979225	2.0312	2.626025	
9	206	2.06	0.136222	0.21905	2.238749	2.1352	-4.62531	
10	150	1.5	0.187078	0.221514	3.040349	2.3408	-23.0088	
11	173	1.73	0.162206	0.222	2.630372	2.4984	-5.01723	
12	196	1.96	0.143172	0.221547	2.326452	2.5102	7.898211	
13	226	2.26	0.124167	0.221125	2.021481	2.469	22.1382	
14	208	2.08	0.134912	0.217388	2.234176	2.3975	7.310258	
15	206	2.06	0.136222	0.21581	2.272361	2.1826	-3.95013	
16	193	1.93	0.145397	0.216795	2.414403	2.1818	-9.63398	
17	189	1.89	0.148475	0.217673	2.455553	2.2475	-8.47277	
18	185	1.85	0.151685	0.218725	2.49659	2.3092	-7.50586	
19	264	2.64	0.106294	0.220244	1.737437	2.4804	42.76201	
20	173	1.73	0.162206	0.218262	2.675417	2.5962	-2.96091	
21	194	1.94	0.144648	0.215159	2.420221	2.2086	-8.74387	
22	190	1.9	0.147693	0.216387	2.457152	2.1101	-14.1241	
23	173	1.73	0.162206	0.217985	2.678821	2.1828	-18.5164	
24	105	1.05	0.267254	0.21955	4.382207	2.4246	-44.6717	
25	193	1.93	0.145397	0.218924	2.390927	2.5333	5.954723	
26	174	1.74	0.161274	0.217648	2.667545	2.4908	-6.62574	
27	221	2.21	0.126976	0.220145	2.07642	2.398	15.48722	
28	156	1.56	0.179883	0.220389	2.938346	2.49	-15.2584	
29	226	2.26	0.124167	0.221507	2.017999	2.6758	32.59668	
30	190	1.9	0.147693	0.220101	2.415694	2.6709	10.56451	
31	143	1.43	0.196236	0.21911	3.224174	2.7895	-13.4817	
32	144	1.44	0.194873	0.217766	3.221546	2.6432	-17.9524	
33	503	5.03	0.055789	0.21947	0.91511	2.542	177.7807	
34	269	2.69	0.104319	0.217022	1.730452	1.6748	-3.21606	
35	202	2.02	0.138919	0.217951	2.294593	1.6587	-27.7127	
36	278	2.78	0.100941	0.218097	1.666182	1.68	0.829296	
37	230	2.3	0.122007	0.220055	1.995986	2.0322	1.814319	
38	213	2.13	0.131745	0.219048	2.1652	2.1347	-1.40863	
39	176	1.76	0.159442	0.221455	2.591896	2.3325	-10.008	
40	210	2.1	0.133627	0.221993	2.166999	2.5059	15.63921	
41	189	1.89	0.148475	0.221526	2.412845	2.5092	3.993411	
42	226	2.26	0.124167	0.22117	2.021071	2.4637	21.90073	
43	196	1.96	0.143172	0.21766	2.367999	2.4082	1.697694	
44	202	2.02	0.138919	0.215779	2.317696	2.1774	-6.05326	
45	195	1.95	0.143906	0.216825	2.389313	2.1836	-8.60971	
46	196	1.96	0.143172	0.217843	2.366016	2.2569	-4.61179	
47	209	2.09	0.134267	0.218758	2.209568	2.3107	4.577011	
48	237	2.37	0.118404	0.220248	1.935338	2.4708	27.66762	
49	152	1.52	0.184616	0.215128	3.089416	2.189	-29.1452	
50	197	1.97	0.142445	0.216479	2.368832	2.1156	-10.6902	
51	168	1.68	0.167034	0.217736	2.761697	2.173	-21.3165	
52	109	1.09	0.257447	0.219707	4.218392	2.4087	-42.9	
53	188	1.88	0.149264	0.218977	2.453914	2.5351	3.308432	
54	172	1.72	0.163149	0.217558	2.69969	2.4873	-7.8672	
55	192	1.92	0.146155	0.219802	2.393782	2.3507	-1.79974	
56	153	1.53	0.18341	0.220204	2.99847	2.4713	-17.5813	
57	222	2.22	0.126404	0.221366	2.055665	2.6746	30.10872	
58	184	1.84	0.152509	0.220042	2.495129	2.6683	6.94036	
59	151	1.51	0.185839	0.219095	3.053563	2.7881	-8.69354	
60	139	1.39	0.201883	0.21804	3.333233	2.626	-21.2176	
61	223	2.23	0.125837	0.215337	2.103748	2.3143	10.00842	

Puls	Steg	sek	m3/s	m3/kg	Qcal	Qmeas	Fel-%	
62	236	2.36	0.118906	0.215544	1.985949	2.414	21.55399	
63	239	2.39	0.117413	0.215873	1.958033	2.5028	27.82213	
64	253	2.53	0.110916	0.214609	1.860579	2.4346	30.85171	
65	246	2.46	0.114072	0.213092	1.927142	2.346	21.73467	
66	245	2.45	0.114538	0.210016	1.963354	2.1464	9.323129	
67	201	2.01	0.13961	0.211203	2.379693	2.2182	-6.78628	
68	224	2.24	0.125275	0.212219	2.125124	2.2511	5.927927	
69	215	2.15	0.13052	0.212835	2.207678	2.2605	2.392641	
70	261	2.61	0.107516	0.211851	1.827026	2.1454	17.42579	
71	220	2.2	0.127553	0.212189	2.164072	2.1102	-2.48939	
72	172	1.72	0.163149	0.214198	2.742027	2.1664	-20.9928	
73	165	1.65	0.170071	0.217848	2.810477	2.3851	-15.1354	
74	167	1.67	0.168034	0.218325	2.770749	2.4433	-11.8181	
75	224	2.24	0.125275	0.217191	2.076474	2.3604	13.67344	
76	203	2.03	0.138235	0.216704	2.29643	2.2935	-0.12761	
77	208	2.08	0.134912	0.214938	2.259644	2.1613	-4.35219	
78	194	1.94	0.144648	0.21957	2.371605	2.3842	0.531075	
79	210	2.1	0.133627	0.219197	2.194635	2.41	9.813245	
80	288	2.88	0.097436	0.219488	1.598133	2.4472	53.12872	
81	213	2.13	0.131745	0.217404	2.181569	2.2775	4.397345	
82	192	1.92	0.146155	0.218735	2.405455	2.3129	-3.84773	
83	246	2.46	0.114072	0.220645	1.861173	2.5831	38.78878	
84	148	1.48	0.189606	0.219248	3.113281	2.5544	-17.9515	
85	204	2.04	0.137557	0.218033	2.27125	2.4364	7.271314	
86	237	2.37	0.118404	0.217468	1.960078	2.3649	20.65334	
87	205	2.05	0.136886	0.216706	2.274006	2.3255	2.264471	
88	277	2.77	0.101306	0.216269	1.68633	2.2071	30.88187	
89	238	2.38	0.117906	0.214817	1.975926	2.0857	5.555594	
90	192	1.92	0.146155	0.219905	2.392656	2.4186	1.0843	
91	222	2.22	0.126404	0.217745	2.089849	2.3129	10.67309	
92	206	2.06	0.136222	0.215854	2.271898	2.1231	-6.54949	
93	241	2.41	0.116439	0.214808	1.951416	2.0092	2.961109	
94	240	2.4	0.116924	0.215895	1.949678	2.0061	2.893903	
95	194	1.94	0.144648	0.218446	2.383805	2.1771	-8.67123	
96	207	2.07	0.135564	0.216042	2.258956	2.064	-8.63036	
97	250	2.5	0.112247	0.215057	1.878984	1.9727	4.987604	
98	241	2.41	0.116439	0.214553	1.95373	1.8881	-3.35921	
99	253	2.53	0.110916	0.214615	1.860529	1.8447	-0.8508	
100	248	2.48	0.113152	0.216946	1.87764	1.9709	4.966882	
101	235	2.35	0.119412	0.217864	1.973167	2.0573	4.263848	
102	216	2.16	0.129915	0.216011	2.165144	1.9437	-10.2277	
103	243	2.43	0.11548	0.215363	1.930366	1.8763	-2.80084	
104	277	2.77	0.101306	0.215138	1.695195	1.8292	7.90496	
105	223	2.23	0.125837	0.216597	2.091509	1.8673	-10.72	
106	195	1.95	0.143906	0.218993	2.365654	2.053	-13.2164	
107	214	2.14	0.131129	0.221061	2.13546	2.2202	3.968234	
Medelvärden		**2.108879**	**0.138755**	**0.217689**	**2.29347**	**2.257633**		
		Volym	**0.280617**	**m3**	**Medelfel**		**0.114733**	**%**
					Stdev		**16.37865**	**%**
					Pulsantal		**107**	
					95% konfidensintervall		**3.103376**	**%**
						Resultat +0.11 +-3.10 %		

Bilaga 2: Resultat från temperaturpulsmätning i matarvattenlinje

Resultat från flödesmätning i matarvattenlinjen				
Puls	**Qmeas**	**Qref**	**Fel %**	
1	3.0307	1.952538	55.21845	
2	2.7743	2.020585	37.30181	
3	2.7339	2.218385	23.23827	
4	2.6001	2.140935	21.44695	
5	2.5614	2.072782	23.57302	
6	2.5798	2.02851	27.1771	
7	2.6649	2.102051	26.77618	
8	2.8357	2.044359	38.7085	
9	2.6662	1.956131	36.29966	
10	2.5629	1.94155	32.00281	
11	2.5565	1.813275	40.98797	
12	2.4655	1.959829	25.80178	
13	2.3705	1.755266	35.05072	
14	2.7286	1.720504	58.59311	
15	2.7968	1.855223	50.75274	
16	2.7428	2.05651	33.37156	
17	2.5461	1.822785	39.68187	
18	2.5949	1.937957	33.89874	
19	2.6543	2.032419	30.59805	
20	2.5631	2.008962	27.58328	
21	2.4272	1.825955	32.92772	
22	2.3528	1.956131	20.27824	
Medeltal	2.627682	1.964666		
Medelfel			**34.14857**	**%**
Standardavvikelse			**10.35198**	**%**
Antal pulser			**22**	
95% konfidensintervall			**4.325737**	**%**