



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Bestemmelse av det teoretiske spillvarmepotensialet i en industriell prosess

Determination of the theoretical waste heat potential
of an industrial process

Cecilie Borgen

Maskin, prosess- og produktutvikling (MPP)

Forord

Denne gradsoppgaven er skrevet i forbindelse med mitt masterstudium i maskin, prosess- og produktutvikling. Det har vært spennende og utfordrende å arbeide med dette prosjektet. Studietiden ved NMBU har vært fantastisk, og jeg tar med meg mange gode minner herfra.

I et svært utfordrende år er det på sin plass å takke venner og familie for god støtte og godt selskap, ingen nevnt, ingen glemt. Jeg ønsker likevel å rette en spesiell takk til mine veiledere Odd Ivar Lekang og Håkon Hoel Olsen fra NMBU, og David Andre Grimsøen Vaaler fra Borregaard, for god hjelp og tålmodighet. Til sist ønsker jeg å takke Ole Jørgen Østby, dette hadde ikke vært mulig uten din hjelp.

Denne gradsoppgaven dediseres til min kjære pappa, Jan Robert Robertsen.

Enhver lidenskap starter med en gnist, takk for at du delte din med meg.

Cecilie Borgen

Cecilie Borgen

Sarpsborg 17.08.2020

Sammendrag

For å begrense klimaendringene som konsekvens av økte klimagassutslipp er det viktig å sikre ansvarlig forbruk og produksjon. Dette innebærer blant annet å redusere energibruk i industriell produksjon. Dette kan gjøres ved å identifisere overskuddsenergi som ikke blir benyttet, og omsette denne til nyttig arbeid, dette kalles spillvarmegjenvinning. Det finnes en rekke ulike teknologier som kan omsette spillvarmeenergi til nyttig arbeid, eller til en energiform med høyere energikvalitet. I denne gradsoppgaven er det undersøkt om det finnes et teoretisk potensiale for spillvarmegjenvinning i en ny prosess i avdelingen kokeriet for bedriften Borregaard. Borregaard foredler grantømmer til ulike biobaserte produkter, og har sitt hovedkontor i Sarpsborg. Resultatene indikerer at det er et teoretisk energipotensiale for spillvarmegjenvinning i den nye prosessen. De mange forenklingene og antagelsene som er gjort i oppgaven gjør resultatene usikre, og i videre arbeid er det derfor anbefalt å gjøre grundigere undersøkelser av det tekniske og økonomiske spillvarmepotensialet med et mer detaljert datasett fra dagens produksjon.

Abstract

To limit the climate changes that happens as a consequence of increased greenhouse gas emissions, it is important to ensure sustainable consumption and production patterns. This amongst other things includes reducing the energy consumption of industrial production. This can be achieved by identifying surplus energy that is not being utilized, and convert this into useful work, this is called waste heat recovery. There are several different technologies available that can convert waste heat energy into useful work, or into a form of energy that is of a higher quality. In this thesis it has been investigated whether there is a theoretical potential for waste heat recovery in a new process in a department called kokeriet for the company Borregaard. Borregaard refines timber of spruce into different biobased products, and has its main office in Sarpsborg. The results indicate that there is a theoretical energy potential for waste heat recovery in the new process. The many simplifications and assumptions made in the calculations makes the results uncertain, and in future studies it is recommended that there should be made more thorough investigations of the technical and economical waste heat potential with the use of a more detailed dataset from the current production.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag.....	II
Abstract.....	III
Innholdsfortegnelse.....	IV
1. Introduksjon	1
1.1. Bakgrunn	1
1.2. Bedrift.....	3
1.3. Oppgavens omfang og begrensninger	5
Problemstilling.....	5
Delmål.....	5
Begrensninger	5
2. Teori	6
2.1. Energi	6
Energikilder	6
Energikvalitet	6
Energibærere	7
Varmeoverføringsprinsipper	7
Faseoverganger og fasediagrammer.....	8
Spillvarme	8
Termodynamiske sykluser.....	9
2.2. Viktig prosessutstyr	10
2.2.1. Rørsystem	10

2.2.2.	Måleutstyr.....	10
2.2.3.	Pumper.....	13
2.2.4.	Kompressorer.....	15
2.2.5.	Sparger.....	16
2.2.6.	Varmevekslere.....	17
2.3.	Teknologi for spillvarmeutnyttelse - Oppvarming.....	22
2.3.1.	Direkte varmeveksling.....	22
2.3.2.	Varmpepumpe.....	22
2.4.	Teknologi for spillvarmeutnyttelse - Kraftproduksjon	23
2.4.1.	Termodynamiske sykluser	23
	Carnotsyklus.....	23
	Rankinesyklus.....	25
	Organisk Rankinesyklus (ORC)	25
	Kalinasyklus.....	26
2.4.2.	Direkte elektrisk konversjon.....	26
	Termoelektrisk	26
	Piezoelektrisk.....	27
	Termoionisk.....	27
	Termo-fotovoltaisk.....	27
2.5.	Teknologi for spillvarmeutnyttelse - Termisk energilagring	29
2.5.1.	Følbar energilagring	29
2.5.2.	Latent energilagring	29
2.5.3.	Kjemisk energilagring	30
2.6.	Prosjekt	32

2.6.1.	Bedrift	32
	Avdelinger og prosesser ved Borregaard	32
	Borregaards primærråstoff.....	33
	Prosessbeskrivelse kokeriet	34
	Bedriftens visjon for prosjekt i kokeriet for fjerning av SO ₂	35
	Et mulig oppsett av prosjektets spillvarmegjennvingssystem.....	37
2.6.2.	Teoretisk grunnlag for beregninger	38
3.	Metode.....	40
3.1.	Undersøkelse av energipotensial.....	40
3.1.1.	Masse og energibalanse i buffertank 1 og flashtank.....	42
3.1.2.	Estimert energibruk på dampproduksjon av elektrisitet.....	43
3.1.3.	Estimert energibruk på dampproduksjon av spillvarme.....	43
	Liste over forenklinger og antagelser som er gjort:.....	43
4.	Resultat.....	46
4.1.	Undersøkelse av energipotensial.....	46
4.1.1.	Masse- og energibalanse i buffertank 1 og flashtank	46
4.1.2.	Estimert energibruk på dampproduksjon av elektrisitet.....	46
4.1.3.	Estimert energibruk på dampproduksjon av spillvarme.....	47
5.	Diskusjon.....	49
5.1.	Drøfting av resultater	49
5.2.	Drøfting av forsøksoppsett	50
5.2.1.	Antagelser og forenklinger av systemutgangspunkt.....	50
5.2.2.	Antagelser og forenklinger av systeminteraksjoner	51

5.2.3.	Antagelser og forenklinger av virkningsgrader	52
5.3.	Forslag til videre arbeid.....	54
6.	Konklusjon.....	55
7.	Referanser	56
	Figurliste	59

1. Introduksjon

1.1. Bakgrunn

Klima

Det er fastslått med en stor grad av sikkerhet at konsentrasjonen av karbondioksid i atmosfæren har økt drastisk de siste 70 årene. På grunn av dette har gjennomsnittstemperaturen på kloden økt, og FNs klimapanel slo fast i sin rapport fra 2014 at det med stor sikkerhet skyldes menneskelig aktivitet. Konsekvensene av den globale oppvarmingen vil være alvorlig for livet på kloden i dag. FNs klimapanel har også kommet frem til at disse effektene kan begrenses ved å kutte utslippet av drivhusgasser til et lavere nivå. Det kritiske punktet, der disse effektene ikke lenger kan stanses, er antatt å være ved 2 grader celsius oppvarming i løpet av dette århundret.^{16,19}

Verdenssamfunnet trengte en strategi for hvordan verden skulle unngå en oppvarming på 2 °C, 2 gradersmålet. Det ble i Parisavtalen fastslått ulike mål for hvert lands utslippskutt, der hvert land forpliktet seg til å kutte sine utslipp gradvis frem til de blir klimanøytrale en gang mellom år 2050 og 2100. I tillegg har FN vedtatt 17 bærekraftsmål som medlemslandene har forpliktet seg å jobbe mot. Målene er ment å skulle hjelpe verden i å utrydde fattigdom, bekjempe ulikhet og stoppe klimaendringene innen 2030 (Figur 1).^{19,13}



Figur 1: FNs 17 bærekraftsmål. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (hentet 15.08.20)

I sin oppsummering av klimarapporten fastslår miljødirektoratet at 35 % av verdens totale klimagassutslipp kommer fra energi- og varmeproduksjon, og at ytterligere 21 % kommer fra industri, innkjøpt energi- og varmeproduksjon ekskludert. Mye av utslippene kan reduseres ved energieffektivisering og utnyttelse av BAT (beste tilgjengelige teknologi).²⁵ I Norge alene står norsk industri for et forbruk på 57,2 TWh energi.²⁸ Det er derfor svært interessant å se på muligheter for å redusere energiforbruket til industrien i Norge.

Spillvarme

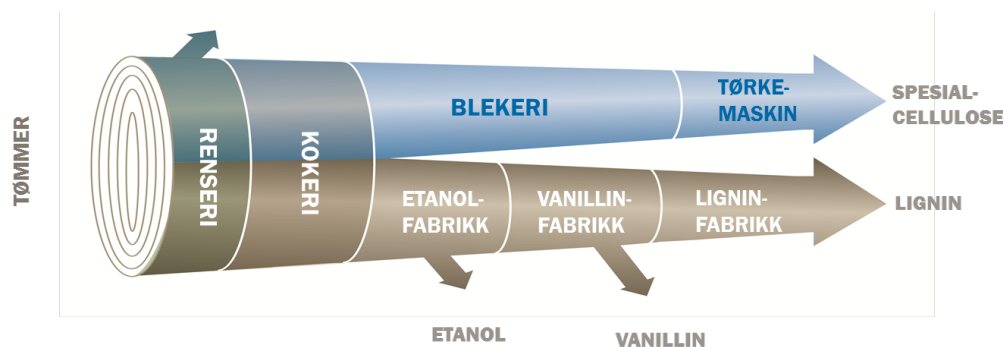
Spillvarme fra industri er definert som varmetap som ikke kan brukes til noe praktisk formål, og kastes bort eller dumpes i miljøet.¹⁷ Spillvarme med høyere temperatur finnes i alle industribedrifter. I en kartlegging utført av Enova i 2009 responderte bedrifter som står for 63 % av energibruken i norsk fastlandsindustri på undersøkelsen som omhandlet spillvarme. Den totale mengden disponibel spillvarme med temperaturer over 25 °C ble rapportert til å være 19,2 TWh/år. Dette tilsvarer 35 % av respondentenes energibruk, og 25 % av norsk industris totale energibruk. Mengde spillvarme må derfor reduseres mest mulig, og spillvarmen bør utnyttes ved høyest mulig temperatur, dvs. tidligst mulig i prosessen.¹⁴

Spillvarme kan deles inn i tre kategorier etter hvilken temperatur de holder; over 400 °C er høytemperatur spillvarme, mellom 100 og 400 °C er middeltemperatur spillvarme og under 100 °C regnes som lavtemperatur spillvarme. Det vil variere mellom disse grupperingene hva spillvarmen kan brukes til realistisk og lønnsomhetsmessig. Spillvarmegjennvinning inkluderer å fange samt overføre varmen fra en prosess via en gass eller væske tilbake til systemet som en ekstra energikilde. Denne energikilden kan benyttes til å tilføre ekstra varme til en prosess, eller omformes til elektrisk eller mekanisk effekt.¹⁷

1.2. Bedrift

Bedriften Borregaard benyttes som utgangspunkt for undersøkelsene og beregningene i denne gradsoppgaven. De er en stor og tradisjonsrik industribedrift med virksomhet i flere land, og har hovedkvarter i Sarpsborg.⁴ Borregaard raffinerer grantømmer og produserer ulike produkter av treets bestanddeler, og er derfor et bioraffineri.^{5, 26}

Fra tømmeret produserer Borregaard produktene cellulose, vanillin, lignin og bioetanol. De oppgir at av ca. 1000 kg tømmer, produserer de 400 kg spesialcellulose, 400 kg lignin, 50 kg etanol og 3 kg vanillin(Figur 2). Flere av disse produktene blir andre steder i verden produsert på petroleumbaserte råvarer, eller fra 1. generasjons bioråvarer. Borregaards bærekraft kommer derfor i hovedsak fra at de tilbyr et alternativ som ikke er produsert på petroleum, og ikke fra råvarer som i utgangspunktet kan benyttes som mat eller fôr. I tillegg benytter de trevirke som er bærekraftssertifisert.^{5, 6}



Figur 2: Oversikt over produktene Borregaard i Sarpsborg produserer av grantre ved de ulike avdelingene på fabrikken. Fra: Borregaard

Borregaards avdeling i Sarpsborg står for rundt 75% av konsernets inntekter og ansatte, og står for mesteparten av produksjonen. I følge deres egen bærekraftsrapport fra 2018 forbruker hele konsernet globalt totalt 1593 GWh energi i året målt i 2018, der 1069 GWh er varmeenergi, og 524 GWh elektrisitet. Av dette er 1007 GWh produsert fra fornybar energi. Grunnlasten til sitt varmeenergibehov dekker Borregaard gjennom energigjenvinning av avfall, bioenergi og gjenvinning av prosessvarme fra produksjonen. Topplastproduksjonen er basert på en kombinasjon av LNG (liquified natural gas) og elektrisitet. De påpeker selv at kontinuerlig energieffektivisering, og effektivisering av produksjonen gir deres produkter et bedre CO₂-fotavtrykk, og de prioriterer aktiviteter som kan forbedre deres miljøpåvirkning, blant annet gjennom energieffektivisering.⁷ Bedriften har satt seg som mål å jobbe med seks av de sytten bærekraftsmålene, basert på konsernets hovedvirksomhet. Disse skal blant annet benyttes som

rammeverk for virksomhetens mål og aktiviteter. De seks målene de har valgt å fokusere på er; 2, 8, 9 12 13 og 15. I arbeidet med bærekraftsmål 12(Figur 1), ansvarlig forbruk og produksjon, påpeker de at de har en energistrategi for økt bruk av grønn og fornybar energi og energieffektivisering.^{7 3}

I forbindelse med implementeringen av en ny prosess i bedriftens avdeling kokeriet, ønsker Borregaard å undersøke muligheten for å energieffektivisere damptilsetningen i prosessen, og slik redusere spillvarmemengden.

1.3. Oppgavens omfang og begrensninger

Problemstilling

Er det et teoretisk spillvarmepotensiale i et nytt system for gass-separasjon i avdelingen kokeriet hos bedriften Borregaard?

Delmål

- Utrede under hvilke trykk og temperaturer prosessen må drives.
- Beregne masse- og energibalanser for det nye systemet.
- Beregne energibruk av kun friskdamp fra eksisterende dampdistribusjonsnett.
- Beregne teoretisk spillvarmegjenvinningspotensiale.

Begrensninger

- Gass-separasjonssystemet planlegges og dimensjoneres ikke i denne gradsoppgaven.
- Prosjektets økonomiske lønnsomhet er ikke vurdert.
- Av konfidensialitetshensyn er noen detaljer om bedriftens produksjon utelatt. Dette kan være oppholdstider i ulike prosesstrinn, detaljer om kjemiske tilsetninger, og spesifikke verdier for trykk, temperatur og lignende i prosesstrinn som ikke direkte angår prosjektet i denne oppgaven. Detaljer som er relevante for oppgavens utfall er hensyntatt.

2. Teori

2.1. Energi

Et systems evne til å utføre arbeid henger direkte sammen med systemets energimengde. Energi deles inn i to kategorier, kinetisk og potensiell. Den kinetiske energien til et system er knyttet direkte opp mot dens bevegelser i rommet, samt dens termiske energi. Den potensielle energien til et system er knyttet til kraftfelter som påvirker systemet, samt den kjemiske energien lagret i stoffer.¹⁰

Energifysikk tar utgangspunkt i termodynamikkens lover. Den første loven kalles ofte for loven om konservering av energi. Denne dikterer at energi kan ikke skapes eller destrueres, den kan kun omformes fra en form til en annen. Termodynamikkens andre lov slår fast at varmeenergi alltid forflytter seg fra et sted med høyere temperatur til et sted med lavere temperatur. I tillegg er det definert en nulte termodynamisk lov som dikterer at to objekter som er i termisk likevekt med et tredje objekt, må også være i termisk likevekt med hverandre.¹⁰

Energikilder

Termodynamikkens første lov innebærer at energi ikke kan oppstå spontant. Energien som er tilgjengelig for bruk til blant annet industrielle prosesser må derfor komme fra en kilde. Det skilles mellom fornybare og ikke-fornybare kilder basert på om energikilden kan brukes opp i løpet av et menneskelig tidsperspektiv.

Fossile energikilder som olje, kull og naturgass er sammen med atomkraft regnet som ikke-fornybare energikilder. Den kontinuerlige energistrømmen som jorden mottar fra solens fusjonsreaksjon driver værsystemene på jorden. Fornybare energikilder som for eksempel vind- og vannkraft kan spores tilbake til jordens værsystemer. Biologiske energikilder har omgjort solenergi ved sin vekstprosess, og kan dermed også spores tilbake til solen. Fornybare energikilder er derfor i hovedsak geotermisk og solenergi.

Energikvalitet

Når energi skal benyttes til å utføre en arbeidsoppgave er det viktig at den forekommer i en form som kan brukes. Det er vanlig å skille mellom høy- og lavverdig energi, altså om energien har den kvaliteten som behøves. Elektrisitet er et eksempel på en høyverdig energiform fordi

den kan benyttes til svært mange formål, og enkelt kan omformes til andre energiformer. Lavtemperatur termisk energi blir regnet som lavverdig fordi den ikke enkelt kan benyttes til like mange formål, og det er vanskelig å omforme den til en høyverdig form.²²

Det er viktig å bemerke at den kvantifiserbare energimengden ikke er annerledes i en høyverdig mot en lavverdig form. Det er kun energiformens økonomiske og praktiske verdi som er annerledes. Dette innebærer at det ved utførelsen av en arbeidsoppgave bør vurderes hvilken energikvalitet som minimum behøves. Det er ikke lønnsomt å benytte en høyverdig energiressurs på et formål som kun trenger en lavverdig energiressurs.²²

Energibærere

I industrielle prosesser finnes en rekke energibærere, det vil si ulike kilder til energi som i ulik grad kan transporteres og omformes til arbeid i ulike prosesser. Eksempler på viktige energibærere i industri er ulike brenslers, elektrisitet, vanndamp, varmtvann og trykkluft.¹⁸

Varmeoverføringsprinsipper

Overføring av termisk energi mellom legemer foregår på tre måter. De tre typene varmeoverføring er varmeledning, konveksjon og termisk stråling.^{18, 31}

Varmeledning, også kalt termisk konduksjon, forekommer mellom legemer som er i kontakt med hverandre. Overføringen av energi skjer grunnet interaksjonene mellom molekylene til legemene, slik at bevegelsesenergi fra det varmeste legemet overføres til det kaldere legemet.

^{18, 31}

Konveksjon oppstår grunnet de kombinerte effektene mellom bevegelser i fluider og konduksjon, og fører til varmetransport innad i et væske- eller gassvolum. Væsker og gasser endrer tetthet ved temperaturendringer. Dersom deler av en væske eller gass varmes opp ved varmeledning med et annet legeme, vil tettheten endres i takt med temperaturen. Når tettheten endres vil volumet forflytte seg, og slik skapes strømninger innad i det totale væske- eller gassvolumet, som medfører varmetransport.^{18, 31}

Termisk stråling er stråling som emitterer fra legemer grunnet dets temperatur. Alle legemer med temperatur over absolutt null avgir termisk stråling. Varme overføres dermed mellom legemer via deres termiske stråling. Dette er slik varme overføres fra solen til jorden.^{18, 31}

Faseoverganger og fasediagrammer

Alle kjemiske forbindelser forekommer i en av de fire aggregattilstandene, som ofte kalles for faser. De fire aggregattilstandene er fast stoff, væske, gass og plasma. Hvilken aggregattilstand forbindelsene er i avhenger av temperaturen og trykket. Ved å endre på trykket og/eller temperaturen kan dermed også aggregattilstanden til en forbindelse endres. Et fasediagram inneholder informasjon om hvilken tilstand ulike stoffer har tilhørende spesifikke trykk og temperaturer.²⁷

Innenfor området til en gitt aggregattilstand vil varmeoverføring til et materiale føre til en temperaturøkning, og dette er det som kalles en følbare varmeovergang. Ved overgang fra en aggregattilstand til en annen foregår det ikke en temperaturendring i materialet, dette er det som kalles en latent varmeovergang.³¹

Spillvarme

Ved bruk av energi til utføringen av ulike arbeidsprosesser vil det alltid være et varmetap til omgivelsene. Dette tapet kan komme i form av termisk stråling, økt temperatur i kjølevæsker, varm eksosgass eller liknende. Dette varmeenergitapet kalles for spillvarme. Strålingen, væsken, gassen også videre er energibærerne av spillvarmen og kalles ofte for spillvarmekilder. Ved å utnytte spillvarmeressurser til nyttige arbeidsoppgaver kan et anlegg energieffektiviseres.⁸

Det er tre måter å anslå spillvarmepotensialet til en prosess, det teoretiske potensialet, det tekniske potensialet, og det økonomiske potensialet. Det teoretiske potensialet er den energimengden spillvarmekilden innehar. Det tekniske potensialet er den andelen av spillvarmen som kan omformes til et annet formål. Og det økonomiske potensialet er den andelen av spillvarmen som lar seg nyttiggjøre med en økonomisk gevinst.⁸

I en potensialstudie produsert av ENOVA i 2009 deler de inn spillvarmeressurser i 4 grupper etter hva de anbefaler at det er mulig å benytte ulike spillvarmekilder til. Denne inndelingen er som følger¹⁴;

Tabell 1: Oversikt over aktuell teknologi for utnyttelse av spillvarmeressurser, delt inn etter spillvarmetemperatur. Basert på ENOVAs potensialstudie fra 2009.¹⁴

Temperaturområde for spillvarme	Aktuell teknologi
> 140 °C	-Kraftgjenvinning ved installasjon av dampturbin -ORC-system/Stirling motor -Direkte bruk til fjernvarme
60 – 140 °C	-Kraftgjenvinning med ORC-system/Stirlingmotor -Direkte bruk til fjernvarme
40 – 60 °C	-Direkte bruk til lavtemperatur fjernvarme -Varmekilde til varmepumpe
25 – 40 °C	-Direkte bruk til fiskeoppdrett -Direkte bruk til jordvarme -Varmekilde for varmepumpe

Termodynamiske sykluser

Termodynamiske sykluser legger grunnlaget for virkemåten til varmepumper og kjøleprosesser. En termodynamisk syklus beskriver en rekke termodynamiske prosesser et fluid undergår i en syklisk rekkefølge. De termodynamiske prosessene foregår ved gitte tilstander som beskriver arbeidsmediets trykk-, temperatur-, volum- og varmeoverføringsforhold. Disse tilstandene er isoterm (konstant temperatur), isobar (konstant trykk), isokor (konstant volum), og adiabatisk (ingen varmeoverføring inn eller ut av systemet). I tillegg kan uttrykkene isentrop (konstant entropi, dvs. reversibel adiabatisk prosess), og isoentalp (konstant entalpi. Medfører netto arbeid og varme lik null, for eksempel som ved fri ekspansjon) brukes. En termodynamisk syklus kan for eksempel være en varmekraftmaskin som driftes mot et kaldt og et varmt reservoar, der reservoarene har tilnærmet konstant temperatur. Varmeenergi hentes ut fra det varme reservoaret og en andel av energien omsettes til arbeid i syklusen. Resten av varmeenergien avsettes i det kalde reservoaret.¹⁰

2.2. Viktig prosessutstyr

2.2.1. Rørsystem

Rørsystemer, eller rørnett, er betegnelsen på et nettverk av rørledninger i tilknytning til prosessanlegg. Rørledninger er rørformede forbindelser som leder stoffer mellom ulike komponenter i anlegg. Et rørsystem består av komponenter som rørstykker, rørformdeler, rørforbindelser, og pakninger. I tillegg kan rørledninger isoleres, og det kan monteres følgeledninger til oppvarming av rørene. Driften som skal foregå i anlegget, og miljøet rørnettet blir montert i, avgjør hva som er de riktige rørdimensjonene, og materialkvalitetene. Rørdimensjoner og tillatte trykk er standardisert.¹⁸

Rørdeler bestilles med en nominell diameter, som er standardisert for å sikre at deler produsert på ulike steder passer sammen. For hver rørledningsdel skal det oppgis et nominelt trykk, som er det maksimalt tillatte overtrykket i bar for delen. Materialet i en rørledning bestemmes etter hva slags stoff som skal transporteres, og det er spesielt viktig at rørledningen ikke utsettes for korrosjon. Rørforbindelser, som sveiser, flenser med mer, samt pakninger bestemmes med hensyn på driftsforholdene som vil være på stedet, samt om det er viktig å kunne åpne rørene i etterkant for vedlikehold og lignende.¹⁸

Det er vanlig å merke hvilke stoffer som skal transporteres i rørene, og hvilken vei strømmingen i røret går. Rørene kan isoleres for å forhindre varmetap til omgivelsene, og rørene kan utstyres med oppvarming for å unngå nedkjøling eller frysing av arbeidsmediet i kalde klima.

På rørledninger er det montert ventiler, som kan være manuelle eller automatiserte. Dette er for å kunne kontrollere strømmingene i røret på en tilfredsstillende måte. Ved valg av disse er det viktig å gjøre riktig materialvalg, ta stilling til om ventilene kun skal ha en av/på-funksjon eller om ventilene skal kunne strupes gradvis. I tillegg er det viktig å avgjøre om ventilene skal være manuelle slik at de må opereres av en arbeider fysisk ute i anlegget, eller om ventilen skal være automatisert slik at den kan tilknyttes et operativsystem.¹⁸

2.2.2. Måleutstyr

For å kunne drifte og styre et prosessanlegg optimalt er det behov for å overvåke at driftsparameterne opprettholdes. Dette gjøres med ulikt måleutstyr. Parametere som kan måles, eller indirekte bestemmes, inkluderer temperatur, trykk, pH, mengde, trykkdifferanser, nivå,

strømning, volum, masse, densitet, viskositet, gassmengde i tanker, ledningsevne i vann, gassanalyser, samt røyk-, støv- og fuktighetsmål.¹⁸

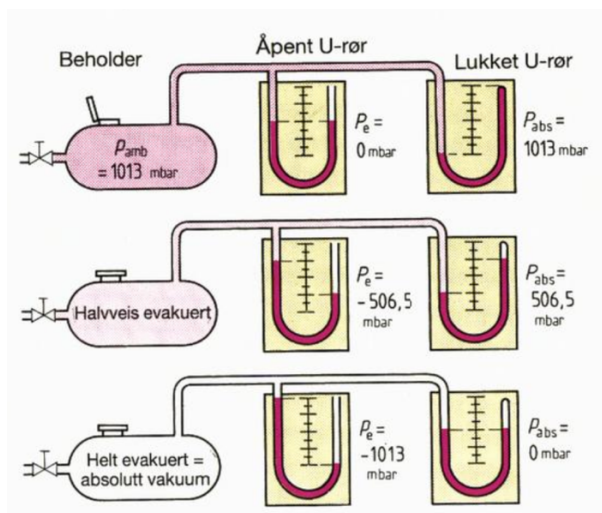
Temperatur

Temperatur kan måles mekanisk eller elektronisk. Mekanisk temperaturmåling tar utgangspunkt i termisk ekspansjon, ofte i væsker eller metaller. Eksempler på mekaniske temperaturmåleinstrumenter er væskeutvidelsestermometre og bimetaltermometre. Elektriske termometre benytter elektriske komponenter som er temperaturfølsomme. Eksempler på dette er motstandstermometre, termoelementer og strålingspyrometre.¹⁸

Trykk

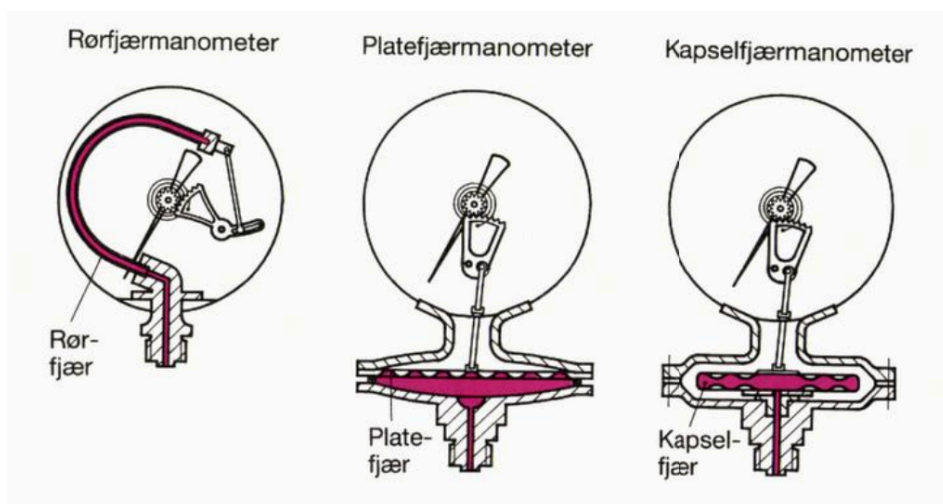
Trykkmålere, også kalt manometre, kan deles inn i tre typer etter virkemåte; trykkmålingsinstrumenter med sperrevæske, med fjærelastisk trykkdemper og differansetrykkmålere. I tillegg er det viktig å være klar over om det er absolutt trykk eller overtrykk som måles, og i strømmende væsker er det viktig å vite at totaltrykket er summen av det statiske og det dynamiske trykket. Hvordan målestedene plasseres i et strømmende fluid avgjør om det er total-, det dynamiske eller det statiske trykket som måles.¹⁸

Trykkmålere med sperrevæske blir brukt til å måle små trykk eller små trykkdifferanser, gjerne i laboratorie- og forsøksskala. Målerne kommer enten som et åpent eller et lukket u-rørmanometer, som består av et u-formet rør koplet til rommet der trykket skal måles. U-røret er fylt med en sperrevæske, og differansen i væskenivået i de to sidene av u-formen er proporsjonalt med trykket i beholderen, dog med ulikt forholdstall for åpent og lukket u-rør. I et åpent u-rør vil sperrevæsken bli påvirket av atmosfæretrykket fra den åpne siden, og det absolutte trykket fra beholderen på den andre siden. Et åpent u-rørmanometer kan kun måle overtrykk i beholderen. I et lukket u-rør vil sperrevæsken påvirkes av det absolutte trykket fra beholderen på den ene siden, og trykket fra et innestengt gassvolum på den andresiden. Et lukket u-rørmanometer kan måle både under- og overtrykk(Figur 3).¹⁸



Figur 3: Illustrasjon og sammenlikning mellom åpent og lukket u-rørmanometer. I: Ignatowitz, E., Prosesskjem: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 173.

Trykkmålere med fjærelastisk måleledd kan måle overtrykk eller trykkdifferanser, og kan måle alt fra veldig små trykk til svært høye trykk. Tre vanlige typer er rørfjær-, platefjær- og kapselfjærmanometer. Hver av disse benytter deler som endrer form under trykk, og den endrede formen benyttes til å flytte på en viser som er kalibrert til å vise det korresponderende trykket (Figur 4). Trykkmålere med fjærelastisk måleledd kan koples til en måleomformer som omformer den mekaniske målingen til et elektrisk signal, slik at den kan avgi en digital måling.¹⁸



Figur 4: Illustrasjon av rørfjær-, platefjær-, og kapselfjærmanometer. I: Ignatowitz, E., Prosesskjem: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 174.

Strømning

Måling av strømning i rør danner basis for dosering av væsker, for å opprettholde driftstilstander, og er viktig for å kunne bedrive prosessstyring av et anlegg. Strømningsmålinger kan gjøres ved bruk av måleblender. En måleblende struper diameteren på et rør midlertidig, og måler trykket før og etter. Ved hjelp av fluidmekanikk kan volumstrømmen i røret beregnes. Strømningsmålinger kan også gjøres med et rotameter, eller med elektromagnetiske strømningsmålere.¹⁸

Nivå

Nivåmålinger av innholdet i en beholder kan måles direkte eller indirekte. Ved en direkte måling kan nivået på beholderen leses rett av et mekanisk instrument. Dette kan for eksempel være en peilestav, et seglass, eller en flottør, som direkte angir høyden på nivået i beholderen. Indirekte nivåmålinger benytter kjente fysiske egenskaper til systemet, som via beregninger angir høyden på innholdet i beholderen. Eksempler på indirekte nivåmålinger av væsker er å benytte instrumenter med fortrenningslegemer der omregningsfaktoren er basert på oppdriften til legemet som fortrenses i et sylindrisk rør. Et annet eksempel er boblerørsmetoden som benytter det hydrostatiske prinsippet. Ved måling av finkornet produkt i eksempelvis en silo, kan det benyttes et senkelodd, radioaktiv nivåmåling, eller ultralydmåling.¹⁸

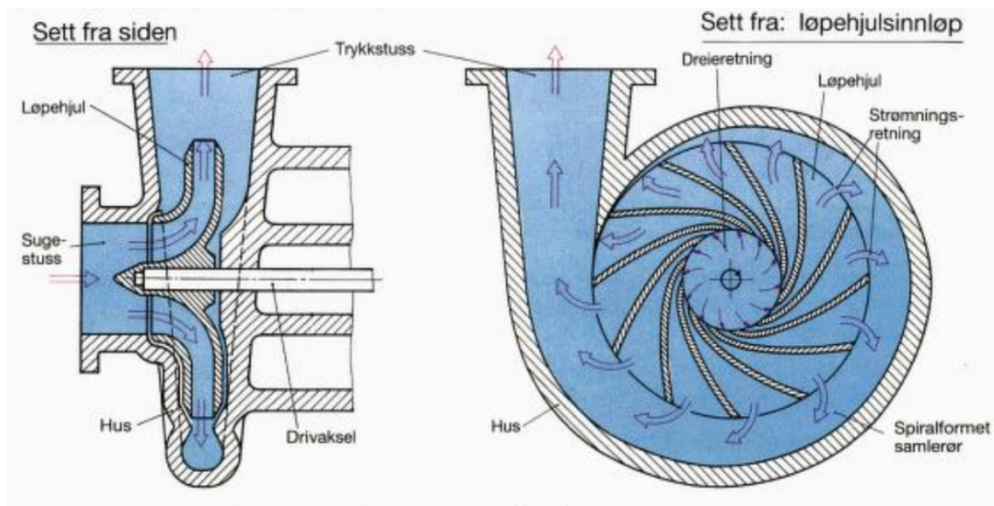
2.2.3. Pumper

Pumper er prosessutstyr som benyttes til å forflytte væsker og fast stoff i mindre biter fra et sted til et annet i en prosess. De deles inn etter hva slags prinsipp som benyttes for å utføre transporten av mediet. Pumpetypene det skilles mellom er sentrifugalpumper, fortrengerpumper, roterende fortrengerpumper og strålepumper. Pumper dimensjoneres etter hvilken volumstrøm og hvilket trykk den skal levere.¹⁸

Sentrifugalpumper

Sentrifugalpumper består av et spiralformet pumpehus, med innløp i midten av pumpehuset. Utløpet er langs siden av pumpehuset. Innløpet kalles sugesiden av pumpen, og utløpet kalles trykksiden. Pumpen benytter prinsippene i den fiktive kraften sentrifugalkraften til å transportere væsker, ved hjelp av et roterende løpehjul med skovler plassert litt utenfor sentrum i pumpehuset. Når løpehjulet roterer vil væsken slynges ut fra midten mot kantene i pumpehuset, og opp trykksiden av pumpen. Dette fører til at mer væske suges inn i pumpen, og væske kan transporteres fra et sted til et annet(Figur 5). Det er viktig ved oppstart av en

sentrifugalpumpe at det er væske i pumpehuset, at sugesiden er åpen, og at trykksiden har en stengt ventil rett etter pumpen. Ved drift gir en sentrifugalpumpe en jevn og kontinuerlig transport av væsken. Trykket levert av en sentrifugalpumpe bestemmes av løpehjulets form, og omdreiningstallet på løpehjulet.¹⁸



Figur 5: Illustrasjon av utformingen til en sentrifugalpumpe. I: Ignatowitz, E., *Prosesskjemi: Anlegg og utstyr*, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 47.

Fortrengerpumper

Fortrengerpumper, også kalt stempelpumper, forflytter væske ved å periodisk skape et undertrykk i et kammer slik at væske trekkes inn, og deretter skape et overtrykk som presser væsken ut. Dette gjøres ved å bevege ulike stempler, eller en membran frem og tilbake i et kammer. En slik pumpe er nødt til å ha en tilbakeslagsventil både på suge- og trykksiden for å fungere. En membranpumpe brukes der væsken ikke bør komme i kontakt med de bevegelige delene av pumpen, for eksempel en syre. Det finnes enkeltvirkende og dobbeltvirkende fortrengerpumper. I dobbeltvirkende fortrengerpumper beveger stempelet seg slik at det trekkes væske inn i et område av pumperommet, samtidig som væske presses ut av den andre delen. Slik vil hver stempelperiode pumpe dobbel mengde sammenliknet med en enkeltvirkende pumpe. Ved konstant turtall på motoren leverer fortrengerpumper konstant volumstrøm.¹⁸

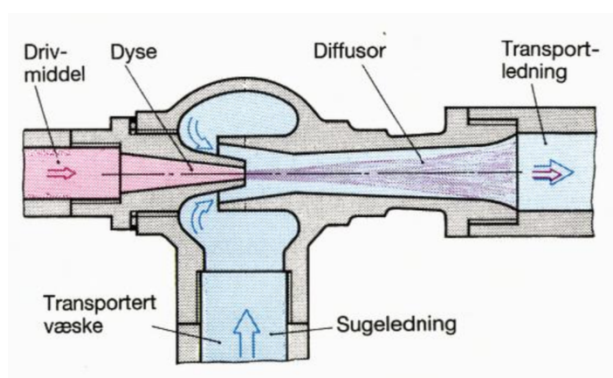
Roterende fortrengerpumper

Roterende fortrengerpumper benytter roterende objekter som skaper under- og overtrykk i pumpehuset slik at væske kan forflyttes. Ulike roterende fortrengerpumper er tannhjulpumper, rotasjonsstempelpumper, skruerpumper, og slangepumper. Fordelen med roterende fortrengerpumper er at de ikke er avhengige av ventiler på suge- og trykkside, samt at

bevegelsen er roterende i stedet for frem og tilbake. Skruerpumper kan i tillegg benyttes til grøt- eller slamaktige væsker.¹⁸

Strålepumper

Strålepumper, også kalt drivmiddelpumper, benytter et drivmiddel som strømmer inn gjennom en dyse. Den store hastigheten på drivmiddelet drar med seg væsken og slynger den ut av pumpen. Dette skaper et undertrykk på sugesiden som fører til at det strømmer inn til pumpen på sugesiden(Figur 6). Denne pumpen er avhengig av at væsken som skal pumpes kan blandes med drivmiddelet, som kan være vann, luft eller damp.¹⁸



Figur 6: Illustrasjon av en strålepumpe. I: Ignatowitz, E., Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 55.

2.2.4. Kompressorer

Gasser transporteres i prosessanlegg ved hjelp av trykkforskjeller. Kompressorer er betegnelsen på maskiner som skaper et overtrykk fra 3 til 1000 bar, og benyttes til å endre trykket på gasser som benyttes i prosessanlegg. Dersom det er behov for lavere trykk benyttes blåsere eller vifter, som benytter seg av noen av de samme prinsippene som kompressorer. Kompressorer kan koples i serie i en rekke trinn for å oppnå et større trykk ut av systemet.¹⁸

Ved gasskompresjon i en kompressor vil temperaturen i gassen øke, og kompressorer må derfor kjøles kontinuerlig. For å unngå at gassen kondenseres er man nødt til å forholde seg til det kritiske trykket og den kritiske temperaturen til gassen. Dersom gassen holdes ved et gitt trykk må temperaturen ikke underskride den kritiske temperaturen, og dersom gassen holdes ved en bestemt temperatur må ikke trykket overstige det kritiske trykket, for å unngå denne kondenseringen. Dette betyr også at kompressorer til en viss grad kan benyttes for å øke temperaturen til en gass, eller til å kondensere gasser til væsker.¹⁸

Typer kompressorer deles inn etter prinsippet de benytter, fortrenningsprinsippet eller det dynamiske prinsippet. Stempelkompressorer og rotasjonsstempelkompressorer benytter fortrenningsprinsippet, mens turbokompressorer benytter det dynamiske prinsippet.¹⁸

Stempelkompressorer komprimerer gassen med et stempel som beveger seg frem og tilbake i en sylinder. Gassen komprimeres i takt med forminskningen i volum i sylinderrommet. Når riktig trykk er oppnådd slippes gassen ut på gassledningen, og ny gass trekkes inn i sylinderrommet.¹⁸

Rotasjonsstempelkompressorer komprimerer gassen ved hjelp av roterende fortrenningslegemer, som leder gassen slik at den får et stadig mindre volum og dermed høyere trykk. Grunnet fraværet av frem og tilbakegående deler, er konstruksjonen enkel og lite plasskrevende. To typer rotasjonsstempelkompressorer er skruekompressor og cellehjulskompressor.¹⁸

Turbokompressorer arbeider etter liknende prinsipp som sentrifugalpumper, det vil si at kinetisk energi fra et roterende løpehjul omformes til statisk trykenerg i gassen. Ved å plassere flere løpehjul på samme aksel kan det leveres høyere trykk. Kompressor med radialløpehjul er en type turbokompressor.¹⁸

2.2.5. Sparger

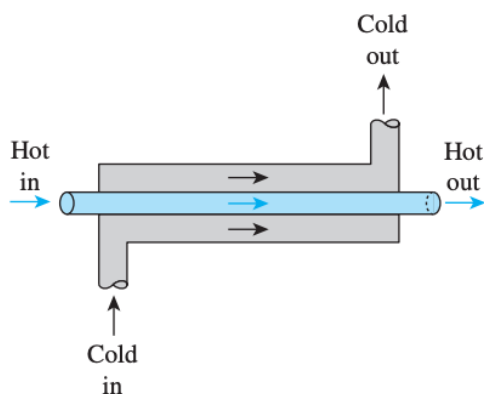
I noen prosesser er det behov for å tilsette en gass til en væske slik at gassen fordeles ut i væsken over et større område, og til dette kan man benytte en sparger. Dette kan for eksempel være for å tilsette luft til en bioreaktor, eller for å fjerne forurensninger fra en væske i en gass-stripping. En sparger kommer i en rekke ulike utforminger, og kan lages av ulike materialer. Dersom prosessen har en høy temperatur, eller har korrosive eller oksiderende stoffer, benyttes ofte spargere av metall. I mer skånsomme miljøer kan spargere av keramer benyttes. Plasseringen spargeren vil avhenge av om prosessen er kontinuerlig eller batchvis, samt strømmertaten til gassen som skal tilsettes, og tankstørrelsen med mer.¹²

2.2.6. Varmevekslere

Varmevekslere er prosessutstyr som er laget for å tilrettelegge for varmeoverføring mellom to eller flere fluider i en prosess. Varmeoverføringen drives av en temperaturforskjell mellom et varmt og et kaldt fluid.³¹ Varmevekslere kommer i en rekke forskjellige typer, slik at forbrukeren kan anskaffe utstyr med hensyn på blant annet kostnadsnivå, virkningsgrad, og om arbeidsmediene kan komme i kontakt med hverandre eller ikke.

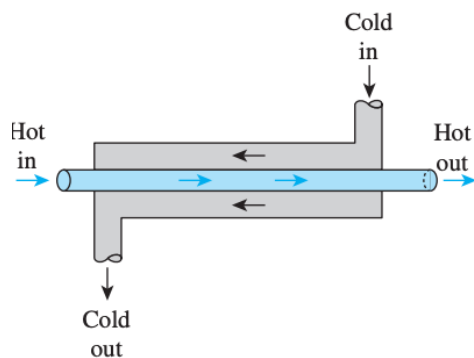
Det skilles mellom direkte eller indirekte varmeveksling. Ved direkte varmeveksling blandes det varme mediet med det kalde, og varmeoverføringen skjer ved termisk konduksjon mellom mediene mens de blandes. Direkte varmeveksling blir ofte utført ved å tilsette vanndamp, eller et oppvarmet løsemiddel til blandingen som skal varmes opp. Dette kan gjøres med eller uten omrøring. Ved indirekte varmeveksling holdes mediene adskilt fra hverandre, og varmeenergien ledes fra det varme mediet, gjennom varmevekslerveggen, og til det kalde mediet slik termofysikkens andre lov dikterer.¹⁸

Ved indirekte varmeveksling kan arbeidsmediene strømme på ulike måter i forhold til hverandre, for å oppnå ønsket grad av varmeoverføring. Ved parallell strøm, også kalt medstrøms, strømmer mediene parallelt med hverandre langs hele vekslerlengden (Figur 7). Her vil temperaturdifferansen være størst ved inngangen til veksleren, og så avta gradvis langs strømmeretningen. Varmeoverføringen mellom mediene korrelerer direkte med temperaturdifferansen, den vil derfor også avta langs strømmeretningen. Utgangstemperaturen på det kalde mediet vil være lavere enn utgangstemperaturen på det varme mediet.³¹



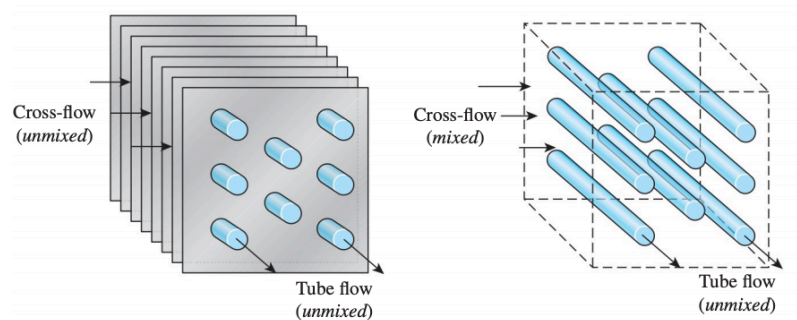
Figur 7: Illustrasjon av en varmeveksler med parallell strømning. I: Cengel, Y., og Ghajar, A. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and applications*, fifth edition, 2015, New York: McGraw-Hill Education, side 650.

Ved motstrømsveksling strømmer mediene mot hverandre langs hele vekslerlengden(Figur 8). Temperaturdifferansen mellom mediene vil ikke være like stor som ved inngangen til en veksler med parallell strøm, men den vil være jevnere langs hele veksleren. Oppsettet til strømmingen muliggjør at utgangstemperaturen på den kalde siden overstiger utgangstemperaturen til den varme siden. Dog kan den ikke overstige inngangstemperaturen til den varme siden, da dette ville vært i strid med termodynamikkens andre lov.³¹



Figur 8: Illustrasjon av en motstrøms varmeveksler. I: Cengel, Y., og Ghajar, A. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and applications*, fifth edition, 2015, New York: McGraw-Hill Education, side 650.

Ved kryssstrøm strømmer det ene mediet langs lengderetningen til veksleren, mens det andre mediet strømmer på tvers av denne retningen(Figur 9). Kryssstrømvekslere kan ha plater som sørger for at ikke deler av kryssstrømmen går parallelt med den andre strømmingen.³¹



Figur 9: Illustrasjon av varmeveksler med kryssstrøm. Umikset kryssstrøm vises til venstre, mikset kryssstrøm vises til høyre. I: Cengel, Y., og Ghajar, A. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and applications*, fifth edition, 2015, New York: McGraw-Hill Education, side 651.

Det finnes forskjellige typer varmevekslere å velge mellom på markedet. Noen av de som benyttes til væske-til-væske varmeveksling er platevarmeveksler, rørvarmeveksler,

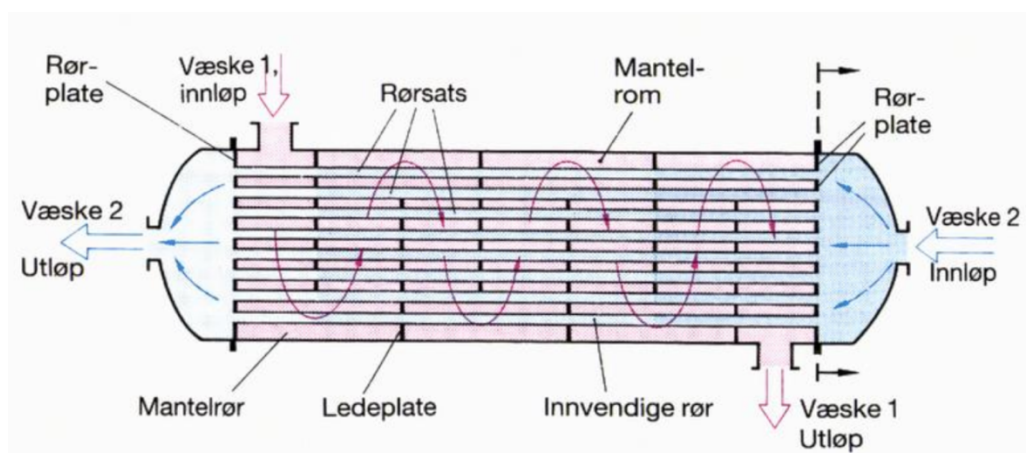
mangerørsvarmeveksler og spiralvarmeveksler.^{18, 31} Det er flere typer vekslere på markedet, der noen av de er bedre egnet for gass-til-væske eller gass-til-gass varmeveksling.

Rørvarmeveksler

Den enkleste varmeveksleren består av et mindre rør som holdes i midten av et større rør konsentrisk. Det mediet sendes gjennom røret i midten, mens det andre sendes i røret på utsiden. Det andre mediet vil altså omkranse det innerste røret fullstendig. Varmeveksleflaten vil være overflaten til det innerste røret. Denne kan brukes til både parallell og motstrømsveksling. En enkel rørvarmeveksler er illustrert i Figur 7 og Figur 8.³¹

Mangerørsvarmeveksler (Skall- og tubevarmeveksler)

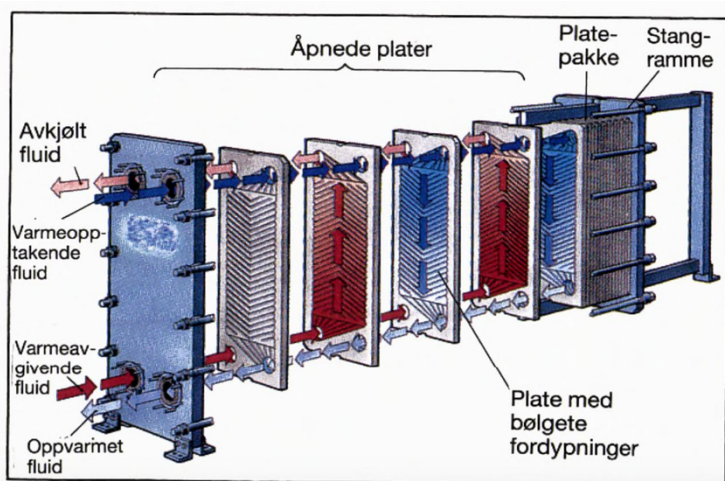
En mangerørsvarmeveksler består av et stort sylinderformet rør, som er fylt med mange mindre rør innvendig. Rørene og den sylinderformede beholderen er parallelle med hverandre. Det sylinderformede hulrommet kalles for mantelrommet, og her strømmer det ene mediet, mens det andre strømmer gjennom de små rørene, kalt rørrømmet. Det kan monteres lederplater i mantelrommet for å påvirke strømningsmønsteret til å være krysstrøm(Figur 10). Fordelen med denne varmevekslertypen er dens enkle konstruksjon, god varmeoverføring, gunstig kostnad ved anskaffelse, og at den ikke har et stort plassbehov. Ulempene med denne konstruksjonen er at mediene ikke kan ha for stor temperaturdifferanse, da konstruksjonen ikke har rom til for mye termisk utvidelse. Konstruksjonen tillater heller ikke rom for å utvide kapasiteten til varmeveksleren i ettertid. I tillegg bør mediet som går gjennom mantelrommet ikke gi avleiringer, da det ikke er lett å komme til for å rengjøre mantelrommet.^{18, 31}



Figur 10: Tverrsnitt av en mangerørsvarmeveksler. I: Ignatowitz, E., *Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans*, side 244.

Platevarmeveksler

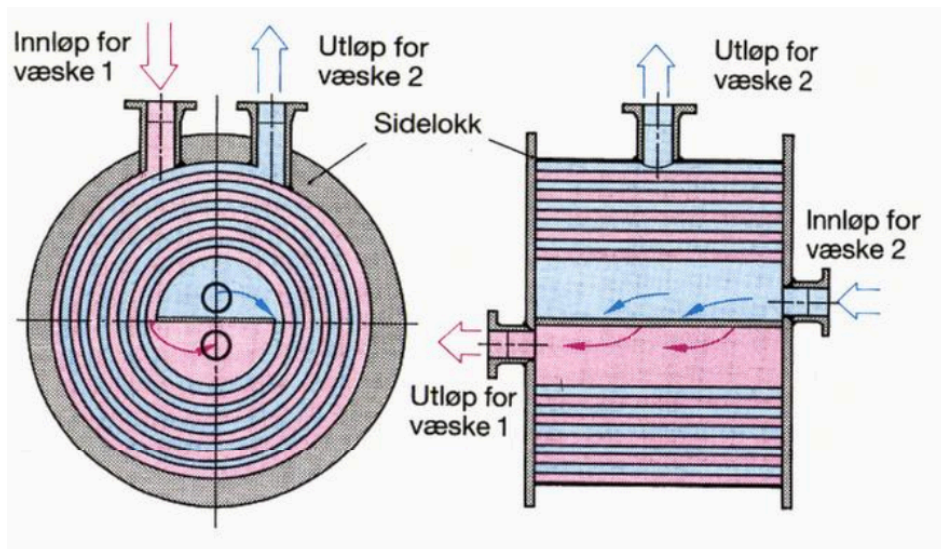
En platevarmeveksler består av en rekke rillete plater som er montert på en stangramme. Den er montert med pakninger mellom platene, slik at det dannes et hulrom mellom platene. Rillene i platene er der for å få større varmeoverføringsflate, samt for å skape et optimalt strømningsmønster. Strømningen er satt opp slik at et av mediene strømmer gjennom annethvert hulrom, og andre mediet strømmer i hulrommene som er igjen. Slik vil det kalde mediet alltid ha kontakt med en varm flate på begge sider. Dette sørger for en mer effektiv varmeoverføring(Figur 11). Platevekslere er godt egnet for væske-til-væske varmeveksling, så lenge væskene holdes under omtrent likt trykk. Fordelene med en platevarmeveksler er en stor varmeveksleflate, og dermed effektiv varmeoverføring. Konstruksjonen av veksleren gjør den lett å demontere for rengjøring, og utvidelse av vekslerens kapasitet i ettertid kan gjøres enkelt ved å legge til flere plater. I tillegg er veksleren plasseffektiv i montert tilstand.^{18, 31}



Figur 11: Illustrasjon av en åpnert platevarmeveksler.. I: Ignatowitz, E., *Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans*, side 246.

Spiralvarmeveksler

En spiralvarmeveksler består av to plater som er viklet sammen i en spiralform med samme avstand til hverandre hele veien. Dette danner to strømningskanaler inntil hverandre gjennom hele spiralen. Inntil hver flate ende av spiralen sitter endelokk som kan tas av ved behov, for eksempel ved rengjøring(Figur 12). Veksleren brukes mest til væske-til-væske varmeveksling. De kan brukes til både med- og motstrømsveksling.¹⁸



Figur 12: Illustrasjon av en spiralvarmeveksler. I: Ignatowitz, E., *Prosesskjemi: Anlegg og utstyr*, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 246.

2.3. Teknologi for spillvarmeutnyttelse - Oppvarming

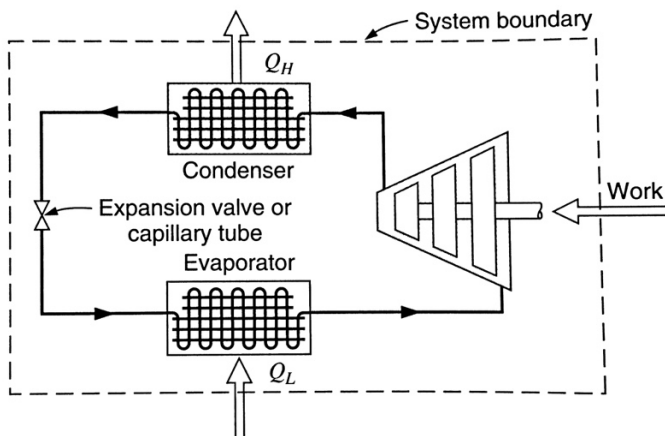
2.3.1. Direkte varmeveksling

Spillvarme kan benyttes direkte til oppvarming av andre prosessmedier ved hjelp av varmevekslere. Fordelen med dette er at varmevekslere er relativt billige i anskaffelse sammenliknet med de andre spillvarmeutnyttelsesmulighetene som finnes. Energikvaliteten ved varmeoverføring til et annet prosessmedium vil gå ned, da det ikke er mulig å nyttiggjøre 100 % av varmeenergien i spillvarmebæreren ved bruk av varmeveksling. Det er derfor viktig å utrede størrelsen på det økonomiske potensialet i spillvarmeutnyttelsen. I tillegg burde varmeoverføringen dekke et behov som ellers ville bli dekket av mer høyverdig energibærere.

2.3.2. Varmepumpe

Varmepumper benytter prinsipper fra termodynamikken til å kunne varme opp eller kjøle ned sine omgivelser. En varmepumpe kan benytte en spillvarmekilde som hovedenergikilde, og overføre denne til fra et sted til et annet ved å tilføre noe arbeid. Dette arbeidet blir drevet av elektrisitet.¹⁷

En enkel varmepumpekonfigurasjon består av to varmevekslere, en pumpe eller en turbin, og en trykkreduserende komponent som en ekspansjonsventil. I den første varmeveksleren, kalt fordamperen, vil spillvarmen varmeveksle med arbeidsmediet til varmeveksleren, slik at arbeidsmediet fordamper. Trykket i fordamperen er lavt slik at arbeidsmediet lettere fordamper. Den fordampede gassen trekkes så inn i kompressoren hvor arbeid tilføres slik at trykket på gassen øker. Herfra sendes arbeidsmediet til den andre varmeveksleren, kalt kondensatoren. Gassens økte trykk fører til at arbeidsmediet kondenserer ved en lavere temperatur, og den latente energien i faseovergangen avsettes i kondensatoren. Energi har nå blitt transportert fra ett sted til et annet. Arbeidsmediet sendes gjennom en trykkreduksjonsventil, og fortsetter tilbake inn i fordamperen(Figur 13).¹⁰



Figur 13: Illustrasjon av en enkel varmepumpe. I: Borgnakke, C., Sonntag, R., *Fundamentals of thermodynamics SI version*, 8. utgave, 2014, side 190.

Den økonomiske gevinsten i å benytte en varmepumpe til oppvarming kommer av at det benyttes mindre elektrisk energi på å drifte et varmepumpesystem, enn å utføre oppvarmingen direkte elektrisitet. I tillegg kan et slikt system gi en totalt mer bærekraftig energibruk i oppvarmingssammenheng.

2.4. Teknologi for spillvarmeutnyttelse - Kraftproduksjon

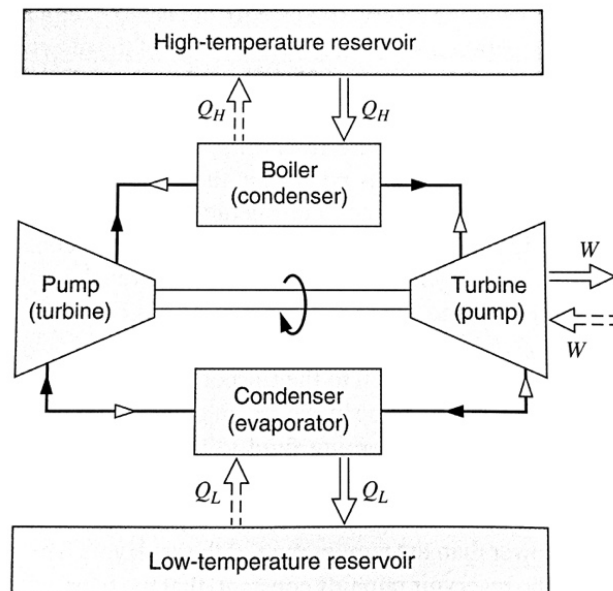
Det er mulig å benytte spillvarme til å produsere elektrisitet ved hjelp av en termodynamisk syklus, eller ved direkte elektrisk konversjon. Fordelen med å produsere elektrisitet fra spillvarme er at elektrisitet er mer anvendelig til flere bruksområder, og dermed er ikke bruken av energien fra spillvarmen like begrenset. Ulempene er at konverteringen til elektrisitet vil ha en lavere virkningsgrad sammenliknet med direkte bruk av varmeenergien, og at utstyret som kreves ofte kan være dyrt i anskaffelse. I tillegg vil noe av utstyret være plasskrevende, og kan derfor være vanskelig å plassere i en allerede eksisterende prosess.¹⁷

2.4.1. Termodynamiske sykluser

Carnotsyklus

Den enkleste termodynamiske syklusen er Carnotsyklusen. Det generelle oppsettet til en Carnotmaskin er to varmevekslere brukt som en kondensator og en fordamper, en pumpe for å øke trykket i systemet og drive arbeidsmediet rundt, samt en turbin som gir en trykkreduksjon i systemet (Figur 14). Turbinen omsetter energien fra trykkreduksjonen til elektrisk energi. Termodynamikkens andre lov dikterer at det er umulig for et system å absorbere varme fra ett enkelt reservoar og konvertere denne energien til arbeid, uten å påføre en endring på

omgivelsene. Dette medfører at det ikke er mulig å produsere en varmekraftmaskin med en effektivitet på 100 %.¹⁰



Figur 14: Illustrasjon av komponentene i en Carnotmaskin. I: Borgnakke, C., Sonntag, R., *Fundamentals of thermodynamics SI version*, 8. utgave, 2014, side 200.

Carnotsyklusen nytter i teorien hele potensialet fra temperaturdifferansen mellom det kalde og det varme reservoaret. Det vil si at effektiviteten til syklusen kun er avhengig av temperaturdifferansen mellom den kalde og den varme siden. Ved en gitt temperatur på den kalde, T_C , og den varme siden, T_H , er effektiviteten til Carnotsyklusen den maksimale teoretiske effektiviteten som kan oppnås for systemet. Carnoteffektiviteten er ikke mulig å oppnå i virkeligheten da den er en ideell syklus, men den virkelige maksimale effektiviteten kan heller ikke overstige den. Carnoteffektiviteten er vist i formel 1.¹⁰

$$\varepsilon_{carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad [1]$$

Der ε_{carnot} er Carnoteffektiviteten, T_C er temperaturen på det kalde reservoaret i K, og T_H er temperaturen på det varme reservoaret i K.

I en Carnotmaskin foregår prosessen i pumpen og turbinen isotermt altså uten endring i temperatur. I tillegg foregår varmeoverføringen mellom fordampere og det varme reservoaret,

samt mellom kondensator og det kalde reservoaret adiabatisk, altså uten varmeoverføring fra systemet til omgivelsene. Dette er vanskelig og upraktisk å få til i virkeligheten.¹⁰

Rankinesyklus

Rankinesyklusen er en idealisert reversibel syklus som benytter det samme prosessutstyret i samme konfigurasjon som en Carnotmaskin, to varmevekslere, en pumpe og en turbin, se Figur 14. Rankinesyklusen er ment å driftes under forhold det er mer realistisk å oppnå i virkeligheten sammenliknet med Carnotsyklusen. I en rankinemaskin foregår prosessen i pumpen og ekspansjonen i turbinen adiabatisk, det vil si uten varmeoverføring fra systemet til omgivelsene. Varmeoverføringen i varmevekslerne, altså fordamperen og kondensatoren, foregår isobart, under konstant trykk.¹⁰

Fossile kraftverk er termiske kraftverk som produserer elektrisitet fra termisk energi, fra eksempelvis forbrenningsprosesser, ved hjelp av en dampturbin. Denne prosessen har basis i den idealiserte Rankinesyklusen. Arbeidsmediet er ofte vann.¹⁰

Organisk Rankinesyklus (ORC)

En type Rankinesyklus er den organiske Rankinesyklysen, ofte forkortet ORC. Maskiner som bygger på den syklusen består av de samme komponentene som en vanlig Rankinesyklus, men benytter organiske stoffer som arbeidsmedium, i stedet for å benytte vann slik som i en tradisjonell Rankinesyklus. De organiske stoffene har lave kokepunkt, og høye damptrykk som muliggjør å benytte varmereservoar som holder en lavere temperatur, slik som for eksempel spillvarme. Det kan benyttes en rekuperator slik at varmeenergien som avsettes i det kalde reservoaret minimeres. Systemet kan også optimaliseres ved hjelp av ulike oppsett.¹⁷

Varmekilden til en ORC-maskin kan ha temperatur ned mot 60 °C, men er avhengig av en lav kjøletemperatur for å oppnå en god virkningsgrad. Dermed kan en ORC-maskin potensielt benyttes til å produsere energi fra lavtemperatur spillvarme.¹⁴

Mahmoudi et al. oppsummerte i sin artikkel «A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle» fra 2018 akademiske artikler som omhandlet spillvarmegjenvinning ved bruk av ulike konfigurasjoner av ORC-teknologi. De mest brukte varmekildene var fra dieselmotorer, interne forbrenningsmotorer og gassturbiner. I den samme artikkelen kommer det frem at virkningsgraden for ulike ORC-systemer med ulike konfigurasjoner og

arbeidsmedier varierer fra 7,1 % til 36,7 % i ulike publiserte artikler. Det optimale temperaturområdet for varmekilden varierer fra arbeidsmedium til arbeidsmedium. Det optimale temperaturområdet for de ulike arbeidsmediene brukt i forsøkene oppsummert i artikkelen av Mahmoudi et al. varierte mellom 165 – 170 °C opp til 240 – 255 °C.²³

Kalinasyklus

Kalinasyklusen er også basert på Rankinemaskinen, men denne benytter en vann-ammoniakk løsning som arbeidsmedium i systemet. Vann-ammoniakk-løsningen gir en to-fase blanding fordi de to stoffene har ulike kokepunkter, og temperaturen er derfor ikke konstant i fordamperen og kondensatoren. I en vanlig Carnot-, Rankine- eller organisk Rankinesyklus vil temperaturen i fordamperen og kondensatoren være tilnærmet konstant fordi det foregår en faseovergang. Fordi temperaturen ved varmeoverføring i fordamperen stiger, blir snittemperaturen i fordamperen, som er det varme varmereservoaret, høyere. Fordi temperaturen ved varmeoverføring synker i kondensatoren, blir snittemperaturen i kondensatoren, det kalde varmereservoaret, lavere. Temperaturdifferansen mellom det kalde og varme reservoaret vil derfor være større ved bruk av en Kalinasyklus, og økt temperaturdifferanse vil gi en høyere teoretisk maks termisk virkningsgrad.¹⁷

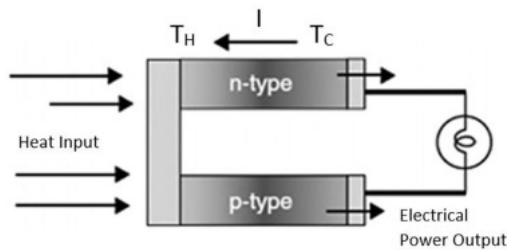
Enova opplyser i sin potensialstudie at spillvarmekilder med temperaturer over 90 – 100 °C kan benyttes til en Kalinasyklus.¹⁴ En studie av Milewski et al., indikerer at ORC kan være et bedre alternativ enn Kalina for varmekilder med en temperatur under 200 °C.²¹

2.4.2. Direkte elektrisk konversjon

Det finnes også teknologi som direkte konverterer elektrisitet fra spillvarme, uten å konvertere energien til mekanisk energi først.

Termoelektrisk

Termoelektriske enheter er laget av halvledermateriale som genererer en elektrisk strøm når de blir utsatt for en temperaturdifferanse mellom to overflater. Metoden har med nylige forbedringer i nanoteknologi hatt en virkningsgrad mellom 15 - 25 % ved bruk av varmekilder som holder 450 °C – 750 °C.¹⁵ Hovedutfordringen med teknologien er å opprettholde en stor nok temperaturdifferanse mellom de to halvlederne, samt å lede nok varme til halvlederne effektivt nok.¹⁷



Figur 15: Illustrasjon av prinsippet bak termoelektrisk generasjon. Fra: *Waste heat recovery technologies and applications*. H. Jouhara et. al., *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, s. 278.

Piezoelektrisk

Piezoelektriske enheter er laget av tynnfilmmembraner som omformer vibrasjoner fra omgivelsene til elektrisitet. Disse vibrasjonene kan eksempelvis være fra oscillerende ekspanderende gasser.¹⁷ Spillvarme kan benyttes til piezoelektrisk konversjon ved å benytte en resonator. Resonatoren danner selvopprettholdte akustiske bølger ved en spesifikk temperaturgradient. Den piezoelektriske enheten plasseres på den andre siden av resonatoren, og konverterer den akustiske energien til elektrisk energi.²⁰ utfordringer med denne løsningen er lav effektivitet, høy intern impedans, krav om langsiktig holdbarhet, og en svært høy kostnad knyttet til å produsere enhetene. I tillegg er det utfordringer knyttet til hvordan systemene må settes opp for å tilrettelegge for kraftproduksjon, pålitelighet og stabilitet.¹⁷

Termoionisk

Termoioniske enheter benytter en temperaturforskjell mellom to flater til å produsere en elektrisk strøm. Dette skjer via termoionisk emisjon. Den varme siden er en katode, og den kalde er en anode. Katoden emitterer en strøm av elektroner til kollektoren (anoden), og slik genereres elektrisitet. Denne metoden er begrenset til høy-temperatur bruk, og har lav effektivitet.¹⁷

Termo-fotovoltaisk

En termo-fotovoltaisk enhet brukes til å direkte konvertere strålingsenergi til elektrisitet liknende et solcellepanel. Systemet bruker en emitter som avgir elektromagnetisk stråling når den utsettes for varme fra en varmekilde. PV-cellen omformer deretter strålingen til elektrisk energi. Et spektralfilter benyttes for å sikre at kun stråling med korresponderende bølgelengde til PV-cellen slipper gjennom fra emittoren. Effektiviteten til termo-fotovoltaiske enheter ligger i området 1 – 20 %, avhengig av varmeoverføringen, strålingen emittert, og hvordan generatoren er satt opp. utfordringer med denne teknologien er at den har et begrenset

operasjonsområde med tanke på temperatur, og effektiviteten til enheten synker når celledemperaturen øker. Det er mulig å benytte PV-celler med høy effektivitet som tåler høyere temperaturer, men disse er kostbare.¹⁷

2.5. Teknologi for spillvarmeutnyttelse - Termisk energilagring

Termisk energilagring kan brukes til å lagre spillvarme til senere bruk som et slags termisk batteri. Det skilles mellom tre måter å lagre energien fra en termisk energikilde på, og disse er varmelagring basert på temperaturendring, faseovergang eller en kjemisk reaksjon.¹

2.5.1. Følbar energilagring

Denne typen av varmelagring baserer seg på å lagre energi i form av å øke temperaturen i et materiale, slik at denne varmeenergien kan hentes ut ved et senere tidspunkt. Det vil være en fordel om materialet har en høy varmekapasitet, slik at man trenger mindre masse av materialet. Gjennom energioverføringen til det termiske energilageret skjer det ingen faseovergang, materialet får kun en økning i temperatur. Mengden varme som blir lagret vil være proporsjonal med tettheten, volumet, den spesifikke varmekapasiteten og økningen i temperatur til lagringsmediet.¹

Materialer som egner seg til bruk ved termisk energilagring er¹:

- Vann
- Termiske oljer
- Saltsmelter
- Flytende metaller
- Jordmaterialer
- Betongblokker

Fordelen ved bruk av denne type varmelagring er at mange av materialene som kan brukes er stabile ved høye temperaturer. Ulempen er at materialene også ofte er termisk stabile når de skal avgi varmeenergien. Foruten termiske oljer og flytende metaller har mange av materialene også en lav kostnad. Energitettheten i et termisk lager som baserer seg på temperaturøkning vil være mindre enn ved bruk av latent varmelagring. Noen av materialene som brukes til følbar varmelagring kan likevel ha tilstrekkelig stor energitetthet grunnet det store temperaturområdet de kan benyttes, og materialets høye tetthet.¹

2.5.2. Latent energilagring

Denne typen varmelagring benytter materialer som befinner seg i en faseovergang og opereres ved en fast temperatur. Potensialet for mengden energi som kan lagres i en faseovergang er størst fra væske til gass, men denne benyttes sjelden grunnet den store endringen i volum.

Potensialet i faseovergang fra fast til flytende brukes mest, men innebærer en mulighet for at det oppstår lekkasjer. Det finnes også mulighet for fast til fast overganger, men den spesifikke latente energien er mindre.¹

Materialer som kan brukes til latent varmelagring deles inn i organiske og uorganiske. Noen materialer som kan benyttes er¹;

- Organiske
 - Parafin
 - Ikke-parafin
 - Fettsyrer
 - Estere
 - Alkoholer
 - Glykoler
- Uorganiske
 - Salter
 - Salt eutektikum
 - Salthydrater
 - Metaller og legeringer

Fordelen med latent energilagring er at det er potensiale for å lagre større mengder energi enn ved følbare energilagring. Dette er fordi energien knyttet til den latente varmen involvert i faseovergangen til et materiale er i størrelsesorden 50-100 ganger større enn den spesifikke varmekapasiteten til materialet. En ulempe ved latent energilagring er at selv om temperaturen ved utladning av det latente lageret er tilnærmet konstant, har ofte stoffene som benyttes en lav termisk konduktivitet. I tillegg har en del av materialene som kan benyttes ulemper som for eksempel at de er korrosive, eller brannfarlige.¹

2.5.3. Kjemisk energilagring

Denne typen varmelagring benytter reversible kjemiske reaksjoner som absorberer termisk energi den ene veien, og frigjør termisk energi den andre. De operer i temperaturområdet mellom 200 og 400 °C. Etter oppladningsperioden der den kjemiske reaksjonen drives slik at den absorberer termisk energi kan produktene oppbevares hver for seg, slik at reaksjonen som frigjør energi ikke kan finne sted. Dersom produktene fra reaksjonen kan lagres uten å forringes,

kan de i teorien lagres i det uendelige. Så lenge produktene kan lagres uforringet er energien knyttet til den kjemiske reaksjonen lagret. Fordelene med kjemisk energilagring er potensialet for lang lagringstid, og at den har den største energitettheten per masse og per volum av varmelagringsteknologiene. Det er fortsatt uløste teknologiske utfordringer, og teknologien er fortsatt på laboratoriestadiet. Det kreves derfor forbedringer i teknologien før den kan kommersialiseres.¹

2.6. Prosjekt

2.6.1. Bedrift

Avdelinger og prosesser ved Borregaard

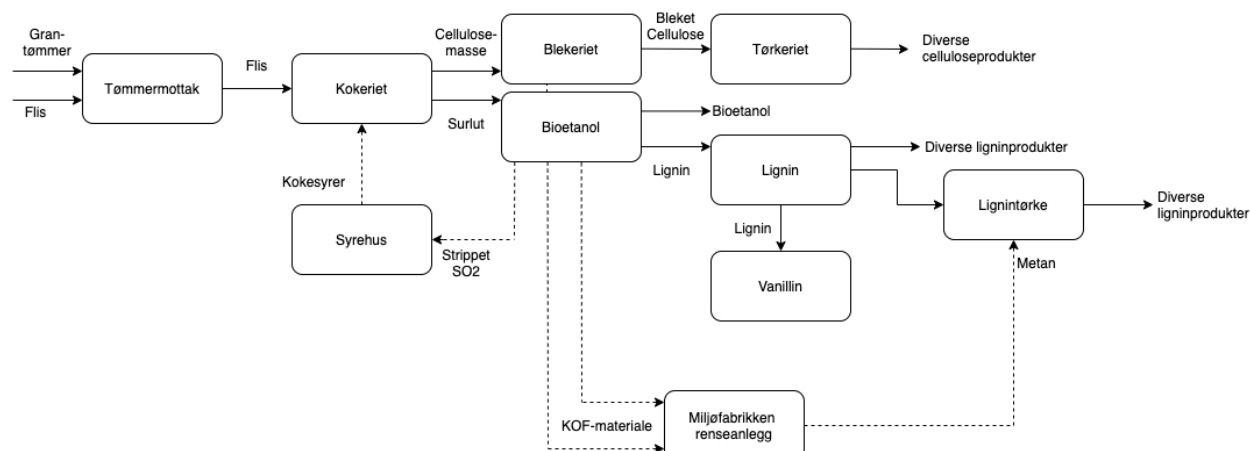
Borregaards fabrikk i Sarpsborg deles inn i en rekke ulike avdelinger som utfører ulike deler av produksjonen (Figur 16). I tømmermottaket og -renseriet, lokalisert på Opsund, tar bedriften i hovedsak inn grantømmer, og noe sagbruksflis. De hugger tømmeret til flis, som transporteres herfra til kokeriet. I kokeriet modnes flisen i siloer med en viss oppholdstid, før den så transporteres til beholdere der den syrekokes. Syrekokingen skiller treets bestanddeler fra hverandre. Etter kokeprosessen har flisen dermed blitt til en masse bestående av cellulosefibre, og det de lokalt kaller surlut. Surluten inneholder hemicellulose, lignin, syrerester og vann. Man må derfor skille surlut fra de frigjorte fibre. Dette gjøres i en serie av vaskeutstyr der man bruker motstrømsprinsippet. Man tilsetter rent vann på siste vaskeapparat og får best mulig fortrenningsvask (drenerer fibre samtidig som man tilsetter vaskevæske) pr. vaskeapparat. Her skilles surluten fra cellulosen. Cellulosen transporteres videre til blekeriet. Her vaskes og blekes cellulosen før den sendes til tørkeriet. Cellulosen tørkes og pakkes som ark, eller på rull, og er klar for å sendes til kunden.²⁹

Surluten som inneholder hemicellulosen, ligninet, syrerestene og vannet sendes til bioetanolfabrikken. Her strippes væsken for SO₂ i et inndampingsanlegg, og SO₂ sendes til syrehuset som gjenvinner den til bruk i kokeriet. Surluten som er igjen etter strippingen gjæres, slik at C-6 sukkerartene i hemicellulosen omdannes til etanol. Væsken sendes videre til destillering i et apparatus. Her skilles ligninet og ugjærbar hemicellulose fra den alkoholholdige væsken. I apparatuset går væsken gjennom en rekke ulike destilleringer, til den har blitt foredlet til henholdsvis 96% og 100% bioetanol klar for salg.²⁹

Ligninet og den ugjærbare hemicellulosen som skilles ut sendes til ligninfabrikken. Her skilles resten av den ugjærbare hemicellulosen fra ligninet, og den brukes til å lage noen sukkerholdige ligninvarianter. I ligninfabrikken produseres ulike ligninprodukter, og noe sendes til lignintørken for å tørkes i fremstilling til ligninpulver. En delstrøm av lignin sendes til vanillinfabrikken som produserer vanillin og etylvanillin.²⁹

Prosessavløpsvann som inneholder KOF-materiale (stoffer med et kjemisk oksygenforbruk ved nedbrytning) samles opp fra bioetanol og blekeriets prosess, og sendes til Borregaards renseanlegg, kalt Miljøfabrikken, for behandling. Her brukes mikroorganismer som forbruker

KOF-materialet. Mikroorganismene produserer metan, og denne benyttes som brensel i lignintørkene.²⁹



Figur 16: Blokkskjema over hele Borregaards avdeling i Sarpsborg. Oppgaven tar for seg et prosjekt i kokeriet. (Cecilie Borgen)

Borregaards primærråstoff

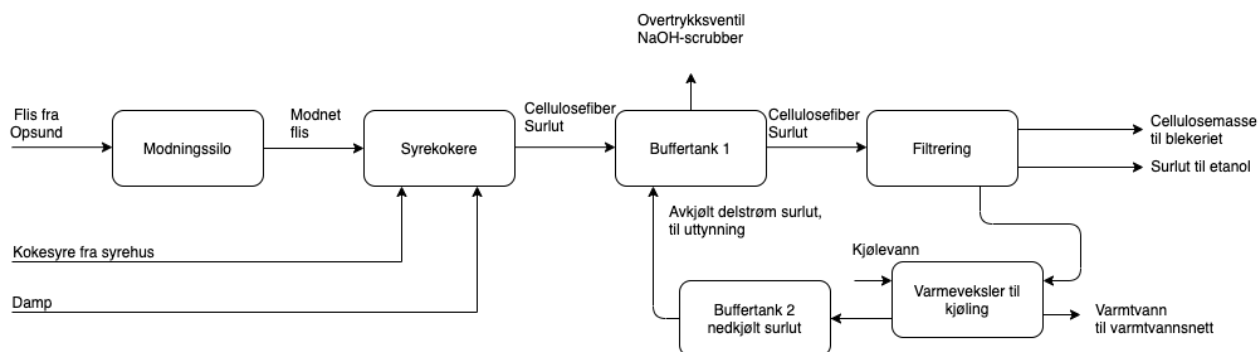
Borregaards primærråstoff er grantømmer, som raffineres til diverse produkter. Treets hovedbestanddeler er cellulose, hemicellulose og lignin¹¹, samt mindre mengder ekstraktiver og uorganiske salter.²⁹ Cellulose er et polysakkarid som har lange rette molekyler, som kan pakkes sammen tett parallelt, og er uløselig i vann.⁹ Det finnes både amorf og krystallinsk cellulose.²⁹ Stoffet består av lange fibre som avstiver treet, og brukes til papirproduksjon, eller eksempelvis som fibertilsetning i næringsmidler. Cellulose nedbrytes ikke i fordøyelsen til mennesker, og er et ufordøyelig karbohydrat. Dette betyr at produktet kan brukes i eksempelvis diettprodukter.⁹ Kun en liten andel av cellulosen som produseres av Borregaard går til denne bruken. Borregaards cellulose blir hovedsakelig benyttet som råstoff i produksjonen av celluloseacetat, cellulosederivat eller andre cellulosebaserte produkter.²⁹ Hemicellulose er polysakkarider satt sammen av monosakkarider som forekommer i cellers plantevegger sammen med cellulose. Hemicelluloser kan bestå av både rette og forgrenede molekyulkjeder, men kjedene er kortere enn cellulose, og molekylene legger seg ikke like organisert. Dette gjør hemicellulose lettere løselig enn cellulose. Mengden hemicellulose som skilles ut ved prosessering grunnet løselighet kan varieres etter behov.³² Lignin fungerer som et bindemiddel mellom cellulose- og hemicellulosefibre, slik at det dannes en vedstruktur i treet. Ligninet må fjernes fra treverket når en ønsker å fremstille cellulose, og ligninet har en rekke anvendelser.²⁴ Lignin kan blant annet brukes som dispergeringsmiddel, for eksempel i betong, eller som bindemiddel i pellets til dyrefôr.²

Prosessbeskrivelse kokeriet

Denne oppgaven tar for seg energigjenvinning i forbindelse med SO_2 -gjenvinning i en prosess i avdelingen kokeriet. I kokeriet blir flisen først sendt til en modningssilo der flisen oppholdes i et tilstrekkelig tidsrom for å oksidere deler av ekstraktivene i treverket. Dette er for å sikre et renere sluttprodukt i cellulosestrengen. Fra modningssiloen fordeles flisen på en rekke syrekokere hvor flisen oppholder seg tidvis under høyt trykk og gjennomgår forskjellige resepter og temperatur. Det tilsettes en kokesyre til flisen, samt damp til oppvarming. Kokeprosessen gjør ligninet og hemicellulosen vannløselige, og cellulosefibrene forblir uløste i væsken. Ved koketidens slutt slippes trykket i kokerne, og syrekokernes innhold tømmes til buffertank 1, som er under atmosfæretrykk (Figur 17). Innholdet i buffertank 1 består av cellulosefiber og surlut. Surluten er sammensatt av syrerester, vann, løst lignin og hemicellulose.²⁹

Syrerestene i surluten er hovedsakelig fri SO_2 og bundet HSO_3^- . Løseligheten av SO_2 i vann er avhengig av trykk og temperatur, den blir høyere ved høyere trykk, og ved synkende temperatur.³⁰ Derfor vil det frigjøres noe SO_2 -gass fra blandingen når væsken blir overført til buffertank 1, da trykket over væsken blir lavere slik at løseligheten av SO_2 synker. SO_2 -gassen fanges opp i et rørsystem og scrubbes med NaOH. Innholdet i buffertank 1 må tilsettes væske for nedkjøling, for å gjøre videre transport lettere. I dagens prosess er væsken som tilsettes i buffertank 1 en nedkjølt delstrøm av surlutstrømmen som sendes til bioetanolfabrikken. Blandingen fra buffertank 1 sendes gjennom en rekke vaskeapparater der surlut og cellulosefibre skilles fra hverandre, og den rene cellulosen fraktes til blekeriet. Resten av den løste flytende blandingen, surluten, skilles ut og sendes til bioetanolfabrikken for videre behandling.²⁹

Det tas en delstrøm fra surluten som ikke sendes direkte til bioetanolfabrikken. Denne delstrømmen avkjøles i en varmeveksler, og brukes til å fortynne og kjøle ned blandingen i buffertank 1. Væsken sendes gjennom en mindre buffertank, buffertank 2, før den tilsettes Buffertank 1. Avkjølingen av delstrømmen gjøres i dag med fabrikkvann, og slik produseres det varmtvann til lokal bruk, eksempelvis til rengjøring og lignende.²⁹



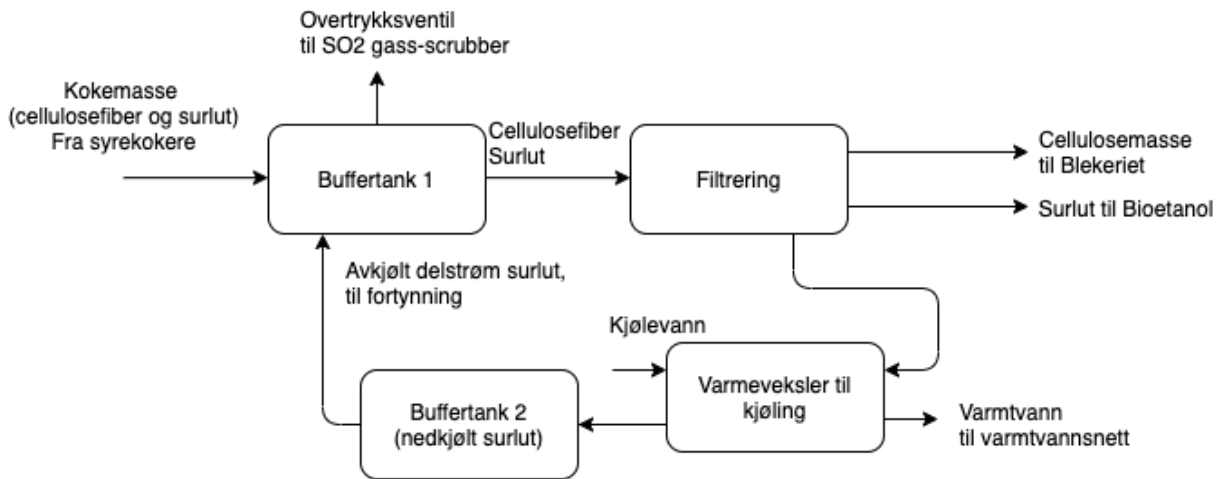
Figur 17: Blokkskjema med oversikt over prosessflyt i kokeriet ved Borregaard fabrikker i Sarpsborg. (Cecilie Borgen)

I dagens prosess i kokeriet er det ingen spesifikk prosess på plass for å redusere innholdet av SO_2 løst i produktet etter syrekokere. Gassen fjernes i stor grad først ved bioetanolfabrikkens prosess. Dette medfører at produktet blir transportert en betydelig avstand før SO_2 -gassen håndteres, og diverse produksjonsutstyr og rørsystemer utsettes for den korrosive gassen. Dette fører igjen til unødvendig slitasje på utstyr, i tillegg til at det fulle potensialet for gjenvinning av SO_2 -gassen ikke er utnyttet. I tillegg lukter det mye SO_2 fra de åpne systemene som ikke fanges opp og sendes til scrubber, og dette er et HMS-problem da SO_2 -gass er svært helseskadelig. Det er derfor hensiktsmessig å skille ut gassen allerede i kokeriet. Dette vil kunne minimere slitasje på utstyr, vil kunne føre til et mindre forbruk av råstoff til produksjon av kokesyre, og vil løse HMS-problemstillingen.²⁹

På grunn av disse ulempene ønsker bedriften å sette i gang et prosjekt som forflytter prosessen for fjerningen av SO_2 slik at denne finner sted så tidlig som mulig i produksjonen. Prosjektet vil være todelt slik at én del tar for seg den nye prosessen for fjerning av gassen, og den andre delen av prosjektet skal utrede spillvarmeutnyttelsen for den nye prosessen. Denne gradsoppgaven fokuserer på spillvarmeutnyttelsen for prosjektet.

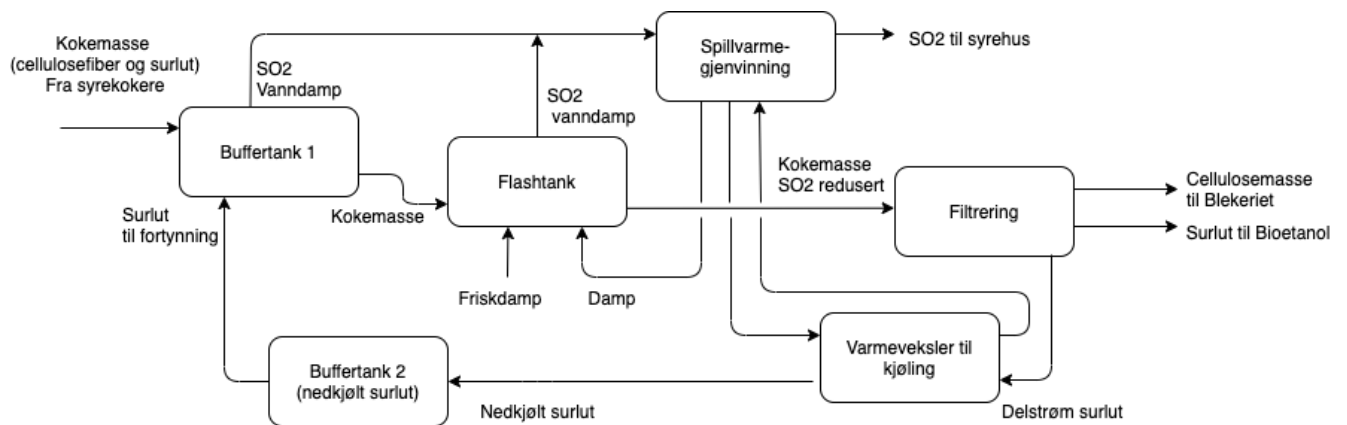
Bedriftens visjon for prosjekt i kokeriet for fjerning av SO_2

Bedriften ønsker å gjøre et tiltak i kokeriets prosess slik at SO_2 -gassen fjernes så tidlig som mulig i prosessflyten, dermed transporteres ikke den giftige og korrosive gassen med surluten til Bioetanolfabrikken. Kokemassen fra syrekokere består av cellulosefibre og surlut. Selv ved lave konsentrasjoner av cellulosefibre i denne blandingen har kokemassen en svært høy viskositet. Det er en av grunnene til at det i dagens prosess tilsettes avkjølt surlut til buffertank 1. Løsningen bedriften ønsker å utrede er å sette inn en flashtank mellom buffertank 1 og transportviren mot Bioetanolfabrikken (Figur 18).



Figur 18: Skisse av aktuell prosessflyt i kokeriet før prosjekt. (Cecilie Borgen)

I den nye prosessflyten vil fortsatt kokemassen fra syrekokerne sendes til buffertank 1, hvor noe av SO_2 -gassen vil dampe av grunnet trykkfallet. For å fortynne og avkjøle kokemassen tilsettes en nedkjølt delstrøm av surluten slik som før. Denne delstrømmen vil ha et redusert SO_2 -innhold grunnet det nye systemet, og vil derfor føre til at prosentandelen SO_2 i væsken i buffertank 1 reduseres sammenliknet med dagens prosess. Innholdet fra buffertank 1 sendes inn i flashtanken. Her vil det økte overflatearealet føre til at mer av SO_2 -gassen frigjøres fra væsken. I tillegg ønsker de en damptilsetning i bunnen av flashtanken via spargere. Damptilsetningen vil føre til omrøring av kokemassen, og agitasjonen vil frigjøre flere SO_2 -gassbobler til atmosfæren i tanken. I tillegg synker løseligheten av SO_2 løst i vann når temperaturen stiger³⁰, slik at temperaturøkningen fra dampen vil føre til at mer SO_2 -gass frigjøres fra kokemassen. Kokemassen sendes fra flashtanken til transportviren slik som i dagens system. Her vil surluten som filtreres ut fra transportviren ha et betydelig lavere innhold av SO_2 enn i dagens prosess. Surluten sendes til Bioetanol for videre prosessering slik som før, og delstrømmen som benyttes til fortynning i buffertank 1 tas fortsatt fra denne strømmen (Figur 19). Dimensjonering og valg av prosessutstyr til selve flashingen er ikke utredet i denne gradsoppgaven.



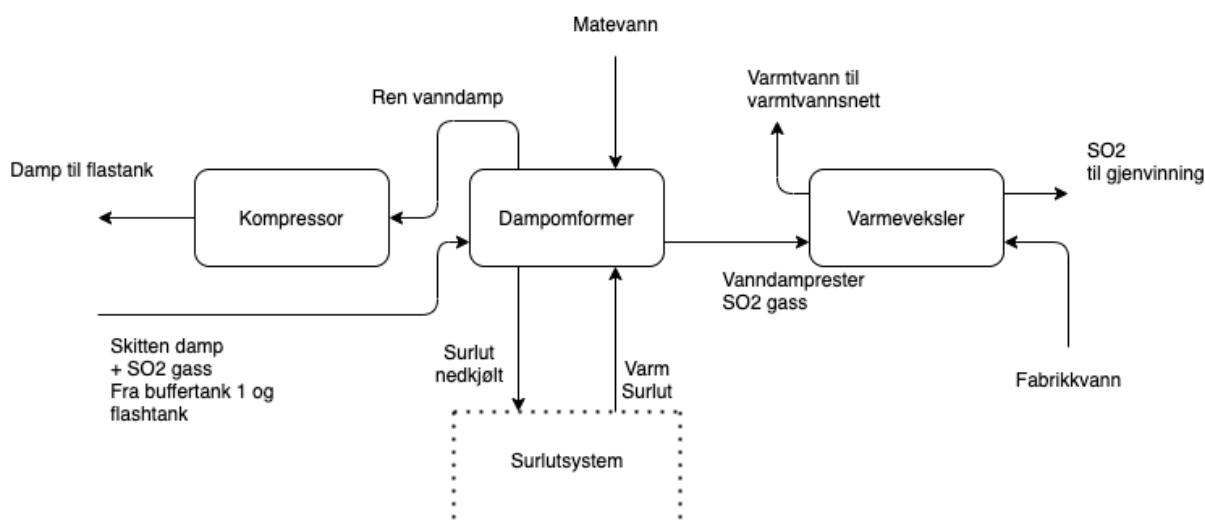
Figur 19: Skisse av aktuell prosessflyt i kokeriet etter prosjekt. (Cecilie Borgen)

For å spare energi ønsker bedriften å utrede muligheten for å benytte overskuddsvarmen i damp-gass-blandingen fra flashttrinnet til å drifte flashttrinnet. Slik benytter de spillvarmen fra den nye prosessen tidligst mulig i prosessen. Dette blir ansett som et separat delprosjekt i tillegg til hoveddelen i prosjektet for fjerning av SO₂. Delprosjektet som angår spillvarmeutnyttelsen er utgangspunktet for denne gradsoppaven.

Et mulig oppsett av prosjektets spillvarmegjennvingssystem

Energieffektivisering av prosessen for fjerning av SO₂ sammenfaller med Borregaards strategi for energibesparelser i sine anlegg. De ønsker å utrede muligheten for å nyttiggjøre spillvarmen fra damp-gass-blandingen som fanges opp fra buffertank 1 og flashtanken, samt spillvarmen fra nedkjølingen av surlutdelstrømmen (Figur 20).

For å minimere termiske tap fra spillvarme bør den omsettes så geografisk nær kilden som mulig, og så raskt som mulig. I tillegg burde den benyttes slik at den har størst mulig nytteverdi, det vil si der det er størst potensiale for besparelser. Derfor ønsker de å utrede om denne varmeenergien kan benyttes til deler av oppvarmingen i produksjon av dampen som skal tilsettes i flashtanken. Dette sørger for at utnyttelsen er relativt nær spillvarmekilden. Friskdamp produseres ved bruk av LNG og elektrisitet, så en reduksjon av bruk av friskdamp har potensiale for besparelser. Denne energieffektiviseringen er utgangspunktet for denne gradsoppaven.



Figur 20: Illustrasjon av mulig prosessflyt i damp- og spillvarmegjennvinningsystem tilhørende prosjekt for fjerning av SO₂. (Cecilie Borgen)

2.6.2. Teoretisk grunnlag for beregninger

Sammenhengen mellom masse, molar masse og antall mol til et stoff beskrives av den følgende ligningen,

$$m = \frac{n}{Mm} \quad [2]$$

Der m er stoffets masse i kg, n er antall mol av stoffet i mol, og Mm er den molare massen til stoffet i kg/mol.

Ved visse tilfeller oppgis mengden gass som tilsettes i en prosess i en stor normalkubikkmeter (1 Nm³). Denne mengden tilsvarer antall kubikkmeter det er av en gass når den måles ved 0 °C og 1 atm. 1 Nm³ tilsvarer 1/22,414 kmol av gassen. Slik kan antall Nm³ av gassen omgjøres til masse;

$$m_{gass} = \frac{1/22,414 \times 10^3 \text{ mol}}{Mm} \times snk \quad [3]$$

Der m_{gass} er massen til gassen i g, $1/22,414 \times 10^3 \text{ mol}$ er omregningsfaktoren mellom en stor normalkubikkmeter og massen til gasser, Mm er den molare massen til gassen i g/mol, og snk er antall stor normalkubikkmeter av gassen i Nm³.

Når stoffer varmes opp må det tilsettes en gitt mengde energi. Varmen (energien) som tilsettes fører til en følbare temperaturendring. Dette kalles derfor for følbare varme. Energimengden som kreves finner man med ligningen

$$Q_{f\bar{o}l} = mc_p\Delta T \quad [4]$$

Der $Q_{f\bar{o}l}$ er den følbare varmeenergien i kJ, m er massen til stoffet som oppvarmes i kg, c_p er den spesifikke varmekapasiteten til stoffet i kJ*(kg*K)⁻¹, og ΔT er temperaturendringen i K.

Ved faseovergang mellom to faser kalles mengden energi som kreves for den latente varmeenergien. Den latente varmeenergien som omsettes i faseovergangen til et medium kan finnes med ligningen

$$Q_{lat} = mL \quad [5]$$

Der Q_{lat} er den latente varmeenergien i kJ, m er massen til stoffet som oppvarmes i kg, og L er den spesifikke fordampningsvarmen til stoffet i kJ/kg.

Ved dampproduksjon vil den totale energimengden som kreves for å omdanne vann ved en gitt starttemperatur være en sum av den følbare og latente varmeenergien. Sammenhengen uttrykkes slik

$$Q_{tot} = Q_{f\bar{o}l} + Q_{lat} \quad [6]$$

Der Q_{tot} er den totale energien som kreves for å heve temperaturen til kokepunktet, og deretter sørge for faseovergangen, i enheten kJ, $Q_{f\bar{o}l}$ er den følbare varmeenergien i kJ, og Q_{lat} er den latente varmeenergien i kJ.

Ved kondensering av damp og avkjøling av kondensatet til en gitt temperatur, benyttes også formel 6.

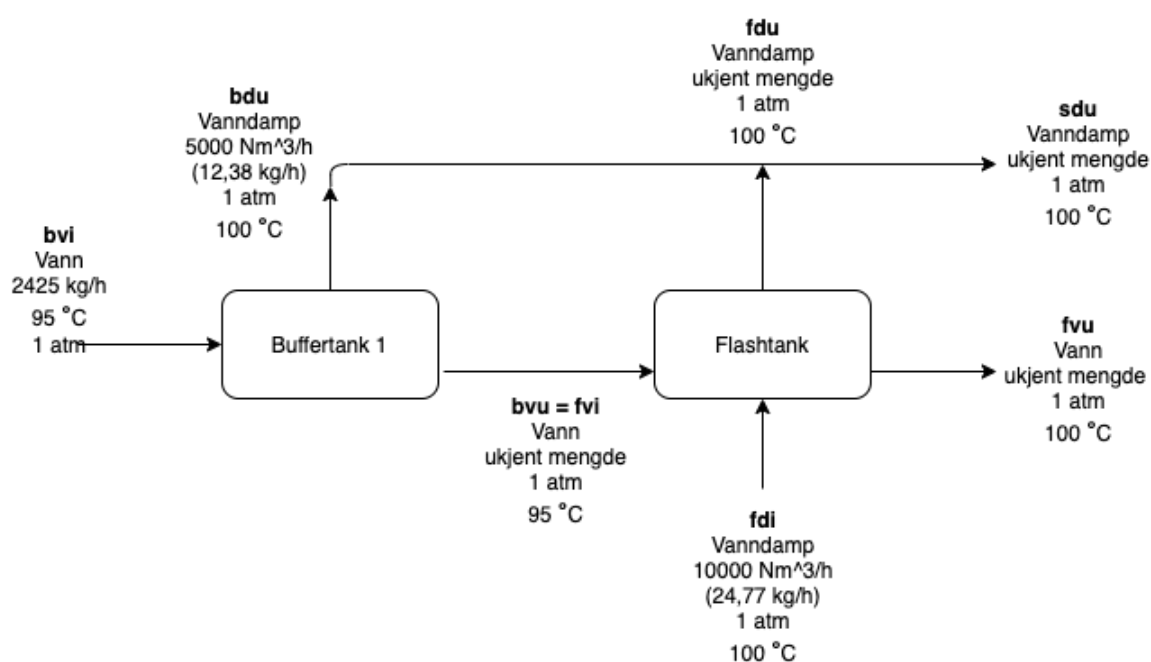
3. Metode

3.1. Undersøkelse av energipotensial

For å undersøke energipotensialet i denne prosessen ble det gjort en rekke antagelser og forenklinger av systemet.

Den totale mengde kokemasse inn på buffertank 1 vil være 2500 kg/h.²⁹ Da kokemassen inneholder rundt 97 % vann, antas det at tilsetningen til denne kan forenkles til 2425 kg rent vann per time. Det antas at dette vannet holder en temperatur på 95 °C.²⁹ Dette er antagelser basert på mengdene i prosessflyten til kokeriet før prosjekt. Videre estimeres det at det damper av 10 000 Nm³ gass fra buffertank 1 per time²⁹, hvorav det antas at 5000 Nm³ er vanndamp, og resten er SO₂-gass. Det antas at temperaturen på væsken øker til 100 °C i flashtanken grunnet damptilsetningen. Damptilsetningen i flashtank antas å være på 10 000 Nm³ per time. Trykket i systemet er antatt å være 1 atm (Figur 21). Dette innebærer at det er antatt at dampen som tilsettes i flashtanken holder 1 atm. Ved disse forutsetningene sammenliknes energibruken ved å produsere damp med en elektrisk kjele, mot å produsere damp med spillvarmen.

Det antas at SO₂-gasses interaksjoner med energibruken på damp og vann kan sees bort fra, da denne vil være lik uavhengig av produksjonsmetode for damptilsetningen til flashtank.



Figur 21: Utgangspunkt for beregninger, og illustrasjon av tilhørighet til variabler for medium, strømmeretning og posisjon som benyttet i beregninger. (Cecilie Borgen)

Variablene som er benyttet i beregningene er strukturert etter fysisk størrelse(Tabell 3), og deretter etter hvilket medium, strømmeretning i systemet samt om størrelsen er tilknyttet buffertank 1 eller flashtank(Tabell 2).

Tabell 2: Oversikt over medium, posisjonen og strømmeretning som benyttes i beregninger, i forbindelse med figur 21. Fysisk størrelse som kombineres med variabelnavnene kan finnes i tabell 3.

Medium, strømmeretning og posisjon	Forkortet variabel
Vann inn buffertank	bvi
Vann ut buffertank	bvu
Damp ut buffertank	bdu
Vann inn flashtank	fvi
Vann ut flashtank	fvu
Damp inn flashtank	fdi
Damp ut flashtank	fdu
Sum damp ut	sdu

Tabell 3: Fysiske størrelser og de tilhørende variabelnavnene. x , y og z representerer de forkortede variablene for medium, strømmeretning og posisjon fra tabell 2.

Fysisk størrelse	Forkortet variabel
Masse	$m_{x,y,z}$
Mol	$n_{x,y,z}$
Molar masse	$Mm_{x,y,z}$
Tetthet	$\rho_{x,y,z}$
Volum	$V_{x,y,z}$
Spesifikk varmekapasitet	$c_{p\ x,y,z}$
Spesifikk fordampningsvarme	$L_{x,y,z}$
Latent varme	$Q_{lat\ x,y,z}$
Følbar varme	$Q_{føl\ x,y,z}$

3.1.1. Masse og energibalanse i buffertank 1 og flashtank

Det første som må bestemmes er masseflyten av vann og vanndamp gjennom buffertank 1 og flashtanken. Det vil si hvor mye vann som vil forflyttes fra buffertank 1 til flashtanken, som vil være avhengig av antagelsene for hvor mye som sendes inn i buffertanken, og som fordamper ut av den, slik som beskrevet i kapittel 3.1. Deretter må det bestemmes hvor mye damp som vil gå ut av flashtanken ved tilsetning av $10\,000\text{ Nm}^3$ damp, og hvor mye vann som vil sendes ut av flashtanken.

Først bestemmes massen av vanndampen som damper av buffertank 1, m_{bdu} , ved hjelp av formel 3. Deretter bestemmes massen av vannet som blir sendt videre til flashtanken ($m_{bvu} = m_{fvi}$) ved å trekke massen som fordamper fra buffertanken fra massen som tilsettes buffertanken.

Vannet som går inn til flashtanken, m_{fvi} , oppvarmes til fra 95 °C til 100 °C grunnet termisk likevekt. Energimengden som kreves for dette finnes ved formel 4. Denne varmeenergien, $Q_{f\phi l_{fvi}}$, kommer fra damptilsetningen. Massen av vanndampen som tilsettes flashtanken, m_{fdi} , omgjøres fra $10\,000\text{ Nm}^3$ til kg ved formel 3.

Det vil fordampe vanndamp fra flashtanken. Det antas at mengden vanndamp ut av flashtanken vil være den resterende vanndampmengden som ikke kondenseres ved oppvarmingen $Q_{f\phi l_{fvi}}$. Varmeenergien som frigjøres ved kondenseringen av vanndampen, Q_{lat} er lik varmeenergien som ble benyttet til oppvarming av væske i flashtanken, $Q_{f\phi l_{fvi}}$. Massen av vanndampen som kondenseres, m_{fd} blir funnet ved formel 5. Mengden vanndamp ut av flashtanken, m_{fdu} , kan dermed finnes ved å trekke den kondenserte mengden, m_{fd} , fra dampmengden som tilsettes, m_{fdi} .

Mengden vann som sendes ut av flashtanken, m_{fvu} , finnes enkelt ved å legge sammen massene til vann og vanndamptilsetningene, og trekke fra mengden vanndamp som fordamper.

3.1.2. Estimert energibruk på dampproduksjon av elektrisitet

Det neste som skal bestemmes er hvor mye elektrisk energi som går med til å produsere vanndamp dersom flashtanken kun skal driftes på friskdamp. Her antas det at dampkjelen har en virkningsgrad på 85 %. Den totale varmeenergien som behøves for å produsere mengden damp som skal tilsettes i flashtanken, m_{fdi} , bestemmes ved formel 4, 5 og 6.

3.1.3. Estimert energibruk på dampproduksjon av spillvarme

Til slutt skal det bestemmes hvor mye av damptilsetningen i flashtanken som kan produseres ved hjelp av spillvarmen som finnes i dampen som har flashet av fra buffertank 1 og flashtanken. Den skitne vanndampen som blir samlet opp fra buffertank 1 og flashtanken, m_{sdu} , sendes i en varmeveksler motstrøms matevann som holder en temperatur på 85 °C. Det antas at veksleren kan dimensjoneres slik at all den skitne vanndampen kondenseres, og deretter avkjøles til 85 °C.

Den totale varmeenergien fra den skitne vanndampen, $Q_{tot\,sdu \rightarrow svu}$, vil være en sum av den latente varmeenergien som frigjøres ved kondenseringen, $Q_{lat\,sdu}$, og den følbare varmeenergien som frigjøres ved avkjøling av kondensatet fra 100 °C til 85 °C, $Q_{f\,sdu}$. Disse blir funnet ved å benytte formel 4, 5 og 6.

Deretter antas det at hele den totale varmeenergien fra den skitne vanndampen, $Q_{tot\,sdu \rightarrow svu}$, omsettes, og benyttes til å produsere damp som kan tilsettes til flashtanken. Varmeenergien som benyttes til å produsere denne dampen vil være lik $Q_{tot\,sdu \rightarrow svu}$, og massen damp som kan produseres, $m_{damp\,av\,spillvarme}$, kan bli funnet ved bruk av formel 6. Differansen mellom flashtankens forbruk av damp, m_{fdi} , og mengden damp som kan produseres via spillvarmeutnyttelse, $m_{damp\,av\,spillvarme}$, vil være mengden friskdamp som må tilsettes i tillegg til mengden som er produsert av spillvarmeenergien. Varmeenergien $Q_{tot\,sdu \rightarrow svu}$ vil være det teoretisk maksimale energipotensialet ved spillvarmegjenvinningen.

Liste over forenklinger og antagelser som er gjort:

- **Antagelse 1:** Det er antatt en masseflyt av vann inn til buffertank 1, på 2425 kg per time med en temperatur på 95 °C, og 1 atm trykk.

- **Antagelse 2:** Det er antatt at væsken i buffertank 1 holder 95 °C, men at det likevel flasher av 5000 Nm³ vanndamp som holder en temperatur på 100 °C.
- **Antagelse 3:** Antatt at systemet kun får tilsatt mettet vanndamp med en temperatur på 100 °C og med trykk på 1 atm.
- **Antagelse 4:** Bedriften antar selv at det damper av 10 000 Nm³ gass fra buffertank 1, som vil være sammensatt av vanndamp og SO₂-gass. Det er antatt at forholdet mellom disse vil være 5000 Nm³ mettet vanndamp og 5000 Nm³ SO₂-gass.
- **Antagelse 5:** Det er antatt et tilsetningsbehov på 10 000 Nm³ vanndamp til flashtank 1.
- **Antagelse 6:** Det er antatt at systemet med dampomformer og kompressor som vist i Figur 20, kan forenkles til kun en varmeveksling, med formål å anslå det teoretisk største energipotensialet.
- **Antagelse 7:** Det antas at SO₂-gassens interaksjoner med det øvrige energi-damp-systemet kan sees bort fra, da gassen befinner seg langt unna forhold for faseovergang. Det antas at energi knyttet til konduksjon til og fra SO₂-gassen kan neglisjeres.
- **Antagelse 8:** Det antas at systemet kan forenkles til kun masseforflytning av vann og vanndamp, og til energiinteraksjoner kun mellom vann og vanndamp.
- **Antagelse 9:** Det er antatt at væsken i flashtanken vil øke til 100 °C, grunnet termisk likevekt med vanndamptilsetningen.
- **Antagelse 10:** Det er antatt at energi fra den tilsatte vanndampen i flashtank fordeles mellom å omsettes til følbar varmeenergi i væsken, eller som vanndamp i avdampen til flashtanken. Tap grunnet friksjon og interaksjoner med andre stoffer er derfor sett bort fra.
- **Antagelse 11:** Flashtankinnholdet er for viskøst til å direkte varmeveksles. Innholdet må motstrøms vaskes med fabrikkvann, som deretter kan varmeveksles. Dette gjør

spillvarmepotensialet for denne knyttet til væsken ut av flashtanken vanskelig å anslå. Det er derfor antatt det vil produseres like store mengder varmtvann fra vaskevannet slik som i dagens prosess. Disse vil derfor være like i begge alternativer som vurderes, og kan derfor sees bort fra.

- **Antagelse 12:** I spillvarmegjenvinningen er det antatt at 100 % av den skitne dampen fra systemet vil kondensere.
- **Antagelse 13:** I spillvarmegjenvinningen er det antatt at kondensatet fra den skitne dampen kan kjøles ned til 85 °C motstrøms matevannet som har starttemperatur 85 °C.
- **Antagelse 14:** I spillvarmegjenvinningen blir det antatt at en varmeveksling kan produsere tilsetningsklar mettet vanndamp ved 100 °C, og 1 atm trykk.
- **Antagelse 15:** At det ikke er behov for bruk av elektrisk energi i en kompressor eller liknende i spillvarmegjenvinningen, ved produksjon av vanndamp til damptilsetning.
- **Antagelse 16:** I beregningen av estimert elektrisk energibruk til produksjon av vanndamp til flashtank er det antatt at dampproduksjonen har en virkningsgrad på 85 %.
- **Antagelse 17:** Det er antatt i den elektriske produksjonen av vanndamp at virkningsgraden på 85 % gjelder for hele varmeoverføringen til matevannet, det vil si både den latente og følbare varmeenergiendringen.
- **Antagelse 18:** Det er ikke tatt til høyde for en virkningsgrad i omsetningen av energipotensialet i spillvarmen. Det er altså antatt en virkningsgrad for bruken av denne på 100 %.

4. Resultat

4.1. Undersøkelse av energipotensial

4.1.1. Masse- og energibalanse i buffertank 1 og flashtank

De beregnede vann- og vanndampmassene inn og ut av buffertank 1, samt en fremstilling av massebalansen i buffertanken er vist i Tabell 4.

Tabell 4: Masser og massebalansen for buffertank 1. Verdiene er angitt per time.

Buffertank			
Masse inn i kg		Masse ut i kg	
Vann inn, m_{bvi}	2425,00	Vann ut, m_{bvu}	2412,62
		Damp ut, m_{bdu}	12,38
Totalt	2425,00	Totalt	2425,00

De beregnede vann- og vanndampmassene inn og ut av flashtanken, samt en fremstilling av massebalansen i flashtanken er vist i Tabell 5.

Tabell 5: Masser og massebalanser for flashtanken. Verdiene er angitt per time.

Flashtank			
Masse inn i kg		Masse ut i kg	
Vann inn, m_{fvi}	2412,62	Vann ut, m_{fvu}	2435,13
Damp inn, m_{fdi}	24,77	Damp ut, m_{fdu}	2,26
Totalt	2437,38	Totalt	2437,38

Kondensasjonsvarmen som ble omsatt til temperaturøkningen av vannet inn i flashtanken ble funnet til å være $Q_{f\phi l_{fvi}} = 50791,62 \text{ kJ}$.

4.1.2. Estimert energibruk på dampproduksjon av elektrisitet

De beregnede verdiene for den elektriske energien som må benyttes for å heve temperaturen fra 85 °C til 100 °C, samt til å danne vanndamp til friskdamptilsetning i flashtanken er vist i Tabell 6. De korresponderende varmeenergiene er også vist i tabellen.

Tabell 6: De beregnede verdiene ved produksjon av vanndamp for friskdamptilsetning i flashtanken. Verdiene er angitt per time.

Størrelse	Variabel	Enhet	Verdi
ΔT	-	K	15,00
Følbar varmeenergi	$Q_{f\ddot{o}l_{fdi}}$	kJ	1560,78
Latent varmeenergi	$Q_{lat_{fdi}}$	kJ	55880,78
Total varmeenergi	$Q_{tot_{fdi}}$	kJ	57441,56
Elektrisk energi	$E_{tot_{fdi}}$	kJ	67578,31

$$E_{tot_{fdi}} = 67578,31 \text{ kJ}$$

$$E_{tot_{fdi}} = 18,77 \text{ kWh}$$

4.1.3. Estimert energibruk på dampproduksjon av spillvarme

Massen skitten damp som fanges opp fra buffertank 1 og flashtanken, og de beregnede verdiene for den følbare, latente og totale varmeenergien fra den skitne vanndampen som omsettes i spillvarmegjenvinningen er vist i Tabell 7.

Tabell 7: Beregnede verdier for kondensering og avkjøling av skitten damp til spillvarmegjenvinning. Verdiene er angitt per time.

Skitten damp			
	Variabel	Enhet	Verdi
Masse	m_{sdu}	kg	14,64
ΔT	-	K	15,00
Følbar varmeenergi	$Q_{f\ddot{o}l_{sdu}}$	kJ	922,53
Latent varmeenergi	$Q_{lat_{sdu}}$	kJ	33029,54
Total varmeenergi	$Q_{tot_{sdu \rightarrow svu}}$	kJ	33952,08

Den beregnede mengden damp som kan produseres direkte fra varmeenergien som omsettes fra den skitne dampen er vist i Tabell 8.

Tabell 8: Mengden damp som kan produseres fra spillvarme i damp samlet opp fra buffertank 1 og flashtank. Verdiene er angitt per time

Produsert ren damp			
	Variabel	Enhet	Verdi
Total varmeenergi	$Q_{tot\,sdu \rightarrow svu}$	kJ	33952,08
ΔT	-	K	15,00
Masse	$m_{damp\,av\,spillvarme}$	kg	14,64

$$E_{damp\,fra\,spillvarme} = Q_{tot\,sdu \rightarrow svu} = 33952,08\,kJ$$

$$E_{damp\,fra\,spillvarme} = 9,43\,kWh$$

5. Diskusjon

5.1. Drøfting av resultater

Mengden elektrisk energi som kreves for å produsere 10 000 Nm³ vanndamp til tilsetningen i flashtanken er estimert til å være rundt 18,77 kWh. Estimert for hvor mye damp som kan produseres fra spillvarmen i avdampen fra buffertank 1 og flashtanken er 9,43 kWh. Dette utgjør omtrent 50 % av den elektriske energien som kreves for å produsere all vanndamp til tilsetningen. Dette er det teoretiske maksimale energipotensialet for et system med de betingelsene som er satt opp. Dette indikerer at det kan være mulig å spare 50 % av elektrisitetsforbruket som benyttes til dampproduksjon, dersom 100 % av spillvarmen i avdampen kan omsettes til ny damp. De 9,43 kWh utgjør 0,0000018 % av bedriftens totale elektrisitetsforbruk i 2018. Det er derfor usikkert om det vil være økonomisk lønnsomt å implementere et slikt system.

Det er likevel grunnlag for å si at tiltaket burde vurderes. En reduksjon i forbruket av friskdamp vil direkte føre til et mindre forbruk av LNG i dampproduksjonen til Borregaard, da dette er en del av Borregaards topplastproduksjon. En reduksjon i bruk av LNG vil føre til en reduksjon i bedriftens utslipp i CO₂-ekvivalenter, og økt spillvarmegjennvinning passer godt inn i bedriftens visjon om en mer bærekraftig produksjon.

Det teoretiske energipotensialet i en spillvarmekilde vil være større enn det energipotensialet som er teknisk mulig å utnytte, og det energipotensialet som er teknisk mulig å utnytte vil ofte være større enn det energipotensialet det er økonomisk lønnsomt å benytte. Derfor er vil besparelsen i dampproduksjonen være enda mindre enn anslaget som er beregnet i denne oppgaven. Altså vil energipotensialet være under 50 % av damptilsetningsbehovet i flashtanken.

Tallene er i tillegg svært usikre, da det er gjort svært mange antagelser og forenklinger i utregningene i denne gradsoppgaven, antagelsene drøftes ytterligere i kapittel 5.2 – forsøksoppsett. Det vil derfor være vanskelig å trekke noen konklusjoner ut fra disse resultatene, uten en rekke forbehold.

5.2. Drøfting av forsøksoppsett

5.2.1. Antagelser og forenklinger av systemutgangspunkt

Antagelse 1: *Det er antatt en masseflyt av vann inn til buffertank 1, på 2425 kg per time med en temperatur på 95 °C, og 1 atm trykk.*

Denne antagelsen er basert på informasjon om prosess fra bedrift. Informasjonen har blitt tolket som at 97 % av kokemassen er vann. Dersom denne informasjonen er feil vil dette påvirke alle resultatene, da resten av masseflyten er beregnet fra denne verdien. Likevel vil dette ikke gi et ulikt utgangspunkt for sammenlikning mellom dampproduksjon fra ren elektrisk energi, og dampproduksjon fra spillvarme. Dette er en mulig feilkilde på for størrelsen på varmeenergiene som er beregnet for de to alternativene, men ikke for forholdene mellom de.

Antagelse 2: *Det er antatt at væsken i buffertank 1 holder 95 °C, men at det likevel flasher av 5000 Nm³ vanndamp som holder en temperatur på 100 °C.*

Dette er nok en uriktig antagelse, i alle fall i størrelsesorden til antagelsen om avdamp fra flashtank. Væsken i flashtanken holder 100 °C, men avgir likevel mindre avdamp enn buffertanken, grunnet denne antagelsen. Dersom denne flashingen skal være mulig fra buffertanken med væske som holder 95 °C må systemet antagelig ha et trykk under 1 atm. Dette gir et stort utslag på spillvarmepotensialet, fordi dette er en feilkilde som kan påvirke mengden skitten vanndamp.

Antagelse 3: *Antatt at systemet kun får tilsatt mettet vanndamp med en temperatur på 100 °C og med trykk på 1 atm. Dampsystem vil driftes under høyere trykk i virkeligheten, for å kunne transportere gassen effektivt fra et sted til et annet.*

Dette er en antagelse som er gjort for å forenkle beregningene. Det endrede trykket vil påvirke energibalansen for systemet, i tillegg til energibruken på dampproduksjonen. Dette burde vært korrigert for.

Antagelse 4: *Bedriften antar selv at det damper av 10 000 Nm³ gass fra buffertank 1, som vil være sammensatt av vanndamp og SO₂-gass. Det er antatt at forholdet mellom disse vil være 5000 Nm³ mettet vanndamp og 5000 Nm³ SO₂-gass.*

Dette er igjen en antagelse som i utstrakt grad påvirker masse- og energibalansen til systemet. Det hadde vært ønskelig med bedre datatilgang om fraksjonene i gassblandingen som fanges

opp fra dagens prosess, for å kunne estimere en mer korrekt mengde vanndamp ut av buffertank 1.

Antagelse 5: *Det er antatt et tilsetningsbehov på 10 000 Nm³ vanndamp til flashtank 1.*

Denne mengden ble kun antatt basert på mengde avgass bedriften antok fra buffertank 1, og ikke på det faktiske behovet til flashtankprosessen. Dette vil ha et vesentlig utslag på energipotensialet.

5.2.2. Antagelser og forenklinger av systeminteraksjoner

Antagelse 6: *Det er antatt at systemet med dampomformer og kompressor som vist i Figur 20, kan forenkles til kun en varmeveksling, med formål å anslå det teoretisk største energipotensialet.*

Et system som forenkles til en varmeveksling på denne måten vil naturligvis ha et større energipotensiale enn et system som er avhengig av å forbruke elektrisk energi under drift. Dette vil likevel gi en pekepinn på størrelsesordenen til varmeenergien som kan utnyttes fra systemet.

Antagelse 7: *Det antas at SO₂-gassens interaksjoner med det øvrige energi-damp-systemet kan sees bort fra, da gassen befinner seg langt unna forhold for faseovergang. Det antas at energi knyttet til konduksjon til og fra SO₂-gassen kan neglisjeres.*

Antagelse 8: *Det antas at systemet kan forenkles til kun masseforflytning av vann og vanndamp, og energiinteraksjoner kun mellom vann og vanndamp.*

Antagelse 9: *Det er antatt at væsken i flashtanken vil øke til 100 °C, grunnet termisk likevekt med vanndamptilsetningen.*

Antagelse 7, 8 og 9 henger delvis sammen, og er en feilkilde til energi og massebalansen til systemet.

Antagelse 10: *Det er antatt at energi fra den tilsatte vanndampen i flashtank fordeles mellom å omsettes til følbar varmeenergi i væsken, eller som vanndamp i avdampen til flashtanken. Tap grunnet friksjon og interaksjoner med andre stoffer er derfor sett bort fra.*

Dette er en antagelse som kan være en vesentlig feilkilde i beregningen av energibruken til systemet.

Antagelse 13: *I spillvarmegjenvinningen er det antatt at kondensatet fra den skitne dampen kan kjøles ned til 85 °C motstrøms matevannet, som har starttemperatur 85 °C.*

Dette er teoretisk mulig, men svært urealistisk.

Antagelse 14: *I spillvarmegjenvinningen blir det antatt at en varmeveksling kan produsere tilsetningsklar mettet vanndamp ved 100 °C, og 1 atm trykk.*

En varmeveksling kan produsere noe tilsetningsklar mettet vanndamp ved det trykket og den temperaturen, men det er ikke mulig når varmekilden ikke er varmere ønsket utgangstemperatur på dampen. Dette henger sammen med antagelse 15.

Antagelse 15: *At det ikke er behov for bruk av elektrisk energi i en kompressor eller liknende i spillvarmegjenvinningen, ved produksjon av vanndamp til damptilsetning.*

Det vil mest sannsynlig være behov for bruk av en kompressor eller lignende, slik at trykk- og temperaturforholdene kan legges til rette.

5.2.3. Antagelser og forenklinger av virkningsgrader

Antagelse 16: *I beregningen av estimert elektrisk energibruk til produksjon av vanndamp til flashtank er det antatt at dampproduksjonen har en virkningsgrad på 85 %.*

Antagelse 17: *Det er antatt i den elektriske produksjonen av vanndamp at virkningsgraden på 85 % gjelder for hele varmeoverføringen til matevannet, det vil si både den latente og følbare varmeenergiendringen.*

Antagelse 16 og 17 tar utgangspunkt i vanlige virkningsgrader oppgitt for dampkjeler. Det er noe usikkert om hele varmeenergiendringen til matevannet skal benyttes til denne beregningen, eller om effektiviteten er oppgitt kun for den latente varmeovergangen. Dette vil ha innvirkning på mengden elektrisk energi som er presentert i resultatene. I tillegg kan det være at Borregaards el-dampkjeler har en annen virkningsgrad enn den som er antatt. Dette er ikke hensyntatt, og er derfor en feilkilde. I tillegg er det ikke beregnet mengden varmeenergi som hadde blitt benyttet dersom vanndampen hadde blitt produsert i en LNG-dampkjel, som toppplastproduksjonen til

Borregaard baseres på. Dette vil påvirke mengden energi som benyttes til å produsere friskdamp, og burde blitt hensyntatt.

Antagelse 18: *Det er ikke tatt til høyde for en virkningsgrad i omsettingen av energipotensialet i spillvarmen. Det er altså antatt en virkningsgrad for bruken av denne på 100 %.*

Det er ikke sannsynlig å kunne omsette 100 % av energipotensialet til spillvarmen til vanndamp.

Det burde estimeres en virkningsgrad for denne prosessen.

5.3. Forslag til videre arbeid

De mange forenklingene og antagelsene som er gjort i oppgaven gjør resultatene usikre, og av videre arbeid vil det være hensiktsmessig å arbeide med et mer detaljert datasett fra dagens produksjon. Dataene som var tilgjengelige til å utføre beregninger med var begrenset til en estimert verdi for mengde kokemasse, dens vanninnhold og temperatur, mengde avgass fra buffertank 1, og trykkforhold i buffertank 1 og flashtank. Dette er et svært lite datasett. Med bedre data fra dagens produksjon vil det kunne gjøres mer korrekte forenklinger og antagelser, og slik sikre et mer nøyaktig bestemt teoretisk energipotensiale. Det anbefales å utføre en kartlegging av det tekniske spillvarmepotensialet ved å utføre grundigere undersøkelser av virkningsgradene til de tilgjengelige spillvarmegjenvinningsteknologiene som er oppsummert i teoridelen i denne gradsoppgaven. Til slutt anbefales det å sette sammen et forslag til sammensetning av komponentene i spillvarmegjenvinningssystemet, og innhente informasjon om kostnader for utbyggingen av et slikt system, slik at det økonomiske spillvarmepotensialet kartlegges.

6. Konklusjon

Beregningene i denne gradsoppgaven indikerer at det er et teoretisk energipotensiale for spillvarmegjenvinning fra den nye prosessen i avdelingen kokeriet. Dette varmeenergipotensialet er funnet til være 9,43 kWh varmeenergi per time. Varmeenergiforbruket til den nye prosessen er anslått å være 15,95 kWh per time. Til sammenlikning er det funnet at det vil benyttes 18,77 kWh elektrisk energi per time å drifte den nye prosessen uten spillvarmegjenvinning. De mange forenklingene og antagelsene som er gjort i oppgaven gjør resultatene usikre, og av videre arbeid er det derfor anbefalt å gjøre grundigere undersøkelser med et mer detaljert datasett fra dagens produksjon. Med bedre datatilgang vil det kunne gjøres mer korrekte forenklinger og antagelser. Det anbefales å utføre en kartlegging av det tekniske og det økonomiske spillvarmepotensialet.

7. Referanser

Litteraturliste

1. Alva, Guruprasad, Lin, Yaxue & Fang, Guiyin. (2018). An overview of thermal energy storage systems. *Energy*, 144: 341-378. doi: 10.1016/j.energy.2017.12.037.
2. Borregaard. *Borregaard Lignotech*. borregaard.no. Tilgjengelig fra: <https://www.borregaard.no/Forretningsomraader/Borregaard-LignoTech> (lest 01.05.2020).
3. Borregaard. *Borregaards bidrag til FNs 2030-agenda*. Tilgjengelig fra: <https://www.borregaard.no/Baerekraft-i-Borregaard/Borregaards-bidrag-til-FNs-2030-agenda2> (lest 12.02.2020).
4. Borregaard. *Historie*. Tilgjengelig fra: <https://www.borregaard.no/Om-oss/Historie> (lest 12.02.2020).
5. Borregaard. *Hva gjør Borregaard med tømmerstokken?* Tilgjengelig fra: <https://www.borregaard.no/Baerekraft-i-Borregaard/Det-groenne-rommet/Hva-gjoer-Borregaard-med-toemmerstokken> (lest 12.02.2020).
6. Borregaard. *Verdens ledende bioraffineri*. Tilgjengelig fra: <https://www.borregaard.no/Baerekraft-i-Borregaard/Det-groenne-rommet/Verdens-ledende-bioraffineri> (lest 12.01.2020).
7. Borregaard. (2018). *Bærekraft og Samfunnsansvar*. Tilgjengelig fra: https://borregaard.no/content/download/109826/19601389/file/Borregaard%20Baekraft-aftsrapport%202018_NORSK_WEB.pdf (lest 12.02.2020).
8. Brückner, Sarah, Liu, Selina, Miró, Laia, Radspieler, Michael, Cabeza, Luisa F. & Lävemann, Eberhard. (2015). Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies. *Applied Energy*, 151: 157-167. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.147.
9. Bøhmer, Einar. (2019). *Cellulose*. snl.no: Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/cellulose> (lest 28.04.2020).
10. Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag. (2014). *Fundamentals of Thermodynamics SI Version*. 8 utg.: John Wiley & Sons.
11. Einar Bøhmer, Halvor Aarnes. (2016). *Tre - plante*. snl.no: Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: snl.no/tre_-_plante (lest 01.05.2020).

12. Engineering, Chemical. (2012). *Processing & Handling; Gas Sparging*. Chemical Engineering - Essentials for the CPI professional. Tilgjengelig fra: <https://www.chemengonline.com/gas-sparging/> (lest 09.08).
13. FN-sambandet. (2019). *Parisavtalen*. FN.no. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/Om-FN/Avtaler/Miljoe-og-klima/Parisavtalen> (lest 12.02.2020).
14. Geir Sollesnes, Hans Even Helgerud. (2009). Utnyttelse av spillvarme fra norsk industri - en potensialstudie. *ENOVA, Norsk Energi/NEPAS*: 73 sider.
15. Hendricks, Terry & Choate, William T. (2006). *Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery*: Office of Scientific and Technical Information (OSTI).
16. Holly Shaftel, Randal Jackson, Susan Callery, Daniel Bailey. (2020). *Climate Change: How Do We Know?* I: Holly Shaftel (red.). Global Climate Change Vital Signs of the Planet. NASA.gov: Earth Science Communications Team at NASA's Jet Propulsion Laboratory. Tilgjengelig fra: <https://climate.nasa.gov/evidence/> (lest 12.02.2020).
17. Hussam Jouhara, Navid Khordehgah, Sulaiman Almahmoud, Bertrand Delpech, Amisha Chauhan, Savvas A.Tassou. (2018). Waste Heat recovery technologies and applications. *Thermal Science And Engineering Progress*, 6: 268-289.
18. Ignatowitz, Eckhard. (1994). *Prosesskjemi: Anlegg og utstyr*. 2 utg.: Yrkesopplæring ans.
19. IPCC. (2014). Summary for Policymakers. I: Core Writing Team, Pachauri & Meyer (red.) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, s. 151. IPCC, Geneva, Switzerland: IPCC.
20. J. Smoker, M. Nouh, O. Aldraiheim, A. Baz. (2012). Energy harvesting from a standing wave thermoacoustic-piezoelectric resonator. *Journal of Applied Physics*, 111 (10). doi: <https://doi.org/10.1063/1.4712630>.
21. Jaroslaw Milewski, Janusz Kasucki. (2017). Comparison of ORC and Kalina cycles for waste heat recovery in the steel industry. *Journal of Power Technologies*, 97: 302-307.
22. Jensen, J. (1980). *Energy Storage*: Elsevier Ltd.
23. Mahmoudi, A., Fazli, M. & Morad, M. R. (2018). A recent review of waste heat recovery by Organic Rankine Cycle. *Applied Thermal Engineering*, 143: 660-675. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.07.136.

24. Manum, Svein B. (2018). *Lignin*. snl.no: Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/lignin>.
25. Miljødirektoratet. (2014). *FNs klimapanels femte hovedrapport; Del 3: Tiltak og virkemidler for å redusere utslipp av klimagasser. Tiltak og virkemidler for å redusere oppvarmingen til to grader*. I: Miljødirektoratet (red.). miljødirektoratet.no. Tilgjengelig fra: https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m169/m_169.pdf (lest 12.02.2020).
26. Murthy, Ganti S. (2019). Chapter 3: Systems Analysis Frameworks for Biorefineries. I: Pandey, Larroche, Dussap, Gnansounou, Khanal & Ricke (red.) *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels* s. 77-92: Elsevier Inc.
27. Pedersen, Bjørn. (2018). *Aggregattilstand*. Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/aggregattilstand> (lest 12.08).
28. StatistiskSentralbyrå. (2019). *Elektrisitet*. ssb.no. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/statistikker/elektrisitet/aar> (lest 12.02.2020).
29. Vaaler, David Andre Grimsøen. (2020). *Personlig meddelelse* (13.08).
30. W.L Beuschlein, L.O Simenson. (1940). Solubility og Sulfur Dioxide in Water. *Journal of the American Chemical Society*, 62: 610-612. doi: 10.1021/ja01860a053.
31. Yunus A. Cengel, Afshin J. Ghajar. (2015). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. SI units*. 5 utg.: McGraw-Hill Education.
32. Aarnes, Halvor. (2009). *Hemicelluloser*. snl.no: Store Norske Leksikon. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/hemicelluloser> (lest 29.04.2020).

Figurliste

Figur 1: FNs 17 bærekraftsmål. Tilgjengelig fra: https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal (hentet 15.08.20)	1
Figur 2: Oversikt over produktene Borregaard i Sarpsborg produserer av grantre ved de ulike avdelingene på fabrikk. Fra: Borregaard.....	3
Figur 3: Illustrasjon og sammenlikning mellom åpent og lukket u-rørmanometer. I: Ignatowitz, E., Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 173.....	12
Figur 4: Illustrasjon av rørfjær-, platefjær-, og kapselfjærmanometer. I: Ignatowitz, E., Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 174.	12
Figur 5: Illustrasjon av utformingen til en sentrifugalpumpe. I: Ignatowitz, E., Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 47.....	14
Figur 6: Illustrasjon av en strålepumpe. I: Ignatowitz, E., Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 55.	15
Figur 7: Illustrasjon av en varmeveksler med parallell strømning. I: Cengel, Y., og Ghajar, A. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and applications, fifth edition, 2015, New York: McGraw-Hill Education, side 650.	17
Figur 8: Illustrasjon av en motstrøms varmeveksler. I: Cengel, Y., og Ghajar, A. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and applications, fifth edition, 2015, New York: McGraw-Hill Education, side 650.....	18
Figur 9: Illustrasjon av varmeveksler med krysstrøm. Umikset krysstrøm vises til venstre, mikset krysstrøm vises til høyre. I: Cengel, Y., og Ghajar, A. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and applications, fifth edition, 2015, New York: McGraw-Hill Education, side 651.....	18
Figur 10: Tverrsnitt av en mangerørsvarmeveksler. I: Ignatowitz, E., Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 244.	19

Figur 11: Illustrasjon av en åpen platevarmeveksler.. I: Ignatowitz, E., Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 246.	20
Figur 12: Illustrasjon av en spiralvarmeveksler. I: Ignatowitz, E., Prosesskjemi: Anlegg og utstyr, andre utgave, 1994, Yrkesopplæring ans, side 246.	21
Figur 13: Illustrasjon av en enkel varmepumpe. I: Borgnakke, C., Sonntag, R., Fundamentals of thermodynamics SI version, 8. utgave, 2014, side 190.	23
Figur 14: Illustrasjon av komponentene i en Carnotmaskin. I: Borgnakke, C., Sonntag, R., Fundamentals of thermodynamics SI version, 8. utgave, 2014, side 200.....	24
Figur 15:Illustrasjon av prinsippet bak termoelektrisk generasjon. Fra: Waste heat recovery technologies and applications. H. Jouhara et. al., Thermal Science and Engineering Progress, 2018, s. 278.	27
Figur 16: Blokkskjema over hele Borregaards avdeling i Sarpsborg. Oppgaven tar for seg et prosjekt i kokeriet. (Cecilie Borgen).....	33
Figur 17: Blokkskjema med oversikt over prosessflyt i kokeriet ved Borregaard fabrikker i Sarpsborg. (Cecilie Borgen).....	35
Figur 18: Skisse av aktuell prosessflyt i kokeriet før prosjekt. (Cecilie Borgen)	36
Figur 19:Skisse av aktuell prosessflyt i kokeriet etter prosjekt. (Cecilie Borgen).....	37
Figur 20: Illustrasjon av mulig prosessflyt i damp- og spillvarmegjennvinningsystem tilhørende prosjekt for fjerning av SO ₂ . (Cecilie Borgen)	38
Figur 21: Utgangspunkt for beregninger, og illustrasjon av tilhørighet til variabler for medium, strømmereetning og posisjon som benyttet i beregninger. (Cecilie Borgen)	40



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway