



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

# Kartleggelse av dampforbruk og utbedring av kjelanlegg



Bachelorprosjekt utført ved

Høgskolen Stord/Haugesund – Studie for ingeniørfag

---

Maskin Proses- og energiteknikk

Av: Lars Andreas Larsen  
Egil Aasbøe

Kand.nr. 4  
Kand.nr. 43

---

Haugesund

Våren 2016

# BACHELORPROSJEKT

**Studenten(e)s navn:** Egil Aasbøe og Lars Andreas Larsen

---

**Linje & studieretning** Maskin, Prosess- og energiteknikk

---

**Oppgavens tittel:** *Kartlegging av dampforbruk og utbedring av kjelanlegg*

## Oppgavetekst:

FMC Vormedal er avhengig av to dampkjeler for å drifte fabrikk. Etter installasjon av dampkjelene i 1997 og 2003, har det blitt utført utbygninger av fabrikk, samtidig som at produksjonen av alginat har økt. Dette har ført til en samsvarende økning i dampforbruk.

I dag har det økende behovet av damp på fabrikk ført til at begge kjelene må være i gang for en stabil drift av fabrikk. Dette er uheldig med tanke på muligheter for å utføre nødvendig vedlikehold eller reparasjoner på en kjele.

I denne oppgaven skal det utføres en kartlegging av dampforbruket ved ulike situasjoner, samt presentere muligheter til forbedring av kjelanlegget.

**Endelig oppgave gitt:** Onsdag 2.mars 2016 kl. 12.00

**Innleveringsfrist:** Onsdag 4.mai 2016 kl. 12.00

**Intern veileder:** Edmundo Villacorta – HSH, tlf: 52 70 26 51

**Ekstern veileder:** Øystein Østhus – FMC, tlf: 909 41 660

**Adresse ekstern veileder:** Bjørgvingata 23D, 5529 Haugesund

**Godkjent av  
studieansvarlig:  
Dato:**

*J. C. Lindaa  
15/4 - 16*

## Forord

Denne rapporten er et avslutningsprosjekt ved Høgskolen Stord/Haugesund. Rapporten er et obligatorisk emne og utgjør 20 studiepoeng. Emnet består av denne rapporten, produkt, plakat og avslutningsvis en muntlig presentasjon. Formålet med rapporten er at en skal bruke kunnskaper en har tillært seg i løpet av utdannelsen i en reell oppgave. Læringsemner som har gitt stort utbytte i rapporten er "Varme- og strømningslære", "Prosessteknikk 1" og "Prosessteknikk 2".

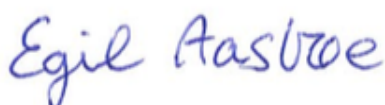
Kilder refereres til på formen [tall], hvor det brukte tallet representerer det samme tallet i referanselisten. Vedlegg refereres til på formen "Vedlegg [bokstav]", hvor den brukte bokstaven er den samme som i vedleggslisten.

Vi vil rette en stor takk til:

- Edmundo Villacorta, intern veileder Høgskolen Stord/Haugesund
- Øystein Østhus, ekstern veileder FMC Health and Nutrition

I tillegg vil vi takke:

- Atle Holden, vedlikeholdsplanlegger ved FMC Health and Nutrition
- Petter Sirevåg, teknisk sjef ved Skåland Rør & Industrimontasje
- Svein Jacob Nesheim, førsteamanuensis ingeniørfag ved Høgskolen Stord/Haugesund
- Narve Tunheim, daglig leder ved Peder Halvorsen AS
- Helge Aasbøe, mekaniker ved FMC Health and Nutrition



---

Egil Aasbøe



---

Lars Andreas Larsen

## Sammendrag

Ved FMC Vormedal er vanndamp en viktig varme- og energikilde i produksjon av alginat. Kjelanlegget på FMC består av to dampkjeler som forsyner fabrikken med damp. Kjelenes er naturgassfyrte og har hver en dampproduksjonskapasitet på 12 tonn/time. Tidligere år har FMC hatt muligheten til å ta en kjel ut av drift for å utføre nødvendig vedlikehold, tilstandskontroll eller reparasjoner uten at det har ført til konsekvenser for produksjonen. I dag er FMC avhengig av å ha begge kjelenes i omløp for en stabil drift av fabrikken. Dette er uheldig for bedriften da manglende vedlikehold eller nedsatt produksjon kan føre til store økonomiske tap.

Ut ifra datahistorikk over anleggets naturgassforbruk fra januar 2015 til februar 2016 er det utarbeidet en analyse over naturgassforbruk som illustrerer fabrikkens energiproblem og omfang. Fra innsamlet data over kjeltilstanden og forbrenningsrapport er det estimert en kjelvirkningsgrad. Basert på estimert kjelvirkningsgrad er det utarbeidet en beregningsmodell som beskriver et tilnærmet forhold mellom brenselforbruk og damp produsert. Beregningsmodellen brukes som et verktøy for å analysere hvor ofte og i hvor stor grad det har vært nødvendig med to kjeler i drift i perioden fra januar 2015 til februar 2016. Analysen tar også for seg en kartlegging over dampforbruket som gir oversikt over hvor den produserte dampen går og hvor mye som blir brukt.

Basert på resultater fra analysen er det undersøkt alternative løsninger som kan forbedre kjelanlegget i en så stor grad at kjelanlegget er tilstrekkelig for fabrikkens dampbehov. Den mest gunstige løsningen vil være å tilføre en mindre kjel til eksisterende kjelanlegg. En tredje kjel med et kapasitetsområde på 5 tonn/time vil kunne bidra med en tilfredsstillende økning i dampproduksjon slik at en av hovedkjelenes alltid kan være tilgjengelig for vedlikehold, tilstandskontroll eller reparasjon.

Som et effektiviserende tiltak anbefales det at FMC reparerer de allerede installerte økonomiserene. Disse har et potensiale til å øke virkningsgraden og redusere brenselsbesparelser med 5%.

For å utføre en analyse og kunne trekke en konklusjon er det gjort en del antagelser underveis. Dette er som følge av at fabrikken har begrenset måling over damp- og naturgassforbruk. Med tilstrekkelig måling over naturgassforbruk og dampproduksjon for hver kjel, vil dette gi en optimal oversikt over energibehovet til fabrikken, samt muliggjøre en nøyaktig vurdering av kjelvirkningsgraden.

## Innholdsfortegnelse

<b>Forord</b>	<b>i</b>
<b>Sammendrag</b>	<b>ii</b>
<b>Figurliste</b>	<b>v</b>
<b>Tabelliste</b>	<b>v</b>
<b>1 Innledning</b>	<b>1</b>
1.1 Om bedriften	1
1.2 Bakgrunn for oppgaven	1
1.3 Målsetting for oppgaven	1
1.4 Avgrensninger	1
1.5 Metode	2
1.6 Usikkerheter	2
<b>2 Teori</b>	<b>3</b>
2.1 Innledning	3
2.2 Vanndamp	3
2.2.1 Entalpi	4
2.2.2 Mollier-diagram	5
2.2.3 Damptabell	5
2.2.4 Flashdamp	7
2.3 Varmeoverføring	7
2.4 Kjelsystem	8
2.4.1 Dampkjel	8
2.4.2 Ekonomiser	10
2.4.3 Forbrenning	10
2.4.4 Naturgass	10
2.4.5 Bunnavlåsning	10
2.5 Kjelvirkningsgrad	11
2.5.1 Beregningsmodeller for kjelvirkningsgrad	12
2.6 Matevannssystem	12
2.6.1 Vannbehandling	13
2.7 Kondensatsystem	13
2.7.1 Kondenspotter	14
2.8 Dampakkumulator	14
<b>3 Eksisterende kjelanlegg</b>	<b>15</b>
3.1 Innledning	15
3.2 Kjel 1	15
3.3 Kjel 2	15
3.4 Ekonomiser	15
3.5 Matevannstank	16
3.6 Forbrukere	16
3.6.1 Steamveksler	17
3.6.2 Steamskrue	18
3.6.3 Tørking	18
3.6.4 Kneater	18
3.7 Kondensatgjenvinning	18
<b>4 Analyse</b>	<b>19</b>
4.1 Innledning	19
4.2 Kjelanalyse	19
4.2.1 Virkningsgrad	19
4.2.2 Beregningsmodell	22

4.2.3	Naturgassstilførsel ved full last	25
4.3	<i>Analyse av naturgassforbruk</i>	27
4.3.1	Januar 2016	29
4.3.2	Usikkerhet	30
4.4	<i>Analyse av dampforbruk</i>	30
4.4.1	Dampbehov	31
4.5	<i>Oppsummering</i>	34
<b>5</b>	<b>Løsning</b>	<b>35</b>
5.1	<i>Innledning</i>	35
5.2	<i>Alternativ 1: Ny røykrørskjel</i>	35
5.2.1	Leverandør	35
5.3	<i>Alternativ 2: Dampgenerator</i>	36
5.3.1	Skåland QB generatorkjel	36
5.4	<i>Alternativ 3: Utskifte eksisterende kjeler</i>	37
5.4.1	Leverandører	38
5.5	<i>Alternativ 4: Dampakkumulator</i>	39
5.5.1	Dampakkumulator volum	39
5.5.2	Leverandør	41
5.6	<i>Effektiviserende tiltak (utnyttelse av røykgasstap/temperatur)</i>	41
5.6.1	Ekonomiser	41
5.6.2	Luftforvarmer	43
<b>6</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>44</b>
6.1	<i>Vurdering av løsning</i>	44
6.1.1	Utskifting av eksisterende kjeler	44
6.1.2	Investering i én ny røykrørskjel	44
6.1.3	Dampgenerator	44
6.1.4	Dampakkumulator	44
6.1.5	Effektivisering	45
6.1.6	Deloppsummering	45
6.2	<i>Vurdering av analysen</i>	46
6.2.1	Kjelanalyse	46
6.2.2	Naturgassforbruk	49
6.2.3	Dampforbruk	50
6.2.4	Deloppsummering	51
6.3	<i>Hvilke tiltak bør gjøres for få en bedre oversikt?</i>	52
<b>7</b>	<b>Avslutning</b>	<b>54</b>
7.1	<i>Konklusjon</i>	54
7.2	<i>Videre arbeid</i>	55
	<b>Bibliografi</b>	<b>56</b>
	<b>Vedleggsliste</b>	<b>57</b>

## Figurliste

Figur 1: Temperatur-entalpi fasediagram [5].....	4
Figur 2: Kondenspotte: Egil Aasbøe .....	7
Figur 3: Røykgasssystemet i en røykrørskjel [6].....	8
Figur 4: Røykrørskjel [7].....	9
Figur 5: Illustrasjon av energistrømmer rundt en kjel: Egil Aasbøe.....	11
Figur 6: Forbrukere ved produksjonslinje H1 og H2: Egil Aasbøe .....	16
Figur 7: Energibalanse over kjel.....	22
Figur 8: Naturgassforbruk ved forskjellige virkningsgrader .....	25
Figur 9: Naturgassforbruket fra januar 2015 til februar 2016 .....	27
Figur 10: Gjennomsnittlig naturgassforbruk for hver måned og hele perioden .....	28
Figur 11: Naturgassforbruket for januar 2016 med øvre og nedre grense .....	29
Figur 12: Naturgassforbruket med redusert naturgasstilførsel ved full belastning.....	30
Figur 13: Dampbehov produksjonslinje H1.....	31
Figur 14: Dampbehov produksjonslinje H2.....	32
Figur 15: Dampbehov ved ønsket produksjon .....	33
Figur 16: Dampfordeling.....	33
Figur 17: Naturgasstilførsel for ny og gammel kjel.....	37
Figur 18: Røykgasstap.....	47
Figur 19: Varmetap.....	47
Figur 20: Forhold mellom naturgass og damp .....	49
Figur 21: Eksisterende målesystem .....	52
Figur 22: Anbefalt målesystem .....	52

## Tabelliste

Tabell 1: Damptabell [3].....	6
Tabell 2: Virkemåte til forbrukere .....	17
Tabell 3: Data fra forbrenningsrapport 2012 .....	20
Tabell 4: Røykgasstap .....	20
Tabell 5: Varmetap .....	21
Tabell 6: Naturgasstilførsel med varierende virkningsgrad .....	26
Tabell 7: Spisslaster i januar måned.....	29
Tabell 8: Dampbehov produksjonslinje H1 .....	31
Tabell 9: Dampbehov produksjonslinje H2 .....	32
Tabell 10: Dampbehov ved ønsket produksjon .....	33
Tabell 11: Dampbehov over én kjel.....	34
Tabell 12: Vurdering av én mindre røykrørskjel.....	36
Tabell 13: Sammenligning av kjeler fra Parat Halvorsen og Skåland Rør & Industrimontasje .....	38
Tabell 14: Dampakkumulatorvolum.....	40
Tabell 15: Virkningsgradfordeling ved alle laster .....	47
Tabell 16: Naturgasstilførsel ved alle belastninger.....	48
Tabell 17: Sammenligning av beregningsmodeller.....	49
Tabell 18: Sammenligning mellom med og uten kondensatkjøling.....	50
Tabell 19: Oversikt over mengdemålere.....	53

## 1 Innledning

### 1.1 Om bedriften

FMC er en global leverandør av naturlige ingredienser som brukes i mat, farmasøytiske produkter og biomedisin. I Norge har FMC drevet forskning og utvikling av produkter fra stortare på internasjonalt nivå i over 65 år. Fabrikken på Vormedal i Karmøy kommune produserer alginat i fra brun stortare. Fabrikken sysselsetter ca. 120 personer og er en hjørnesteinsbedrift i området. [1]

### 1.2 Bakgrunn for oppgaven

Ved FMC Vormedal er vanddamp en viktig varme- og energikilde i produksjon av alginat. Damp benyttes i flere av de ulike prosesstrinnene i produksjonen. Oppgaven til damp er hovedsakelig å varme opp andre medier som vann, luft og "prosessløsning" ved å overføre varmeenergi.

Kjelanlegget på FMC består av to kjeler, fra 1997 og 2003, som forsyner fabrikken med damp. Disse er naturgassfyrte og har hver en dampkapasitet på 12 tonn/time.

I dag er FMC avhengig av å ha begge kjelene i gang for å drifte fabrikken. Tidligere år har FMC hatt muligheten til å tatt en kjel ut av drift for å utføre nødvendig vedlikehold, tilstandskontroll og reparasjoner uten at det har ført til konsekvenser for produksjonen. Dette er uheldig for fabrikken da manglende vedlikehold eller nedsatt produksjon kan føre til store økonomiske tap.

Det er dermed ønskelig for FMC at det blir utført en kartleggelse over dampforbruket som gir en oversikt over hvor dampen går og hvor mye som blir brukt. Det er nødvendig å undersøke ulike løsninger og tiltak som kan utføres for å forbedre kjelanlegget i en så stor grad at kjelanlegget er tilstrekkelig for en stabil drift av fabrikken. Disse løsningene/tiltakene kan være alt fra mindre inngrep for å øke virkningsgrad til eksisterende system, til store utskiftninger/investeringer som for eksempel en ny kjel.

### 1.3 Målsetting for oppgaven

Målsettingen med oppgaven er å gi en tilfredsstillende oversikt over dampbehovet til fabrikken, som kan anslå i hvor stor grad det har vært nødvendig med to kjeler i drift. Ut i fra denne oversikten skal det utarbeides løsninger som vil forbedre kjelanlegget i en så stor grad at det er mulig å utføre nødvendig vedlikehold på kjelene, uten at det vil få konsekvenser for produksjonen.

### 1.4 Avgrensninger

Ettersom kjelanlegget er et svært komplekst og omfattende system er det nødvendig å begrense oppgavens omfang for å komme frem til en løsning. Det er mange områder i kjelanlegget som gir anledning til utbedring og optimering. Oppgaven tar hovedsakelig for seg analyser og utbedringsmuligheter rundt kjelsystemet og den dampproduserende delen av anlegget. Dette innebærer at det ikke utarbeides løsninger til utbedring av



kondensatgjenvinning, matevannssystem og vannbehandling, transportveg (rørledninger, ventiler, pumper) og prosessen ved dampforbrukere. Videre i oppgaven vil følgende avgrensninger bli tatt for å begrense arbeidsomfanget.

- Det vil ikke tas høyde for bunnavlåsing og ufullstendig forbrenning i kjel ved estimering av kjelvirkningsgrad.
- De vil ikke tas høyde for varmetap ved beregning av dampbehovet til forbrukerne.
- Det vil ikke legges ned noe særlig arbeid i å avdekke årsaken til svingninger i damp- og gassforbruk.
- Som en forenkling antas det at kjelvirkningsgraden er konstant og ikke endres med belastning/pådrag.

## 1.5 Metode

Virkemidler som vil bli brukt for å løse oppgaven er:

- Datahistorikk over anleggets naturgassforbruk fra januar 2015 til februar 2016
- Prosessinformasjon fra PI Coresight ved et gitt tidspunkt som representerer normal produksjon (Mars 2016).
- Relevante beregningsmetoder for blant annet vann/damp og termodynamikk fra boken «Prosessteknikk - masse- og energibalanser» [2].
- Litteratur med omkring kjeler og kjelanlegg.
- Relevant informasjon og data vedrørende fabrikkens kjeler og kjelanlegg.

Ut i fra datahistorikk over anleggets naturgassforbruk og data over fabrikkens kjeler skal det utarbeides en analyse over damp- og naturgassforbruket som illustrerer fabrikkens energiproblem og omfang. Analysen og nevnte virkemidler skal videre brukes som et grunnlag for å utarbeide en løsning på oppgavens problemstilling.

## 1.6 Usikkerheter

For å skape bedre oversikt vil usikkerhet rundt oppgavens ulike analyser, estimater, antagelser og beregninger bli redegjort for ved passende kontekst.

## 2 Teori

### 2.1 Innledning

Hensikten med dette kapittelet er for det første at det skal fungere som et redskap for leseren til å utvikle innsikt i fagområdet og perspektiv over hvilket område oppgaven dreier seg om. For det andre skal teoridelen belyse problemområdet og klargjøre sentrale begreper og beregningsmetoder.

Et kjelanlegg er et komplekst system som består av mange ulike komponenter, delsystem og prosesser. Dette kapittelet omfatter kun emner og faktorer i et kjelanlegg som er relevant for oppgaven og problemstillingen. Det innebærer en kort innføring i vann- og dampteori og tilhørende beregningsmetoder aktuelt for situasjonen. Det gis en grunnleggende forklaring på oppbygning og virkemåte til de viktigste systemene i et kjelanlegg. Det er redegjort for faktorer som avgjør virkningsgraden til en dampkjel, samt beregningsmodeller for en estimering av kjelvirkningsgrad.

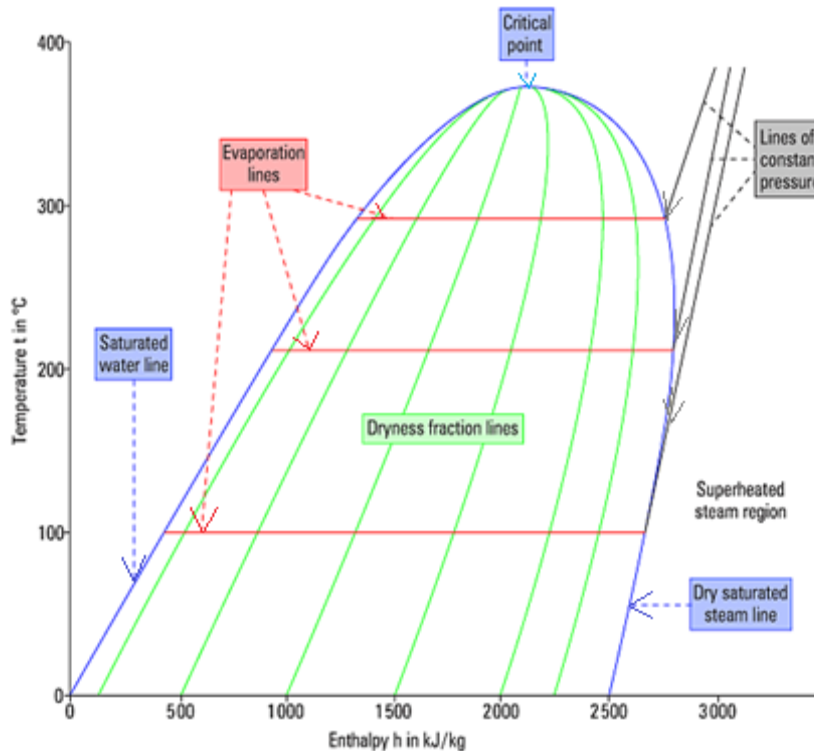
### 2.2 Vanndamp

Vanndamp er det mest brukte mediet for transport av varmeenergi, og benyttes til en hel rekke prosesser i industrien. Damp er en så integrert og viktig del av moderne teknologi, at industrier innenfor mat, tekstil, kjemi, medisin, strøm, oppvarming og transport ikke ville eksistert eller fungert uten.

Vann er rimelig og fornybart. Det er ikke helseskadelig og brenner ikke, og i gassform er det en sikker og effektiv energibærer. Damp har et høyt energiinnhold og kan holde opp til 5 til 6 ganger så mye potensiell energi som tilsvarende masse med vann. Som et eksempel vil vann ved 99°C ha et energiinnhold på 417 kJ/kg og mettet damp av samme temperatur et energiinnhold på 2675 kJ/kg [3].

Når vann varmes opp i en kjel, vil det begynne å absorbere energi. Avhengig av trykket i kjelen, vil vannet ved en bestemt temperatur starte å fordampe, og dampen overføres til prosessen eller oppvarming. Ved for eksempel atmosfærisk trykk, 1,013 bar, vil vannet koke ved 100°C. Jo høyere trykket er i kjelen, jo høyere vil kokepunkts temperaturen til vannet være. Så ved å fordampe vannet under høyt trykk, vil det få en høyere damptemperatur. Dette er en viktig parameter ved kjelvirksomhet, da energiinnholdet i dampen øker med temperaturen.

Figur 1 er et temperatur-entalpi fasediagram som illustrerer forholdet mellom temperatur og entalpi for vann og damp. Dette diagrammet viser et godt grafisk bilde på faseovergangen fra vann til damp. Entalpi er varmemengden i vanndampen. Dette blir mer detaljert forklart i neste kapittel.



Figur 1: Temperatur-entalpi fasediagram [4]

Området innenfor den blå kurven er to-fase området. I dette området er det en blanding mellom vann og damp. Denne fasen kalles for våt damp.

Til venstre for dette området, har vi mettet vann. Den blå kurven (saturated water line), representerer metningstemperaturen (kokepunktet) til vannet. Kokepunktet er som nevnt avhengig av trykket, og de røde linjene er konstante trykk linjer.

Til høyre for to-fase området, har vi tørr damp. Den blå kurven (dry saturated steam line) representerer det området der dampen først er 100% fri fra vann. Denne tilstanden kalles for tørrmettet. Området utover dette er overhettet damp.

I dampkjeler av typen røykrør blir dampen oppvarmet til den er mettet, og så sendt ut til forbruk. I vannrørskjeler derimot, som blir brukt der energibehovet er mye større (kraftproduksjon), blir dampen overhettet. Ut i fra T-h diagrammet kan en se at ved oppvarming av vanddamp under konstant trykk til overhettet område (superheated steam region) er entalpien i dampen høy.

### 2.2.1 Entalpi

For å beskrive energiinnholdet eller varmemengden til damp, brukes begrepet entalpi. Entalpi er en termodynamisk tilstandsfunksjon med symbol H, som identifiseres av et systems indre energi, trykk og volum [2].

$$H = U + pV$$

Dersom systemet står under konstant trykk, kan endringen i entalpi skrives som

$$\Delta H = \Delta U + p\Delta V$$

Det siste leddet,  $p\Delta V$ , representerer arbeidet,  $W$ , som er utført.

Fra termodynamikkens første lov har vi at varmemengden som tilføres et system er lik summen av forandring i indre energi og arbeidet som systemet samtidig utfører.

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W$$

Dermed vil den tilførte varmen tilsvare endringen i dampens entalpi, forutsatt at trykket er konstant.

$$\Delta Q = \Delta H$$

Ved bruk av damptabell eller Mollier-diagram kan dampens spesifikke entalpi,  $h$ , ut av kjel identifiseres. Dersom massestrømmen,  $\dot{m}$ , til dampen også er kjent, vil kjelens effekt være.

$$Q = \dot{m}h$$

Effekten levert i en prosess kan også beregnes ved å kjenne den spesifikke entalpien til dampen før og etter prosessen.

$$Q = \dot{m}\Delta h = \dot{m}(h_{\text{før}} - h_{\text{etter}}) \quad (2.1)$$

Entalpi i dampen kan bestemmes ut i fra damptabell [3] eller et Mollier-diagram, for så å brukes til å beregne energiforandringer i ulike prosesser. I damptabell og mollier-diagram er energien i dampen målt som spesifikke entalpi, som er et mål for den totale energien per enhet masse, med enhet kJ/kg.

### 2.2.2 Mollier-diagram

Mollier-diagram er et entalpi-entropi ( $h$ - $s$ ) kart, som dekker trykkområder fra 0,01 – 1000 bar, og temperaturer opp til 800°C. Diagrammet er en grafisk fremstilling av forholdene til dampens trykk, temperatur, entalpi, entropi og fuktighet. Mollier-diagram er et effektivt designverktøy for ingeniører.

Entropi er også en tilstandsfunksjon for et system, der entropi er et mål for tilstandens «grad av uorden». Denne «graden av uorden» vil øke ved tilført varme, da varme nettopp er «uorganisert» energioverførsel.

### 2.2.3 Damptabell

For damp- og energiberegninger videre i rapporten, vil verdier fra «saturated water and steam» fra [3] brukes. Denne tabellen er resultat av virkelige prøver utført på damp. Tabellen viser egenskapene til mettet damp/vann ved varierende trykk. Tabell 1 er et utdrag fra [3] i et trykkområde som er relevant for røykrørskjeler. Her vises entalpien og vannets metningstemperatur (kokepunkt) under de forskjellige trykkene.

<b>P</b> [bar]	<b>T<sub>s</sub></b> [°C]	<b>h<sub>f</sub></b> [kJ/kg]	<b>h<sub>fg</sub></b> [kJ/kg]	<b>h<sub>g</sub></b> [kJ/kg]
1	99,6	417	2258	2675
2	120,2	505	2202	2707
3	133,5	561	2164	2725
4	143,6	605	2134	2739
5	151,8	640	2109	2749
6	158,8	670	2087	2757
7	165,0	697	2067	2764
8	170,4	721	2048	2769
9	175,4	743	2031	2774
10	179,9	763	2015	2778
11	184,1	781	2000	2781
12	188,0	798	1986	2784

Tabell 1: Damptabell [3]

$h_f$  - Vannets spesifikke entalpi ved metning (saturated water line)

$h_{fg}$  - Spesifikk entalpi for fordampning

$h_g$  - Dampens spesifikke entalpi ved metning (dry saturated steam line)

$T_s$  - Metningstemperaturen (kokepunktet) til vann

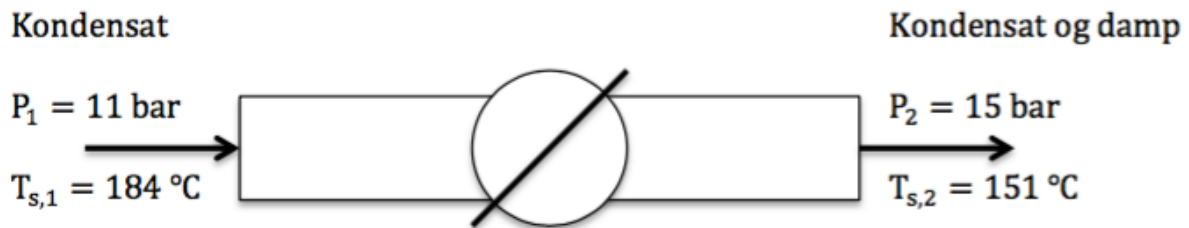
Denne damptabellen kan forstås bedre i kombinasjon med T-h diagram, Figur 1.

Entalpien for tørrmettet damp,  $h_g$ , vil være summen av entalpien av vann og entalpien for fordampning.

$$h_g = h_f + h_{fg}$$

### 2.2.4 Flashdamp

Flashdamp er damp dannet fra varmt kondensat utsatt for trykkreduksjon. Denne metoden er et alternativ til fordamping av vann uten tilførsel av varme. Dette utføres ved at kondensat strømmer fra en trykktank og igjennom en kondenspotte. Kondenspotte beskrives nærmere senere i rapporten.



Figur 2: Kondenspotte: Egil Aasbøe

Dersom varmt vann under høyt trykk utsettes for et stort trykkfall til et trykk der metningstemperaturen er lavere enn temperaturen i vannet, vil flashdamp genereres [4]. I følge termodynamikkens første lov må energimengden før kondenspotten tilsvare den energimengden etter. Dermed vil det være en ubalanse i energi etter kondenspotten,  $781\text{kJ/kg} - 640\text{kJ/kg} = 141\text{kJ/kg}$ . Energimengden  $141\text{kJ/kg}$  anses som overskuddsvarme. Denne overskuddsvarmen koker kondensatet til damp, og denne prosessen kalles «flashing» [4]. Mengde flashdamp produsert beregnes ved formel [4]:

$$\text{Mengde flashdamp} = \dot{m}_d = \dot{m}_v \cdot \frac{h_{f,P_1} - h_{f,P_2}}{h_{fg,P_2}} \quad (2.2)$$

Hvor:

- $h_{f,P_1}$  - Vannets entalpi ved starttrykk
- $h_{f,P_2}$  - Vannets entalpi ved sluttrykk
- $h_{fg,P_2}$  - Fordampningsentalpi
- $\dot{m}_v$  - Massestrøm vann

### 2.3 Varmeoverføring

En dampkjel har som oppgave å overføre forbrenningsvarme fra røykgasside til kjelens vannside for å generere damp. Hensikten med produksjon av damp er hovedsakelig å utnytte varmeinnholdet i dampen ved å overføre den til en prosess. For dimensjonering av kjel og andre komponenter i et kjelanlegg, er varmeoverføring et sentralt tema. Varme går alltid fra et sted med høyere temperatur til et sted med lavere temperatur. Varmeutvekslingen mellom to systemer vil ikke stanse før temperaturen mellom de er lik.

Varmemengden som kreves for å gi et system en temperaturøkning kan uttrykkes ved følgende formel [2]:

$$Q = \dot{m}c_p\Delta T \quad (2.3)$$

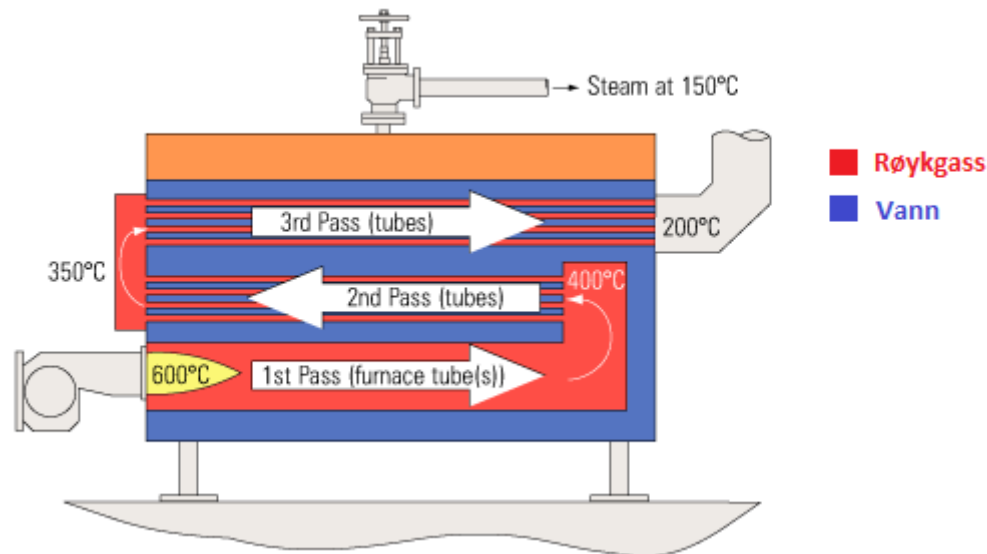
## 2.4 Kjelsystem

### 2.4.1 Dampkjel

Dampkjelen er den viktigste komponenten i et dampsystem/kjelanlegg. Dampkjelen er en lukket trykkbeholder der det blir produsert vanndamp ved høyt trykk gjennom oppvarming og koking av vann. Oppvarming og fordamping av vann skjer ved nedkjøling av røykgasser som er dannet ved forbrenning av brensel som for eksempel olje, gass eller kull. Den produserte dampen kan så bli brukt i ulike prosesser som oppvarming, varmeveksling og drift av dampturbiner.

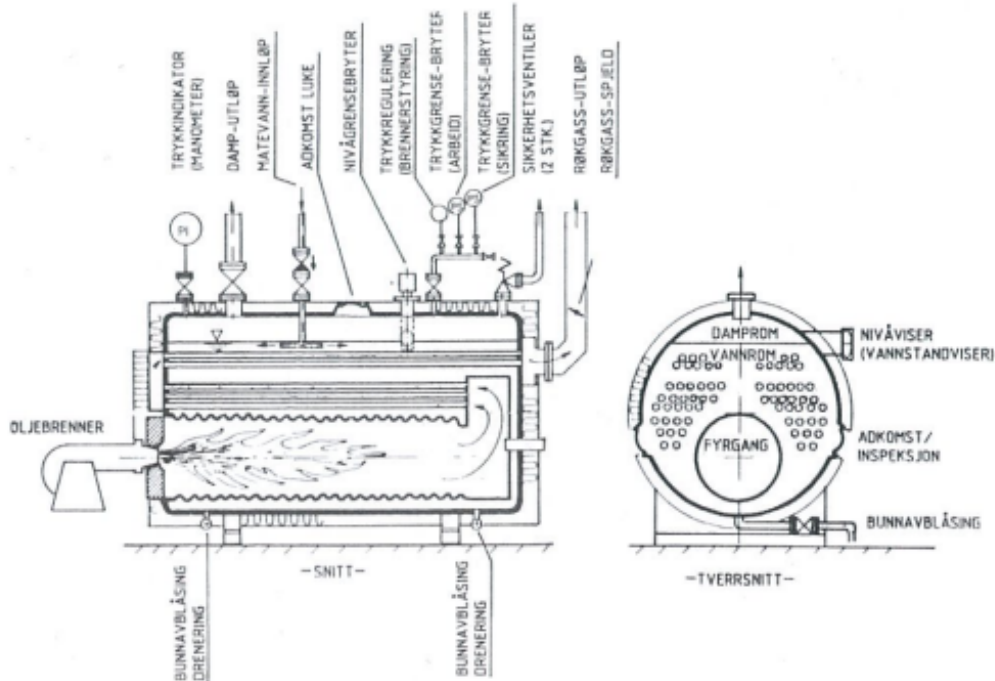
Kjeler deles ofte inn i elektriske, fyrte og ikke-fyrte kjeler. Valg av kjeltype avhenger av anvendelsesområde, størrelse og effektbehov. Fyrte kjeler er vanligst i industri, og består av enten røykrør- eller vannrørskjel. Denne oppgaven omfatter fyrte kjel av typen røykrør med naturgass som brensel. I en røykrørskjel vil røykgassen strømme gjennom rørene i kjelen, mens i en vannrørskjel vil vannet strømme gjennom rørene.

I en røykrørskjel vil den varme forbrenningsgassen fra brenneren strømme gjennom rør og bli kjølt ned av vannet som er på utsiden. Rørbuntene i kjelen er ofte konstruert i slynger slik at forbrenningsgassen passerer frem-og-tilbake i kjelen opp til tre ganger for å oppnå maksimal varmeoverføring gjennom rørene til det omgivende kjelevannet. Når vannet oppnår metningstemperatur (kokepunkt), vil det dannes bobler av damp som stiger til vannoverflaten og brister. Dampen samler seg i rommet over vannet, og er klar til å sendes ut i dampnettverket.



Figur 3: Røykgasssystemet i en røykrørskjel [5]

De fleste fyrte røykrørskjelene er bygget etter 3-trekks prinsipp med fyrting, røykrør og vannkjølt bakre vendekammer [6]. Figur 3 viser et eksempel på røykgasssystemet i en slik røykrørskjel. Røykgassen dannes i en fyrting som betraktes som første passering, og det er denne som gir mest varmeoverføring til vannet. Deretter går røykgassen inn i rørbunter som går i to øvrige passeringer i kjelen før røykgassen føres til utløpet. Figur 4 viser et mer detaljert bilde over en røykrørskjel.



Figur 4: Røykrørskjel [6]

Røykrørskjeler leverer vanligvis et damptrykk på under 20 bar og bygges for effekter fra 200 kW til 12 MW, men ved å bruke to fyrganger kan de bygges for effekter opptil ca. 20 MW [6]. En røykrørskjel har en god akkumuleringsevne, da kjelen har et stort vannvolum i forhold til dampproduksjon. Dette er på grunn av at det alltid er nødvendig med en mengde vann i kjelen som hindrer store temperaturforskjeller mellom varm og kald side. Store temperaturforskjeller i kjelen kan føre til store spenninger i materialet. Som en regel kan man regne at vannvolumet i  $m^3$  er, i tallverdi, ca. dobbelt så mye som dampproduksjon i tonn/time [6]. Dersom vi betrakter en kjel som produserer 12 tonn/time, vil vannvolumet typisk være  $12 \times 2 = 24m^3$ . For å dekke dette vannvolumet vil kjelen være ca. 4m lang og 3m i diameter.

Ulempen med en røykrørskjel og dets store vannvolum, er at det fører til en lang oppfyringstid fra kald tilstand. Fra kald tilstand regner man normal oppfyringstid for en røykrørskjel til ca.  $\frac{1}{2}$  time per  $m^3$ , eller 1 time per tonn dampproduksjon ved maksimal belastning [6]. Dermed vil en røykrørskjel som produserer 12 tonn/time ha en oppfyringstid på 12 timer.

En røykrørskjel garanteres stort sett for en virkningsgrad på ca. 90%, avhengig av kjeltrykket. Med økonomiser kan kjeltypen oppnå en virkningsgrad på 95%. [6]



### 2.4.2 Ekonomiser

En økonomiser er en heteflate som er installert i røykgasskanalen umiddelbart etter kjelen for å øke virkningsgraden til kjelen [6]. Prinsippet med økonomiser er å utnytte varmeenergi fra røykgassen til å forvarme matevannet som kommer inn på kjel. Dette blir utført ved at matevann strømmer i rørslynger som er omgitt av røykgass til matevannet har ønskelig temperatur. En økonomiser kan også brukes til å varme opp vann/kondens som går inn på matevannstank. Røykgassen til skorstein kan nedkjøles til ca. 100°C ved gassfyrte kjeler og ca. 150-180°C ved oljefyrte kjeler ved bruk av økonomiser som forvarmer matevannet til kjelen. Dette kan gi brenselbesparelse på 4-6% [6].

### 2.4.3 Forbrenning

Forbrenningsinnretningen er normalt en del av kjelen, der brensel og forbrenningsluft blir tilført brenneren med et slikt forhold mellom brensel- og luftmengde at det hele tiden foregår forbrenning ved luftoverskudd. Effekten blir regulert ved å endre brensel- og forbrenningsluftmengden. [6]

Ved naturgass som brensel brukes det gassbrennere. I en gassbrenner blir gassen ofte ledet inn i forbrenningen gjennom flere små huller, en dyseplate, eller flere tynne rør. Dette gjøres for å få en god blanding av gass og forbrenningsluft. Gassbrennere har et stort reguleringsområde (1 til 10). [6]

### 2.4.4 Naturgass

Naturgass består av over 85% metan, resten er bestått hovedsakelig av etan. Naturgass egner seg godt til bruk som brensel da det har høy brennverdi, er luktfri, ikke-giftig og er lettere enn luft. Ved en eventuell lekkasje vil naturgassen raskt stige til værs og fortynnes til konsentrasjoner som ikke er brennbare. [7]

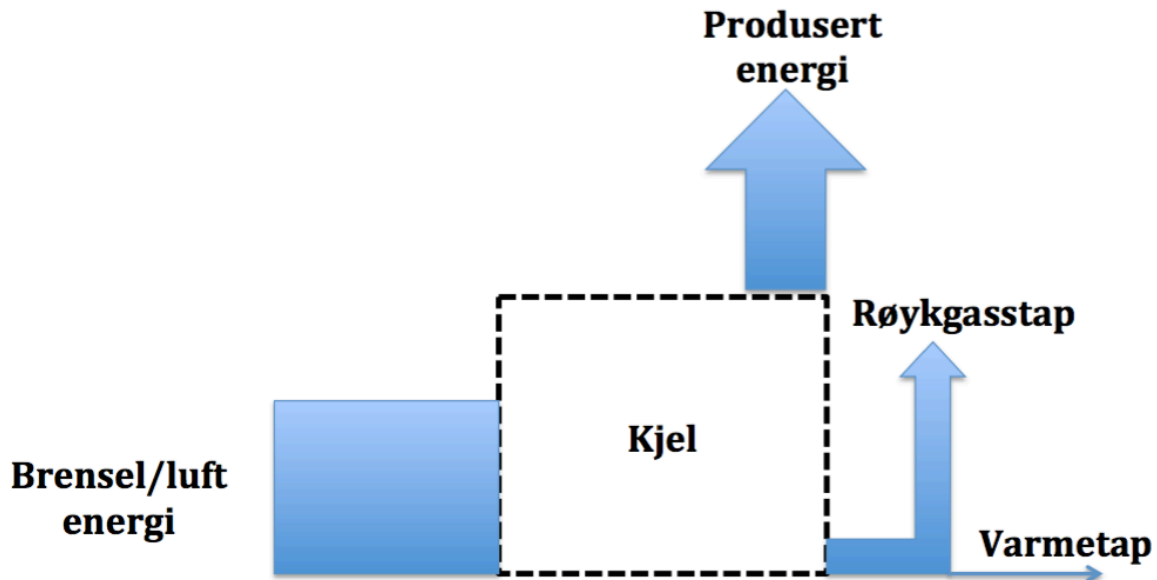
Tetthet	-	0,804 kg/Sm <sup>3</sup>
Nedre brennverdi ( $H_{LHV}$ )	-	46MJ/ kg
Metaninnhold	-	Over 85%, resten etan

### 2.4.5 Bunnavlåsning

Den nødvendige kjemikalietilsetningen i matevannet vil føre til tilstedeværelse av faste stoffer i kjelen. Dette vil samle seg i bunn av kjelen i form av slam, og blir fjernet ved en prosess kalt bunnavlåsning. Dette blir enten utført automatisk og regelmessig eller av kjeloperatør ved å manuelt åpne en utblåsningsventil for en bestemt periode. Med utblåsning vil vannet i bunn av kjel tappes. Det tapte vannet erstattes med en tilsvarende mengde matevann. [5]

## 2.5 Kjelvirkningsgrad

Kjelvirkningsgrad er en svært viktig faktor i et forbrenningsanlegg. Denne forteller oss hvor velfungerende og effektivt anlegget er. Kjelvirkningsgraden defineres som forholdet mellom produsert og tilført energi. Tilført energi er brenselets energi samt følbare varme i tilført luft og brensel. [8]



Figur 5: Illustrasjon av energistrømmer rundt en kjele: Egil Aasbøe

Sankey-diagrammet ovenfor illustrerer de forskjellige energistrømmene rundt en kjele. Energistrøm inn på kjele er brensel og luft som blir tilført. Produsert energi er kjelens overførte effekt, eller med andre ord energigevinsten i dampen som en har fått nyttiggjort. Energi tilført kjelen er alltid større enn produsert energi, all tilført energi blir ikke overført til produsert energi. De forskjellige tapene i en kjele er røykgasstap, varmetap og tap p.g.a ufullstendig forbrenning. Tap p.g.a ufullstendig forbrenning er ikke illustrert i figuren. Røykgasstapet representerer energi som ikke er blitt absorbert av dampen. Dette tapet er avhengig av røykgasstemperaturen og luftoverskuddet [8]. Varmetapet illustrerer strålingsvarmen som er overført til omgivelsene [8].

Røykgasstemperaturen representerer den største delen av energien ved start som ikke er blitt overført til nyttig energi. Desto høyere røykgasstemperatur, desto mindre energi er blitt overført og desto lavere effektivitet. [9]

For å beregne virkningsgraden til kjelen må en ha kunnskap om brennverdien til brenselet. All brensel har to brennverdier, øvre og nedre brennverdi. Nedre brennverdi tar høyde for fuktighet i brenselet. Desto mer fuktighet i brenselet, desto lavere blir brennverdien. Ved kalkulering av energi som er tilført kjelen blir nedre brennverdi brukt. [9]

Overflødig luft er tilført kjelen for å få en fullstendig forbrenning og for å håndtere variasjoner i forbrenningen. En bestemt mengde overflødig luft er tilført brenneren som en sikkerhetsfaktor for forbrenningen. Overflødig luft opptar energi, og varme blir absorbert av luften istedenfor å blir overført nyttigenergi. Som følger av dette vil virkningsgraden falle. En kvalitets brenner kan operere med 15% luftoverskudd. [9]

### 2.5.1 Beregningsmodeller for kjelvirkningsgrad

Ved beregning av virkningsgrad er det to modeller som blir brukt for å estimere virkningsgraden. De to forskjellige modellene er direkte metode og indirekte metode. [6]

#### Direkte metode

Beregnes ved å bruke målte masse- og energistrømmer. Her blir virkningsgrad bestemt ut i fra forholdet mellom dampens mottatte energi og kjelens tilførte energi.

$$\text{Kjelevirkningsgrad: } \eta_{\text{kjel}} = \frac{Q_v}{Q_b} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

$Q_v$ : kjelens overførte effekt (mottatt av vann/damp)

$Q_b$ : tilført effekt fra brensel/luft

#### Indirekte metode

Her blir tapt energimengde i % beregnet og trukket i fra 100%. Sankey-diagrammet i innledningen av virkningsgrad beskriver tapene.

Erfaringsbaserte modeller blir brukt for å avgjøre hvor store tapene er. Ved bruk av denne metoden vil en lettere kunne avgjøre hvilke metoder som kan iverksettes for å forbedre virkningsgraden.

$$\text{Kjelevirkningsgrad: } \eta_{\text{kjel}} = 100\% - \sum \text{tap i \%} \quad (2.5)$$

Tapene er representert som:

- Røykgasstapet (Tar hensyn til omgivelses temperaturen, røykgas temperaturen og luftoverskuddet).
- Varmetapet (Størrelsen på kjelen avgjør hvor stort varmetap det er).
- Tap p.g.a ufullstendig forbrenning. (Dette tapet blir ofte neglisjert p.g.a størrelse og mangel på data)

## 2.6 Matevannssystem

I kjelanlegget vil matevannsystemet sørge for at kjelen får tilstrekkelig tilførsel av vann og vann ved rett kvalitet. Dersom kjelen blir kokt tørr, vil heteflatene miste kjøling, og materialtemperaturen vil stige raskt og slå buler/sprekker, eller i verste fall brenne opp. Matevannet må ha riktig temperatur for å unngå at kjelen utsettes for termisk sjokk, samt holde kjelen effektivt i drift. Ordinært ubehandlet drikkevann er ikke egnet for kjelen, da det kan føre til kjelen skummer opp og dampen blir uren og våt. Dette fører til at kjelen blir mindre effektiv, samt at levetiden på kjelen reduseres.

Matevannsystemet består hovedsakelig av en matevannstank med avgassing og en eller to matevannpumper. Matevannstanken er vanligvis fylt til 70-80% [6], og vannvolumet er minst så stort at det kan fylle en av kjelene i kjelanlegget. Matevannet har normalt en temperatur på 105°C og et trykk på ca. 0,2 barg [6]. Trykkavgasserer er vanligvis montert over matevannstanken. I tillegg til råvann vil avkjølt damp (kondensat) fra prosessen tilbakeføres til matevannstanken for gjenbruk. Om nødvendig brukes også damp direkte fra kjele for å oppnå ønskelig temperatur. Matevannstanken har dermed

regulerbar energitilførsel, slik at vanntemperaturen kan holdes over 100°C og nærmest mulig kokepunkt.

Matevannet pumpes fra matevannstanken til kjel via en rørledning som er utstyrt med stengeventil og tilbakeslagsventil, plassert ved innløp til kjel. Regulering skjer ved hjelp av en reguleringsventil (pådragsorgan) plassert i forkant av kjel eller økonomiser. Større kjeler og kjeler med økonomiser bør ha kontinuerlig matevanntilførsel.

Trykkavgasserer sørger for å fjerne mest mulig oksygen fra matevannet. Oksygenet utgjør en stor del av korrosjonsfaren i et kjelanlegg.

### 2.6.1 Vannbehandling

Før råvannet går inn på matevannstanken, må vannet behandles. Som nevnt tidligere er ubehandlet vann forurensset og/eller har egenskaper som medfører at det ved bruk i kjelanlegg kan forårsake problemer eller skade anlegget. Slike problemer og skader kan for eksempel være [6]:

- Partikler legger seg på heteflater og hindrer varmeoverføring
- Oksygen i vannet vil forårsake korrosjon
- Nitrogen i vannet kan føre til ansamling av gass i høydepunkter i kjelen og i røropplegg
- For lav PH-verdi øker faren for korrosjon
- Tungt oppløselige salter av kalsium (Ca) og magnesium (Mg), hardt vann, kan føre til beleggdannelse ved temperaturøkning og fordampning av vannet
- Vannløselige salter som natriumsalter (NaCl) vil kunne felle ut ved fordampning og føre til beleggdannelse

Ved å gjennomføre en tilfredsstillende vannbehandling på vann som benyttes på kjeler og tilhørende utstyr, opprettholder den optimale virkningsgraden på anlegget, samt at levetiden på utstyret og driftssikkerheten blir bedre. Mangelfull vannbehandling er derfor økonomisk uforutsvarlig, idet så vel fyringsutgifter som kostnader til kjemisk rengjøring og reparasjoner blir større.

## 2.7 Kondensatsystem

Når 1 kg damp kondenserer fullstendig, vil det bli dannet 1 kg kondensat ved samme trykk og temperatur. Som nevnt i avsnitt 2.2 vil damp ha et mye høyere energiinnhold enn kondensat. Men å gjenvinne den kondenserte dampen kan likevel føre til store energibesparelser og andre viktige fordeler for kjelanlegget.

Et effektivt kondensatgjenvinningssystem samler opp det varme kondensatet og returnerer det til matevannsystemet eller bruker det i en annen prosess. Samtidig som at kondensatet inneholder en brukbar mengde varmeenergi, vil kondensatet i utgangspunktet også være destillert vann, som er ideelt for bruk som matevann. Dette sparer anlegget for vann- og vannbehandlingskostnader. Det er kun når det er en reell risiko for forurensing at kondensatet ikke returneres til kjel. Men selv da kan kondensatet nyttiggjøres ved å bruke det som varmt prosessvann eller føre det gjennom en varmeveksler. [10]

### 2.7.1 Kondenspotter

I et damp- og kondensatsystem spiller kondenspotten en viktig rolle, da den kobler dampforbruk med kondensatretur. Kondenspotten slipper igjennom kondensat, samt luft og andre ikke-kondenserbare gasser, men hindrer dampgjennomgang. Dette tillater dampen å nå sin forbruker i en så tørr tilstand som mulig slik at den utfører oppgaven sin effektivt og økonomisk. I tillegg vil kondenspotten sørge for at all kondensat tas ut og samles så fort den er dannet. Dersom det dannede kondensatet brukes i en prosess, vil kondenspotten være plassert nær varmemeforbrukeren for å sikre at kondenseringsvarmen fullt og helt overføres.

### 2.8 Dampakkumulator

Hensikten med en dampakkumulator er å frigjøre damp når behovet er større enn kjelens evne til å levere på den tiden, og for å ta imot damp når behovet er mindre. En dampakkumulator er i prinsippet en forlenging av energilagringen til kjelen. Dampakkumulatoren er fylt med vann til ca. 80-90% av dens totale volum [6]. Vannet blir varmet opp ved å tilføre damp fra kjelanlegget. I vannet er det et fordelingsrør som er utstyrt med en serie dampinjektorer, som er anordnet for å oppnå god sirkulasjon av vannet.

En dampakkumulator bruker fenomenet flashdamp som er beskrevet i avsnitt 2.2.4. Flashdamp er damp dannet fra varmt kondensat utsatt for trykkreduksjon.

Under oppladning av dampakkumulatoren kondenserer dampen fra kjelanlegget i vannet, og dermed økes vannets temperatur og trykket i beholderen stiger. Vannmengden i beholderen øker i takt med den dampmengden som kondenseres. Når maksimalt trykk er oppnådd er akkumulatoren fullt oppladet. Maksimalt trykk på akkumulatoren er som regel det samme arbeidstrykket som kjelen opererer ved. [6]

Den fullt oppladde dampakkumulatoren vil kunne avgi en dampmengde omtrent like stor (men alltid litt mindre) som den dampmengden som går med til oppladning [6]. Grunnen til at dette skjer er fordi tanken vil avgi varmetap til omgivelsene og at dampen som tilføres som regel er fuktig. På grunn av dette vil vannstanden i dampakkumulatoren stige over en lengre periode og det er derfor nødvendig med en avtappingsmekanisme.

Dampakkumulatoren er avhengig av et rimelig trykkfall. Bedriften må være avhengig av store mengder damp av et trykk som er lavere enn kjeltrykket og akkumulatorens fulle ladetrykk [4]. Desto større trykksenkning, desto større mengde damp vil bli frigjort.

## 3 Eksisterende kjelanlegg

### 3.1 Innledning

FMC Vormedal har benyttet seg av damp som en energikilde i produksjon av alginat i mange år. Fabrikken har vært under stadig utvikling, som dermed har gjort det nødvendig for samsvarende utvikling og optimalisering av kjelanlegget.

I dag består kjelanlegget av to røykrørskjeler som er en essensiell del i drift av fabrikken. Kjelen er gassfyrte, og forsynes med naturgass i fra Kårstø. Kjelanlegget benytter seg av vanlig drikkevann fra Haugesund (byvann), som gjennomgår en vannbehandling på fabrikken før entring i kjelanlegget. Den produserte dampen kan bli fordelt til opptil 17 ulike forbrukere der dampen brukes til ulike formål som blant annet varmeveksling, oppvarming og regulering av viskositeten til alginatløsning/prosessløsning. Av de 17 forbrukerne er det 11 forbrukere som har et betydelig dampbehov. De resterende 6 forbrukerne er såpass sjeldent i bruk og krever så liten dampmengde at de neglisjeres fra energibildet.

### 3.2 Kjel 1

Kjel 1 er en røykrørskjel fra Peder Halvorsen AS som ble installert i 2003. Kjelen har en kapasitet på 12 tonn/time og et arbeidstrykk mellom 11 og 12 bar. Etter en ombygging av kjelen og utskifting av brenner, gikk dampproduksjon fra 8 tonn/time til 12 tonn/time. Kjelen er utstyrt med brenner i fra Weishaupt med et regulerbart flammehode som gjør det mulig for brenning ved lavere last/pådrag. Det blir ikke registrert mengde damp ut fra kjel.

### 3.3 Kjel 2

Kjel 2 er en røykrørskjel fra Anders Halvorsen AS som ble installert i 1997. Kjelen har en kapasitet på 12 tonn/time og et arbeidstrykk mellom 11 og 12 bar. Kjel 2 er også utstyrt med Weishaupt brenner, men brenneren har en mer grovere modulering. Dette fører til at kjelen ikke kan brenne på så lav last/pådrag som kjel 1. Det blir ikke registrert mengde damp ut fra kjel. Sjekkliste og forbrenningsrapport utført i 2012 er lagt ved i vedlegg A.

### 3.4 Ekonomiser

Ekonomiser-systemet er levert av DP Clean Tech, og ble installert i 2012. Ekonomiseren er installert for å levere en total effekt på 938 kW som tilsvarer oppvarming av matevann fra 100°C til 138°C (526kW) og kaldtvann fra 8°C til 59°C (412kW). Øvrig teknisk data for økonomiser er oppgitt i vedlegg B.

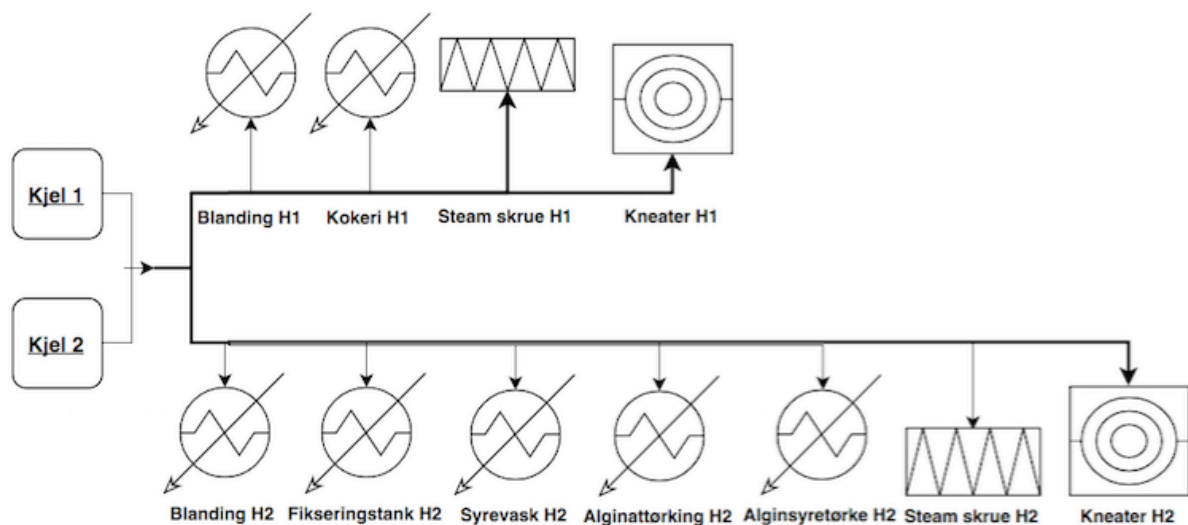
Hensikten med systemet er å forvarme matevannet inn på kjel, samt å forvarme byvann inn på matevannstank. Ekonomiser-systemet er per dags dato ikke i bruk. FMC har en mistanke om at manglende vannsirkulasjon i systemet har ført til at heteflatene i økonomiser har blitt utsatt for tørrkoking, og dermed sprukket. Det er i skrivende stund ingen offisiell forklaring på hva som har ført til skade på økonomiser. FMC holder på å undersøke dette med leverandør.

### 3.5 Matevannstank

Matevannstanken er plassert i kjelhuset i nærheten av kjelene. Tanken er en 15 000 liters trykkavgassingstank levert av Parat Halvorsen AS, og installert i 2012. Normalt driftstrykk og temperatur er på 0,3 barg og 105°C. Inn på tanken kommer tre linjer med kondens i retur fra forbrukere fra fabrikk, i tillegg til byvann og damp. Dampen går direkte fra kjelene inn på tanken via en dampregulator som sørger for å holde trykk og temperatur konstant. En sikkerhetsventil sørger for at trykket i tanken ikke overstiger 0,5 bar. Matevannsystemet består av to flertrinns matevannspumper (en for hver kjel). Pumpene leverer maksimalt ca. 18m<sup>3</sup>/t, og har en maksimal løftehøyde på 190 meter. Råvannet fra Haugesund går gjennom en vannbehandling før det går inn på matevannstank. Råvannet går hovedsakelig gjennom et grovfilter, deretter gjennom et avherdingsfilter for fjerning av kalk. I tanken blir det tilsatt kjelevernmiddel, TM 20, som er et universalmiddel som blant annet fjerner oksygen og binder slammet i bunn av kjelen før bunnavlåsing.

### 3.6 Forbrukere

Den produserte dampen fra kjelene samles i samme rørledning og vil i første del av ferden ankomme en fordelingsstokk. Her distribueres dampen videre og vil til slutt anvendes i 11 forskjellige forbrukere fordelt på produksjonslinjene H1, H2 og H4. Figur 6 nedenfor illustrerer disse forbrukerne. Produksjonslinje H1 har 4 forbrukere, mens produksjonslinje H2 har 7 forbrukere. Linjene går ut til brukerstedene i fabrikk på 11 – 11,5 bar, og blir regulert ned rett før hver forbruker til aktuelt arbeidstrykk for dette prosessutstyret og prosesstrinnet.



Figur 6: Forbrukere ved produksjonslinje H1 og H2: Egil Aasbøe

Forbrukere	Virkemåte
Blanding H1	Steam-/varmeveksler. Vann varmes opp av damp.
Kokeri H1	Steam-/varmeveksler. Vann varmes opp av damp.
Steamskrue H1	Direkte injisering av damp i løsning.
Kneater H1	Oppvarming av prosessløsning i en bestemt periode.
Blanding H2	Steam-/varmeveksler. Vann varmes opp av damp.
Fikseringstank H2	Steam-/varmeveksler. Vann varmes opp av damp.
Syrevask H2	Steam-/varmeveksler. Vann varmes opp av damp.
Alginattørke H2	Luft-/varmeveksler: Luft varmes opp av damp.
Alginsyretørke H2	Luft-/varmeveksler: Luft varmes opp av damp.
Steamskrue H2	Direkte injisering av damp i løsning.
Kneater H2	Oppvarming av prosessløsning i en bestemt periode.

Tabell 2: Virkemåte til forbrukere

Bruksmetode og energibehov varierer mellom forbrukerne. Noen forbrukere har kontinuerlig damptilførsel mens andre kun har tilførsel av damp i intervaller eller kun i nødvendige situasjoner. Energibehovet varierer med bruksmetode og situasjon. Ved noen brukersteder er damp kun en ekstra varmekilde dersom for eksempel elektrisk varme ved perioder ikke er tilstrekkelig, mens ved andre steder brukes damp til å varme opp store mengder vann. Tabell 2 illustrerer virkemåten til hver forbruker.

Dampen blir hovedsakelig brukt som medium for å regulere temperatur og viskositet til prosessløsning og i varmeveksling med vann eller luft. De viktigste forbrukerne av damp er steamveksler, steamskrue, kneater og tørking.

### 3.6.1 Steamveksler

En steamveksler er en varmeveksler der vann oppvarmes ved kjøling av damp. Forvarmet vann fra varmepumpe går inn på steamveksler der dampen sørger for en ytterligere økning til ønsket temperatur. Det oppvarmede vannet, prosessvannet, transporteres så videre til dets forbruk.

Som følge av den høye varmekapasiteten til vann, ca. 4,18 kJ/kgK ved 20°C, kan steamvekslerne kreve store energimengder for å få ønsket vanntemperatur. Prosesstrinnene «blanding» ved både H1 og H2 benytter seg av steamvekslere for å få prosessvannet til ønsket temperatur. Disse anses som de største dampforbrukerne på



fabrikken. Etter at dampen avkjøles i prosessen, returneres kondensatet til kjelanlegget for gjenbruk.

Prosesser på FMC som består av steamveksler er blanding H1, kokeri H1, blanding H2, fikseringstank H2 og syrevask H2.

### 3.6.2 Steamskrue

Her blir damp injisert direkte i taremassen (prosessløsningen). Dette gjøres for å øke viskositeten til løsningen, samt holde temperaturen ved ønskelig verdi. Steamskrueene kan også kreve store energimengder. Dampforbruket kan derimot variere mye, da nødvendig dampinjisering for å få ønsket viskositet og temperatur avhenger av kvalitet på taremassen inn på steamskrue. Fersk taremasse vil for eksempel kreve mer damp enn gammel, da gammel taremasse er mer løselig. Steamskrueene krever ikke kontinuerlig tilførsel av damp, men vil reguleres automatisk etter settpunkt temperatur. I steamskrue blir som sagt dampen injisert direkte inn i taremassen. Dette medfører at det ikke er mulig å gjenvinne energi i form av kondensatretur.

### 3.6.3 Tørking

I mot slutten av prosessen fra tare til alginat er det nødvendig å ta ut fuktigheten i prosessløsningen. En måte å gjøre dette på er å tørke prosessløsningen ved å blande den med oppvarmet luft og en bestemt oppholdstid. I tørkeprosessen blir damp brukt til å varme opp frisk luft. Dette gjøres etter varmeveksler prinsippet. Luft har mye mindre varmekapasitet enn vann, ca. 1 kJ/kgK, i tillegg til lav tetthet, og krever dermed ikke så store energimengder for å gi temperaturøkning. Siden luftoppvarming utføres relativt enkelt, er det ofte brukt elektrisk varme i tillegg til damp. I noen tilfeller krever også tørkeprosessen høyere lufttemperatur enn det damptemperatur kan bidra med, som også gjør det nødvendig for elektrisk varme.

### 3.6.4 Kneater

I kneateren brukes damp til å varme opp prosessløsningen til en bestemt temperatur, og sørge for at temperaturen på løsningen er konstant i en bestemt oppholdsperiode. Etter oppvarmingen går dampen tilbake som kondensat til matevannstanken.

## 3.7 Kondensatgjenvinning

Etter prosesser som i steamveksler vil en kondenspotte sørge for at all den kondenserte dampen «sluses» ut av systemet. Etter kondenspotten har kondensatet en temperatur på ca. 95°C. Fra H1 samles det dannede kondensatet i to rørledninger som fører kondensatet direkte tilbake til matevannstank. På H2 er det en oppsamlingstank på rundt 4000 liter for all kondensat. Før kondensatet når oppsamlingstanken går det først i sirkulasjon gjennom en varmeveksler hvor det varmer opp en liten del prosessvann som brukes i H2. Kondensattemperaturen ligger etter dette på ca. 60°C i kondensattanken. Kondensatet pumpes herfra i en linje til matevannstanken. Steamskrue H1 og steamskrue H2 returnerer ikke kondensat, da damp blir direkte injisert i løsningen.

## 4 Analyse

### 4.1 Innledning

Naturgassforbruket fra og med januar 2015 til februar 2016 vil bli analysert for å undersøke hvor ofte det har vært nødvendig med to kjeler i drift. Naturgassforbruket blir analysert og ikke dampproduksjonen, siden det ikke er mengdemålere av damp ut fra kjel. Det vil bli estimert en virkningsgrad for kjelene for å kunne gi kjelene en tilstandsvurdering. Det vil bli laget en beregningsmodell hvor en har forholdet mellom damp og naturgass. Grunnen til at dette vil bli gjort er fordi det ikke er noen informasjon om hvor mye naturgass som går til hver enkelt kjel. Naturgassdata som er tilgjengelig er totalforbruket. Beregnet naturgasstilførsel vil bli sammenlignet med naturgasstilførsel som en kjel ville hatt. Av hensiktsmessige grunner vil ikke hele perioden bli analysert, men det vil bli analysert en måned som representerer forbruket på en god og representativ måte.

Det vil også bli sjekket opp i en påstand som er blitt sagt av driftspersonell fra bedriften. Påstanden omhandler hva som er naturgasstilførselen ved full belastning på kjel.

Dampbehovet ved ønskelig produksjon vil også bli beregnet. Dette er en produksjon som skal kunne håndteres av én kjel både i dag og i fremtiden. Ved denne beregningen vil det også bli gitt en oversikt over dampfordeling til de forskjellige forbrukerne. Dette vil gi svar på hvilke som er de største forbrukerne.

### 4.2 Kjelanalyse

#### 4.2.1 Virkningsgrad

Siden det ikke er mulig å innhente informasjon om dampmengde ut av kjelene, vil det ikke være mulig å nytte direkte metode for å beregne en kjelvirkningsgrad. Den indirekte metoden tar hensyn til røykgasstap og varmetap til omgivelsene. Med verdier fra en forbrenningsrapport utført på kjel 2 i 2012, vil kjelvirkningsgrad ved hjelp av denne metoden estimeres. Kjelvirkningsgraden betraktes som en felles virkningsgrad for de to kjelene.

$$\text{Kjelveirkningsgrad: } \eta_{kjel} = 100\% - \sum \text{tap } i \% \quad (2.5)$$

Modeller som er brukt for å estimere denne virkningsgraden er hentet fra CleaverBrooks [11]. CleaverBrooks er en leverandør av kjeler som har modeller for å estimere kjelvirkningsgraden.

Prosedyren som følges for å estimere denne virkningsgraden er som følger:

1. Bestemme røykgasstemperaturen.
2. Bestemme mengde konsentrasjon av karbondioksid.
3. Bestemme omgivelsestemperaturen som kommer inn på brenner.

4. Subtrahere omgivelsestemperaturen med røykgasstemperaturen inn.
5. Bruker tabell oppgitt i fra guiden til å estimere røykgasstapet.
6. Bruker størrelse på anlegg for å estimere varmetapet.
7. Subtraherer røykgasstapet, varmetapet med 100% og får kjelvirkningsgrad.

Fra forbrenningsrapport i fra 2012 er det oppgitt den nødvendige informasjonen som trengs for å benytte denne metoden. Forbrenningsrapporten gjelder kun for kjel 2, men antas at verdiene også er gjeldende for kjel 1. I rapporten er den nødvendige informasjonen oppgitt ved forskjellige laster på brenneren. Ved estimering av virkningsgrad er det ønskelig å bestemme virkningsgraden ved full belastning, altså 12 tonn/time. Derfor blir informasjonen fra full belastning benyttet. Forbrenningsrapport er lagt til som vedlegg A.

Belastning	Luftoverskudd	Konsentrasjon av karbondioksid	Røykgasstemperatur
Lav last	33%	8,6 %	141,2°C = 286,16°F
Full last	14%	10,1%	190,5°C = 374,9°F

Tabell 3: Data fra forbrenningsrapport 2012

Fra forbrenningsrapporten er det oppgitt en røykgasstemperatur på 190,5°C (374,9°F) og en omgivelsestemperatur på 23,2°C(73,76°F). Konsentrasjonen av karbondioksid er 10,1%. Differansen mellom omgivelsestemperaturen og røykgasstemperaturen blir da 167,3°C. Differansen i fahrenheit blir 301,14°F.

Ved å lese av tabell i fra guiden finner en røykgasstapet. Et utsnitt i fra tabellen er oppgitt nedenfor. Hele tabellen er lagt ved i vedlegg C. Tabellen som er oppgitt i guiden viser temperaturen i fahrenheit.

CO2 %	Differanse mellom omgivelsestemperatur og røykgasstemperatur [°F]					
	200	220	240	260	280	<b>300</b>
3,0	23,1	24,4	25,9	27,2	28,6	30,0
3,5	21,2	22,5	23,8	24,9	26,1	27,2
4,0	19,9	20,9	22,0	23,1	24,1	25,1
4,5	18,9	19,9	20,9	21,8	22,7	23,6
...	...	...	...	...	...	...
<b>10,0</b>	14,2	14,6	15,2	15,6	16,1	<b>16,6</b>

Tabell 4: Røykgasstap

Avlest fra tabellen ser en at røykgasstapet er 16,6%.

En ny tabell i fra samme guide blir brukt for estimere varmetapet. Tabellen er basert for kjeler som er konstruert og isolert med høy virkningsgrad. Tabellen er lagt ved som vedlegg C. Et utsnitt av tabellen er vist nedenfor.

Last situasjon	75 – 300 kW		300 – 600 kW	
	0,7 bar	8,6 bar	0,7 bar	8,6 bar
25%	1,6%	1,9%	1,0%	1,2%
100%	0,4%	0,5%	0,2%	<b>0,3%</b>

Tabell 5: Varmetap

Fra tabellen kan en lese av varmetapet ved full last. Trykk og effekt som er oppgitt i tabell er ikke beregnet for kjel med høyere effekt enn 600 kW og et trykk på 8,6 bar. Ved FMC har kjelene en effekt på 9000kW og et trykk på 11 til 12 bar. Det blir derfor brukt varmetapet ved 600 kW og et trykk på 8,6 bar. Selv om dette er en betraktelig forskjell benyttes allikevel denne verdien for å gi et omtrentlig estimat. Lest ut i fra tabell blir da strålings- og konveksjonstapet 0,3%. I følge Norsk Energi vil varme- og strålingstapet ligge mellom 0,5 – 1,5% [6].

Det vil også være andre tap som følger av bunnavlåsing samt gjennomstrømmingstap. Disse er så små at de neglisjeres. Ved bruk av indirekte metode basert på modeller fra CleaverBrooks blir da kjelvirkningsgraden for både kjel 1 og kjel 2:

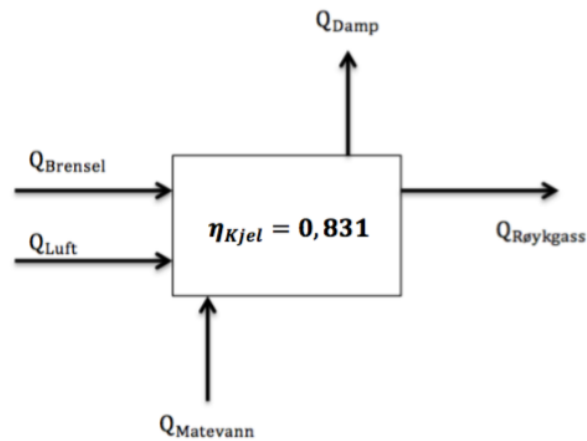
$$Kjelvirkningsgrad: = 100\% - Røykgasstap\% - Varmetap\% \quad (4.1)$$

$$Kjelvirkningsgrad = 100\% - 16,6\% - 0,3\% = 83,1\% \quad (4.2)$$

Det blir dermed antatt en felles kjelvirkningsgrad på 83,1%.

#### 4.2.2 Beregningsmodell

Det er nødvendig å utarbeide en beregningsmodell for å kunne analysere naturgassforbruket. Beregningsmodellen skal brukes som et verktøy for å kunne estimere forholdet mellom naturgasstilførsel og damp produsert.



Figur 7: Energibalanse over kjel

Ved å sette opp en energibalanse rundt en kjel kan en illustrere kjelens overførte effekt og hva som er tilført effekt, Figur 7. En kjel fungerer som en varmeveksler, hvor en har varm og kald side. Varm side vil overføre varme til kald side. Varm side representerer tilført energi til kjel, mens kald side representerer absorbert energi. Varm side vil ikke overføre all sin energi til kald side, dermed må en multiplisere varm side med virkningsgraden.

$$Q_{\text{varm}} \cdot \eta_{\text{kjel}} = Q_{\text{kald}} \quad (4.3)$$

Ved å sette opp en energibalanse for kald og varm side så setter en opp en energibalanse for kjelen. Kald side er mottatt energi og varm side er tilført energi.

Energibalanse for kald side:

$$Q_{\text{kald}} = \text{Energi ut} - \text{Energi inn} \quad (4.4)$$

Energi ut er dampens massestrøm multiplisert dampens entalpi, mens energi inn er massestrøm vann multiplisert med vannets entalpi.

$$\text{Energi inn} = \dot{m}_v \cdot h_v \quad (4.5)$$

$$\text{Energi ut} = \dot{m}_d \cdot h_d \quad (4.6)$$

Neglisjerer tap fra bunnavlåsning, og massestrøm damp er dermed lik massestrøm vann. Energibalanse for kald side blir da ved bruk av ligning 2.1:

$$Q_{\text{kald}} = \dot{m}_{\text{damp}} \cdot (h_d - h_v) \quad (4.7)$$

Energibalanse for varm side:

$$Q_{\text{varm}} = \text{Energi ut} - \text{Energi inn} \quad (4.8)$$

Energi inn på varm side er energi i fra brensel og luft.

$$\text{Energi inn} = \dot{m}_b \cdot H_{\text{LHV}} + \dot{m}_b \cdot c_p \cdot T_o + \dot{m}_l \cdot c_p \cdot T_o \quad (4.9)$$

Energi ut fra varm side er energi i fra røykgassen. Som en forenkling antar en at røykgassens og brenselets varmekapasitet er den samme som luftens varmekapasitet.

$$\text{Energi ut} = \dot{m}_{\text{RG}} \cdot c_p \cdot T_{\text{RG}} \quad (4.10)$$

Massestrømmen til røykgassen er lik summen av massestrømmene til luft og brensel. Energi ut kan da skrives som:

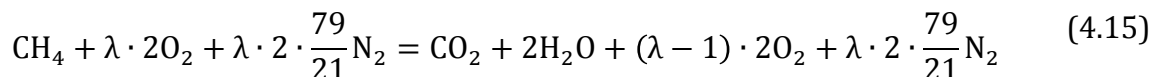
$$\text{Energi ut} = (\dot{m}_l + \dot{m}_b) \cdot c_p \cdot T_{\text{RG}} \quad (4.11)$$

Energibalanse for varm side blir da:

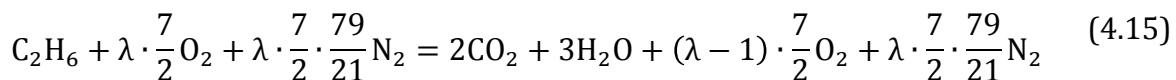
$$Q_{\text{varm}} = \dot{m}_b \cdot H_{\text{LHV}} + \dot{m}_b \cdot c_p \cdot (T_o - T_{\text{RG}}) + \dot{m}_l \cdot c_p \cdot (T_o - T_{\text{RG}}) \quad (4.12)$$

Det er ingen informasjon om massestrømmen til luft inn på kjel, men i fra forbrenningsrapport er det oppgitt luftoverskudd. Ved å sette opp en reaksjonsbalanse for metan kan en finne ut hvor mye kg luft som trengs for per kg brensel som tilføres. Den brukte naturgassen består av over 85% metan og resten etan.

Reaksjonsbalanse for metan der lambda er luftoverskuddet.



Reaksjonsbalanse for etan der lambda er luftoverskuddet.



Ved bruk av disse reaksjonsbalansene blir da nødvendig luftmengde.

$$m_{\text{luft}} = \lambda \cdot \dot{m}_{\text{brensel}} \cdot \left( 0,85 \cdot \frac{200}{21} + 0,15 \cdot \frac{50}{3} \right) = \lambda \cdot \dot{m}_{\text{brensel}} \cdot \frac{445}{42} \quad (4.16)$$

Setter ligning 4.16 inn i ligning 4.12. Setter ligning 4.12 og 4.7 inn i ligning 4.3. Isolerer naturgasstilførsel og får ligning 4.17.

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_{damp} \cdot (h_{damp} - h_{vann})}{\eta_{kjel} \cdot \left( \left( 1 + \lambda \cdot \frac{445}{42} \right) \cdot c_p \cdot (T_o - T_{RG}) + H_{LHV} \right)} \quad (4.17)$$

Data for naturgassforbruket er oppgitt i standardkubikkmeter. Det er dermed ønskelig å finne brensel inn på kjel i volumstrøm.

$$\dot{V}_b = \frac{\dot{m}_{damp} \cdot (h_{damp} - h_{vann})}{\eta_{kjel} \cdot \rho_b \cdot \left( \left( 1 + \lambda \cdot \frac{445}{42} \right) \cdot c_p \cdot (T_o - T_{RG}) + H_{LHV} \right)} \quad (4.18)$$

Ved å sette inn alle kjente faktorer inn i ligning 4.18 kan en lage en enkel modell med naturgasstilførsel og damp produsert som parametere. Verdiene nedenfor gjelder for full belastning på kjel, 12 tonn/time.

$h_{damp}(11bar)$	=	2781 kJ/kg
$h_{vann}(105^\circ\text{C})$	=	440,17 kJ/kg
$\lambda$	=	1,14
$c_p$	=	1,1 kJ/kgK
$T_o$	=	23,2°C
$T_{RG}$	=	190,5°C
$H_{LHV}$	=	46MJ/kg (kilde)
$\rho_b$	=	0,804 kg/Sm <sup>3</sup>

$$\dot{V}_b = \frac{\dot{m}_D \cdot (2781 - 440,17) \text{ kJ/kg}}{0,831 \cdot 0,804 \text{ kg/Sm}^3 \cdot \left( \left( 1 + 1,14 \cdot \frac{445}{42} \right) \cdot \frac{1,1 \text{ kJ}}{\text{kgK}} \cdot (23,2 - 190,5) \text{ K} + 46 \text{ MJ/kg} \right)}$$

Beregningsmodellen blir som følger:

$$\dot{V}_b = 0,08037 \text{ Sm}^3/\text{kg} \cdot \dot{m}_D \quad (4.19)$$

Stigningstallet til beregningsmodellen er 0,08037. Beregningsmodellen er på betingelser av at røykgasstemperaturen, luftoverskuddet og virkningsgraden er konstante ved alle belastninger. I realiteten vil disse faktorene variere med pådraget. Kjelvirkningsgraden, 83,1% , er et resultat av verdier fra full belastning på kjel. Virkningsgraden vil variere utover pådraget, men kun med ca.  $\pm 1\%$ . Ved lav belastning så er røykgasstapet mindre og varmetapet større. Ved høy belastning blir røykgasstapet større og varmetapet

mindre. Virkningsgraden vil som følger av dette ikke variere så mye. Beregningsmodellen vil gi et godt estimat, men ikke en helt nøyaktig verdi. Hovedsakelig skal beregningsmodellen brukes som en modell for å kunne bestemme hvor ofte én kjel har blitt oversteget i løpet januar 2015 og februar 2016.

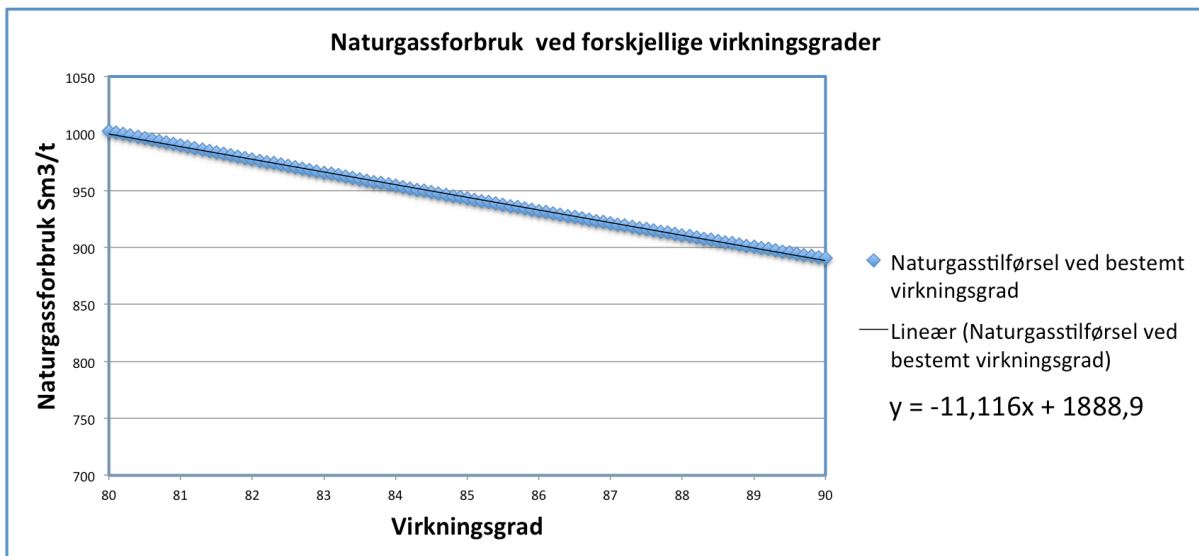
#### 4.2.3 Naturgasstilførsel ved full last

Det er tatt utgangspunkt i at begge kjelene leverer 12 tonn/time ved full belastning. Ved å bruke beregningsmodellen fra ligning 4.19 kan en estimere hvor mye naturgasstilførsel som trengs for å generere denne mengden damp.

$$\dot{V}_b = 0,08037 \text{ Sm}^3/\text{kg} \cdot 12\,000 \text{ kg/t}$$

$$\dot{V}_b = 964 \text{ Sm}^3/\text{t}$$

Det beregnede naturgassbehovet er noe høyere enn det en nyinstallert og effektiv kjel vil kreve. I fra vedlegg D, tilsendt fra FMC, vil en ny kjel kun kreve  $890 \text{ Sm}^3/\text{t}$  ved full belastning, altså 12 tonn/time. En ny kjel garanteres ofte for en virkningsgrad på ca. 90%. Den beregnede verdien  $964 \text{ Sm}^3/\text{t}$ , anses dermed som reell, da virkningsgraden på kjelene i dag ikke er helt optimal. Siden kjelene har tilbakelagt en driftstid på henholdsvis 19 og 13 år, er det ikke utenkelig at effekten på kjelene er redusert.



Figur 8: Naturgassforbruk ved forskjellige virkningsgrader

Figur 8 illustrerer variasjon i gasstilførsel ved 12 tonn/time ved en virkningsgradfordeling fra 80 – 90%. Funksjonen brukt i diagrammet er en funksjon av virkningsgraden i fra ligning 4.18 under full last. Hensikten med diagrammet er å fastslå om estimert virkningsgrad kan betraktes som troverdig. Stigningstallet fra den lineære funksjonen er -11,116. Det vil si at naturgasstilførselen vil synke med ca.  $11,1 \text{ Sm}^3/\text{t}$  per % virkningsgrad. Altså, ved å øke virkningsgraden med 5%, vil en redusere gassforbruket med ca.  $55 \text{ Sm}^3/\text{t}$ . Dette er på betingelse av verdier fra ligning 4.18, altså at dampproduksjon, røykgasstemperatur og luftoverskuddet er konstant.



Fra Figur 8 kan det registreres at naturgasstilførselen ved 90% er ca. 890,5 Sm<sup>3</sup>/t. Dette stemmer godt overens med vedlegg D om hva en ny og effektiv kjel vil kreve av gasstilførsel, 890 Sm<sup>3</sup>/t, ved en dampproduksjon på 12 tonn/time. Dette gir god argumentasjon for at verdier i ligning 4.18 er pålitelige, samt at dagens kjel krever 964 Sm<sup>3</sup>/t ved full last.

En typisk ny kjel vil ha en virkningsgrad på ca. 90%, mens det kan forventes at eldre kjeler ikke har lavere virkningsgrad enn 80%. Som en sikkerhetsfaktor vil det bli satt en øvre og nedre grense på hvor mye naturgasstilførsel som trengs for å levere 12 tonn/time. Øvre grense vil være med en virkningsgrad på 80%, og nedre grense vil være med en virkningsgrad på 90%.

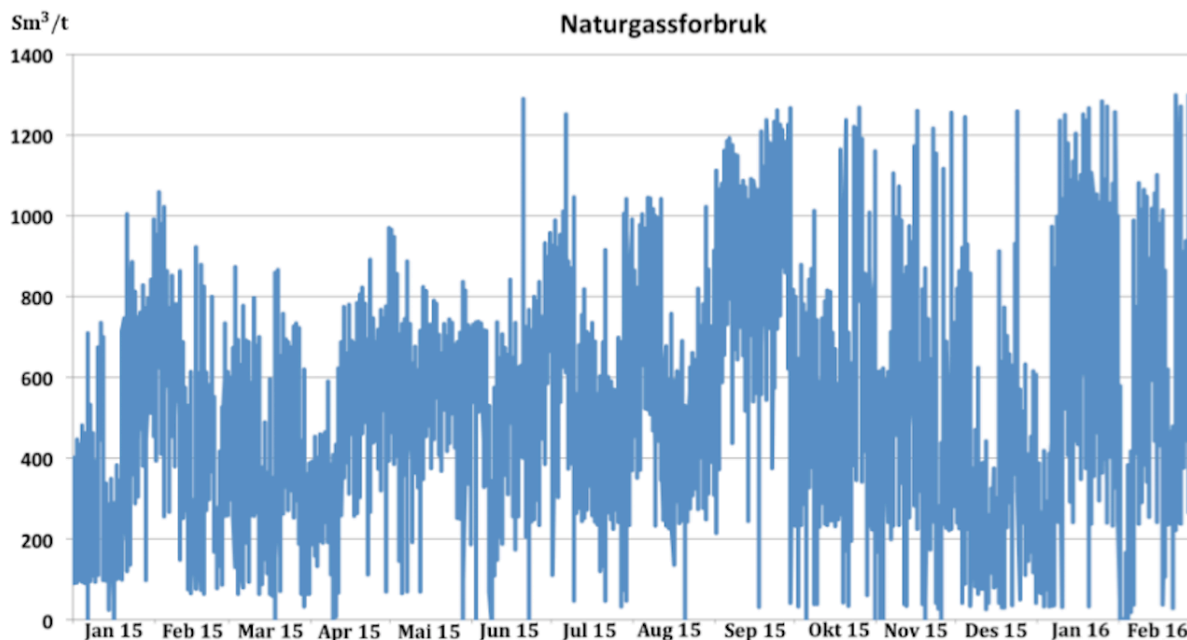
	Virkningsgrad [%]	Naturgasstilførsel [Sm <sup>3</sup> /t]
Øvre grense	80,0	1000
Beregnet naturgasstilførsel	83,1	964
Nedre grense	90,0	890

Tabell 6: Naturgasstilførsel med varierende virkningsgrad

Ved å sette en øvre og en nedre grense kan en med god grunn si at naturgasstilførselen til en kjel ved full last vil ligge i området mellom 890 Sm<sup>3</sup>/t og 1000 Sm<sup>3</sup>/t. Dette er på betingelser i fra ligning 4.18.

### 4.3 Analyse av naturgassforbruk

Figur 9 nedenfor gir en oversikt over naturgassforbruket i en periode fra januar 2015 til februar 2016. Diagrammet er et resultat av trendet naturgassforbruk for hver time i denne perioden. Data er hentet fra PI Coresight, fra FMC. Dette er et verktøy som gir prosessinformasjon over fabrikk.



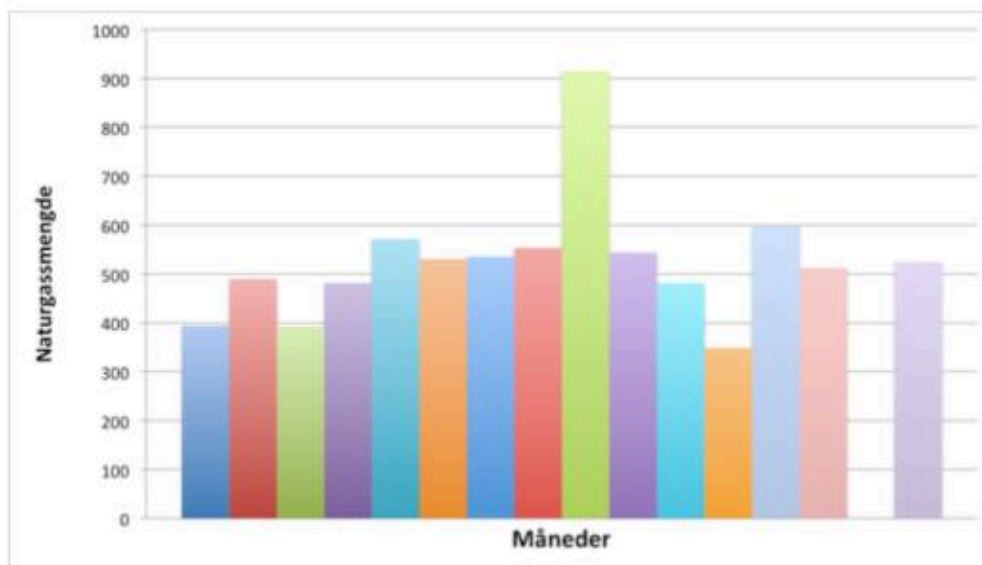
Figur 9: Naturgassforbruket fra januar 2015 til februar 2016

Dersom en kjel alene vil kreve en naturgassmengde  $964 \text{ Sm}^3/\text{t}$  ved full produksjon, kan en se at behovet for å ha to kjeler i gang har vært nødvendig. Ut i fra Figur 9 kan en se at gjennomsnittlig gassforbruk hvor hver måned i hele perioden derimot ikke overskrider kapasiteten til én kjel. De ulike spisslastene som forekommer, med uforutsigbarhet, er grunnen til at det er nødvendig med to kjeler på nett, spesielt de siste månedene i perioden.

Det er vanskelig å beskrive de ulike spisslastene som har oppstått i den gitte perioden. Dette er på grunn av at dampbehovet hele tiden varierer med produksjonen. Spisslastene kan for eksempel forekomme av at energibehovet hos flere forbrukere øker samtidig eller at andre energikilder er ute av drift.

I september måned har gjennomsnittlig gassforbruk vært ca. 60% høyere enn de resterende månedene. Dette kan en derimot begrunne da det i fra en vedlikeholdsrapport fra FMC viser at varmepumpen har vært ute av drift. Dermed ble det et større energibehov i fra kjelene, som igjen medførte til større naturgassforbruk. Gjennomsnittlig gassforbruk for hele perioden er  $524,22 \text{ Sm}^3/\text{t}$  og dette tilsvarer ut i fra beregningsmodellen, ligning 4.19, ca. 6,3 tonn/time. Dette er på betingelser på at virkningsgraden er den samme ved alle laster som ved full last. Høyest inntreffende spisslast i denne perioden (utenom september) er  $1242 \text{ Sm}^3/\text{t}$ . Dette tilsvarer 15,5 tonn/time ut i fra beregningsmodell.

### Gjennomsnittlig naturgassforbruk



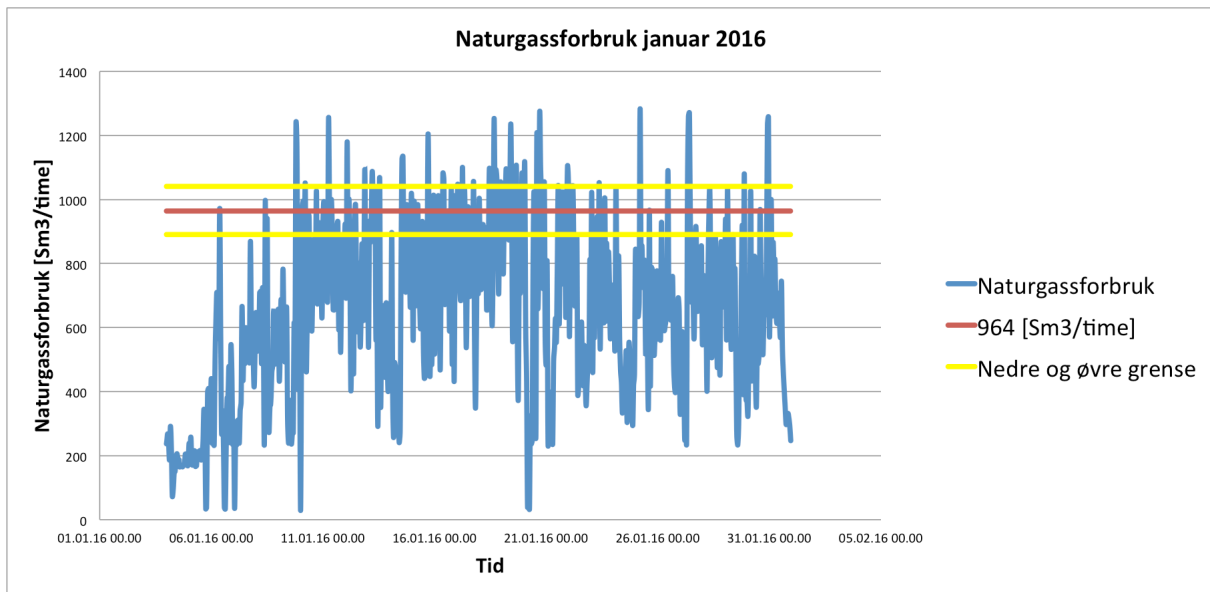
Figur 10: Gjennomsnittlig naturgassforbruk for hver måned og hele perioden

Fra Figur 10 kan det registreres at gjennomsnittlig naturgassforbruket i januar 2016 og februar 2016 er større enn tilsvarende måneder i 2015. Januar 2016 har ca. 34 % mer forbruk av naturgass enn hva januar 2015 har. Hva som er årsaken til dette er ikke godt å si. Det er godt mulig at en produksjonslinje har vært ute av drift i denne perioden, men dette er noe som ikke har blitt bekreftet. Årsaken kan også være at det har blitt oppvarmet mer vann med en høyere temperatur i januar 2016. Forskjellen mellom februar 2015 og 2016 er ikke så stor, med bare en forskjell på ca. 5%.

### 4.3.1 Januar 2016

Videre i analysen tas det utgangspunkt i gassforbruket i januar 2016. Denne måneden er mest relevant å analysere, da produksjonstilstanden i denne måneden var høy og stabil, samtidig som at produksjonen representerer en tilnærmet ønskelig produksjon. I tillegg er det registrert at varmpumpen har vært i normal drift hele denne måneden.

Figur 11 viser naturgassforbruket for januar 2016. Rød linje i figur representerer beregnet gassforbruket til én kjel ved full belastning og virkningsgrad 83,1%. Gule linjer representerer nedre og øvre grense utarbeidet fra 4.2.3, som tilsvarer virkningsgradområdet, 80 – 90%. Naturgassforbruket ved full last vil ligge i området mellom de to gule linjene. Uansett hvilken virkningsgrad kjelene har så har det vært nødvendig med to kjeler i drift.



Figur 11: Naturgassforbruket for januar 2016 med øvre og nedre grense

Med hensyn på beregnet naturgasstilførsel (rød linje) så er det ikke det gjennomsnittlige forbruket som har forårsaket bruken av to kjeler, men spisslaster som overskrider kapasiteten til en kjel.

I Tabell 7 er det registrert antall spisslaster som overskrider kapasiteten til én kjel. I januar 2016 er det 93 perioder med et gassforbruk over 964 Sm<sup>3</sup>/t. Totalt gir dette en driftstid på rundt 131 timer med nødvendighet for to kjeler. Gjennomsnittlig gassforbruk på spisslastene denne måneden var for øvrig på ca. 1100 Sm<sup>3</sup>/t. Fra ligning 4.19 er dette et dampbehov på 13,7 tonn/time.

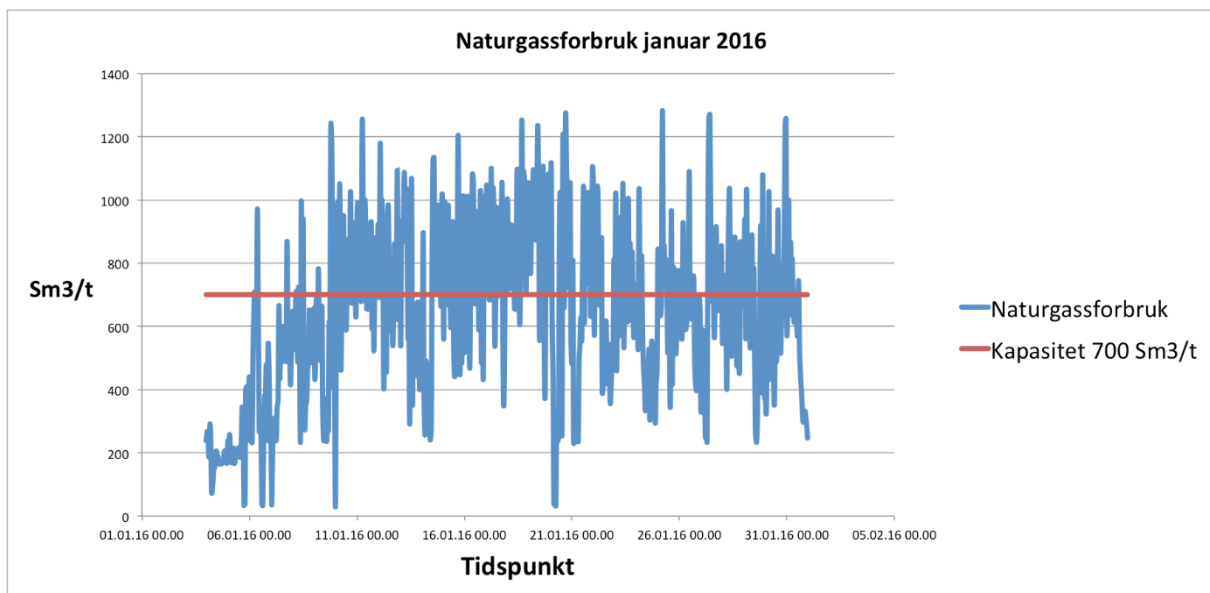
Spisslast varighet [timer]	Antall Spisslaster
±1	69
±2	14
±3	6
±4	4
±131	93

Tabell 7: Spisslaster i januar måned

#### 4.3.2 Usikkerhet

Det er en usikkerhet rundt kjelenes dampproduksjon som følge av mangel på måling. Det er som nevnt ingen mengdemålere som registrerer produsert damp ut fra kjel. Dermed kan det stilles spørsmål om kjelene faktisk klarer å levere 12 tonn/time ved full pådrag.

Den beregnede naturgassmengden for full last, 964 Sm<sup>3</sup>/t, er gjeldende for rapporten og er en relativt troverdig verdi. Men det bør også nevnes at i følge driftspersonell ved FMC er det påstått at maksimal naturgasstilførsel på kjelene er henholdsvis 700 Sm<sup>3</sup>/t og 650 Sm<sup>3</sup>/t. Dersom dette er tilfellet vil behovet for to kjeler i drift være betraktelig større. Med estimert virkningsgrad, 83,1%, vil kjelene da levere maksimalt 8,5 og 7,8 tonn/time, noe som er vesentlig mindre enn det kjelene er designet for. Dersom maksimal naturgasstilførsel faktisk er 700 Sm<sup>3</sup>/t, kan en se fra Figur 12: Naturgassforbruket med redusert naturgasstilførsel ved full belastning at gassforbruket i januar 2016 svært ofte er over kapasiteten til én kjel.



Figur 12: Naturgassforbruket med redusert naturgasstilførsel ved full belastning

En kjel vil da ikke være i nærheten av å kunne tilfredsstille behovet til fabrikken. Det vil ikke bli gjort øvrige betraktninger på disse verdiene videre i rapporten. Det medfører at mulige løsninger til utbedring av kjelanlegg kun vil ta høyde for beregnet naturgasstilførsel ved maksimal dampproduksjon, og ikke påstanden nevnt i dette delkapittelet. Verdiene velger likevel å belyses for leseren. Dersom påstanden faktisk er sann, vil det uansett argumentere godt for problemstillingen i oppgaven.

#### 4.4 Analyse av dampforbruk

Analysen baserer seg på data fra prosessinformasjonssystemet til FMC. Dataene som er hentet representerer prosessverdier ved et bestemt tidspunkt og ved ønsket produksjon. Med ønskelig produksjon menes en produksjon der kvalitet på både råstoff og produkt er tilnærmet normal, samt at det ikke er stans ved noen ledd i fabrikken.

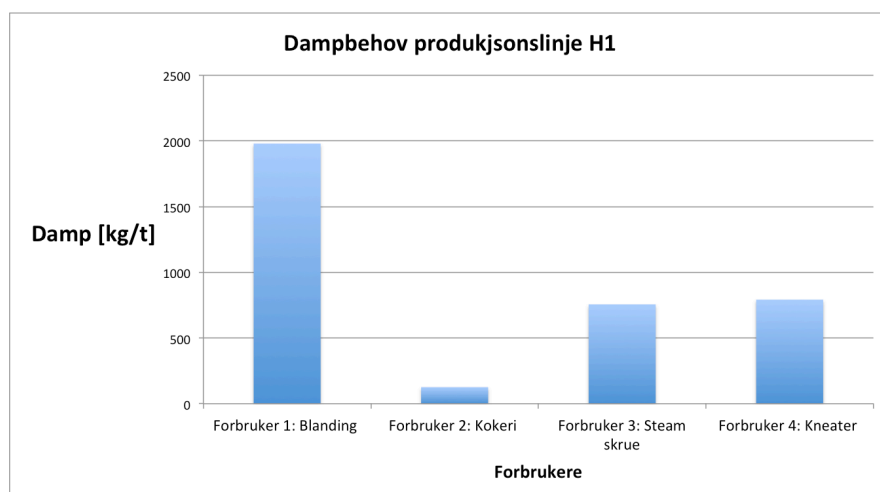
Dette er en produksjon som er ønskelig at skal kunne håndteres av én kjel både nå og i fremtiden.

Ut i fra prosessinformasjonen fra FMC er det gjennomført beregninger på dampbehovet til 11 forbrukere. Det forekommer også andre forbrukere av damp, men disse velges å bli neglisjert i fra det totale dampforbruket. Disse forbrukerne vil ikke vektlegges da de kun har tilførsel av damp i intervaller eller kun ved nødvendige situasjoner. Dampforbruk i disse periodene er også så lite at de ikke vil gi utslag på det totale energibildet.

De utførte beregningene på de 11 aktuelle forbrukerne vil gi en god oversikt over det totale dampbehovet ved ønskelig produksjon. En vil også kunne få en oversikt over hva som er de store forbrukerne. Nedenfor er det presentert damp- og energibehov for alle 11 forbrukere. Alle utførte beregninger er lagt til i vedlegg E. Det er ikke tatt hensyn til tap ved hver enkelt forbruker.

#### 4.4.1 Dampbehov

##### Produksjonslinje H1



Figur 13: Dampbehov produksjonslinje H1

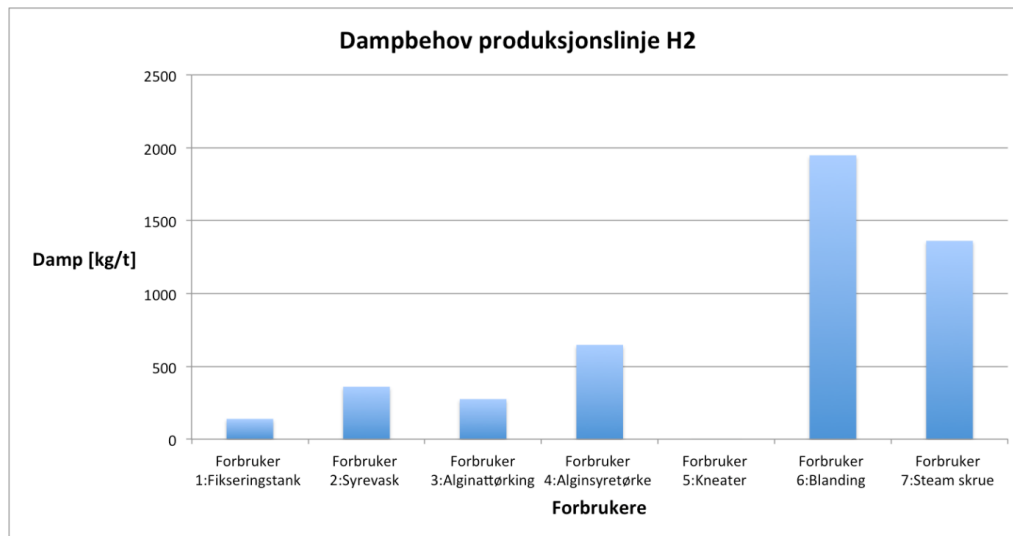
Forbrukere	Dampbehov [kg/time]	Type forbruk
Forbruker 1: Blanding*	1980	Kontinuerlig
Forbruker 2: Kokeri*	126	Kontinuerlig
Forbruker 3: Steamskruer	756	Ikke kontinuerlig
Forbruker 4: Kneater*	792	Ikke kontinuerlig
<b>Totalt</b>	<b>3654</b>	

\*Beregnet verdi

Tabell 8: Dampbehov produksjonslinje H1

Ved produksjonslinje H1 er et nødvendig dampbehov ca. 3,7 tonn/time. Blanding har et vesentlig større behov enn de andre forbrukerne på H1, utgjør ca. 54% av det totale dampbehovet. Kokeri utgjør en liten del av dampbehovet på H1.

## Produksjonslinje H2



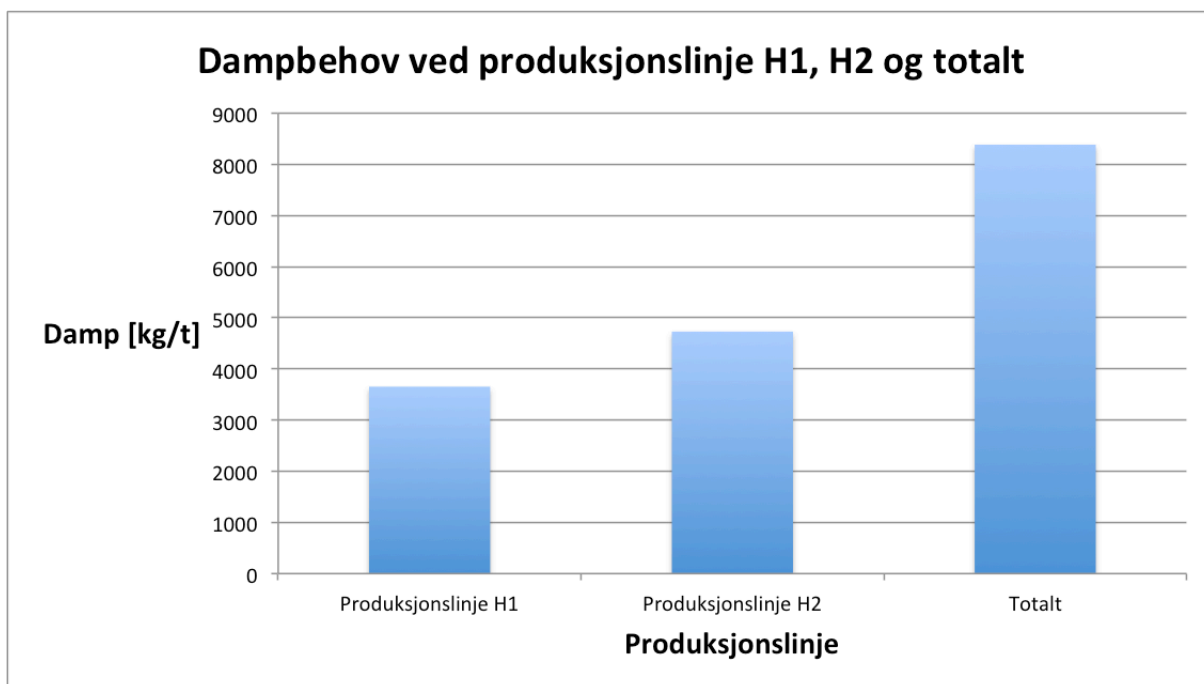
Figur 14: Dampbehov produksjonslinje H2

Forbrukere	Dampbehov [kg/time]	Type forbruk
Forbruker 1: Fikseringstank*	139,5	Kontinuerlig
Forbruker 2: Syrevask*	360,0	Kontinuerlig
Forbruker 3: Alginattørking	275,4	Kontinuerlig
Forbruker 4: Alginsyretørke	647,1	Kontinuerlig
Forbruker 5: Kneater*	0,000	Ikke kontinuerlig
Forbruker 6: Blanding*	1948	Kontinuerlig
Forbruker 7: Steamskrue	1361	Ikke kontinuerlig
<b>Totalt</b>	<b>4731</b>	

\*Beregnet verdi

Tabell 9: Dampbehov produksjonslinje H2

Ved produksjonslinje H2 er det totale dampbehovet ca. 4,7 tonn/time. H2 er en større produksjonsavdeling og vil ikke overraskende kreve mer damp enn H1. Blanding og steamskrue er de største forbrukerne på H2 og utgjør 41% og 29% av det totale behovet på avdelingen. På dette produktet som informasjonen er hentet fra krevde ikke kneater damptilførsel. Kneater vil likevel ved andre typer produkt kreve damp, men i små mengder, og utgjør generelt en svært liten del av dampbehovet på H2.

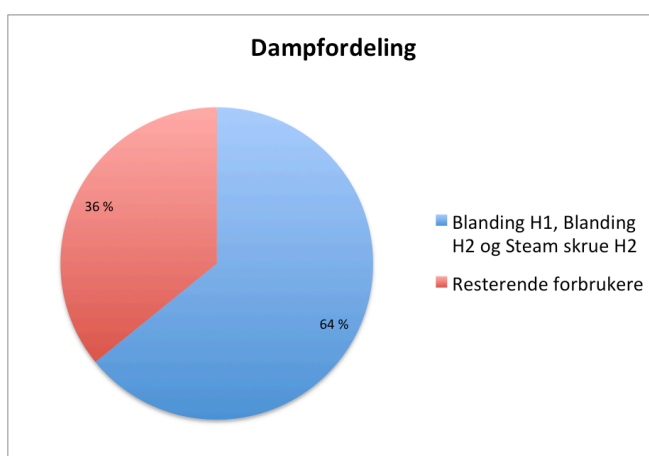


Figur 15: Dampbehov ved ønsket produksjon

	Dampbehov [kg/time]
Produksjonslinje H1	3654
Produksjonslinje H2	4731
<b>Totalt</b>	<b>8384</b>

Tabell 10: Dampbehov ved ønsket produksjon

Totalt dampbehov for både produksjonslinje H1 og H2 er ca. 8,4 tonn/time. Dette er en kapasitet som en kjel skal kunne levere. Installerte kjeler ved FMC skal i dag kunne ha en kapasitet som tilfredsstiller dette behovet. Nødvendig dampbehov ved ønsket produksjon er over gjennomsnittet av dampforbruket som er ca. 6,3 tonn/time.



Figur 16: Dampfordeling



Fra Tabell 8 og Tabell 9 er det registrert at blanding H1, blanding, H2 og steamskrue H2 utgjør en stor del av dampbehovet ved denne type produksjon. Til sammen utgjør de ca. 63% av det totale dampbehovet. Hvis det oppstår spisslaster på hver av disse tre forbrukere samtidig kan det ha et stort utslag på dampbehovet. Figur 16: Dampfordeling illustrere størrelse andelen til disse tre forbrukerne.

#### 4.5 Oppsummering

Hensikten med analysen var å gi en systematisk oversikt over hvorfor 2 kjeler har vært nødvendig for å drifte fabrikken på en stabil måte. Det er blitt estimert en virkningsgrad og beregningsmodell ved full last på kjel for å kunne analysere naturgassforbruket. Ved bruk av beregnet naturgassstilførsel på ca. 964 Sm<sup>3</sup>/t ved full last har det blitt gitt en oversikt over at det ikke er det gjennomsnittlige forbruket som har forårsaket bruken av to kjeler. Årsaken til bruk av to kjeler har vært hyppige spisslaster som har overskredet kapasiteten til én kjel.

Tabell 11 illustrerer behovet over én kjel. Maksimalt behov er 15,5 tonn/time, som er største spisslast som har inntruffet det siste året. Ved hjelp av beregningsmodell ligning 4.19 er naturgassforbruk blitt konvertert til dampforbruk. Behov over kapasiteten til én kjel blir dermed 3,5 tonn/time.

	Damp [tonn/time]
Maksimalt behov	15,5
Tilgjengelig (én kjel)	12,0
Behov over én kjel	3,5

Tabell 11: Dampbehov over én kjel

Ved analysering av naturgassforbruket ble det også sjekket opp i en påstand fra FMCs driftspersonell. Påstanden omhandlet hva naturgassstilførselen var ved full last. Det ble sagt at denne tilførselen var ca. 700 Sm<sup>3</sup>/t. Hvis denne påstanden er rett så er ikke én kjel alene i nærheten av å kunne tilfredsstille dampbehovet til fabrikken. Denne antagelsen tilsier også at kjelene ikke lenger har en kapasitet på 12 tonn/time.

Det er blitt også gitt en oversikt over dampbehovet til hver forbruker ved ønsket produksjon. Hensikten med å beregne dette behovet var å se om denne typen produksjon kan håndteres av én kjel i drift, noe som en kjel kan. Ved denne beregningen ble det også gitt en oversikt over dampbehovet til hver forbruker. Ut i fra denne oversikten var det tre av elleve forbrukere som skilte seg ut. Disse tre forbrukerne sto for 64% av dampbehovet ved denne typen produksjon. Det er mulig at disse tre forbrukerne kan være årsaken til spisslaster, med tanke på størrelsen. Hvis en spisslast på hver av disse forbrukerne skulle inntreffe samtidig ville det mest sannsynlig forårsaket en spisslast som overskrider kapasiteten til en kjel.

Ved vurdering av virkningsgrad ble det registrert en høy røykgasstemperatur. Ved bruk av erfaringsbaserte modeller ble det estimert et røykgasstap på 16,6%. Dette er en stor

mengde tapt energi som ikke er blitt nyttiggjort. Denne energien kan utnyttes av en økonomiser eller en luftforvarmer.

## 5 Løsning

### 5.1 Innledning

Det vil i dette kapittelet presenteres ulike forslag til tiltak og løsninger som vil hovedsakelig forbedre kjelanlegget i en så stor grad at det er mulig å utføre nødvendig vedlikehold på en av de dampproduiserende enhetene uten at det vil få konsekvenser for alginatproduksjonen. I tillegg vil det bli beskrevet mindre tiltak som kan utføres for å øke virkningsgrad på kjel. Følgende forslag til løsninger og tiltak til utbedring er gjort på grunnlag av resultater i fra analysen.

### 5.2 Alternativ 1: Ny røykrørskjel

Ved investering i én ny kjel med en kapasitet større enn 3,5 tonn/time vil det være mulig for å ha to kjeler i drift og én kjel i standby. Ved å veksle om hvilken kjele som skal være ute av drift vil en kunne utføre nødvendig vedlikehold, tilstandskontroll og reparasjoner uten at det fører til konsekvenser for produksjonen. Den tredje kjelen vil være en mindre røykrørskjel som vil fungere som en moduleringskjel til en av de eksisterende hovedkjelene. På denne måten vil en av hovedkjelene alltid være på nett med stort pådrag mens den mindre kjelen vil fungere som en buffer. Dermed vil hovedkjelen som er på nett kunne jobbe effektivt, mens den andre hovedkjelen er tilgjengelig for vedlikehold/inspeksjon/reparasjon.

Fra Tabell 11 ble det illustrert hvilket kapasitetsområde én kjel må kunne håndtere for stabil produksjon. Ved investering i én ny kjel med mindre kapasitet må denne kjelen ha en kapasitet større enn 3,5 tonn/time. Som en sikkerhetsmargin bør én ny kjel ha en kapasitet på 5 tonn/time. Da vil denne kjelen i kombinasjon med en av hovedkjelene med god sikkerhet kunne håndtere en maksimal belastning på 15,5 tonn/time.

#### 5.2.1 Leverandør

Det er blitt kontaktet to leverandører som kan levere én røykrørskjel i denne størrelsen. Leverandørene som er blitt kontaktet er FMCs nåværende leverandør av kjeler og tilhørende utstyr, og Skåland Rør og industrimontasje.

Parat Halvorsen leverer kjeler i fra Vitomax serien. De kan levere røykrørskjeler i fra 0,5 til 26 tonn/time, og fra 6 til 26 bar. Det kan installeres en valgfri økonomiser og tilhørende styresystem som gir kjelen en meget høy yteevne. Det trengs ingen foring på grunn av vendekammer som er totalt vannkjølt. Det er et stort dampvolum i topp av kjel som gir damp av toppkvalitet med lav restfuktighet. Øvrig teknisk data er lagt til i vedlegg F.

Skåland Rør & Industrimontasje leverer Danstoker serien. Kjelene blir levert i størrelsesordenen 0,16 til 35 tonn/time og klarer både variasjoner innen sitt kapasitetsområde og i kortere perioder langt over dette på grunn av vannvolumet. Kjelene de leverer er utviklet etter de nyeste prinsipper for å oppnå den optimale virkningsgrad og oppfylle gjeldene miljøkrav. Øvrig teknisk data for kjel er lagt ved i vedlegg F.

For å sammenligne disse produktene er vekt, størrelse, vannvolum og dampvolum valgt som temaer for valget. Desto større vannvolum, desto bedre egenskaper for svingninger i dampbehov. Desto større dampvolum, desto bedre dampkvalitet.

	PARAT Halvorsen	Skåland Rør & Industrimontasje
Dampytelse [tonn/time]	5,09	5,00
Vekt ved 13 bar [kg]	11 900*	12 000
Total lengde [m]	5,38*	5,43
Total bredde [m]	2,55	2,50*
Total høyde [m]	2,90	2,85*
Vannvolum [m <sup>3</sup> ]	9,82	10,8*
Dampvolum [m <sup>3</sup> ]	1,38	2,1*
*Fordel	3	4*

Tabell 12: Vurdering av én mindre røykrørskjel

På bakgrunn av denne sammenligningen var Danstoker kjelen fra Skåland Rør & Industrimontasje som fikk flest fordeler. Fra disse betingelsene leverer Skåland kjeler med bedre dampkvalitet og kan håndtere svingninger i dampbehov bedre. Selv om Danstoker kjelen fikk flest fordeler, blir den ikke valgt som anbefaling av kjel. Da FMC allerede har kjeler og andre produkter i fra Parat Halvorsen ser en ingen grunn til å bytte leverandør på grunn av denne sammenligningen. Driftspersonell er også kjent med denne typen kjel, og vedlikeholdsrutiner kan mest sannsynlig gjøres på samme måte. Små forskjeller er grunnen til at Parat Halvorsen blir valgt som leverandør av én røykrørskjel i størrelsesordenen 5 tonn/time. Det er ikke fått tilbakemelding fra leverandør på pris av kjel i denne størrelsesordenen.

### 5.3 Alternativ 2: Dampgenerator

En mulig løsning til problemstilling kan være å utvide anlegget med en dampgenerator. En dampgenerator er en fyrt vannrørskjel der vannet strømmer på innsiden av kjelrørene. I denne typen kjel føres vannet ofte gjennom tynne rør i en spiral som gir rask oppfyring og dampleveranse.

En dampgenerator kan tilkobles eksisterende anlegg og avhjelpe/avlaste hovedkjelene. Dampgeneratoren kan være driftsklar, men trenger ikke å være i drift/fyrt. Uansett om kjelpasser må utføre uforberedt eller planlagt vedlikehold/repasjon på en av hovedkjelene, kan dampgeneratoren raskt fyres opp og starte å levere damp til nettet innen 5 minutter. Med utgangspunkt i at begge eksisterende kjeler på FMC leverer 12 tonn/time og at største inntreffende spisslast er på 15,5 tonn/time (Tabell 11) bør dampgeneratoren kunne håndtere et behov på minst 4 tonn/time.

#### 5.3.1 Skåland QB generatorkjel

I samtaler med Skåland Rør & Industrimontasje ble det anbefalt en type dampgenerator som kan være et reelt alternativ. QB-serien til Skåland er en hurtig dampgenerator med rør spunnet i spiral (coil). Dette er en 1-trekks dampgenerator med kapasiteter opp til 5

tonn/time og driftstrykk mellom 10 – 20 bar. Kjelen kan fyres med naturgass og leveres med en virkningsgrad rundt 88%. Med en QB generatorkjel med kapasitet på 5 tonn/time vil den i kombinasjon med en av hovedkjelene kunne håndtere spisslaster opp til 17 tonn/time. For øvrig data om QB generatorkjel se datablad (Vedlegg F).

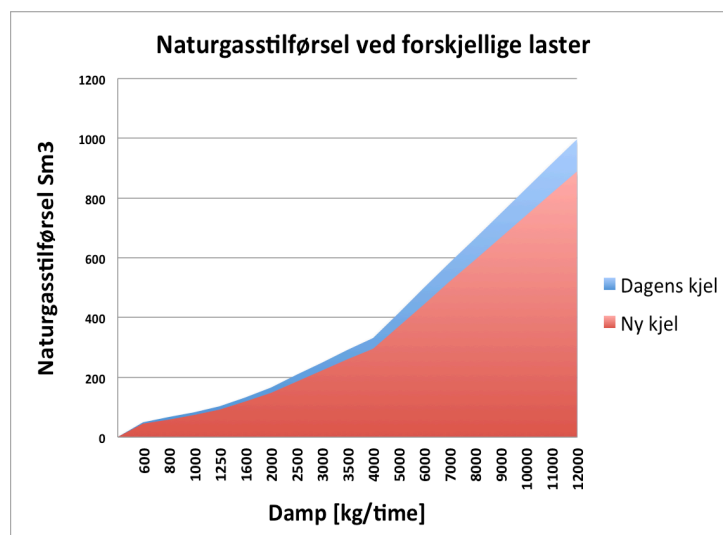
Det er ikke funnet andre leverandører som kan levere denne typen kjeler med den nødvendige kapasiteten. Det er heller ikke fått et prisestimat i fra Skåland.

#### 5.4 Alternativ 3: Utskifte eksisterende kjeler

Et alternativ er å erstatte dagens kjeler med to nye kjeler med større kapasitet, der en kjel alene vil kunne tilfredsstille dampbehovet på egenhånd. En ny kjel må ha gode egenskaper ved variasjoner i dampbehov. Å erstatte kun én kjel er ikke en aktuell løsning. Dersom den «nye og større» kjelen da blir tatt ut for vedlikehold, og kun en av de gamle kjelene er på nett, vil det samme problemet vedvare. Den gamle hovedkjelen vil ikke kunne håndtere den maksimale belastningen 15,5 tonn/time alene.

I Tabell 11 blir det illustrert hvilket kapasitetsområde to nye kjeler må ha. Største spisslast er 15,5 tonn/time og gjennomsnittlig behov er 6,3 tonn/time. Nye kjeler må som nevnt kunne håndtere de uforutsigbare spisslastene. En nødvendig størrelse på kjelene vil da være 16 tonn/time.

Ved å investere i nye kjeler vil en også få kjeler med større virkningsgrad. Estimert virkningsgrad for både kjel 1 og kjel 2 er 83,1%. En ny kjel vil ha en virkningsgrad i området 90%. Figur 17 nedenfor sammenligner naturgassbehovet for en bestemt last mellom dagens kjel (blå) og en ny kjel (rød). En kan se at ny kjel vil trenge mindre naturgasstilførsel ved en bestemt last kontra de gamle kjelene. Desto større last, desto større forskjell i naturgasstilførsel. Naturgasstilførselen for dagens kjeler er basert på resultater i fra beregningsmodell ligning 4.19.



Figur 17: Naturgasstilførsel for ny og gammel kjel

Ved å sammenligne ny virkningsgrad med virkningsgrad på dagens kjeler kan en beregne hvor mye besparelser en kan gjøre ved å investere i en nye kjeler. Ligning 6.1 illustrerer besparelsene.

$$\text{Besparelser}(\%) = \frac{\eta_{ny} - \eta_{gammel}}{\eta_{gammel}} \cdot 100\% \quad (6.1)$$

$$\text{Besparelser}(\%) = \frac{0,9 - 0,831}{0,9} \cdot 100\% = 7,7\% \quad (6.2)$$

Ved å investere i en nye kjeler kan en oppnå brenselsbesparelser på 7,7%. Kapasitet til ny kjel må som nevnt være 16 tonn damp per time hvis den skal kunne tilfredsstille energibehovet til fabrikk. Den har da muligheter til å håndtere spisslastene og variasjonene i dampbehovet helt på egenhånd. Virkningsgraden som er blitt brukt som virkningsgrad for dagens kjel er 83,1%. Som en forenkling blir det antatt at denne virkningsgraden også gjelder for alle andre belastninger.

#### 5.4.1 Leverandører

De samme leverandørene blir vurdert ved valg av kjeler i denne størrelses ordenen som ved investering i en mindre røykrørskjel. Det er blitt oppgitt pris fra begge leverandørene, men ingen forskjeller på dette området. Begge leverandørene leverer kjeler i prisklassen 2,5 millioner.

	PARAT Halvorsen	Skåland Rør & Industrimontasje
Dampytelse [tonn/time]	17,42*	16
Vekt ved 13 bar [kg]	33 700	27 500*
Total lengde [m]	7,56*	7,950
Total bredde [m]	3,60	3,425*
Total høyde [m]	3,95	3,775*
Vannvolum [m <sup>3</sup> ]	26,15	27,0*
Dampvolum [m <sup>3</sup> ]	4,75	6,50*
*Fordel	2*	5*

Tabell 13: Sammenligning av kjeler fra Parat Halvorsen og Skåland Rør & Industrimontasje

Fra Tabell 13 kan det registreres at Skåland igjen har flest fordeler når disse faktorene blir satt som vurderingsgrunnlag. Skåland leverer kjeler med større vannvolum og dampvolum. Deres kjeler kan dermed levere bedre kvalitet på dampen, og de kan håndtere svingninger i dampbehov på en bedre måte. Kjelerne er også mindre i størrelsen og har lavere vekt. Som nevnt er svingninger i dampbehov en egenskap som kjeler ved FMC må kunne håndtere på en tilfredsstillende måte. En kan også registrere fra tabellen at Parat ikke leverer kjeler i størrelsesordenen 16 tonn/time, men en må opp i en kapasitet på 17,42 tonn/time. Med grunnlag på disse vurderingene burde kjeler i fra Skåland blitt valgt. Begrunnelse for at disse kjelerne ikke velges er FMCs kjennskap

til Parat sine kjeler og leverandøren. En anbefaling av kjeler i denne størrelsesordenen blir dermed Parat Halvorsen.

Hvis en tar utgangspunkt i at en kjel koster 2,5 millioner blir investeringskostnadene 5 millioner kroner for å utskifte begge kjelene. I tillegg vil det være andre kostnader som montering, men dette tas ikke hensyn til. Nedenfor er et enkelt estimat for hvor lang tid det vil ta å spare kostnader i naturgassforbruk hvis FMC skulle investere i nye kjeler.

$$\text{Investering} = \text{Tid} \cdot \text{Brenselsbesparelser} \quad (6.3)$$

Ved å sette inn brenselsbesparelser og investering inn i ligning 6,3 kan en estimere hvor lang tid det tar å spare inn kostnadene i investering i nye kjeler. Brenselsbesparelser er ca. 7,7 % (ligning 6.1). Det brukt gjennomsnittlig gassforbruk fra januar 2015 til februar 2016. Gjennomsnittlig gassforbruk var  $524 \text{ Sm}^3/\text{t}$ , og ny gjennomsnittlig gassforbruk for ny kjel blir da  $483,7 \text{ Sm}^3/\text{t}$ . Brenselsbesparelser blir da  $40,348 \text{ Sm}^3/\text{t}$ . Multipliserer dette tallet med gjennomsnittlig gasspris fra 2015, som er  $1,58 \text{ NOK}/\text{Sm}^3$  [12]. Ved å sette disse verdiene inn i ligning 6.3 så blir besparelsetid 9 år. Dette er på grunnlag av at nye kjeler vil ha virkningsgrad på 90% og dagens kjeler med en virkningsgrad på 83,1%. Det er også antatt at nye kjeler vil ha 90% i virkningsgrad i alle 9 årene. Det er dermed ikke tatt høyde for at virkningsgraden vil falle i løpet av disse årene. Det er også antatt at kjelene vil ha samme virkningsgrad ved alle belastninger.

## 5.5 Alternativ 4: Dampakkumulator

En mulig løsning for å kunne ha en kjel tilgjengelig for vedlikehold, små reparasjoner og tilstandskontroll kan være å installere en dampakkumulator. En dampakkumulator er en forlengelse av energilagringen til kjelen. Den fungerer som en buffertank, og når spisslaster over kjelens kapasitet inntreffer vil dampakkumulatorene ta den belastningen. Det vil da ikke være trykk- og temperaturfall i kjelen.

Ved FMC har kjelen et arbeidstrykk på 11 bar, og en god del forbrukere har et arbeidstrykk på 4-6 bar. Med dette tilstrekkelige trykkfallet har FMC gode muligheter for å produsere en tilstrekkelig mengde flash-damp. For FMC kan det være aktuelt å ha en buffertank som bidrar med energi til hele nettverket, men bedriften kan også ha buffertanker ved forbrukere som variere mye i dampbehov. Hvis noen forbrukere bare trenger damp ved bestemte perioder er det muligheter for å ha en akkumulator ved disse forbrukerne.

### 5.5.1 Dampakkumulator volum

Nedenfor vil det bli beregnet en mulig størrelse på dampakkumulatoren. Fra Tabell 7 var det vist varighet på spisslaster som hadde inntruffet i januar 2016. Gjennomsnittlig størrelse på disse spisslastene var  $13,7 \text{ tonn/time}$ . Varighetene på spisslastene var en, to, tre og fire timer. Det var flest spisslaster med en lengde på én time. Største spisslast var  $15,5 \text{ tonn/time}$ . For beregning av størrelse på dampakkumulator blir det bare vist ved ett tilfelle. Størrelsesbehov for alle situasjonene er i Tabell 14.

Dampakkumulatorvolum for en periode på 1 time og en gjennomsnittlig spisslastbelastning på  $13,7 \text{ tonn time}$ .

$$\text{Nødvendig dampplagring} = 1,7 \text{ tonn/time} \cdot 1 \text{ time} = 1,7 \text{ tonn}$$

Trykket i dampakkumulatoren er 11 bar, det samme som arbeidstrykket til kjelene. Leveringstrykket kan være 6 bar. Mange forbrukere mottar damp på 6 bar og lavere. Ved bruk av ligning 2.3 kan mengde flashdamp beregnes. Entalpi verdier er hentet i fra Tabell 1.

$$\text{Mengde flashdamp} = \dot{m}_d = \dot{m}_v \cdot \frac{h_{f,P_1} - h_{f,P_2}}{h_{fg,P_2}} \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_v = \frac{1700 \text{ kg}}{\frac{781 - 670}{2065}} = 31657 \text{ kg vann}$$

Vanninnholdet i en dampakkumulator er 90%. Nødvendig størrelse på dampakkumulatoren må bli beregnet for at hele volumet er fullt med vann. Mengde vann i tanken blir da.

$$\dot{m}_v = \frac{31657 \text{ kg vann}}{0,9} = 35175 \text{ kg vann}$$

Tettheten til vann ved 10 barg er 882 kg/m<sup>3</sup> [13]. Minimum størrelse på dampakkumulatoren blir da.

$$V = \frac{35175 \text{ kg vann}}{882 \text{ kg/m}^3} = 40 \text{ m}^3$$

Nødvendig størrelse på en dampakkumulator som er dimensjonert for spisslaster på 1 time og en spisslaststørrelse på 13,7 tonn/time er 40 m<sup>3</sup>. I Tabell 14 er det oppgitt dampakkumulator størrelser for gjennomsnittlig spisslastbelastning og maksimal belastning. Der er også oppgitt forskjellige varigheter på spisslastene.

Varighet [time]	Gjennomsnittlig (13,7 tonn/time)	Maksimal (15,5 tonn/time)
1	40 m <sup>3</sup>	82 m <sup>3</sup>
2	80 m <sup>3</sup>	164 m <sup>3</sup>
3	120 m <sup>3</sup>	246 m <sup>3</sup>
4	160 m <sup>3</sup>	328 m <sup>3</sup>

Tabell 14: Dampakkumulatorvolum

I Tabell 14 kan en se at nødvendig størrelse på dampakkumulator øker for varighet på spisslastene. En kan også registrere at hvis akkumulatoren skal kunne håndtere de største spisslastene vil volumet på akkumulatoren bli veldig stort. Ved gjennomsnittlig belastning og en varighet på 1 time er også størrelsen ganske stor. Det er ikke blitt

beregnet om det er tilstrekkelig med opplagringstid for å lade opp dampakkumulatoren. Alle disse størrelsene er tenkt som en akkumulator for hele anlegget, og ikke for enkelte forbrukere.

### 5.5.2 Leverandør

Det er blitt kontaktet to leverandører, Parat Halvorsen og Skåland Rør & Industrimontasje. Begge leverandørene leverer dampakkumulator med størrelsesorden 5 til 25m<sup>3</sup>. Det er ikke oppgitt noe produktblad ved noen av de nevnte leverandørene. Begge leverandørene beregner og tilpasser størrelsen på dampakkumulatoren til kundens behov. En ca. pris for dampakkumulatorene er 750 000 NOK. Ved FMC er muligens spisslastene for lange for å kunne ha en dampakkumulator. Begge leverandørene har sagt at det ikke er normalt med akkumulatører som er større en 25m<sup>3</sup>.

### 5.6 Effektiviserende tiltak (utnyttelse av røykgasstap/temperatur)

Effektiviserende tiltak vil ikke kunne føre til at kjelene vil levere mer damp, dermed vil ikke disse utbedringene kunne tilfredsstille problemstillingen. Disse tiltakene vil kun føre til brenselsbesparelser. Allikevel blir disse tiltakene belyst. Det er på grunn av en høy røykgasstemperatur ut fra kjel.

Ved full last vil røykgasstemperaturen ut fra kjel være på ca. 190 °C. Dette er mye varmeenergi som går til spille. Ved en bedre utnyttelse av røykgassen er det mulig å øke virkningsgraden på kjel å derav redusere gassforbruket. Røykgassen kan utnyttes for eksempel i en økonomiser til å forvarme matevann, og ved forvarming av luft i en luftforvarmer.

#### 5.6.1 Ekonomiser

Som nevnt i avsnitt 3.4 er økonomiser på anlegget ikke i bruk. Dersom denne hadde vært i drift vil denne kunne forvarmet matevannet med en varmemengde på 526 kW (se vedlegg B). Dersom det antas et tidspunkt med full belastning på kjel, 12 tonn/time, og en normal matevannstemperatur, 105 °C, vil temperaturendringen være følgende:

$$\Delta T = \frac{Q}{\dot{m} \cdot C_p} + T_1 \quad (6.4)$$

$$\Delta T = \frac{526kW}{\frac{12000kg/t}{3600s/t} \cdot 4,18kJ/kgK} \rightarrow \Delta T \approx 38^\circ C$$

Matevannet inn på kjel vil altså bli oppvarmet 38°C, som tilsvarer en ny temperatur 105°C + 38°C = 143°C.

En økonomiser vil føre til en omtrentlig tilsvarende reduksjon i varmemengde nødvendig fra brensel for å generere 12 tonn/time. Ekonomiser vil gi en følgende reduksjon i gassforbruk.



$$Q = \dot{m}_b \cdot H_{LHV} \quad (6.5)$$

$$\dot{m}_b = \frac{526 \text{ kW}}{46000 \text{ kJ/kg}} = 0,011435 \text{ kg/s}$$

$$\frac{0,011435 \text{ kg/s} \cdot 3600 \text{ s/t}}{0,804 \text{ kg/Sm}^3} = 51,2 \text{ Sm}^3/\text{t}$$

Fra avsnitt 4.2.3 er maksimalt forbruk på 964 Sm<sup>3</sup>/t. En reduksjon på 51,2 Sm<sup>3</sup>/t vil da føre til brenselbesparelse på omtrent 5%. I følge parameter utarbeidet fra avsnitt 4.2.2 vil dette føre til følgende økning i virkningsgrad.

$$x = \frac{y - 1888,9}{-11,116} \quad (6.6)$$

$$y = (960 - 51,2) \text{ Sm}^3/\text{t}$$

$$x = \frac{(960 - 51,2) \text{ Sm}^3/\text{t} - 1888,9 \text{ Sm}^3/\text{t}}{-11,116 \text{ Sm}^3/\text{t} \cdot \%} = 87,8\%$$

$$\text{Økning i virkningsgrad} = 87,8\% - 83,1\% = 4,7\%$$

Merk at denne brenselbesparelsen og virkningsgradsøkningen er et omtrentlig resultat basert på økonomiserens kapasitet som er oppgitt i datablad. Denne er igjen avhengig av øvrige data gitt fra leverandør, DP CleanTech. Effekten til økonomiser vil variere med temperatur på røykgassen, som i realiteten er lavere hos FMC enn det økonomiseren er designet for. Det er ikke mulig å estimere en helt korrekt brenselbesparelse ved bruk av økonomiser siden brukte verdier i utredning er resultat av antagelser. Men ifølge Norsk Energi vil en økonomiser på en gassfyrte kjel nedkjøle røykgassen til 100 °C og føre til brenselbesparelser på 4 - 6%. Noe som også beregnet besparelse tilsvarer.

Økonomiser kan også brukes til å forvarme råvann inn på matevannstank. En kan dermed spare matevannstanken for dampinjeksjon til oppvarming.

### 5.6.2 Luftforvarmer

På eksisterende kjelsystem kommer luften inn på brenner med omgivelsestemperatur. Forbrenningsluften vil dermed variere rundt 20 °C gjennom året. Som nevnt i avsnitt 3.4 vil overflødig luft oppta energi, og varme vil bli absorbert av luften istedenfor å bli nyttiggjort.

Luftforvarmere er vanligvis brukt i større kjelsystemer som for eksempel i sammenheng med en vannrørskjel for kraftproduksjon. Brennere brukt på røykrørskjeler vil muligens ikke håndtere en forvarmet forbrenningsluft, men prinsippet nevnes likevel da det kan være aktuelt for videre arbeid.

Ved å betrakte en produksjon- og forbrenningstilstand som gitt i avsnitt 4.2.3 kan en estimere en brenselbesparelse ved luftforvarming. Fra forbrenningsrapporten ble det oppgitt at lufttemperatur inn på brenner var 23,2°C og at røykgassen ut var 190°C. Luftmengden ble registrert til å være 10,86 kg luft/kg brensel. Med en brenselmengde på 964 Sm<sup>3</sup>/t tilsvarer dette 2,3 kg/s mengde luft. Dersom for eksempel økes til 100°C, så vil dette føre til følgende brensel besparelser.

$$Q = 1,2 \text{ kg/s} \cdot 1,1 \text{ kJ/kgK} \cdot (190,5 - 23,2)K = 423 \text{ kW}$$

$$Q = 1,2 \text{ kg/s} \cdot 1,1 \text{ kJ/kgK} \cdot (190,5 - 100)K = 229 \text{ kW}$$

$$\dot{m}_b = \frac{423 - 229 \text{ kW}}{46000 \text{ kJ/kg}} = 0,004217 \text{ kg/s}$$

$$\frac{0,004217 \text{ kg/s} \cdot 3600 \text{ s/t}}{0,804 \text{ kg/Sm}^3} = 18,9 \text{ Sm}^3/\text{t}$$

Dette vil føre til brenselbesparelser på 2%, og som igjen vil føre til en 2% økning i kjelvirkningsgrad.

## 6 Diskusjon

### 6.1 Vurdering av løsning

I dette avsnittet vil løsningene som er presentert i kapittel 5 bli vurdert. Vurderingen er basert på resultater fra analysen. For enkelhetens skyld vil det bli gått igjennom hver og en løsning der det blir diskutert fordeler og ulemper, etterfulgt av en deloppsummering som sammenligner løsningene.

#### 6.1.1 Utskifting av eksisterende kjeler

Ved å investere i to nye kjeler med større kapasitet kan en tilfredsstillende energibehovet til fabrikkens. Med nye og effektive kjeler med en kapasitet på 16 tonn/time, vil en kunne håndtere dampbehovet med kun én kjel på nett dersom fabrikkens maksimale dampforbruk er 15,5 tonn/time. En ny og effektiv kjel vil alene også kunne håndtere variasjoner i dampbehov og korte spisslaster over kjelens kapasitet. Ved å investere i nye kjeler kan det som vist oppnås brenselsbesparelser på ca. 7,7% per kjel.

Denne løsningen vil være mest omfattende og kreve store kostnader. Utskiftingen av to nye kjeler vil også kunne medføre produksjonsstopp over en lengre periode.

#### 6.1.2 Investering i én ny røykrørskjel

En mye rimeligere utbedring kan være å installere en mindre røykrørskjel, 5 tonn/time. Dette kan være en mer aktuell løsning, siden eksisterende kjeler nødvendigvis ikke må erstattes. Ved å tilføre en ekstra kjel til anlegget vil være et betraktelig mindre omfattende enn å utskifte de eksisterende kjelene. Installasjonen kan også utføres uten noe særlig konsekvenser for produksjonen.

#### 6.1.3 Dampgenerator

En installasjon av dampgenerator vil fungere relativt likt som i løsningen ovenfor. Denne vil også bli tilført anlegget som en tredje kjel som avhjelper en av hovedkjelene. En dampgenerator vil til forskjell for en røykrørskjel ikke være på nett hele tiden. Dampgeneratoren vil i prinsippet fungere som en reserveenhet for dampproduksjon ved avkobling av en av hovedkjelene. Ved avkobling av en av hovedkjelene vil dampgeneratoren raskt kunne fyres opp og levere damp til nettet.

I motsetning til en røykrørskjel er dampgeneratoren en vannrørskjel. En vannrørskjel leverer ikke samme dampkvalitet som en røykrørskjel. Vannrørskjelen har en tendens til å levere fuktig damp, mens de fleste røykrørskjeler garanterer damptørhet på over 99%. Dette kan dermed være et problem for anlegget dersom det ved noen forbrukere eller dampsystem er krav til tørrmettet damp. Dampgenerator fra Skåland Rør og Industrimontasje har en maksimal kapasitet på 5 tonn/time. I dette kapasitetsområdet er dimensjonen på en dampgenerator stor.

#### 6.1.4 Dampakkumulator

Moderne kjeler har med tiden blitt utviklet for å takle raske svingninger i dampbehov. Dette har ført til at dampakkumulatoren ikke er så aktuelt den dag i dag. Ved FMC kan en dampakkumulator derimot være en mulig løsning. Dampakkumulatoren vil fungere som en buffertank og frigjøre damp ved eventuelle spisslaster over kjelens kapasitet. Det vil dermed være mulig å kun ha en av hovedkjelene på nett.

Ulempen med dampakkumulatoren er at den har en begrenset leveringsperiode og krav til oppladning. Dersom varigheten og hyppigheten på spisslastene er for lange og inntreffer for ofte i forhold til oppladningsperioden, vil ikke dampakkumulatoren være tilstrekkelig for å avhjelpe en kjel.

Ved beregning av dampakkumulatorstørrelse ble det registrert at en mulig dampakkumulator kan bli for stor. Minste dampakkumulatorstørrelse var 40 m<sup>3</sup>. Leverandører som er blitt kontaktet leverer normalt ikke akkumulatorene i denne størrelsen.

En dampakkumulator kan også være et alternativ som energikilde til en eller flere forbrukere. Dersom noen forbrukere kun trenger damp i intervaller, kan en dampakkumulator være aktuelt. Men en slik løsning kan ikke med sikkerhet bevise at en av hovedkjelene kan bli tatt av nett for vedlikehold. Kneater H1, steamkrue H1 og steamkrue H2 er aktuelle forbrukere som kan ha en buffertank som leverer damp.

### 6.1.5 Effektivisering

Løsninger til effektivisering av kjelsystemet vil ikke kunne bidra til økning i dampproduksjon. Løsningene er tenkt til å være mulige utbedringer av eksisterende kjelsystem som kan redusere brenselkostnadene til fabrikk. Her er det stort forbedringspotensial i røykgasstapet. Per dags dato er det ingen utnyttelse av varmeenergien i røykgassen.

En økonomiser er et bra tiltak for å utnytte røykgassen, og er en essensiell del av alle moderne kjeler. Denne kan forvarme både råvann inn på matevannstank og matevann inn på kjel. Eksisterende økonomiser på anlegget kan føre til brenselbesparelser og virkningsgradsøkning på 5%. Det er dermed høyst aktuelt for FMC at denne repareres og settes i drift igjen. Ved å forvarme råvann inn på matevannstank, vil dette også føre til mindre behov av damp for oppvarming av vann i matevannstank.

En luftforvarmer kan også installeres for å utnytte røykgassen. Ved å øke inngående forbrenningsluft med 100°C kan en oppnå brenselbesparelser og en økning i virkningsgrad på ca. 2%. Dette prinsippet er vanligvis ikke brukt ved fyringsinnretninger til røykrørskjeler, men er alltid i bruk i større kjelsystemer som for eksempel i sammenheng med vannrørskjeler for kraftproduksjon. Weishaupt brennerene på FMC vil muligens ikke håndtere forvarmet forbrenningsluft. Konseptet velges likevel å belyses på grunn av utnyttelsesmulighetene i den høye røykgasstemperaturen.

### 6.1.6 Deloppsummering

Den mest hensiktsmessige utbedringen vil både være en løsning på problemstillingen samtidig som at den ikke er for omfattende i installasjon og kostnader. Basert på analyse og antagelser av dampforbruk og kjeltilstand vil den mest egnede løsningen være å tilføre en tredje kjel til eksisterende kjelsystem. En utskifting av eksisterende kjeler vil være unødvendig arbeid og kostnader da kjelene er velfungerende og opererer med en relativt normal virkningsgrad. En tredje kjel, enten røykrør- eller vannrørskjel, med et kapasitetsområde rundt 5 tonn/time vil være tilstrekkelig for dagens energibehov.

Som nevnt vil ikke effektiviserende tiltak kunne bidra til økt dampproduksjon og dermed ikke tilfredsstille problemstillingen. Det er allikevel veldig aktuelt å øke

virkningsgraden på dagens kjeler. Det største og enkleste utbedringspotensialet for en virkningsgradsøkning er de allerede installerte økonomiserne som er ute av drift. Luftforvarming kan også være en interessant metode for å øke virkningsgraden.

## 6.2 Vurdering av analysen

### 6.2.1 Kjelanalyse

I kjelanalysen ble det estimert en felles kjelvirkningsgrad, samt en naturgasstilførsel for én kjel ved full last, altså 12 tonn/time. Hensikten med dette var å kunne få en oversikt over i hvor stor grad det er nødvendig med to kjeler i drift.

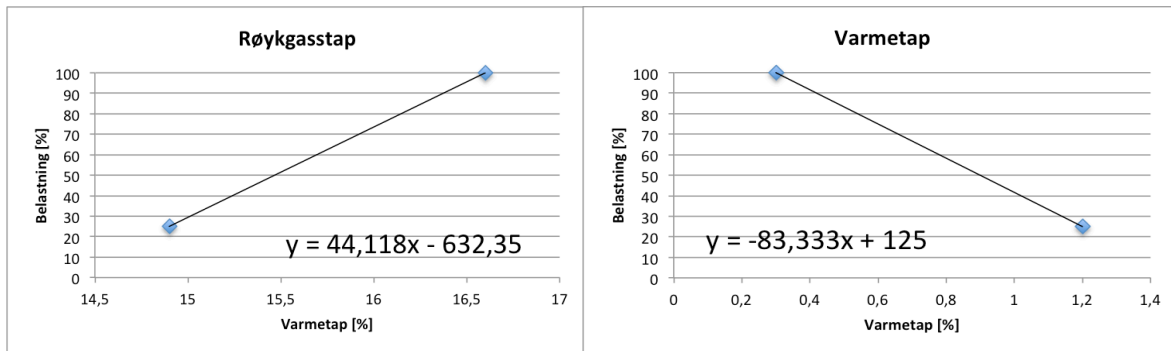
Virkningsgraden er beregnet fra indirekte metode som baserer seg på varme- og røykgasstap. For å utføre denne metoden ble det hentet informasjon om røykgasstemperatur og luftoverskudd ved forbrenning fra en forbrenningsrapport fra 2012. Disse verdiene er nøyaktig målt og antas dermed at tilsvarende verdier gjelder for kjelene den dag i dag. På grunn av bruk av reelle tall kan det forventes at en estimert virkningsgrad på 83,1% er en troverdig antagelse. Det er kun utført forbrenningsrapport på kjel 2. Det er antatt at verdier fra forbrenningsrapporten også gjelder for kjel 1. Disse verdiene kan være annerledes for kjel 1, men for å kunne komme frem til en virkningsgrad antas det dermed at den estimerte virkningsgraden gjelder for begge kjelene.

I etterkant ble det lagt merke til at brukt modell for beregning av varmetap gjelder for kjeler med mye lavere kapasitet enn FMCs kjeler. Varmetapet kan være litt annerledes. Uansett vil ikke varmetapet variere noe særlig. I følge Norsk Energi ligger varmetapet på 0,5 – 1,5% av maksimal effekt [6]. Estimert varmetap antas dermed å være ikke så langt unna realiteten.

Beregnet naturgasstilførselen ved full last er basert på den estimerte virkningsgraden, entalpi i vann/damp og en dampproduksjon på 12 tonn/time. De usikre faktorene i beregningsmodellen er massestrømmen til dampen, og entalpien i vannet inn og dampen ut. Dette er ikke målte verdier. Ut i fra kjelens produktkatalog er det antatt at maks kapasitet på 12 tonn/time stemmer. Entalpien i damp og vann er antatt ut i fra at dampen ut av kjel er tørrmettet på 11 bar og matevannet inn på kjel er 105°C og 11 bar. Disse verdiene kan variere, som for eksempel at dampen ut ikke er helt tørr eller at matevannet inn på kjel har en høyere temperatur. Disse variasjonene er likevel så små at de ikke vil utgjøre store utslag. Resterende faktorer i beregningsmodellen som luftoverskudd, omgivelse- og røykgasstemperatur og brennverdi anses som nøyaktige på grunn av forbrenningsrapporten. En naturgasstilførsel på 964 Sm<sup>3</sup>/t ved full last på én kjel og en virkningsgrad på 83,1% betraktes dermed som en troverdig verdi. I tillegg vil en ny kjel med virkningsgrad på ca. 90% kunne produsere 12 tonn/time med en gasstilførsel på 890 Sm<sup>3</sup>/t. Det er naturlig at eldre kjeler er mindre effektive og vil kreve mer gassforbruk enn en ny kjel. Dette gir god argumentasjon for at kjelene ved FMC bruker 964 Sm<sup>3</sup>/t ved maksimalt pådrag.

Beregningsmodellen som ble brukt i analysen av naturgassforbruket var basert på verdier for full belastning på kjel. I realiteten vil ikke denne beregningsmodellen gjelde

for alle belastninger. Allikevel vil ikke forskjellen mellom beregningsmodellen og en modell som gjelder for alle laster være noe særlig i forskjellig.



Figur 18: Røykgas tap

Figur 19: Varmetap

Fra forbrenningsrapport var det oppgitt nødvendig informasjonen for å estimere kjelvirkningsgraden, Tabell 3. For å estimere virkningsgraden på begge kjelene ble det brukt data for full belastning, 12 tonn/time. Ved å ta hensyn til virkningsgraden ved lav last kan en lage diagrammer som illustrerer virkningsgraden ved alle laster. I Figur 18 og Figur 19 er det illustrert varmetap og røykgas tap ved alle belastninger på kjel. Fra Figur 19 kan en se at varmetap synker ved økning av belastning. Fra Figur 18 kan en se at røykgas tapet stiger med belastningen. Forholdet mellom disse er relativt jevnt. I Tabell 15 kan en se at virkningsgraden ikke varierer mer enn med 1% fra lav til full last.

Belastning [%]	Virkningsgrad [%]	Varmetap [%]	Røykgas tap [%]	Luftoverskudd [%]	Røyk.Temp [°C]
10	84,1	1,4	14,6	37	131
15	84,0	1,3	14,7	36	134
20	84,0	1,3	14,8	34	137
25	83,9	1,2	14,9	33	141
30	83,8	1,1	15,0	32	144
35	83,8	1,1	15,1	30	147
40	83,7	1,0	15,2	29	150
45	83,7	1,0	15,4	28	154
50	83,6	0,9	15,5	27	157
55	83,6	0,8	15,6	25	160
60	83,5	0,8	15,7	24	164
65	83,5	0,7	15,8	23	167
70	83,4	0,7	15,9	22	170
75	83,4	0,6	16,0	20	173
80	83,3	0,5	16,1	19	177
85	83,3	0,5	16,3	18	180
90	83,2	0,4	16,4	17	183
95	83,2	0,4	16,5	15	187
100	83,1	0,3	16,6	14	190

Tabell 15: Virkningsgradsfordeling ved alle laster

Ved bruk av ligning 4.18 kan en estimere hva som er naturgasstilførselen ved alle belastninger. De eneste konstantene i ligningen 4.18 denne gangen er entalpien til damp, entalpien til vann, omgivelsestemperatur og nedrebrennverdi. Tabell 16 nedenfor illustrere forholdet mellom damp og naturgasstilførsel.

Belastning [%]	Damp [kg/t]	Naturgass [Sm <sup>3</sup> /t]
10	1200	94
15	1800	141
20	2400	188
25	3000	236
30	3600	284
35	4200	332
40	4800	380
45	5400	423
50	6000	476
55	6600	524
60	7200	573
65	7800	621
70	8400	670
75	9000	718
80	9600	768
85	10200	816
90	10800	866
95	11400	915
100	12000	964

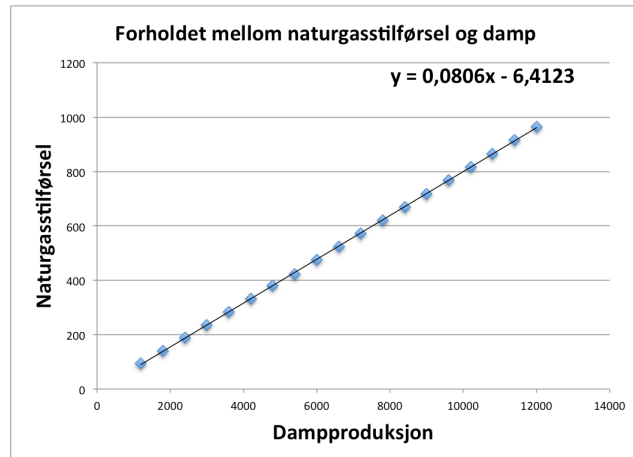
Tabell 16: Naturgasstilførsel ved alle belastninger

Figur 20 illustrer også forholdet mellom damp og naturgasstilførsel. Dersom en sammenligner stigningstallet i Figur 20 med stigningstallet i beregningsmodellen 4.19, ser en at tallene er ganske like. I analysen ble beregningsmodellen brukt som modell for å estimere forholdet mellom naturgass og damp. Verdier som ble estimert var gjennomsnittlig belastning, full belastning, gjennomsnittlig spisslast og maksimal spisslast. I Tabell 17 blir modellene sammenlignet. Verdiene er omtrentlige verdier. Fra tabellen kan det registreres at verdiene er like unntatt for gjennomsnittlig belastning. Ved bruk av ny modell blir gjennomsnittlig belastning litt høyere.

Hensikten med dette avsnittet var å bevise at beregningsmodellen som ble brukt for å analysere naturgassforbruket var et tilfredsstillende verktøy. Selv om det var antatt samme virkningsgrad, luftoverskudd og røykgasstemperatur for alle belastninger ga beregningsmodell et godt forhold mellom naturgasstilførsel og damp ved alle belastninger.

Naturgass [Sm <sup>3</sup> /t]	Ligning 4.19 [kg/t]	Ny modell [kg/t]
524	6300	6600
965	12000	12000
1100	13700	13700
1242	15500	15500

Tabell 17: Sammenligning av beregningsmodeller



Figur 20: Forhold mellom naturgass og damp

### 6.2.2 Naturgassforbruk

For å kartlegge dampforbruket og energiproblemet til FMC er den estimerte naturgasstilførselen ved full last koblet opp mot en trending av naturgassforbruket fra januar 2015 til februar 2016. Denne metoden er utført på grunn av ingen tilgjengelig data over dampmengde ut fra kjelene. Ved bruk av estimert naturgasstilførsel ved full belastning viser oversikten at det ikke var det gjennomsnittlige forbruket som har forårsaket bruken av to kjeler. Det ble vist at spisslaster over kjelens kapasitet er årsaken til denne bruken. Ved å sammenligne maksimal naturgasstilførsel for en kjel med gassforbruket, var det mulig å vurdere hvor mye og hvor ofte dampproduksjonen var over kjelens kapasitet.

Dette resultatet kan derimot ikke anvendes for noen av de enkelte uttenkte løsningene for problemstillingen i oppgaven. Det målte naturgassforbruket gir ingen kontinuerlig måling, men registrerer kun naturgassforbruket time for time. Dermed er det ikke mulig å avgjøre varighet og hyppighet på spisslastene. En løsning som for eksempel en dampakkumulator kan dermed være uvurderlig på grunn av at det ikke kan utføres en grundig vurdering av oppladningsmuligheter og frigjøringsbehov.

På grunn av en påstand fra driftspersonell på FMC om hva som var naturgasstilførselen ved full belastning på kjel, ble det også gitt en oversikt over hvor stor nødvendigheten av 2 kjeler har vært ved dette tilfellet. Nødvendigheten med bruk av to kjeler var betraktelig mye større dersom maksimal gasstilførsel er 700 Sm<sup>3</sup>/t og 650 Sm<sup>3</sup>/t. Hvis denne påstanden faktisk stemmer så vil ikke kjelene ha en kapasitet på 12 tonn/time. Kapasiteten til kjelene vil da være mindre, 8,5 og 7,8 tonn/time. Dette er vesentlig mye mindre kapasitet enn hva kjelene er installert for. På grunn av mangel på mengdemålere ut fra kjel har ikke dette kunnet blitt klargjort.



### 6.2.3 Dampforbruk

Hensikten med beregningen av dampforbruket ved ønskelig produksjon var for å undersøke om denne typen produksjon kan håndteres av én kjel i drift. En annen bakgrunn for denne beregningen var også for å kunne gi en oversikt over energifordelingen til forbrukerne. Det var da ønskelig å finne ut hvilke forbrukere som har det største dampbehovet.

Fra resultatet av beregningene ble det vist at én kjel vil ha stor nok kapasitet for å kunne håndtere samlet energibehov for alle forbrukerne på egenhånd. Blanding H1, blanding H2 og steamskruer H2 står for 64% av det totale dampbehovet ved denne type produksjon. Disse forbrukerne kan tenkes å være opphavet til spisslastene. Skulle det inntreffe en belastningsøkning på alle tre forbrukere samtidig, vil dette kunne føre til overbelastning for en kjel.

Det er en mulig feilkilde i beregning ved blanding H1, kokeri H1, blanding H2, syrevask H2 og fikseringstank H2. Alle disse forbrukerne er steamveksler. Ved beregning av damp-/energibehov er det tatt utgangspunkt i at dampen kun avgir en varmemengde til dampen er kondensert. Det er ikke tatt hensyn til om kondensert damp overfører varme under varmevekslingen. Hvis den kondenserte dampen avkjøles videre så ville estimert mengde damp ved steamveksler være feil. Dampbehovet ved disse forbrukerne vil da være mindre. Det er blitt antatt at energiinnholdet i kondensat som forlater en varmeveksler er 781 kJ/kg. Dersom kondensert damp hadde avgitt varme til den var avkjølt til f.eks. 100°C ville energiinnholdet som forlater varmeveksler vært ca. 400 kJ/kg. Dette betyr at det ville kreve en mindre mengde damp for å varme opp vannet til den bestemte temperaturen. I følge vedlikeholdsplanlegger ved FMC, Atle Holden, er kondensattemperaturen ca. 95°C direkte etter kondenspottene. Dersom dampen kjøles ned til denne temperaturen i varmevekslerprosessen, vil forbrukeren kreve mindre damp enn beregnet i analysen. Tabell nedenfor illustrerer forskjellen i fabrikkens dampbehov (kg/time) med og uten kondensatkjøling i steamvekslere.

	Uten kondensatkjøling (781 kJ/kg) [kg/time]	Med kondensatkjøling (400 kJ/kg) [kg/time]
Blanding H1	1980	1663
Kokeri H1	126	105
Syrevask H2	360	302
Fikseringstank H2	140	121
Blanding H2	1948	1632
Steamskruer H1	756	756
Kneater H1	792	792
Alginattørking H2	275	275
Alginsyretørke H2	647	647
Steamskruer H2	1361	1361
<b>Totalt</b>	<b>8385</b>	<b>7654</b>

Tabell 18: Sammenligning mellom med og uten kondensatkjøling

Dette utgjør ikke en betraktelig forskjell på den først beregnede verdien (uten kondensatkjøling). I tillegg så er det ikke tatt hensyn til tap til omgivelsene ved beregning «med kondensatkjøling». Det vil alltid være noen tap i disse prosessene, slik at en kan med god sikkerhet anta at det totale dampbehovet i fra forbrukerne ligger mellom 8385 og 7654 kg/time ved ønskelig produksjon.

#### 6.2.4 Deloppsummering

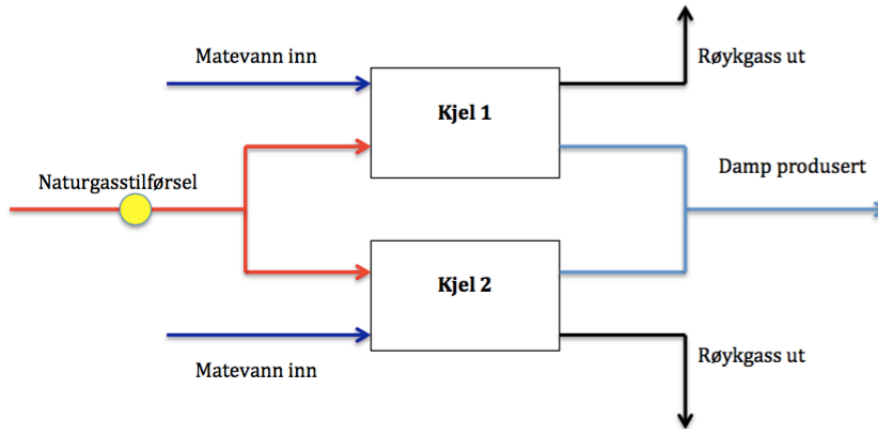
Estimert virkningsgrad og beregnet naturgassstilførsel ved full last anses som troverdige verdier. Analysen har gitt en god oversikt over hvorfor det har vært nødvendig med to kjeler i drift. Analysen gir også et godt bilde på hvor damp blir brukt og hvor mye som trengs ved hver forbruker.

Svakheten i analysen er at den ikke gir svar på hvor mye damp som blir produsert på anlegget. Dette er som følge av mangel på mengdemålere ut av kjelene. Det er heller ikke tilstrekkelig med mengdemålere på dampforbrukerne, slik at det dermed ikke er mulig med direkte avlesing av hvor mye damp som nyttiggjøres i produksjonen. Som følger av dette er det ikke mulig å trekke noen klare konklusjoner på hvilke løsninger som er mest aktuelle og hvilke dimensjon en ny løsning bør ha.

Det målte naturgassforbruket gir ingen kontinuerlig måling, men registrerer kun naturgassforbruket time for time. Dermed er det ikke mulig å avgjøre varighet og hyppighet på spisslastene som er nevnt grunnen til bruk av to kjeler. Som følger av dette kunne det ikke bli gjort en grundig vurdering om en dampakkumulator hadde vært en gunstig løsning på problemstillingen. Basert på resultater i fra analysen vil ikke en dampakkumulator være et alternativ for å kunne ta én kjel av nett.

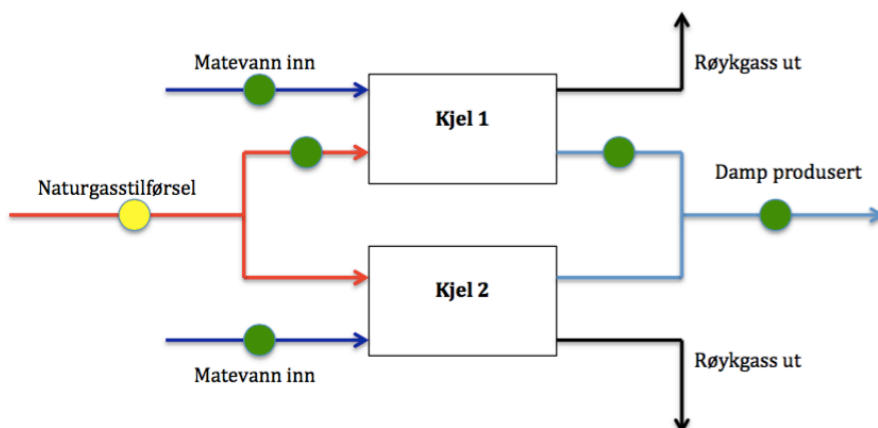
### 6.3 Hvilke tiltak bør gjøres for få en bedre oversikt?

Som nevnt er det ingen mengdemålere på damp ut av kjel. Det er heller ingen mengdemålere på hver enkelt brenselstrøm. Figur 21 illustrerer dagens mengdemålere rundt kjelsystemet. Her er det kun én mengdemåler (gul) på den totale naturgasstilførselen til kjelene. Denne gir kun måling time for time.



Figur 21: Eksisterende målesystem

For å kunne utføre en nøyaktig analyse over energibehovet og damp- og naturgassforbruk på FMC, samt evaluere effektiviteten til kjelene anbefales det en mer nøyaktig måling av naturgasstilførselen inn på hver kjel og dampproduksjonen ut av hver kjel. Figur 22 under viser et forslag til hvordan mengdemålerne kan installeres for at denne informasjonen kan innhentes. Grønn farge representerer ny mengdemåler. Disse må også kunne gi en mer nøyaktig måling enn den eksisterende. Det er kun nødvendig med naturgassmåling på det totale og inn på den ene av kjelene, som for eksempel mengdemåling inn på kjel 1. Ved å bruke differansen mellom disse kan en fastslå naturgassmengden inn på kjel 2. Det samme vil gjelde for dampproduksjon ut av kjelene. Ved måling av damp ut av kjel 1 og måling av den totale dampproduksjonen vil en kunne anslå damp ut av kjel 2. Det er også anbefalt å installere mengdemålere på vann inn på hver av kjelene. Dette vil være et kontrollelement og kan for eksempel brukes til å registrere mengden som går tapt som følge av bunnavlåsing.



Figur 22: Anbefalt målesystem

Med denne informasjonen vil en vite korrekt dampproduksjon og tilhørende naturgasstilførselen i samme periode. Dermed er det mulig å beregne en helt eksakt virkningsgrad med hjelp av direkte metode. En vil kunne fastslå virkningsgraden til både kjel 1, kjel 2 og en samlet for begge kjelene.

Det anbefales også i neste fase å installere mengdemålere av dampstrømmene ved hver dampforbruker. Dette vil gjør det mulig å anslå en virkningsgrad på hele kjelanlegget. Ved å ha rede på hvor mye damp som brukes ved hver forbruker, samtidig som at den totale dampproduksjonen er kjent, kan en finne ut hvor mye tap det er i transportvei fra kjel til forbruker. Disse tapene kan være tap i fra lekkasjer, dårlig isolasjon og lignende. Ved å kunne vite tapsmengden, kan en vurdere anleggsvirkningsgraden og bedømme kvaliteten til dampsystemet. Tabell 19 nedenfor illustrerer hvor det er mangel på mengdemålere.

Forbruker	Mengdemåler	Ingen mengdemåler
Blanding H1		x
Kokeri H1		x
Kneater H1		x
Steamskrue H1	x	
Fikseringstank H2		x
Syrevask H2		x
Alginattørking H2	x	
Alginsyretørke H2	x	
Kneater H2		x
Blanding H2		x
Steamskrue H2	x	
	4	7

Tabell 19: Oversikt over mengdemålere

## 7 Avslutning

### 7.1 Konklusjon

I denne oppgaven er det utført en kartleggelse over gass- og dampforbruket til FMC. Det er blitt undersøkt ulike løsninger og tiltak som kan forbedre kjelanlegget i en så stor grad at kjelanlegget er tilstrekkelig for en stabil drift av fabrikk. Basert på resultater fra analyse av dampforbruk og kjeltilstand vil den mest egnede løsningen være å tilføre en mindre tredje kjel. En tredje kjel, enten en røykrør- eller dampgenerator (vannrørskjel), med et kapasitetsområde rundt 5 tonn/time vil være tilstrekkelig for dagens energibehov.

En mindre røykrørskjel er tenkt til å avlaste en av hovedkjelene. Dermed kan én hovedkjel alltid være tilgjengelig for vedlikehold, tilstandskontroll og små reparasjoner. Dette kan også være en langsiktig løsning dersom fabrikk utvikler et større energibehov, siden røykrørskjeler kan levere kapasitetsområder utover 5 tonn/time uten at kjelen blir for stor i dimensjon.

En dampgenerator (mindre vannrørskjel) har rask oppfyringstid, og kan dermed brukes som en reserve for de to kjelene som er i drift. Dersom det må utføres planlagt eller uforutsett vedlikehold på en av hovedkjelene, kan dampgeneratoren raskt fyres opp og levere damp til nettet. En dampgenerator fra Skåland Rør og Industrimontasje kan derimot være begrensende i fremtiden, siden de ikke leverer dampgeneratorer med kapasiteter over 5 tonn/time.

Som et effektiviserende tiltak av eksisterende kjeler anbefales det å reparere de allerede installerte økonomiserne. Disse har et potensiale til å øke virkningsgraden og redusere brenselkostnader med 5%.

Det har ikke vært mulig å utføre en så nøyaktig analyse over anlegget som ønskelig. Begrenset måling av naturgass- og dampforbruk har ført til at analysen består av flere antagelser. Det har dermed ikke vært mulig å gå noe særlig på dybden på alle de aktuelle løsningene som er blitt vurdert i oppgaven. For kunne gi en bedre vurdering bør det installeres mengdemålere på naturgasstilførsel og dampproduksjon for hver kjel. En vil da få en optimal oversikt over hva som er energibehovet til fabrikk og en vil få en nøyaktig virkningsgrad for hver kjel.

## 7.2 Videre arbeid

Hovedprioriteten til FMC bør være å utbedre målingssystemet rundt kjelene. Det vil være svært gunstig for fabrikkens at naturgasstrømmen inn på hver kjele og dampstrømmene ut er kjent. Dette vil gi en god og nøyaktig oversikt over dampforbruket.

Som en anbefaling til videre arbeid kan det være aktuelt å redegjøre for omfanget av energitap i dampsystemet. Ved å installere mengdemålere ved hver forbruker og sammenligne disse verdiene med dampproduksjonen, er det mulig å estimere hvor mye energi som går tapt i fra kjele til forbruker. Dette kan gi indikasjoner på utbedringsmulighet i dampsystemet. Utbedringer i dampsystemet kan være å stoppe lekkasjer, forbedre isolasjon av rør og tanker og optimalisering av kondensatgjenvinning.

I rapporten ble luftforvarmer belyst som et mulig tiltak for å øke virkningsgraden til dagens kjeler. For å begrense omfanget av oppgaven ble ikke dette nærmere undersøkt. Det anbefales at FMC ser nærmere på om dette kan være et gunstig tiltak.

Det kan også være aktuelt å se nærmere på om en dampakkumulator kan bli brukt ved forbrukere som varierer i dampbehov. En forbruker som kan være aktuell for en slik løsning kan være kneater på produksjonslinje H1. En dampakkumulator vil muligens ikke kunne håndtere fabrikkens totale svingninger i dampbehov, men vil antagelig håndtere mindre svingninger forårsaket av en enkel forbruker.

Et annet interessant tiltak kan være å utnytte varmeenergien i fra røykgassen til bruk i en prosess. En nærmere undersøkelse på om røykgassen kan brukes til å varme opp luft, som igjen kan bli brukt ved noen bestemte forbrukere. Kneater på produksjonslinje H1 er en mulig forbruker som kan utnytte en slik metode for oppvarming av alginsyreløsningen.

Det anbefales også at det undersøkes forbedringspotensial rundt matevannssystemet. Mangelfull vannbehandling er økonomisk uforvarlig, idet så vel fyringsutgifter som kostnader til kjemisk rengjøring og reparasjoner blir større. Ved å gjennomføre en tilfredsstillende vannbehandling, forlenges levetiden på utstyret og driftssikkerheten blir bedre. God vannbehandling kan også føre til reduksjon av tap i form av mindre nødvendighet for bunnavlasing.

Det kan i neste fase ses nærmere på hvilket kjøringsmønster som vil være mest optimalt for dagens kjeler. Det er ikke blitt sett nærmere på dette i oppgaven på grunn av mangel på informasjon om kjele 1. Det ble antatt en felles kjelvirkningsgrad for kjelene. På bakgrunn av dette var det ikke mulig å gi en anbefaling til kjøringsmønstrene til kjelene.

## Bibliografi

- [1] FMC Corporation, «Om FMC,» 2013. [Internett]. Available: [http://www.stortare.no/?page\\_id=293](http://www.stortare.no/?page_id=293). [Funnet 20 April 2016].
- [2] S. Skogestad, Prosessteknikk, Masse- og energibalanser, Bergen: Fagbokforlaget, 2009.
- [3] Y. M. G.F.C Rogers, Thermodynamic and Transport Properties of Fluids, Blackwell Publishing Ltd, 1995.
- [4] Spirax Sarco, «What is steam?,» 2016. [Internett]. Available: <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/what-is-steam.aspx>. [Funnet 15 Februar 2016].
- [5] Spirax Sarco, «The Steam And Condensate Loop,» 2016. [Internett]. Available: <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/introduction/the-steam-and-condensate-loop.aspx>.
- [6] Norsk Energi, Operatørkurs 725, Norsk Energi, 2015.
- [7] Gasnor AS, «Typiske data naturgass,» [Internett]. Available: <http://gasnor.no/naturgass/typiske-data-naturgass/>. [Funnet 20 April 2016].
- [8] NTNU Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi, «Laboppgaver,» 23 September 2004. [Internett]. Available: <http://www.ivt.ntnu.no/ept/fag/tep4120/innhold/Laboppgaver/Forbrenning%20Energianalyse.pdf>. [Funnet 15 April 2016].
- [9] A. Bhatia, «Course M166,» 2012. [Internett]. Available: <http://www.pdhcenter.com/courses/m166/m166content.pdf>. [Funnet 15 Februar 2016].
- [10] Spirax Sarco, «Condensate Recovery,» 2016. [Internett]. Available: <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/condensate-recovery/introduction-to-condensate-recovery.aspx>. [Funnet 15 Mars 2016].
- [11] Cleaver Brooks, «Boiler Efficiency Guide,» 10 Mars 2010. [Internett]. Available: <http://www.cleaver-brooks.com/Reference-Center/Insights/Boiler-Efficiency-Guide.aspx>. [Funnet Februar 2016].
- [12] Statoil, «Internpris for naturgass,» 8 April 2016. [Internett]. Available: <http://www.statoil.com/no/InvestorCentre/AnalyticalInformation/InternalGasPrice/Pages/default.aspx>. [Funnet 20 April 2016].
- [13] Spriax Sarco, Thermsave Engineering, «Steam Accumulators,» 2016. [Internett]. Available: <http://www.spiraxsarco.com/Resources/Pages/Steam-Engineering-Tutorials/the-boiler-house/steam-accumulators.aspx>. [Funnet 12 Februar 2016].

## Vedleggsliste

Vedlegg A: Forbrenningsrapport kjel 2

Vedlegg B: Teknisk data for økonomiser ved FMC

Vedlegg C: Tabeller for estimering av virkningsgrad

Vedlegg D: Forholdet mellom brensel og damp for én ny kjel

Vedlegg E: Beregninger av dampbehov ved ønskelig produksjon

Vedlegg F: Detaljerte datablad for kjeler presentert i løsninger







# Vedlegg B

## Teknisk data for økonomiser ved FMC

Dette vedlegget inneholder teknisk informasjon om økonomiser som er installert på FMC.

**Date: 26.09.2012**

Flue gas = Natural gas			
Type		ECO	COOLER
Element Pos.		A+B	C
Dew Point	°C	56,9	56,9
Amount of flue gas	kg/h	11.261	11.261
Flue gas temperature in	°C	280	132
Flue gas temperature out	°C	132	53,8
Pressure drop	mbar	230	390
Performance	kW	<b>526</b>	<b>412</b>
Performance total	kW	<b>938</b>	
Amount of Condensate	kg/h	0	202
Amount of water	kg/h	11.800	7.000
Water temperature in	°C	100	8
Water temperature out	°C	138	59
Pressure drop	mbar	280	390
Design pressure	Bar g	20	10
Max.Working temperature	°C	215	184
Dimension water nozzle		DN 80 / PN 40	DN 40 / PN 40
Face height of element	mm	1500	1500
Face wide of element	mm	1320	1320
Amount of elements	pc	2	1
Water content of each element	l	59	59

# Vedlegg C

## Tabeller for estimering av virkningsgrad

Tabell 2 illustrerer røykgasstapet og tabell 1 illustrerer varmetapet.

### STACK LOSS - % - NATURAL GAS

% CO <sub>2</sub>	DIFFERENCE BETWEEN FLUE GAS AND ROOM TEMPERATURES IN DEGREES FAHRENHEIT																																			
	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700	750	800	850	900	950	1000				
3.0	23.1	24.4	25.9	27.2	28.6	30.0	31.3	32.8	34.1	35.8	36.9	38.2	39.8	41.0	42.2	43.8	45.0	46.3	47.8	49.0	50.0															
3.5	21.2	22.5	23.8	24.9	26.1	27.2	28.4	29.6	30.9	32.0	33.2	34.4	35.8	36.8	37.9	39.2	40.3	41.6	42.8	43.8	45.0	46.2	47.7	48.3	49.8											
4.0	19.9	20.9	22.0	23.1	24.1	25.1	26.2	27.2	28.3	29.4	30.4	31.8	32.5	33.8	34.8	35.8	36.8	37.8	38.8	39.9	40.9	42.1	43.0	44.1	45.2	46.2	48.8									
4.5	18.9	19.9	20.9	21.8	22.7	23.6	24.5	25.5	26.4	27.3	28.3	29.2	30.2	31.2	32.2	33.0	34.0	34.9	35.9	36.8	37.8	38.6	39.8	40.4	41.5	42.6	44.8	47.2	49.8							
5.0	18.0	18.9	19.8	20.6	21.4	22.2	23.1	24.0	24.9	25.8	26.8	27.5	28.3	29.1	30.1	30.9	31.8	32.5	33.6	34.3	35.7	36.2	36.9	37.8	38.8	39.7	41.8	43.8	46.0	48.2						
5.5	17.4	18.1	18.9	19.8	20.5	21.2	22.1	22.9	23.8	24.5	25.2	26.2	26.9	27.8	28.5	29.2	30.0	30.8	31.8	32.3	33.2	34.1	34.9	35.8	36.3	37.3	39.2	41.0	43.0	45.3	47.2	49.0				
6.0	16.8	17.4	18.2	18.9	19.6	20.4	21.1	21.8	22.7	23.3	24.1	24.9	25.5	26.2	27.0	27.8	28.4	29.2	30.0	30.8	31.5	32.2	32.9	33.8	34.3	35.2	36.8	38.8	40.4	42.5	44.3	46.2				
6.5	16.3	16.9	17.6	18.4	19.0	19.8	20.4	21.1	21.8	22.4	23.2	23.8	24.5	25.2	25.9	26.5	27.2	27.9	28.7	29.2	30.0	30.9	31.4	32.1	32.8	33.5	34.6	36.8	38.4	40.3	42.0	43.8				
7.0	15.8	16.5	17.1	17.8	18.4	19.1	19.8	20.4	21.0	21.8	22.3	22.9	23.6	24.2	24.9	25.5	26.2	26.8	27.4	28.0	28.8	29.4	30.0	30.8	31.2	32.0	33.8	35.3	36.8	38.3	40.0	41.8				
7.5	15.5	16.1	16.7	17.2	17.9	18.5	19.1	19.8	20.3	20.9	21.5	22.2	22.8	23.3	24.0	24.6	25.2	25.8	26.4	26.9	27.7	28.2	28.8	29.4	30.1	30.8	32.2	33.8	35.2	36.8	38.3	39.9				
8.0	15.2	15.7	16.3	16.9	17.4	18.0	18.6	19.2	19.8	20.3	20.9	21.5	22.1	22.8	23.2	23.8	24.4	25.0	25.5	26.0	26.7	27.2	27.8	28.4	29.0	29.5	31.0	32.4	33.8	35.4	36.8	38.2				
8.5	14.9	15.4	15.9	16.5	17.1	17.6	18.2	18.7	19.3	19.8	20.4	20.9	21.4	22.0	22.5	23.1	23.7	24.2	24.8	25.3	25.8	26.4	26.9	27.4	28.1	28.6	29.9	31.3	32.8	34.2	35.4	36.8				
9.0	14.6	15.2	15.7	16.2	16.6	17.2	17.8	18.3	18.8	19.3	19.9	20.4	20.9	21.4	21.9	22.5	23.0	23.5	24.1	24.5	25.2	25.8	26.2	26.7	27.2	27.8	29.0	30.3	31.8	33.0	34.3	35.7				
9.5	14.4	14.9	15.4	15.9	16.4	16.9	17.4	17.9	18.4	18.9	19.5	19.9	20.5	20.9	21.4	21.9	22.4	22.9	23.4	23.8	24.4	24.9	25.4	25.9	26.4	26.9	28.2	29.4	30.8	32.0	33.3	34.5				
10	14.2	14.6	15.2	15.6	16.1	16.6	17.1	17.5	18.1	18.5	19.0	19.5	20.0	20.4	20.8	21.4	21.8	22.4	22.8	23.3	23.8	24.2	24.8	25.2	25.8	26.2	27.4	28.6	29.8	31.2	32.2	33.4				
11	14.4	14.7	15.2	15.6	16.1	16.5	16.9	17.4	17.8	18.4	18.8	19.3	19.6	20.2	20.5	20.9	21.4	21.9	22.3	22.8	23.2	23.7	24.2	24.6	25.0	26.2	27.2	28.3	29.5	30.8	31.8					
12			14.4	14.8	15.2	15.6	16.1	16.5	16.9	17.3	17.8	18.2	18.6	19.0	19.4	19.8	20.2	20.6	21.1	21.4	21.9	22.3	22.8	23.2	23.6	24.0	25.1	26.1	27.2	28.3	29.2	30.3				

table 2

### MODEL CB 4-PASS BOILER—RADIATION AND CONVECTION LOSSES

Firing Rate (% of Load)	100-350 BHP		400-800 BHP	
	Op. Pressure = 10 PSIG	Op. Pressure = 125 PSIG	Op. Pressure = 10 PSIG	Op. Pressure = 125 PSIG
25%	1.6%	1.9%	1.0%	1.2%
50%	.7%	1.0%	.5%	.6%
75%	.5%	.7%	.3%	.4%
100%	.4%	.5%	.2%	.3%

Based on  
 • still air conditions  
 • 80° F ambient air.

table 1

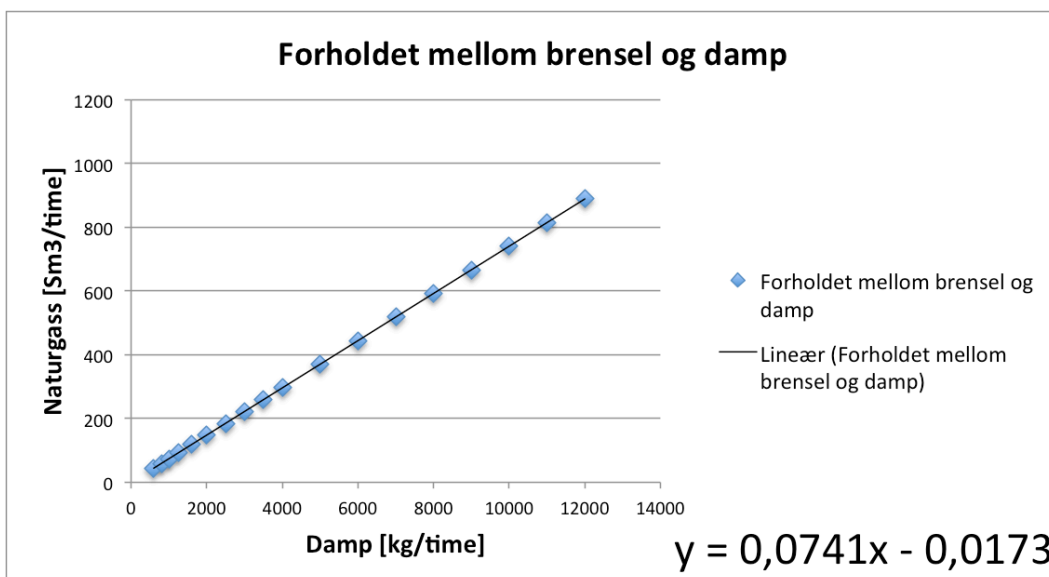
# Vedlegg D

## Forholdet mellom brensel og damp for én ny kjel

Tabell nedenfor illustrerer forholdet mellom dampproduksjon og gassforbruk. Dette er tall som gjelder for en ny kjel. Diagrammet illustrerer forholdet mellom brensel og damp.

Ved bruk av lineær funksjon i diagrammet nedenfor tilsvarer 12 000 kg/t damp omtrent 890 Sm<sup>3</sup>/t.

Type DJ [kg/t]	Varme Ytelse [kW]	Olje · Gass Forbruk [kg/t · Nm <sup>3</sup> /t]
600	417	39,4 · 42,1
800	556	52,6 · 56,2
1000	695	65,7 · 70,2
1250	966	82,2 · 87,8
1600	1.112	105,2 · 112,4
2000	1.390	131,5 · 140,5
2500	1.738	164,4 · 175,6
3000	2.086	197,2 · 210,7
3500	2.433	230,2 · 245,8
4000	2.781	263,0 · 280,9
5000	3.476	328,7 · 351,1
6000	4.171	394,5 · 421,4



# Vedlegg E

---

## Beregninger av dampbehov ved ønskelig produksjon

Dette vedlegget inneholder alle beregninger utført ved beregning av dampbehov for ønskelig produksjon. Der er også lagt ved bilder over prosessinformasjonen til hver forbruker. Ved alle beregninger er det ikke tatt hensyn til tap.

**Formel brukt ved beregning er:**

$$\dot{m}_{damp} \cdot h_{fg} = \dot{m}_{vann} \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1)$$

Forbruker 1: Blanding H1

$$Q_1 = 16,3 \text{ kg/s} \cdot 4183 \text{ J/kg} \cdot k \cdot (57,58 - 41,78) \text{ K} = 1,07728 \text{ MW} \approx 1,1 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{damp} = \frac{Q_1}{h_{fg}} = \frac{1,1 \text{ MW}}{2000 \text{ kJ/kg}} = 0,55 \text{ kg/s} = 1,98 \text{ tonn/time}$$

Forbruker 2: Kokeri H1

$$Q_2 = 2,5 \text{ kg/s} \cdot 4183 \text{ J/kg} \cdot k \cdot (48,3 - 41,8) \text{ K} = 0,06797 \text{ MW} \approx 0,07 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{damp} = \frac{Q_2}{h_{fg}} = \frac{0,07 \text{ MW}}{2000 \text{ kJ/kg}} = 0,035 \text{ kg/s} = 0,126 \text{ tonn/time}$$

Forbruker 3: Steamskrue H1

$$Q_3 = \dot{m}_{damp} \cdot h_g$$

$$Q_3 = 0,21 \text{ kg/s} \cdot 2781 \text{ kJ/kg} = 0,6 \text{ MW}$$

Forbruker 4: Kneater H1

$$Q_4 = \frac{\dot{m}_{alginsyre} \cdot C_p \cdot \Delta T}{\text{Oppvarmings tid}}$$

$$Q_4 = \frac{2000 \text{ kg} \cdot 4183 \text{ J/kgK} \cdot (79 - 30) \text{ K}}{15 \cdot 60 \text{ s}} = 0,46 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{damp} = \frac{Q_4}{h_{fg}} = \frac{0,46 \text{ MW}}{2109 \text{ kJ/kg}} = 0,22 \text{ kg/s} = 0,79 \text{ tonn/time}$$

Forbruker 5: Fikseringstank H2

$$Q_5 = 5,37 \text{ kg/s} \cdot 4183 \text{ J/kg} \cdot k \cdot (45,25 - 41,78) \text{ K} = 0,08 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{damp} = \frac{Q_5}{h_{fg}} = \frac{0,08 \text{ MW}}{2000 \text{ kJ/kg}} = 139,5 \text{ kg/time}$$

Forbruker 6: Steam syrevask H2

$$Q_6 = 6,96 \text{ kg/s} \cdot 4183 \text{ J/kg} \cdot k \cdot (58,53 - 41,78) \text{ K} = 0,2 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{damp} = \frac{Q_6}{h_{fg}} = \frac{0,2 \text{ MW}}{2000 \text{ kJ/kg}} = 360 \text{ kg/time}$$

Forbruker 7: Alginattørking H2

$$Q_7 = 275,35 \text{ kg/t} \cdot 2000 \text{ kJ/kg} = 0,15 \text{ MW}$$

Forbruker 8: Alginsyretørke H2

$$Q_8 = 647,12 \text{ kg/t} \cdot 2000 \text{ kJ/kg} = 0,36 \text{ MW}$$

Forbruker 9: Blanding H2

$$Q_9 = 35 \text{ kg/s} \cdot 4183 \text{ J/kg} \cdot k \cdot (49,192 - 41,78) \text{ K} = 0,108 \text{ MW}$$

$$\dot{m}_{damp} = \frac{Q_9}{h_{fg}} = \frac{1,08 \text{ MW}}{2000 \text{ kJ/kg}} = 630 \text{ kg/time}$$

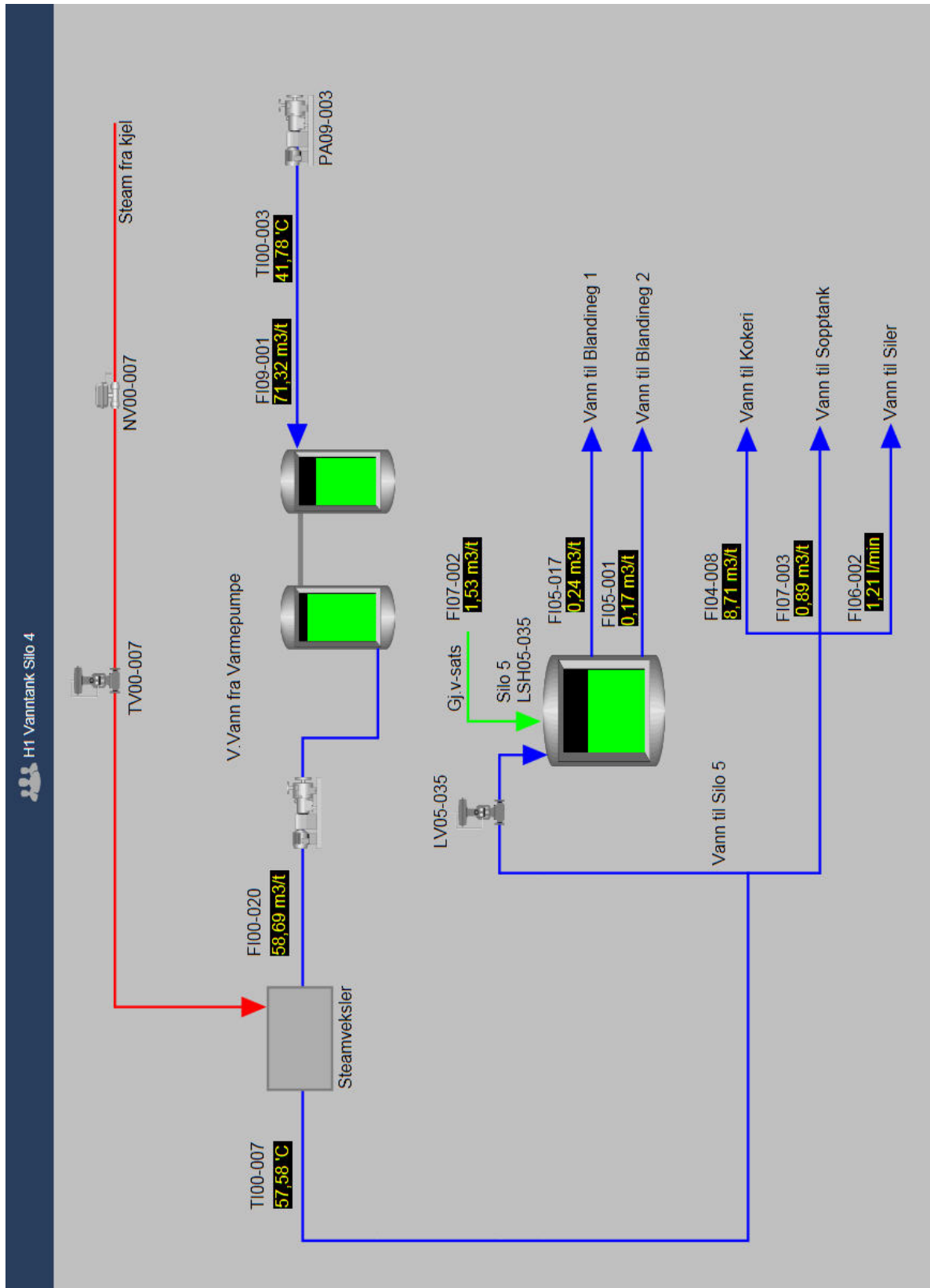
Forbruker 10: Steamskrue H2

$$Q_{10} = 0,378 \text{ kg/s} \cdot 2764 \text{ kJ/kg} = 1,045 \text{ MW}$$

Forbruker 11: Kneater H2

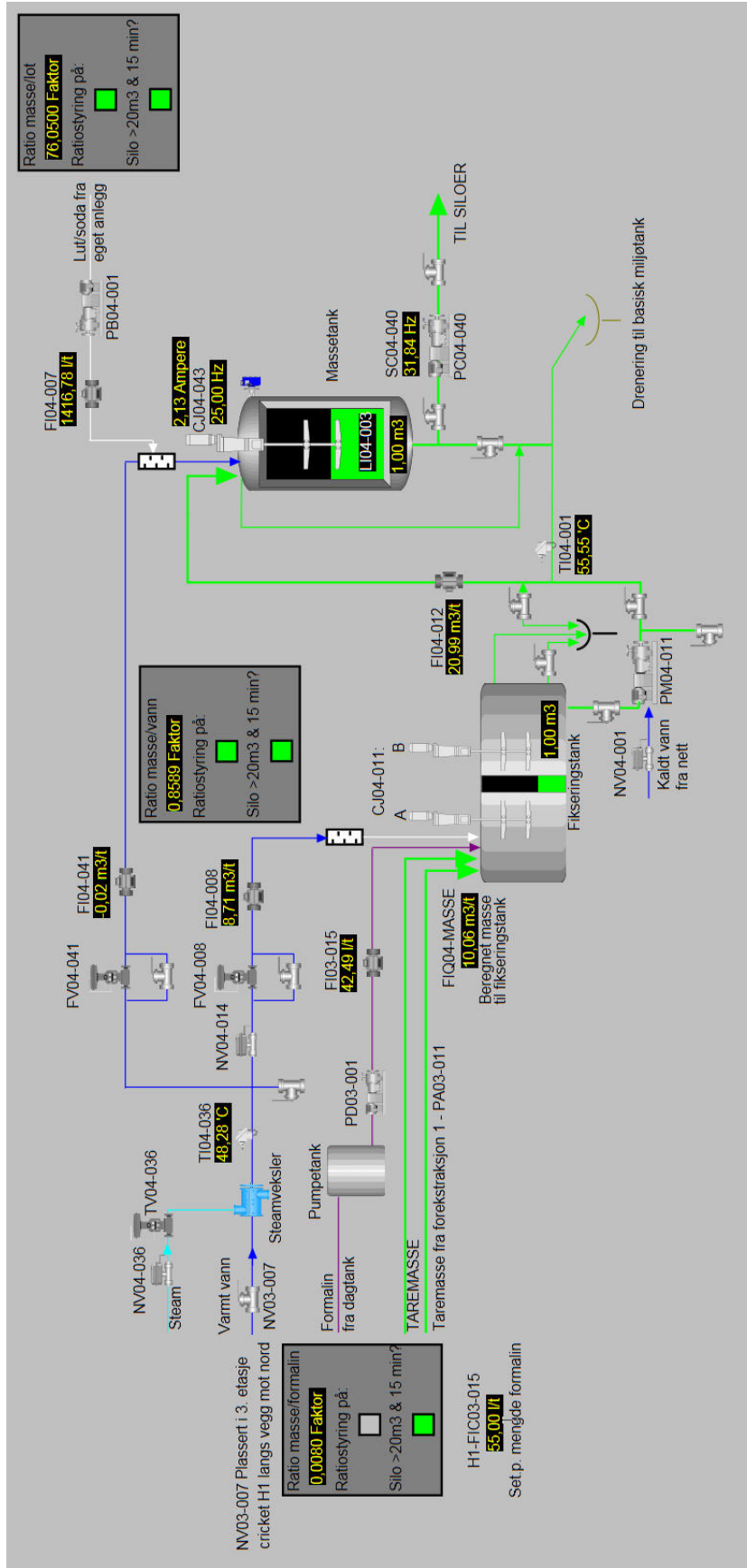
Ikke i bruk ved denne type produksjon.

## Forbruker 1: Blanding H2

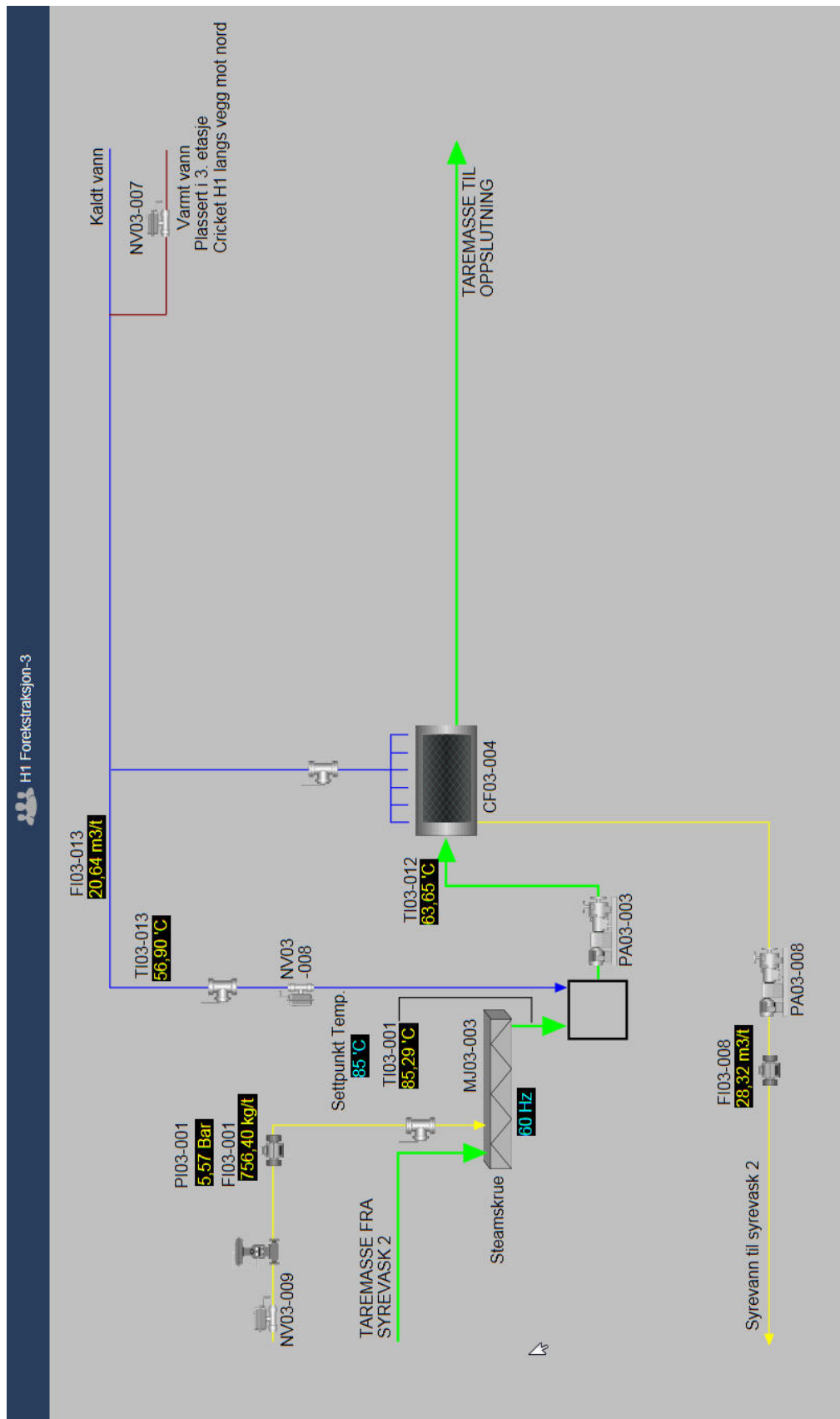




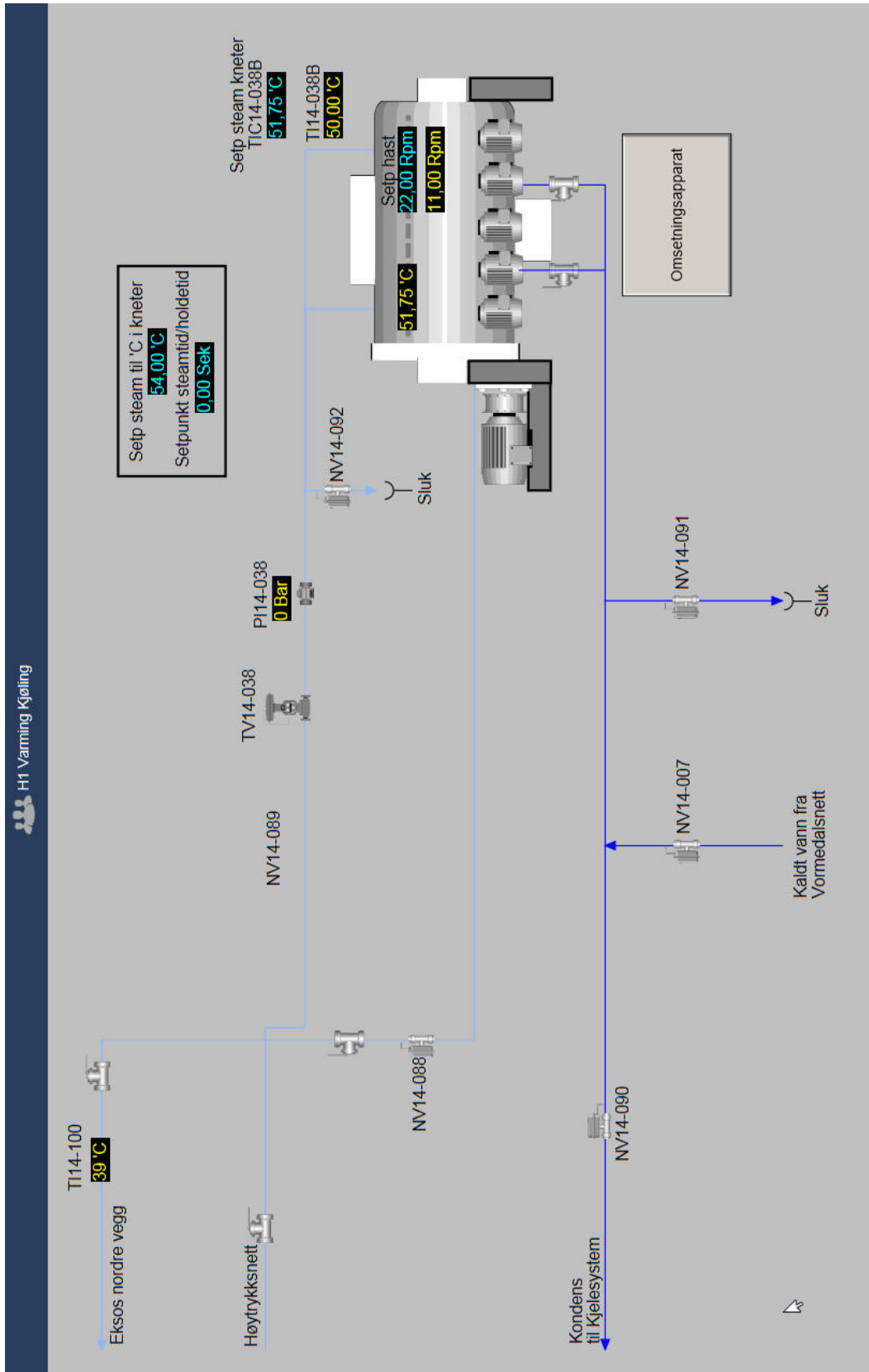
## Forbruker 2: Kokeri H1



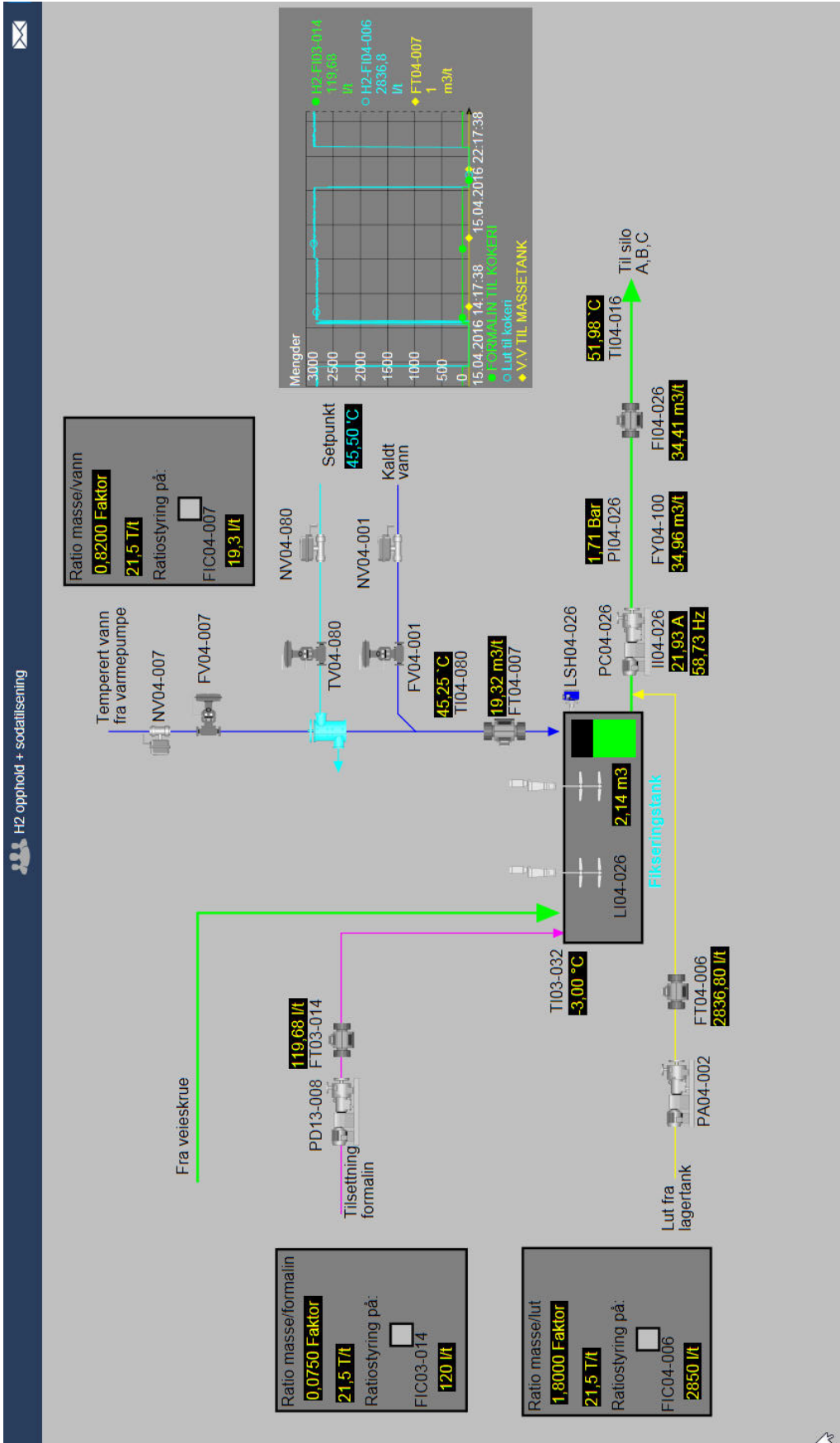
## Forbruker 3: Steamskruer H2



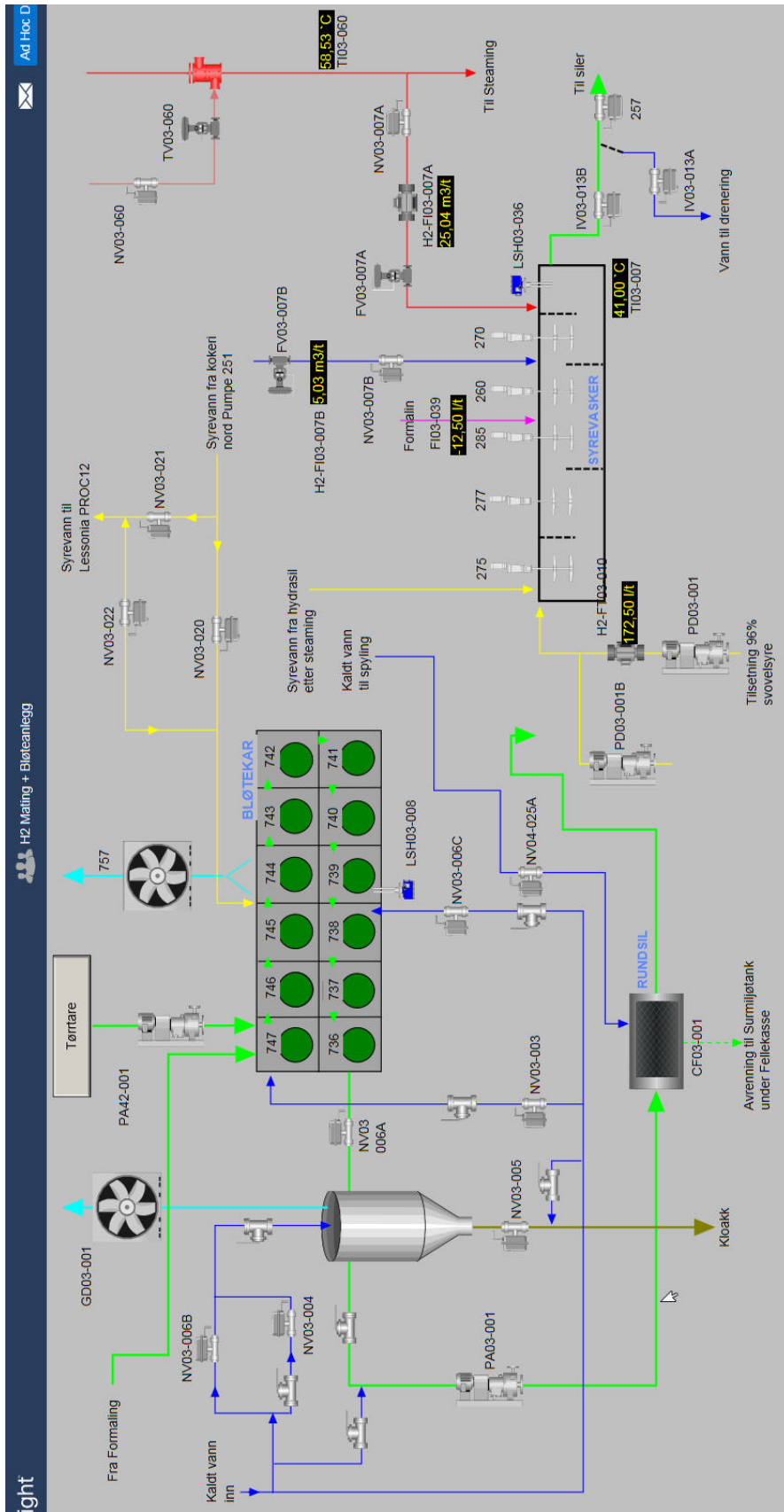
# Forbruker 4: Kneater H1



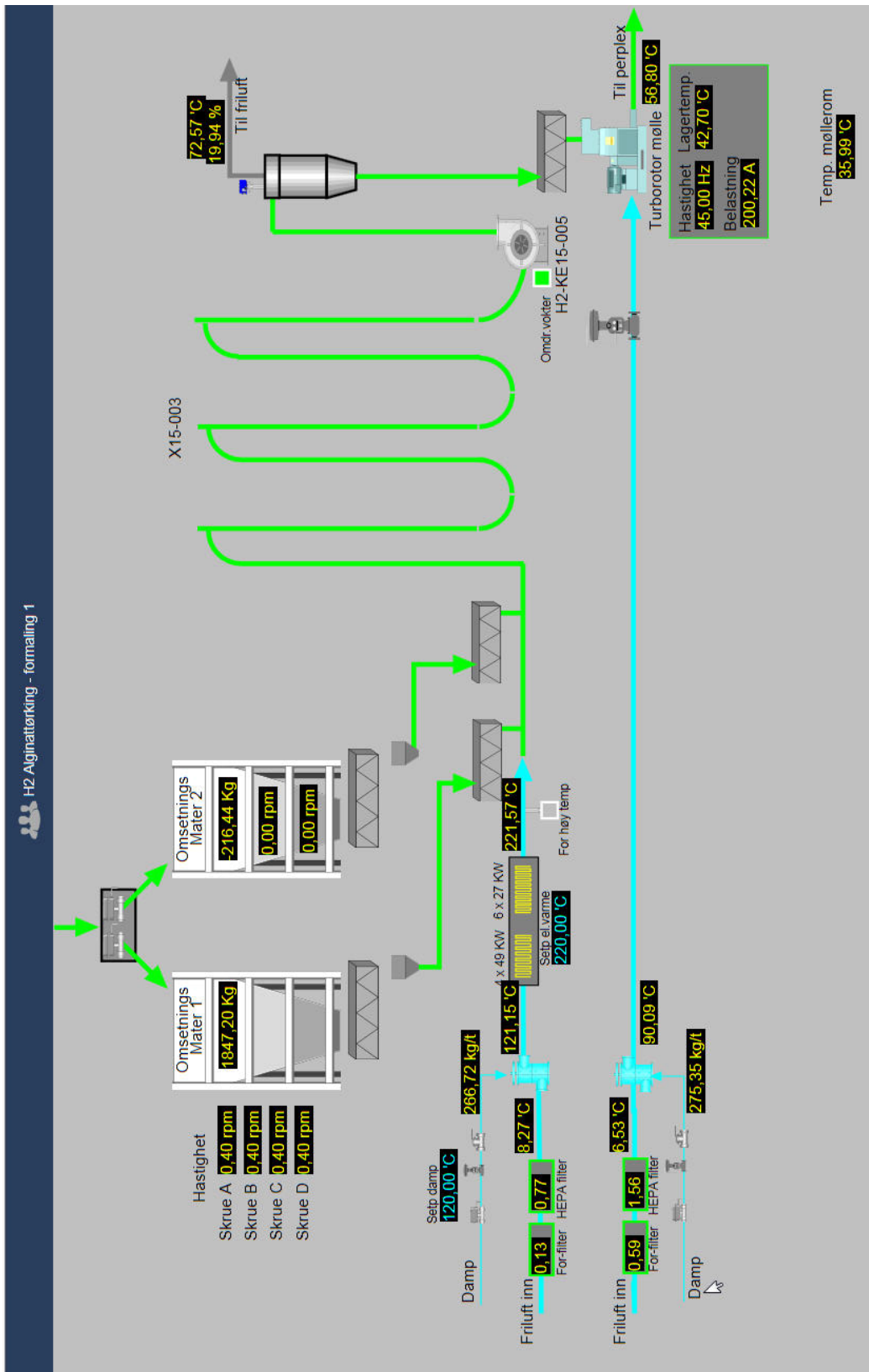
# Forbruker 5: Fikseringstank H2



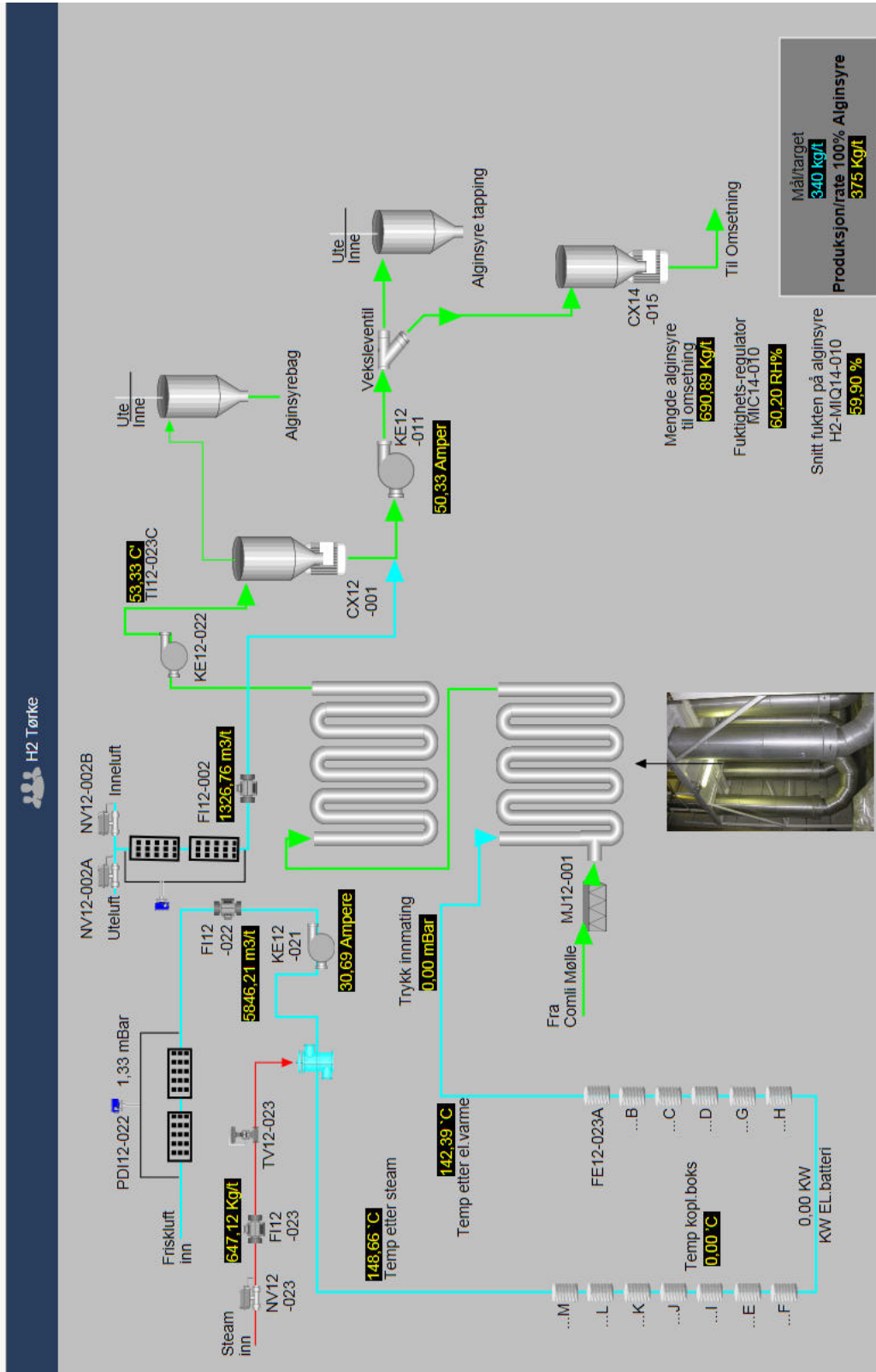
# Forbruker 6: Steam syrevask H2



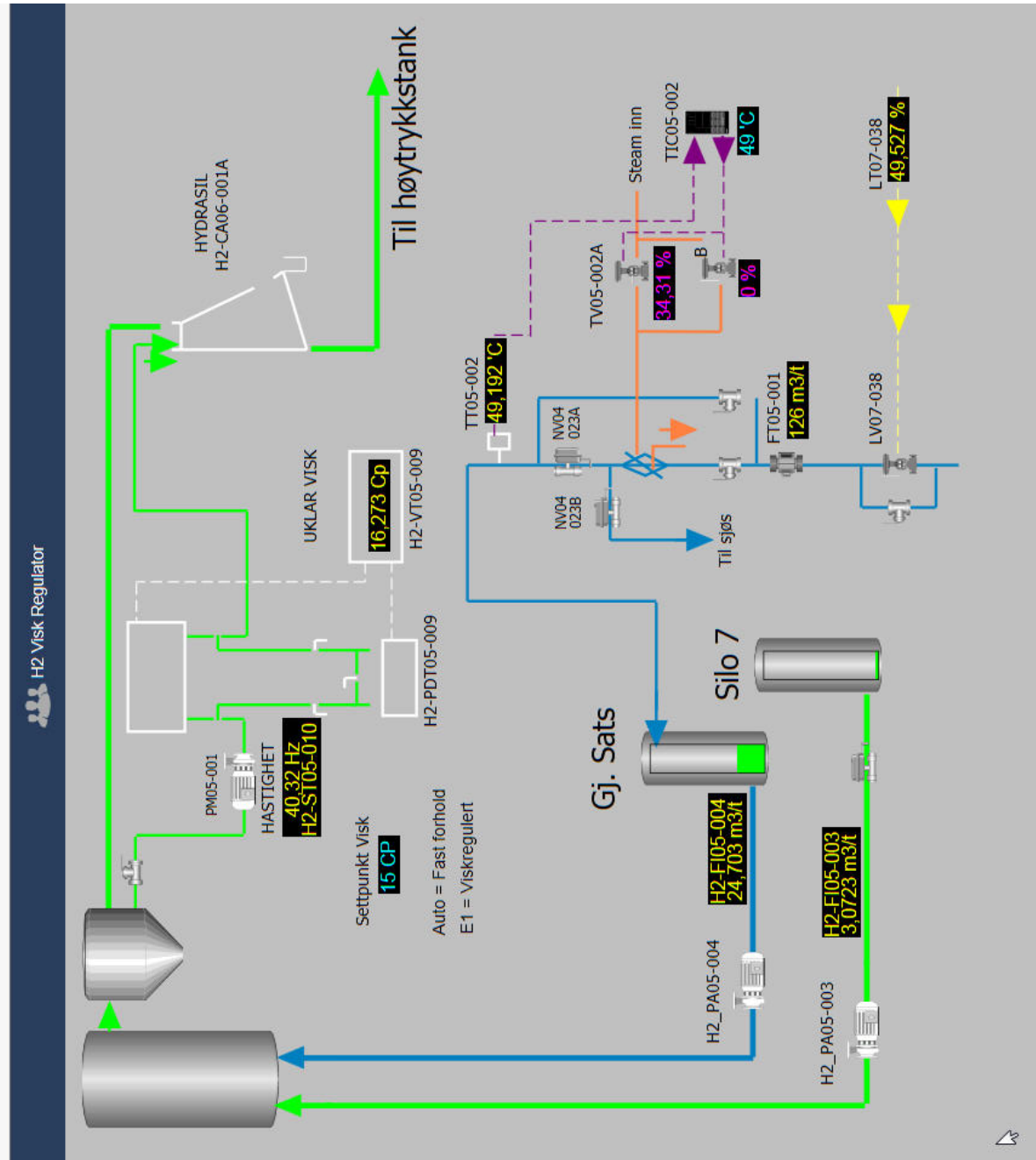
# Forbruker 7: Alginattørking H2



## Forbruker 8: Alginsyretørke H2

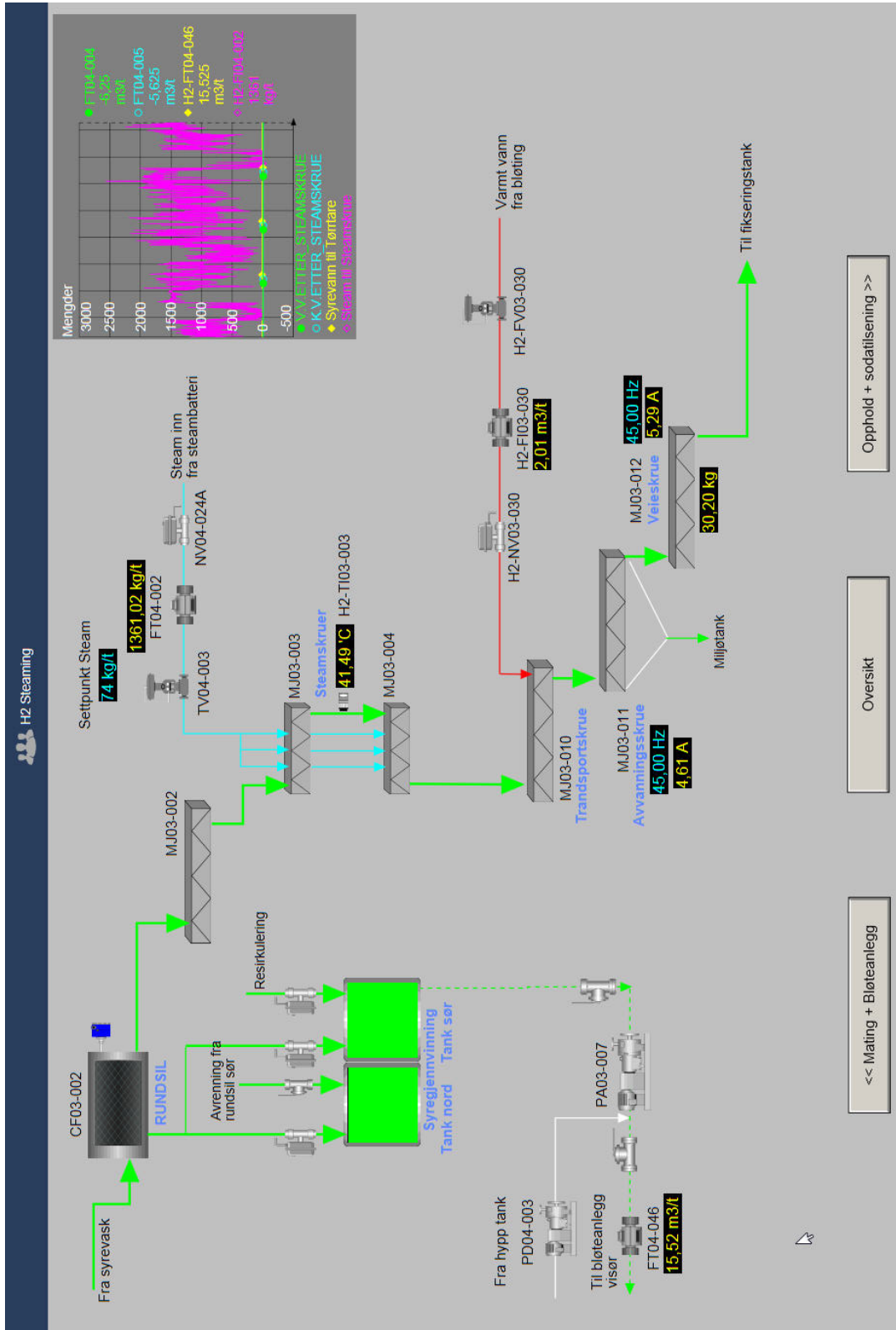


## Forbruker 9: Blanding H2





# Forbruker 10: Steamskrue H2



# Vedlegg F

Parat Halvorsen: Vitomax 200 – HS

**VIESSMANN**

**VITOMAX 200-HS**

Høytryksdampkedel  
Tretrækskedel  
Indfyret effekt 3,8 til 18,2 MW  
Dampydelse 5 til 26 t/h

## Datablad

Best.-nr. og priser på forespørsel

For valg af kedel henvises der til den separate planlægningsvejledning.



### **VITOMAX 200-HS** Type M75A

Olie/gas-højtryksdampkedel  
i overensstemmelse med kravene i direktivet for trykbærende  
udstyr 97/23/EF og TRD-regelsamlingen

**Tretrækskedel**

med og uden economiser

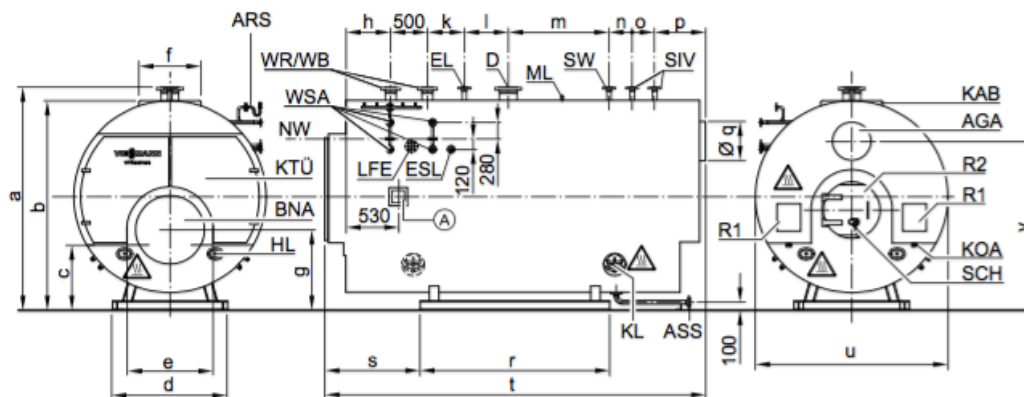
Tilladt driftstryk 6 til 25 bar



## Tekniske data uden integreret economiser (fortsat)

Kedelstørrelse		1	2	3	4	5	6	7	8	9	A
Røggasmassestrøm		1,5225 x indfyrede effekt i MW									
- ved naturgas	t/h	1,5 x indfyrede effekt i MW									
- ved fyringsolie	t/h										
Røggasvolumen	m <sup>3</sup>	4,9	6,1	7,3	8,5	9,6	11,8	14,7	18,4	24,7	28,7

### Mål



▲ Pas på, varm overflade!

AGA	Røggasaftræk	LFE	Studs til ledningsevneelektrode, blændflanget
ARS	Armaturstykke	ML	Mandehul
ASS	Studs til udslamningsventil	NW	Laveste vandstand
BNA	Brændertilslutning	R1	Rengøringsåbning røggaskasse
D	Dampstuds	R2	Rengøringsåbning brændkammer
EL	Udluftning	SIV	Studs til sikkerhedsventil, 1x blændflanget
ESL	Studs til afsaltningsledning, blændflanget	SCH	Inspektionsåbning
HL	Håndhul	SW	Fødevandsstuds
KAB	Kedelafdækning	WR/WB	Studs til vandstandsregulering /-begrænsning
KL	Hovedhul	WSA	Studs til vandstandsviser, 1x blændflanget
KOA	Kondensatbortleder R 2"	Ⓐ	Typeskilt
KTÜ	Kedeldør		

### Måltabel<sup>5</sup>

Kedelstørrelse		1	2	3	4	5	6	7	8	9	A
a	mm	2880	3055	3180	3330	3380	3530	3730	3930	4240	4340
b	mm	2725	2900	3035	3175	3225	3375	3575	3775	4085	4185
c	mm	755	813	825	840	830	835	850	865	945	965
d	mm	1800	1950	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2870	2920
e	mm	905	1030	1105	1155	1205	1275	1380	1530	1680	1680
f	mm	800	800	800	900	900	900	1000	1000	1100	1100
g	mm	1003	1070	1108	1160	1178	1240	1265	1342	1455	1455
h	mm	530	530	530	530	530	530	530	530	530	530
k	mm	575	575	650	650	675	825	875	975	1300	1400
l	mm	475	525	550	565	725	925	875	1075	800	1100
m	mm	1530	1660	1685	1860	1825	1860	2025	2040	2500	2600
n	mm	300	325	325	325	325	350	350	400	450	500
o	mm	300	325	325	325	325	350	350	400	450	500
p	mm	660	660	760	760	810	810	910	960	1110	1160
q <sup>6</sup>	mm	500	550	600	650	700	750	850	900	1000	1100
r	mm	2550	2790	2875	2965	3165	3380	3485	3700	4290	4590
s	mm	1230	1225	1270	1320	1335	1445	1530	1630	1720	1910
t	mm	5105	5335	5560	5750	5990	6425	6720	7185	7975	8665
u	mm	2500	2675	2800	2950	3000	3150	3350	3550	3800	3900
v	mm	2240	2390	2490	2615	2640	2765	2915	3090	3350	3400

5821.487 DK

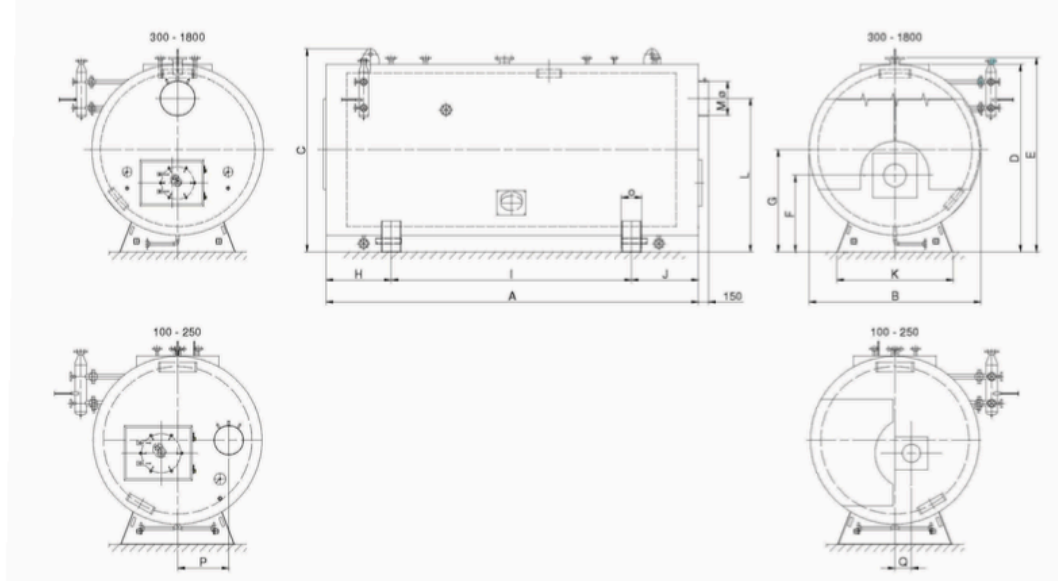
<sup>5</sup> Nominelle mål, der tages forbehold for konstruktionsændringer

<sup>6</sup> Indvendig diameter, for udvendig diameter +10 mm

# Datablad for Danstoker OPTI Høytrykksdampkjel (Skåland Rør & Industrimontasje)



## • OPTI Høytrykksdampkjel •



OPTI	Nr.	100	150	200	250	300	400	500	600	700	800	1000	1200	1400	1600	1800
Dampytelse	kg/h	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000	6000	7000	8000	10000	12000	14000	16000	18000
A	mm	3300	3550	3600	3975	4225	4725	5425	5550	5600	5750	6315	6750	7050	7950	8050
B	mm	1800	1950	2050	2150	2200	2375	2500	2600	2725	2775	3000	3050	3375	3425	3575
C	mm	2300	2450	2550	2650	2700	2875	3000	3100	3225	3275	3500	3550	3875	3925	4075
D	mm	2050	2200	2300	2400	2450	2625	2750	2850	2975	3025	3250	3300	3625	3675	3825
E	mm	2150	2300	2400	2500	2550	2725	2850	2950	3075	3125	3350	3400	3725	3775	3925
F	mm	1010	1085	1115	1160	1030	1080	1125	1140	1145	1155	1235	1240	1340	1370	1430
G	mm	1150	1225	1275	1325	1350	1440	1500	1550	1615	1640	1750	1775	1940	1965	2040
H	mm	785	785	785	785	950	950	950	975	975	975	1050	1050	1200	1200	1200
I	mm	1780	2030	2080	2380	2300	2800	3500	3600	3600	3750	4180	4580	4600	5500	5600
J	mm	735	735	735	810	975	975	975	975	1025	1025	1085	1110	1250	1250	1250
K	mm	1325	1425	1475	1525	1475	1600	1700	1800	1875	1925	2100	2150	2300	2300	2500
L	mm	1150	1225	1275	1325	1720	1845	1950	1985	2040	2040	2220	2200	2450	2360	2575
M e	mm	250	300	325	350	400	450	500	550	600	650	725	800	850	900	950
NP: Friavst. rørsnitt	mm	2450	2700	2750	3050	3300	3800	4500	4550	4550	4700	5100	5500	5700	6550	6600
O	mm	250	250	250	250	300	300	300	300	300	300	400	400	400	450	450
P	mm	525	550	620	675											
Q	mm	170	175	200	213											
Vanninnhold til L.V.	m <sup>3</sup>	3,17	4,12	4,61	5,6	5,9	7,9	10,8	11,6	12,8	13,5	17,2	18,9	23,2	27,0	32,8
Damprom ved L.V.	m <sup>3</sup>	0,55	0,7	0,9	1,1	1,4	1,8	2,1	2,5	3,1	3,4	4	4,7	5,8	6,5	7,2
Brennkammer dia.	mm	600	700	700	750	800	900	975	1000	1025	1050	1200	1200	1375	1425	1550
-do- lengde	mm	2000	2250	2300	2600	2800	3300	4000	4100	4100	4250	4700	5100	5300	6150	6250
Røkgassvolum	m <sup>3</sup>	1,3	1,9	2,0	2,6	2,9	4,3	5,3	6,5	7,0	7,6	11,0	12,0	16,0	19,5	22,5
Røkgasstemp. *	°C	245	245	245	245	240	240	240	240	240	240	240	240	240	245	245
Røkgassmotstand *	mbar	5,0	8,5	7,5	7,5	9,5	10,0	10,5	10,5	10,5	12,0	11,0	13,0	12,0	10,5	10,5
Vekt ved 8,0 bar	kg	3500	4300	5100	6000	7100	8500	10000	11600	13500	15000	17500	21000	24000	27000	30000
Vekt ved 10,0 bar	kg	3700	4600	5500	6500	7700	9200	11000	12800	14700	16800	19200	22800	26500	29600	33000
Vekt ved 13,0 bar	kg	4000	5000	6000	7100	8500	10500	12000	14500	16500	18500	21500	25500	24500	27500	31000
Vekt ved 18,0 bar	kg	4500	5800	6800	8000	9500	11600	13600	16000	18300	20500	24000	24000	30000	35000	39000

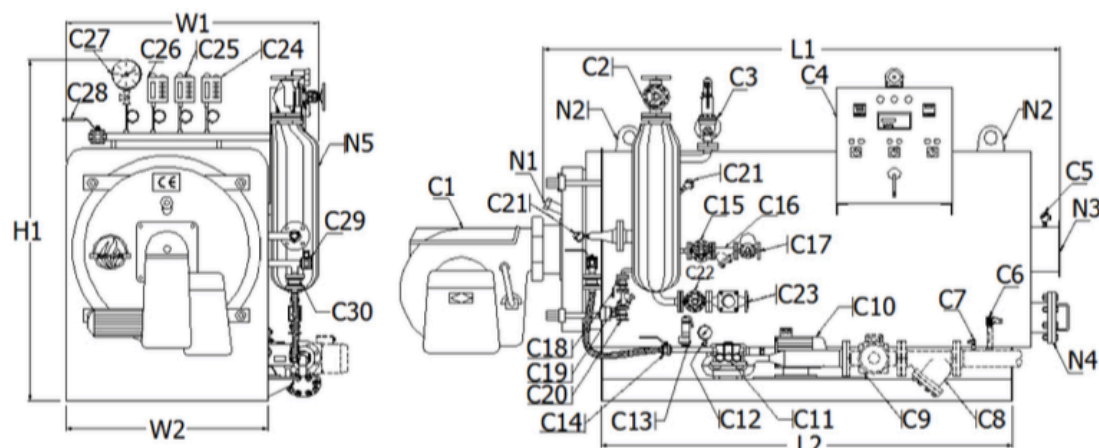
Dampkjel • Dampanlegg • Gass • Rustfritt • Næringsmiddel • Industrirør • Prosessrør • VVS • Fjernvarmesentraler • Biovarmeanlegg

Skåland Rør & Industrimontasje AS Drageland 1 4380 Hauge i Dalane Tlf: +47 4000 2850 post@boiler-steam.no www.boiler-steam.no kto.nr. 3325.05.14501

## Datablad for QB generator kjel (Skåland Rør & Industrimontasje)

### QB DAMPGENERATOR

#### • DIMENSJON OG VEKT ( UTEN ECONOMISER )



- |                                   |                                     |                                 |
|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| C1. Brenner                       | C13. Sikkerhetsventil for matevann  | C25. Modulerings pressostat     |
| C2. Dampventil                    | C14. Ventil for matevann            | C26. Sikkerhets pressostat      |
| C3. Sikkerhetsventil              | C15. Ventil for kondenspotte        | C27. Manometer                  |
| C4. Styreskap                     | C16. Filter for kondenspotte        | C28. Dreneringsventil           |
| C5. Røkgasstermostat              | C17. Kondenspotte                   | C29. Avblåsningsventil          |
| C6. Probe for ledningsevne        | C18. Avblåsningsventil              | C30. Tilbakeslagventil matevann |
| C7. Nivåprobe for vannmangel      | C19. Filter avblåsing               |                                 |
| C8. Filter for matevannspumpe     | C20. Avblåsing fra ledningsevne TDS | N1. Se glass for flammekontroll |
| C9. Høytrykkspumpe                | C21. Damp temperatur                | N2. Heisefeste                  |
| C10. Motor                        | C22. Ventil for seglass             | N3. Røkgass tilkopling          |
| C11. Matevannspumpe               | C23. Seglass                        | N4. Rense håndhull              |
| C12. Manometer for matevannspumpe | C24. Drifts pressostat              | N5. Vannutskiller               |

Type		500	750	1000	1250	1500	2000	2500	3000	4000	5000
<b>Hoved Dimensjoner</b>											
Lengde (L1)	mm	2410	2410	2980	2980	2975	3760	3770	4330	5950	6350
Bredde med utstyr (W1)	mm	1325	1325	1535	1535	1555	1555	1730	1730	1730	1730
Bredde uten utstyr (W2)	mm	1075	1075	1255	1255	1280	1280	1450	1450	1450	1450
Høyde (H1)	mm	1910	1910	2090	2090	2115	2115	2285	2285	2285	2285
<b>Transport vekt<sup>5</sup></b> (med utstyr uten brenner)	t	1.45	1.66	2.05	2.29	2.57	2.89	3.96	4.48	5.40	6.4
<b>Røkgass tilkopling</b>											
Diameter (N3)	mm	250	250	320	320	320	320	400	480	480	550
<b>Inspeksjons åpninger</b>											
Røkgass side	(N4)	Ø 150 mm									
<b>Ramme mål</b>											
Lengde (L2)	mm	1860	1860	2360	2360	2360	3135	3110	3710	4730	5130
Bredde (W2)	mm	1075	1075	1255	1255	1280	1280	1450	1450	1450	1450

<sup>5</sup> Transportvekt kan avvike fra oppgitt over

## • SPESIFIKASJONER (UTEN ECONOMISER)

www.srim.no

Type		500	750	1000	1250	1500	2000	2500	3000	4000	5000
Medium		Tørr mettet damp									
Kapasitet (matevann 102°C)	t/h kW	0.5 326	0.75 489	1.0 653	1.25 817	1.5 979	2.0 1306	2.5 1632	3.0 1959	4.0 2612	5.0 3265
Avgitt ved Forbrenning <sup>1</sup>	kW	363	543	725	907	1089	1451	1814	2178	2904	3630
Overenstemmelse med direktiv		CE0038 etter Pressure Equipment Directive									
Kjel virkningsgrad @ 10 bar(g)	%	88.7	88.4	88.3	88.1	88.2	88.2	88.5	88.2	88.5	88.5
Røkgassmotstand	mbar	3.4	3.8	3.8	4.1	4.3	5.1	5.4	5.8	6.0	6.4
Forbruk av brensel <sup>2</sup>											
- Lettolje	Kg/h	31	46	61	76	92	122	153	184	245	306
- Naturgass	Nm <sup>3</sup> /h	36	54	73	91	109	145	181	218	290	362
- HFO (tungolje)	Kg/h	33	49	65	81	98	130	163	195	260	325
Røkgass mengde											
- Lettolje	Nm <sup>3</sup> /h	415	622	824	1002	1273	1664	2074	2467	3321	4151
- Naturgass	Nm <sup>3</sup> /h	406	608	812	1014	1216	1622	2027	2431	3247	4058
- HFO (tungolje)	Nm <sup>3</sup> /h	504	754	1006	1259	1512	2014	2518	3023	4031	5038

## DATA

Vann/Dampvolum	m <sup>3</sup>	0.123	0.123	0.202	0.202	0.318	0.410	0.542	0.645	0.712	0.791
Damp generator volum	lt	10.1	10.1	12.3	12.3	18.8	18.8	34.6	34.6	34.6	34.6
Røkgassvolum til røkgasstuss	m <sup>3</sup>	0.79	0.79	1.34	1.34	1.51	1.75	2.75	3.11	4.05	5.06
Isolasjon	mm	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Damp (DN)											
12.5 bar	PN16	40	40	50	50	65	65	80	80	100	100
16 bar	PN25	32	32	40	40	50	50	65	65	80	80
20 bar	PN40	25	25	32	32	40	40	50	50	65	65
Sikkerhetsventil utløp (DN)											
12.5 bar	PN16	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	32/50	32/50	40/65	40/65
16 bar	PN25	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	32/50	32/50	32/50
20 bar	PN40	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40	25/40
Matevann (DN)											
12.5 bar	PN16	50	50	50	50	65	65	80	80	80	80
16 bar	PN25	50	50	50	50	65	65	80	80	80	80
20 bar	PN40	50	50	50	50	65	65	80	80	80	80
Avblåsing (DN)											
	PN40	25	25	25	25	25	25	40	40	40	40
Vannutskiller (DN)											
	PN40	20	20	20	20	20	20	20	25	25	25
Omvendt Avblåsing (DN)											
	PN40	25	25	25	25	25	25	25	2x25	2x25	2x25

<sup>1</sup> Forbrenningsdata avhenger av valgt brensel.

<sup>2</sup> Verdier for kalkulasjon av brenselforbruk er lettolje 11,86 kWh/kg, naturgass 10,0 kWh/Nm<sup>3</sup>/h, HFO 11,16 kWh/kg.