



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Primær reduktion af emissioner fra 400 kW portionsfyret halmkedel

Miljøprojekt nr. 1931

April 2017

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Torben Nørgaard Jensen

Anette Scavenius Brønnum

Marcin Blazniak Andreassen

ISBN: 978-87-93529-88-5

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

Indhold	3
Forord.....	5
Sammenfatning og konklusion	6
Summary and conclusion	7
1. Indledning	9
1.1 Forbrændingsprincipper	9
1.1.1 Et-kammer forbrænding (konventionel manuel fyret halmkedel)	9
1.1.2 To-kammer forbrænding	10
1.2 Mål og succeskriterier.....	11
1.3 Særlige udfordringer	11
2. Litteratur- og markedsundersøgelse	13
2.1 Søgningsmetode og resultater for litteratur- og markedsundersøgelse	13
2.2 Generel internetsøgning	13
2.3 Videnskabelig database og patentsøgning	13
2.4 Specifik internetsøgning i branchen for biomassekedler	14
2.5 Indsamling af informationer gennem Teknologisk Instituts europæiske netværk	14
3. Princip for halmkedel.....	16
3.1 Valg af forbrændingsprincip.....	16
3.2 Ide til første model.....	17
4. Indledende tests med minibrændkammer	18
4.1 Udformning af minibrændkammer.....	18
4.2 Test med minibrændkammer	19
4.3 Opsamling på test med mini brændkammer	23
5. Udformning af kedel version 1 & 2	24
5.1 Version 1 – overvejelser	24
5.1.1 Design.....	25
5.1.2 Konklusion på version 1.....	27
5.2 Version 2 – overvejelser	27
5.2.1 Design.....	28
5.2.2 Test	30
5.2.3 Konklusion på test med kedel – version 2.	34
6. Udformning af kedel ver. 3 – endelig version	35
6.1 Version 3 – overvejelser	35

6.1.1	Design – endelig version	35
6.1.2	Styring	36
6.1.3	Test	37
6.1.4	Opsamling på indregulering	52
7.	Brændselsanalyse.....	53
8.	Sluttest med emissionsmålinger	55
8.1	Måleprogram iht. EN303-5:2012	55
8.1.1	Måleudstyr	55
8.1.2	Måling i felten	55
8.2	Måling på version 3 - endelige version	56
8.2.1	Opsamling på sluttest med emissionsmålinger	62
9.	Diskussion og konklusion	63
9.1	Resultater	63
9.1.1	Mekanik.....	63
9.1.2	Virkningsgrad og emissioner	63
9.2	Perspektiv	64
	Referencer	65
Bilag 1	Oversigt over teknologier	66
Bilag 2	CFD beregninger	69
Bilag 3	Eksempel på 2-kammer forbrændingskedel	84
Bilag 4	CAD tegninger.....	86
Bilag 5	El-diagram.....	89

Forord

Dette projekt er udført for Miljøstyrelsen af en projektgruppe bestående af Maskinfabrikken Faust ApS og Teknologisk Institut, Division for Energi og Klima.

Projektet er medfinansieret af Miljøstyrelsens "Program for Grøn Teknologi 2013" og er udført i perioden 2014 til 2016.

Projektets formål har været at udvikle en portions/manuel fyret halmkedel, som kan brænde renere og mere effektivt end de kedler der findes på markedet. Ideelt set skal kedlen kunne overholde de nye skrappe klasse 5 krav i EN-303-5 standarden.

I rapporten beskrives udvikling og test af kedlen. I stedet for et konventionelt brændkammer, hvor halmballen ligger på en lukket bund og brændes fra toppen, testes i projektet forskellige alternativer. Der afprøves to-kammer forbrænding i flere varianter og endes op med en helt ny løsning.

Rapportens indhold er nødvendigvis ikke et udtryk for Miljøstyrelsens holdninger, men styrelsen har støttet projektet, fordi man finder dets målsætning væsentlig og interessant.

Sammenfatning og konklusion

Projektets overordnede formål har været at udvikle en manuel fyrer (også kaldet portionsfyrer) halmkedel på ca. 400 kW med lavere emissioner end de halmkedler der findes på markedet i dag. Særlig fokus har der været på reduktion af CO, OGC, NO_x og støvemissioner som er de væsentligste emissioner fra disse anlæg.

Manuelt fyrede halmkedler er fortsat relativt simple og består groft sagt af et kammer med fast bund og luftdosering/røggasafgang i toppen. Og der er ikke sket stor udvikling de senere år.

Grundideen har derfor været at overføre teknologi fra brændekedler som ligesom halmfyrer er portionsfyrer men udviklet til et noget højere teknologisk niveau. De gode brændefyrer er i lang tid blevet bygget som to-kammer kedler hvor brændet ligger på en rist og både luftdosering og røggasafgang sker under risten. Det giver en langt bedre opblanding i forbrændingsfasen og samtidig sikres det at der altid er samme afstand mellem luftdoseringen og brændslet.

Dette princip skulle danne grundlag for halmkedlen. Udfordringen med halm er imidlertid at det i forhold til brænde er et meget besværligt brændsel. Der dannes slagge og støv i store mængder og korrosive forbindelser i røggassen. Disse udfordringer skulle adresseres i projektet.

Der blev udviklet og testet flere varianter og det endte op i en kedel med en helt ny type brændkammer. I stedet for en vandret rist som i en brændekedel, blev der udviklet et lodretstående ristesystem som ballen ligger an mod og som ved hjælp af roterende opriverrør afriver halmen i kontrolleret mængde, samtidig med at der er fast afstand til ballen. Derudover undgås slaggeproblemer, idet slaggen flyder væk fra risten og ned i et askerum i bunden af brændkammeret.

Det lykkedes at gennemføre flere fulde afbrændinger uden væsentlige problemer. Mekanikken fungerede og både CO, OGC og NO_x-emissionerne var under eller meget tæt på de ønskede grænseværdier. Støvemissionen var imidlertid fortsat relativt høj og her vil der kræves yderligere udvikling.

Det forventes at støvemissionen vil kunne reduceres ved yderligere optimering af brændkammer, luftdosering og kedlens styring.

Faust er meget begejstret for kedlen og har iværksat en patentansøgning på ristedelen. Faust forventer at kedlen hvis den videreudvikles vil kunne supplere og måske endda helt erstatte deres portefølje af manuelt fyrede halmkedler.

Hvis styring og mekanik trimmes optimalt vil kedlen kunne køre start/stop på en balle og derved fungere uden akkumuleringstank. Samtidig vil der være mulighed for at kedlen kan bygges så den kan tilsluttes automatisk brændselsdosering og derved både fungere som manuelt og automatisk fyrer kedel.

Endelig vil kedlen ideelt set, pga. af det nye princip, kunne bygges så lav at den vil kunne være i en 20 fods container. Det vil kunne reducere transportudgifterne, som er en væsentlig post i forbindelse med levering af et halmfyr, betydeligt.

Summary and conclusion

The overall aim of the project has been to develop a manually fired straw burner of approximately 400 kW with lower emissions than the straw burners available on the market today. Reduction of CO, OGC, NO_x and dust emissions have been in focus since they are the most significant emissions from such units.

Manually fired straw burners remain relatively simple and basically consist of a chamber with fixed bottom and air metering /flue gas outlet at the top. No notable development has taken place in recent years.

The basic idea was to transfer technology from furnaces, which like straw burners, are fired in portions but developed to a higher technological level. The good wood furnaces have for a long time been built as a two-chamber / under combustion boilers, in which the wood is placed on a grate and wherein both the air dosing and fluegas outlet occurs under the grate. This gives a much better mixing in the combustion phase and ensures that there is always the same distance between the air dosage and fuel.

This principle should be the basis for the straw burner. The challenge of straw is however, that it is a very troublesome fuel in relation to wood. Slag and dust occur in very large quantities also corrosive compounds occur in the flue gas. These challenges should be addressed in the project.

Several variants were developed and tested, resulting in a burner with a new type of combustion chamber. Instead of the bale of straw being located on a horizontal grid as in a wood-burning boiler, a vertical grate system was developed which the bale of straw is placed up against and which by means of rotating cam tubes peels off the straw and at the same time ensures both a fixed distance to the bale of straw and that slagging issues are remedied, because the slag flows away from the grate and into an ash pit with ash auger.

The project managed to complete several full burnings without major problems. The mechanics worked and both CO, OGC and NO_x emissions were below or very close to the limit values. Dust emissions, however, remained relatively high and it will require further development to reach a reduction.

Dust emission will likely be reduced by further optimization of the combustion chamber, air dosing and boiler control.

Faust is very excited about the burner and has launched a patent application on the part with the grate. Faust expects, if the boiler is further developed, that it could complement and perhaps even completely replace their portfolio of manually fired straw burners.

If management and mechanics are trimmed optimally, the burner will run start stop on one bale of straw and could thus function without storage tank. At the same time the burner could possibly be built so that it can be connected to automatic fuel dosing and thereby be able to work as a manual - and automatically fired burner.

Finally, the burner will ideally due to the new principle be built so low that it would fit into a 20 foot container. This would reduce transportation costs considerably, which is a significant item in the supply of a straw burner.

1. Indledning

Grundideen bag projektet er at overføre og anvende viden og teknologi fra manuelt fyrede (også kaldet portionsfyrede) brændekedler, som er betydeligt længere fremme i udviklingen end manuelle halmkedler.

Nyere brændekedler præsterer betydelig bedre forbrændingskvalitet med fast brændsel end både ældre brændekedler og manuelt fyrede halmkedler. I de nyere brændekedler trinopdeles forbrændingsprocessen i et to-kammer system, hvilket giver langt bedre forbrænding end den traditionelle overforbrænding i ét forbrændingskammer.

Resultaterne fra emissionsmålinger på en brændekedel med ét forbrændingskammer og to kedler med to-kammer systemer ses i Tabel 1. Kedlen af fabrikatet Viadrus U22 har ét forbrændingskammer, mens de to anonyme kedler begge har to-kammerforbrænding. Tabellen viser, at resultaterne er langt bedre for to-kammerkedlerne end for Viadrus U22-kedlen.

TABEL 1
EKSEMPLER PÅ EMISSIONER FRA UDVALGTE KEDLER

Parameter	CO ppm ved 13% O ₂	*OGC mg C/m ³ _{n,t} ved 13 % O ₂	Støv mg/m ³ _{n,t} ved 13 % O ₂
Viadrus U22	3.740	594	228
2-kammer kedel1	406	2	41
2-kammer kedel2	189	4	36
Halmkedel	1.241	141	140

*OGC: Uforbrændte kulbrinter (Organic Gaseous Compounds)

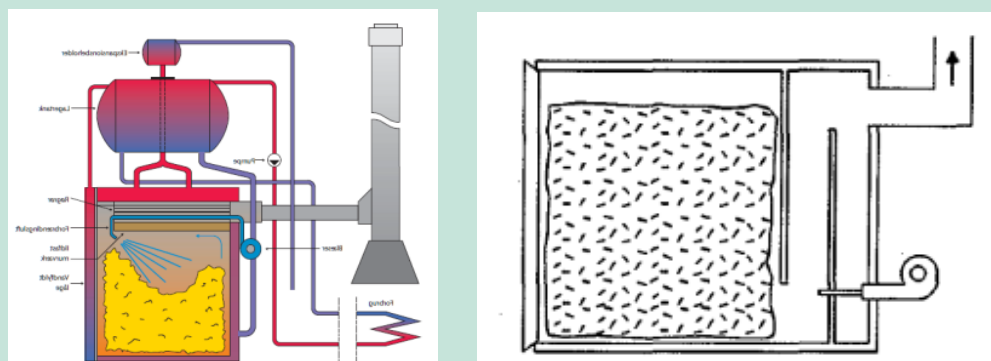
Sidste række i tabellen viser resultaterne fra en 900 kW traditionel portionsfyret halmkedel typeprøvet i 2008. Som det ses ligger emissionerne fra de to kedler med to-kammer forbrænding langt under både den traditionelle brændekedel og halmkedlen. Tanken er derfor, at princippet med to-kammer forbrænding skal overføres til en manuelt fyret halmkedel.

1.1 Forbrændingsprincipper

I det følgende forklares hhv. et- og to-kammer forbrænding.

1.1.1 Et-kammer forbrænding (konventionel manuel fyret halmkedel)

På Figur 1 er vist princippet for de to typer manuelt fyrede halmkedler der findes i dag. Til venstre den mest almindelige med luftdosering og røgafgang i toppen og til højre en mindre almindelig udgave, hvor der fra siden blæses ind på den nederste del af halmballen. Fælles for dem er, at forbrændingen foregår i samme kammer som brændslet befinder sig i.



FIGUR 1
EKSEMPLER PÅ ET-KAMMER FORBRÆNDING

Når der blæses ned på ballen ovenfra i modstrømsforbrænding (hvor røggassen går mod forbrændingsluften) fås der med de bedste kedler rigtig god forbrænding langt ind i ballen. Men når ballen er ved at være brændt væk begynder det at knibe. Så bliver afstanden fra luftdysen til halmen for lang og forbrændingen er ikke længere optimal.

Dette er forsøgt afhjulpet i kedlen til højre hvor ideen er, at der skal være samme afstand mellem dyse og balle i størst mulig del af tiden. Her er problemet imidlertid, at ballen efter nogen tid falder sammen, hvilket giver urolig forbrænding, og samtidig er der også her en vis afstand fra dysen til den sidste del af ballen, når den er ved at være udbrændt.

1.1.2 To-kammer forbrænding

To-kammer forbrænding anvendes i dag i langt de fleste brændekedler. Her ligger brændet på en rist og luften doseres nedenfra. Fordelen er, at der konstant er samme afstand til brændslet, men også at der dannes en god turbulens/opblanding, når luften og røggassen går imod hinanden. Samtidig undgår man opvarmning og ufuldstændig/dårlig forbrænding af det øverste brændsel, idet det kun er det nederste glødelag der er ”i gang” og i kontakt med forbrændingsluften.

To-kammer forbrænding kaldes også omvendt forbrænding når gasserne afbrændes i et kammer under brændslet og flammerne således går nedad og ikke op igennem brændslet som i et-kammer forbrænding.

I to-kammer forbrænding foregår afgasning og primær forbrænding i kammer et (hvor brændslet ligger), mens den sekundære forbrænding foregår i kammer to. Under afgasning forlader de brændbare gasser brændslet ved tilførsel af primær forbrændingsluft. Gasserne består primært af CO, H₂ og kulbrinter. De afbrændes efterfølgende i det sekundære kammer under tilførsel af sekundær forbrændingsluft.

I glødelaget afbrændes den resterende kulstof/koks andel vha. den primære luft.

På Figur 2 ses et eksempel på en brændekedel med to-kammer/omvendt forbrænding.



FIGUR 2
EKSEMPEL PÅ TO-KAMMER FORBRÆNDING

Grundideen i projektet er som nævnt at dette princip skal afprøves på en halmkedel.

1.2 Mål og succeskriterier

Projektets formål er at udvikle en halmkedel med lave emissioner - særligt med fokus på partikler, CO, OGC og NO_x. De konkrete mål og succeskriterier for projektet er som følger:

- Den nominelle ydelse skal være ca. 400 kW
- Emissioner skal leve op til EN303-5:2012, klasse 5 (CO, OGC og partikler)
- NO_x emissionen skal leve op til østrigske krav (Annex C i EN303-5: 2012)
- Virkningsgraden skal leve op til EN303-5:2012, klasse 5

I tabel 2 ses de konkrete mål.

TABEL 2
MÅL FOR PROJEKTET

Parameter	Mål	
Nominel ydelse	ca. 400	kW
CO emission	700	mg/m _n ³ ved 10% O ₂
OGC-emission	30	mg/m _n ³ (ved 10% O ₂)
Partikelemission	60	mg/m _n ³ ved 10% O ₂
NO _x -emission	600	mg/m _n ³ ved 10% O ₂
Virkningsgrad	89	%

Målene skal kontrolleres opfyldt ved afsluttende test iht. EN303-5:2012.

1.3 Særlige udfordringer

Der er forskellige forhold der gør at der er særlige udfordringer ved at overføre princippet til en stor portionsfyret halmkedel:

- Kedlen skal kunne imødegå de driftsmæssige udfordringer der er ved manuel fyring, eksempelvis i relation til påfyring med frontlæsser. Det skal være let at placere ballen korrekt i kedlen og kedelkonstruktionen skal være robust.
- Kedlen skal kunne imødegå at der er betydelig risiko for slaggedannelse og tæring af kedeldele ved fyring med halm.
- Forbrændingsteknisk er det udfordrende at opnå de ønskede lave NO_x - og partikelemissioner, da indholdet af nitrogen og kaliumsalte er betydeligt højere i halm end i eksempelvis træ.
- Halmens forbrændingskvalitet varierer med forhold som jordtype, nedbør under vækstperioden, kornsorten samt behandling i forbindelse med høst. Kedlen vil derfor skulle kunne håndtere halm af meget forskellig beskaffenhed.

2. Litteratur- og markedsundersøgelse

Formålet med studiet har været at undersøge state-of-the-art for portionsfyrede halmkedler, især med fokus på anvendelse af to-kammer forbrænding.

2.1 Søgningmetode og resultater for litteratur- og markedsundersøgelse

For at finde ud af den aktuelle status med hensyn til kommercielle, præ-kommercielle systemer og F&U, er der udført undersøgelser i relation til tidligere og nuværende forsøg på at udvikle en portionsfyret halmkedel med omvendt forbrænding.

Søgning er udført som følger:

- En generel søgning via internettet
- En videnskabelig database og patentsøgning
- En specifik internetsøgning på biomassekedelbranchen
- Indsamling af oplysninger gennem Teknologisk Instituts europæiske netværk af virksomheder og akademiske institutioner

Efter en grundig søgning kan det konstateres, at der med en enkelt undtagelse ikke foreligger nogen form for kommercielle eller prækommercielle systemer, som anvender konceptet med omvendt/2-kammer forbrænding i forbindelse med portionsfyring af halm. Det eneste kendte system, som det har været muligt at opspore, produceres af virksomheden Herlt i Tyskland. En uddybende beskrivelse af produktet findes i Bilag 3. Det konkluderes, at der ikke findes et dokumenteret fungerende koncept med lave emissioner i omvendt/2-kammer forbrænding.

2.2 Generel internetsøgning

Der blev udført en google søgning på internettet med forskellige kombinationer af alle, eller nogle af følgende grupper af nøgleord:

- boiler, furnace, kessel
- straw, biofuel, biomass, stroh, hay
- batch, manual
- combustion, chamber, upside down, top-down, reverse, brennkammer
- straw bale, bale of straw, strohballen

Denne søgning gav ikke noget relevant resultat udover det i Bilag 3 beskrevne produkt fra Herlt.

2.3 Videnskabelig database og patentsøgning

En søgning er blevet udført i de faglige databaser Scopus og ScienceDirect. Der blev i disse søgninger brugt de samme grupper af nøgleord som i den generelle internetsøgning.

Endvidere blev patentsøgningsfunktionen i Scopus' database anvendt. Ydermere blev der udført patentsøgning i den amerikanske patent og varemærkestyrelse (United States Patent and Trademark Office på www.uspto.gov) og i det europæiske patentregister (EPO på register.epo.org).

Udover Herlts patenter blev der ikke fundet koncepter svarende til portionsfyret halmkedler med omvendt/2-kammer forbrænding.

2.4 Specifik internetsøgning i branchen for biomassekedler

Der er lavet en gennemgang af produkterne fra forskellige producenter af portionsfyrede halmkedler for at finde ud af, om nogle af dem har kommercialiseret kedler med omvendt forbrænding eller forbrænding i to kamre. I søgningen er der ikke fokuseret på konkrete lande eller markeder, idet antallet af virksomheder der producerer portionsfyret halmkedler er relativt lille. Desuden eksisterer der ikke, som det kendes fra automatiske træpillekedler, et land eller marked der tydeligt er førende på området.

De undersøgte virksomheder er:

- Farm2000, UK (www.farm2000.co.uk)
- Step Truntnov, Tjekkiet (www.steptruntnov.cz),
- GlenFarrow, UK (www.glenfarrowbiomassboilers.co.uk)
- Topling, UK (www.toplingbiomassboilers.co.uk)
- Limes Innovation EOOD, Bulgarien (www.limesboilers.com)
- Herlt, Tyskland (www.herlt-strohheizung.de)
- Ecoprotect Industrie- und Handelsges. m. b. H. Ungarn (www.ecoprotect.com)
- Celsiussplussz, Ungarn (www.celsiussplussz.hu)
- Hurst Boiler, US (www.hurstboiler.com)
- Graso, Polen (www.kotly.graso.com.pl)
- Emko, Tyrkiet (www.emkoisi.com)
- Passat Energi, Danmark (www.passat.dk)
- Alcon, Danmark (www.alcon.nu)
- Skovager Kedler, Danmark (www.skovagerkedler.dk)

Igen er det kun Herlt der har produkter, som involverer et 2-kammer system i forbindelse med afbrænding af halmballer i portionsfyrede kedler.

2.5 Indsamling af informationer gennem Teknologisk Instituts europæiske netværk

E-mails blev sendt til forskellige af Teknologisk Institut centrale kontakter inden for biomasseforbrænding med forespørgsel om deres kendskab til igangværende eller afsluttede studier omkring portionsfyrede halmkedler med lave emissioner. Af de positive besvarelser der blev modtaget, omhandlede ingen 2-kammer forbrændingssystemer.

De kontaktede virksomheder og institutioner var som følger:

- TFZ, Germany, www.tfz.bayern.de

TFZ er et teknologi og support center af den bayerske Ministeriet for fødevarer, landbrug og skovbrug. Et af deres forskningsområder er faste biobrændsler, hvor de beskæftiger sig blandt andet med den termiske anvendelse af biomasse.

- BioEnergy2020, Austria, www.bioenergy2020.eu

BioEnergy2020 er det østrigske kompetencecenter for bioenergi forskning. Et af deres kompetenceområder er forbrænding hvor der arbejdes med forbedring og udvikling af biomasse-systemer.

- Umeå Universitet, Sverige, www.umu.se

Ved siden af undervisning driver Umeå Universitet forskning inden for en række områder, herunder energi og biomasse.

- Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt, Østrig, www.josephinum.at

BLT er en afdeling under ministeriet for landbrug, skov, miljø og vand der udfører forskning og prøvning inden for biomasse og landbrugsteknik.

- SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Sverige, www.sp.se

SP har kompetence til udvikling og evaluering af teknologier, materialer, produkter og processer og er bindeled mellem forskning og kommerialisering. På biomasseområdet arbejder SP arbejder både med forskning og prøvning af biomassekedler.

3. Princip for halmkedel

I forbindelse med det første projektmøde diskuteres det, hvilket forbrændingsprincip der skal anvendes. I forhold til de muligheder forundersøgelsen har afdækket er der imidlertid ikke så meget at vælge imellem. Hvis ikke konstruktionen skal blive for kompleks og dyr er umiddelbart kun ristefyret to-kammer forbrænding en reel mulighed. De andre alternativer (se Bilag 1) er alt for komplekse og vil gøre kedlen uforholdsmæssigt kompliceret og dyr. Hvis kedlen skal blive en kommerciel succes er det afgørende, at den holdes så simpel og let at betjene som muligt.

3.1 Valg af forbrændingsprincip

I projektgruppen er der, på baggrund af ovenstående, hurtigt enighed om, at to-kammer forbrænding er det mest oplagte princip. Det er det enkleste og er gennemtestet i mange moderne brændekedler. Umiddelbart vurderes det, at det vil kunne overføres til en halmkedel. Hvis det laves rigtigt. Den primære forbrænding/afgasning skal foregå på en rist mens den sekundære forbrænding/gasafbrænding skal foregå i et kammer umiddelbart efter det primære kammer.

En af de helt særlige udfordringer ved halm er, at den er meget slem til at danne slagge. Dette problem findes ikke med brænde. Slaggen dannes når temperaturen i glødelaget/askelaget når op over askens smeltepunkt. For træ er det ca. 1400-1500 °C mens det for halm er ca. 600-700°C. Det skyldes, at halmaske har et stort indhold af kaliumsalte. Derfor skal temperaturen i brændslet/glødelaget enten holdes under denne temperatur eller også skal den slagge der dannes kunne håndteres uden at blokere for risten.

Det besluttet indledningsvist at forsøge at gå efter den første løsning - nemlig at lave brænderdelen, så temperaturen holdes under smeltepunktet. Det betyder, at der på risten kun skal foregå afgasning og ikke forbrænding. Under forbrænding vil der være ca. 1000-1200 °C i glødelaget – altså langt over temperaturen for slaggedannelse mens temperaturen - afhængig af lufttilførslen/luftunder-skuddet - vil kunne holdes væsentligt lavere, hvis der kun afgasses.

Under afgasning omdannes brændslet ved tilførsel af luft til brændbare gasser uden, at gasserne afbrændes. Brændslet vil afgasse primært i form af kulilte (CO), brint (H₂) og kulbrinter (C_xH_y). Gassen skal så efterfølgende afbrændes i et sekundærkammer under tilførsel af luft.

Ud over slaggeproblematikken skal kedlen også kunne håndtere, og gerne begrænse den kraftige støvemission, som opstår ved afbrænding af halm. Det sker for langt størstedelens vedkommende i form af kaliumsalte, som afdamper under forbrændingen og kondenserer igen, når temperaturen i røggassen falder. Det skal afprøves om saltene i et omfang kan holdes i kedlen i stedet for at gå med røggassen.

Endelig har det høj prioritet, at kedlen konstrueres, så den er så holdbar, driftssikker og nem at betjene og vedligeholde som muligt.

3.2 Ide til første model

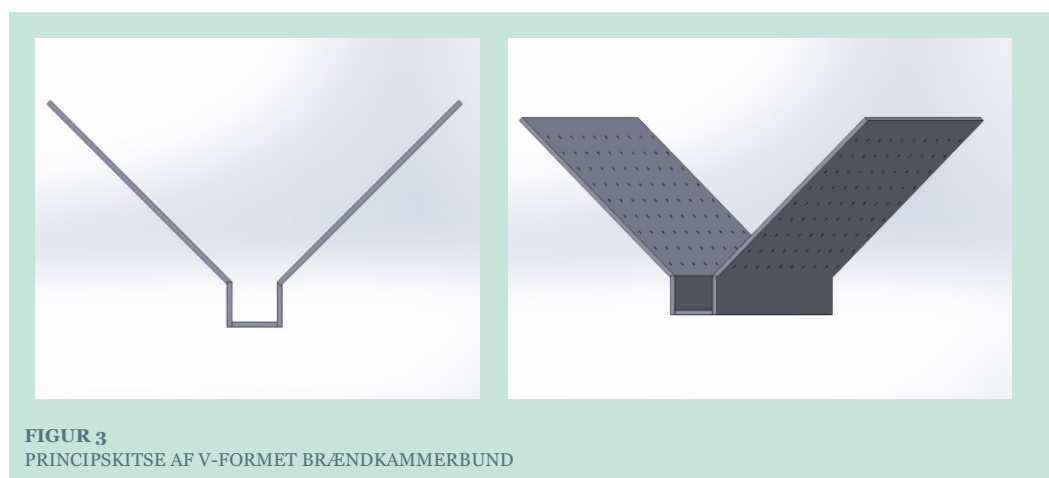
Der afholdes indledningsvist et arbejdsgruppemøde, hvor idéer til udformning af det primære- og sekundære kammer diskuteres. Den første ide, som ønskes afprøvet, er et primærkammer med v-formet ristebund.

Ideen er, at der laves en V-formet brænder, hvor ballen lægger an på bærerrør, som står vinkelret på bunden. Bærerrørene skal sikre at der er en luftspalte under ballen, som primærluften kan doseres i. Luften skal tilsættes via huller i bundpladen. Luftmængden skal tilpasses så den præcist afgasser ballen uden at den afbrændes. Tilføres for lidt luft vil der ikke ske tilstrækkelig afgasning og gassen vil blive for "tynd" og kold. Tilføres for meget luft vil der ske en egentlig forbrænding direkte på ballen og temperaturen vil blive så høj at der dannes slagge. Gasserne skal afbrændes i et sekundært brændkammer umiddelbart efter primærkammeret.

Brænderen/primærkammeret skal laves i syrefast materiale og i en kraftig godstykkelse, så den kan holde til belastningerne. Derudover vil det formentlig være nødvendigt på den endelige model at vandkøle bunden, men det vil der blive taget stilling til på et senere tidspunkt. I første omgang skal princippet afprøves, det vil sige, det skal afprøves om der kan laves en tilfredsstillende gas i primærkammeret uden der dannes slagge.

Udformning og sekundærkammer og afbrænding af den producerede gas er i første omgang ikke det mest interessante. Hvis det lykkes at producere en god gas i primærkammeret, dvs. en gas der er let antændelig, vil der forholdsvis let kunne laves et anvendeligt sekundærkammer som kan afbrænde den.

På Figur 3 ses en principskitse af den v-formede ristebund.



Luften doseres via primærlufthullerne i bundpladen, ballen afgasser (og forsvinder) og gasserne ledes via den nederste kanal til sekundærkammer - og afbrænding.

Det aftales, at der indledningsvist konstrueres en miniudgave af primærbrændkammeret for at se om princippet overhovedet fungerer og om det er muligt at afgasse en hel balle uden det hele stopper til i aske, slagge og sammensintring.

En miniudgave er langt hurtigere at fremstille og en lille balle langt mere håndterlig end en stor. En minibrænder vil kunne laves uden vandkøling, hvilket vil forenkle konstruktionsarbejdet væsentligt.

I det følgende afsnit beskrives udvikling og test af minibrændkammeret.

4. Indledende tests med minibrændkammer

Som nævnt i forrige afsnit bygges der indledningsvist et minibrændkammer som passer til en lille balle. Det overordnede princip vil således kunne afprøves uden at skulle have ild i en Big balle på 500 kg. Er forsøget en succes vil det efterfølgende være muligt umiddelbart at opskalere til en større og mere kompleks version.

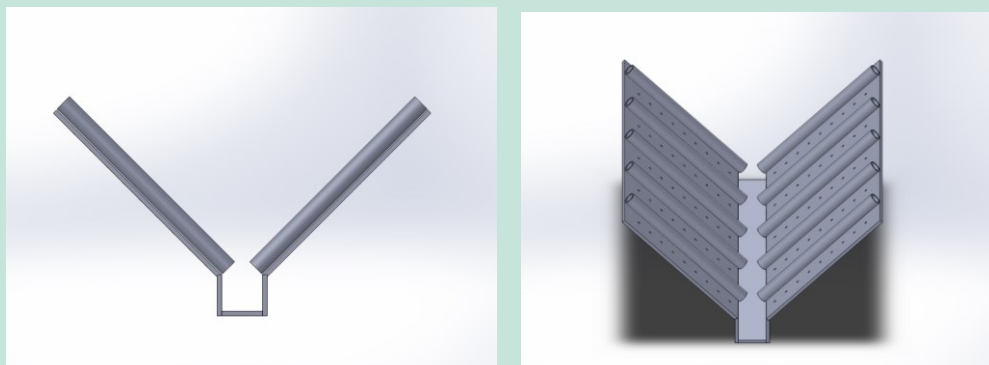
Tanken er, at minibrændkammeret dimensioneres så lufttilførsel, i forhold til dysestørrelse, afstand til dyser og lufthastighed vil være det samme som i en fuldskala udgave. Det vil derved være muligt umiddelbart at opskalere til fuldskala med en vis sandsynlighed for, at billedet vil være nogenlunde det samme som tilfældet er med en lille balle.

Der vil naturligvis være forskel i forhold til eksempelvis, hvor hårdt ballen er presset, hvilket vil kunne kræve ekstra opmærksomhed men i grove træk ventes det, at billedet vil være nogenlunde det samme med stor og lille balle.

4.1 Udformning af minibrændkammer

På Figur 4 er vist, hvordan brændkammeret konstrueres. Det dimensioneres til en ydelse på ca. 90 kW. Lufthastigheden gennem dysehullerne sættes til 6 m/s, idet Faust har erfaring for, at det er optimalt.

Brændkammeret bygges i plade med en godstykkelse på 6 mm og der laves 50 6 mm huller med 100 mm afstand. Brændkammeret dimensioneres så det præcist passer til en lille balle. Afslutningsvist isoleres kammeret så det holder på varmen til afgangningen.



FIGUR 4
V-FORMET BRÆNDKAMMERBUND MED BÆRERRØR

4.2 Test med minibrændkammer

Det overordnede formål er at undersøge, om ballen kan afgasses med en tilfredsstillende gas uden slaggedannelse. Teoretisk skal temperaturen gerne være under 700°C for at undgå slaggedannelsen mens gassammensætningen skal have så højt et indhold af CO og C_xH_y , og et så lavt indhold af O_2 , som muligt. I gassen fra primærkammeret skal CO over 6-7%, for at være antændelig i sekundærkammeret. CO_2 skal under 15-16% og gerne ned i nærheden af 10-11%.

Det opnås ved at sikre en passende temperatur og et passende luftunderskud. Der skal tilføres præcis luft nok til at ovennævnte gasser dannes. Tilføres for meget luft vil der ske en egentlig forbrænding og dermed være for høj temperatur. Den vil i stedet for de ønskede $600\text{--}700^{\circ}\text{C}$ ligge på $1000\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ – og slaggedannelse vil ikke kunne undgås. Tilføres der for lidt luft vil temperaturen være for lav og processen ineffektiv – og til sidst gå i stå.

På Figur 5 ses brændkammeret hhv. før, under og efter test.



På billedet øverst til venstre ses dysehullerne og bærerrørene i bunden af kammeret samt kanalen nederst, som leder gassen videre til sekundærkammeret. Øverst til højre er der stoppet en balle i brænderen og den er klar til optænding. Nederst til venstre er kassen lukket og isoleret og ballen under afbrænding. Nederst til højre ses brændkammeret efter afbrændingen.

I det viste eksempel er ballen helt afgasset og i bunden ligger kun fint aske. Der er ingen slagge, sammensintret materiale eller uforbrændt brændsel tilbage hvilket viser at princippet har fungeret. Det har været muligt at afgasse en balle 100% uden slagge dannelse.

I det følgende gennemgås i logbog-form testrækken. Der opsummeres og konkluderes til sidst.

Test 1 med minibrændkammer

Fin opstart og masser af røg. Dog tvivl om forbrænding/afgasning er ok, da O_2 er forholdsvis højt. Derfor prøves forskellige indstillinger af træk. Ingen umiddelbar effekt. Det viser sig efter en god halv time, at ballen er fuldstændig væk. Det svarer ca. til 90 kW. Temperaturer i fyrboks og røggas ca. 600°C. Hovedformålet med testen var at undersøge, om ballen kunne afgasses uden at danne alt for meget slagge. Dette viste sig muligt allerede i første test. Efterfølgende tests bruges derfor på at optimere på gassen og temperaturerne. I gassen er der for meget O_2 og temperaturerne i fyrboks og røgrør er lidt for lave.

Test 2

Fyrboks isoleres og øverste kant afstives med firkantprofil og der prøves igen. Igen meget let opstart. Meget stabil drift. Længe med CO_2 på 14-15%, CO på 7% og OGC på 1,5%. Temperaturer mellem 600 og 700°C så tæt ved perfekt. Balle er brændt ud. Ser igen rigtig fint ud – dog en ganske lille tendens til lidt meget let sammensintret aske men forsvindende lidt som ikke kan flyttes uden at falde fra hinanden. Dog mere end test 1. Skyldes formentlig, at temperaturen har været lidt højere.

Test 3

Spalten for enden af ballen (ca. 10 cm) lukkes med et presseslag. Derudover monteres sekundær kammer. Opstartsforsøg kikser i første omgang fordi røgrøret ikke er monteret til suger. Efterfølgende konstateres, at røgsuger ikke er i stand til at lave tilstrækkeligt træk i fyrboks. Skyldes at hullet i dysen i sekundærkammer er for småt.

Test 4

Nyt sekundærkammer med større lysning i dysen. Derudover er kanal i bund isoleret. Ellers ingen ændringer. Det droppes at proppe presseslag ned bag ballen idet det mistænkes for at kunne kile ballen fast så den bliver ”hængende”. Opstart sløvt i forhold til test 1 og 2. Der kommer aldrig rigtig gang i forbrændingen. Det viser sig at styringen til røgsugeren kører ustabil og at trækket ikke kan komme langt nok op. Stoppes og genstartes nogle gange og ser til sidst ud til at fungere. Testen er imidlertid mislykkedes og låget afmonteres og det sidste af ballen brændes væk. Det overvejes om det også er fordi fyrboksen har været kold, at det har været svært at få gang i forbrændingen. Til næste test er den varm, så vil det vise sig om det er bedre.

Test 5

Bedre opstart men fortsat ringere end test 1 og 2. Røgsuger kan fortsat ikke give de ønskede 45 Pa træk i fyrboksen. Momentvis høj CO_2 og CO. CO_2 ca. 17,5 % og CO ca. 9%. Det vurderes, at afgasningen er ok. Faust er imidlertid bekymret for konstruktionen med hulpladerne. De vil hellere have luften tilført ved toppen af hulpladerne enten gennem slidser eller et rør, som ligger på tværs. Det skal afprøves. Derfor blændes alle huller bortset fra den øverste række af, og øverst laves der slidser mellem hullerne så al luften skal doseres derigennem. Derudover vil Faust gerne teste tilførsel af sekundær luft før sekundærkammer. Der laves derfor et hul på hver side af den nederste kanal lige før udgang til sekundær kammer.

Test 6

Forsøg på opstart, kommer aldrig rigtig i gang, så det hele hakker lidt afsted. Luftindtag begrænses med alutape idet det konstateres at spalterne giver mere luft end hullerne gjorde. Dette fjernes dog hurtigt igen idet det ingen synlig effekt har. Pludselig stiger temperaturen i sekundærkammer, hvilket indikerer, at der har været flamme. Momentan stigning i CO_2 og fald i CO. Der kan dog ikke ses flammer gennem skueglas. Da låget åbnes konstateres en del glødende halm.

Test 7

Derudover bygges en varmluftsblæser på sekundærkammeret for at se, om det kan medvirke til at gasserne i sekundærkammeret antændes. Flowet kontrolleres i røgkanal og det konstateres, at det er for højt. Der er fortsat problemer med røgsugerens styring. Resættes nogle gange, hvorefter det ser ud til at fungere. Sekundær huller lukkes igen. Huller til luftkasser begrænses så der er 6 Pa dynamisk træk i røgkanal. Forsøg på opstart men forbrændingen kommer aldrig i gang. Det konstateres, at luftdoseringen kun via spalter ved toppen af ballens anlægsflader ikke dur. Det er nødvendigt at dosere den over hele anlægsfladen.

Opsummering

Positive output:

- Forsøget har vist, at en halmballe kan afgasses stort set uden slaggedannelse.
- Der kan opnås temperaturer, som ligger rimelig stabilt mellem 600 og 700 °C hvilket er præcist hvor de gerne skal ligge.
- Der kan laves en gas, som stort set er fri for O_2 med CO mellem 7 og 9 %, CO_2 mellem 14 og 17% og OGC op til ca. 1,5%.

Negative output:

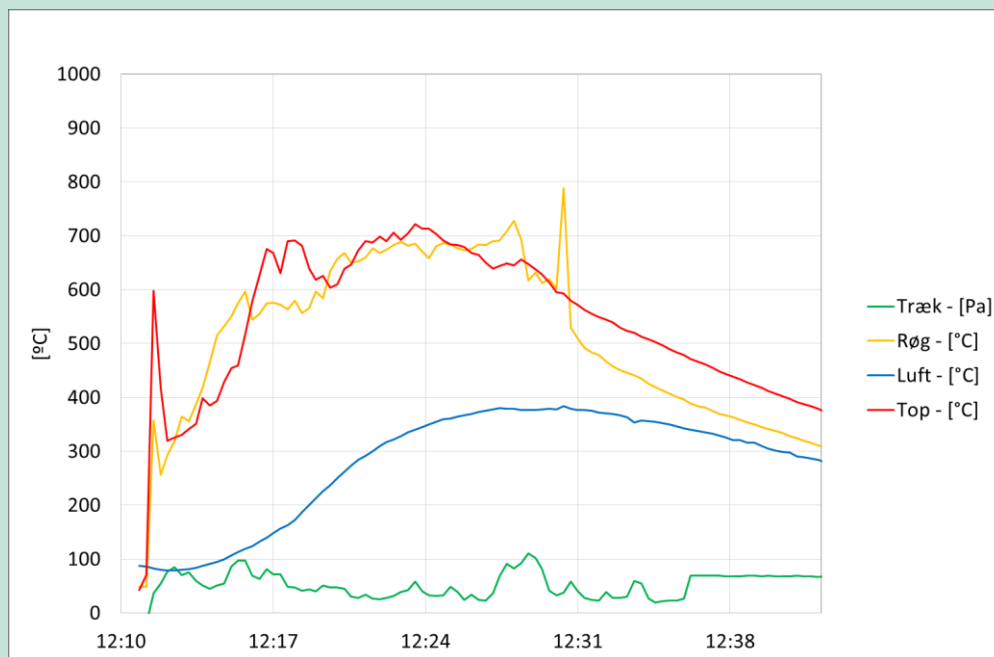
- Det har vist sig svært at få ild i gassen i sekundærkammer.

Spørgsmål som opstod:

- Vil det gå lige så godt i primærkammer med en hårdere presset balle (big eller mini big)?
- Kan konstruktionen laves, så den kan holde, når det har vist sig nødvendigt at dosere primærluften direkte ind på anlægsfladerne?
- Kan der laves et sekundærkammer, som kan tænde og vedholde forbrænding af gasserne?

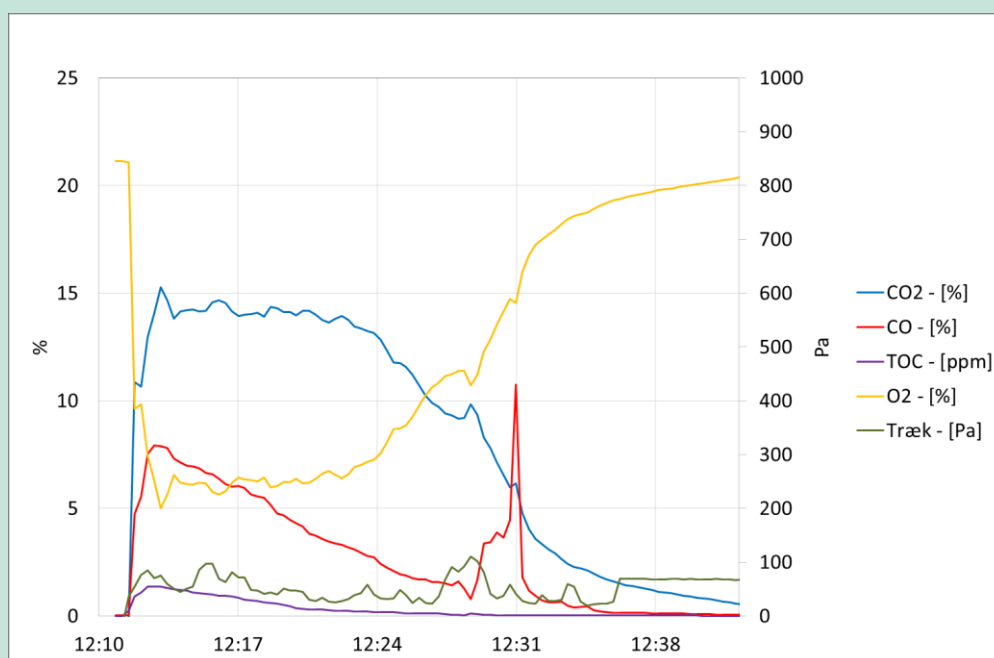
Bedste test (Test 2)

På Figur 6-8 vises kurver og data fra bedste test.



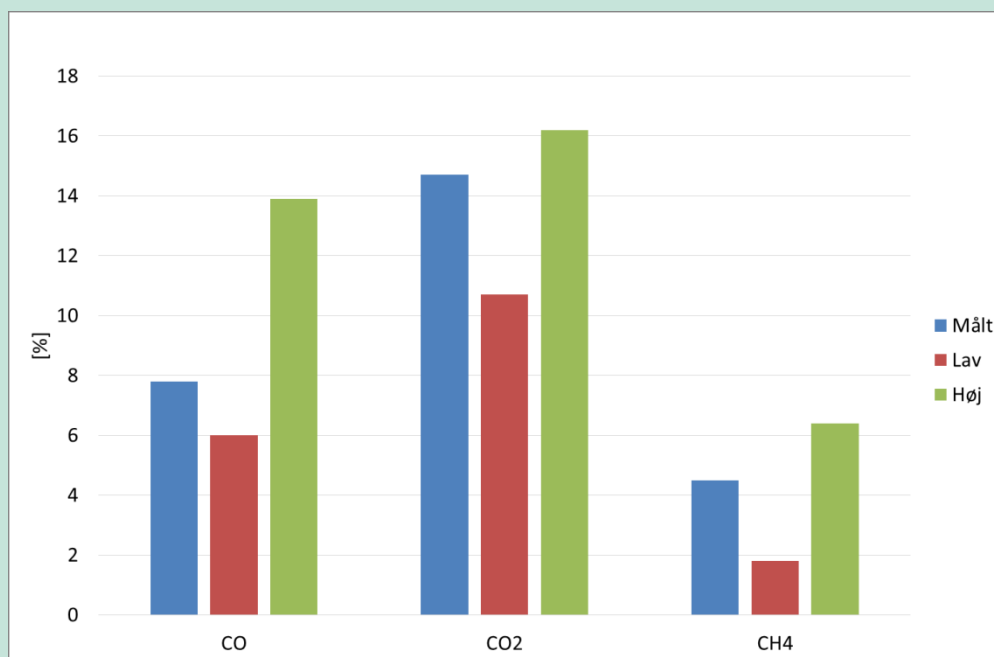
FIGUR 6
TEMPERATURER I MINIBRÆNDKAMMER UNDER BEDSTE TEST

Som det ses er temperaturen oppe at runde 700 °C, hvilket er som ønsket. Temperaturen skal helst ikke over 700°, hvis slaggedannelse skal undgås.



FIGUR 7
GASSAMMENSÆTNING I MINIBRÆNDKAMMER UNDER BEDSTE TEST

Af CO₂ målingen ses, at afgasningen starter ca. 12.11 og kører nogenlunde stabilt indtil ca. 12.22, hvorefter den aftager i takt med, at ballen forsvinder.



FIGUR 8
GASSAMMENSÆTNING I MINIBRÆNDKAMMER UNDER BEDSTE TEST SAMMENHOLDT MED ERFARINGSTAL
[ZIELKE 1991]

Som det ses er gassens sammensætning fornuftig i forhold til erfaringstal fra afgangning af biomasse, hvilket betyder, at princippet for afgangningen fungerer tilfredsstillende.

4.3 Opsamling på test med mini brændkammer

De to bedste forsøg viser, at ballen kan afgasses stort set uden slaggedannelse og at der kan opnås temperaturer som ligger rimelig stabilt mellem 600 og 700 °C, hvilket er præcist hvor de gerne skal ligge.

Der kan som ønsket laves en gas som stort set er fri for O₂ med CO mellem 7 og 9 %, CO₂ mellem 14 og 17% og OGC op til ca. 1,5%. Forsøget vurderes samlet som succesfuldt og næste skridt er derfor at gå op i ballestørrelse. Planen er at bygge en kedel med et primær kammer så stort at det passer til en big balle. Kedlen skal laves fleksibel, så flest mulige konfigurationer og indstillinger kan testes.

Det skal bl.a. undersøges om en stor hårdt presset balle afgasser lige så let og problemfrit som en lille. Derudover skal konstruktionen kunne holde rent mekanisk.

5. Udformning af kedel

version 1 & 2

På baggrund af erfaringerne med minibrændkammeret mødes projektgruppen for at diskutere designet på kedlen. Næste skridt er at gå op fuldskala og bygge en kedel så den passer til en big balle som måler 240 x 120 x 130 cm og vejer i omegnen af 500 kg. Det er standard størrelsen på den største balle som vil være relevant for kedlen.

5.1 Version 1 – overvejelser

Erfaringen fra forsøgene med minibrændkammeret var som beskrevet overordnet meget positive. Der blev lavet en fornuftig gas, temperaturen holdt sig på et fornuftigt niveau, ballen afgassede fuldt og der blev ikke dannet slagge. Som udgangspunkt vurderes det, at ideen er så god, at den kan danne grundlag for en fuldskala kedel.

Imidlertid er Faust usikre på, om de kan lave en konstruktion i det angivne design, som kan holde til belastningen og køre driftssikkert uden for meget besvær for brugeren. Der er især bekymring for, at bundpladerne brænder væk, idet Faust ikke vurderer, at de kan konstrueres så de kan vandkøles. Samtidig er der bekymring for, om aske og slagge vil kunne lukke lufthullerne til. Derfor har Faust en ny ide til konstruktionen der som udgangspunkt skal fungere efter samme princip.

I stedet for den V-formede ristebund i pladejern ønsker Faust, at risten laves af rør. Dels af et lag bærerrør, som ballen skal hvile på og dels et lag røg med luftdosering. Rørene skal kun være på den ene side af ballen og ikke på to sider som i tilfældet med minibrændkammeret. Ballen skal altså kun afgasse på én flade. Det vil sikre en konstant ydelse, idet arealet som brænder/afgasser er konstant hele ballen igennem.

Ydermere ændres designet, så ballen brænder på en endeflade i stedet for på siden. Det giver et mere kontrolleret brænderområde og vil gøre det nemmere at fylde ballen i magasinet. Samtidig vil det åbne op for, at der på et senere tidspunkt kan bygges automatik på brændselsfødningsen, så kedlen også vil kunne fungere som automatisk kedel.

Byggehøjden på kedlen skal holdes så lav som mulig, idet det har høj prioritet for Faust, at den er nem at fragte. Ideelt set skal den kunne være i en standard 20 fods container.

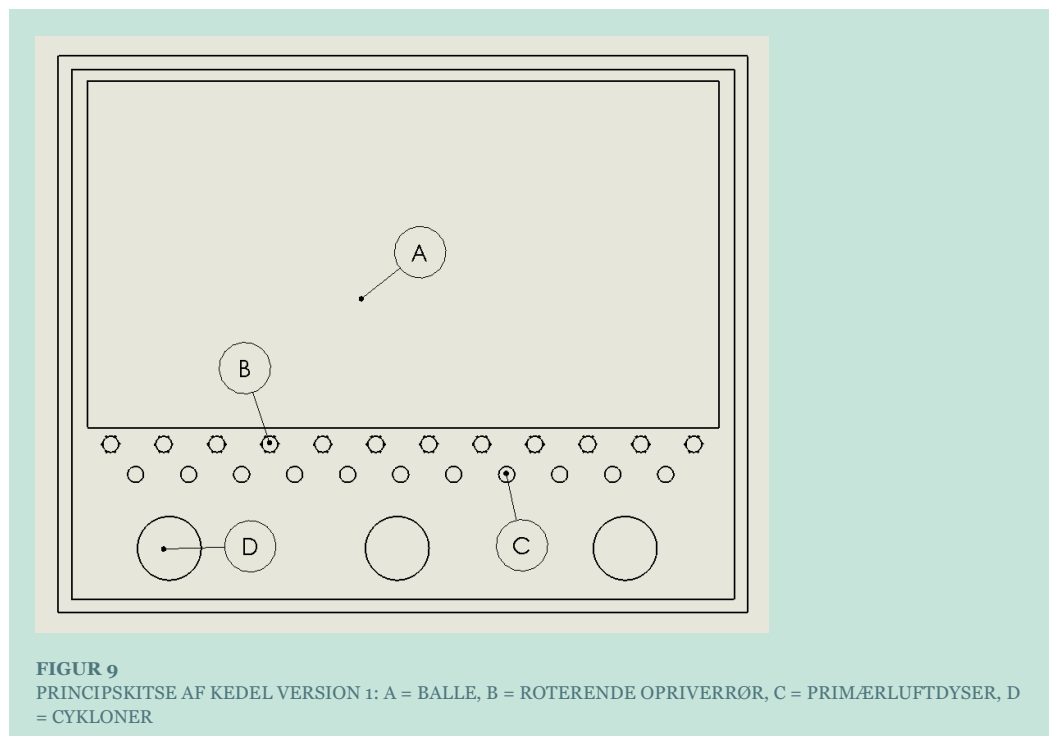
I primærkammeret skal der fortsat kun være afgang. Gasforbrænding skal foregå i et sekundærkammer enten bygget på siden af kedlen eller internt i kedlen. Ideelt set skal sekundærkammeret udformes som en cyklon og integreres i kedlens fyrboks.

Det overvejes, om der skal gives mulighed for recirkulation af røggassen (EGR) med henblik på at reducere NO_x emissionen. Det vil imidlertid ikke ske i den første udgave men kunne tages op og eventuelt bygges ind i en senere version hvis det viser sig at være nødvendigt.

5.1.1 Design

På Figur 9 vises princippet for kedlen. Som nævnt udføres den i fuldskala, så den passer til en Big balle. Tanken er, at den bygges i moduler, så forskellige konfigurationer kan afprøves uden det hele skal skæres fra hinanden og svejdes sammen igen. Der bygges ikke EGR ind i første omgang, men der gives mulighed for, at det senere kan indføjes.

Derimod skal der indbygges cykloner, som dels skal sikre en fuldstændig forbrænding af gasserne, og dels sikre at noget af støvet udfældes. Cyklonerne og den øvrige luftdosering dimensioneres vha. af CFD, hvilket sikrer det bedst mulige udgangspunkt i første forsøg.



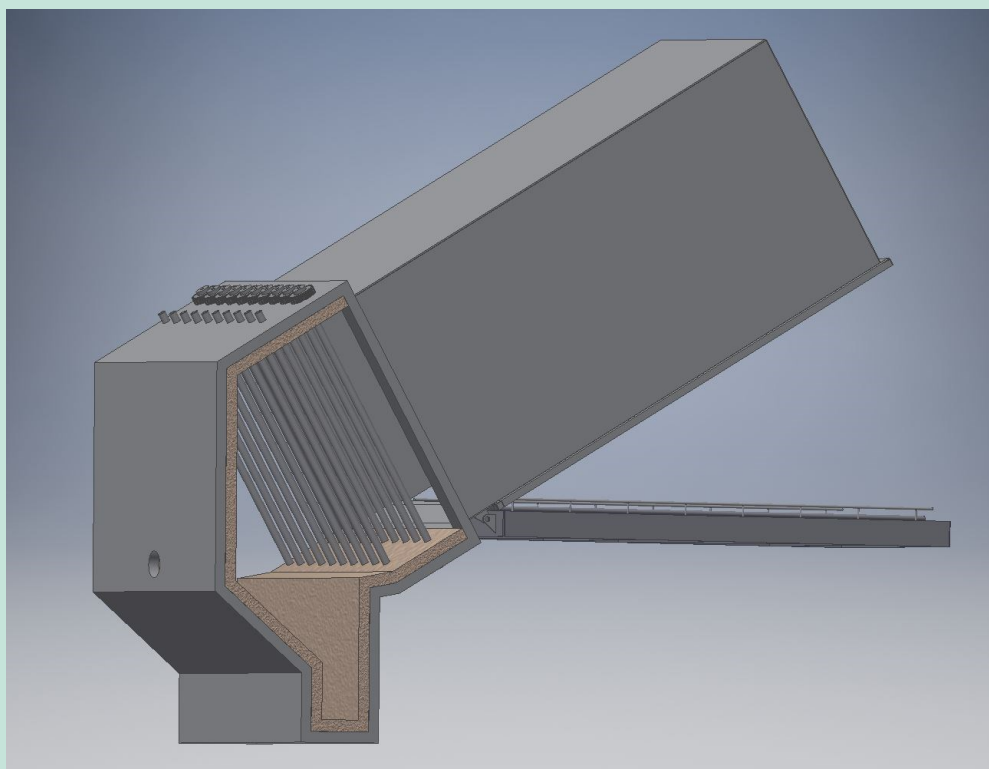
FIGUR 9
PRINCIPSKITSE AF KEDEL VERSION 1: A = BALLE, B = ROTERENDE OPRIVERRØR, C = PRIMÆRLUFTDYSER, D = CYKLONER

Ballen skal hvile på det øverste rørlag, mens det nederste rørlag skal fungere som primær dyser. Det øverste rørlag skal vandkøles, forsynes med knaster og kunne rotere så det river ballen op. Faust ved af erfaring, at det vil være nødvendigt. Alternativt vil ballens overflade hurtigt være omdannet til sammensintret aske og koks - og afgangningen vil stoppe.

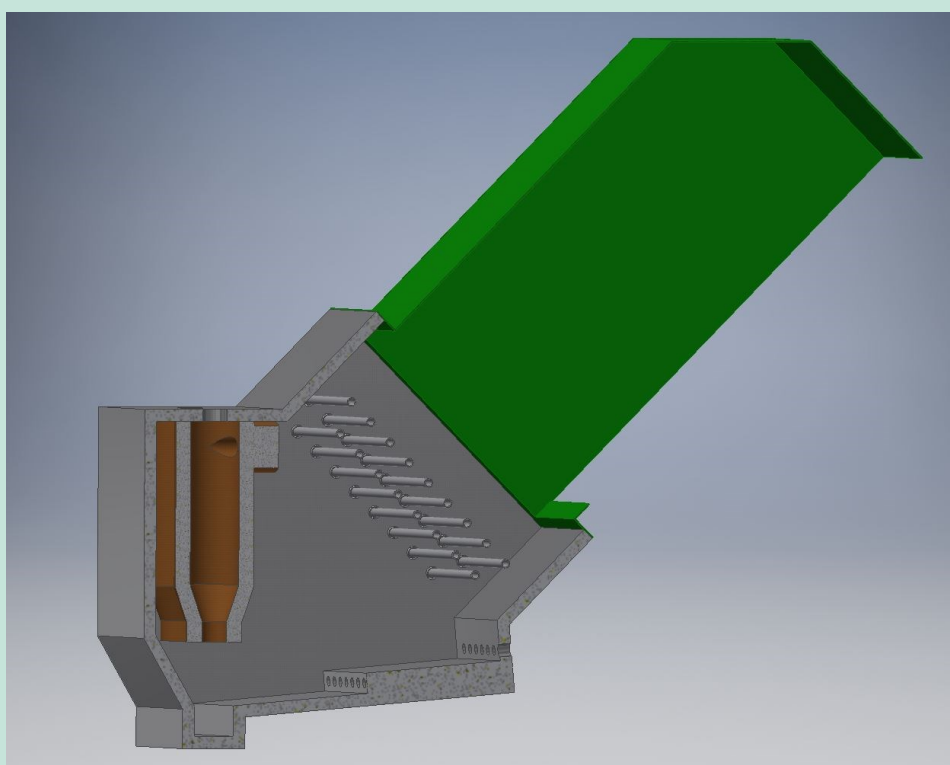
Det vurderes, at luftdysserørene vil kunne klare sig uden vandkøling, idet de naturligt køles af luftgennemstrømningen. Hvis det ikke viser sig at være tilfældet skal disse også vandkøles. Gasafbrændingen skal foregå i cykloner, som placeres inde i fyrboksen. Det vil sikre en god temperatur - og at kedlen designmæssigt holder de lige linjer.

Ballen skal falde til vha. tyngdekraften. Vinklen på ballen skal som udgangspunkt være 30° men den skal i forsøgsmodellen kunne varieres, hvis den viser sig at være for lille og ballen ikke vil skride ned mod bære- og dysserørene.

På Figur 10 og 11 er Fausts designforslag til kedlen vist i to varianter, hhv. med cykloner og plads for aske/slagge snegl/skubber.



FIGUR 10
FORSLAG 1 TIL KONSTRUKTION AF KEDEL VERSION 1



FIGUR 11
FORSLAG 2 TIL KONSTRUKTION AF KEDEL VERSION 1

Som det fremgår af Figur 10 og 11, har to forskellige modeller været overvejet. Dels en model, hvor bære- og dyserør ligger vertikalt og dels en, hvor de ligger horisontalt. Samtidig er der overvejet forskellige udformninger af kedlens bund i forhold til aske/slagge håndteringen.

Endelig er der overvejet hhv. en model, hvor cyklonerne er placeret internt i fyrboksen og en model, hvor de kobles efter fyrboksen. Det endelige design fastlægges ud fra resultaterne af CFD beregningerne (se Bilag 2).

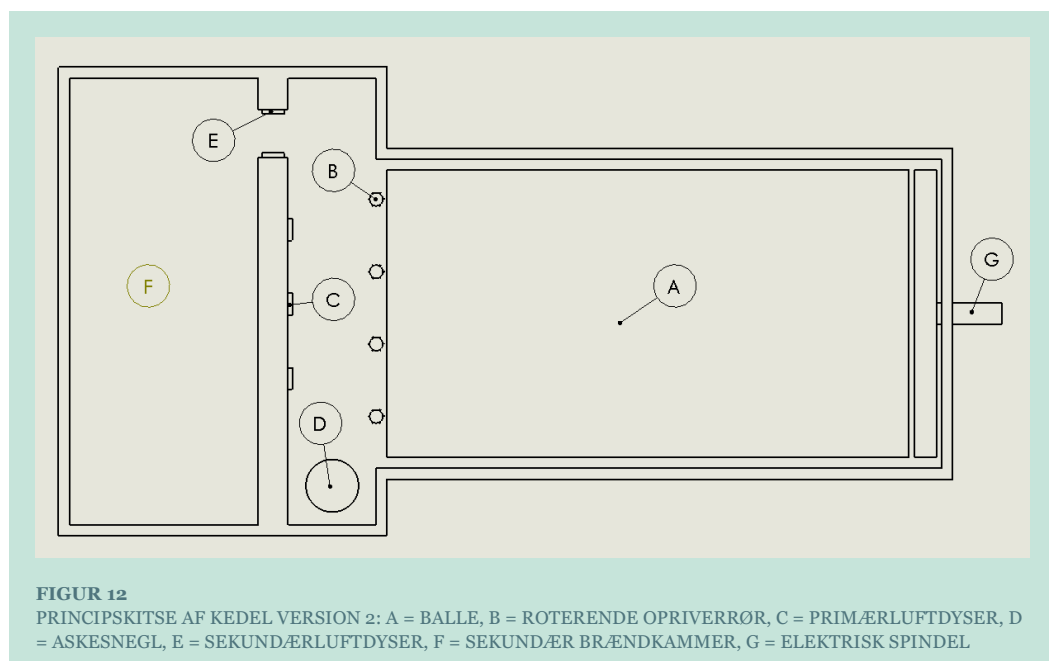
5.1.2 Konklusion på version 1

Ud fra CFD- beregningerne vurderes det, at der vil være gode muligheder for at designet vil kunne fungere om end designets betydning i forhold til støvemissionen forventes at være begrænset. Moduleringen viser en vis sandsynlighed for, at en andel af støvet vil afleje sig i cyklonen men også, at den største del vil følge med igennem.

Det er samtidig usikkert, om temperaturen i cyklonen vil være høj nok til, at der kan opnås en tilfredsstillende forbrænding. Derudover vurderer Faust, at det vil være besværligt at rengøre og servicere cyklonen, hvilket kan blive til betydelig gene for slutbrugerne. Endelig er der bekymring fra Fausts side i forhold til, at aske og slagge kan lukke luftdysehullerne. Faust har derfor i stedet en ny ide til nyt design – version 2 – som præsenteres i det følgende.

5.2 Version 2 – overvejelser

På baggrund af ovennævnte overvejelser ønsker Faust at afprøve et nyt designforslag. De to væsentligste nytænkninger i forhold til version 1 er, at risten stilles på højkant og at gasafbrændingen i stedet for i en cyklon sker vha. en sekundær dyse i et stort udmuret kammer.



FIGUR 12

PRINCIPSKITSE AF KEDEL VERSION 2: A = BALLE, B = Roterende OPRIVERRØR, C = PRIMÆRLUFTDYSER, D = ASKESNEGL, E = SEKUNDÆRLUFTDYSER, F = SEKUNDÆR BRÆNDKAMMER, G = ELEKTRISK SPINDEL

I stedet for tyngdekraften skal ballen trykkes mod risten /opriverrørene vha. en elektrisk spindel. Primær luften skal doseres via dyser placeret i væggen modsat ballen. Sekundær luften skal tilsættes i en dyse i væggen mellem primærkammeret og sekundærkammer, og gasserne skal udbrænde i sekundærkammeret.

Som i den forrige version skal ballen lægge an mod roterende opriverrør, som skal rive halm ud efter behov. I bunden af primærkammeret skal der være en askesnegl, som løbende skal fjerne aske og slagge.

I det store sekundærrum skal gassen brænde ud. Efter udbrændingen skal gassen ledes gennem et rørbatteri, hvor varmeenergien afgives før røggassen forlader kedlen.

Fordelen i forhold til version 1 er primært, at aske og slagge, hvis alt fungerer som ønsket, forsvinder fra brændzonen uden at blokere og samtidig at den ikke lukker for lufttilførslen, som der var risiko for i den første udgave.

Derudover vil der være bedre mulighed for at regulere på ydelsen, idet trykket på ballen vil kunne justeres i modsætning til version 1, hvor det alene var tyngdekraften som trak ballen mod opriverrørene.

Endelig vil det være nemmere at overholde ønsket om lav byggehøjde, når ballen kan placeres 100% horisontalt i stedet for i en vinkel på 30 – 60°.

Som udgangspunkt bruges de samme tal for luftdosering mv. som blev anvendt under CFD beregningen til version 1. Kedlen sættes således op til at have en nominel ydelse på ca. 400 kW.

5.2.1 Design

På Figur 13 ses en snittegning af kedlen. De forskellige positionsnumre viser kedlens væsentligste dele. Beskrives kort i det følgende.

Pos. 01: Vandkølede roterende opriverrør

Opriverrørene roterer og river derved halmen ud af ballen. Rørene kører med konstant hastighed. Hvor meget der rives ud bestemmes af trykket på ballen.

Pos. 02: Askesnegl

Askesnegl som automatisk fjerner aske og slagge fra primærkammer. Askesneglen skal enten kunne køre efter et fast interval eller ved hjælp af niveauføler.

Pos. 03: Fremføringsenhed

Enhed som trykker ballen frem mod opriverrørene. Den skal drives af en elektrisk spindel, som sikrer at der er et passende tryk mod opriverrørene.

Pos. 04: Primær luftdyser

Luftdyser jævnt placeret over ballens anlægsflade.

Pos. 05: Sekundær dyse

Sekundærdysen består af en kegleformet spalte med mindst lysning mod primær kammer og størst mod sekundærkammer. I spalten er der huller for dosering af sekundærluften.

Pos. 06: Sekundær kammer

I sekundærkammeret brænder gasserne ud før de går til konvektionsdelen.

Pos. 07: Konvektionsdel

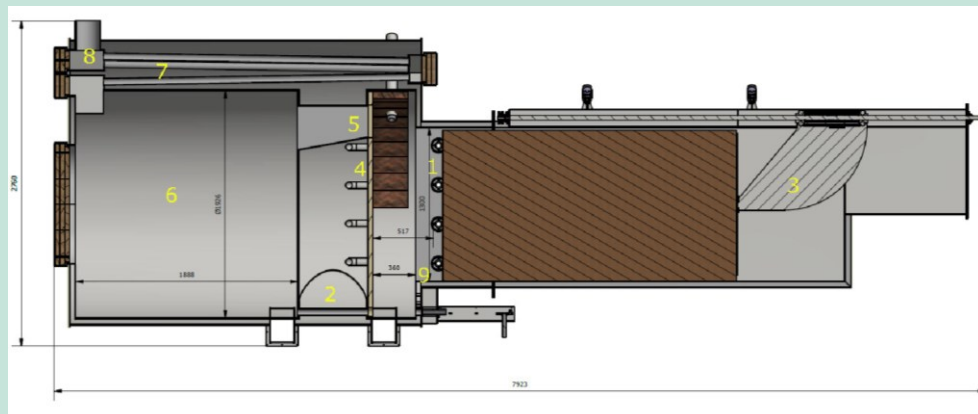
Konvektionsdelen består af to rørslag. Der er ikke turbulatorer i rørene.

Pos. 08: Røgafgang med lambdasonde

Lambdasonden måler røggassens iltindhold og giver besked til styringen. Styringen skruer herefter op eller ned for brændselsdoseringen – afhængig af om ilten er over eller under setpunktet.

Pos. 09: Autotænding

Autotændingen består af en varmeblæser, som sender en koncentreret varmemstråle mod ballen, når den skal tændes.



FIGUR 13
SKITSE OVER KEDEL VERSION 2

5.2.2 Test

Kedlen opstilles udendørs til den første testrække. Den kobles til Teknologisk Instituts 600 kW kølevogn og analysatorudstyr. Se nærmere beskrivelse i afsnit 8.1. På Figur 14 ses kedlen hhv. før og efter test den første testdag.



FIGUR 14
FULDSKALA KEDEL UNDER FØRSTE INDLEDENDE TEST

På billedet til venstre ses magasinet med en balle og til højre ses magasinet efter afbrændingen.

I første omgang afprøves det om kedlen kan køre rent mekanisk og om ballen kan afgasses og gasserne efterfølgende afbrændes. Kvaliteten af det hele er ikke afgørende i første omgang. Der vil senere kunne fintrimmes. Eksempelvis er det meget svært at vurdere, hvor meget primær luft der skal doseres for at kunne opnå afgasningen uden at afkøle.

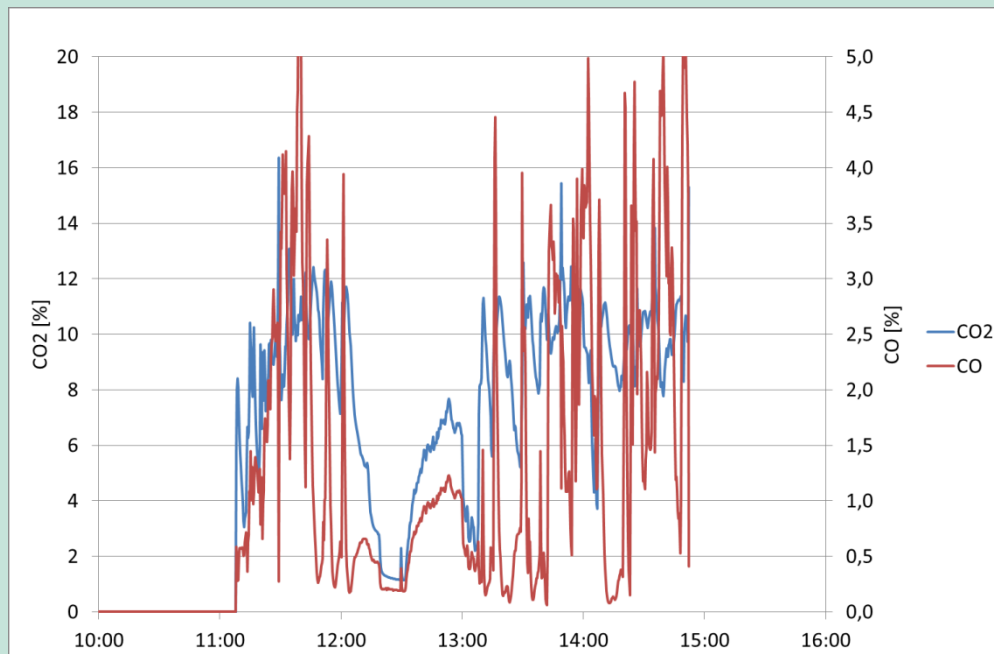
Det samme gælder sekundærluften, idet doseringen heraf afhænger meget af, hvor meget primær luft der tilsættes og hvilken sammensætning gassen har, når den når sekundærdysen.

Som udgangspunkt er det sikret, at blæserne er store nok til, at de kan levere rigelig luft til at kunne yde de 400 kW, der som udgangspunkt er målet. Fordelingen mellem primær og sekundær luft justeres indledningsvist manuelt vha. af spjæld.

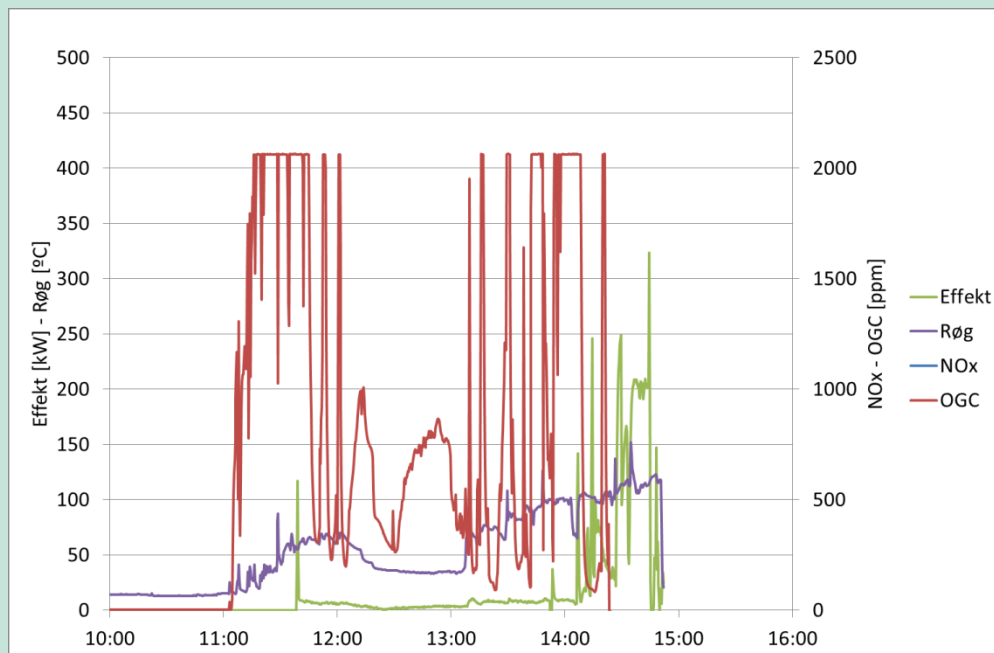
I det følgende vises tests med kedlen. De fleste tests kører med almindeligt grå halm, men der testes også med gult halm. Når der testes med gult halm fremgår det af den indledende tekst til testen. Brændselsanalyser findes i afsnit 7.

Test 1 kedel – version 2

Hvert forsøg er illustreret vha. to grafer, data samt beskrivelse af test. Den første graf viser CO₂ og CO som bruges som indikatorer på hvor god forbrændingen er. CO₂ indikerer, hvor godt der er gang i forbrændingen og skal gerne ligge mellem 12 og 16 %. CO indikerer ufuldkommen forbrænding og skal under ca. 0,07% (700 ppm) i gennemsnit for at overholde klasse 5. På den anden graf er vist kedeffekt, røggastemperatur, NO_x og OGC. Data og beskrivelse af test ses på efterfølgende side.



FIGUR 15
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER FØRSTE INDLEDENDE TEST



FIGUR 16
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER FØRSTE INDLEDENDE TEST

Herunder er det i punktform beskrevet, hvordan testen forløber. Der samles op nederst.

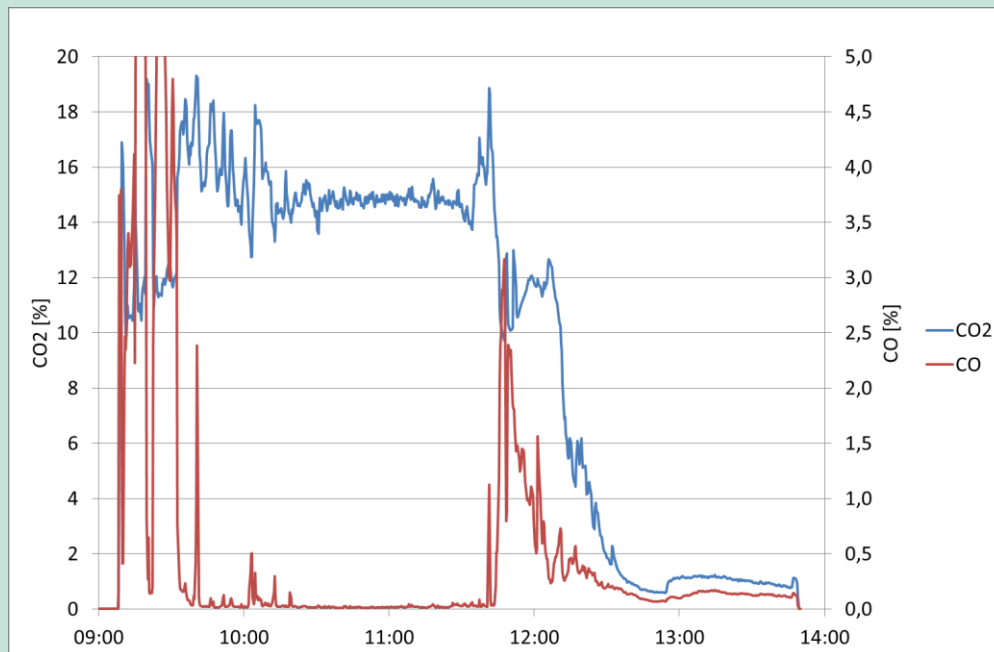
10:50	Opriver startes.
10:53	Ballen forsøges antændt. El-tænder fungerer ikke. Formentligt en styringsfejl.
11:05	Ballen tændes med gasbrænder. Ballen er antændt. Mangler primær luft.
11:08	Der ses tydelig forbrænding i primær brændkammer.
11:16	Forbrændingen i primær brændkammer pulserer.
11:29	Der observeres kortvarigt flammer i sekundær brændkammer.
11:40	Røgsuger skrues op til at køre 60 Pa i stedet for 35 Pa undertryk.
11:46	Forbrændingen i primær brændkammer er faldet lidt til ro og der ses indikationer på antænding i det sekundære brændkammer.
11:49	Røgsugere kører 200 Pa undertryk og ballen er trykket længere frem.
13:00	Der monteres større blæser, da der ikke er kapacitet nok til primær forbrænding.
13:30	Primær luftmængden øges.
13:37	Opriverør kører kontinuert. Der observeres bedre bål i primært brændkammer.
13:40	Sekundær luft reduceres. Der observeres lange flammer i sekundært brændkammer.
14:11	Forsøget stoppes. Det vurderes at der skal mere temperatur i primært brændkammer samt i kanalen til sekundært kammer. Skamolskærm indsættes i primært kammer på væg med dyser for at få temperaturen op.
15:30	Opriverør sættes til at køre kontinuert og ballen presses frem. Dette resulterer i en ca. 10 min lang forbrænding i det sekundære brændkammer, emissioner kendes ikke.

Det har vist sig svært at få ordentlig gang i forbrændingen i det sekundære kammer. Årsagen vurderes at være, at temperaturen i primærkammer er for lav og at sekundærdysen er for kort.

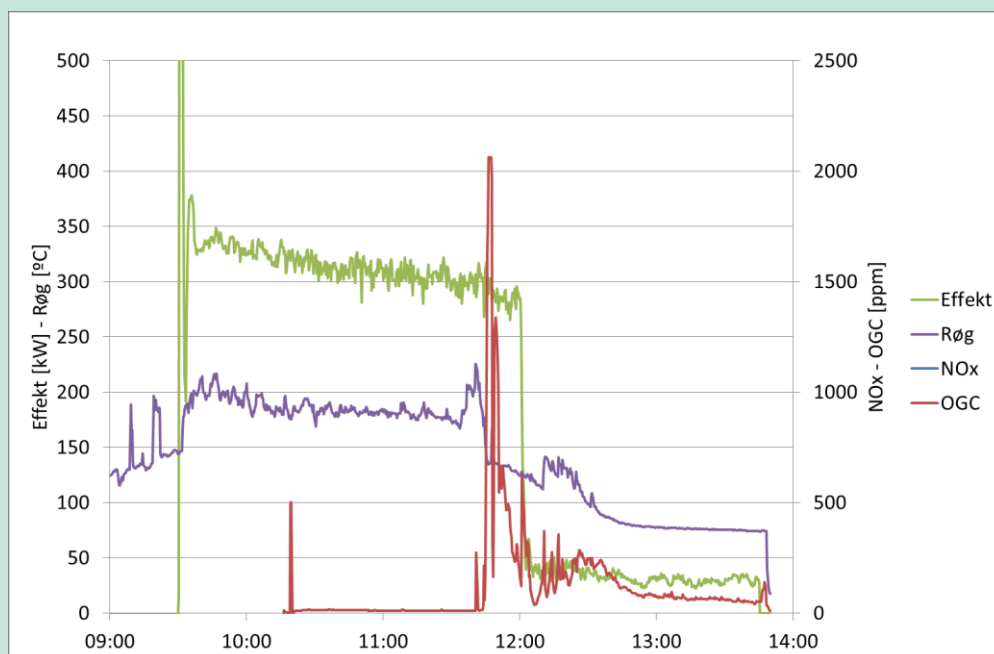
Dette ændres til næste forsøg. Primærkammer isoleres med skamol og sekundærdysen forlænges.

Test 2 med kedel – version 2

Kedlen er ombygget i forhold til første test. Der er opsat skamol på bagvæggen i det primære brændkammer, med udkæringer for primærdyserne. Desuden er kanalen fra det primære kammer til det sekundære forlænget ind i det sekundære brændkammer. Endelig er der monteret ny gearmotor til opriverrørene, idet den oprindelige ikke var stærk nok.



FIGUR 17
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER ANDEN INDLEDENDE TEST



FIGUR 18
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER ANDEN INDELLENDE TEST

Testforløb

08:30	Forbrændingen har forpuffet meget under opstart.
09:25	Der har været kortvarig tænding i det sekundære kammer (ca. 3 min).
09:56	Der har over en længere periode været konstant forbrænding i det sekundære kammer. I kortere perioder måles der CO under 300 ppm og O ₂ på 3-4%. Kedelydelsen ligger på ca. 340 kW. Der skal reguleres meget på sekundærluften for at opnå optimale betingelser. Der køres konstant med oprivererrørene.
10:49	Kedlen har nu kørt stabilt i en længere periode. CO omkring 150 ppm, OGC 12 ppm og O ₂ 5,5%. Sekundærluften styres efter lambdasonde i røgafgang.
11:03	Der foretages en støvprøve. Prøven er af 15 minutters varighed. Der observeres meget støv i filtrene.
11:29	Der observeres massive opbygninger af brændsel og aske/slagge i primær kammeret.
12:12	Kedlen er stoppet. Det konstateres at stempelpladen som presser ballen frem er meget forvredet, hvilket betyder at den ene side af ballen ikke kan brændes færdig. Der observeres ikke meget slagge efter afbrænding af en hel balle.
14:20	I løbet af testen er der afbrændt lidt over en halv balle på ca. 4 timer. Den sekundære forbrænding starter ikke før der måles 110°C i røggasafgangen. Det forsøges at lokalisere de øvrige parametre for "en god opstart" så der kan skrives en program til styringen.

Det har tilsyneladende hjulpet at lave de to ændringer. Som det fremgår, er der dog fortsat betydelige problemer med at få forbrændingen til at foregå stabilt. Imidlertid er der en lang periode mellem ca. 9:30 og 11:30, hvor forbrændingen er rigtig god.

Som det fremgår er der dog betydelige udfordringer både i forhold til at fastholde forbrændingen og få det rent konstruktionsmæssige til at fungere.

Nedenfor samles der op på de to indledende forsøg.

5.2.3 Konklusion på test med kedel – version 2.

Resultaterne fra testene har været blandede. Det har været meget positivt, at oprivererrørene, og mekanikken i øvrigt, har fungeret godt. Der har også i perioder været rigtig god afgang og forbrænding.

Som det ses af graferne, har kedlen i korte perioder kørt rigtig godt. Det høje CO₂ niveau indikerer intensiv forbrænding og lavt røgtab - og dermed høj virkningsgrad mens det lave CO og OGC indhold indikerer meget ren forbrænding.

Imidlertid har det vist sig meget svært at opretholde en konstant flamme i sekundærkammeret. Pulseringen og inhomogeniteten i brændselsdoseringen gør – sammen med en svært antændelig gas - at flammen er meget skrøbelig og let går ud. Det resulterer i forpuffninger og ustabil drift.

Det er overvejet at sætte en støtteflamme ved sekundærdysen, men det vurderes at være en dårlig løsning, da det vil komplicere kedlen og samtidig kræve et fossilt brændstof.

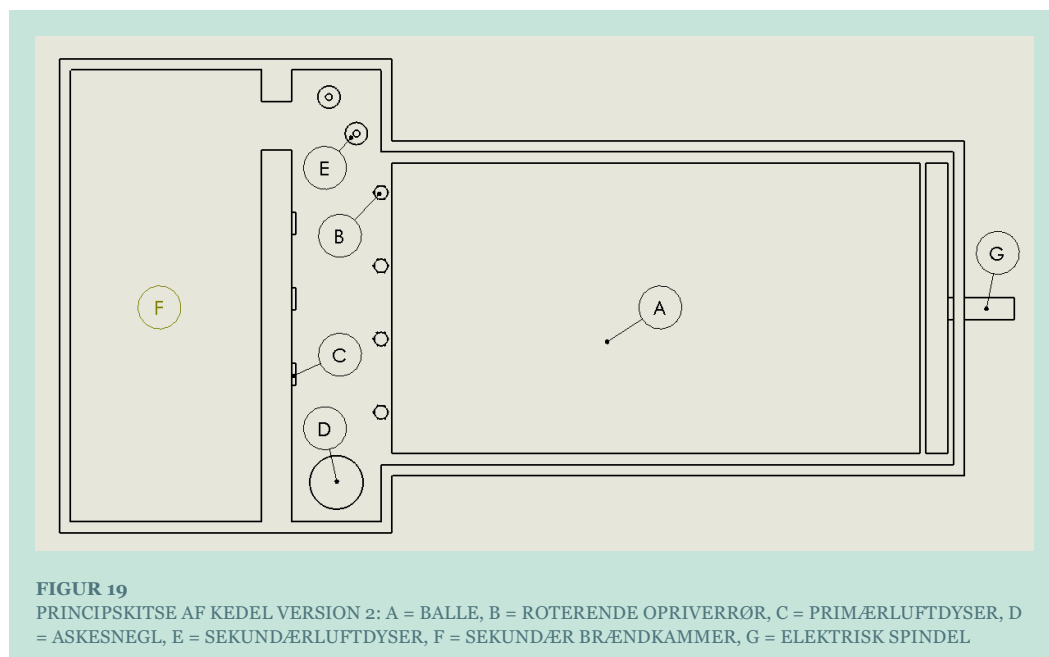
Faust ønsker i stedet at bygge kedlen med flammen direkte på ballen. Det giver i sagens natur højere temperaturer og dermed risiko for slaggedannelse, men det vurderes, at det sagtens vil kunne håndteres efter brænderen er blevet vendt 90°, der løbende rives op i halmen og konstruktionen i det hele taget er blevet meget robust.

I det følgende beskrives denne version som også bliver den endelige.

6. Udformning af kedel ver. 3 – endelig version

6.1 Version 3 – overvejelser

Den endelige version af kedlen bygges som udgangspunkt som version 2 blot med den ændring, at flammen trækkes ind i primærkammeret. Det gøres ved at der indbygges to sekundær dyser i toppen af primærkammeret i stedet for i spalten mellem primær- og sekundærkammer.



FIGUR 19

PRINCIPSKITSE AF KEDEL VERSION 2: A = BALLE, B = ROTERENDE OPRIVERRØR, C = PRIMÆRLUFTDYSER, D = ASKESNEGL, E = SEKUNDÆRLUFTDYSER, F = SEKUNDÆR BRÆNDKAMMER, G = ELEKTRISK SPINDEL

Sekundærkammeret er på testmodellen fortsat samme størrelse som i version 2, men det forventes, at den kan formindskes, da der ikke skal foregå samme afbrænding her, som da kammeret skulle klare al gasafbrændingen.

6.1.1 Design – endelig version

På Figur 20 ses en skitse af kedlen. Eneste forskel i forhold til version to er som nævnt ovenfor, at sekundærlufttilførslen er ændret. De forskellige positionsnumre viser de væsentlige dele, som kedlen består af. I Bilag 4 findes mere detaljerede CAD tegninger af kedlen.

Pos. 01: Vandkølede roterende opriverrør

Opriverrørerne roterer og river derved halmen ud af ballen. Rørene kører med konstant hastighed. Hvor meget der rives ud bestemmes af trykket på ballen.

Pos. 02: Askesnegl

Askesnegl, som automatisk fjerner aske og slagge fra primærkammer. Askesneglen skal enten kunne køre efter et fast interval eller ved hjælp af niveauføler.

Pos. 03: Fremføringsenhed

Enhed som trykker ballen frem mod opriverrørene. Den skal drives af en elektrisk spindel, som sikrer at der er et passende tryk mod opriverrørene.

Pos. 04: Primær luftdyser

Luftdyser jævnt placeret over ballens anlægsflade.

Pos. 05: Sekundær luftdyser

Sekundærluftdyser, placeret i toppen af primærkammeret.

Pos. 06: Sekundærkammer

I sekundærkammeret brænder gasserne ud før de går til konvektionsdelen.

Pos. 07: Konvektionsdel

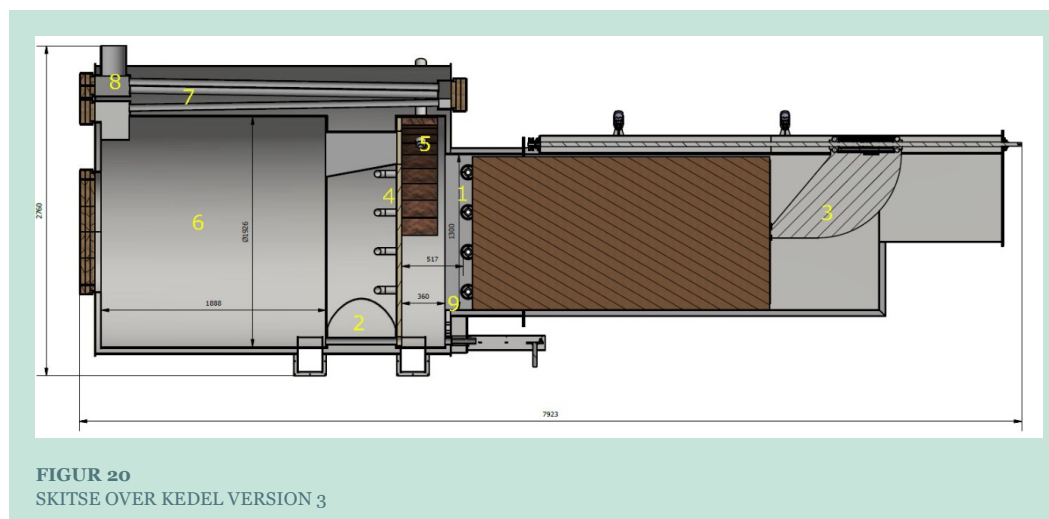
Konvektionsdelen består af to rørslag. Der er ikke turbulatorer i rørene.

Pos. 08: Røgafgang med lambdasonde

Lambdasonden måler røggassens iltindhold og giver besked til styringen. Styringen skruer herefter op eller ned for brændselsdoseringen – afhængig af om ilten er over eller under setpunktet.

Pos. 9: Autotænding

Autotændingen består af en varmeblæser, som sender en koncentreret varmestråle mod ballen når den skal tændes.



6.1.2 Styring

Kedlens styring er bygget op på Fausts normale sokkel, da kedlen som udgangspunkt skal have samme muligheder/funktioner som Fausts øvrige anlæg har.

Det grundlæggende princip er, at kedlens termostat sættes til en ønsket temperatur. Når vandtemperaturen fra kedlen falder til under det ønskede skrues styringen forsigtigt op for blæseren. Dette medfører, at iltindholdet i røggassen øges. Det registreres af lambdasonden som beder styringen dosere mere brændsel indtil det ønskede iltoverskud i røggassen igen er opfyldt.

Brændselsdoseringen øges ved at øge trykket på ballen. Det bevirker at opriverrørene river mere halm ud af ballen.

Stiger vandtemperaturen over termostatens setpunkt sker det samme, blot med modsat fortegn. Det hele styres af en PID regulator, som sikrer, at der på samme tid sker en hurtig ændring, når behovet ændres men også, at det ikke sker så hurtigt, at temperaturen svinger over.

Ideen er, at styringen på sigt skal kunne regulere inden for ca. 70-100% af kedlens ydelse. Falder varmebehovet til under 70% går kedlen på pause og afventer, at der igen bliver behov for varme. Kedlen vil typisk kunne starte på gløderne, men er der ikke gløder startes med el-tænder.

I Bilag 5 findes et el-diagram over styringen.

6.1.3 Test

Kedlen opstilles i en af Fausts montagehaller. Kedlen kobles igen til Teknologisk Instituts 600 kW kølevogn og analysatorudstyr. Kølevognen står udenfor, mens det øvrige udstyr er i hallen ved siden af kedlen. Se beskrivelse af udstyret i afsnit 8.1. På Figur 21 ses kedlen den første testdag.

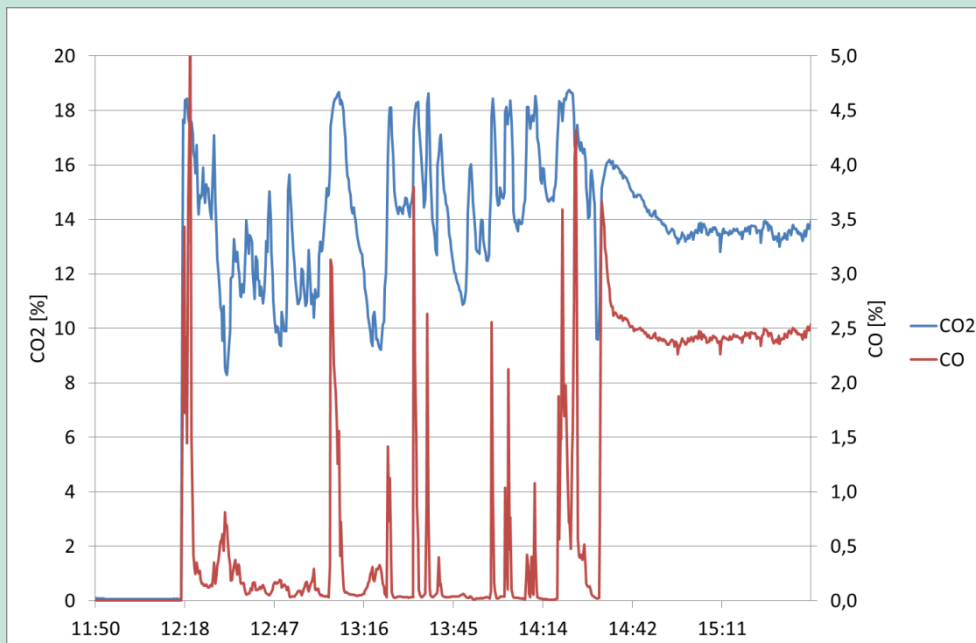


På billedet til venstre er der stoppet en balle i magasinet, klar til indfyring. Til højre ses forbrændingen i primærkammer.

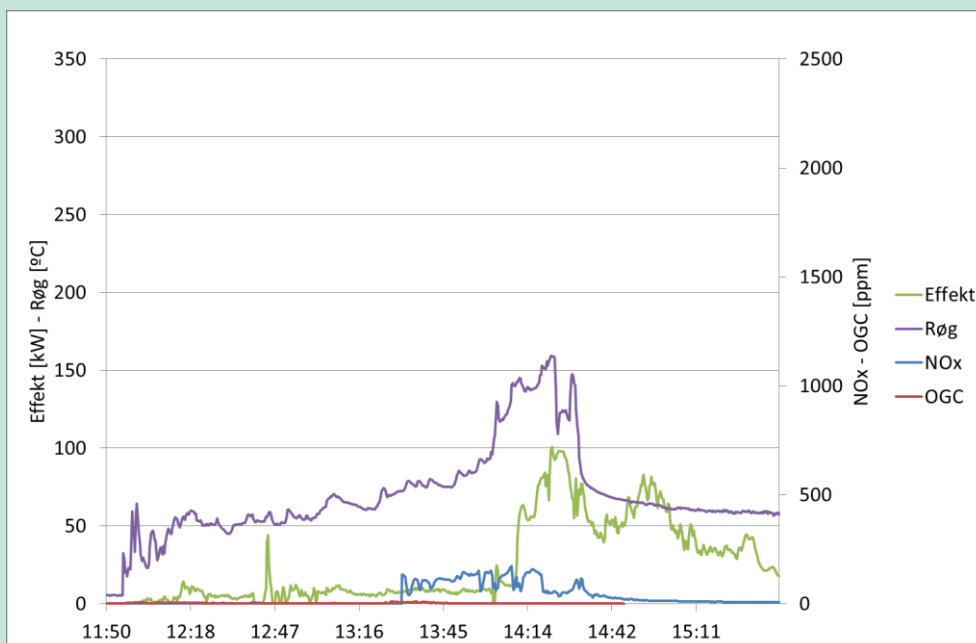
Det handler som i den første testrunde igen i første omgang om at undersøge, om kedlen overhovedet kan køre rent mekanisk og om ballen kan afbrændes. Der lægges ud med nogenlunde samme indstilling af den samlede luftmængde som under den første testrunde.

Test 1 – indregulering til nominel ydelse

Testens formål er at få et indtryk af, hvordan det hele kører i det nye set up og overordnet trimning af de forskellige parametre. Det vil sige blæserindstilling (luftmængde), fordeling mellem primær og sekundær luft, iltoverskud og køretid for opriverrørene. Luft og brændselsdosering styres i første omgang manuelt for at finde bedste indstilling.



FIGUR 22
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER INDLEDENDE TESTS



FIGUR 23
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER INDLEDENDE TESTS

Kedlen startes op uden store vanskeligheder. Efter kort tid er fordelingen mellem primær og sekundær luft fundet. Det viser sig imidlertid problematisk at skubbe ballen frem, da den er lidt for stor. Det er derfor nødvendigt at montere en anden gearmotor til fremføring af ballen. Herefter kører kedlen fint og testen afsluttes med et kontrolleret stop sidst på dagen.

Som det ses på Figur 22 er der i perioder meget lav CO, hvilket indikerer ren forbrænding. Dog er der også ofte spidser med meget høje værdier. Spidserne opstår, når der bliver presset for meget brændsel ind som flammer op og bruger al ilten. Det ses af, at CO spidserne følger CO₂ spidserne.

Konklusionen er at en mere jævn brændselstilførsel er ønskelig. Derudover overvejes det, om luftblæseren skal følge opflamningen og justere op for luften, og derved sikre, at der også er et luftoverskud, når der falder ekstra brændsel ind.

I Tabel 3 ses de opnåede værdier fra testen.

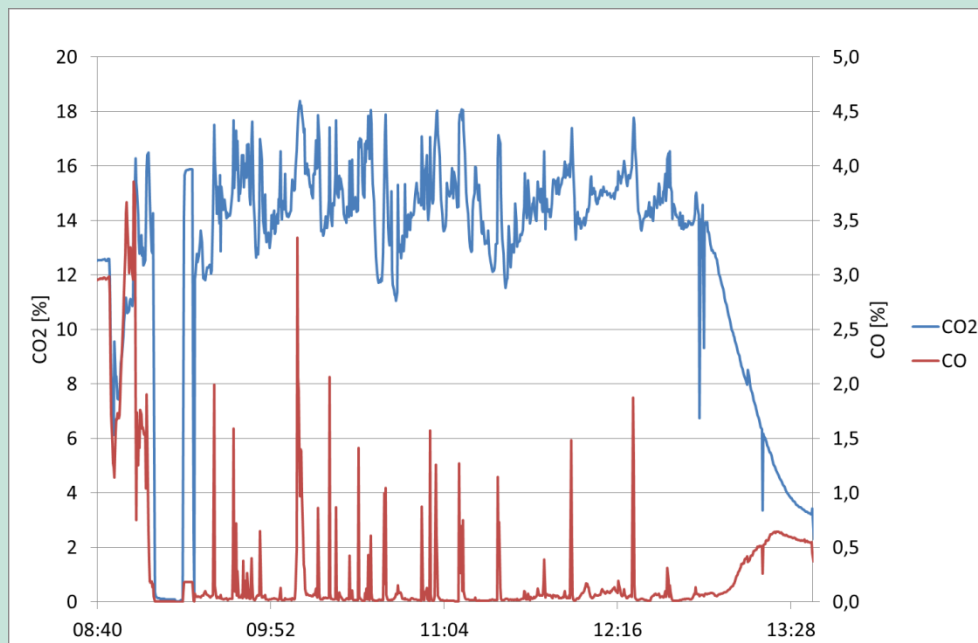
TABEL 3
MÅLEDATA FRA INDLEDENDE TEST

Parameter	Enhed	Hele periode	Udvalgt periode	Mål
Tidsrum	-	12.17 - 14.32	-	-
Tid	hr.min	02.15	-	-
Effekt	kW	-	-	-
CO ₂	%vol	14,1	-	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	3509	-	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	< 6	-	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	-	-	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	69	-	600

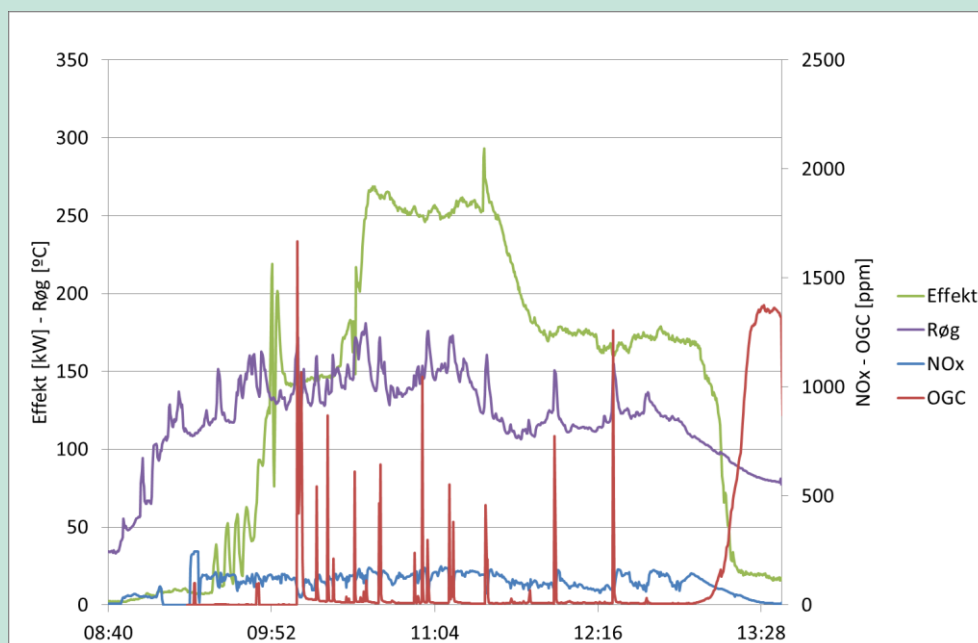
Som det ses ligger CO emissionen betydeligt over klasse 5 kravet. Det skyldes den periodevise meget dårlige forbrænding, når der bliver doseret for meget brændsel ind. Den dårlige forbrænding er også baggrunden for den meget lave NO_x. NO_x følger forbrændingskvaliteten – jo bedre forbrænding jo højere NO_x og visa versa. Der er ikke målt støv.

Test 2 – indregulering til nominal ydelse

Testens formål er som under første test at trimme de forskellige parametre til fuldlast. I modsætning til første test kører styringen nu automatisk. Både i forhold til luftdosering og fremføring af brændsel.



FIGUR 24
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER INDLEDENDE TESTS



FIGUR 25
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER INDLEDENDE TESTS

Kedlen er startet op på gløderne fra dagen før. Styringen er skiftet fra manuel til automatisk, så fremføring af brændsel nu foregår på baggrund af iltmålingen. Kedlen kører dagen igennem fornuftigt og der ses ingen farlige situationer eller andre driftsmæssige problemer. Det lykkedes igen at afbrænde en hel balle.

Som det fremgår af Figur 24 er der igen stabile perioder med meget lav CO mens der også fortsat er spidser med meget høj CO.

Med henblik på at få en endnu bedre afbrænding af gasserne er det aftalt, at sekundær dyserne forbedres, så der skabes mere turbulens.

I Tabel 4 ses de opnåede værdier fra testen.

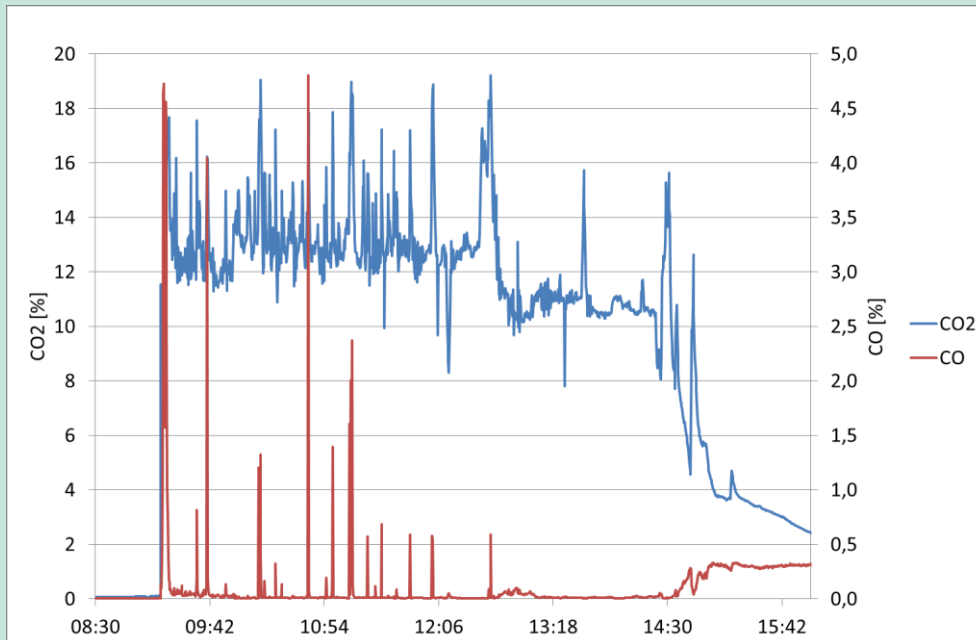
TABEL 4
MÅLEDATA FRA INDLEDENDE TEST

Parameter	Enhed	Hele periode	Udvalgt periode	Mål
Tidsrum	-	09.28 – 12.49	-	-
Tid	hr.min	03.21	-	-
Effekt	kW	181	-	-
CO ₂	%vol	14,8	-	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	1041	-	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	49	-	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	-	-	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	170	-	600

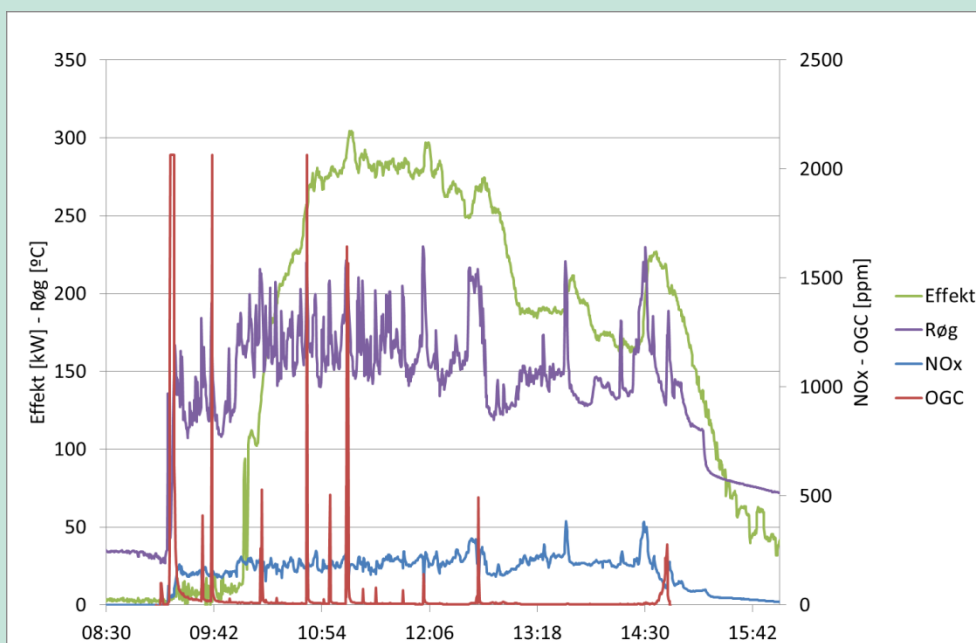
Som det ses har kedlen kørt med rimelig fornuftige emissioner. Der er brændt en hel balle af og gennemsnittet for både CO og OGC er ved at nærme sig grænseværdien for klasse 5. NO_x emissionen ligger på et meget fornuftigt niveau. Der er ikke målt støv.

Test 3 – indregulering til nominal og reduceret ydelse

Testens formål er igen at trimme til fuldlast men også at teste kedlen ved reduceret ydelse. I forhold til sidste test er der ændret på styring og luftdosering – både primær og sekundær, hvilket forklares på næste side.



FIGUR 26
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST



FIGUR 27
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST

Siden sidste test er der ændret på de to sekundærdyser. Den ene er vinklet så den nu næsten ligger vandret og den anden peger mod center af det primære brændkammer. Styringen er ændret, så blæseren også er inddraget i iltstyringen. Før var det udelukkende opriverrorene og sekundærspjældet som regulerede ilten. Dette har umiddelbart givet en mere aggressiv styring, men samtidig virker den også mere stabil.

Inden opstart er stemplet til fremføring af brændsel forstærket, idet det blev vredet skævt i sidste test. Årsagen tænkes at være manglende primærluft i det nederste hjørne ud mod brændselslågen. Det antages, at tryktabet i manifolden er for højt og at der derfor gives for lidt luft i de nederste dyser. Derfor er de nederste tre dyser nu boret op.

Der ses en positiv effekt heraf. Efter ca. fire timers drift forsøges det at trække kedlen ned i last. Resultatet heraf er overfyldning af brændkammeret og dårlig forbrænding resten af testen.

Som det fremgår af Figur 26 er der igen stabile perioder med meget lav CO mens der også fortsat er spidser med meget høj CO. I slutningen af perioden hvor primærkammeret er ved at blive overfyldt kommer der mere ro på forbrændingen og emissionerne dykker. Det skal derfor overvejes, om rummet i bunden af primærkammeret måske skal minimeres.

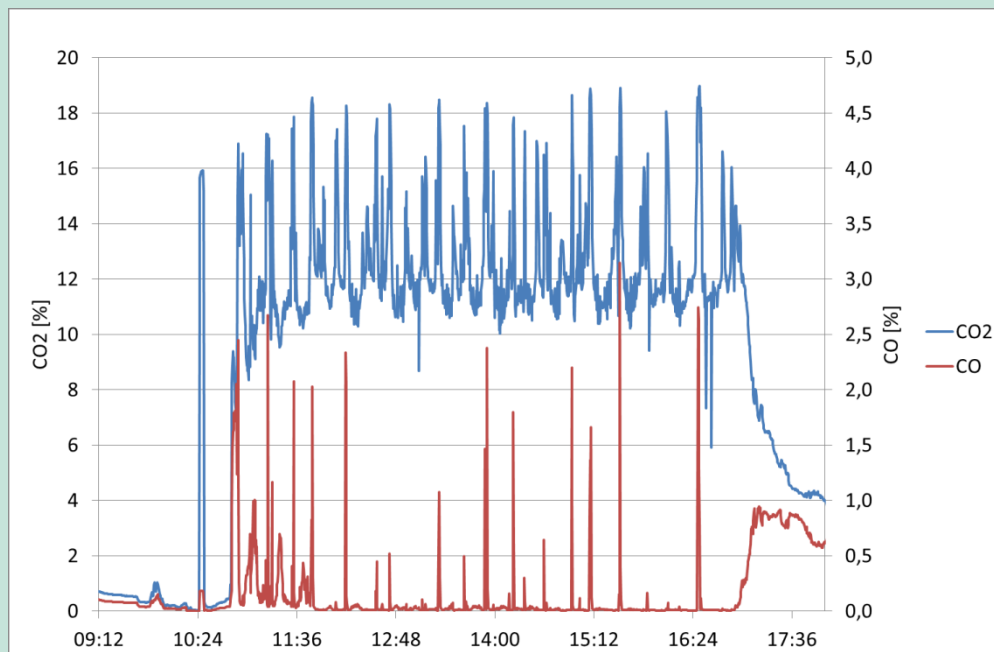
TABEL 5
MÅLEDATA FRA INDLEDENDE TEST

Parameter	Enhed	Hele periode	Udvalgt periode	Mål
Tidsrum	-	09.10 – 15.06	10.44 – 12.43	-
Tid	hr.min	05.54	01.59	-
Effekt	kW	187	278	-
CO ₂	%vol	11,8	13,4	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	1030	500	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	24	48	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	296	404	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	329	322	600

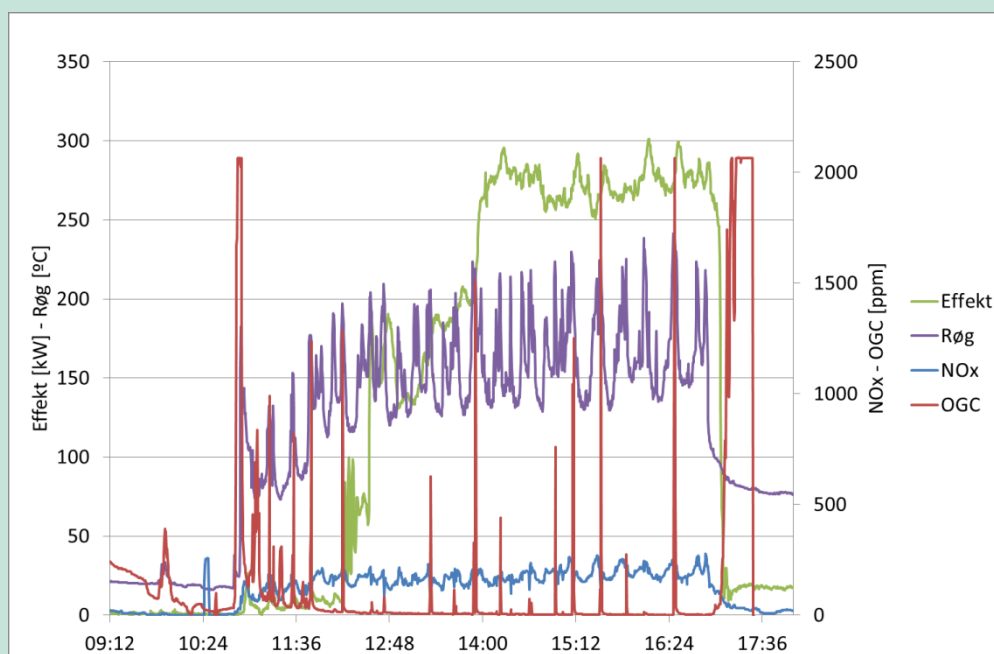
Som det ses har kedlen kørt med fornuftige emissioner. Der er afbrændt en hel balle og gennemsnittet for både CO og OGC ligger igen forholdsvis tæt på grænseværdien for klasse 5. Støv ligger højt pga. det høje saltindhold og spidserne hvor det hele flammer op giver i tillæg uforbrændte partikler ligesom der bliver revet ekstra aske og støv med. NO_x holder sig fortsat klart under den ønskede grænseværdi.

Test 4 – indregulering til forskellige ydelsestrin

Testens formål er afprøve forskellige blæserindstillinger/ydelsestrin for at se, om kedlen vil kunne køre tilfredsstillende ved forskellige ydelser. Der vælges tre forskellige indstillinger for luftdoseringen. Se mere på næste side. Under de forskellige indstillinger trimmes luften manuelt.



FIGUR 28
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER INDLEDENDE TESTS



FIGUR 29
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER INDLEDENDE SESTS

Der vælges 3 forskellige blæserindstillinger. Ved maks. ydelse (ca. 300kW) er blæserindstillingen hhv. max 75% og min 60%. Der startes med lav ydelse (max 55% og min 40%). 13:52 øges til mellemste ydelse (max 65% og min 50%). 15:54 øges til høj ydelse (max 75% og min 60%). Der ses ingen effekt af at øge fra mellem til høj ydelse. Der foretages et kontrolleret stop kl. 16:54.

Som det ses af Figur 28 og 29 og Tabel 6 kører kedlen rigtig fornuftigt på den lavere last (ca. 50 % af nominel ydelse). Emissionerne er lidt lavere end ved fuldlast og det giver umiddelbart et godt indtryk af, at kedlen vil kunne modulere i ydelse, måske ned til omkring 70% af nominel ydelse.

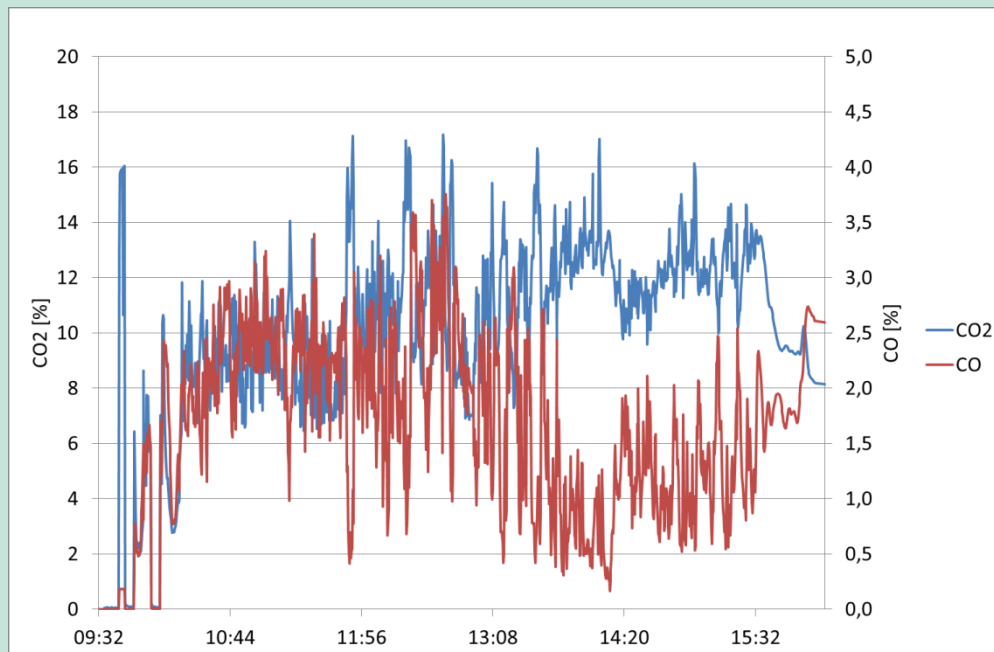
TABEL 6
MÅLEDATA FRA INDLEDENDE TEST

Parameter	Enhed	Lav ydelse	Maks. ydelse	Mål
Tidsrum	-	12.34 – 13.39	14.01 – 16.54	-
Tid	hr.min	01.05	02.53	-
Effekt	kW	ca. 175	275	-
CO ₂	% _{vol}	12,5	12,4	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	450	635	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	23	44	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	-	-	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	272	322	600

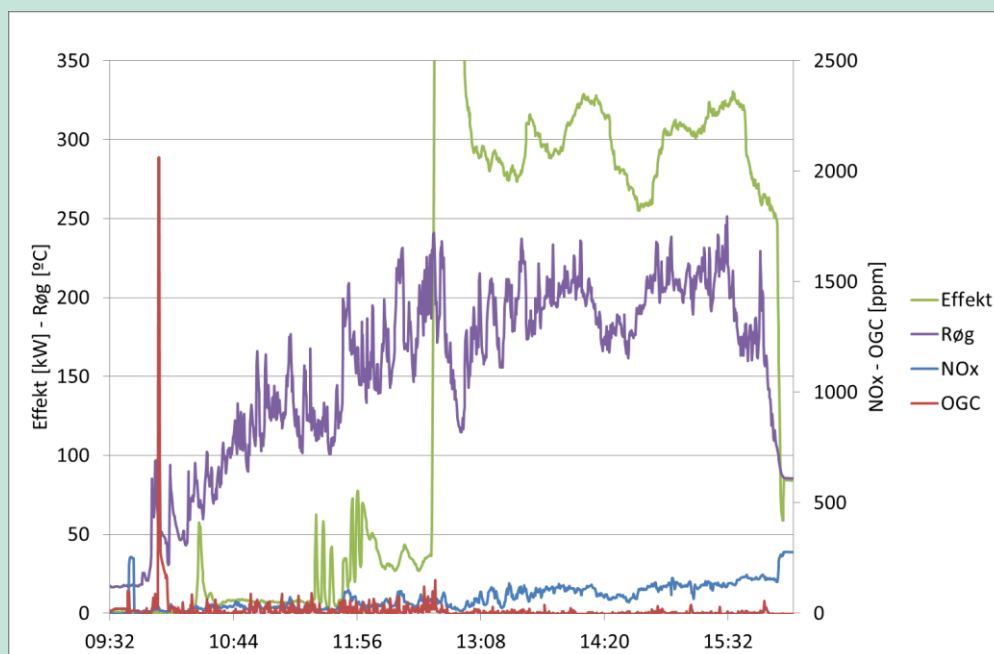
Som det ses har kedlen kørt med meget fornuftige emissioner under både fuldlast og 50%. Den første kolonne viser tallene for fuldlast mens den anden kolonne viser tallene for lavlast. Det skal understreges, at opstart eller udbrænding ikke er medtaget i de to måleperioder, hvorfor resultaterne ikke viser det helt rigtige billede. Der er ikke foretaget støvmåling.

Test 5 – indregulering til nominal ydelse på gul halm

Testens formål er at afprøve kedlen på gul halm. Gul halm er karakteriseret ved et ekstra højt indhold af kaliumsalte og er generelt et svært brændsel at håndtere. Se analyseresultater i afsnit 7. Opsætningen af kedlen er som udgangspunkt den samme som under sidste fuldlast test. Resultatet vil derfor umiddelbart kunne sammenlignes.



FIGUR 30
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER INDLEDENDE TESTS



FIGUR 31
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER INDLEDENDE SESTS

Kedlen er rensed ud og der fyres på gul halm. Opstarten går ikke særlig godt og der er stor røgudvikling og mange forpufninger. Halmen gløder blot og falder til bunden i brændkammeret og der er kun vilkårlig tænding i korte perioder med forpufninger til følge. De sidste 2 timer er der imidlertid konstant forbrænding.

Ballen brænder fint ud og der er ikke meget sintring og aske, som skal renses ud. Der observeres meget uforbrændt halm i det sekundære kammer, men umiddelbart ikke meget i støvfiltrene.

Som det fremgår af Figur 30 er der generelt skidt forbrænding og meget høje CO-emissioner. I slutningen er det lidt bedre, men det er fortsat betydeligt over niveauet for den grå halm.

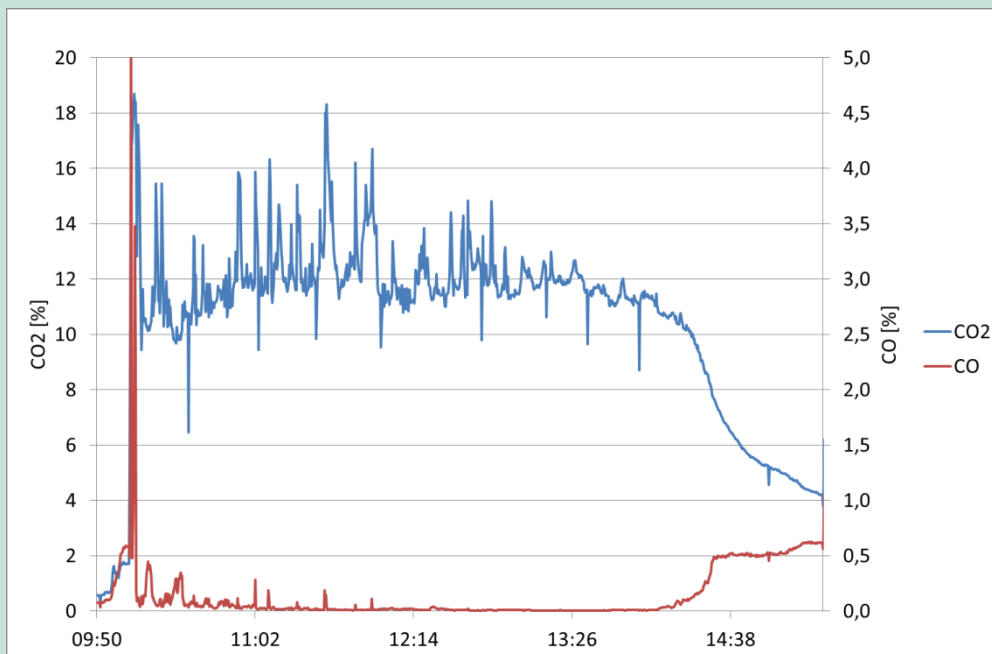
TABEL 7
MÅLEDATA FRA INDLEDENDE TEST

Parameter	Enhed	Hele periode	Udvalgt periode	Mål
Tidsrum	-	09.32 – 16.10	-	-
Tid	hr.min	06.38	-	-
Effekt	kW	117	-	-
CO ₂	%vol	10,0	-	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	2162	-	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	26	-	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	1273	-	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	150	-	600

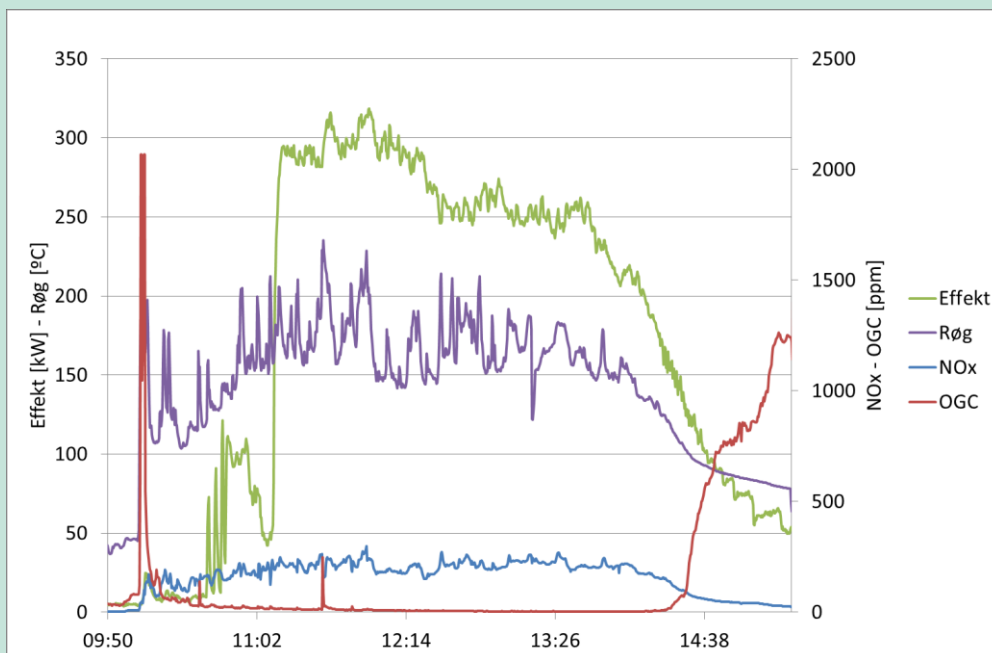
Som det ses ligger det generelle CO niveau langt over niveauet for de øvrige tests og viser, sammen med de øvrige parametre, at gul halm er et besværligt brændsel. Måske kan kedlen trimmes ind og forbedres til at håndtere det men umiddelbart ser det svært ud.

Test 6 – fintrimning til endelig test

Formålet er at gennemføre en komplet EN303-5 test. Kedlen er sat til fuld automatik. Iltsetpunktet er sat til 7 % og blæser til 70% af maks. ydelse. Kedlen renses ikke ud før opstart. Testen mislykkes, idet kedlen pakker til i aske og slagge før ballen er udbrændt.



FIGUR 32
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST



FIGUR 33
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST

Der indfyres en balle uden kedlen først er rensed ud. Gløderne er raget ind i brændkammeret og ligger ca. op til næstnederste opriverrør. Der startes fint op på gløderne. Sidst på dagen pakker brændkammeret til og ballen kan ikke brændes færdig.

Som det fremgår af Figur 32 lykkes det ikke at gennemføre en fuld afbrænding af ballen. Efter ca. 3 timer pakker primærkammeret til i aske og slagge. Som det fremgår af begge kurver falder det hele til ro som kammeret pakker til. Både CO og OGC emissionen falder til meget lave værdier.

Kedlen kører emissionsmæssigt fornuftigt resten af testen, som det også fremgår af skemaet nedenfor.

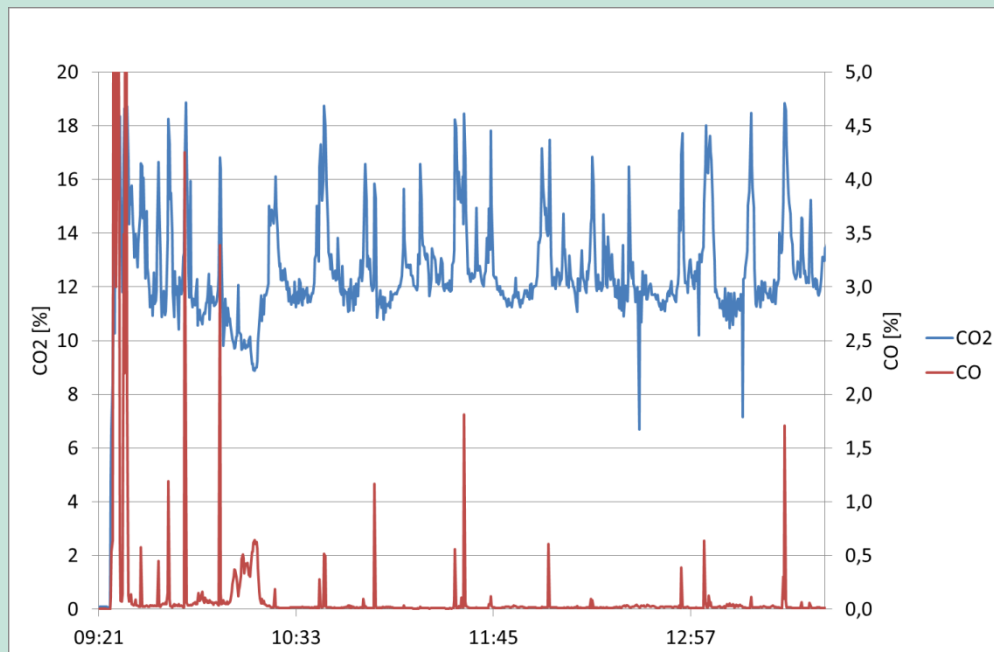
TABEL 8
MÅLEDATA FRA INDLEDENDE TEST

Parameter	Enhed	Hele periode	Udvalgt periode	Mål
Tidsrum	-	09.50 – 15.20	10.50 – 13.30	-
Tid	hr.min	05.30	02.40	-
Effekt	kW	159	248	-
CO ₂	%vol	10,4	12,3	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	1840	192	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	277	15	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	322	338	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	333	369	600

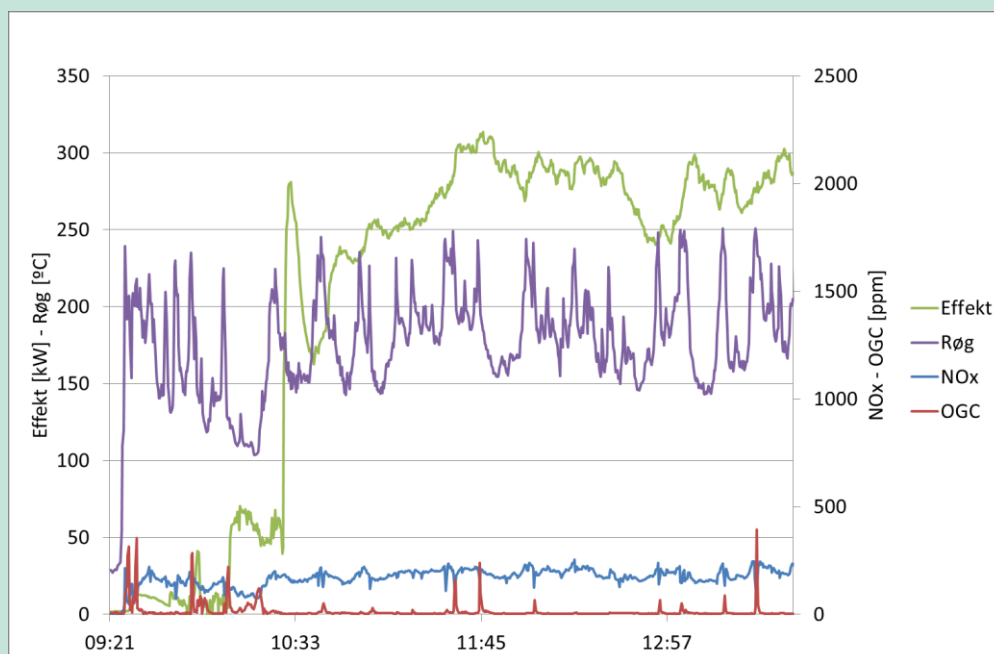
Som det ses i skemaet er værdierne ikke for gode, når opstarten er medtaget, mens de efter det hele er stabiliseret, er rigtig fine. Her er såvel CO som OGC emissionerne langt under grænsen for klasse 5. Imidlertid ødelægges det hele af opstarten, hvor begge er voldsomt høje indtil der er ordentlig ild i ballen. Støv ligger som forventet på et relativt højt niveau.

Test 7 – fintrimning til endelig test

Ny test på nominel ydelse med samme indstillinger som under forrige test. Kedlen er sat til fuld automatik. Iltsetpunktet er sat til 7 % og blæser til 70% af maks. ydelse. Kedlen er i modsætning til forrige test rensat ud for aske og slagge før opstart. Denne gang mislykkes testen pga. strømsvigt på både kedel og måleudstyr.



FIGUR 34
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST



FIGUR 35
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST

Opstarten forløber problemfrit med fin tænding. 10:20 vendes omdrejningsretningen på opriverørerne, da ydelsen falder og stemplet har svært ved at skubbe ballen frem. 13:47 rammes kedlen af strømsvigt. Kort tid efter er der strømsvigt på målerack.

Som det ses af både Figur 34 og 35 og Tabel 9 har kedlen indtil strømafbrydelsen kørt meget fornuftigt – dog igen bortset fra opstarten, hvor der er meget høje emissioner af både CO og OGC.

TABEL 9
MÅLEDATA FRA INDLEDENDE TEST

Parameter	Enhed	Hele periode	Udvalgt periode	Mål
Tidsrum	-	09.22 – 14.45	09.34 – 13.47	-
Tid	hr.min	05.23	04.13	-
Effekt	kW	198	209	-
CO ₂	%vol	12,7	12,6	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	2824	675	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	144	18	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	344	344	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	282	302	600

Som det ses i Tabel 9 er værdierne igen ikke for gode, når opstarten medtages mens de efter det hele er stabiliseret er rigtig fine. Igen er såvel CO som OGC emissionerne under grænsen for klasse 5 – dog knap så overbevisende som under første test.

Igen ødelægges det hele af opstarten, hvor begge bliver voldsomt høje indtil der er ordentlig ild i ballen. Hvis der var en udbrænding med i målingen ville det formentlig trække yderligere i den gale retning.

6.1.4 Opsamling på indregulering

Forsøgene har vist, at kedlen i lange perioder brænder halmen ekstremt rent. I flere tilfælde med CO under 100 ppm (0,01%). Men forsøgene har også vist, at der ofte sker voldsom opflamning og heraf følgende store udledninger af emissioner – både i form af CO, OGC og støv.

Mekanisk kan kedlen sagtens klare belastningen. Dog har det vist sig, at opriverrørene, hvis de stopper, bøjer ud pga. varmepåvirkningen. Så det er nødvendigt, at de hele tiden roterer. Problemet vil dog kunne minimeres hvis rørene vandkøles bedre.

Kedlen kan i sin nuværende udformning afbrænde én balle. Der er ikke plads til mere aske slagge i primærkammeret, idet testkedlen ikke er forsynet med askesnegl. Den færdige kedel skal forsynes med askesnegl så dette løses.

Hvis det kan lykkes at holde brændselsdoseringen nogenlunde jævn, dels ved trimning af styring, spindel og opriverrør og samtidig få en bedre luftregulering under opstart/udbrænding, er forventningen at emissionerne kan komme langt længere ned.

I forhold til emissionerne på fuldlast har forsøgene indikeret at både CO, OGC og NO_x vil kunne komme under grænseværdierne mens det for støvemissionens vedkommende næppe vil være muligt, selv hvis kedlen kommer til at køre så stabilt, at den ikke laver de voldsomme opflamninger. Det høje indhold af kalium i halmen gør at det formentlig ikke kan lade sig gøre.

Forsøgene har indikeret, at kedlen kan køre modulerende drift ned til omkring 50% med fornuftig forbrænding.

Endelig har forsøgene vist, at afbrænding af gul halm er en udfordring. Ballen er meget langsom til at tænde og forbrændingen bliver aldrig god.

Der foretages følgende ændringer før sluttest:

- For at undgå at primærkammer pakker til forsynes bunden af kammeret med askesnegl.
- Med henblik på at opnå en mere jævn forbrænding ændres styringen af opriverrørene, så de kører som stoker, dvs. afhængig af brændselsbehovet. Der skal samtidig sikres konstant tryk på ballen.

7. Brændselsanalyse

Halmens anvendelighed i halmfyr afhænger af halmtype, hvor halmen er groet og hvilke vejrforhold, der har været under væksten. I projektet er det derfor relevant at undersøge hvordan kedlen håndterer forskellige halmtyper. Faust har haft adgang til tre forskellige typer. To versioner gråhalm fra forskellig jordbund og en version af gul halm.

I Tabel 10 ses analyser af de tre forskellige halmtyper.

TABEL 10
ANALYSERESULTATER

Parameter	Gulhalm / sandjord	Gråhalm / bonitet 5-7	Gråhalm / sandjord
Vand / modtaget	8,8%	9,4%	9,2%
Aske / tørbasis	5,16%	6,22%	4,24%
Brændværdi (NCV / tørbasis)	17,20 MJ/kg	16,98 MJ/kg	17,40 MJ/kg
Rumvægt	560 kg/m ³	580 kg/m ³	560 kg/m ³
Slaggetest*	5	5	5
Nitrogen / tørbasis	0,42%	0,72%	0,66%
Hydrogen / tørbasis	5,9%	5,9%	5,9%
Svovl / tørbasis	0,06%	0,09%	0,10%
Klor / Tørbasis	0,13%	0,14%	0,13%
Oxygen	42%	41%	42%
Major elements / tørbasis	%	%	%
Aluminium	0,012	0,059	0,084
Silicium	1,51	1,89	0,85
Jern	0,025	0,041	0,15
Titanium	< 0,003	0,004	0,017
Mangan	0,005	0,004	0,003
Magnesium	0,059	0,081	0,064
Kalcium	0,25	0,32	0,41
Barium	< 0,003	0,003	0,003
Natrium	0,028	0,044	0,061
Kalium	0,69	0,58	0,56
Fosfor	0,042	0,099	0,065

* TI- udviklet metode hvor 2-4 kg brændsel afbrændes og slaggedannelsen efterfølgende vurderes. Skala fra 1-5 hvor 1 er de bedste træpiller mens 5 er det mest slaggedannende brændsel.

Typisk er problemet med halm at det har et højt indhold af kalium. Kalium giver slagge, pga. af et lavt smeltepunkt og støvproblemer idet der under forbrændingen dannes kaliumklorid, som går med røggassen som finkornet støv.

Umiddelbart vil man forvente at gul halm har et højt indhold af salte, da den gule farve skyldes at halmen ikke er udvasket i samme grad som den grå halm. Af analyserne fremgår det også, at indholdet af kalium, som er den største bidrager til saltene, er betydelig højere ved den gule halm end ved den grå halm. Umiddelbart kunne man måske forvente en større forskel.

En anden væsentlige parameter er silicium som også bidrager til slaggedannelsen. Den er højest i gråhalmen fra bonitet 5-7 jorden, mens den er lavest i gråhalmen fra sandjorden.

Imidlertid viser slaggetesten, at den slaggedannende tendens er meget høj – og den samme for alle tre baller.

Ud fra analyserne besluttet det, at en af de grå halmballer udvælges til testrækken mens der laves et par supplerende forsøg med den gule - besværlige - halm for at se, hvad kedlen siger til det.

8. Sluttest med emissionsmålinger

8.1 Måleprogram iht. EN303-5:2012

Biobrændselsanlæg testes i Europa efter den fælleseuropæiske standard EN303-5:2012. I standarden er beskrevet præcist, hvad der skal testes og hvordan. Standarden dækker både manuelle og automatiske anlæg og gælder som udgangspunkt alle anlæg op til 500 kW.

I standarden er der krav til konstruktion, virkningsgrad og emissioner. I forhold til projektkedlen er det som udgangspunkt emissioner og virkningsgrad, der er interessant. De øvrige ting vil først være relevante, når en endelig version er klar til test.

8.1.1 Måleudstyr

Måleudstyret består af gasanalysatorudstyr til måling af CO, CO₂, OGC og NO_x samt strøhlineudstyr til støvmåling. Gasserne måles kontinuerligt mens støvmålingerne foretages manuelt, af en halv times varighed pr. måling. Støv måles med patronfilter og planfilter.

Virkningsgrad bestemmes ved at måle afgivet effekt i forhold til indfyret. Indfyret bestemmes ved hjælp af ballens vægt og halmens brændværdi. Afgivet effekt måles ved at måle temperatur før og efter kedel samt vandflowet igennem.

8.1.2 Måling i felten

Til måling på større anlæg i felten har Teknologisk Institut bygget en 600 kW kølevogn. Kølevognen består hovedsageligt af en kaloriferer på 600 kW, varmeveksler til overførsel af varme fra kedelkredsen samt pumper, ventiler og flowmålere. På Figur 36 ses vognen, som er bygget på en standard trailer, så den kan transporteres med en almindelig bil.

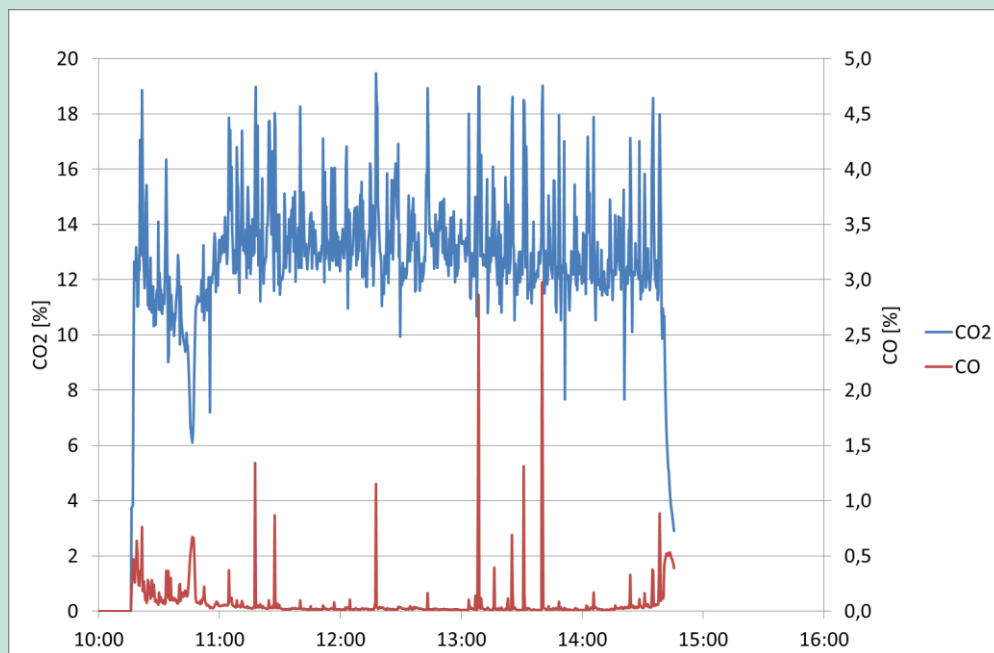


FIGUR 36
MOBIL KØLEVOGN TIL MÅLING I FELTEN

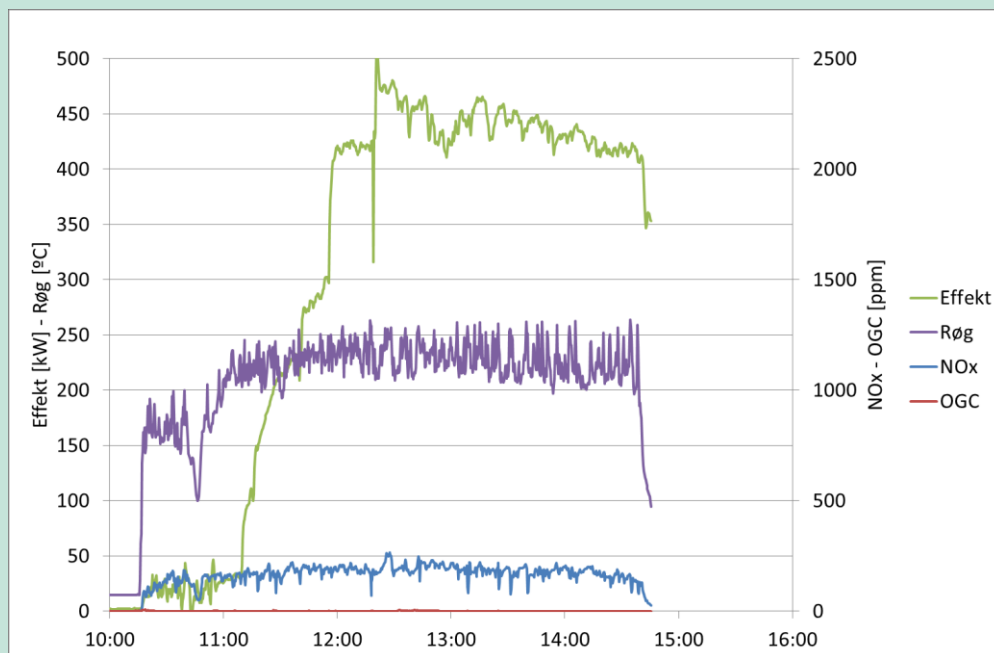
8.2 Måling på version 3 - endelige version

Test 1 efter EN303-5

Formålet er i videst mulige omfang at teste kedlen efter EN303-5. Udgangspunktet for kedlens indstilling er som under de bedste indledende tests. Kedlen er sat til fuld automatik. Iltsetpunktet er sat til 7 % og blæser til 70% af maks. ydelse. Kedlen er renset ud før opstart.



FIGUR 37
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST



FIGUR 38
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST

Kedlen er blevet modificeret. Den er forsynet med askesnegl og større tænder på opriverrørene. Derudover er styringen ændret, så opriverrørene nu kører på stokerpuls og fremføring af ballen kører på puls.

Endelig indstilling for puls var 2 sek. kørsel hver 20 sek. Opstarten var rimelig smertefri uden særlig røgudvikling eller forpufning. Styringen krævede heller ikke nævneværdig indregulering. Kun fremføringen krævede lidt justering, for ikke at få for meget pres på opriverrørene.

Der er foretaget en smule indregulering i starten primært på fremføring af ballen.

Alt i alt er ballen afbrændt helt problemfrit og med en rigtig god forbrænding. På Figur 37 ses det, at både driften og opstart og udbrænding går rigtig godt. Forbrændingen er forholdsvis hurtig i gang ligesom udbrændingen også går hurtigt. Se værdierne for hhv. hele perioden og en udvalgt driftsperiode i Tabel 12.

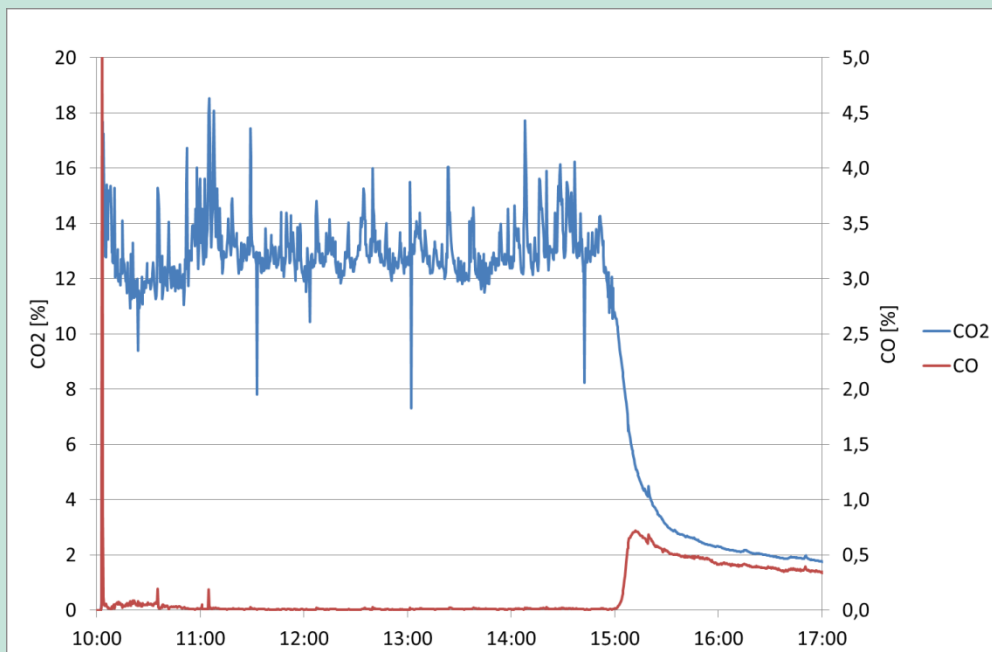
TABEL 11
MÅLEDATA FRA AFSLUTTENDE EN303-5 TEST

Parameter	Enhed	Hele periode	Udvalgt periode	Mål
Tidsrum	-	10.10 – 14.45	10:17 – 14:37	-
Tid	hr.min	04:35	04:20	-
Effekt	kW	440*	440*	-
CO ₂	%vol	12,6	13,0	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	844	738	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	< 6	< 6	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	1468	1468	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	283	285	600

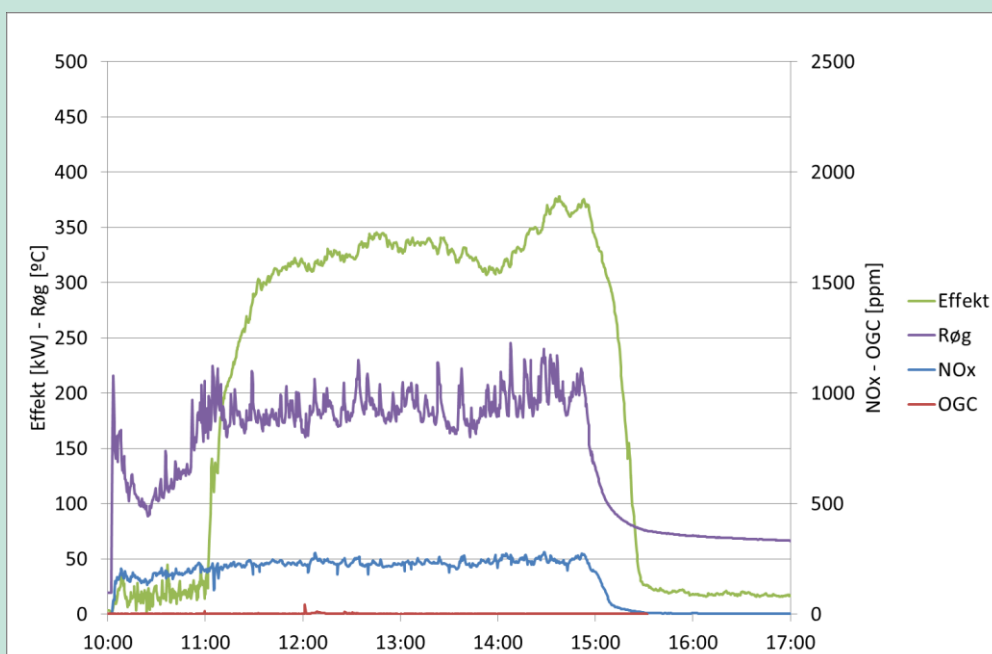
Som det ses er CO meget tæt på grænsen for klasse 5 mens OGC er langt under og endda så lav, at den er under måleusikkerheden. NO_x emissionen er ligeledes klart under grænseværdien mens støvemissionen til gengæld er voldsom høj. Det skyldes formentlig, at der trods en fin forbrænding er en del uro og dermed rives en del støv med i røggassen.

Test 2 efter EN303-5

Ny test på nominel ydelse med helt samme indstillinger som under forrige test. Kedlen er sat til fuld automatik. Iltsetpunktet er sat til 7 % og blæser til 70% af maks. ydelse. Askesneglen har løbende fjernet aske/slagge så brændkammer er tom før opstart.



FIGUR 39
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST



FIGUR 40
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST

Halmen er den samme type som i forrige test og der er ikke foretaget ændringer i styringen.

Kedlen starter op uden problemer. Som det ses af Figur 39-40 og Tabel 12 kører kedlen rigtig godt og testen er klart bedst af alle tests. I forhold til forrige test er forbrændingen mere rolig, hvilket både ses af mindre udsving på CO₂ og CO - og støvmålingerne.

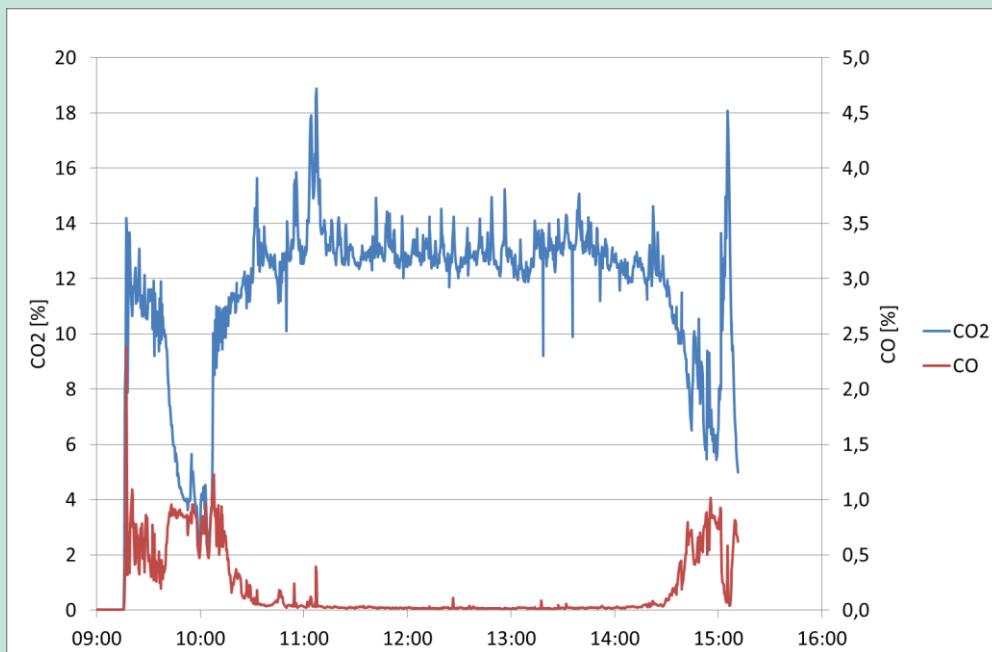
TABEL 12
MÅLEDATA FRA AFSLUTTENDE EN₃₀₃₋₅ TEST

Parameter	Enhed	Hele periode	Udvalgt periode	Mål
Tidsrum	-	10.03 – 15.31	10.10 – 14.50	-
Tid	hr.min	05.28	04.30	-
Effekt	kW	ca. 325	ca. 325	-
CO ₂	% _{vol}	12,3	12,9	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	772	163	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	< 6	< 6	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	237	233	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	362	372	600

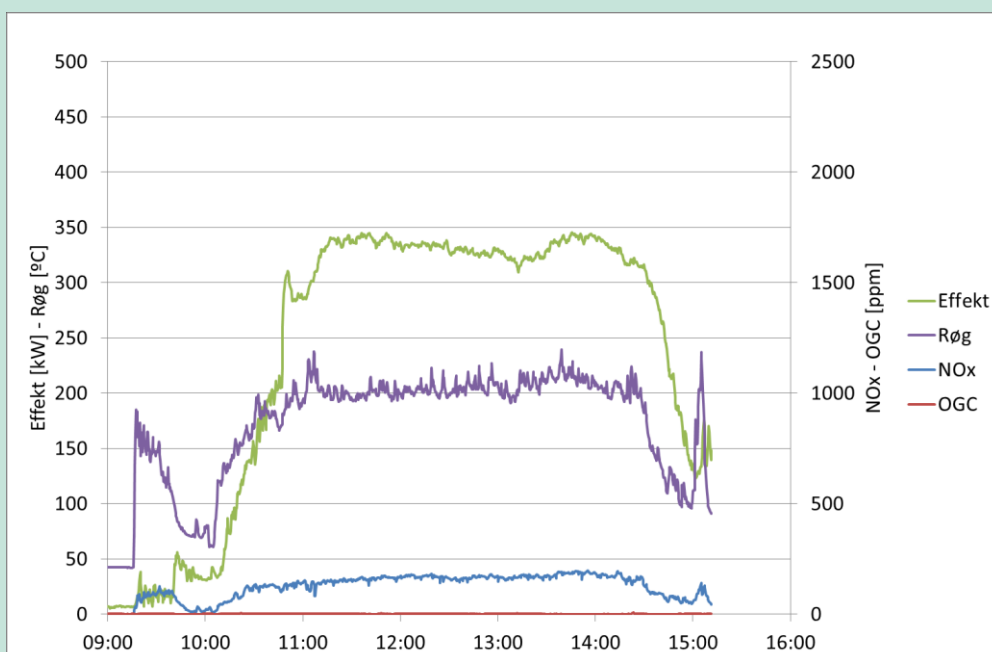
Som det ses i Tabel 12 er CO nu endnu tættere på grænsen for klasse 5 end i forrige test mens OGC fortsat er langt under. NO_x er højere end i forrige test og det skyldes dels N-indholdet men også, at forbrændingen har været bedre og der derved er dannet mere termisk NO_x. NO_x er dog fortsat klart under den ønskede grænseværdi. Støvemissionen er efterhånden så langt nede, at der formentlig ikke længere er revet halm og aske med men at den nu primært består af saltene fra halmen.

Test 3 efter EN303-5

I den tredje og sidste test afbrændes der igen en balle gul halm. Kedlen har som udgangspunkt samme indstillinger som under de to forrige tests dvs. iltsetpunktet er sat til 7 % og blæser til 70% af maks. ydelse. Der er ikke aske/slagge i brændkammer ved opstart.



FIGUR 41
CO OG CO₂ EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST



FIGUR 42
EFFEKT- RØGGASTEMPERATUR, NO_x OG OGC EMISSIONER UNDER AFSLUTTENDE EN303-5 TEST

Det viser sig at være meget svært at få ild i ballen. Kedlen går i stå ved 9:45 tiden. Falder ud på overstrøm enten på askesnegl eller fremføring. Kedlen kommer i drift igen kl. 10:15. Styringen ændres til at køre konstant med blæseren til forbrændingsluften og på et lavere niveau end tidligere.

Efter noget tid lykkedes det at få godt gang i ballen og herfra brændte den rigtig fornuftigt og langt bedre end det tidligere forsøg med gul halm.

TABEL 13
MÅLEDATA FRA AFSLUTTENDE EN303-5 TEST

Parameter	Enhed	Hele periode	Udvalgt periode	Mål
Tidsrum	-	09.11 – 15.11	11.00 – 14.00	-
Tid	hr.min	06.00	03.00	-
Effekt	kW	ca. 330	ca. 330	-
CO ₂	%vol	11,5	13,1	-
CO ved 10% O ₂	mg/m _n ³	2313	237	700
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	< 6	< 6	30
Støv ved 10% O ₂	mg/m _n ³	683	727	60
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m _n ³	243	272	600

Som det ses er CO under hele perioden relativ høj mens det i den udvalgte periode ligger rigtig fint lavt. Det skyldes, at opstarten er dårlig og forbrændingen svær at få i gang. Det skal dog også bemærkes, at ydelsen er noget lavere end under de to forrige tests, idet blæseren som nævnt er justeret ned i forbindelse med opstarten.

8.2.1 Opsamling på slutttest med emissionsmålinger

Forsøgene har igen vist, at kedlen i lange perioder brænder halmen ekstremt rent. I flere tilfælde med CO helt ned under 50 ppm (0,005%). I forhold til testen under indreguleringen er forbrændingen blevet langt roligere og efter montering af askesnegl er der ikke længere problemer med ophobning af aske/slagge i brændkammer.

At det nu er opriverørerne, der styrer brændselsdoseringen og ikke trykket på spindlen, har vist sig at være en klar forbedring. Det er sandsynligvis en stor del af forklaringen på, at forbrændingen er blevet mere rolig og ensartet.

I forhold til emissionerne på fuldlast har forsøgene nu vist, at både CO, OGC og NO_x vil kunne komme under de ønskede grænseværdier mens det for støvemissionens vedkommende næppe vil være muligt. I test 2 har kedlen kørt meget tæt på det optimale i forhold til støvemissionen i kedlens nuværende udformning.

Endelig har forsøgene vist, at det godt kan lade sig gøre at afbrænde gul halm, blot der sikres en ordentlig opstart.

9. Diskussion og konklusion

9.1 Resultater

Helt overordnet er resultaterne fra projektet meget positive. Det er lykkedes at udvikle en hel ny type som kedel, som efter lidt startvanskeligheder allerede præsterer helt på højde med, og flere steder overgår, de konventionelle kedler. I forhold til målsætningen mangler der lidt på emissionerne, men der er til gengæld åbnet op for en helt ny måde at tænke halmkedel på.

Nedenfor gennemgås de opnåede resultater og perspektiver for kedlen.

9.1.1 Mekanik

Rent mekanisk har kedlen vist rigtig gode præstationer men også visse svagheder. Opriverørerne som er kernen i brændselsdoseringen har vist sig at fungere rigtig godt. Faktisk så godt, at Faust har besluttet sig for at søge patent på systemet.

Fremføringsdelen har imidlertid vist sig at være lidt skrøbelig. Den er i flere tilfældet blevet bøjet og er af flere gange forstærket. Her er der fortsat forbedringer at hente.

Konvektionsdelen er dimensioneret for småt. Kedlen har kørt ved lavere ydelse end i første omgang anslået og alligevel er røggastemperaturen oppe omkring 250°C når kedlen kører godt. Det skal opgraderes i en endelig version.

Endelig skal udfordringen med indfyring løses. Magasinet er for småt, hvis ballen er lidt skæv eller overstørrelse.

9.1.2 Virkningsgrad og emissioner

Virkningsgraden er ikke målt, idet kedlen ikke er tilstrækkeligt isoleret til at det vil give mening. Derudover er konvektionsdelen underdimensioneret, hvilket betyder røggastemperaturen er alt for høj. Den bør sænkes i hvert fald 100°C hvilket vil give ca. 5% på virkningsgraden. Det vurderes at kedlen vil kunne overholde klasse 5 kravet til virkningsgrad, når konvektionsdelen dimensioneres rigtigt og kedlen isoleres.

Vurderingen er, at CO og OGC kan komme klart under klasse 5 kravet, hvis kedlen og styringen optimeres. Derimod er det tvivlsomt om støvemissionen vil kunne bringes under grænsen. Umiddelbart vurderes det ikke at være muligt uden efterbehandling, så længe der er så højt et kaliumindhold i brændslet som tilfældet er med halm. Dog er der en del at hente ved at lave forbrændingen mere rolig og ensartet. Støvemissionen svinger under nominel drift mellem ca. 180 og helt op til 1500 mg/m³ ved 10% O₂.

De høje værdier kommer, når flammen blusser op og støvet ud over saltene også består af uforbrændt halm og aske, som hvirvles med ud i røggassen.

Det kan i næste version af kedlen overvejes at indbygge cyklon med henblik på støvreduktion. Hvorvidt det vil kunne have tilstrækkelig effekt til at bringe støv under de skrappe klasse 5 krav er dog svært at forudsige.

I forhold til NO_x er der ikke krav i EN303-5 men der er krav i Østrig og det forventes at disse bringes ind i EN303-5 på sigt. Som forsøgene har vist har kedlen imidlertid ingen problemer med at overholde kravene.

9.2 Perspektiv

Faust forventer, at kedlen hvis den videreudvikles, vil kunne supplere og måske endda helt erstatte deres portefølje af manuelt fyrede halmkedler.

Hvis styring og mekanik trimmes optimalt vil kedlen kunne køre start stop på en balle og derved kunne fungere uden akkumuleringstank. Samtidig vil der være mulighed for, at kedlen kan bygges, så den kan tilsluttes automatisk brændselsdosering og derved både kunne fungere som manuelt – og automatisk fyret kedel.

Endelig vil kedlen ideelt set, pga. af det nye princip, kunne bygges så lav, at den vil kunne være i en 20 fods container. Det vil kunne reducere transportudgifterne, som er en væsentlig post i forbindelse med levering af et halmfyr, betydeligt.

Referencer

[BREF] Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control
JOINT RESEARCH CENTRE Institute for Prospective Technological studies Sustainable
Production and Consumption Unit European IPPC Bureau Draft 1 (June 2013)

[FBR] Forbrænding - teori og praksis, Bind 2 1988, Nicolai Bech og Jørgen Dahlin.

[HalmpjeceDK] HALM TIL ENERGI, Status, teknologier og innovation i Danmark 2011. Inbiom,
Torben Skøtt, Biopress.

[Kemi-online.dk] Forgasning af biomasse, dansk kemi, 84, nr. 12, 2003

[Miljøprojekt nr. 173] Fyring med halm. En metode til renere forbrænding. Miljøprojekt nr. 173.
Miljøstyrelsen 1991.

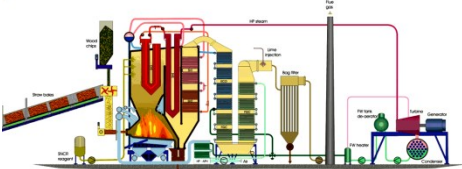
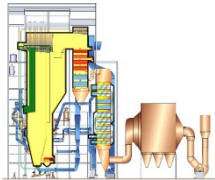
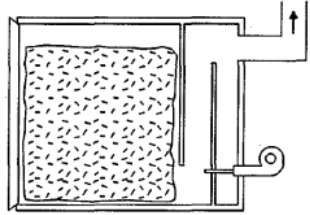
[Miljøprojekt nr. 1528] Udvikling af brændeovn med to-kammer katalytisk forbrænding,
Miljøprojekt nr. 1528, 2014

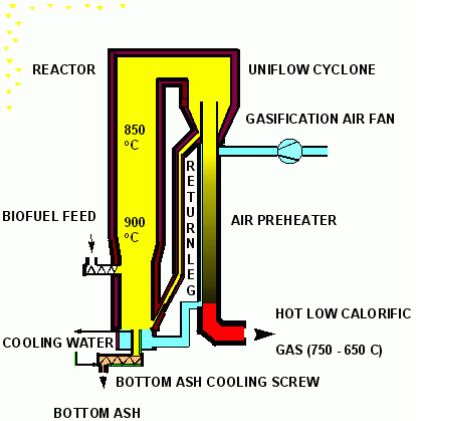
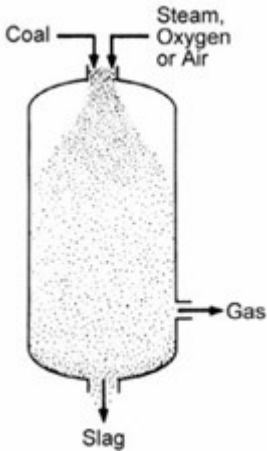
[netl.doe.gov] Entrained Flow Gasifiers, U.S. Department of energy

[Videnblad nr. 141] Kvalitetsbestemmelse af halm til fyringsformål, Videnblad nr 141. Jens Kristian
Kristensen, Forskningscenter Bygholm

[Videncenter.dk] Forgasning og andre kraftvarmeteknikker.

[Zielke 1991] Zielke, U (1991). Skaktovnsforgasning med henblik på kraftvarmeproduktion,
Delrapport nr. 2, Forgasning af halm – forsøg 1-5. Dansk Teknologisk Institut – Miljøteknik.

	Teknologier	Beskrivelse	Fordele/ulemper
Forbrænding af fast biomasse	Ristefyring [BREF] s. 443  (vandkølet rist)	Ristefyring er den mest udbredte teknologi til udnyttelse af halm på de danske kraftværker. Hovedparten af de restefyrede anlæg anvender oprivning inden halmen føres ind på risten. På ældre anlæg anvendes i enkelte tilfælde "cigarbrænderprincip). En del af halmstråene brænder i rummet over risten, mens andre falder ned på risten hvor de udbrænder [HalmpjeceDK].	Belægnings ved halmfyring kan være meget aggressive, og problemet stiger med temperaturen. Kaliumklorid fra halm fordamper og sætter sig på overhederrørene [HalmpjeceDK].
	Fluid-bed forbrænding [BREF] s. 445  (cirkulerende)	CFB: Her forgår forbrændingen i et leje af flydende sandpartikler. Det giver mulighed for at anvende lavere forbrændingstemperatur end ved tilsatsfyring og ristefyring. Derved reduceres dannelsen af NO _x og det er muligt at fjerne svovl fra røggassen ved at tilføre kalk.	Fluid bed kedler er fleksibel mht. brændselsvalg, men følsom overfor aske med lavt smeltepunkt som f.eks. halmáske. Årsagen er at aske får sandpartiklerne til at klæbe sammen, så partiklerne ikke længere kan holdes svævende. Derfor kan halmandelen maksimalt udgøre 50 %. [HalmpjeceDK].
	Pulveriseringsfyring [BREF] s. 446	Møller knuser halmpiller.	Forbrændingen af halm kan give de samme problemer med tilstopning og korrosion af kedlen overhederrør.
	Modstrømsforbrænding [Miljøprojekt nr. 173] s. 13 	Primærluften blæses vinkelret ind på halmballens overflade. De brændbare gasser der forlader halmen og den luft der iblandes skal tvinges gennem en lille åbning for at sikre opblandingen af gas og luft. De brændbare gasser opblandes i primærluftstrømmen for at opnå intern recirkulation. Recirkulationen stabiliserer forbrændingen pga. blandingen af luft og varm røggas.	Hvis man blæser luft ind fra andre positioner end umiddelbart ved det sted hvor de brændbare gasser forlader brændkammeret skal de bevæge sig forbi uforbrændt halm hvorved de får mulighed for yderligere for-/afgasning og optagelse af de dannede gasser hvilket ikke er ønskeligt.
	Traditionel portionsfyring [HalmpjeceDK] s. 16	Ældre halmkedler består typisk af et vandkølet kammer, hvor skorstenen er koblet på i	Halm og andre former for biomasse udvikler gasarter der først antændes ved 800-

		temperatur kan styres. Den viste forgasser er af typen »Cirkulating Fluid Bed« (CFB), hvor »bed«-materialet løbende opfanges i cyklonen og føres tilbage.	
	Entrained flow [netl.doe.gov] 	Et pulveriseret fast, eller forstøvet flydende brændsel forgasses med ilt eller luft i medstrøm. Forgasningen finder sted i en tæt sky af meget fine partikler. De fleste kul er egnet til denne type forgasser på grund af de høje temperaturer, og fordi kulparkler er godt adskilt fra hinanden.	Høje temperaturer og tryk muliggør stor gennemstrømning. Kræver homogent og finmalet brændsel i jævn dosering.

Bilag 2 CFD beregninger

Numerisk Fluidmekanik, eller CFD (forkortelse af Computational Fluid Dynamisc), anvendes til modellering af termiske og strømningsrelaterede problemstillinger, og benyttes i stigende grad i forbindelse med eksempelvis industrielle udviklingsopgaver. CFD er et analyseværktøj, der kan sammenlignes med de mere velkendte faststofmekaniske værktøjer, der anvendes i forbindelse med eksempelvis tøjnings- og spændingsanalyser. Forskellen er, at man i CFD ikke bestemmer udbøjning, torsion osv. som det kendes fra faststofmekanik, men i stedet bestemmer hastigheds- og trykfelter osv. i fluider.

Fremgangsmåden til opbygning af en model er følgende:

- Den ønskede geometri, der skal underkaste en fluidmekanisk undersøgelse, genereres. Oftest anvendes 3D CAD tegning. I modsætning til en faststofmekaniske analyse, er man i CFD interesseret i områderne omkring de faste objekter, altså områder hvor luften eller en anden fluid strømmer.
- Der anlægges et beregningsnet. Beregningsnettet specificerer hvor man vil gerne bestemme temperaturen, hastigheden eller f.eks. trykket af fluiden. Jo tættere beregningsnet der anvendes des mere nøjagtig bliver løsning, men des længere beregningstid skal der også påregnes.
- Når beregningsnettet er lagt, skal grænsebetingelser samt en turbulensmodel bestemmes. Disse input har en afgørende betydning på kvaliteten af løsningen.
- Derefter løses differentielligninger og den fremkomne resultat studeres og vurderes ved hjælp af en post-processor

Primær brændkammer

Der er udført beregninger på størrelsen af lufthuller i luftrørene i det primære kammer, samt på afstanden til de risterør som ballen hviler på. De efterfølgende overvejelser og beregninger tager udgangspunkt i en lufthulsdiameter på 6mm.

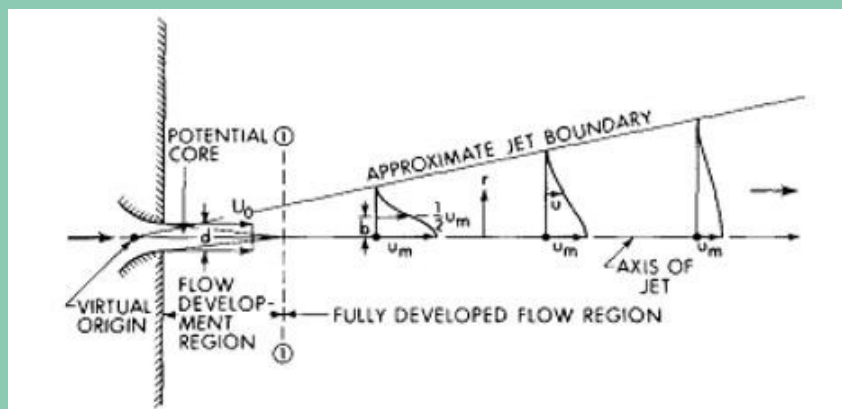
For at opnå en god fordeling over hele luftrørslængde vælges det at placere hulerne med 50 mm afstand. Eftersom luftrørene er ca. 1,4 m lange betyder det, at der skal være 28 huler pr. rør. Udgangshastighed fra hullet er beregnet til ca. 26 m/s. Dimensioneringsgrundlaget under disse forudsætninger kan ses i

Tabel 14.

Total luft flow	246 m ³ /h		
Forventet luft temperatur	200 °C		
Hul diameter	6 mm		
Afstand mellem hullerne (center til center)	140 mm	120 mm	100 mm
Antal huller pr. luftrør	10 stk.	12 stk.	14 stk.
Total antal huller	100 stk.	120 stk.	140 stk.
Udgangshastighed fra hullet	ca.24 m/s	ca.20 m/s	ca.17 m/s

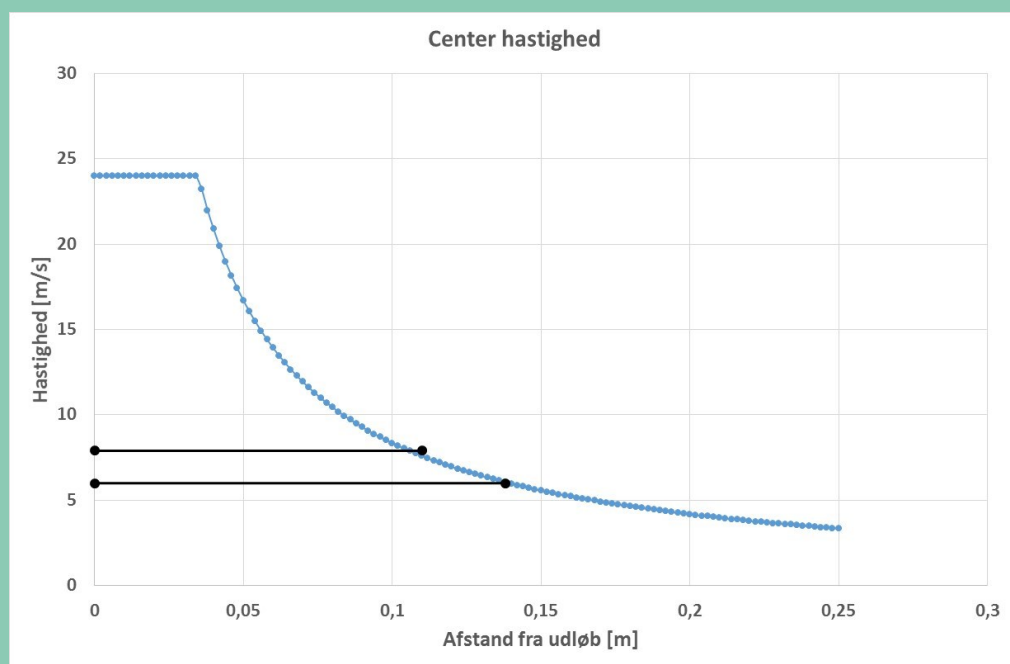
TABEL 14 DIMENSIONERINGSGRUNDLAG

De indledende dimensioneringsovervejelser omkring placering af luftrør samt lufthulstørrelser baseres på viden om udvikling af en fri luftjetstrøm. For en fri luftjet strøm defineres 2 zoner: en nærzone hvor centerhastighed er bevaret, og en fjernzone hvor der sker udvikling i hastighedsprofilet og centerhastighed falder. En skitse af en jetudvikling ses i Figur 43.



FIGUR 43 UDVIKLING AF FRI JETSTRØM

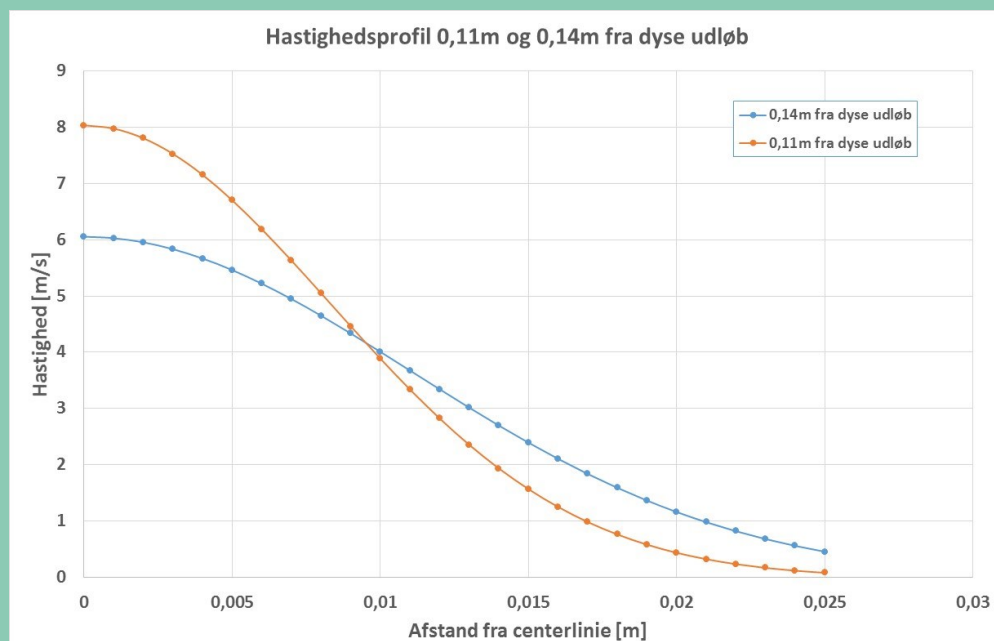
Anvendes teorien bag udvikling af en fri luftjetstrøm, kan det beregnes, hvordan centerhastigheden udvikler sig fra hullets udgang. For et 6 mm hul med udgangshastigheder på 24 m/s fås en udvikling som vist i Figur 44.



FIGUR 44 UDVIKLING AF CENTERHASTIGHED

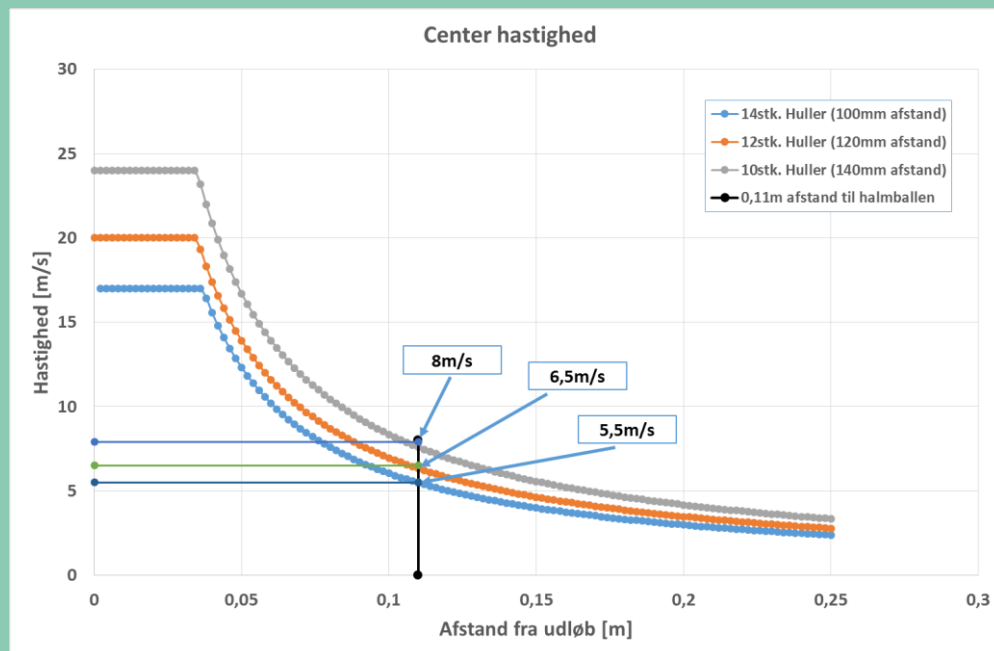
Det er ønsket, at lufthastigheden som rammer ballen skal være mellem 6-8 m/s. På Figur 44 kan man se, at dyseåbningen skal placeres i en afstand mellem 0,11 m og 0,15 m fra ballen for at opnå disse hastigheder.

Hastighedsprofilen på tværs af jetten ses i Figur 45. Der er plottet 2 hastighedsprofiler; en med en afstand på 0,11 m fra dysen og en anden med en afstand på 0,14 m fra dysen. Af figuren kan det ses, at des tættere på dysen des mere spidst hastighedsprofil.



FIGUR 45 HASTIGHEDSPROFIL FRA DYSEUDLØB

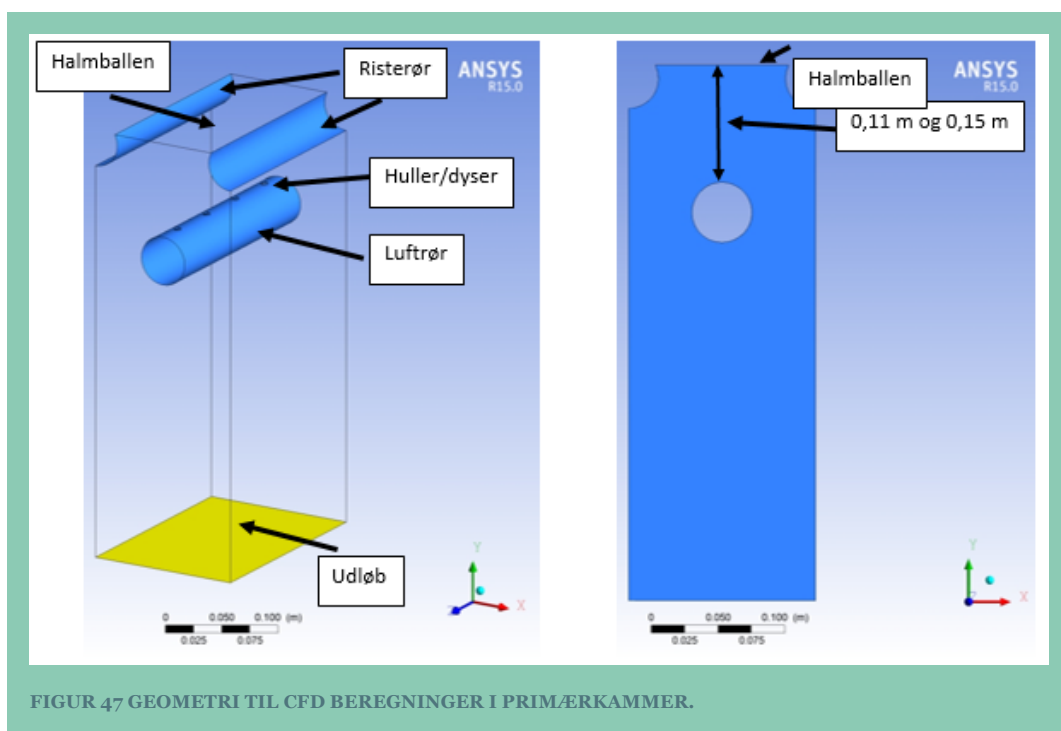
Det skal vurderes, om trykfald over hullerne er stor nok til at skabe jævn lufttilførsel gennem alle hullerne i lufrøret. I det tilfælde, at trykfaldet er for lille, og der som følge heraf skabes et ujævnt flow, skal antallet af huller reduceres. Færre antal huller har indflydelse på udgangshastighederne og placering af lufrøret i forhold til ballen. I Figur 46 ses udvikling af centerhastigheden ved 3 forskellige udgangshastigheder, der svarer til henholdsvis 10, 12 og 14 stk. huller i lufrøret. Det vælges af lufrøret placeres i et afstand på ca. 0,11 m fra ballen. Dette vil betyde, at "ramme"-hastigheden på ballen vil være mellem ca. 6-8 m/s for de 3 cases.



FIGUR 46 UDVIKLING AF CENTERHASTIGHEDER VED FORSKELLIGE ANTAL LUFTHULLER.

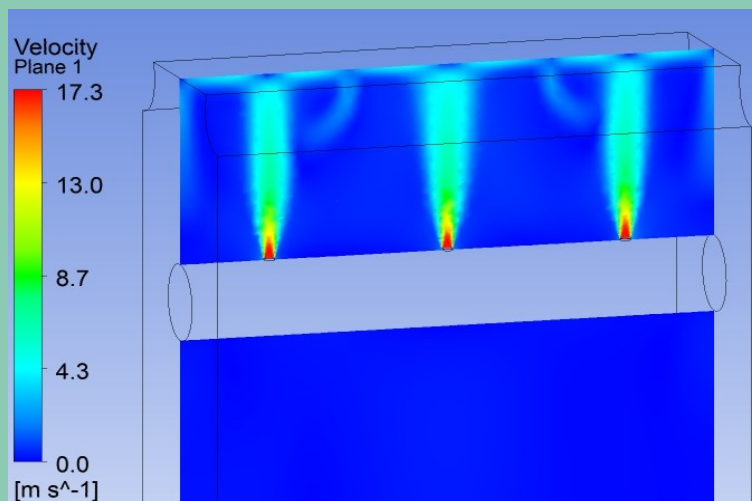
CFD beregninger – primært kammer

Der er udført CFD beregninger på et udsnit af det primære brændkammer, hvor der tilføres luft. Geometrien ses i Figur 47. Der er modelleret et lufrør med 4 huller/dyser, 2 risterør som er halve, og en halmballe, som er modelleret som en væg, og som går lidt "ind i" risterør. På alle vægge omkring lufrøret er der antaget symmetrigrænsebetingelse, med undtagelse af den nederste flade, som er modelleret som et udløb. Hullerne i lufrøret placeres i en afstand på 0,11 m til ballen.

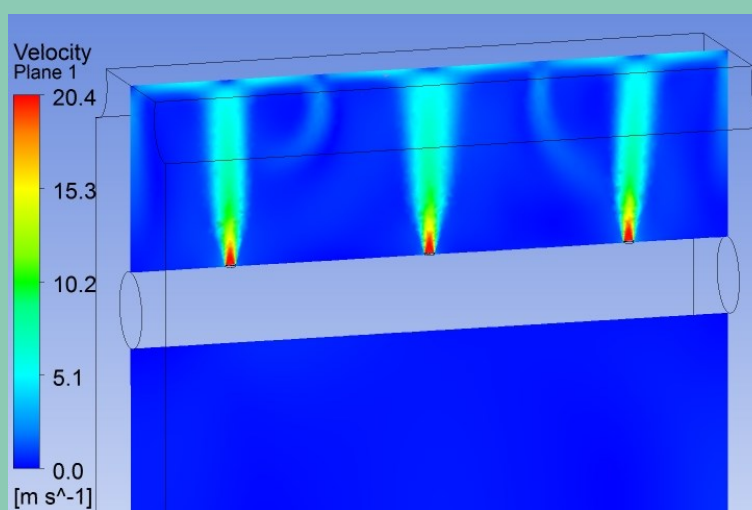


I Figur 48, 49 og 50 ses resultaterne fra CFD beregningerne illustreret med hastighedsplots forskellige steder i beregningsgeometrien.

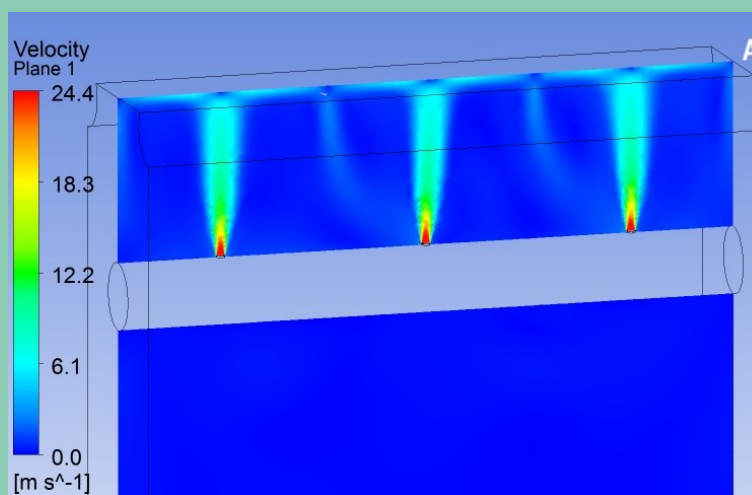
0,11m til ballen 100mm
afstand mellem hullerne



0,11m til ballen 120mm
afstand mellem hullerne

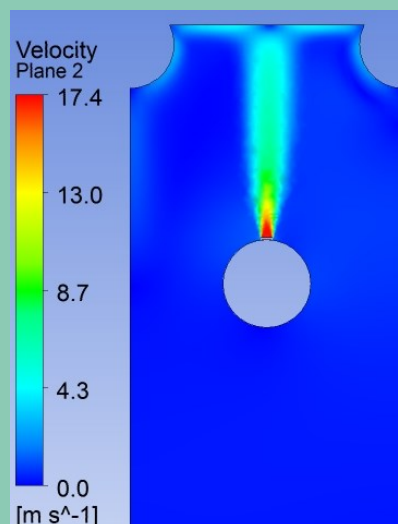


0,11m til ballen 140mm
afstand mellem hullerne

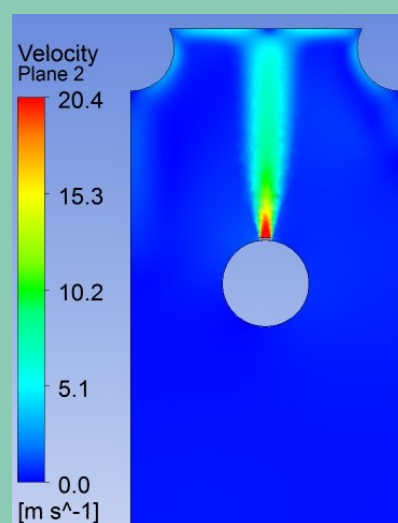


FIGUR 48 HASTIGHEDSPLOT LANG LUFTRØR.

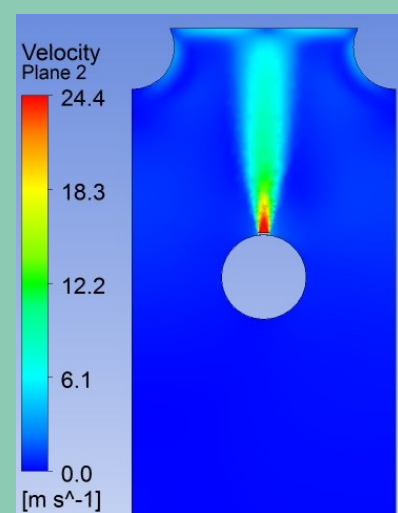
0,11m til ballen 100mm afstand mellem hullerne



0,11m til ballen 120mm afstand mellem hullerne

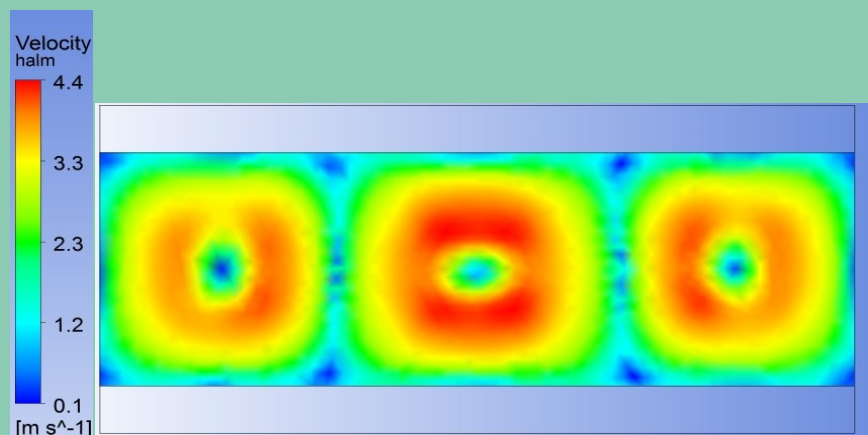


0,11m til ballen 140mm afstand mellem hullerne

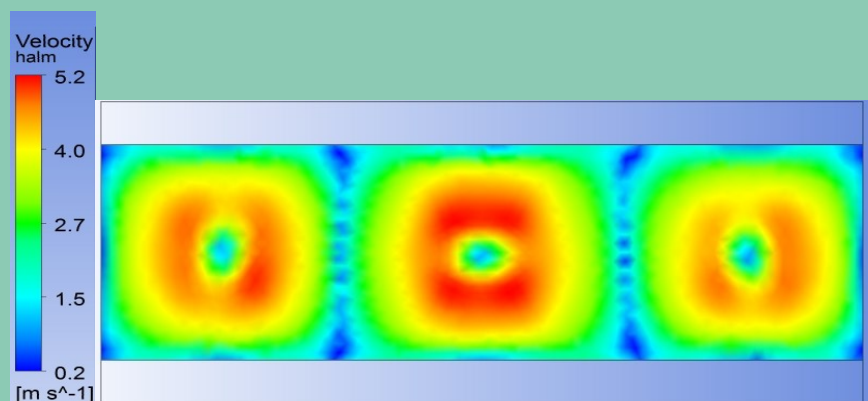


FIGUR 49 HASTIGHEDSPLOTS PÅ TVÆRS AF LUFTRØR.

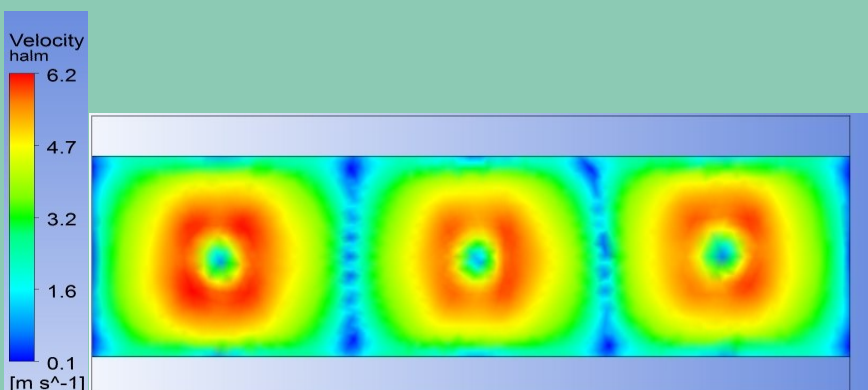
0,11m til ballen 100mm
afstand mellem hullerne



0,11m til ballen 120mm
afstand mellem hullerne



0,11m til ballen 140mm
afstand mellem hullerne



FIGUR 50 HASTIGHEDSPLOT I HALMPALLEPLANET.

Alt andet lige betyder et færre antal huller, at en større lufthastighed vil ramme ballen fra luftdyserne, men samtidig betyder det også en grovere luftfordeling hen over ballens flade. Spørgsmålet er således, om der skal dimensioneres med henblik på lav hastighed på ballen, hvorved der opnås en finere fordeling, eller om der skal søges højere hastighed på ballen til gengæld for en grovere luftfordeling.

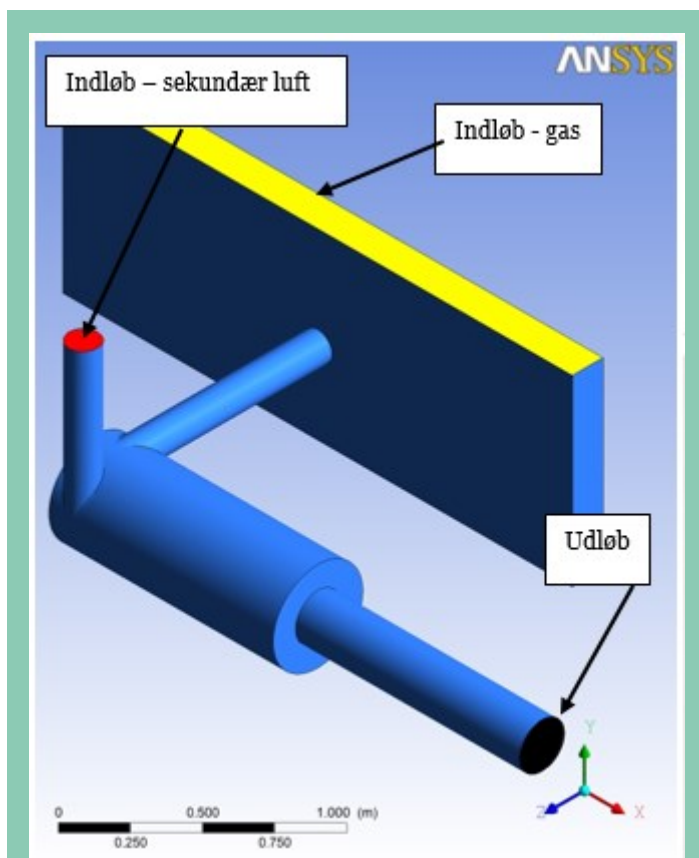
Med udgangspunkt i en afstand på ca. 0,11 m til ballen, foreslås det på baggrund af de udførte CFD beregninger, at vælge en afstand mellem huller på 140 mm, altså det sidste løsningsforslag. Baggrund herfor er, at hastigheden hvormed luften rammer ballen er nærmere de 8 m/s, end det er tilfældet med et større antal huller.

Sekundært brændkammer

Som udgangspunkt for beregningerne anvendes et arbejde, der er blevet udført for Faust af en 8. semesters projektgruppe fra Ålborg Universitet i 2003. I gruppens projektrapport foreslås et cyclon-forbrændingskammer.

CFD beregninger - sekundært brændkammer

I de indledende beregninger blev der genereret en cyclongeometri som vist i Figur 51. Designparametrene som blev anvendt i projektgruppens arbejde og taget til indtægt i nærværende beregninger. De er vist i Tabel 52. Gassammensætningen er vist i Tabel 15.



FIGUR 51 GEOMETRI TIL CFD BEREKNINGER I SEKUNDÆRKAMMER.

Parameter	Value
Preconditions:	
Nominal heat output	600 kW
Nominal thermal efficiency	0.85
Straw mass flow	0.0351 kg/s
Primary air flow (20 °C)	0.0670 m ³ /s (0.0804 kg/s)
Gas temperature from primary chamber (adiabatic)	1082° C
Gas flow from primary chamber	0.505 m ³ /s (0.116 kg/s)
Design parameters:	
Secondary air flow (20 °C)	0.221 m ³ /s (0.164 kg/s)
Oil burner heat power	20 kW
Flue gas temperature (adiabatic)	1954° C
Total flue gas flow	1.82 m ³ /s (0.290 kg/s)
Secondary chamber furnace load	3.2 MW/m ³
Dimensions of Secondary Combustion Chamber:	
Volume	0.165 m ³
Diameter	0.44m
Length	1.1m
Diameter _{exit}	0.22 m
Diameter _{inlets}	0.14 m
Inlet Velocity _{air}	15 m ³ /s
Inlet Velocity _{fluegas}	34 m ³ /s

FIGUR 52 DESIGNPARAMETRE I AAU PROJEKTET.

Gassammensætning	CH ₄	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	N ₂
Masseprocent	3,3 %	13,7 %	24,9 %	1,2 %	3,6 %	53,3 %

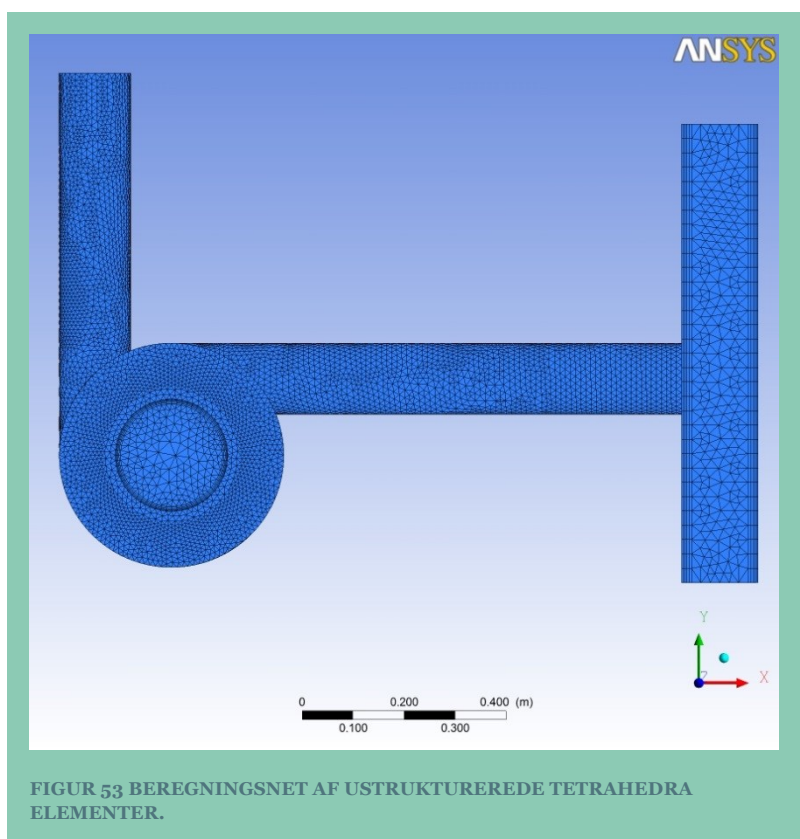
TABEL 15 GAS SAMMENSÆTNING

I Tabel 16 er grænsebetingelserne for de CFD beregninger der er gjort i nærværende projekt vist. Indledende blev der anvendt en K-epsilon og SSG Reynolds Stress turbulens model. Ifølge litteraturen skulle SSG Reynolds Stress turbulens model være bedre egnet til beregninger på swirl flow.

Simuleringstype	Stationær
Turbulens model	k-epsilon og SSG Reynolds Stress
Indløb 1: Luft	
Indløbskonditioner	
Type	Indløb
Masseflow	x kg/s
Turbulens intensitet	10%
Temperatur	25°C
Indløb 2: Gas	
Indløbskonditioner	
Type	Indløb
Masseflow	x kg/s
Turbulens intensitet	10%
Temperatur	25°C
Udløb	
Udløb konditioner	
Type	Fri åbning
Åbnings tryk	0 Pa

TABEL 16 GRÆNSEBETINGELSERNE

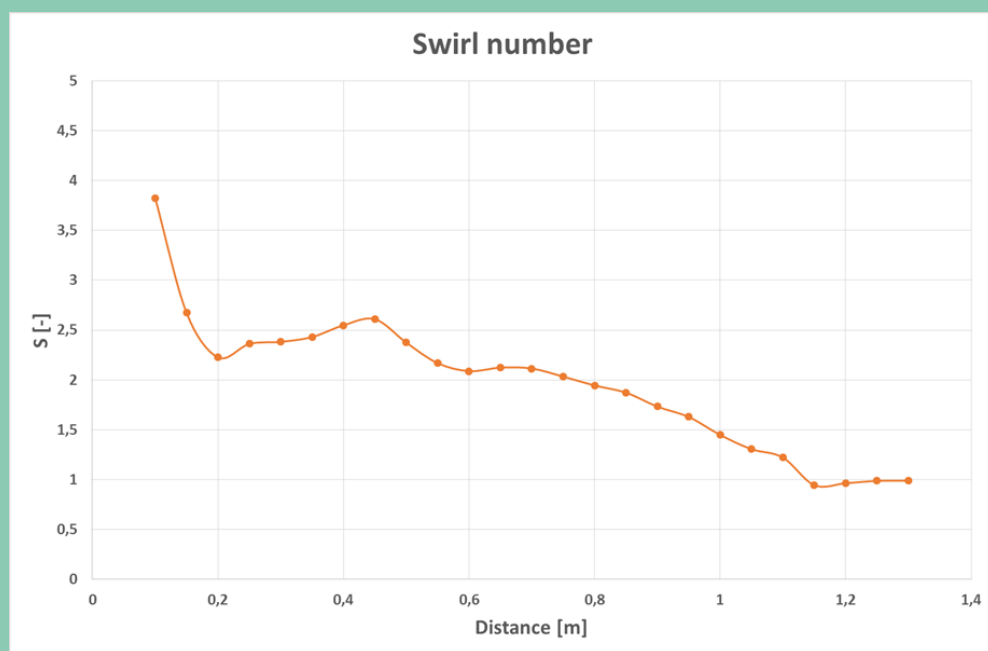
Det anlagte beregningsnet er vist i Figur 53. Beregningsnettet består af ustruktureret tetrahedra elementer. Der er genereret et beregningsnet med ca. 1.500.000 tetrahedral elementer og 455.000 noder.



Graden af swirl i strømmingen kan kvantificeres ved den dimensionsløse parameter, S , også kaldt for swirl number. Swirl number er defineret som forholdet mellem den aksiale flux af angulært momentum til den aksiale flux af aksiale momentum.

$$S = \frac{\int \rho \cdot U_x \cdot U_\theta \cdot r \, dA}{R \int \rho \cdot U_x^2 \, dA}$$

Swirl number er plottet i Figur 54 som funktion af afstanden fra indløbet.

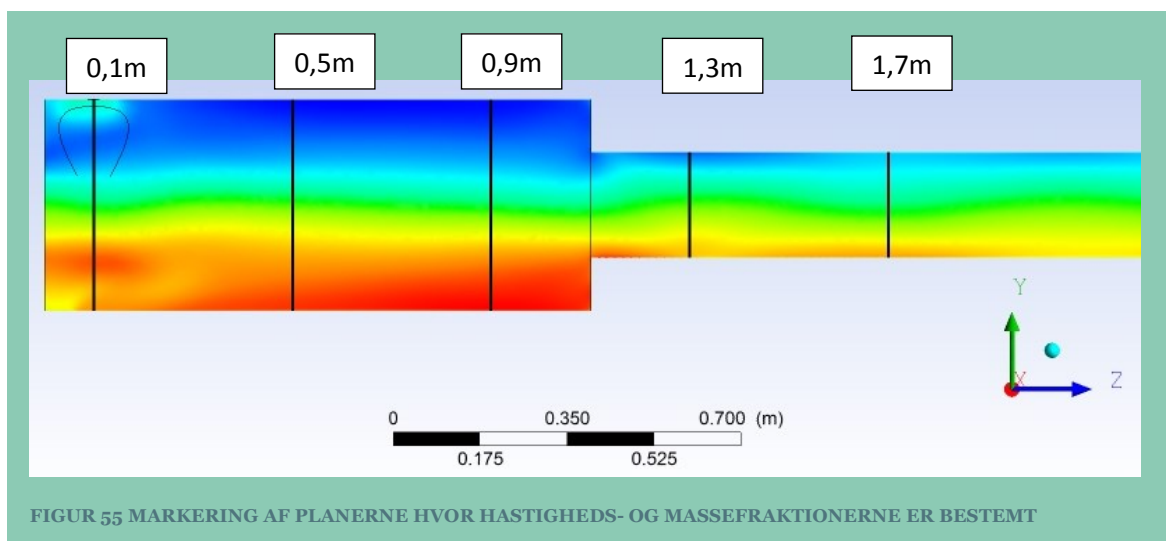


FIGUR 54 BEREGNING AF SWIRLNUMBER SOM FUNKTION AF AFSTANDEN FRA INDLØBET.

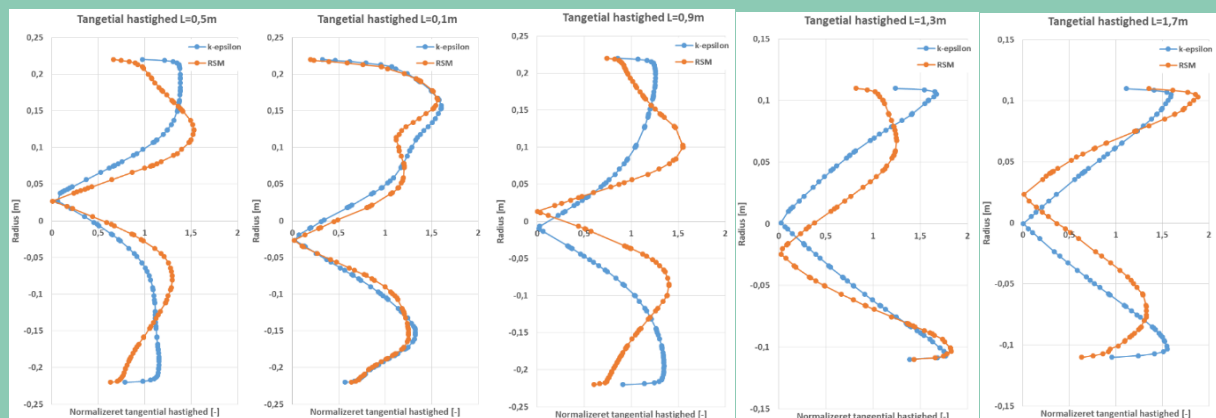
I Figur 54 kan man se at swirl number aftager med brændkammerets længde. Normalt ligger swirl number i området 3-11 for swirl brændere. I forhold til det anvendte design i beregningerne, ses at swirlet er relativt svagt. Dette ses også af de aksiale hastigheder, idet graden af recirkulation er svag.

Resultater fra beregning med hver af de to turbulensmodeller er vist i Figur 56, 57 og 58.

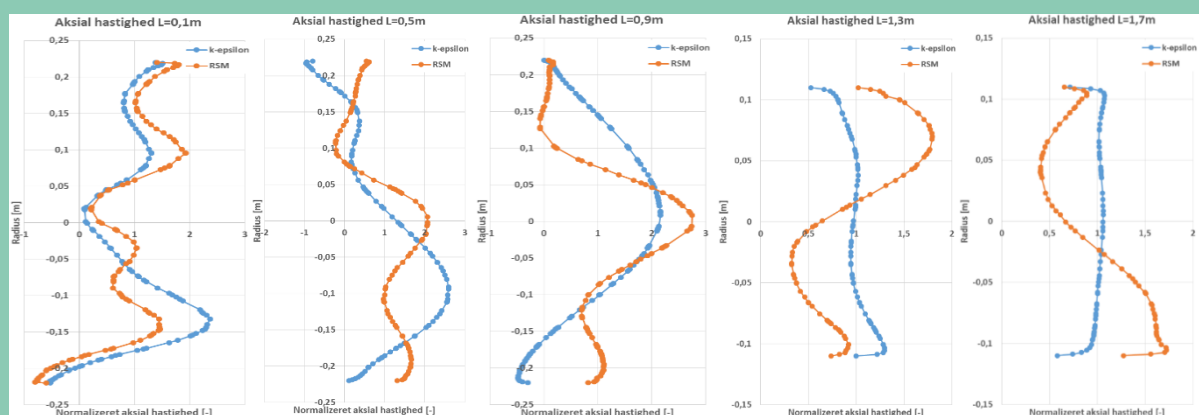
Figur 55 viser de snitplaner hvor resultaterne fra de to beregninger er præsenteret.



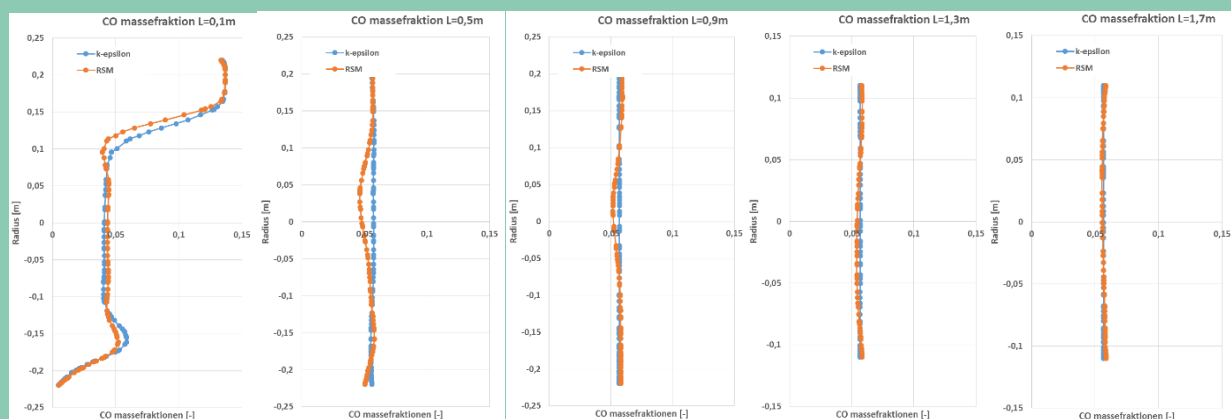
FIGUR 55 MARKERING AF PLANERNE HVOR HASTIGHEDS- OG MASSEFRAKTIONERNE ER BESTEMT



FIGUR 56 TANGENTIEL HASTIGHED I SNITPLANERNE



FIGUR 57 AKSIAL HASTIGHED I SNITPLANERNE



FIGUR 58 CO MASSEFRAKTIONEN I SNITPLANERNE

I Figur 56 og 57 ses forskellen på udformning af de aksiale og tangentielle hastighedsprofiler, og i Figur 58 ses massefraktionerne af CO. Af Figur 58 kan man se, at opblandingen sker effektivt, og at der allerede halvvejs gennem brændkammeret ikke sker yderligere opblandingen. Af Tabel 17, ses at opholdstiden er kort samt at tryktabet er relativt stort.

SSG Reynolds stress

Opholdstid 0,3-0,4s

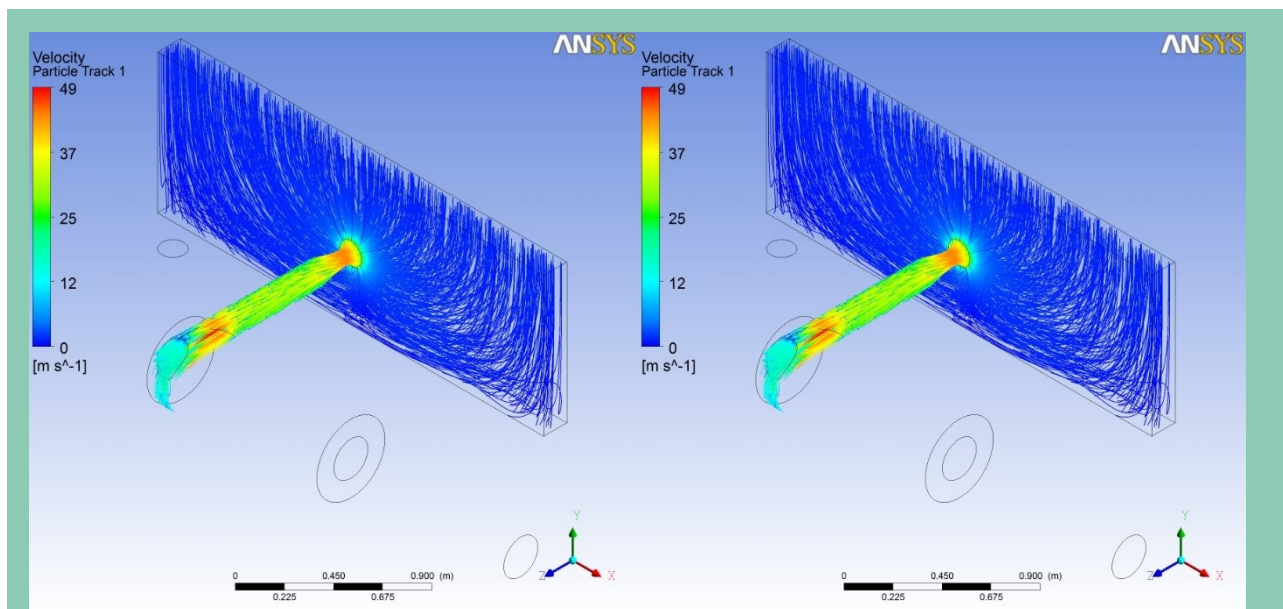
Tryktab Ca. 600 Pa

TABEL 17 OPHOLDSTID OG TRYKTAB I SEKUNDÆR BRÆNDKAMMERET MED SSG REYNOLDSSTRESS MODEL

Ved sammenligning af resultaterne fra de turbulensmodeller ses det, at SSG Reynoldsstress modellen er bedre til at bestemme den frie vortex struktur end k- ϵ modellen. Til de senere beregninger skal derfor vælges SSG Reynoldsstress model.

CFD beregninger – overgangen til det sekundært brændkammer

Der blev også undersøgt, hvad der sker med partiklerne, som uundgåelig vil blive dannet i det primære brændkammer. I gassen fra det primære forbrændingskammer blev der tilført sod partikler i størrelsen fra 30-300 μ m med densiteten 1200kg/m³. Der er blevet undersøgt hvorvidt disse partikler vil følge strømning, eller vil ramme væggen med tilhørende risiko for aflagring.



FIGUR 59 PARTIKELBANER VED OVERGANGEN MELLEM PRIMÆR- OG SEKUNDÆRKAMMER

Figur 59 viser partikelbanerne fra det primære til det sekundære brændkammer. Simulering viser, at alle partikler større end 30 μ m vil ramme væggen. Nogle af de største partikler vil blive sorteret fra inden indløbet til sekundærkammer, mens resten på grund af høje flowhastigheder vil ramme brændkammervæggen i cyclonbrænderen tæt ved indløbet. I hvor høj grad partiklerne vil aflagre på cyclonvæggen, afhænger af partiklernes kemiske sammensætning. Risikoen er imidlertid høj i forbindelse med afbrænding af halm, hvor indholdet af salte er stort.

Bilag 3 Eksempel på 2-kammer forbrændingskedel

Herlt kedlen

http://www.herlt-strohheizung.de/downloads/Herlt_Pp_Stroh.pdf



Herlt kedlen er ifølge producenten en modulopbygget forgasserkedel bestående af bl.a. et forgasningskammer, et underliggende forbrændingskammer og et efterfølgende cylinderisk brændkammer.

Herlt har patenteret flere dele af systemet i bl.a. et europæisk patent (EP 1 695 009 B1)

http://www.lens.org/images/patent/EP/1695009/B1/EP_1695009_B1.pdf

Uddrag af patent:

Fig. 1

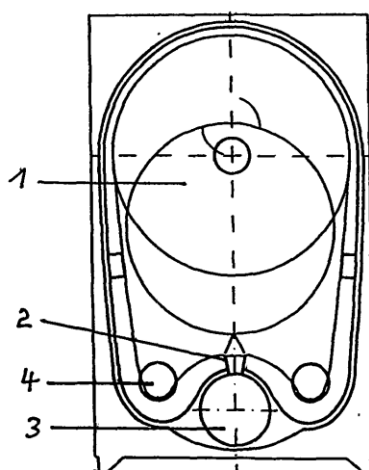
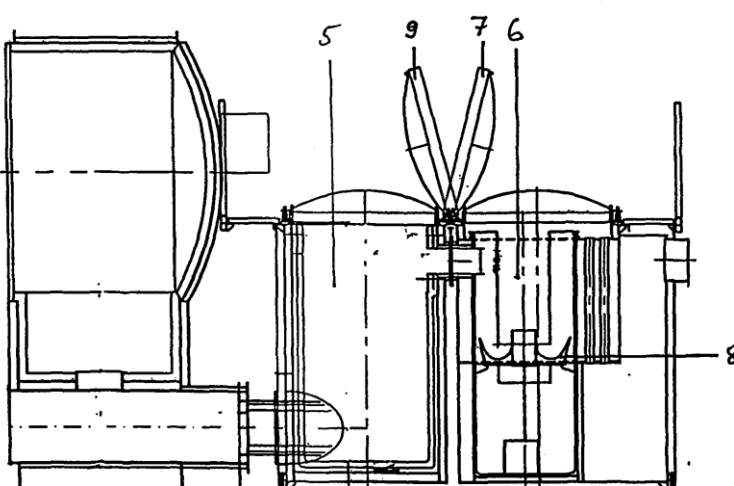


Fig. 2



Claims

1. A gasification boiler for solid fuels, in particular for bales of straw, with optimized exhaust gas values and burn-up at the bottom, comprising a fuel and gasification space (1) which can be closed by means of a filling door and has air feeds, a grating (2) arranged at the bottom, a combustion space (3) situated below it, and ash separator (6), heat exchange surfaces and fan arranged behind it in terms of flow, **characterized**

- **in that** the fuel and gasification space (1) has depressions (4) for collecting ash laterally next to the centrally arranged grating (2) and the combustion space (3),
- a cylindrical combustion chamber (5) designed as an additional constructional unit is connected to the outlet of the combustion space (3),
- and a cylindrical ash separator (6) which is designed as an additional constructional unit and is connected to a known heat exchanger is connected to the combustion chamber (5).

2. The gasification boiler as claimed in claim 1, **characterized in that** the lower, lateral depressions (4) of the fuel and gasification space (1) are of half-shell shaped design and run parallel to the combustion space (3) and the latter is in each case assigned a small door for the removal of ash.

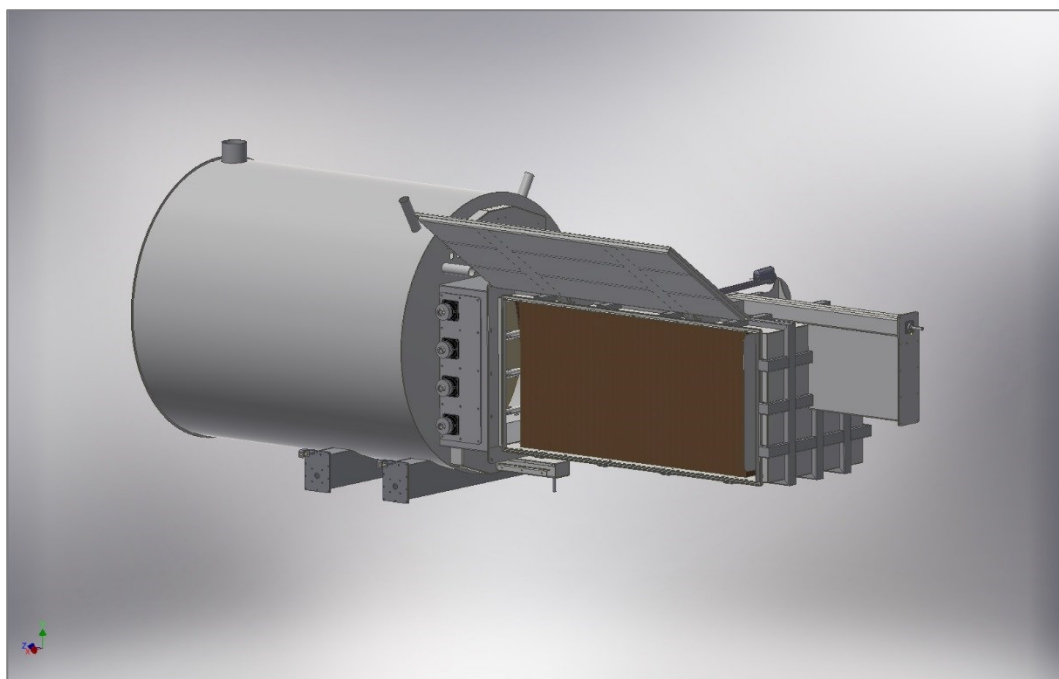
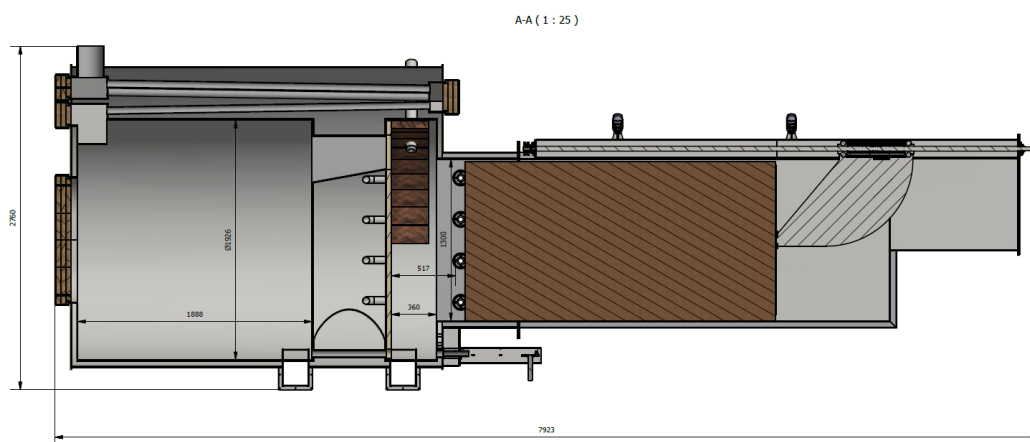
3. The gasification boiler as claimed in claims 1 and 2, **characterized in that** the cylindrical combustion chamber (5) is connected at the bottom tangentially to the outlet of the combustion space (3), so that the combustion gas rises therein in a swirling manner and **in that** the combustion chamber (5) can be closed at the top by a cover (7).

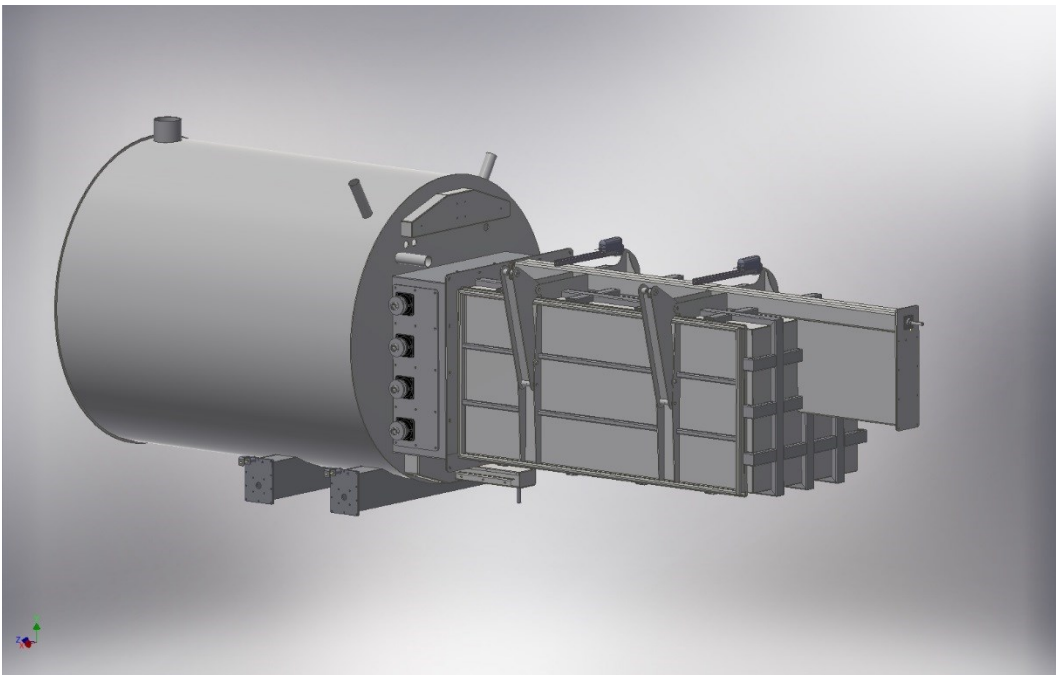
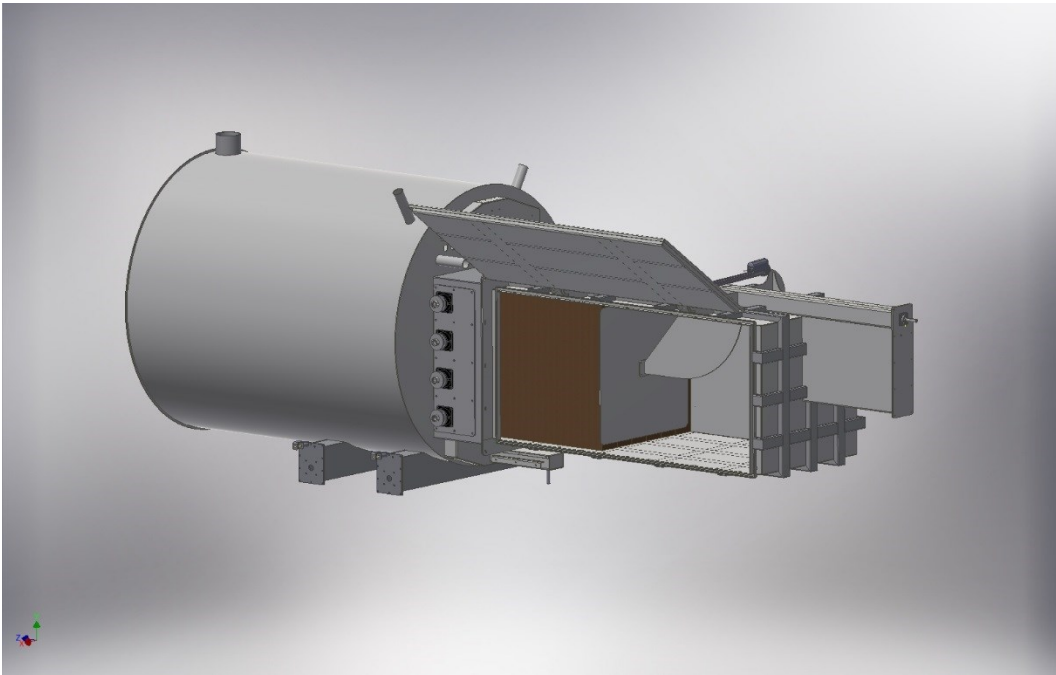
4. The gasification boiler as claimed in claims 1 to 3, **characterized in that** the cylindrical ash separator (6) is connected at the top tangentially to the outlet of the combustion chamber (5), and a flue pipe with the opening approximately halfway up is arranged centrally.

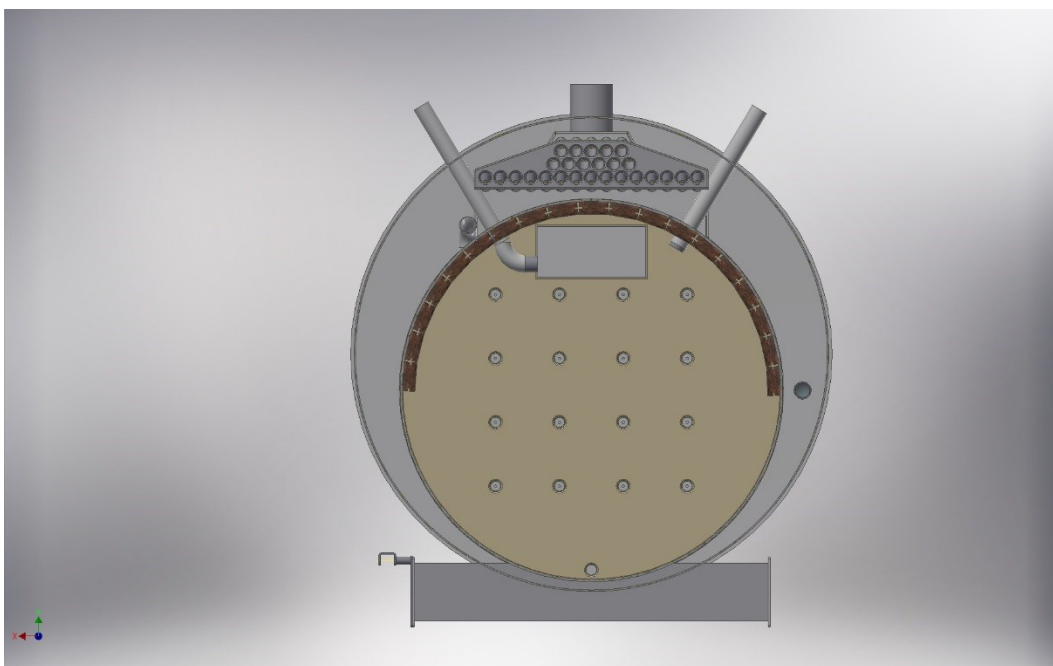
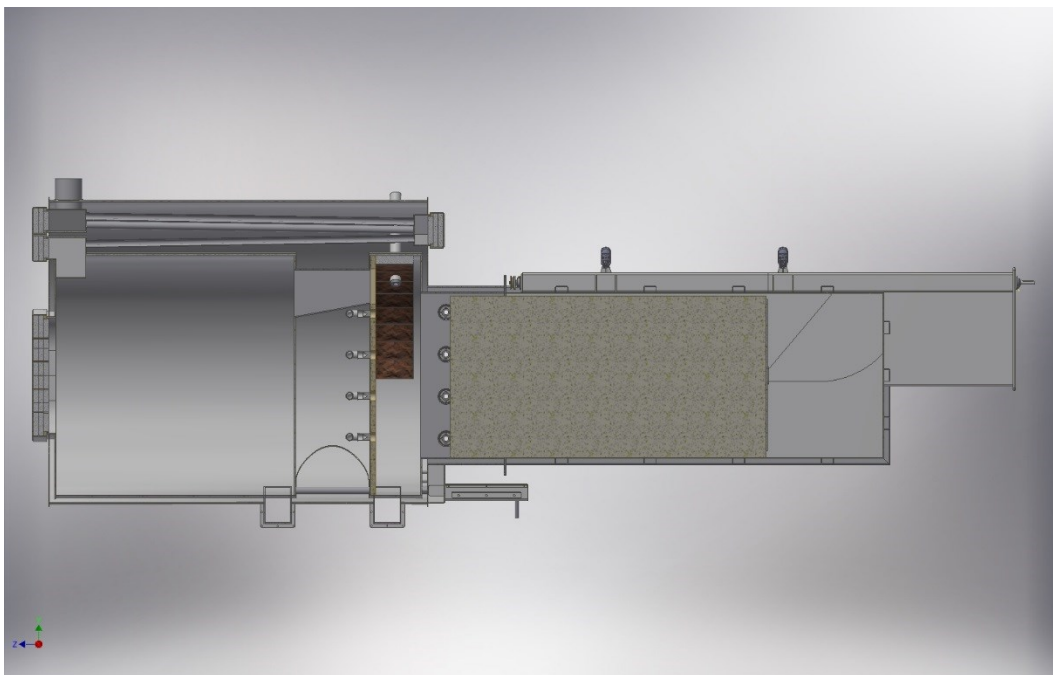
5. The gasification boiler as claimed in claim 4, **characterized in that** a circular baffle plate (8) is fitted below the opening of the flue pipe in such a manner that an annular opening for the depositing of ash remains from the outer wall, and **in that** the ash separator (6) can be closed at the top by a cover (9).

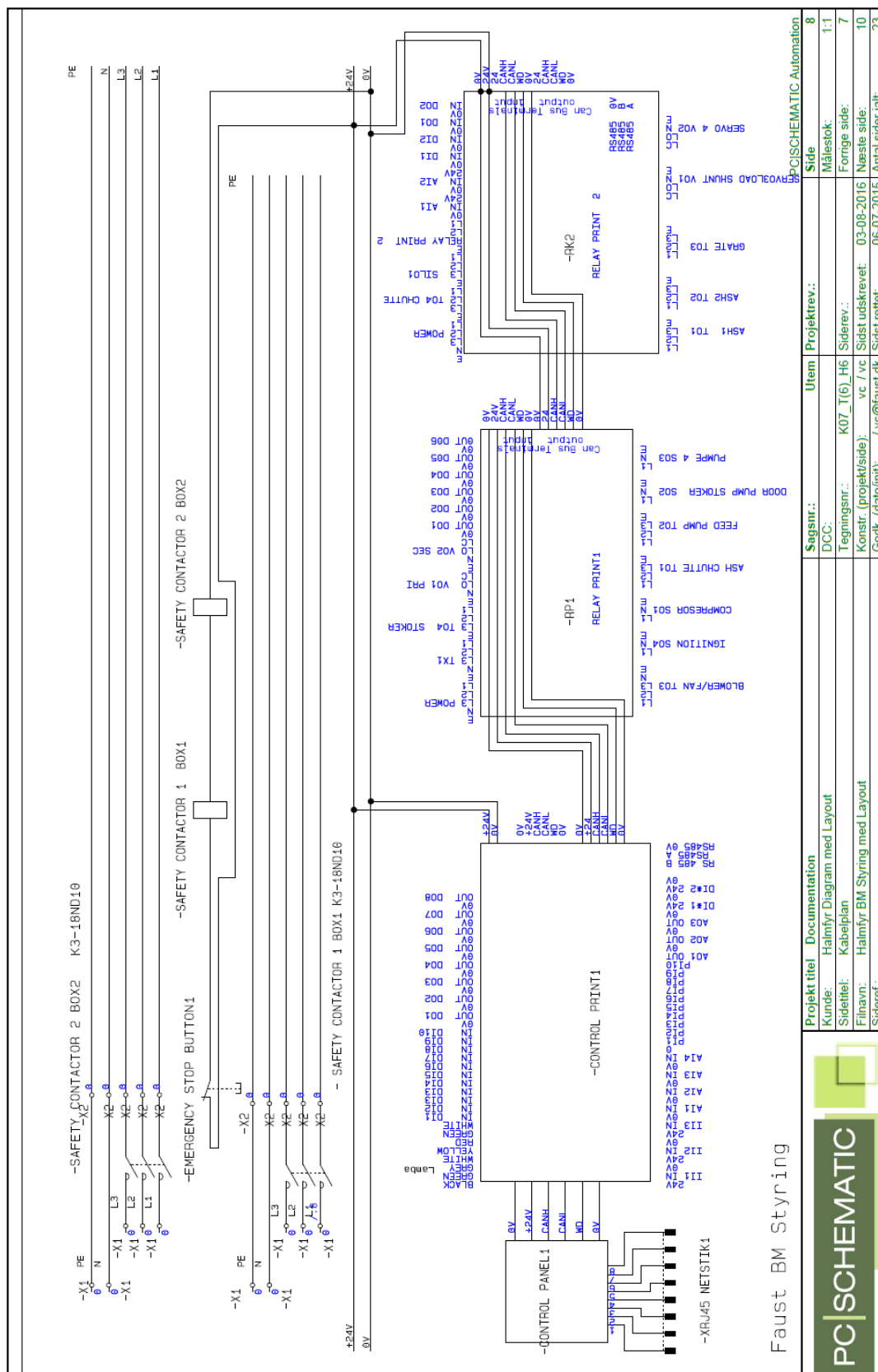
6. The gasification boiler as claimed in claims 1 to 5, **characterized in that** the cylindrical combustion chamber (5), the cylindrical ash separator (6) and the heat exchanger are connected in a framework (10) to form a constructional unit.

Bilag 4 CAD tegninger









Primær reduktion af emissioner fra 400 kW portionsfyret halmkedel

Projektets overordnede formål var at udvikle en manuelt fyret halmkedel (også kaldet portionsfyret) på ca. 400 kW med lavere emissioner end de halmkedler, der findes på markedet i dag. Særlig har fokus været på reduktion af CO, OGC, NOx og støvemissioner, som er de væsentligste emissioner fra disse anlæg. Grundideen har været at overføre teknologi fra brændekedler, der lige som halmfyr er portionsfyrede men udviklet til et noget højere teknologisk niveau. Udfordringen med halm er imidlertid at det i forhold til brænde er et meget besværligt brændsel. Der dannes slagge og støv i store mængder og korrosive forbindelser i røggassen. Disse udfordringer skulle adresseres i projektet. Der blev udviklet og testet flere varianter, og det endte op i en kedel med en helt ny type brændkammer. Det lykkedes at gennemføre flere fulde afbrændinger uden væsentlige problemer. Mekanikken fungerede og både CO, OGC og NOx-emissionerne var under eller meget tæt på de ønskede grænseværdier. Støvemissionen var imidlertid fortsat relativt høj, og her vil der kræves yderligere udvikling. Det forventes at støvemissionen vil kunne reduceres ved yderligere optimering af brændkammer, luftdosering og kedlens styring.



Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K

www.mst.dk