



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

EcoDesign+ Boiler Ultra-lavemissions- biomassekedel med forgasningsteknologi og røggasrecirkulation – Et MUDP projekt

MUDP Rapport
August 2022

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

René Lyngsø Hvidberg (Teknologisk Institut),
Lars Schwarzer (Teknologisk Institut),
Quynh Thu Nguyen (Teknologisk Institut),
Morten Gottlieb Warming-Jespersen (Teknologisk Institut),
Anne Mette Frey (Teknologisk Institut),
Jens Mogensen (KSM),
Jannich Hansen (NBE)

ISBN: 978-87-7038-432-2

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

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram, MUDP, som er et program under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk

Web: www.ecoinnovation.dk

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | Forord og formål | 5 |
| 2. | Sammenfatning og konklusion | 6 |
| 3. | AP1: Træpillers fysiske og kemiske egenskaber og deres emissioner | 8 |
| 3.1 | Materialer og metoder | 8 |
| 3.2 | Resultater | 9 |
| 3.2.1 | Sammenhænge mellem nøgleparametre herunder NOx og nitrogenindhold | 15 |
| 3.2.2 | Undersøgelse af sammenhænge mellem støv og uorganiske komponenter | 15 |
| 3.2.3 | Undersøgelse af sammenhænge mellem støv og organiske komponenter | 15 |
| 3.3 | Delkonklusion for afsnit 3 | 15 |
| 4. | AP2: Retningslinjer til udvikling af ultra-lavemissions-biomassekedler | 17 |
| 4.1 | Baggrund og formål | 17 |
| 4.2 | State of the art | 18 |
| 4.3 | Anbefalinger for kedler med to-trins forbrænding (forgasningskedler) | 18 |
| 4.4 | Anbefalinger for kedler med røggasrecirkulation | 20 |
| 5. | AP3: Emissioner og forbedringer på kedler gennem udvikling | 22 |
| 5.1 | Formål og målsætning | 22 |
| 5.2 | Metoder/testprocedurer | 22 |
| 5.3 | Resultater for NBE's Kedel N. | 24 |
| 5.3.1 | Udviklingsproces for NBE | 24 |
| 5.3.2 | Data for to-trins-forbrænding Kedel N (forgasningskedel) | 28 |
| 5.3.3 | Røggasrecirkulering Kedel N-R | 32 |
| 5.4 | Resultater for KSM' Kedel K. | 34 |
| 5.4.1 | Udviklingsproces for KSM | 34 |
| 5.4.2 | Data for 2 to-trins-forbrænding, Kedel K (forgasningskedel) | 36 |
| 5.4.3 | Røggasrecirkulering Kedel K | 46 |
| 5.5 | Træpilleforsøg på Kedel K | 47 |
| 5.5.1 | Afvejning og forbrændingstest på de forskellige træpiller | 47 |
| 5.5.2 | Partikelfordelingen fra forbrændingen | 51 |
| 5.5.3 | Opløste piller | 53 |
| 5.6 | Delkonklusion for emissioner og forbedringer på kedler gennem udvikling | 55 |
| 6. | Formidlingsaktiviteter gennem projektperioden | 57 |
| 7. | Referencer | 58 |
| | Bilag 1.Askesmelte egenskaber | 59 |
| | Bilag 2.Prototyper NBE | 60 |
| | Bilag 3.Prototyper KSM | 61 |

1. Forord og formål

Formålet med projektet er at udvikle to nye mindre (<50 kW) ultra-lavemissions-biomassekedler med forgasningsteknologi og røggasrecirkulering (FGR) til at reducere henholdsvis støv- og NO_x-emissioner samtidig med at energieffektiviteten øges, således at disse kedler er klar til fremtidens strengere krav og kan blive en ny kedelgeneration. Kedlerne vil blive optimeret til brug under virkelig driftsbetingelser og ikke kun under testomstændigheder. Derudover vil projektet være det første i de nordiske lande, som udvikler kedler til et niveau, så de er væsentligt lavere end Ecodesign 2020 krav (Ecodesign+ ready). Målet er at opnå en årsvirkningsgrad på minimum 92 % og emissioner af støv og NO_x på henholdsvis 65-75% og 30% lavere end Ecodesign 2020 krav. 30 % af de danske biomassekedler stod i 2020 til at blive udelukket fra markedet, da deres nuværende produkter ikke på tidspunktet opfyldte de øgede krav fra EU's Ecodesign lovgivning.

Udover nye ultra-lavemissionskedler vil der igennem viden genereret i projektudviklingsarbejdet udfærdiges generelle retningslinjer for, hvordan man udvikler lavemissionskedler med denne forbrændingsteknologi. Disse udbydes som en slags springbræt for alle danske producenter af kedler, således at også de producenter med produkter, der ellers ikke kan blive på markedet, har en chance for at få tilpasset deres kedelmodeller og efterfølgende nå Ecodesign 2020 standarden.

Udviklingsarbejdet med kedlerne vil blive udført af to danske producenter; NBE og KSM. Begge virksomheder er innovative på et højt niveau, de er fortrolige med forsknings- og udviklingsprojekter og er meget dygtige inden for deres respektive brænderkoncepter, der fører til højeffektive biomassekedler.

Rapporten er delt op i tre overordnede afsnit der følger projektets arbejdsplaner AP1 (afsnit 3), AP2 (afsnit 4) og AP3 (afsnit 5).

2. Sammenfatning og konklusion

Projektets formål

Formålet med projektet er at udvikle to nye mindre (<50 kW) ultra-lavemissionsbiomassekedler med forgasningsteknologi og røggasrecirkulering (FGR) til at reducere henholdsvis støv- og NO_x-emissioner samtidig med at energieffektiviteten øges, således at disse kedler er klar til fremtidens strengere krav og kan blive en ny kedelgeneration.

Træpillers kemiske egenskaber og emissioner

Der er i projektet indlagt et mindre træpilleanalysestudie (afsnit 3) der omhandler 7 forskellige træpiller af enten 6 eller 8 mm i dimension, som har haft til hensigt at finde eventuelle sammenhænge mellem fysiske- og kemiske analyser og tilhørende forbrændingsresultater af de forskellige træpiller. Det er eftervist en tydelig sammenhæng mellem NO_x og nitrogenindhold i træpiller. NO_x-emissioner tiltager omtrentlig lineær med nitrogenindholdet, hvilket tyder på at en relevant andel af NO_x dannes fra brændstof-N (jf. afsnit 4). På baggrund af denne sammenhæng bør man i fremtidigt lovgivningsarbejde tage op til overvejelse om, hvorvidt biobrændselskedler skal evalueres baggrund af på NO_x, da de forbrændingstekniske resultater i høj grad er afhængig af nitrogen-indholdet i træpiller brugt under godkendelsestest.

Modsat formodningen var der intet tydeligt forhold mellem askemængden i pillerne og støvkonzentrationen i røggas. En øget totalmængde af kalium (K) syntes dog at øge støvemissioner. Højere støvkonzentrationer syntes desuden at falde sammen med højere CO-konzentrationer. Sammenhængen der ses i projektet, er imidlertid domineret af enkelte målepunkter. Ikke desto mindre er observationen interessant i forhold til optimering og styring af kedler, idet CO er nemmere at måle online end støv.

Anbefalinger og retningslinjer for opbygning af ultra-lavemissionsbiomassekedler

En del af projektet har omhandlet anbefalinger og retningslinjer for opbygning af ultra-lavemissionsbiomassekedler (<50kW) som benytter to-trins forgasningsprincip med træpiller som brændsel. Disse er beskrevet under afsnit 4.3. Som de vigtigste designparametre kan nævnes fordeling mellem primær- og sekundærluft, placering og geometri af sekundærdyser, udformning af brænderen i primærzonen samt brændselstilførsel.

Desuden er der ligeledes lavet tilsvarende anbefalinger og retningslinjer for opbygning af kedler med røggasrecirkulering primært for reduktion af NO_x-emissioner. Af de vigtigste designparametre kan her nævnes dimension og placering af den recirkulerede røggas. Disse er beskrevet under afsnit 4.4.

Ved at kombinere forgasningsprincippet med røggasrecirkuleringen har projektmålsætningen været at reducere støvemissioner med mellem 65-75% samt reducere NO_x-emissioner med op til 30% uden at dette går på kompromis med kedlens effektivitet, så denne holdes over 92%.

Udvikling og emissionstest

Projektets to partnere NBE og KSM har i projektet hver udviklet kedelprototyper, som hver især efterviser en nedskalering af to-trins-forbrænding/forgasningsteknologi til mindre husstandskedler. Denne teknologi er velkendt og standard for større forbrændingsanlæg (fx kraftværkskedler). Det har under projektet imidlertid vist sig vanskeligt at nedskalere teknologien til disse lave ydelser og vedligeholde en ren forbrænding over tid. For begge producenter har forbrænding dog periodevis vist rigtig gode takter.

Begge producenter har forsøgt at recirkulere røggassen for ultimativt at sænke specielt NO_x-emissionerne. For både Kedel N-R (NBE) og Kedel K-R (KSM) viste resultater ingen eller kun mindre effekt af recirkuleringen, hvorfor denne del efterfølgende blev nedprioriteret. En bedre forståelse af recirkulationsforhold (både mængde og placering af den recirkulerede røggas) kunne dog støtte en mulig videre udviklingsproces.

Kedel N (NBE) med to-trins forbrændingsprincip har været gennem flere udviklingsiterationer. Kedlen viste i ideal drift ret lave CO-, OGC-, NO- og støvemissioner, sammenlignet med målsætning i projektet. Dette resultat er dog overskygget af en ustabil forbrænding, der medfører kortvarige, betydelige overskud i ufuldstændig forbrændte stoffer (CO, OGC, og partikler). Disse spontane/kaotisk optrædende emissionsspidser er årsag til, at kedlen ikke

overholder emissionskrav i gennemsnit over en længere periode (flere minutter til timer). Begge effekter – det lavere basisniveau og spidserne – ses især ved fuldlast. Der formodes, at kedlen virker som et konventionelt pillefy ved lavlast på grund af det højere luftoverskud, der bruges under disse driftsforhold. Umiddelbart anbefales at afklare årsagen til de kortvarige emissionsspids, inden der udvikles videre i forbrændingsprincippet til et kommercielt produkt.

Kedel K (KSM) har igennem projektet udviklet en forgasningskedel, som har delvist kommercielt potentiale. Kedel K har fået foretaget en komplet afprøvning efter EN303-5, hvilket vil sige 1x6 timer afprøvning i fuldlast (10,2 kW) og 1x6 timers afprøvning i lavlast (1,8 kW). Resultaterne heraf viser, at Kedel K lever op til emissionskravene sat i Ecodesign. Desuden viser et gennemsnit for de 2x6 støvprøver, foretaget under de to laster, en reduktion på ca. 64% af støvkravene for Ecodesign på 40 mg/m³ ved 10% O₂. En u hensigtsmæssig rensedyklus under lavlastprøven påvirker imidlertid resultaterne markant, hvorfor kedlens potentiale i form af 2x4 bedste støvprøver giver en reduktion på op til 75% af kravene. For de øvrige emissions-parametre CO, OGC og NO_x viser resultaterne for Kedel K at overholde emissions-kravene sat i Ecodesign. NO_x emissionerne var dog højere end projektets målsætning (30% under Ecodesign-krav).

Desuden viser online-målinger af partikelmassekoncentration og sort kulstofkoncentration (black carbon) en ret stabil kørsel fra start til slutning af 6-timers fuldlast og ved et lavere koncentrationsniveau sammenlignet med lavlast, hvilket er forventet. Imens målinger af partikelmassekoncentration og sort kulstofkoncentration under lavlast viste en tendens til at variere betydeligt mere pga. rensedykussen tidligere nævnt. På den anden side viser fuldlastkørslen en tendens til at generere et højere antal mindre partikler og derved en højere partikelantalskoncentration under fuldlast på grund af lavere tilgængelige koagulations-, absorptions- og kondensvask.

Træpilleforsøg på forgasningskedel

I forlængelse af de tidligere undersøgelser vedrørende de kemiske sammensætninger vs. forbrændingstekniske resultater og de fundne begrænsede sammenhænge mellem disse, er der i stedet undersøgt sammenhænge mellem mekanisk holdbarhed (test af hårdhed af træpiller) og partikelsammensætning sammenholdt med de forbrændingsmæssige resultater på den endelige Kedel K med forgasningsteknologi.

Testen for den mekaniske holdbarhed viste at de fem undersøgte træpiller alle lå indenfor ±0,9%-point. Den hårdest pressede træpille af de fem viste sig at være Verdo 6mm Premium, men dette bør ikke have en direkte sammenhæng med at de emissionsmæssige resultater for denne træpille var markant anderledes end de øvrige træpiller. For partikelstørrelsesfordeling fra testen med de opløste piller viste fire ud af de fem træpiller en relativ ens partikelstørrelsesfordeling, hvor ca. 30-35 % er helt fint støv (<0,5 mm). Fra et analyseperspektiv er det en fornuftig procentdel af de helt fine partikler. Verdo 8 mm Premium skiller sig dog ud og har ca. 50 % helt fine partikler, hvilket er til den høje side. Selvom Verdo 8mm Premium leverer de højeste emissioner af støv og CO (jf. TABEL 10) af de tre 8 mm-træpiller i forsøget, er disse ikke markant anderledes end de to andre, hvorfor man heller ikke her entydigt kan konkludere, at partikelstørrelsesfordelingen for de pressede træpiller har stor indvirkning på forbrændingsresultaterne med dette forbrændingsprincip. Ej heller viser de online partikelmålinger udført under testen en markant forskel for denne træpille.

Under træpilleforsøget har det vist sig, at brændseltilførsel med hjælp af en snegl er meget følsomt over for brændslets størrelse (se afsnit 5.5.1). For denne kedel bliver brændslet doseret ved at variere indfødningstiden af sneglen, som kører med konstant omdrejningstal. Eksempelvis krævede 8 mm-træpiller op til 58% længere indfødningstid for at opnå samme indfyret effekt på grund af større modstand for sneglens motor. Dette skal der tages højde for i kommende styringer og de interne afvejninger for at sikre, at kedlen kan levere den nødvendige effekt.

3. AP1: Træpillers fysiske og kemiske egenskaber og deres emissioner

Ved ultralave emissioner er det af afgørende betydning, at vide hvilke emissioner, der kommer fra brændslet og hvilke der stammer fra forbrændingen og dermed kan minimeres. Støv påvirkes af indholdet af kalium og natrium i brændslet. NO_x er afhængigt af kvælstofindholdet i brændslet, men yderligere dannes en forholdsmæssig stor del af den frigivne NO_x ved termiske processer. For at kunne kvantificere hvor lave NO_x emissioner, der kan opnås ved en given pille, er det derfor altafgørende at kunne adskille de to bidrag. Det samme gør sig gældende for støv. I arbejds pakken vil træpilleegenskaberens betydning for forbrændingsprocessen således blive kvantificeret.

3.1 Materialer og metoder

I studiet blev 7 forskellige træpiller udvalgt i et samarbejde mellem Verdo og Teknologisk Institut. To af træpillerne havde 8 mm diameter, mens de resterende havde 6 mm diameter. Kedelbrugerne rapporterer ofte, at det er vanskeligere at brænde 8 mm-træpiller "rent", dvs. med lave emissioner. Derfor blev denne fysiske egenskab vurderet at være en af de mest relevante at fokusere på.

Træpillernes kemiske sammensætning blev analyseret, både i forhold til den organiske andel (C/H/O/N/S) og den uorganiske andel (aske/metaller). Resultater af analyserne er sammenfattet i TABEL 1. Kemiske analyser af metaller i træpiller angives normalt i procent af askesammensætningen. I dette studie blev tallet dels evalueret på denne måde og dels omregnet som mg metal pr. kg træpille for at normalisere i forhold til det varierende askeindhold i pillerne. Sidstnævnte metodik vil blive anvendt ved præsentation af data i figurer og tabeller i denne rapport. Kvalitative forskelle i de to analysemetoder vil kort blive nævnt i teksten, hvor dette er relevant.

Træpillerne blev afbrændt i den samme kedel med nominel 10 kW ydelse, FIGUR 1, hvor der er målt over en periode på 6 timer og udtaget 4 støvprøver. De samme luftindstillinger blev benyttet i alle forsøg. Resultaterne er ligeledes angivet i TABEL 1. Effekten lå mellem 10,1 kW og 11,7 kW og CO₂-koncentration i røggassen (et mål for luftoverskuddet/forhold mellem brændselsmængde og luftmængde) mellem 10 % og 11 %. Dette anses for rimelig ensartet, så forsøgene kan sammenlignes med hinanden.



FIGUR 1. 10-kW-kedel (NBE) anvendt til træpiller-forbrændingsforsøg.

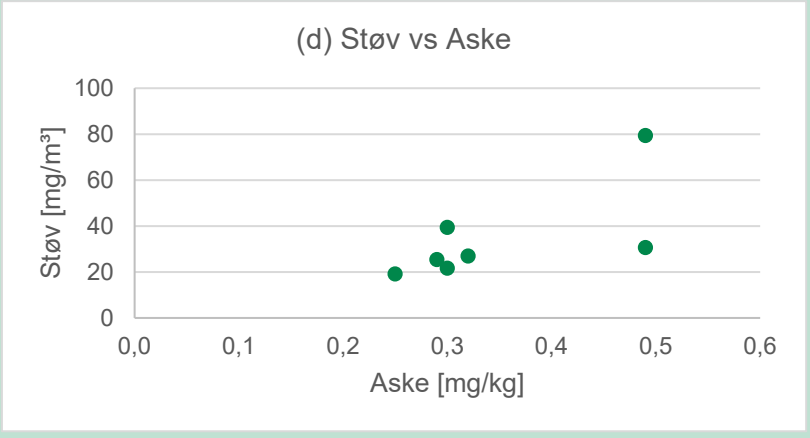
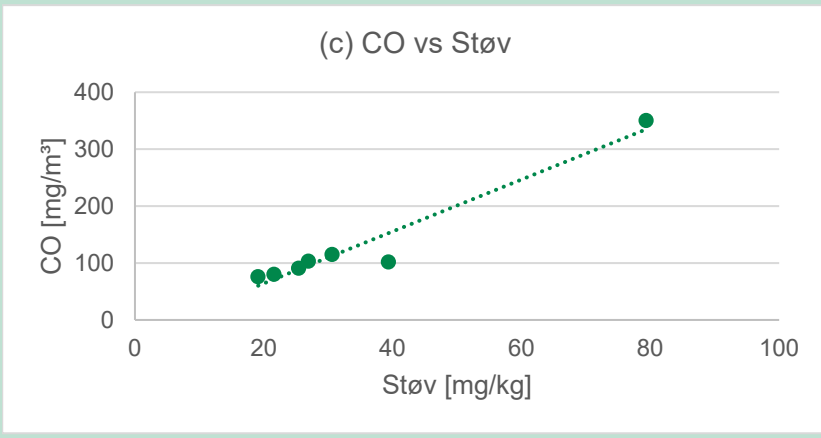
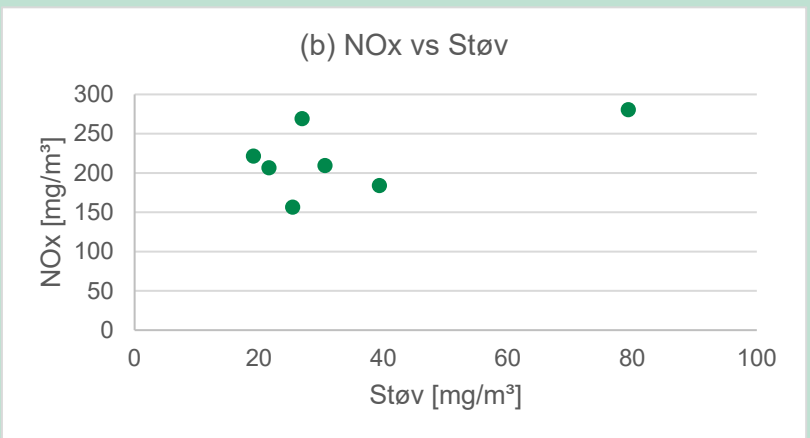
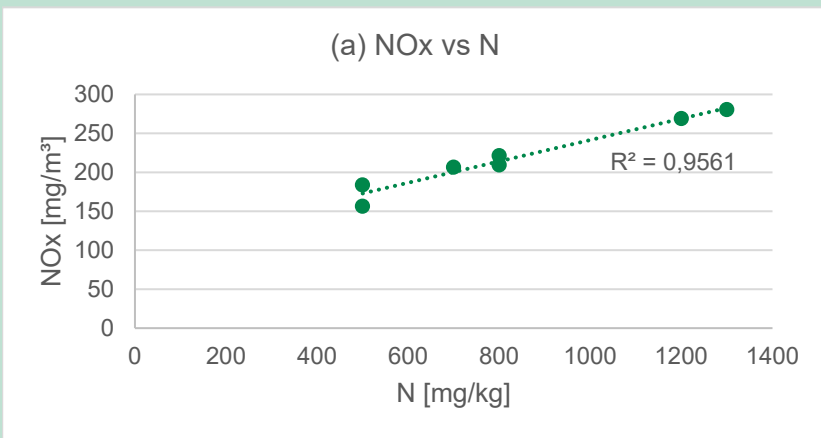
3.2 Resultater

Målinger af de relevante emissioner CO, OGC, NO_x og støv er sammenfattet i TABEL 1. OGC (organic gaseous compounds) blev ikke dannet i relevante koncentrationer, så der ses bort fra en yderligere analyse af denne parameter. Emissioner af CO, NO_x og støv blev vurderet i forhold til træpillernes kemiske egenskaber i de følgende afsnit.

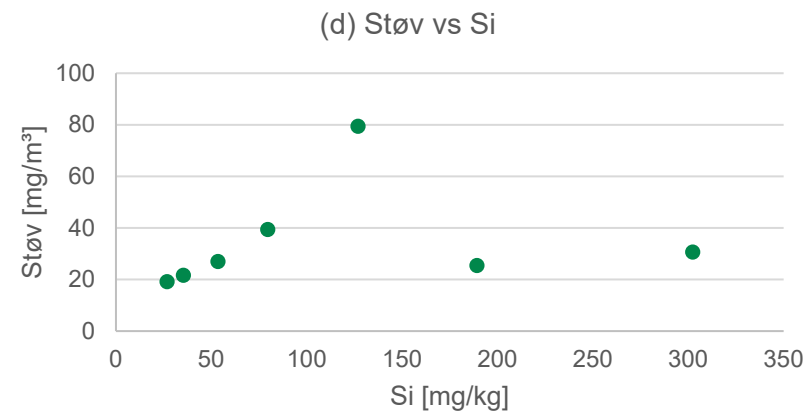
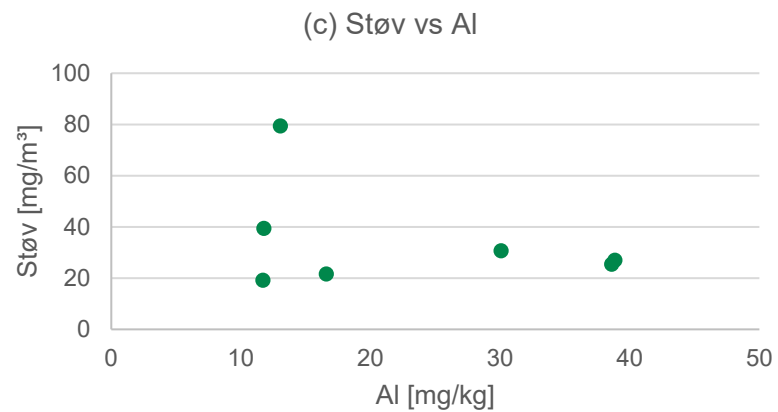
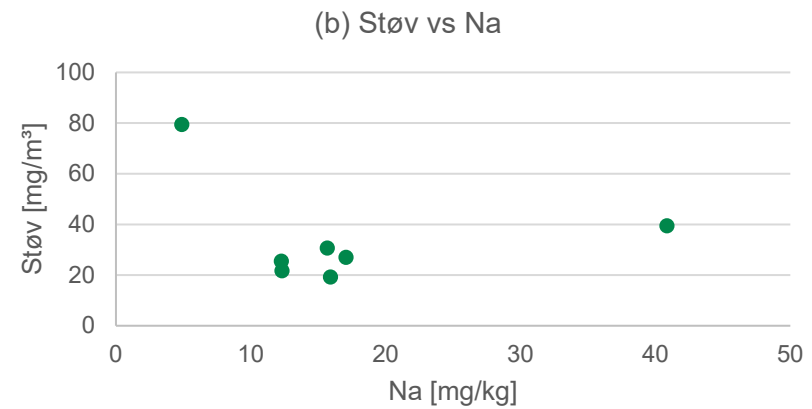
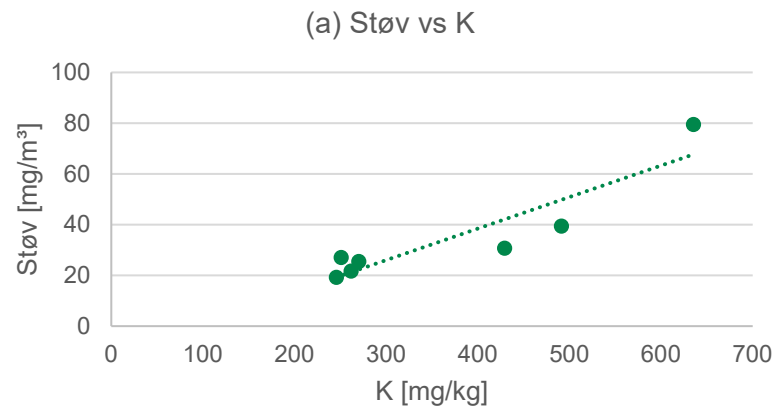
Det er ikke umiddelbart muligt at etablere sammenhænge mellem træpillernes diameter og emissionerne med den tilgængelige mængde data (se TABEL 1). Der var ingen specielle udfordringer ved at bruge 8 mm træpiller – der vurderes derfor, at kedlens snegl, brændkammer mm. er af en sådan beskaffenhed at den kan håndtere de større piller.

TABEL 1. Fysiske og kemiske egenskaber (tør basis) af serien af træpiller undersøgt, tillige med deres emissioner ved forbrændingstest

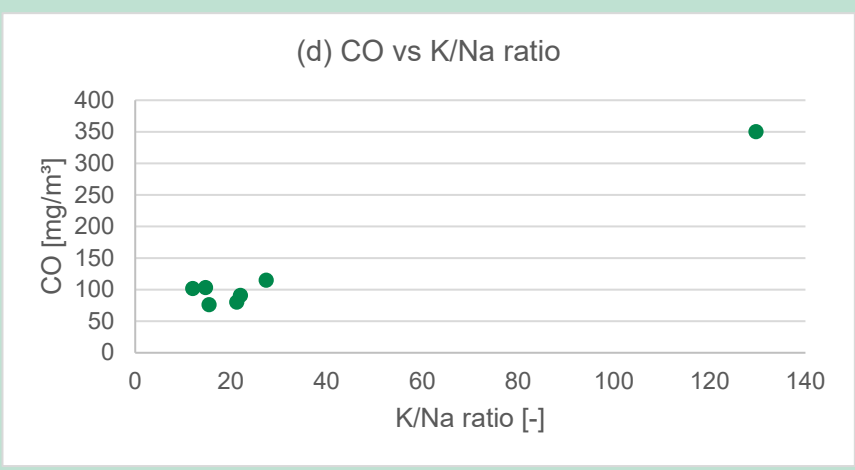
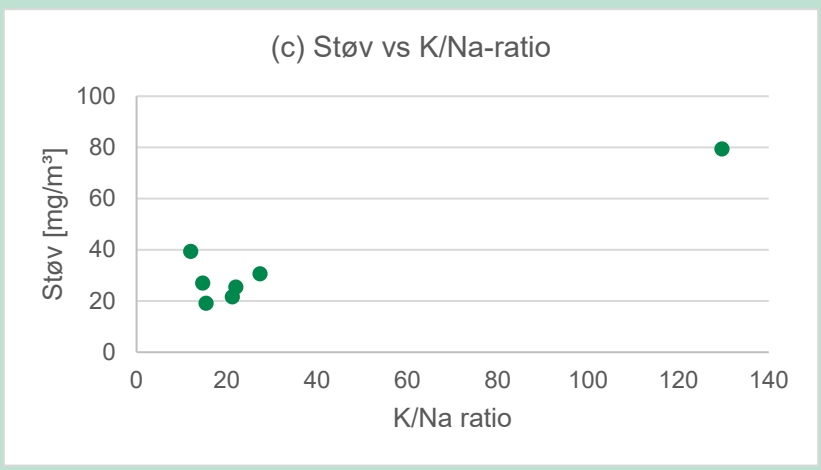
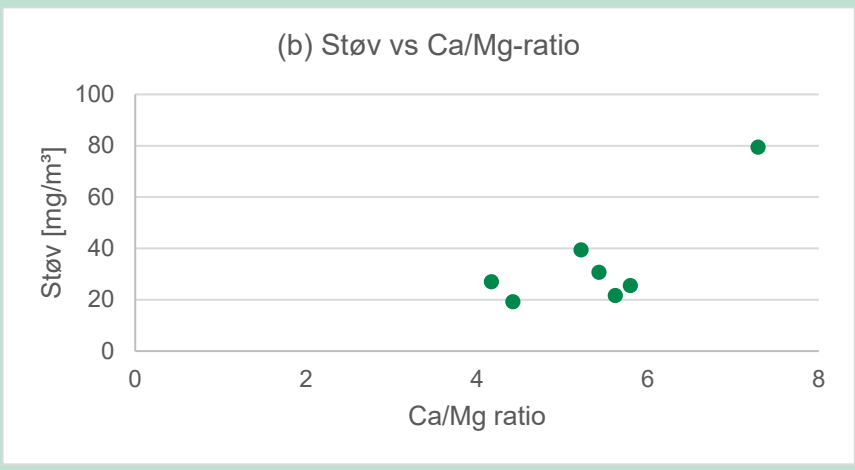
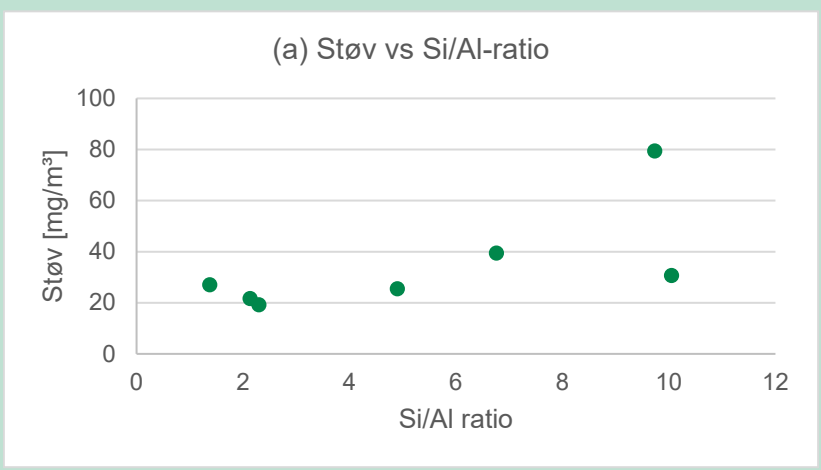
| Navn | Stampemøllen | MV Sormovskiy 3056 Ref.-nr.: 1400 | MV Kaisa Ref.-nr.: 1397 | MV Ina Lehmann Ref.-nr.: 1396 | MV Lisa Lehmann Ref.-nr.: 1395 | MV Haithabu Ref.-nr.: 1394 | Task |
|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------|
| Størrelse (diameter) [mm] | 6 | 8 | 6 | 6 | 6 | 8 | 6 |
| Aske, tør basis (550°) [%] | 0,3 | 0,29 | 0,49 | 0,30 | 0,49 | 0,32 | 0,3 |
| Vand [%] | 5,2 | 6,32 | 7,60 | 6,07 | 6,45 | 6,55 | 8,4 |
| Hydrogen, H [%] | 6,1 | 6,20 | 6,20 | 6,30 | 6,20 | 6,40 | 6,3 |
| Nitrogen, N [%] | 0,05 | 0,05 | 0,13 | 0,07 | 0,08 | 0,12 | 0,1 |
| — i mg/kg | 500 | 500 | 1300 | 700 | 800 | 1200 | 800 |
| Svovl, S [%] | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 |
| Oxygen, O [%] | 43,00 | 43,00 | 43,00 | 42,00 | 43,00 | 41,00 | 42,00 |
| Kulstof, C [%] | 50,4 | 50,90 | 50,30 | 51,20 | 50,40 | 52,40 | 51,5 |
| Aluminium, Al [mg/kg] | 0,4 | 1,33 | 0,27 | 0,55 | 0,61 | 1,21 | 0,5 |
| Silicium, Si [mg/kg] | 2,7 | 6,53 | 2,59 | 1,18 | 6,17 | 1,67 | 1,1 |
| Jern, Fe [mg/kg] | 0,8 | 1,58 | 0,61 | 0,21 | 0,58 | 0,23 | 0,7 |
| Titanium, Ti [mg/kg] | 0,1 | 0,14 | < 0,05 | 0,64 | < 0,05 | < 0,05 | 0,1 |
| Mangan, Mn [mg/kg] | 1,9 | 2,44 | 0,47 | 1,68 | 1,00 | 2,39 | 2,4 |
| Magnesium, Mg [mg/kg] | 3,4 | 3,74 | 3,23 | 4,85 | 4,37 | 5,78 | 5,1 |
| Kalcium, Ca [mg/kg] | 17,9 | 21,65 | 23,55 | 27,23 | 23,72 | 24,11 | 22,6 |
| Barium, Ba [mg/kg] | 0,2 | 0,31 | 0,08 | 0,48 | 0,17 | 0,09 | 0,1 |
| Natrium, Na [mg/kg] | 1,4 | 0,42 | < 0,1 | 0,41 | 0,32 | 0,53 | 0,6 |
| Kalium, K [mg/kg] | 16,4 | 9,32 | 12,97 | 8,73 | 8,76 | 7,85 | 9,8 |
| Fosfor, P [mg/kg] | 2,3 | 1,27 | 1,55 | 0,96 | 1,53 | 1,39 | 2,6 |
| Si/Al-ratio [-] | 6,8 | 4,9 | 9,7 | 2,1 | 10,1 | 1,4 | 2,3 |
| Ca/Mg-ratio [-] | 5,2 | 5,8 | 7,3 | 5,6 | 5,4 | 4,2 | 4,4 |
| K/Na-ratio [-] | 12,0 | 22,0 | 129,7 | 21,2 | 27,4 | 14,7 | 15,4 |
| Kedeltest | | | | | | | |
| Effekt [kW] | 10,1 | 11,7 | 10,5 | 11,3 | 11,1 | 10,5 | 10,3 |
| Røgtemperatur [°C] | 101 | 105 | 102 | 104 | 104 | 103 | 103 |
| CO ₂ [%] | 10,2 | 11,4 | 9,9 | 11,0 | 10,9 | 10,1 | 10,1 |
| CO [mg/m ³] | 102 | 91 | 350 | 80 | 115 | 103 | 76 |
| OGC [mg/m ³] | < 6 | < 6 | 6 | < 6 | < 6 | < 6 | < 6 |
| NO _x [mg/m ³] | 184 | 156 | 280 | 206 | 209 | 269 | 221 |
| Støv [mg/m ³] | 39 | 25 | 79 | 22 | 31 | 27 | 19 |



FIGUR 2. Sammenhænge mellem faktorer som NOx, nitrogenindhold, støv (partikler), CO og aske



FIGUR 3. Sammenhænge mellem aske og totalconcentration af K, Na, Al og Si i træpillerne



FIGUR 4. Sammenhæng mellem støv og henholdsvis Si/Al, Ca/Mg og K/Na forhold tillige med CO versus K/Na

Task

Støvtal: 19 mg/m³



Ina Lehrmann

Støvtal: 22 mg/m³



Soromovskiy

Støvtal: 25 mg/m³



Haithabu

Støvtal: 27 mg/m³



Lisa Lehrmann

Støvtal: 31 mg/m^{3c}



Stampemølle

Støvtal: 39 mg/m³



Kaisa

Støvtal: 79 mg/m³



FIGUR 5. Støvprøver fra de forskellige træpilller

3.2.1 Sammenhænge mellem nøgleparametre herunder NO_x og nitrogenindhold

I FIGUR 2 er overordnede sammenhænge mellem faktorer som NO_x, nitrogenindhold, støv (partikler), CO og aske undersøgt. For de undersøgte træpiller ses en lineær sammenhæng mellem NO_x og nitrogenindhold i brændslet. Alt andet lige, var NO_x-koncentrationen i røggas nærmest dobbelt så høj (280 mg/m³ vs. 156 mg/m³) for træpiller med højt nitrogenindhold sammenlignet med piller med lavt nitrogenindhold (FIGUR 2a). Det vil sige, at brændslets kvalitet (vurderet på nitrogenindhold i dette tilfælde) spiller en signifikant rolle for NO_x emissionerne, og det derfor bør overvejes f.eks. i forbindelse med lovgivning og test, hvorledes kedler evalueres på denne parameter. Der foreslås, at der enten stilles krav til nitrogenindhold i træpiller, og/eller at NO_x-emissioner målt under prøvningen normeres med træpillernes nitrogenindhold. Dermed tages der forbehold for at det virkelig er kedlens forbrændingsmæssige egenskaber der vurderes, og ikke helt eller delvist valget af træpillen, der bruges til testen.

Der er ingen direkte sammenhæng mellem NO_x og støvemissioner (FIGUR 2b), så de to følges ikke nødvendigvis ad og skal optimeres særskilt som også ventet i opstillingen af projektet og dets arbejdsopgaver. Støvemissioner ligger i et interval af 20–40 mg/m³, bortset fra et enkelt forsøg med 80 mg/m³ støv. Støv kan omfatte både uorganiske (fx salte) og organiske forbindelser (fx sod). Det blev derfor undersøgt nærmere, om den høje støvkonzentration kunne forklares med enten dårlige forbrændingsforhold og/eller askeindholdet af træpillerne. Forsøget med høje støvemissioner havde samtidigt høje CO-emissioner (FIGUR 2c). For de øvrige forsøg ses en svag korrelation mellem CO og støv. På baggrund af de indsamlede data er det ikke muligt at afgøre, om sammenfald mellem høje CO-emissioner og høje støv-emissioner er en outlier, eller om målepunktet skyldes en kemisk eller fysisk sammenhæng. En nærmere undersøgelse kunne være interessant, men lå udenfor nærværende projektets rammer.

Ligeledes var der ingen klar sammenhæng mellem træpillernes askeindhold og støv-konzentrationen i røggas (FIGUR 2d). Begge bidrag blev undersøgt nærmere, som beskrevet i de følgende afsnit.

3.2.2 Undersøgelse af sammenhænge mellem støv og uorganiske komponenter

I FIGUR 3 er relationer mellem støv og henholdsvis kalium (K), natrium (Na), silicium (Si) og aluminium (Al) vist. Disse faktorer er valgt illustreret, da det er kendt at disse metaller og sammensætningen af dem kan spille en rolle for fx slaggedannelse ved forbrænding og derfor forventes at spille en stor rolle i forbindelse med evt. frigivelse af uorganiske partikler (se Bilag 1). Der ses en svag lineær sammenhæng mellem kalium i træpiller og støv i røggassen (FIGUR 3a). Den relative andel af kalium i asken havde dog ingen indflydelse på støvkonzentrationen. Der var ingen sammenhæng mellem støvemissioner og hhv. Na (FIGUR 3b) eller de øvrige målte metalioner (Ba, Ca, Fe, Mg, Mn, Ti – jf. TABEL 1).

Derudover blev det undersøgt, om niveauet af støvemissioner kan forklares gennem forholdet mellem bestemte metaller (FIGUR 4, se også Bilag 1). Forholdene Si/Al, Ca/Mg, K/Na er valgt ud fra effekter mellem slaggesmelte-temperaturer tillige med overvejelser om metallernes placering i det periodiske system og almene kemiske egenskaber. Træpiller, der resulterede i den højeste målte støvkonzentration, var kendetegnet ved et relativt højt Si/A-forhold, et højt Ca/Mg-forhold, samt et meget højt K/Na-forhold, sammenlignet med de seks øvrige undersøgte træpiller. Blandt disse var der dog ingen klar sammenhæng mellem støvkonzentration og hhv. Si/Al, Ca/Mg eller K/Na. Derved er det vanskeligt at konkludere en direkte relation mellem askesammensætning og støvdannelse.

3.2.3 Undersøgelse af sammenhænge mellem støv og organiske komponenter

Støvprøverne blev desuden kvalitativt undersøgt med henhold til deres fordeling af kulstofholdige partikler og uorganisk aske (FIGUR 5). I et tidligere projekt [1] blev det eftervist, at farven (gråtonen) af nedslaget på støvprøve-filtre korrelerer med indholdet af elementært kulstof (*elementary carbon/black carbon*). Det gælder, at lysere prøver indeholder mere aske/salte, mens mørkere prøver indeholder mere *elementary carbon*. Metoden er dog kun i begrænset omfang egnet til at vurdere indholdet af kulstof bundet i organiske forbindelser (fx kondenserede tjærestoffer). Farven blandt de enkelte støvprøver for én type træpiller varierer (FIGUR 5). Overordnede ses dog en tendens til at træpillerne med højere støvkonzentrationer viser lysere prøver, hvilket tyder på et lavere indhold af *elementary carbon*.

3.3 Delkonklusion for afsnit 3

Der er for dette analysearbejde tale om et begrænset datagrundlag, da der kun er undersøgt 7 forskellige træpiller, hvorfor konklusioner herfra bør tages med forsigtighed.

I datasættet er eftervist en tydelig sammenhæng mellem NO_x og nitrogenindhold i træpiller. NO_x-emissioner tiltager omtrentlig lineært med nitrogenindholdet, hvilket tyder på at en relevant andel af NO_x dannes fra brændstof-N (jf. Afsnit 4). På baggrund af denne sammenhæng bør man i fremtidigt lovgivningsarbejde tage op til overvejelse om hvorvidt kedler skal evalueres på NO_x, da de forbrændingstekniske resultater i høj grad stammer fra nitrogenindholdet i træpillen brugt under godkendelsestest.

Modsat formodningen var der intet tydeligt forhold mellem askemængden i pillerne og støvkoncentrationen i røggas. En øget totalmængde af kalium (K) syntes dog at øge støvemissioner.

For forbrændingsparametrene CO og støv, syntes en højere støvkoncentration desuden at falde sammen med højere CO-koncentrationer. En mulig sammenhæng ses imidlertid primært på grund af bestemte enkelte målepunkter, men kan også hænge sammen med at begge parametre opstår som følge af ufuldstændig forbrænding. Denne observation har et vist potentiale i optimering af kedler og driftstilstand, idet CO er nemmere at måle (online) end støv.

Overordnet kunne der identificeres flere sammenhæng mellem træpillernes kemiske egenskaber og deres emissioner ved forbrænding i et mindre pillefyr. Relationerne er dog ikke så entydige, at de ville kunne kodes ind fast i en styringsalgoritme, der baserer sig hovedsageligt på træpillernes kemiske egenskaber.

4. AP2: Retningslinjer til udvikling af ultra-lavemissions-biomassekedler

Denne arbejdsplan har fokus på at udvikle nye ultra-lavemissionsbiomassekedler med høje virkningsgrader og lave støv- og NO_x-emissioner. Målet er at opnå dette, ved at introducere forgasning til at reducere støvemissionen og røggasrecirkulation til at reducere NO_x i små biomassekedler. Begge teknologier skal tilpasses og optimere småskalaenheder, så de effektivt reducerer emissionerne, samtidig med at virkningsgraden ikke mindskes. Tværtimod skal det samlede forbrændingssystem med begge teknologier og samlet optimering af forbrændingen resultere i højere virkningsgrader. Ydermere er det centralt at priseffektive løsninger bliver fundet, da produkterne ellers ikke vil være konkurrencedygtige.

4.1 Baggrund og formål

Projektet fokuserer på mindre (<50 kW) biomassekedler med automatisk indfyring af træpiller. Brænderkonstruktionen for pillefyr baserer sig på ristfyingsprincippet, dvs. brændslet danner et lag på en plade- eller skålformet brænder. Forbrændingsluft tilføres delvist gennem hullerne i bunden af brænderen (primær zone) og delvist over pillerlaget (sekundær zone). Der tilføres kontinuert friske træpiller, mens asken af udbrændte piller skubbes ud. Pillefyr drives med et luftoverskud λ :

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{O_2, \text{reel}}}{\dot{m}_{O_2, \text{støkiometrisk}}}$$

Typiske værdier er $\lambda = 1,4-1,6$ ved fuldlast og $\lambda = 2-3$ ved lavlast (30% af fuldlast). Jo tættere luftoverskuddet ligger på $\lambda \approx 1$, jo højere er virkningsgraden. Samtidigt betyder det en højere forbrændingstemperatur, som kan være årsag til øgede koncentrationer af NO_x og partikler i røggassen.

Formålet med projektet er at udvikle biomassekedler, der emitterer mindre NO_x og partikler end påkrævet i EU's Ecodesign-direktivet, samt at opnå en højere årvirkningsgrad (TABEL 2).

Støv/partikler dannes igennem forskellige mekanismer. En vigtig støvkilde er uorganiske stoffer (fx salte) der fordampes i forbrændingsprocessen og kondenserer senere i røggassen. Desuden kan mindre aske- og koks-partikler hvirvles op fra bundasken. NO_x (NO og NO₂) formes ved oxidation enten af molekylært kvælstof i forbrændingsluften (N₂) eller af organisk bundet kvælstof i brændslet.

TABEL 2. Ecodesign krav ifølge Kommissionens Forordning (EU) 2015/1189 og målsætning i dette projekt.

| Parameter | Krav EU 2015/1189 | Målsætning (projekt) |
|---|-------------------|----------------------------|
| NO _x * (NO ₂ -ækv) [mg /m ³] v/10% O ₂ | ≤ 200 | ≤ 140 (30% reduktion) |
| Støv [mg /m ³] v/10% O ₂ | ≤ 40 | ≤ 10-14 (65-75% reduktion) |
| CO [mg /m ³] v/10% O ₂ | ≤ 500 | - |
| OGC (C nævnt H ₈ -ækv) [mg /m ³] v/10% O ₂ | ≤ 20 | - |
| Årvirkningsgrad (Ecodesign) | ≥ 77% | ≥ 92 % (efter EN303-5) |

Førstnævnte kræver dog temperaturer omkring 1500 °C til at dissociere N₂ i større omfang [2]. Dette temperaturniveau opnås normalt ikke i pillefyr. Undersøgelser i projektets første arbejdsplan tyder på en lineær sammenhæng mellem brændslets N-indhold og NO_x-koncentrationen i røggassen (FIGUR 2). Der antages derfor, at brændstof-N

er hovedkilden til de målte NO_x-koncentrationer her. Mekanismen, der danner NO_x fra brændstof-N, er afhængig af brændstoffets struktur [2, 3]. Generelt frisættes N-holdige forbindelser såsom HCN, CN og NH₃ fra brændstoffet, og disse forbindelser kan oxidere til NO under tilstrækkelige temperatur- og iltforhold [3]. Ved iltmangel bliver organiske N-forbindelser til gengæld reduceret til N₂. Undersøgelser med gasformige modelbrændstoffer viser, at der dannes et maksimum af N₂ og et minimum af uønskede N-forbindelser (bl.a. NO) fra brændstof-N når forbrændingen foregår ved luftunderskud ($\lambda \approx 0,7$) [3]. Andel af brændstof-N der omsattes til NO, kan variere mellem 0,11–0,86 [4].

I dette projekt er den primære tilgang til at nedbringe støv-emissioner at reducere temperaturer i træpillerne i primærzonen, og dermed mindske forflygtigheden af salte i brændstoffet. Det opnås ved at opdele selve forbrændingsprocessen i to trin ("air staging"). I det første trin (forgasning) frisættes pyrolysegasser ved en understøkiometrisk forbrænding, dvs. forbrænding foregår under luftunderskud. Den nedre grænse for lufttilførsel er at opretholde forgasningsprocessen ved en delvis forbrænding, idet selve forgasningen er endoterm. I det andet trin brændes pyrolysegasserne ved at tilføre den resterende luftmængde i sekundærzonen. Udover den lavere temperatur begrænser det formindskede luft-flow omkring træpillerne også den pneumatiske transport af partikler fra pillelaget. Dette mindsker antal af både uorganiske og organiske forbindelser (fx sod/black carbon) i røggassen.

Med udgangspunkt i nævnte observationer kan det forventes, at air staging også bidrager til at mindske NO_x-emissioner.

Røggasrecirkulation er en anden kendt teknologi til at reducere NO_x-emissioner i store fyringsanlæg. Teknologien afprøves i dette projekt for kedler af mindre størrelse. Hovedsagelig virker den recirkulerede røggasstrøm som termisk ballast i forbrændingsprocessen. Spidstemperaturer og dermed reaktionshastigheden bliver således mindre, og dermed dannes mindre NO_x igennem den termiske mekanisme. Det forventes, at denne effekt ikke er så stor i pillefyr, fordi temperaturer er lave i forvejen. Den lavere koncentration af O₂ i forbrændingszonen forskyder desuden ligevægten mellem N₂ og NO i retning af mere N₂. Dette påvirker alle NO_x-mekanismer. NO i den recirkulerede røggas kan derudover reduceres i den iltfattige forbrændingszone ("NO_x-reburn"). Her kan NO virke som oxidationsmiddel for bl.a. CO, CH₄, HCN og NH₃, og blive reduceret til N₂.

4.2 State of the art

Røggasrecirkulation og trinvis lufttilførsel ("air staging") er kendte og bredt anvendte teknologier i store anlæg, fx kraftværkskedler. Der er også en række af undersøgelser, der viser at air staging minimerer NO_x [5, 6, 7] og partikler [6, 7, 8] fra mindre, ristfyrede biomassebrændere (10–35 kW). Den typiske afstand mellem primær- og sekundærlufttilførsel i disse undersøgelser (så vidt bekendt) var 300 mm.

Minimale NO_x- og partikelemmissioner blev målt ved primær- $\lambda \approx 0,6$ – $0,8$, med et reduktionspotentiale af hhv. 15–30 % (NO_x) og 16–26 % (partikler) ved primær- $\lambda \approx 0,8$, afhængig af brændstoffet. Emissionerne var upåvirket af det globale luftoverskud [6]. Andre undersøgelser viser en optimal primær- $\lambda \approx 0,9$ – 1 med ca. 70 % reduktion i NO_x [5]. Fire forskellige konfigurationer af sekundærluftdyser blev undersøgt i [7] (kombinationer af mere diffus/mere direkte og "høj"/"lav" position); det er dog vanskeligt at drage specifikke anbefalinger af det fremlagte data. Generelt var emissioner i studiet [7] mere påvirket af sekundærluftmængden end af dyse-konfigurationen. Det viste sig også, at CO og partikelkoncentrationer stiger (mens NO_x falder), når temperaturen i sekundærzonen bliver for lav. Der kan således ligge et optimeringsproblem mellem NO_x-reduktion og sikring af fuldstændig forbrænding.

Røggasrecirkulation kan mindske NO_x-emissioner. I forbindelse med air staging kunne NO-emissioner sænkes med yderligere 5–10 % [5]. Røggasrecirkulation var mere effektiv udenfor det optimale luftoverskuds-interval, dvs. (for) højt eller lavt primære luftover-/underskud kan delvist kompenseres med recirkuleringen. Indblæsning i primærzonen gav bedre resultater i forhold til NO_x-reduktion end indblæsning i sekundærzonen [5].

Det er ikke systematisk undersøgt, hvorvidt eller hvordan røggasrecirkulation påvirker partikelemmissioner. Der er dog to effekter, som kan forventes at have en indflydelse: (1) Lavere iltkoncentrationer og dermed lavere temperaturer begrænser fordampningen af uorganiske stoffer, (2) for at opnå den samme iltmængde (i modsætning til koncentrationen) kræves et højere flow gennem brænderen/kedlen, som potentielt river flere partikler med.

4.3 Anbefalinger for kedler med to-trins forbrænding (forgasningskedler)

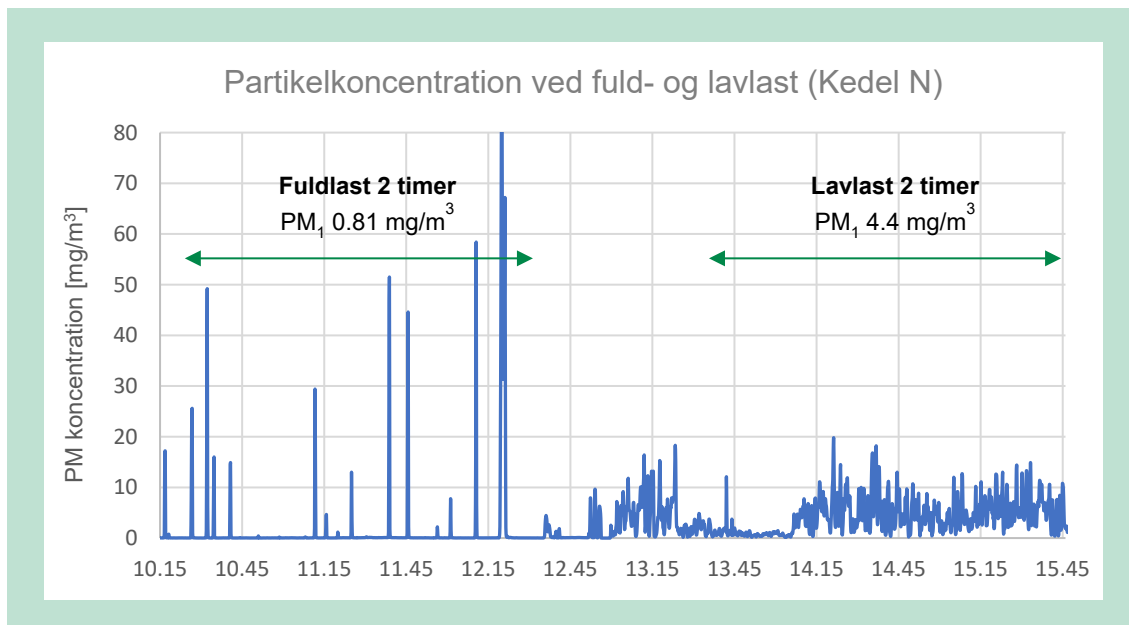
Vigtige designparametre er:

- Fordeling mellem primær- og sekundærluft
- Placering og geometri af sekundærluftdyser

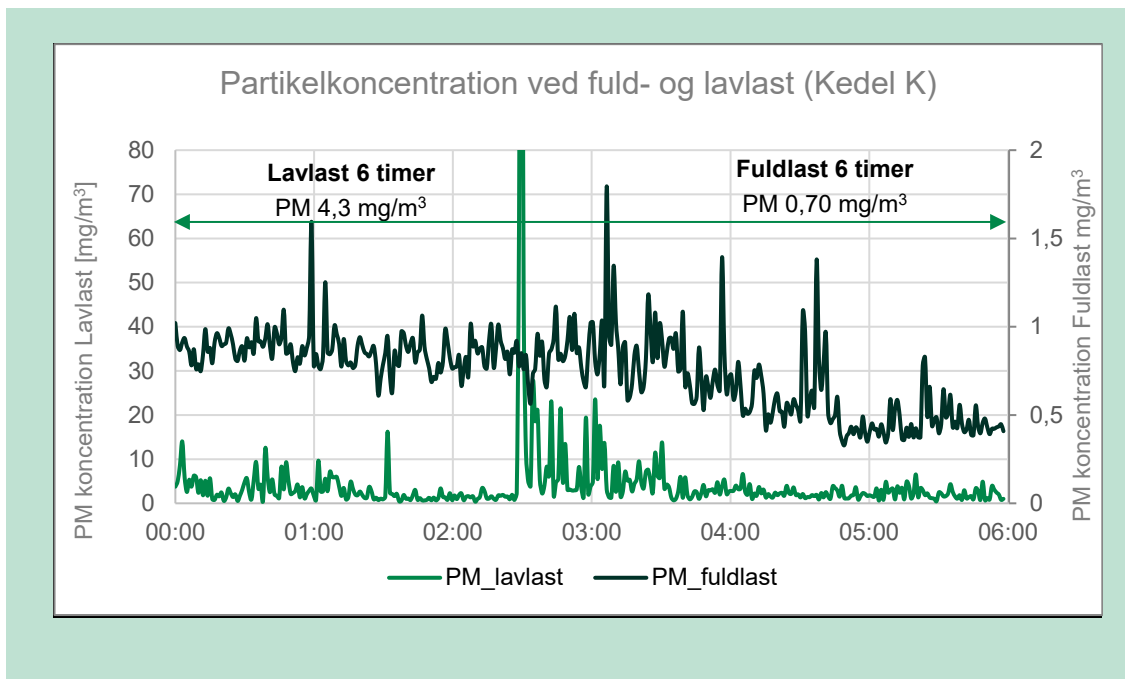
- Udformning af brænderen (i primærzonen)
- Brændselstilførsel både placering, dosering og frekvens

Støv/partikeldannelse fra uorganiske komponenter er overvejende en termisk effekt, der kan begrænses ved at holde temperaturerne nede i nærheden af brændslet og asken. NO_x-dannelse er styret af komplekse processer, der er påvirket af temperatur, iltkoncentration og opholdstid.

- Der skal være et tydeligt skel mellem primær- og sekundærzone, dvs. afstand mellem brændslet/primærzonen og sekundærluftdyserne (se afsnit 4.2 ovenfor). Sekundærluftstråler skal ikke ramme brændslet.
- Temperaturen i primærzone bør være lav, men tilstrækkelig til at opretholde forgasningsprocessen.
 - Temperaturen i primærzonen kontrolleres især med primærluftmængden. Primær- $\lambda \approx 1$ giver den højest mulige temperatur.
 - Ved ufuldstændig forgasning forbliver en del kulstof som koks i asken, hvilket reducerer virkningsgraden. Mulige tiltag er mere primærluft (dog ikke over primær- $\lambda > 1$, ellers er der ikke længere tale om forgasningsprincip), eller ændringer i brænderdesignet der begrænser varmetab.
- Luftmængden i primærzonen skal være tilstrækkeligt til at udgløde det kulstof der bliver på risten. Koks i asken og høje CO-emissioner kan være et tegn på utilstrækkelig primærluft.
- Temperaturen i sekundærzone skal være så høj som muligt, men under det niveau der begunstiger termisk NO_x (<1300–1500 °C).
 - Pyrolysegasser er fortyndet med N₂ (fra luft der bruges som forgasningsmedium), og kan derfor være vanskeligt at antænde.
 - Ufuldstændig forbrænding i sekundærzonen betyder høje CO emissioner og en lavere virkningsgrad.
 - Sekundærzonen kan isoleres med ildfaste sten som et 'indvendigt brændkammer'.
 - Sekundærluft kan have en uønsket kølende effekt – i værste fald med lokal slukning til følge (højere emissioner af CO/partikler, formindsket virkningsgrad). Problemet kan begrænses ved at opvarme sekundærluften.
- Sekundærluftdyserne skal placeres og rettes på en måde der sikrer en god opblanding mellem pyrolysegasser og sekundærluft.
- Generelt har forgasningskedler vist sig vanskeligere at styre end klassiske forbrændingskedler. Emissionerne er meget sensible overfor ujævn brændselstilførsel – muligvis pga. ustabil forbrænding i sekundærzonen ved fluktuationer i forgasningen i primærzonen (jf. FIGUR 6). Derfor bør der tages skridt for at sikre en ensartet og jævn dosering.



FIGUR 6. Eksempel på partikelmassekoncentration målt over 2 sammenhængende timer på Kedel N (NBE). Spidserne som ses især ved fuldlast skyldes sandsynligvis ujævn brændseltilførsel.



FIGUR 7. Eksempel på partikelmassekonzentration målt over 6 timer på Kedel K (KSM). Peaken på lavlasten efter ca. 2,5 time skyldes en uhenigtsmæssig automatisk rensedyklus.

4.4 Anbefalinger for kedler med røggasrecirkulation

Vigtige designparametre er:

- Mængden af recirkuleret røggas (fortyndingsforhold)
- Position hvor den recirkulerede røggas tilsættes:
 - Tilførsel af røggas til luftstrøm før luftblæser
 - Tilførsel af røggas til luftstrøm efter luftblæser, men før brænderen
 - Tilførsel af røggas direkte i brænderen/kedlen/brændkammeret.
- Kombination med et-trins eller to-trins-forbrænding. I sidstnævnte er der valg mellem tilsætning i primærzonen, sekundærzonen eller i begge zoner.

NO_x koncentrationer kan sænkes betydeligt med to-trins forbrænding (jf. afsnit 4.2), og denne teknologi er nemmere at håndtere. Der anbefales derfor at optimere to-trins-/forgasningsprincippet først. Konkrete anbefalinger for kedler med røggasrecirkulering er:

- Der bør være en god opblanding af recirkuleret røggas og forbrændingsluft.
 - Opblandingen er bedst når røggas tilføres før luftblæseren.
 - En god opblanding kan alternativt opnås gennem hensigtsmæssig placering af luft- og røggasdyser
- Iltmængde, iltkoncentration og temperatur i forbrændingszonen skal være tilstrækkelige til at sikre en fuldstændig forbrænding (jf. afsnit 4.3).
- Røggasrecirkuleringsrør skal være tæt. Trykket i recirkuleringsrør kan være højere end omgivelserne – ved utæthed er der fare for udslip af giftige gasser.
- Der er risiko for korrosion, hvis røggassen kondenserer i recirkulationsrør. Dette især, når anlæg tages i drift eller slukkes, og røret er eller bliver kold.
 - Der skal være en mulighed for aftapning af kondensatet.
- Hvis røggasrecirkuleringen kombineres med to-trins forbrænding (air staging) er det hensigtsmæssigt at tilføre røggassen i den primære forbrændingszone:
 - I den iltfattig atmosfære i primærzonen er der mulighed for NO-reburn (reduktion af recirkuleret NO til N₂)
 - Røggas i sekundærzonen ville kun mindske temperaturen og påvirke termisk NO_x – som forventes at være lavt i forvejen. Effekten vil derfor ikke være så stor.
- Røggasrecirkulering kræver en ekstra røggassuger.

- Med røggasrecirkulation indføres en feedback-loop. Det kan tage tid, indtil røggassammensætning og temperatur er konstant.

5. AP3: Emissioner og forbedringer på kedler gennem udvikling

I denne arbejdsplan vil der blive fokuseret på fortsat udvikling for opnåelse af emissionsmålene tidligere beskrevet. Dette gøres ved at teste kedlerne af i forskellige forbrændingsscenarier, blandt andet efter gældende standard EN303-5 for opnåelse af Ecodesign krav. Forskellige træpiller vil ydermere blive anvendt i et iterativt studie til at fastlægge en potentiel optimal strategi til at opnå bedst mulig fremtidig forbrænding.

5.1 Formål og målsætning

Formålet med denne arbejdsplan er at arbejde videre med de udviklede kedler fra AP2 og forbedre disse til at være mere robuste til at kunne gennemgå flere længere emissionstest.

Projektkonsortiet forventede fra projektet begyndelse, at disse teknologier kedlerne er blevet forsynet med, kan sænke emissionerne under kravene ifølge EU's Ecodesign-direktivet og som en målsætning for dette projekt med en endnu lavere reduktion på både støv og NOx jf. TABEL 2 (afsnit 4.1). Desuden er der en målsætning om kedlerne at kunne gennemgå en Load-Cycle-Test, hvilket er en årssimulering der skal levere mere reelle emissioner til forskel fra EN303-5 standardens mere stationære tilstande for fuld- og lavlast. Efter dette er der sat tid af til at gå i dybden med styringsalgoritmerne for optimering af luftforsyning til bålet afhængig af det brændsel, der fyres med.

Det har imidlertid undervejs i projektet vist sig at være vanskeligt at nedskalere den kendte forgasningsteknologi fra de større kraftværker til disse mindre husstandskedler fyret med træpiller. Blandt andet spiller brændselstilførsel samt styringen af de meget begrænsede luft- og brændselsmængder ved de små ydelser ind (ned omkring 1,8-3kW). Forkert eller ujævn dosering påvirker forbrændingen prompte og har en negativ akkumulerende effekt på emissionerne, som har vist sig vanskeligt at vende til det gode.

Da projektets delmål nævnt i ansøgningen har været betinget af, at forgasningsprincippet fra AP2 har kunnet nedskaleres til disse husstandskedler, har en stor del af AP3 i omhandlet optimering af forbrændingen på de enheder, der har fungeret mest hensigtsmæssigt ud fra projektets beskrivelse.

Begge kedelproducenter i projektet har fremstillet adskillige prototyper med både optimerede brændkamre og forskellige udformninger af forbrændingsprincippet i løbet af projektet for at kunne ende ud med et endeligt produkt til komplet afprøvning efter de ønskede emissionstest.

Virkningsprincipper af både to-trins-forbrænding og røggasrecirkulering er beskrevet i det forrige afsnit 4. Nærværende afsnit omhandler resultaterne fra de i projektet udviklede biomassekedler samt træpilleforsøg på den udviklede Kedel K til slut i dette afsnit inklusiv nogle fysiske analyser af disse træpiller, som samlet vil kunne indtænkes i en fremtidig styringsalgoritme (afsnit 5.5).

5.2 Metoder/testprocedurer

Kedel-prototyperne blev testet i Teknologisk Instituts laboratorie, ELAB. Metoden, der testes efter i laboratoriet, er den gældende standard EN303-5, hvor kedlerne testes i både fuldlast (100%) og lavlast (<30% af fuldlast) i op imod 6 timer for hver last. Fælles for de to laster er at der forud for prøvestart foreligger en længere indkøringsfase, hvor luft og brændselstilførsel optimeres i forhold til at ramme de aktuelle last-niveauer beskrevet i standarden. Jo større kedel jo længere er denne indkøringsfase, specielt for lavlasten. For begge producenter er der forsøgt at ramme et ydelsesniveau omkring 10-12kW i fuldlast. Følgende resultater blev gennemført over mindst 60 minutter med stabil driftstilstand (konstant indfyring og luftmængde).

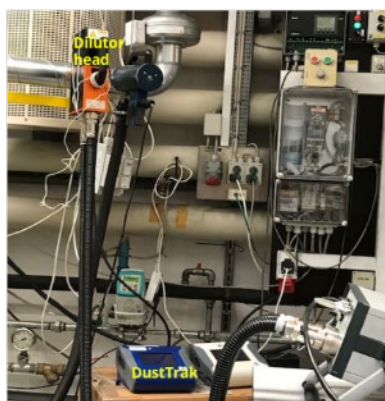
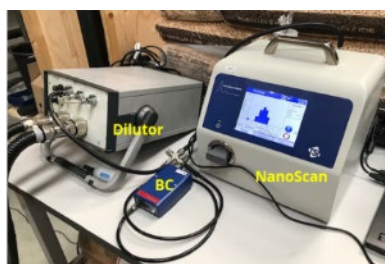
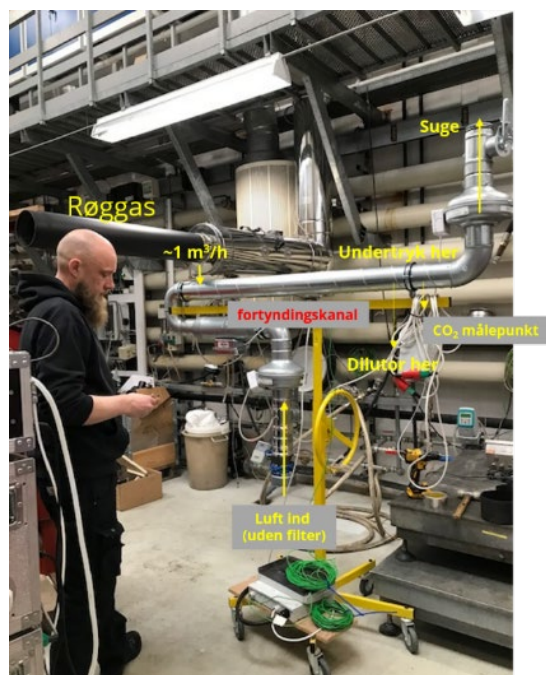
Måleudstyr

Gasser blev målt kontinuert i tør røggas. Til CO, CO₂ anvendtes IR-gasanalysatorer (ABB AO2020), NO_x blev målt med en kemo-luminescens detektor (Eco Physics CLD 822 S), og koncentration af organiske kulstofforbindelser (OGC) i røggassen målt med en FID-analysator (SK Elektronik Themo-FID).

Partikelkoncentrationen blev målt ved at fange partiklerne på quartsfiltre over et defineret tidsrum. Ved kendt gasflow kan den opsamlede partikelmasse omregnes til en koncentration, dvs. masse per gasvolumen. For enkelte forsøg blev partiklerne også målt med online-metoder. Sidstnævnte onlinemåling giver også en indikation af partikelstørrelsesfordeling.

Massekoncentration, antal og black carbon blev målt med forskellige optiske metoder:

- Partikelmasse (TSI DustTrak DRX 8533 Aerosol monitor): DustTrak er en lysspredning laserfotometer med en måleopløsning på 10 sekunder, der giver en realtidsmåling af partikelmassekoncentrationer svarende til PM₁, PM_{2.5}, PM_{respirabel} (PM₄), PM₁₀, og total PM-fraktion; dvs. partikler med diameter størrelser < 1 µm, < 2,5 µm, < 4 µm, < 10 µm, samt den totale koncentration PM_{total}
- Partikelantalskoncentration (#/cm³) blev målt ved brug af NanoScan (TSI NanoScan SMPS 3910). Luften fra fortyndingskanalen blev fortyndet ekstra (med fortyndingsfaktor af 15) foran NanoScan ved brug af en rå gasfortynder med roterende disk (Testo AG MD19-3E). NanoScan bruger en cyklon til at fjerne større partikler, derefter blev partikler opladet af en unipolær oplader og sorteret efter en radial Differential Mobility Analyser (RDMA). Partikler blev dyrket derefter med isopropanoldamp indtil detekterbar størrelse ved brug af en Condensation Particle Counter (CPC). NanoScan måler partikler i størrelse fra 10 nm til 420 nm med en måleopløsning på 1 minut.
- Black carbon (Zenzors AethLabs microAeth AE51): ændring af absorptionsrate ved lys-transmission gennem et tyndt filter. Signalet ved 880 nm bølgelængde interpreteres som black carbon, med en måleopløsning på 1 minut.



Fortydingstunnel tidligere udviklet af Teknologisk Institut til måling af online partikler. Her ses tunnelen med online måleudstyr siddende i den fortyndede røggas.

De tre opridsede online målinger blev målt i fortyndingstunnel for at skåne måleinstrumenterne. Fortyndingstunnelen er tidligere blevet udviklet af Teknologisk Institut til forsøg som disse. Opstillingen sikrer en jævn opblanding af røggas og frisk luft. Forhold mellem røggas og friskluft kontrolleres ved at måle CO₂ både i ufortyndet gas og i tunnelen.

Fortyndingsfaktor for partikelmasse var ca. 30, mens fortyndingsfaktor for partikelantal lå ved 146 (9,7-gangs fortynding i fortyndingstunnelen og yderligere 15,1-gangs fortynding gennem et kommercielt dilutor-system, Testo MD19-3E rotating disk dilutor). Black carbon blev målt både efter Testo dilutor sammen med partikelantalskoncentration (fortyndingsfaktor ca. 146) under AP2, og direkte fra fortyndingskanal sammen med partikelmassekoncentration ((fortyndingsfaktor ca. 30) under AP3.

5.3 Resultater for NBE's Kedel N.

5.3.1 Udviklingsproces for NBE

NBE har igennem projektet udviklet syv forskellige prototyper (se udsnit af tegninger for modeller i Bilag 2). Heraf kan nævnes tre prototyper med vertikal opadgående forbrænding i flere zoner, én fritstående batchfyret single-burn pillebrændeovn med forgasningsteknologi, to tilsvarende batchfyrede single-burn kedelprototyper med vandkappe samt én med vertikalt nedadgående forbrænding (piller fodres oppefra og forbrændingen forgår oppefra og ned).

Specielt den fritstående batchfyrede pillebrændeovn viste meget lovende resultater. Desværre for projektet har pillebrændeovnen ikke været en del af scope. Denne model er herefter forsøgt indkapslet i en todelt vandkappe, hvoraf den ene fungerer som indbygget akkumuleringstank, som blev forsøgt afprøvet uden at få de ønskede resultater.

Fælles for de nævnte prototyper har været periodevise lave emissioner. Dog har forbrændingen vist store fluktuationer formentlig pga. uregelmæssig brændseltilførsel, hvorefter brændslet har hobet sig for meget op i forbrændingszone 1, så sekundærdysen i zone 2 ikke har kunne holde emissionerne tilstrækkeligt nede. I de efterfølgende afsnit om resultaterne fra NBE's projektarbejde har vi valgt at fokusere på den kedel med de længste stabile forbrændingsfaser (1-2 timers forbrænding). Denne kedel er bygget op med et vertikalt opadgående forgasningsprincip i to zoner, hvor emissionerne og partikler for den målte periode ligger under Ecodesign kravet og til dels under målsætningen sat i projektet, hvilket er positivt.

Røggasrecirkulering er for NBE's kedel forsøgt afprøvet over flere omgange nævnt i afsnit 5.3.3.

Resultaterne for NBE's afrapporterede kedel er i de kommende afsnit benævnt "Kedel N".

Nedenfor er en serie billeder af den endelige *Kedel N*.



Kedel N som helhed (tv) og forfra (th).



Styringsenhed til brændsel samt forbrændingsluft til de to zoner (tv). Røggasvandring igennem kedelenhed (th).

Der er neden for belyst to forskellige målekampaner for at vise effekten af de to forskellige systemer (2-trins-forbrænding samt røggasrecirkulering). De to systemer er vist på to forskellige kedler. For 2-trins-forbrændings-kedlen, Kedel N, er der udført målinger for både fuld- og lavlast, hvor både gasser og partikler er målt.

For kedlen med røggasrecirkulering, Kedel N-R, er der ikke målt partikler, fordi denne kedel var udstyret med en integreret elektronisk partikelfilter (ESP). Filtret forventes at fjerne en betydelig antal af partiklerne fra røggassen, hvilket gør resultaterne usammenlignelig. Desuden var Kedel N-R en meget tidlig prototype, dog var det muligt at tilsætte den recirkulerede røggas i både primærzonen eller i sekundærzonen, og at slå recirkulering fuldstændigt fra. Alle tre muligheder blev afprøvet. Resultaterne skal dog betragtes under forbehold af at den recirkulerede røggasmængde ikke kunne måles. Recirkulationsforhold er dermed ukendt, og muligvis meget lavt. Målingerne med recirkulering slukket kan anses som baseline-værdier til vurdering af effekten af røggasrecirkulering. Til en vis grad gælder det også for vurdering af to-trins-forbrænding. Her skal dog være opmærksom på, at der sammenlignes kedler med forskellige brændergeometrier.

Brændsel

To forskellige træpiller blev anvendt til test af prototyperne (TABEL 3). Røggasrecirkulering forventes at virke primært mod NO_x, derfor blev forsøgene gennemført med træpiller med et forholdsvis højt nitrogenindhold. NO_x-koncentrationen i røggas stiger omtrent lineært med brændslets nitrogenindhold jf. afsnit 3. Der forventes, at to-trins-forbrænding/forgasning virker mod både NO_x og partikelemissioner (jf. afsnit 4). Partikelemissioner er typisk en blanding af aske-støv og kondenserede organiske forbindelser. De pågældende forsøg blev derfor gennemført med en træpille, der indeholder typiske mængder af nitrogen og aske. Sammensætning og nedre brændværdi af træpillerne ses i TABEL 3.

TABEL 3. Træpiller: sammensætning og nedre brændværdi (tør). Begge typer træpiller er på 6 mm diameter.

| Forsøgstype | Træpiller- mærke | C [kg/kg] | H [kg/kg] | O [kg/kg] | N [kg/kg] | S [kg/kg] | aske [kg/kg] | H _n [MJ/kg] |
|---------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|---------------------------|
| 2-trins forbrænding | Silva | 0,503 | 0,062 | 0,430 | 0,001 | 0,000 | 0,004 | 19,14 |
| Recirkulering | Task | 0,483 | 0,063 | 0,420 | 0,008 | 0,001 | 0,025 | 19,60 |

Den nedenstående TABEL 4 sammenfatter de målte koncentration samt resultaterne fra NBE's Kedel N som henholdsvis forgasnings- og recirkulationskedel. Den øverste del af tabellen viser rådata, i den nederste halvdel er emissionerne konverteret til masse-koncentration i mg/m³ ved røggas-referencetilstand (tør gas, 10% O₂; 273,15 K; 1013 mbar). Til omregning til referencetilstand bruges en ilt-koncentration der er beregnet fra CO₂-koncentrationen målt i røggassen. Selve O₂-koncentrationen blev ikke målt. For OGC angives kulstofmasse for C₃H₈-ækvivalenter. Sammenligning af partikler målt med filter og koncentrationen målt med online-analysatoren (DustTrak) viser ret store (±50 %) afvigelser.

I det hele taget ligger CO, OGC, og NO emissionerne fra begge kedler under projektets målsætninger, respektive under grænseværdier i Ecodesign-direktivet. Forgasningskedlens støvemissioner (partikler) er dog betydelig højere end målsætningen, og delvist sågar over Ecodesign-krav. Støvemissioner blev ikke systematisk målt for kedlen med røggasrecirkulering, fordi kedlen (modsat de andre kedler i projektet) havde et indbygget partikelfilter. Dermed er resultaterne ikke sammenlignelige. Data fra kedlens indkøring viser dog i fuldlast 6–15 mg/m³ partikler ved røggas-referencetilstand. Dermed overholder kedlen knap projektets målsætning, men kun når den kombineres med (sekundær) røggasrensning.

TABEL 4. Opnåede resultater for Kedel N (to-trins-forbrænding) samt Kedel N-R (røggasrecirkulering). For Kedel N-R er der angivet effekten af forskellige steder at indblæse røggasrecirkulering hhv. i primærzonen, sekundærzonen eller slået fra.

| Parameter | Enhed | To-trins-forbrænding (forgasningskedel) | | Røggasrecirkulering (fuldlast alene) | | |
|--|----------------------|---|-----------------------|--------------------------------------|--------------|------|
| | | Fuldlast | Lavlast | Primærzone | Sekundærzone | Uden |
| Effekt | [kW] | 11,7 | 2,89 | 11,7 | 12,1 | 12,3 |
| CO ₂ | [%] | 10,7 | 5,4 | 8,4 | 8,9 | 8,9 |
| Røgtab | [%] | 1,8 | 2,1 | 5,0 | 4,9 | 4,7 |
| CO | [ppm] | 127 | 220 | 59 | 19 | 30 |
| NO _x | [ppm] | 63 | 27 | 67 | 72 | 73 |
| OGC | [ppm] | 11 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| Partikelmasse (filter) | [mg/m ³] | 50 | 90 | - | - | - |
| PM _{Total} (online) | [mg/m ³] | 24,6 | 133,3 | - | - | - |
| Partikelantal | [#/cm ³] | 4,6 · 10 ⁷ | 1,6 · 10 ⁷ | - | - | - |
| Median diameter | [nm] | 60 | 133 | - | - | - |
| Black carbon | [mg/m ³] | 17,2 | 30,2 | - | - | - |
| Normeret til 10 % O₂; 273,15 K; 1013 mbar røggas | | | | | | |
| CO | [mg/m ³] | 156 | 531 | 91 | 28 | 45 |
| NO _x (NO ₂ -ækv.) | [mg/m ³] | 128 | 107 | 172 | 174 | 176 |
| OGC (C ₃ H ₈ -ækv.) | [mg/m ³] | 22 | 15 | 8 | 9 | 8 |
| Partikelmasse (filter) | [mg/m ³] | 49 | 174 | - | - | - |
| PM _{Total} (online) | [mg/m ³] | 25 | 260 | - | - | - |
| Black carbon | [mg/m ³] | 8.1 | 60.6 | - | - | - |

TABEL 5 viser en sammenfatning af emissioner fra TABEL 4 omregnet til Ecodesign emissioner, hvor emissioner fra lavlast tæller 85% af de endelige emissioner, mens resultater fra fuldlast tæller de resterende 15%. Målsætningen i projektet er sat ud fra denne fordeling. For NO_x leverer 2-trins-forbrændingskedlen betydeligt lavere emissioner end målsætningen med en reduktion på 45% mod en målsætning på 30% reduktion i forhold til Ecodesign kravet på 200mg/m³ v/10% O₂. For prototypen med røggasrecirkulering viser forsøgene en meget begrænset effekt for både recirkulering tilbage til primær- eller sekundærzonen. For begge forsøg er NO_x-emissioner højere end målsætningen i projektet, men lavere end Ecodesign-krav. For partikelemmissionerne leverer kedlen omvendt betydeligt højere partikelemmissioner end målsætningen i projektet, hvilket er en klar indikator for at forbrændingen ikke fungerer hensigtsmæssigt, når målsætningen er en reduktion mellem 65-75% lavere end Ecodesign kravet på 40mg/m³ v/10% O₂.

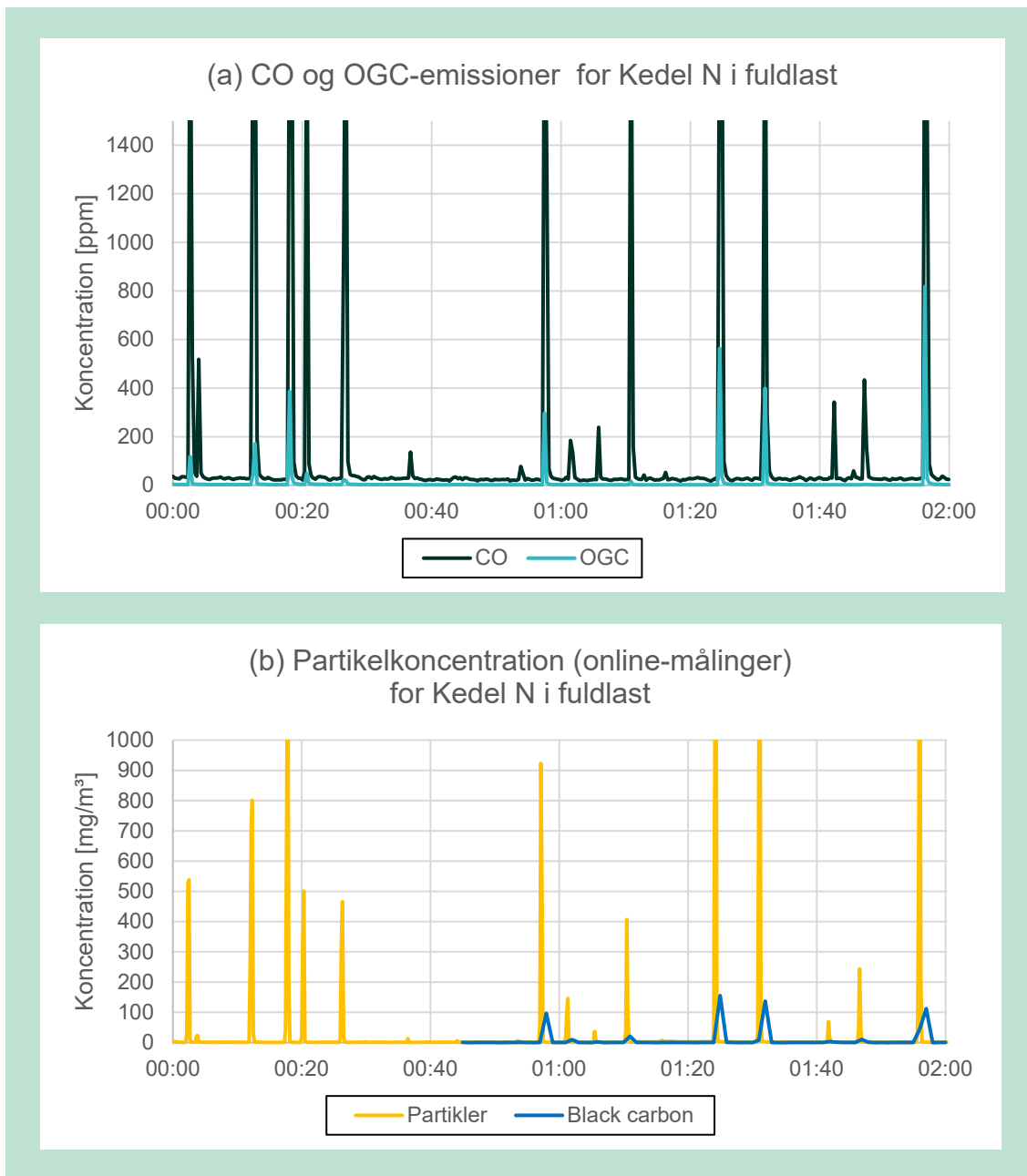
TABEL 5. Sammenfatning af emissioner fra Kedel N (for de timer TABEL 4 repræsenterer) konverteret til Ecodesign-emissioner i hht. projektets målsætning. Gasformige og partikelemmissioner er omregnet til referencetilstand (10% O₂)

| Parameter | Enhed | Ecodesign (85%lavlast + 15%fuldlast) | Ecodesign+ Boiler målsætning | Målsætning mødt? |
|---|----------------------|--|---------------------------------|---|
| CO | [mg/m ³] | 475 | - | Ingen projektmålsætning, men under Ecodesign krav på 500mg/m ³ |
| NO _x (NO ₂ -ækv.) | [mg/m ³] | 110 | 140 | Ja - Reduktion på 45% ift. Ecodesign krav |
| OGC (C ₃ H ₈ -ækv.) | [mg/m ³] | 17 | - | Ingen projektmålsætning men under Ecodesign krav på 20 mg/m ³ |
| Partikelmasse | [mg/m ³] | 155 | 10-14 | Ej mødt |
| Årsvirkningsgrad | [%] | - | >92 | Ikke målt |

5.3.2 Data for to-trins-forbrænding Kedel N (forgasningskedel)

For to-trins-forbrænding (forgasningskedel) viser lavlastdrift højere emissioner for CO og partikler end fuldlastdrift, mens OGC- og NO-emissioner er lavere ved lavlast. Dette ses tydeligst for de normerede emissionsværdier. Under begge driftsforhold er langt de fleste partikler mindre end 1 µm i diameter (PM₁), partiklerne er dog større ved lavlast. Dette ses både i partiklernes mediandiameter (60 nm versus 130 nm) og i sammenligning af partikelantal og -masse (kun tredjedel af antal ved lavlast, men 3,5–10 gange så stor masse). Andel af black carbon er højere ved fuldlast.

En nærmere analyse viser, at gennemsnitsværdier for CO og OGC-emissioner, samt online-målinger af partikler er i høj grad påvirket af enkelte spidser ved fuldlast (FIGUR 8(a)). Medianværdierne er betydeligt lavere (rådata: 27 ppm CO, 3 ppm OGC, 1,1 mg/m³ partikler; omregnet til røggas-referencetilstand: 34 mg/m³ CO, 5 mg/m³ OGC, 1 mg/m³ partikler) end middelværdierne (hhv. 127 ppm, 11 ppm, 24 mg/m³ og 156 mg/m³, 18 mg/m³, 24 mg/m³; jf. TABEL 4). FIGUR 8(a) viser også, at spidskoncentrationer af CO og OGC ofte falder sammen i tid, men at der er flere tidspunkter med usædvanlig høj CO koncentration i røggassen end der er med forhøjet OGC. Selve spidskoncentrationen af CO er muligvis undervurderet, fordi koncentrationen overstiger analysatorens måleinterval. Med en anden (mindre sensitiv) analysator målt kortvarige CO-koncentrationer mellem 0,8–1,5 % (svarende til 8.000–15.000 ppm).



FIGUR 8. Målte koncentrationer (rå) af CO og OGC i den øverste figur (a), samt partikler og black carbon (BC) i den nederste figur (b) ved to-trins-forbrænding i fuldlast (12 kW).

Høje CO-udledninger er ledsaget af høje partikel- og black-carbon-koncentrationer i røggassen (FIGUR 8(b)). Black carbon målingerne er dog mindre dynamisk (dvs. instrumentet har en ringere tids-opløsning) og derfor er emissions-spidsene mere udjævnet for black carbon end for CO, OGC og partikler (data i intervallet 0:00–0:45 mangler for black carbon). CO, OGC og black carbon er alle tegn for ufuldstændig forbrænding. Der kan formodes, at spidsværdier i partikelkoncentrationen derfor skyldes en øget andel af organiske materialer (frem for uorganisk akse). Resultaterne tyder på, at der sker en kortvarig slukning af flammerne. Optræden af fænomenet virker kaotisk, og dets årsag kan ikke umiddelbart afsløres på baggrund af de målte data.

Det er kendt fra tidligere erfaringer med konventionelle pillefyr, at en ujævn brændselstilførsel kan forårsage kortvarigt ufuldstændig forbrænding. Overskud af CO og OGC følger tilføjelsen af for meget (koldt) brændsel. I så fald sænkes temperaturen i bålet, så reaktionshastigheden af oxidationsreaktionerne falder. Ligeledes frigives flere pyrolysegasser, som

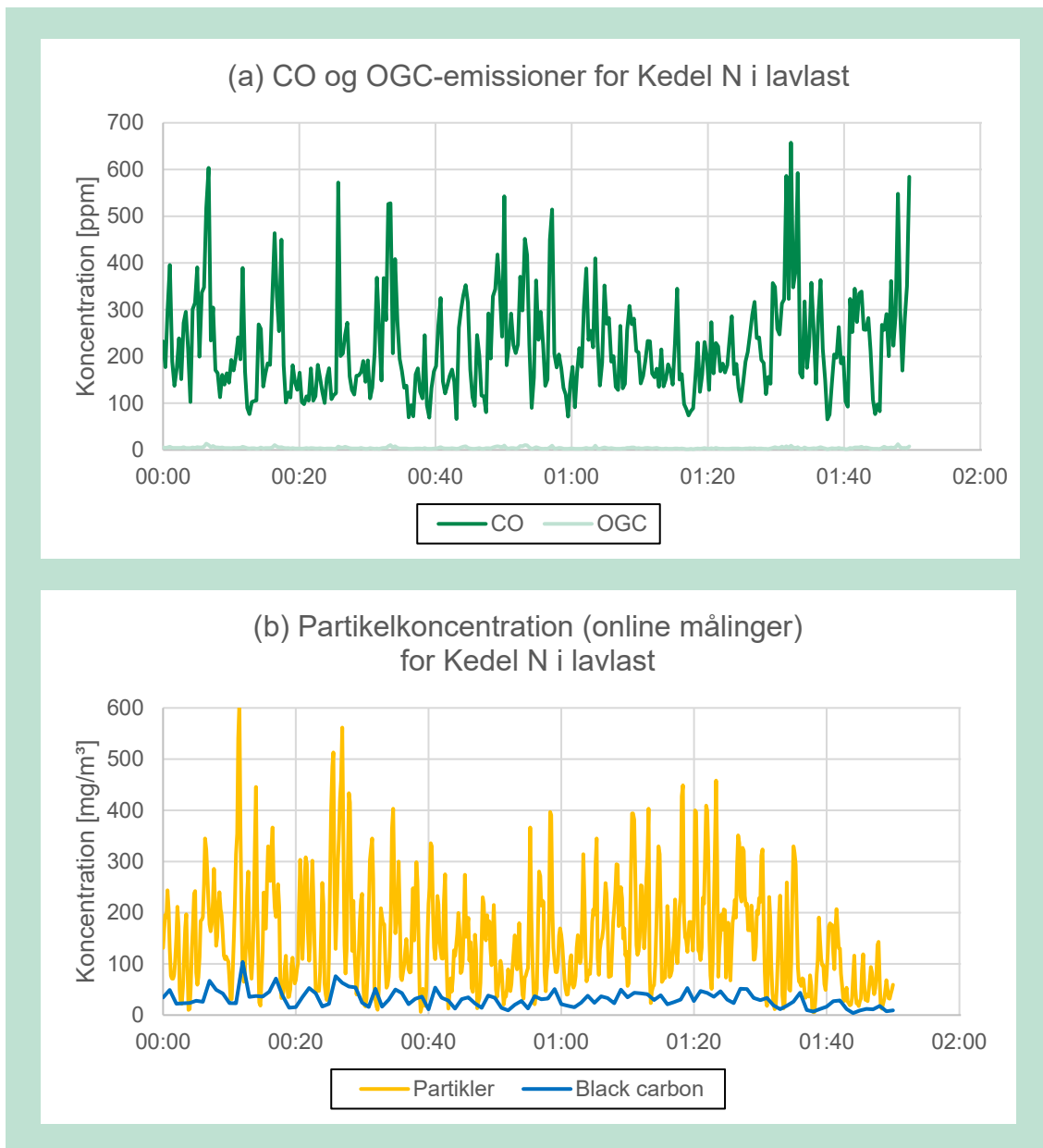
ikke bliver fuldstændig oxideret på grund af manglende opblanding med ilt, for kort opholdstid og/eller for lave temperaturer. Pyrolysegasser findes så i form af CO og OGC i røggassen. I princippet burde det undgås med to-trins-forbrænding, fordi pyrolyse/afgasning og fuldstændig oxidation er bevidst rumligt adskilt. Det er dog muligt, at den ovennævnte effekt også formindsker pyrolysegassernes brændværdi og/eller tændeevne. Aerodynamiske ustabilitet kunne ligeledes forårsage lokal flammeslukning ("flakkende lys"), der måles som forøget CO, OGC og black carbon koncentrationer.

CO-, OGC- eller BC-emissionsspidserne fandtes ikke ved lavlast (FIGUR 9). Ved lavlast drives kedlen dog med et højere globalt luftoverskud ($\lambda \approx 4$ ved lavlast mod $\lambda \approx 2$ ved fuldlast), som kunne medføre at forbrændingen allerede foregår i primærzonen (forgasningszonen), dvs. kedlen fungerer som en almindelig kedel under disse driftsforhold. Andele af hhv. primærluft og sekundærluft blev dog ikke målt. Forventningen vil ellers være, at enhver form for ustabilitet træder forstærket frem ved lavlast. Dette skyldes bl.a. et ugunstigere forhold mellem varmekøling og varmetab (dvs. en mindre eller koldere flamme) og at brændseltilførsel bliver endnu mere portionsvis og ujævn. En mere ujævn forbrænding ved lavlast ses også i at CO-emissioner varierer med ca. $\pm 50\%$ (FIGUR 9, (a)) om medianværdien ved lavlast, men kun med omkring $\pm 25\%$ ved fuldlast (når emissionsspidserne regnes fra).

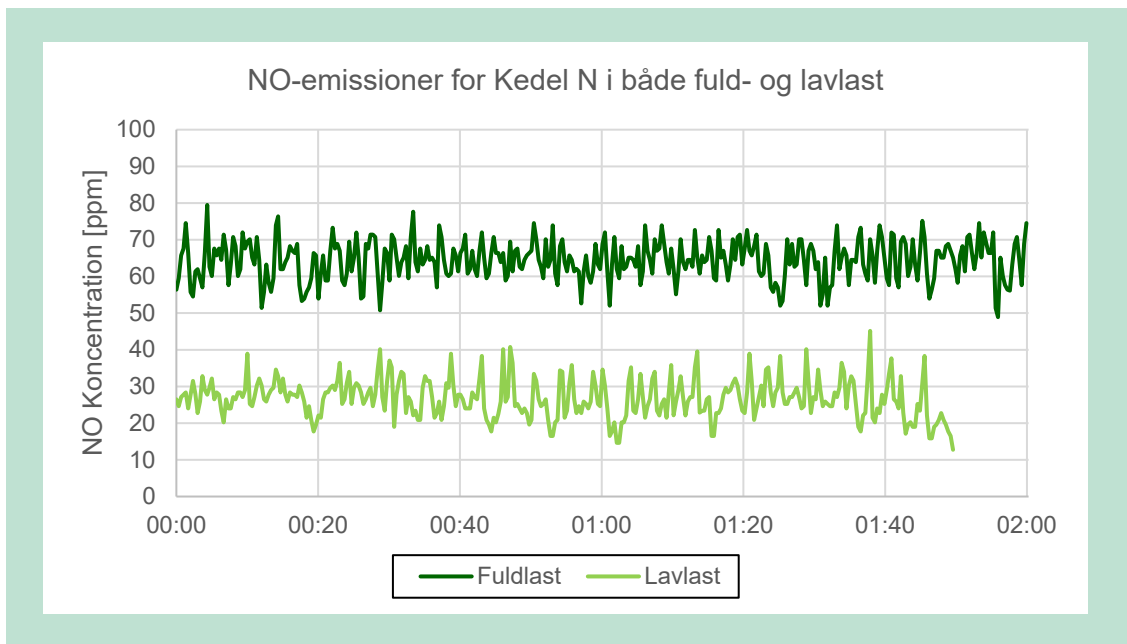
NO-emissionerne var ikke påvirket af forbrændingsustabiliteten (FIGUR 10). Fluktuationer over tid er sammenlignelige ved fuld- og lavlast. Der fandtes ingen korrelation mellem den aktuelle koncentration af NO i røggassen og andre måleparametre. Dette kan indikere, at NO-dannelse foregår på en anden tidsskala end den øvrige forbrændingskemi. Det lavere niveau af NO-emissioner ved lavlast skyldes muligvis den lavere forbrændingstemperatur ved højere luftoverskud. Yderligere oxidation af NO til NO₂ er endnu langsommere, og der var ingen relevant forskel mellem målt NO og målt NOx (NO+NO₂).

Fordeling mellem primær- og sekundærluft blev hverken systematisk varieret eller målt i forsøgene – derfor kan effekten af forgasningsprincippet ikke vurderes direkte. I litteraturen nævnes et reduktionspotentiale af hhv. 15–30 % [6] eller op til 70 % for NOx [5], samt 16–26 % for partikler [6]. Med henhold til NOx ligger de opnåede forbedringer ved ca. 25 %, når der sammenlignes normerede emissioner fra forgasningskedlen (128 mg/m³) med recirkulationskedlen når recirkulering er slået fra (176 mg/m³, jf. TABEL 4). I begge tilfælde er emissionerne signifikant under Ecodesign-krav (200 mg/m³) mens kun forgasningskedlen overholder projektets målsætning (140 mg/m³). Partikelkoncentrationerne var meget påvirket af fluktuerende forbrændingsforhold. Selv når enkelte emissionsspidser tages med i betragtning, kan kedlen lige overholde Ecodesign-kravene. Når disse fluktuationer regnes fra, er partikelemissioner meget lave (≈ 1 mg/m³ ved røggas-reference-tilstand).

Fluktuationerne af ukendte årsag vil dog gøre anvendelsen af forgasningsprincippet meget vanskeligt i kommercielle produkter.



FIGUR 9. Målte koncentrationer (rå) af CO og OGC i den øverste figur (a), samt partikelmassekoncentration og black carbon (BC) i den nederste figur (b) ved to-trins-forbrænding i lavlast (3 kW). Data vises på samme skala som FIGUR 8.



FIGUR 10. NO-koncentration (rå data) ved to-trins-forbrænding i fuld- og lavlast (12 kW, 3 kW). NO_x opstår primært som NO i disse forsøg.

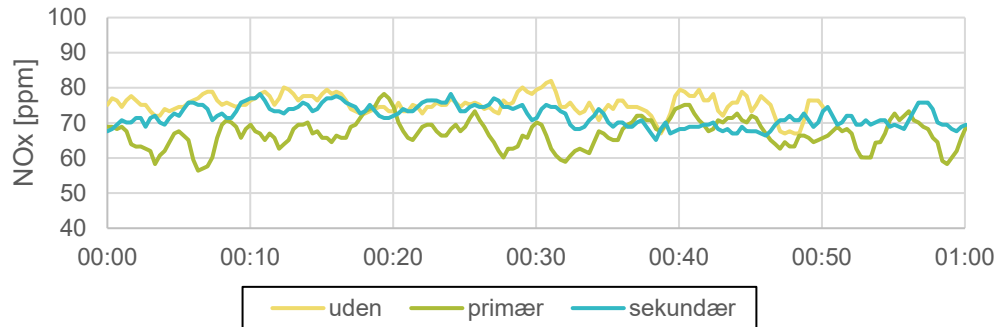
5.3.3 Røggasrecirkulering Kedel N-R

Forsøg med røggasrecirkuleringskedlen viste kun mindre forskelle mellem drift uden recirkulering, med recirkulering gennem brænderen (primærzone) eller gennem brændkammeret (sekundærzone), FIGUR 11. Generelt viser dataet ingen eller kun ringe effekt af røggasrecirkulering gennem sekundærzonen/brændkammeret sammenlignet med konventionel kedeldrift (ingen recirkulering). Der formodes, at røggassen blev tilsat for langt ude i brændkammeret for at påvirke forbrændingen og NO_x-dannelse. Ved recirkulering gennem brænderen (primærzone) blev røggassen blandet med forbrændingsluften inden blæseren.

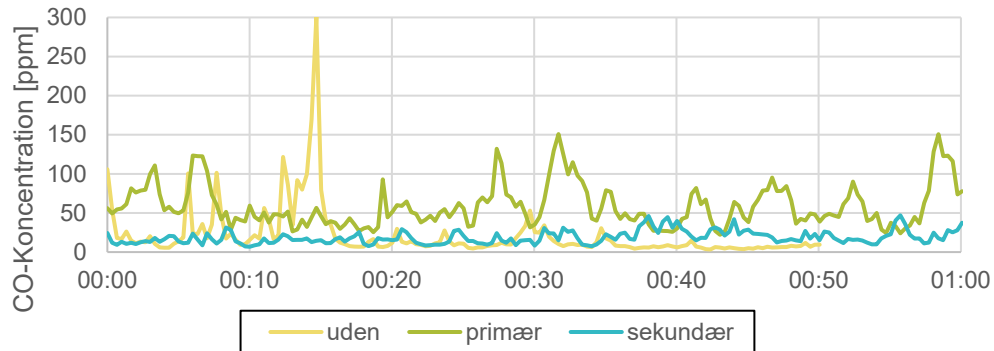
Effekten af recirkulation gennem brænderen er forskellig for de målte emissioner. Difference i NO emissioner mellem røggasrecirkulering gennem brænderen og konventionel kedeldrift er i samme størrelsesorden som fluktuationerne ved begge signaler (FIGUR 11(a)). Forskellene anses derfor for ikke signifikant (jf. TABEL 4). CO-emissionerne er generelt lidt højere og viser en højere grad af fluktuation ved røggasrecirkulering gennem primærzonen (FIGUR 11(b)). Gennemsnitsværdien af CO for forsøg uden recirkulering er påvirket af et kortvarigt overskud i emissionerne. Årsag til dette kendes ikke. De samme tendenser som for CO ses også for OGC (FIGUR 11, (c)). De trappe-agtige signalforløb i diagrammen tyder dog på, at detektorernes reelle opløsningsevne er 1 ppm. Derfor ses der bort fra en videregående analyse af OGC-dataet.

At røggasrecirkuleringen har en mindre effekt på NO-emissioner end to-trins-forbrænding (sammenlignet med konventionel kedeldrift) er i overensstemmelse med litteraturen [5]. En dybere analyse af røggasrecirkuleringens effekt vil kræve en bedre kendskab af recirkulationsforhold. De initiale forsøg med princippet viser dog et ringere potentiale til emissionsreduktion end to-trins-forbrænding.

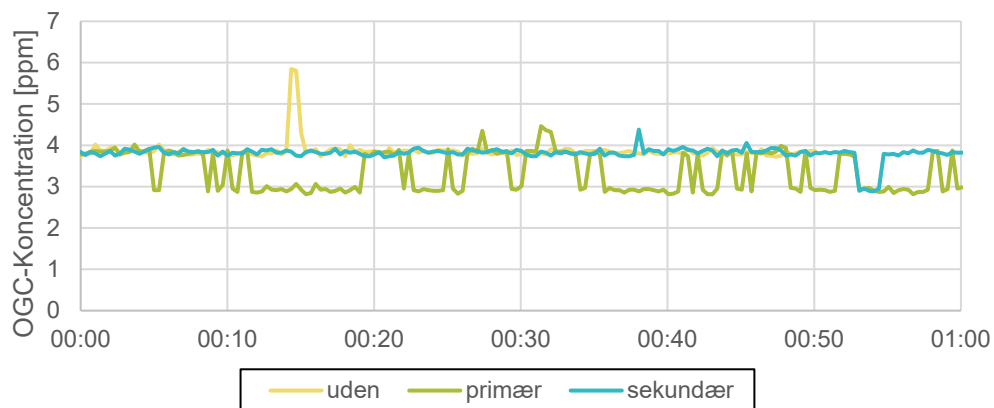
(a) Effekten af NO_x-emissioner for kedel N i hht. røggasrecirkulation



(b) Effekten af CO-emission for kedel N i hht. røggasrecirkulation



(c) Effekten af OGC-emissioner for kedel N i hht. røggasrecirkulation



FIGUR 11. Fra toppen mod bunden af figurene NO_x-, CO- og OGC-koncentrationer (rå data) ved for recikleringskedel N, med hhv. røggasrecirkulering slået fra, recirkulering gennem primærzonen og recirkulering gennem sekundærzonen.

5.4 Resultater for KSM' Kedel K.

5.4.1 Udviklingsproces for KSM

KSM har igennem projektet udviklet tre forskellige prototyper (se udsnit af tegninger for modeller i Bilag 3). Her kan nævnes én med horisontalt forgasningsprincip, og to med vertikalt forgasningsprincip i to forbrændingszoner. For KSM er det lykkedes at opnå måleresultater jf. EN303-5 med den vertikale prototype i både lav- og fuldlast for opfyldelse af emissionerne fra EU's Ecodesign direktiv krav, EU 2015/1189, – det vil sige 1x6timers lavlast og 1x6timers fuldlast. Resultaterne jf. afsnit 5.4.2 er delvist opnået jf. projektets målsætning i form af lave støvtalet.

Den endelige kedel var dog på et så tidligt stadie, at det ikke er lykkedes at lave en komplet automatiseret styring, som Load-Cycle-Testen kræver for at give et billede af de reelle emissioner, hvorfor denne del af projektet ikke er afprøvet inden for den givne tidsramme. Resultaterne for både fuld- og lavlast viser dog, at forbrændingsprincippet for denne kedel fungerer efter hensigten.

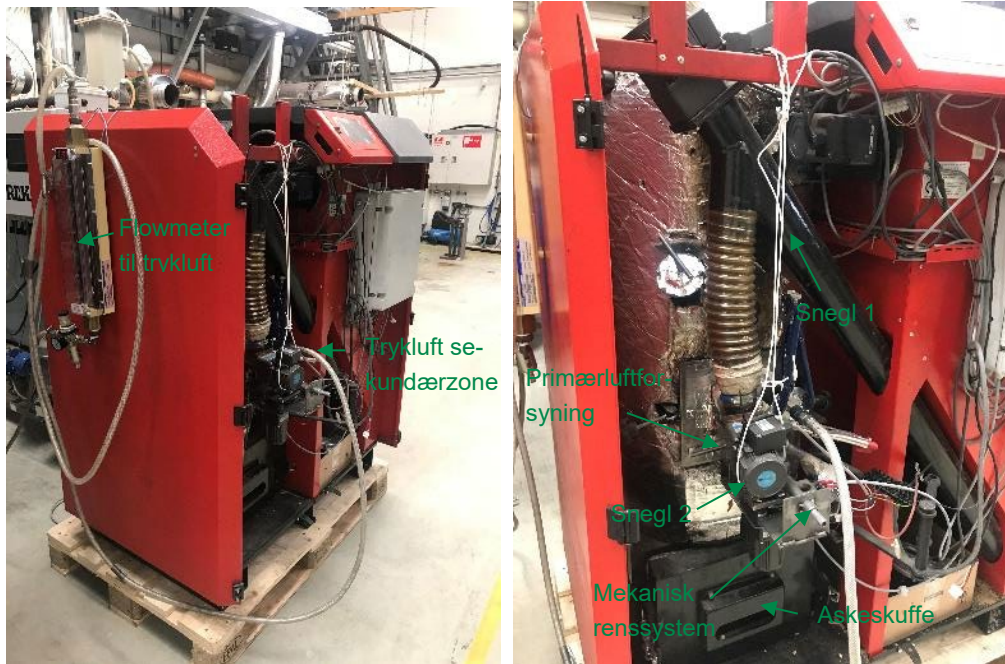
I forlængelse af de kemiske analyser vs. forbrændingstekniske egenskaber dækket i afsnit 3 er det forsøgt afdækket, hvorvidt denne nye kedel med et andet forbrændingsprincip reagerer på forskellige typer brændsler, som kan implementeres i den kommende styringsalgoritme for dette produkt. Desuden er der lavet flere fysiske laboratorietest af de udvalgte træpiller. Mere omkring dette i afsnit 5.5

Røggasrecirkulering på den endelige kedel er også for denne kedel afprøvet over flere omgange jf. afsnit 5.4.3. Resultaterne herfra var ikke tilfredsstillende jf. teorien nævnt i afsnit 4.4, hvorfor denne del af projektet endeligt blev nedprioriteret.

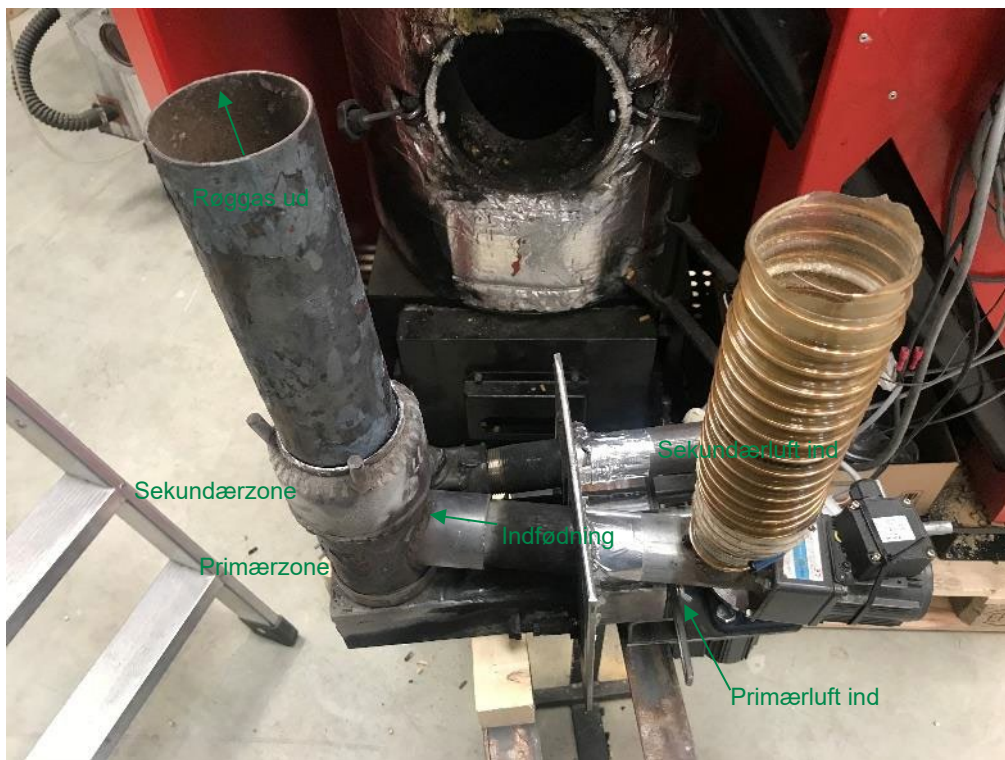
Resultaterne for KSM's endelige kedel er i de kommende afsnit benævnt; *Kedel K*.

Kedel K er bygget op af to zoner. Primærzonen (nederste zone) inkluderer tilførsel af brændsel fra siden. Sekundærzonen kommer i forlængelse af primærzonen med en ekstra forbrændingsring, som i denne kedel får tilført forbrændingsluft via skrå slidser, der bevirker at røggassen får swirl-effekt med høj hastighed (set via skueglas i toppen af kedlen). I de tidligere modeller var der høj modstand igennem dette sekundær-forbrændingssystem pga. mange slidser, hvorfor den endelige Kedel K har færre men større slidser. Først blev forbrændingsluften blæst ind ved hjælp af en højtryksblæser. Dog var der for store fluktuationer igennem den udvalgte blæser, hvorfor der for de endelige målinger blev skiftet om til konstant trykluft. Tryklufften er først ledt gennem et flowmeter, så mængden af sekundærluft er kendt for de afprøvede laster. Flowet af primærluft er derimod ukendt, men arealåbningen er målt under prøven og styres primært ved at justere på den indbyggede røgsuger kombineret med at justere arealåbningen.

Herunder er et udsnit af billeder taget af den endelige Kedel K.



Kedel K som helhed (tv) og forfra (th).



Forbrændingsprincip med to zoner og hver sin luftforsyning



Hhv. primær (tv) og sekundær-zonen (th) tæt på.

5.4.2 Data for 2 to-trins-forbrænding, Kedel K (forgasningskedel)

Der er for de endelige prøver kørt med et relativt højt luftoverskud i begge laster med hhv. $\lambda=2,2$ og $\lambda=5,6$, hvorfor de beregnede emissioner henført til 10% O₂ specielt i lavlasten er relativt høje i forhold til de tidligere udførte lavlastmålinger. Tidligere under indkøring af lavlasten har luftoverskuddet været mindre ($\lambda=3,1$) med både lavere emissioner og partikler end nedenstående resultater.

Der er under både fuld- og lavlast benyttet 6mm træpiller af mærket Task.

TABEL 6 neden for viser de målte endelige resultater for Kedel K oplyst i de to forskellige laster. Fuldlast er kørt ved 10,2kW og lavlast er kørt ved 1,8kW, svarende til 18% af fuldlasten og dermed betydeligt lavere end nødvendig jf. standarden. Det generelle billede ved test af biomassekedler efter EN303-5 ved lavlast er, at forbrændingen leverer de største emissioner både for gasser (hovedsagligt CO og OGC) og partikler. Det gør sig også gældende for denne kedel med det nye forbrændingsprincip.

Tabellen viser blandt andet støv, som er partikler i varm røggas. Det er i standarden defineret, at der skal tages 4 støvprøver à 30 minutter under hver last med et kendt interval. I dette projekt har vi imidlertid valgt at tage 6 støvprøver for bedre at kunne følge kedlens forløb. Under lavlasten er der efter ca. 2,5-times drift inde i cyklussen kørt en automatisk rensecyklus, som giver u hensigtsmæssige store udslag på støvmålingen jf. TABEL 8, for OGC og CO jf. FIGUR 14 samt for den målte online partikelkoncentration FIGUR 15. Under normal praksis vil en sådan rensecyklus ikke foregå under en prøve. Da denne støvmåling i lavlasten påvirker det samlede resultat væsentligt, er der i stedet valgt at vise kedlens potentiale i form af de 4 bedste støvprøver af de i alt 6 udsugede støvprøver for hver last.

Også under disse test viser partikler målt med filter og koncentrationen målt med online-analysatoren (DustTrak) ret store afvigelser for nominel last, men kun mindre afvigelser for lavlast, hvilken kan skyldes ikke-isokinetisk udsugning for online-analysatoren.

Røggasrecirkulering er i tabellen også vist. Dette forsøg er udført på et andet tidspunkt i udviklingen af kedlen, men med samme forbrændingsprincip. I afsnit 5.4.3 dykkes dybere ned i resultaterne herfra.

TABEL 6. Opnåede resultater for Kedel K (to-trins-forbrænding) samt Kedel K-R (røggasrecirkulering). For Kedel K-R er der angivet effekten røggas injiceret simultant med sekundærluften i sekundærzonen. Specielt de store forskelle mellem filteropsamlingsmetode vs. partikelmasse målt med DustTrack reflekteres der mere om i slutnigen af dette afsnit under overskriften "Online partikelmåling".

| Parameter, rå målt | Enhed | To-trins-forbrænding (forgasningskedel) | | Røggasrecirkulering (fuldlast alene) | |
|--|----------------------|---|-----------------------|--------------------------------------|------|
| | | Fuldlast | Lavlast | Sekundærzone | Uden |
| Effekt | [kW] | 10,2 | 1,8 | 11,6 | 11,2 |
| CO ₂ | [%vol] | 9,1 | 3,5 | 10,9 | 9,8 |
| Røgtab | [%] | 5,4 | 7,3 | - | - |
| CO | [ppm] | 40 | 115 | 37 | 33 |
| NO _x | [ppm] | 91 | 32 | 75 | 67 |
| OGC | [ppm] | 1 | 4 | - | - |
| Partikler, potentiale* (filter) | [mg/m ³] | 8,4 | 3,7 | - | - |
| PM _{Total} (online) | [mg/m ³] | 0,7 | 4,3 | - | - |
| Partikelantal | [#/cm ³] | 5,0 · 10 ⁷ | 1,3 · 10 ⁷ | - | - |
| Median diameter | [nm] | 51 | 60 | - | - |
| Black carbon | [mg/m ³] | 0,1 | 1,9 | - | - |
| Emissioner normeret til 10% O₂; 273,15 K; 1013 mbar røggas | | | | | |
| CO | [mg/m ³] | 58 | 424 | 45 | 45 |
| NO _x (NO ₂ -ækv.) | [mg/m ³] | 215 | 192 | 146 | 147 |
| OGC (Propan-ækv.) | [mg/m ³] | 2,0 | 20,1 | - | - |
| Partikelmasse (filter) | [mg/m ³] | 9,7 | 10,1 | - | - |
| PM _{Total} (online) | [mg/m ³] | 0,8 | 12,8 | - | - |
| Black carbon | [mg/m ³] | 0,1 | 5,7 | - | - |

* Se TABEL 8 for nærmere beskrivelse af partikel-potentialet

TABEL 7 viser en sammenfatning af emissionerne fra TABEL 6 omregnet til Ecodesign emissioner, hvor emissioner som tidligere nævnt fra lavlast tæller 85% af de endelige emissioner, mens resultater fra fuldlast tæller de resterende 15%. Resultaterne viser at kedlens potentiale vedrørende støvpartikler lever op til både kravene for Ecodesign og op til projektmålsætningen for brug af forgasningsprincippet. Målsætningen for både virkningsgrad og NOx-emissionerne lever op til kravene sat i Ecodesign, men desværre lever de ikke op til projektmålsætningen.

TABEL 7. Resultaterne fra Kedel K i både Fuld- og lavlast (2x6 timer) i forhold til Ecodesign krav samt målsætningen i projektet.

| Parameter | Enheder | Resultater ved 2 laster | | Ecodesign (85%* lav+15%*nom) | Krav Ecodesign | Målsætning projekt | Målsætning nået? |
|---|-----------------------|-------------------------|-------|------------------------------|----------------|--------------------|-------------------------------|
| | | Fuld | Lav | | | | |
| Effekt | [kW] | 10,2 | 1,8 | - | - | - | - |
| Virkningsgrad | [%] | 92,5 | 88,5 | 89,1 ¹⁾ | - | 92,0 | - Nej |
| CO ₂ | [%Vol] | 9,1 | 3,5 | - | - | - | - |
| CO (v/10% O ₂) | [mg/nm ³] | 57,7 | 424,1 | 369 | 500 | - | - |
| Støv-middel (v/10% O ₂) | [mg/nm ³] | 11,7 | 15,1 | 14,6 | 40 | 14 | - Acceptabel Reduktion på 64% |
| Støv-potentiale (v/10% O ₂) | [mg/nm ³] | 9,7 | 10,1 | 10,0 | 40 | 14 | - ja, Reduktion på 75% |
| NOx (v/10% O ₂) | [mg/nm ³] | 215,1 | 191,8 | 195 | 200 | 140 | - Nej |
| OGC (v/10% O ₂) | [mg/nm ³] | 2,0 | 20,1 | 17 | 20 | - | - |

¹⁾ Beregnet virkningsgrad, hvor konvektionstab er overført fra tidligere prøver.

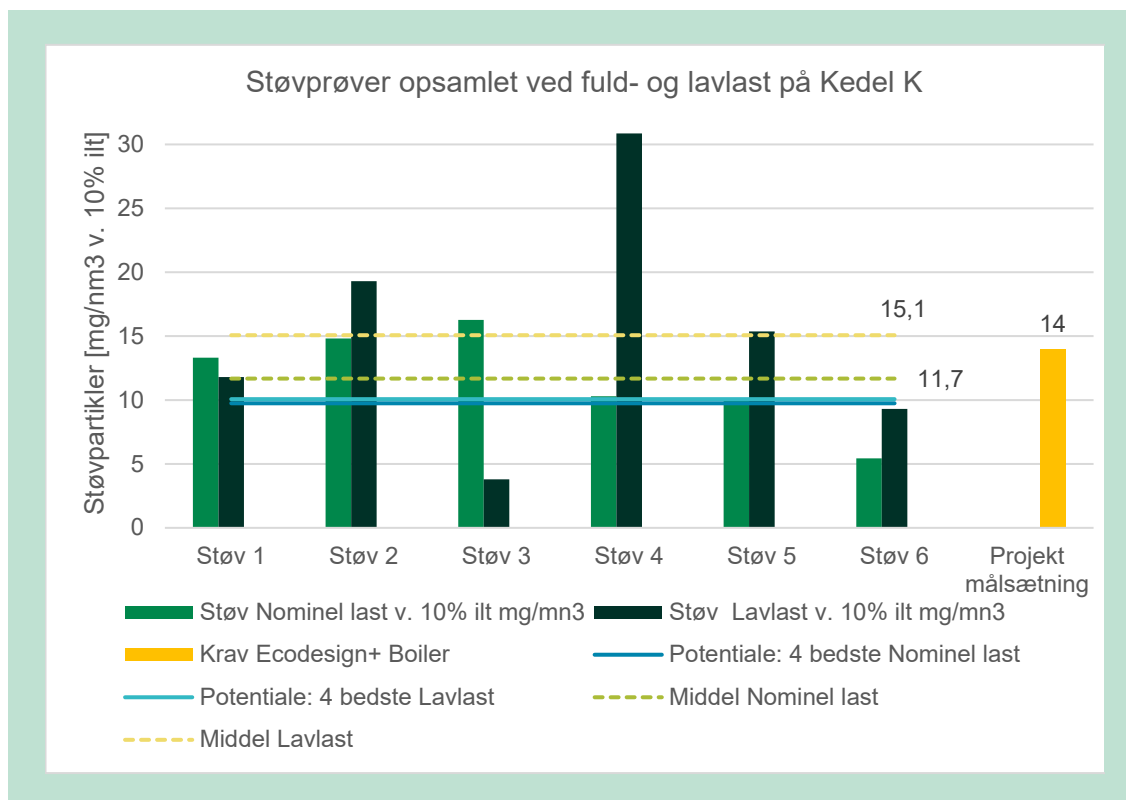
Dykket lidt dybere ned i partikelmålinger udsuget på filtre under disse 2x6timers laster viser TABEL 8 og FIGUR 12 udviklingen for de udtaget støv-emissioner, mens FIGUR 13 og FIGUR 14 viser udviklingen for de øvrige emissioner igennem hele fuld- og lavlastprøverne udført på Kedel K. Det er tydeligt både ved partikel- og øvrige emissionsmålingerne at forbrændingen er mere jævn og ren i fuldlast end i lavlast, da bålet er mindre qua den lavere indfyrede brændselsmængde og mindre lufttilførsel i det geometrisk uændrede brændkammer. Samlet bevirker dette et koldere bål i lavlast og dermed højere emissioner.

TABEL 8. Alle støvprøver udtaget på Kedel K i både fuld- og lavlast afrapporteret ved 10% O₂. Der er i projektet udtaget 2 flere støvprøver pr. last, end hvad standarden for nuværende kræver.

| | Fuldlast v. 10% O ₂ mg/m _n ³ | Lavlast v. 10% O ₂ mg/m _n ³ |
|--------------------------------------|---|--|
| Støv 1 | 13 | 12 |
| Støv 2 | 15 | 19 |
| Støv 3 | 16 | 4 |
| Støv 4 | 10 | 31 |
| Støv 5 | 10 | 15 |
| Støv 6 | 5 | 9 |
| Middel 6* | 11,7 | 15,1 |
| Middel 4** | 9,7 | 10,1 |
| Ecodesign emission (85%lav+15%*fuld) | | |
| Middel alle 6 støvprøver | 14,6 | |
| Potentiale 4 støvprøver | 10,0 | |

*) 6 støvprøver er taget fra begge laster, hvor standarden for nuværende siger 4 støvprøver.

**) Kedlens potentiale i form af middel af de bedste 4 støvprøver udtaget for begge laster.

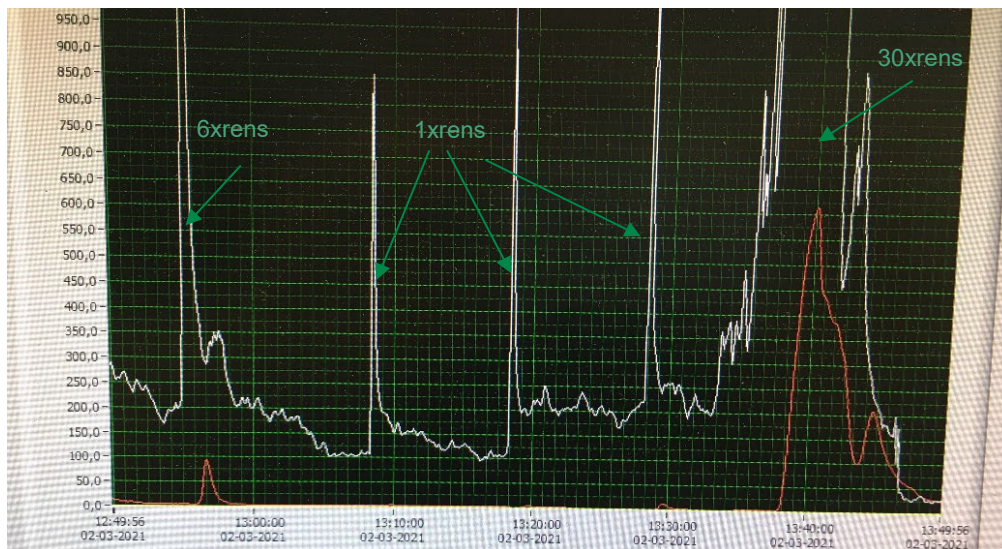


FIGUR 12. Grafisk afrapportering af de 6 støvprøver for de to laster.

FIGUR 12 viser de målte støvprøver udsuget isokinetisk på quartzfiltre à 30 minutter hver. For nominel-/fuldlast er der fra støvprøve #1 => #3 en svag stigning af udsuget støvpartikler, mens der herefter for støvprøve #4 => #6 er den modsatte effekt at støvpartiklerne falder. Det samme gør sig gældende for nedenstående billede af NOx-emissioner i FIGUR 13, som også falder den sidste halvdel af prøven.

For lavlast er det tydeligt, at der under den målte støvprøve #4 er foregået en mekanisk rensning af brænderskålen som ca. fordobler indholdet af støvpartikler for #4. Under denne rensningscyklus (for Kedel K) bliver det nederste lag af de forbrændte piller skubbet ud af forbrændingszone 1 og ned i askeskuffen. Under denne lavlast-prøve er denne cyklus desværre sket automatisk og er meget u hensigtsmæssig i forhold til det samlede snit. Rensningen bevirker at bålet rodes rundt og ekstra primærluft tilføres bålet i processen. Dette påvirker forbrændingen med kortvarige peaks. Efter rensningen falder støvprøve #5 og #6 dog til ca. samme niveau, når bålet igen har stabiliseret sig.

Den mekaniske rensning har til hensigt løbende at forbedre forbrændingen, hvis brænderskålen er ved at pakke til. Nedenstående billede viser momentane CO-peaks efter x-antal påførte rensningscyklusser udført efter hinanden. De indledende forsøg viser, at det er muligt at rense brænderskålen og komme tilbage til et fornuftigt CO-niveau igen.



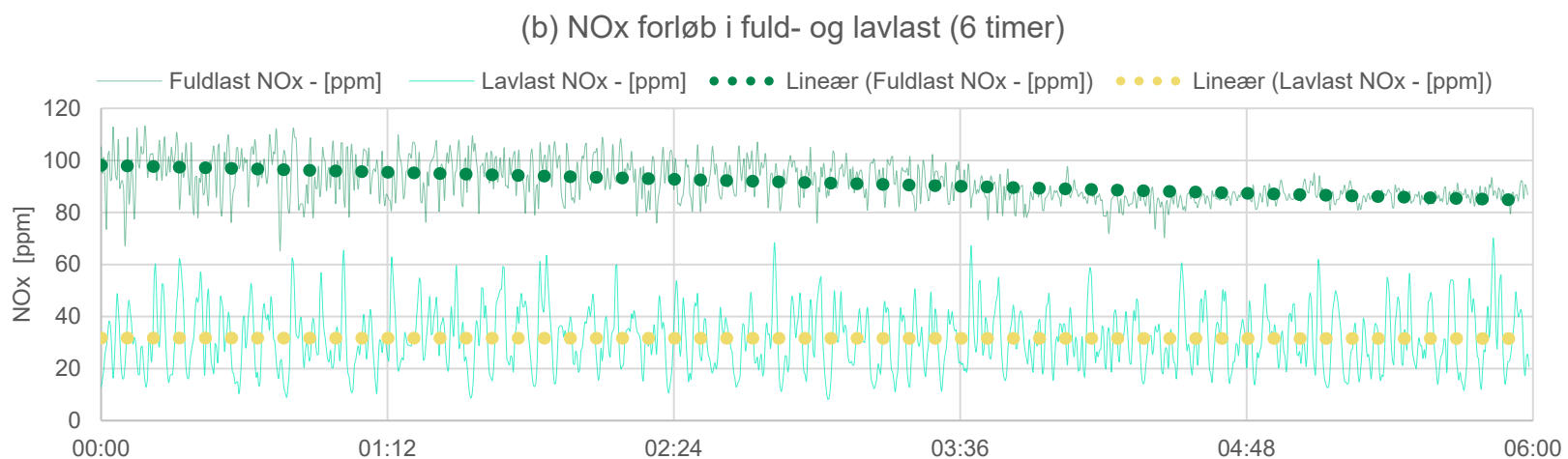
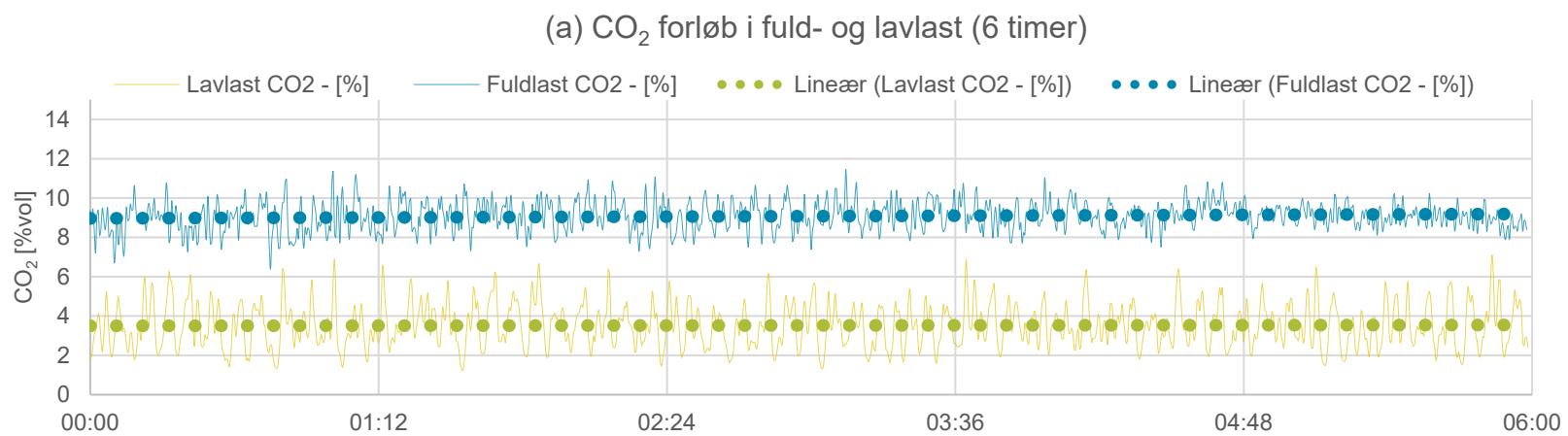
Målte CO₂-koncentrationer efter x-antal rensedyklusser. Efter de kortvarige peaks falder koncentrationen tilnærmelsesvis igen til det forrige niveau. Sidste cyklus falder endda til et markant lavere niveau efter et markant højere antal rensedyklusser.

FIGUR 13 viser de målte koncentrationer for CO₂ (a) og NO_x (b) for både fuldlast- og lavlastforsøg. CO₂ er konstant gennem hele forsøgsperioden for begge laster, dvs. styringen har holdt luftmængden konstant over hele forsøgsperioden. Lavlasten er foretaget med et højere luftoverskud, hvilket ses i den lavere CO₂-koncentration i røggas (9% i fuldlast, 3,5% i lavlast). Fluktuationer i CO₂ er mere udprægede ved lavlast. Dette skyldes formentlig ujævn brændseltilførsel. Per rotation af doseringsneglen påføres en vist mængde træpiller, og udsving er mere synlige når der er i alt færre træpiller per rotation.

For NO_x vises to forskellige tendenser; i fuldlast falder koncentrationen af NO_x i løbet af forsøget, og ved lavlast er NO_x-niveauet konstant. De målte NO_x koncentrationer ved fuldlast er betydeligt højere end ved lavlast. TABEL 6 viser emissionerne omregnet til 10% O₂, emissioner fra lavlast er en smule mindre end i fuldlast, men generelt er på tilnærmelsesvis samme niveau ved de to laster trods den store målte forskel.

FIGUR 14 viser de tilsvarende målte koncentrationer af CO (a) og OGC (b) for begge laster. CO- og OGC-koncentrationer er højere ved lavlast. Både CO og OGC er produkter af ufuldstændige forbrændingsreaktioner. Den ufuldstændige omsætning af brændslet ved lavlast skyldes formentlig, at brændkammeret er overdimensioneret for denne driftstilstand. Dette medfører typisk et større varmetab fra bålet. De lavere temperaturer i bålet afbryder den fuldstændige oxidation af CO og OGC. CO og OGC aftager uvæsentligt i løbet af lavlast-forsøget, hvilket tyder på at forbrændingen er blevet renere i løbet af 6 timer. En mulig forklaring er en opvarmning af brændkammeret i forsøgsperioden, hvilket vil fremme oxidationen af OGC og CO. Ved fuldlast ses en stigning i CO og et fald i OGC i løbet af forsøget. OGC-koncentrationen er dog i forvejen så lav, at der ses bort fra en yderligere interpretation her. Stigning i CO korrelerer med en fald i NO (jf. FIGUR 13) i samme periode.

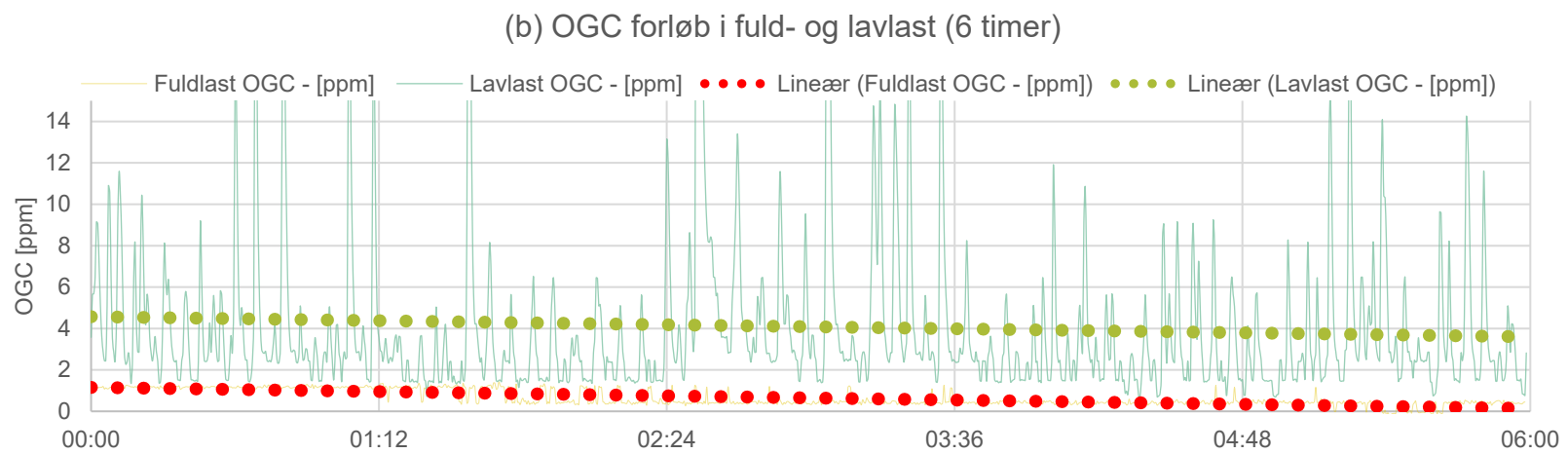
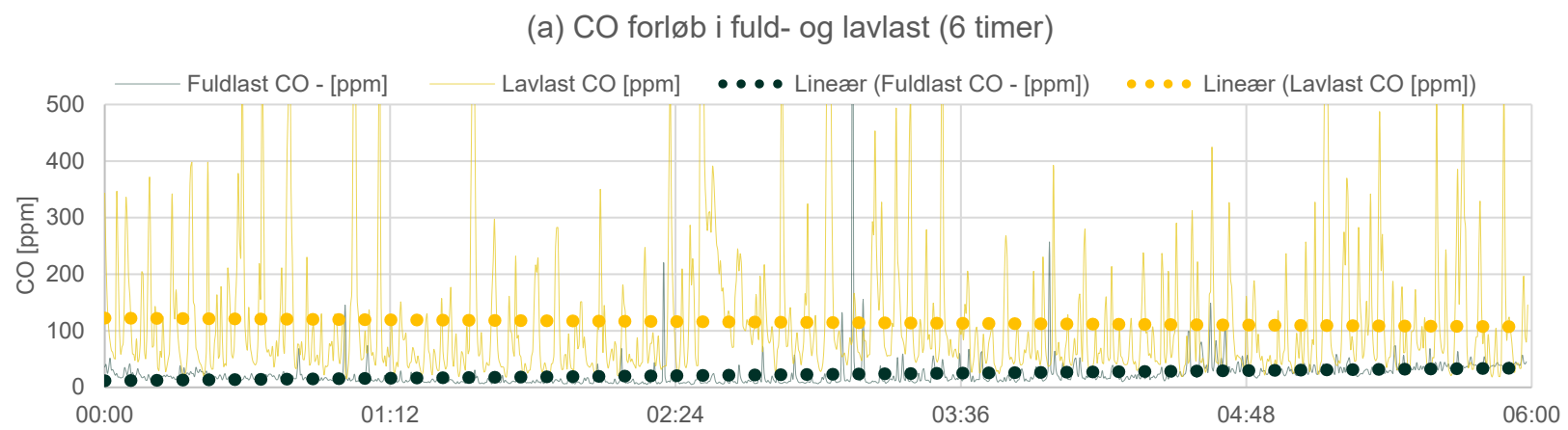
Et forsigtigt bud på, hvorfor både støv (FIGUR 12) og NO_x-emissionen (FIGUR 13 (b)) falder i slutningen af fuldlasten, mens CO-emissionen stiger (FIGUR 14, (b)), kan skyldes at brænderskålen mod slutningen af fuldlasten begynder at pakke en lille smule til, så bundluften har mindre magt og dermed en anelse lavere temperatur i zone 1. Det kan også svagt antydes at CO₂-en (FIGUR 13, (a)) har mindre fluktuationer mod slutningen, hvilket også kan være et tegn på at bundluften er mere afskåret. Sekundærluften alene kan ikke drive den rene forbrænding, når brændslet pakker sammen og primærluften reduceres.



FIGUR 13. Målte koncentrationer af CO₂ (a) og NO_x (b) over de 6 timer på de to laster.

FIGUR 14 viser de tilsvarende målte koncentrationer af CO (a) og OGC (b) for begge laster. CO- og OGC-koncentrationer er højere ved lavlast. Både CO og OGC er produkter af ufuldstændige forbrændingsreaktioner. Den ufuldstændige omsætning af brændslet ved lavlast skyldes formentlig, at brændkammeret er overdimensioneret for denne driftstilstand. Dette medfører typisk et større varmetab fra bålet. De lavere temperaturer i bålet afbryder den fuldstændige oxidation af CO og OGC. CO og OGC aftager uvæsentligt i løbet af lavlast-forsøget, hvilket tyder på at forbrændingen er blevet renere i løbet af 6 timer. En mulig forklaring er en opvarmning af brændkammeret i forsøgsperioden, hvilket vil fremme oxidationen af OGC og CO. Ved fuldlast ses en stigning i CO og et fald i OGC i løbet af forsøget. OGC-koncentrationen er dog i forvejen så lav, at der ses bort fra en yderligere interpretation her. Stigning i CO korrelerer med en fald i NO (jf. FIGUR 13) i samme periode.

Et forsigtigt bud på, hvorfor både støv (FIGUR 12) og NO_x-emissionen (FIGUR 13 (b)) falder i slutningen af fuldlasten, mens CO-emissionen stiger (FIGUR 14, (b)), kan skyldes at brænderskålen mod slutningen af fuldlasten begynder at pakke en lille smule til, så bundluften har mindre magt og dermed en anelse lavere temperatur i zone 1. Det kan også svagt antydes at CO₂-en (FIGUR 13, (a)) har mindre fluktuationer mod slutningen, hvilket også kan være et tegn på at bundluften er mere afskåret. Sekundærluften alene kan ikke drive den rene forbrænding, når brændslet pakker sammen og primærluften reduceres.



FIGUR 14. Målte koncentration af CO (a) og OGC (b) over de 6 timer på de to laster.

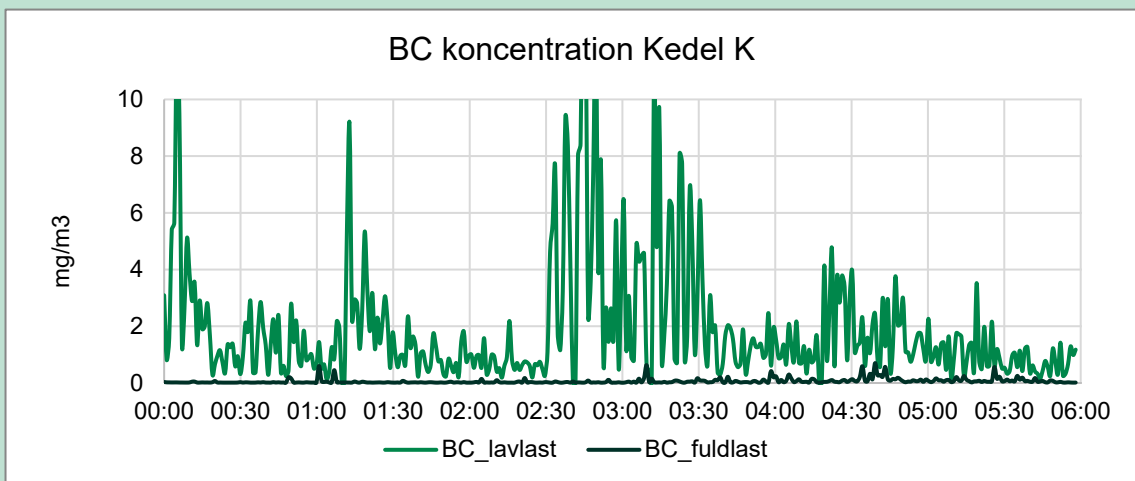
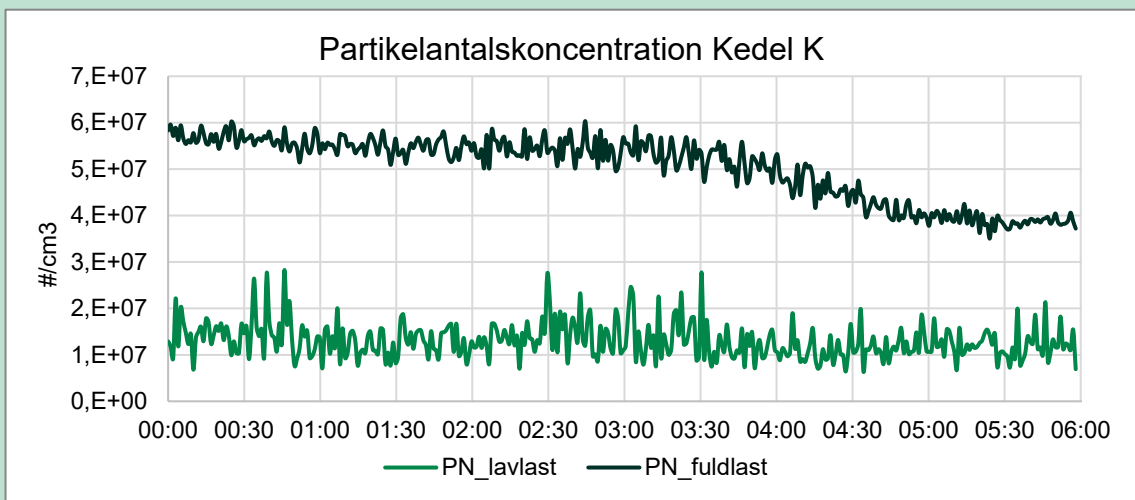
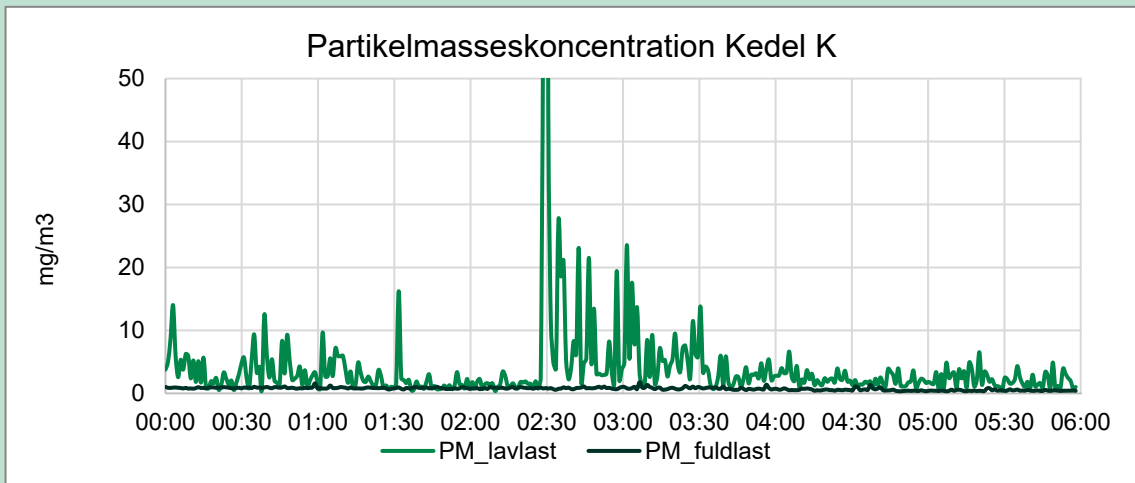
Online partikelmålinger

Det er blevet observeret, at online-måling af partikelmassekoncentration ved brug af DustTrak og filtermåling adskiller sig fra hinanden, idet filtermålingen typisk er højere end online-målte værdier. Dette kan delvis tilskrives de forskellige anvendte metoder. Derudover udføres online måling af partikelmassekoncentration fra fortyndingskanalen, hvor den fortyndede luft suges ud med en konstant hastighed (3 L/min) og derfor med ikke-isokinetisk ekstraktion fra fortyndingskanalen til instrumentet, som er tilfældet ved filtermålinger. Online partikelmassemålinger er således underlagt strømningshastigheden. Ved lavlast, hvor flow i skorstenen er mindre, er online partikelmassemålingerne mere på niveau med filtermålinger. Online BC-målinger ekstraherer flow fra fortyndingskanalen med endnu en lavere flowhastighed på 0,05 L/min, og vil således blive påvirket mere af den ikke-isokinetisk effekt.

Det er derfor anbefalet, at online måleresultaterne bruges som en generel evaluering med en højere tidsopløsning af, hvordan kedlen fungerer i den testede periode, for eksempel i den 6-timers test af kedel K eller den 1,5 timers test af de forskellige træpiller, men de absolutte online-tal bør ikke anvendes af to årsager; 1) den udsuger ikke isokinetisk som filtermetoden gør, hvilket gør at online opsamlingsmetoden ikke giver et retvisende resultat blot en tendens, og 2) de nuværende krav til partikler er som partikelmasse opsamlet på filter.

Dykket yderligere ned i partiklerne fra de to laster for Kedel K viser FIGUR 15 de 6 timers variation af partikelmasseskoncentration, partikelantalskoncentration og BC-koncentrationer. Generelt blev der observeret højere partikelmasseskoncentration og BC-koncentration under lavlast sammenlignet med fuldlast som forventet dels på grund af renere forbrænding i fuldlast. Det er også tydeligt, at rensecyklussen påvirker partikelmassekoncentrationen og BC-koncentrationen negativt, og for begge parametre tager relativt lang tid for dem at vende "tilbage" til før-tilstanden. I gennemsnit var PM-koncentrationen målt med online måleinstrument 4,3 mg/m³ ved lavlast mod 0,7 mg/m³ ved fuldlast. Som nævnt ovenfor ligger disse dog et godt stykke fra de udsuget partikler på filtre. BC-koncentration var 1,9 mg/m³ ved lavlast og 0,1 mg/m³ ved fuldlast.

For partikelantalskoncentration var gennemsnittet $1,3 \times 10^7$ #/cm³ ved lavlast, hvilket er ca. 4 gange lavere end $5,0 \times 10^7$ #/cm³ ved fuldlast. Den højere partikelantalskoncentration tilskrives de mindre partikler, som er højere i antal, men ikke bidrager meget til massen. Disse partikler standses mindre ved koagulationsproces, adsorption eller kondensering, i tilfælde af mindre tilgængelig partikelmasse.

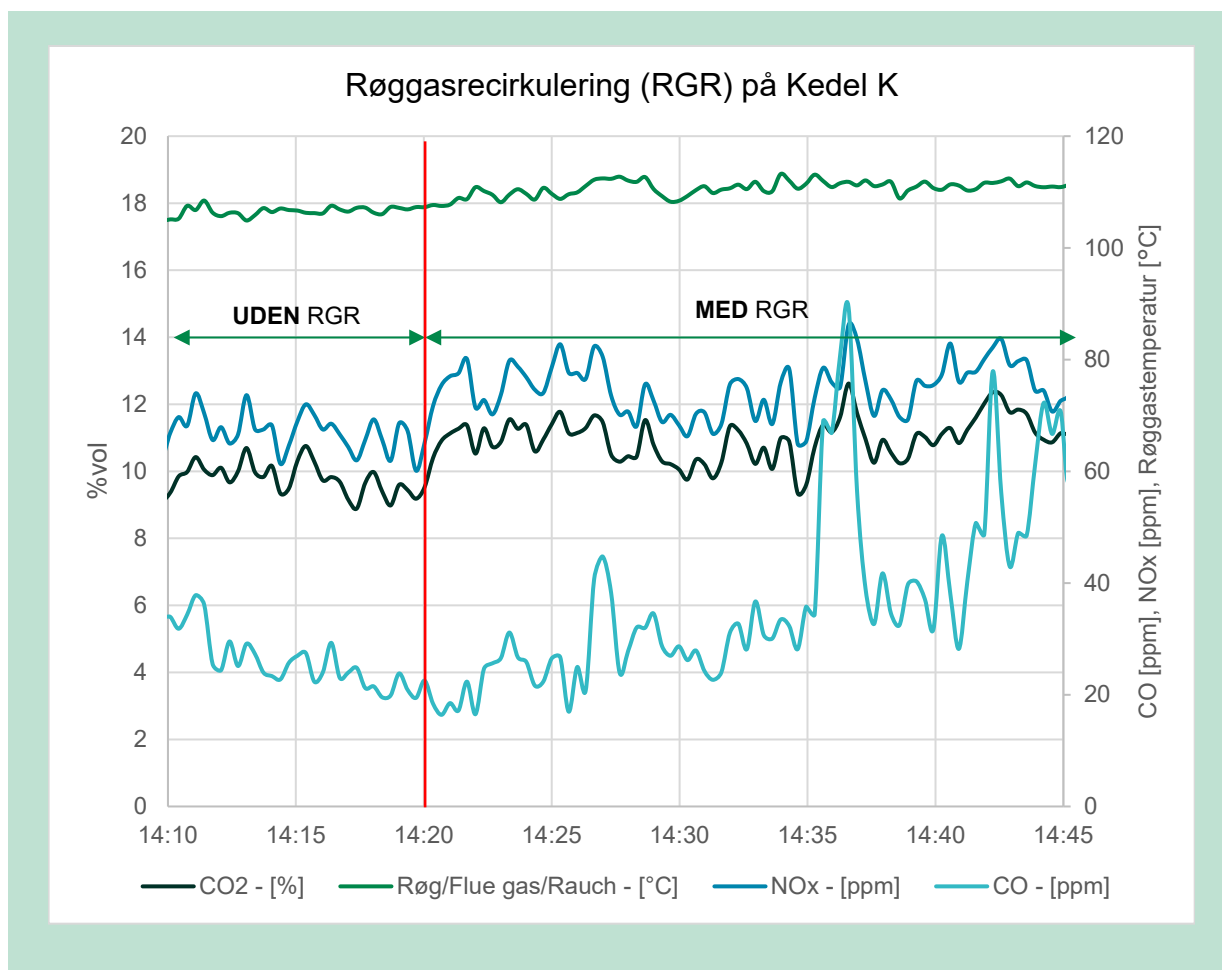


FIGUR 15. Variation of partikelmasseskoncentration, partikelantalskoncentration og BC-koncentration over 6 timers kørsel ved lavlast og fulldast, Kedel K.

5.4.3 Røggasrecirkulering Kedel K

Der blev undervejs forsøgt flere gange at eftervise røggasrecirkulering med det formål at sænke NOx emissionerne. Dog er det ikke lykket på denne kedel at eftervise teorien opridset i afsnit 4. Det er for Kedel K forsøgt eftervist ved at føre røggas tilbage i sekundærluftkanalen via en Y-samling og før umiddelbar indblæsning via hullerne i sekundærluft-ringen. Sekundær-indblæsningen er derfor i dette forsøg en fortyndet røggas, som er både varmere og indeholder mere CO₂, CO, NOx m.m. end referencetilstand. Højere koncentrationer af CO og NOx under røggasrecirkuleringen (FIGUR 16) skyldes formentlig den lavere luftoverskud (CO) og den højere temperatur (NOx), idet den recirkulerede røggas formentlig fortrænger en del af den sekundære (frisk-)luft.

Flowet af den recirkulerede røggas blev i nedenstående figur ikke målt. Dog blev flowet efterfølgende forsøgt eftervist vha. flowmeter og tilhørende pumpe, hvor kondensvandet fra røggassen endte med at ødelægge pumpen i forsøget.



FIGUR 16. Initial grafisk udtryk over målte rådata med og uden røggasrecirkuleringen på Kedel K.

Da CO₂'en stiger tilsvarende med stigningen af både CO og NOx, forbliver den omregnede effekt stort set uændret jf. TABEL 9. Var recirkuleringen ført tilbage til primærzonen jf. afsnit 4.4 kunne billedet formentlig have set anderledes ud. Dette var dog ikke muligt at eftervise på den endelige Kedel K.

TABEL 9. Resultater over forsøg med Røggasrecirkulering af Kedel K

| Parameter | Enheder | UDEN RGR 10:10=>10:20 | MED RGR 10:20=>10:45 |
|--|-----------------------|--------------------------|-------------------------|
| Effekt | [kW] | 11,2 | 11,6 |
| CO ₂ | [%Vol] | 9,8 | 10,9 |
| CO (v/10% CO ₂) | [mg/nm ³] | 45 | 45 |
| NO _x (v/10% CO ₂) | [mg/nm ³] | 147 | 146 |
| Røgtemperatur | [°C] | 106 | 111 |

5.5 Træpilleforsøg på Kedel K

En del af AP3 har oprindeligt været at lave en intelligent styringsalgoritme, der automatisk tilpasser forbrændingen efter typen af brændslet, og dermed tager højde for de kemiske egenskaber. Som konkluderet i afsnit 3 var der dog ingen direkte sammenhæng mellem de kemiske- og forbrændingsmæssige resultater med undtagelse af en klar korrelation mellem indholdet af NO kontra den udledte NO_x-emission. På baggrund af den information er der ikke udført yderligere undersøgelser af den kemiske sammensætning, men der er i stedet undersøgt forskellige træpillers mekaniske holdbarhed og partikelsammensætning og igen sammenholdt op imod de forbrændingsmæssige resultater på den endelige Kedel K. De nedenstående resultater kan eventuelt benyttes på fremtidige styringer for at levere lavest mulige emissioner uafhængig af brændselstype.

Nedenstående data og resultater viser Kedel Ks evne til at brænde de forskellige brændsler af ved kun at justere brændselsmængden tilpasses densiteten (afvejning) for at få samme ydelse. Der er i dette forsøg ikke ændret på luftindstillingerne for kedlen. For at sammenligne de forskellige træpiller, blev der for Kedel K foretaget en indkørringsperiode samt en fuldlast i 1,5 timer med hver træpille. Til forsøget er følgende træpiller repræsenteret vist på nedenstående billeder; Task 6 mm (reference og benyttet til 2x6timer test), Verdo 8mm standard, Verdo 8 mm Premium, Task 8 mm og Verdo 6 mm Premium.

Træpilleforsøg kørt med overstående 5 træpiller, hvor den første træpiller er 6mm Task benyttet til de endelige 2x6timers lastprøver og dermed referencepilleren i dette forsøg. De tre typer i midten er 8mm træpiller, mens den sidste er 6mm.



5.5.1 Afvejning og forbrændingstest på de forskellige træpiller

For at finde den samme ydelse/effekt på de forskellige træpiller, blev der først lavet en afvejning på kedlen på de forskellige brændsler. Afvigelsen lød i første omgang på mellem 5-13% for 8mm pillerne og -8% for den anden

6mm træpille i forhold til referencepillen fra afvejningen. Denne justering blev derefter ganget på indfødningshastigheden i forhold til reference-træpilleren (Task 6mm), for at give den retmæssige effekt. Forbrændingen blev herefter målt på de ovenstående piller. Undervejs i forbrændingsforsøget med de forskellige piller blev det dog synligt, at kedlen generelt set leverede lavere effekt på de 3 typer af 8mm træpiller (

TABEL 10). Alligevel blev forbrændingstesten gennemført med det opsatte PM udstyr (målt i fortyndingstunnel). Efter testen blev der nok engang afvejet og opjusteret på de 3x8mm træpiller, så effekten stemte mere overens med reference-effekten omkring 10,2kW. Grunden til denne ekstra opjustering skyldes formentlig at 8mm træpilleren med kedlens benyttede snegl fra magasinet skulle bruge mere strøm i længere tid for at levere samme effekt pga. større modstand fra træpiller med denne dimension. For de endelige resultater af C2, D2, E2 i TABEL 10 endte indfødningsstiden for de 3x8mm træpiller med at skulle øges mellem 32-58% i forhold referencepilleren på 6mm for at ramme den samme effekt. Dette er meget vigtig viden til en fremtidig styring for alle systemer med forskellige snegle til forbrændingen, når der skiftes mellem forskellige brændselsdimensioner.

TABEL 10. Resultater af 1,5times forbrændingstest fra de forskellige træpiller (emissioner henført til 10% O₂). Markeret med gult i tabellen (C, D, E) er resultaterne efter første afvejning af 8mm træpillerne, mens de efterfølgende korrekte tilpasninger er benævnt NY (C2, D2, E2). Reference-træpilleren er målt på kun 30 minutter for at kontrollere, at kedlen leverede tilnærmelsesvis samme resultater som for fuldlastprøven på de 6 timer.

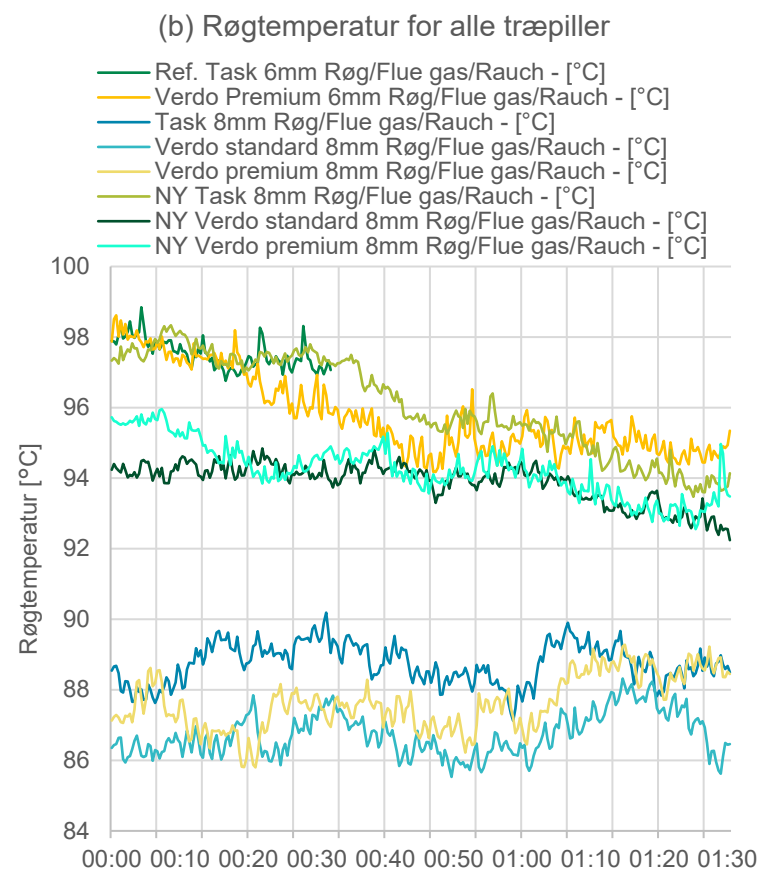
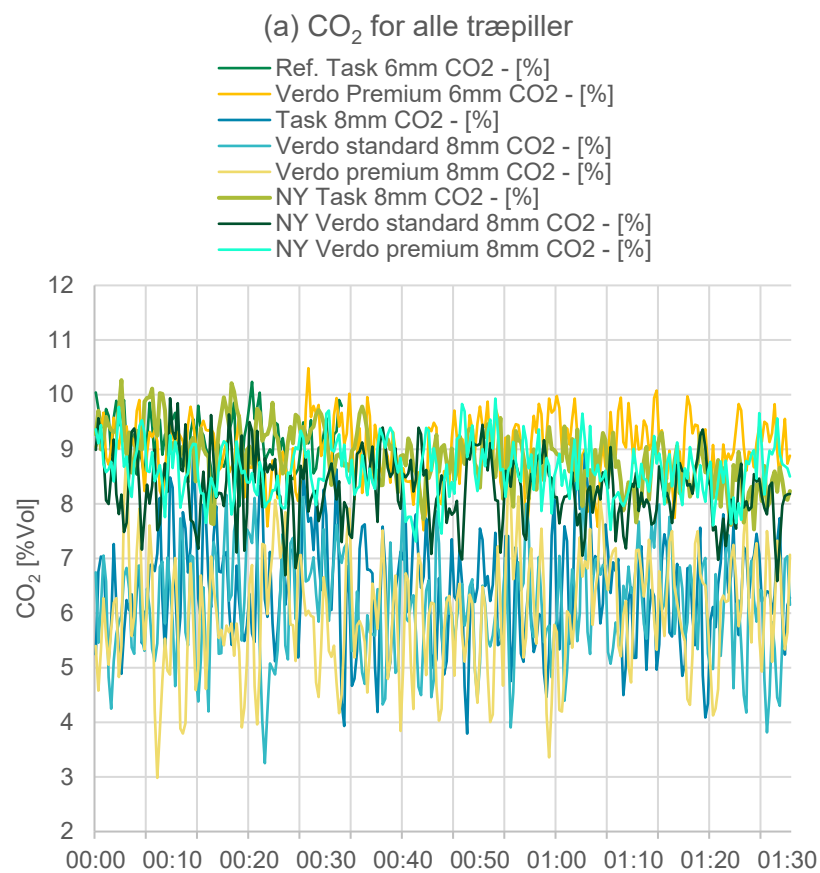
| Parameter* | Målt | Målt | Målt | Målt | Målt | Målt | Målt | Målt | Målt |
|--|----------------------------|----------------------------|-------------------|----------|--------------------|-------------------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|
| | Fuldlast Task 6mm (6timer) | Reference Task 6mm (30min) | Verdo Premium 6mm | Task 8mm | Verdo standard 8mm | Verdo Premium 8mm | <u>NY</u> Task 8mm | <u>NY</u> Verdo standard 8mm | <u>NY</u> Verdo Premium 8mm |
| Ref. # | - | A | B | C | D | E | C2 | D2 | E2 |
| Effekt (kW) | 10,2 | 10,3 | 10,1 | 7,4 | 7,1 | 6,9 | 10,1 | 9,6 | 9,8 |
| CO ₂ (%) | 9,1 | 9,2 | 9,0 | 6,4 | 6,1 | 6,0 | 8,9 | 8,3 | 8,6 |
| CO (mg/m ³) | 58 | 62 | 682 | 44 | 85 | 71 | 168 | 38 | 208 |
| Støv(mg/m ³) | 10 | 6 | 28 | 20 | 23 | 22 | 12 | 13 | 14 |
| NO _x (NO ₂ -ækv., mg/m ³) | 215 | 189 | 145 | 184 | 144 | 205 | 157 | 134 | 184 |
| OGC- C ₃ H ₈ -ækv.(mg/m ³) | < 6 | < 6 | < 6 | < 6 | < 6 | < 6 | < 6 | < 6 | < 6 |

*Emission v/10% O₂.

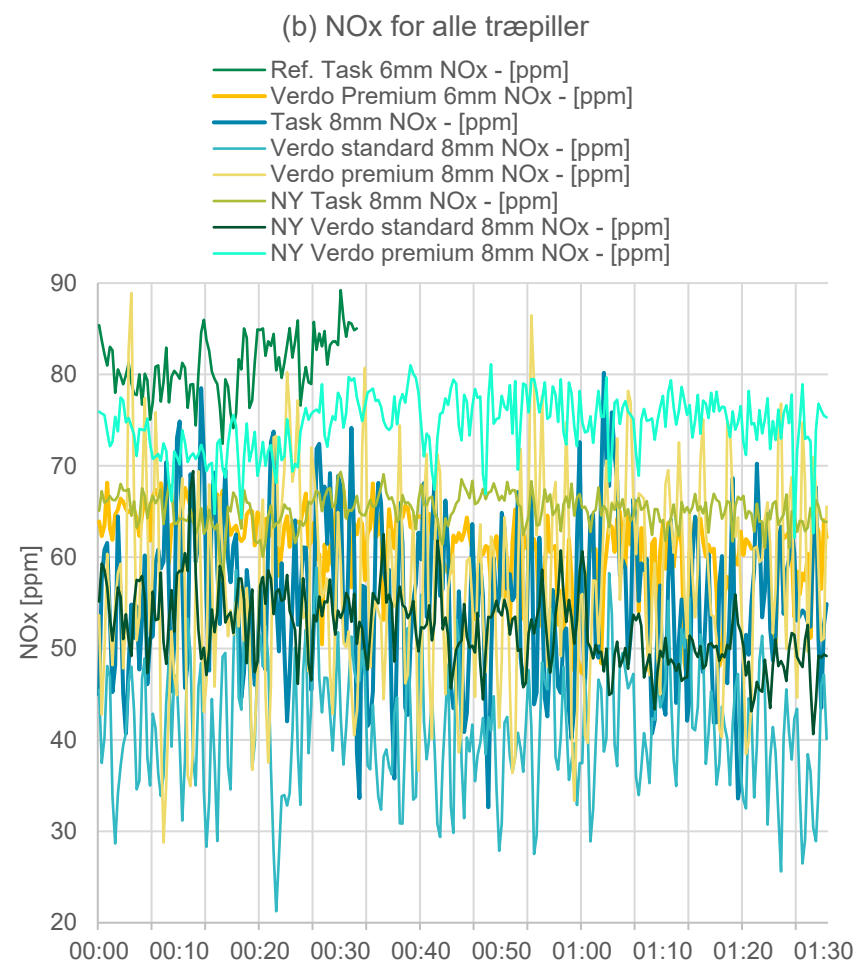
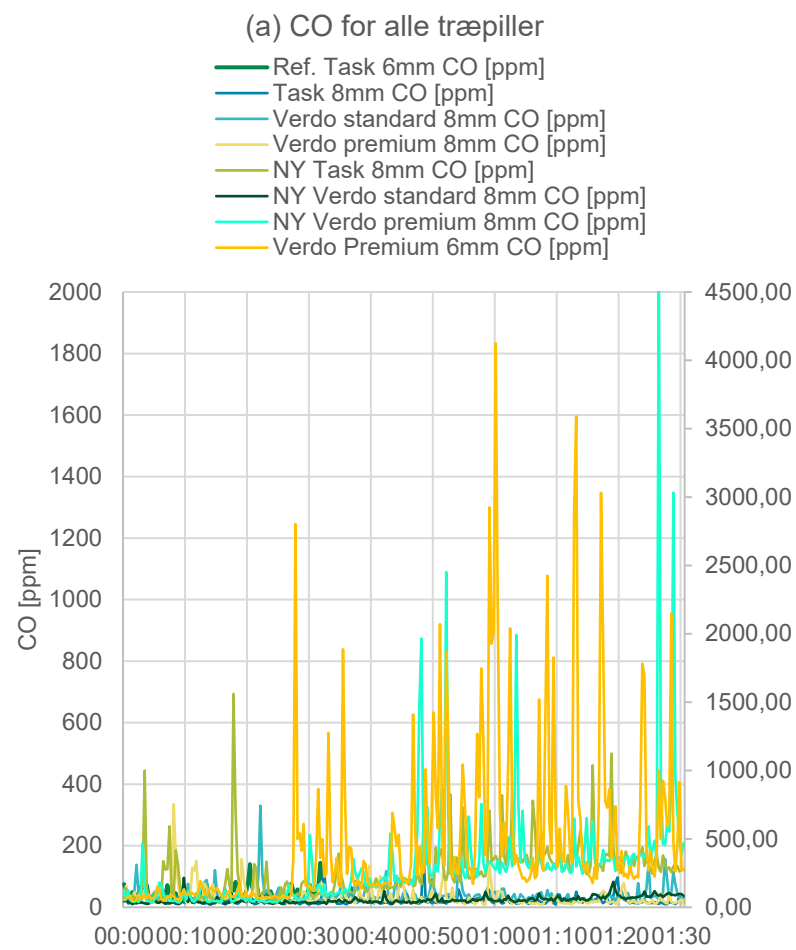
FIGUR 17 og FIGUR 18 viser variationer i parametrene beskrevet i TABEL 10 over tid. Den lavere røggastemperatur og lavere CO₂-koncentration for den første serie af forsøg med 8mm-træpiller skyldes den lavere brændselsmængde (ved lige luftmængde) i disse forsøg. Mens CO₂-signalet er meget stabilt over tiden, viser røggastemperaturen en stigning eller fald for enkelte forsøg.

CO-koncentration i røggassen viser store udsving for enkelte forsøg (FIGUR 18, (a)), hvilket også forklarer de øgede gennemsnitsværdier for "B", "C2" og "E2" (jf. TABEL 10). Høje CO-koncentrationer blev primært målt i den anden serie med 'korrekt' brændselsmængde for 8mm træpillerne. En mulig forklaring er, at de større træpiller er mere påvirket af et muligt (lokalt) luftunderskud. Det er dog ligeledes muligt at udsvingene er tilfældige. Forskellene i NO_x-emissioner blandt de forskellige træpiller er i den samme størrelsesorden som de tidsmæssige fluktuationer i hver enkel måling.

Forklaringen for den markante (beregnete) støvreduktion fra C, D, E => C2, D2, E2 på de ca. 36-40% kan tilskrives den tilsvarende 35-43% øgede CO₂ pga. den øgede effekt.



FIGUR 17. Målte CO₂ koncentrationen (a) og den målte røgtemperatur (b) for de prøvede træpiller over 1,5times målinger. For både CO₂ og røgtemperatur ligger de 3 forkert indjusterede 8mm træpiller (hhv. C, D, og E i TABEL 10) markant lavere end korrekte opjusterede 8mm træpiller, hvilket giver sig til udtryk i lavere ydelse.



FIGUR 18. Målte (a) CO- og (b) NOx-koncentrationer for de forskellige træpiller over 1,5times målinger.

5.5.2 Partikelfordelingen fra forbrændingen

TABEL 11 viser den gennemsnitlige partikelmassekoncentration, BC-koncentration og partikelantalskoncentration af de 4 forskellige træpiller fra 1,5 timers kørsel ved Kedel K (uden C2, D2 og E2) op imod referencepillen Task 6mm. Det er uvist, hvad der har skyldtes reaktionen på Verdo 6mm Premium, men det er tydeligt både på PM og øvrige emissioner, at kedlen ikke har kunne lave en ren forbrænding på denne træpille.

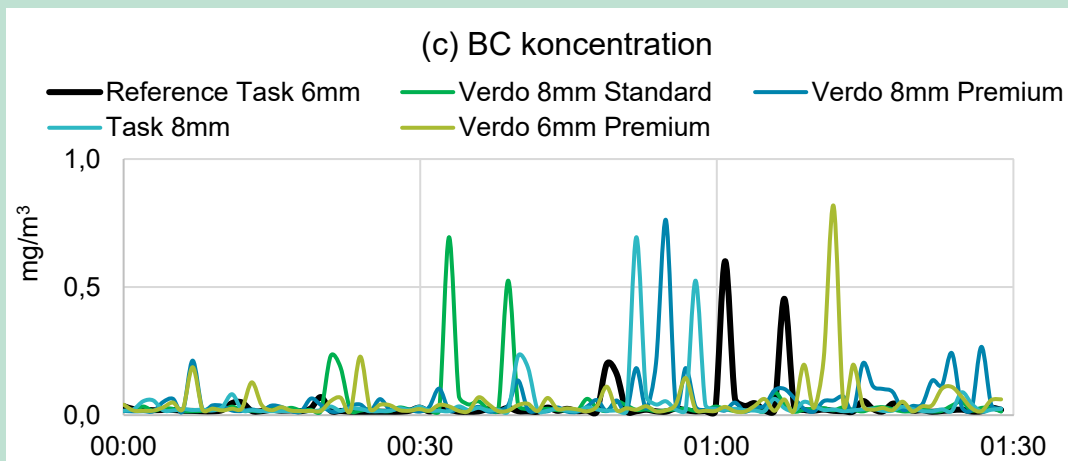
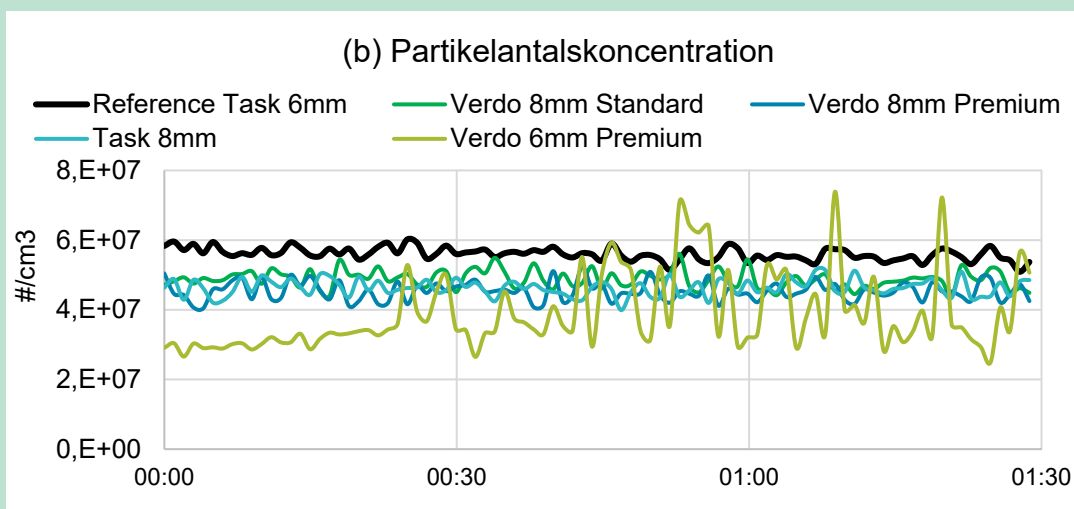
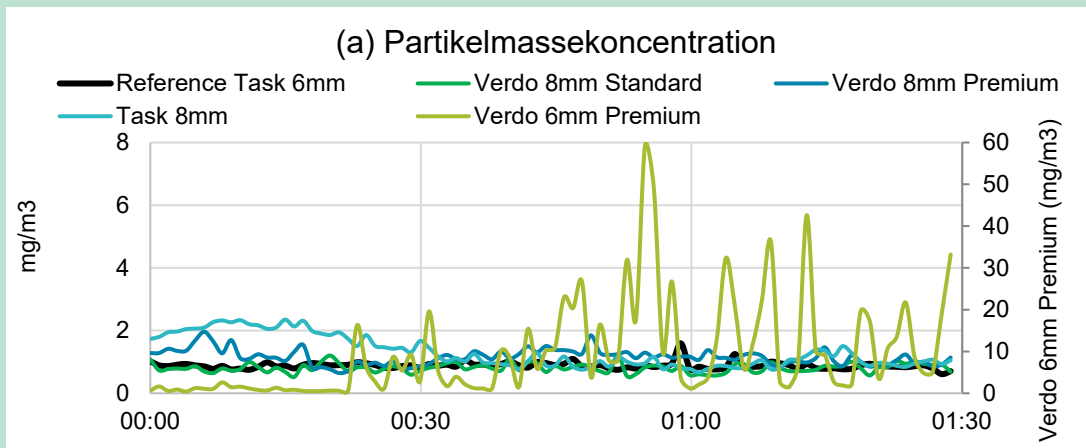
TABEL 11. Variation af partikelmassekoncentration, BC-koncentration og partikelantalskoncentration af de forskellige træpiller over 1,5 timers kørsel ved fuldlast, Kedel K, op imod referencetræpillen benyttet til den komplette test jf. EN303-5.

| Træpiller | Partikelmasses-koncentration (mg/m ³) | BC-koncentration (mg/m ³) | Partikelantals-koncentration (#/cm ³) |
|------------------------------------|---|---------------------------------------|---|
| Reference; Task 6 mm ¹⁾ | 0,7 | 0,1 | 5,0 • 10 ⁷ |
| Verdo 8 mm Standard | 0,8 | 0,0 | 4,9 x 10 ⁷ |
| Verdo 8 mm Premium | 1,2 | 0,1 | 4,5 x 10 ⁷ |
| Task 8 mm | 1,3 | 0,0 | 4,6 x 10 ⁷ |
| Verdo 6 mm Premium | 9,6 | 0,1 | 3.89E+07 |

1) Data fra task 6mm er overført fra Kedel K prøve ved fuldlast fra TABEL 6

Kigges på FIGUR 19 er måleresultaterne for Verdo 8 mm Standard, Verdo 8 mm Premium og Task 8 mm ret sammenlignelige med hinanden med en gennemsnitlig partikelmassekoncentration (a) i området fra 0,8-1,3 mg/m³. Gennemsnitlig BC-koncentration (c) fra 0,04-0,06 mg/m³ og gennemsnitlig partikelantalskoncentration (b) fra 3,9-4,9 x 10⁷ #/cm³.

Kigges særskilt på Verdo 6 mm Premium adskiller den sig på især højere gennemsnitlig partikelmassekoncentration (9,6 mg/m³) og lidt lavere partikelantalskoncentration (3,9 x 10⁷ #/cm³). Grunden hertil er ukendt, men partikelmålingerne for denne træpille synes at vise samme tendens, hvad angår de målte CO-emissioner vist i TABEL 10 og FIGUR 18 (a), som et udtryk for ufuldstændig forbrænding modsat de øvrige træpiller i dette forsøg.



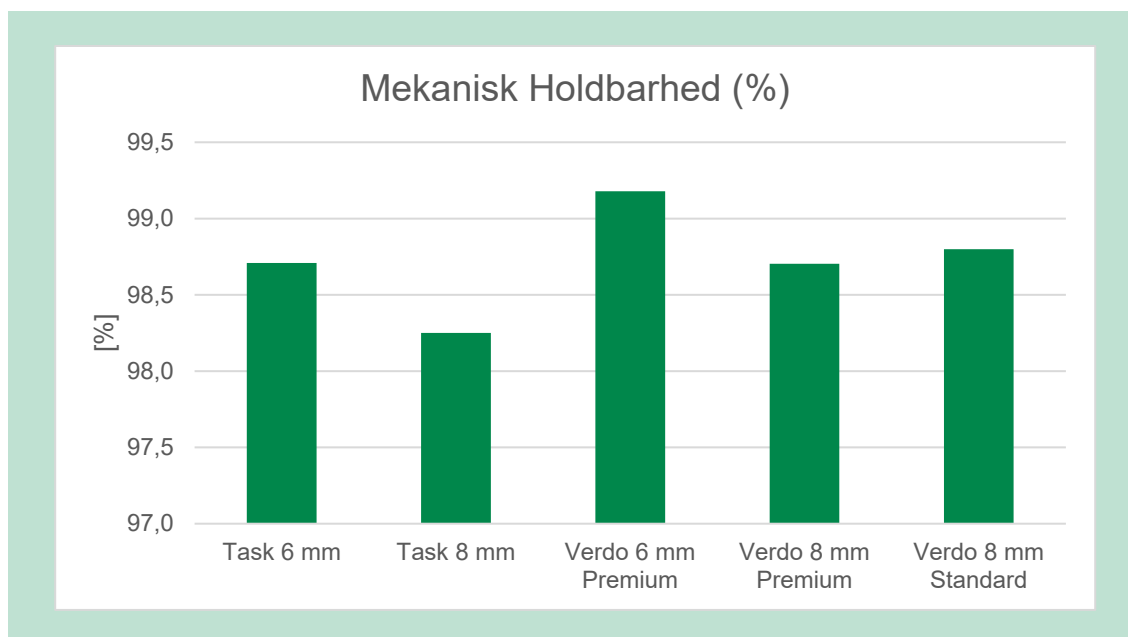
FIGUR 19. Variation of partikelmassekoncentration (a), partikelantalskoncentration (b) og BC-koncentration (c) af forskellige træpiller over 1,5 timers kørsel ved fuldlast, KSM-kedel.

Mekanisk holdbarhed

Den mekaniske holdbarhed for de 5 træpiller er vist i FIGUR 20. Det er en test for pressede pillers modstand mod stød og/eller slid som følge af håndtering og transport. En delprøve udsættes for kontrollerede stød ved kollision af piller mod hinanden og mod væggene i et specificeret roterende testkammer. Holdbarheden beregnes ud fra massen af delprøven efter adskillelse ved sigtning af partikler mindre end 3,15mm og massen af delprøven efter tumling.

Der er ikke en markant forskel i mellem de 5 forskellige træpiller. Verdo 6 mm Premium har en smule højere mekanisk holdbarhed og vil dermed forblive en smule mere intakte efter stød/håndtering.

Generelt ligger de alle indenfor et fornuftigt område og vil ikke gå i stykker ved håndtering eller frigive meget støv/små partikler ved hårde stød/håndtering. De små forskelle bør ikke lægge til grund for den store partikelantal- og -massekonzentrationsforskelle tidligere nævnt.



FIGUR 20. Mekanisk holdbarhed for de 5 træpiller. Som det ses, er der under 1% forskel mellem dem.

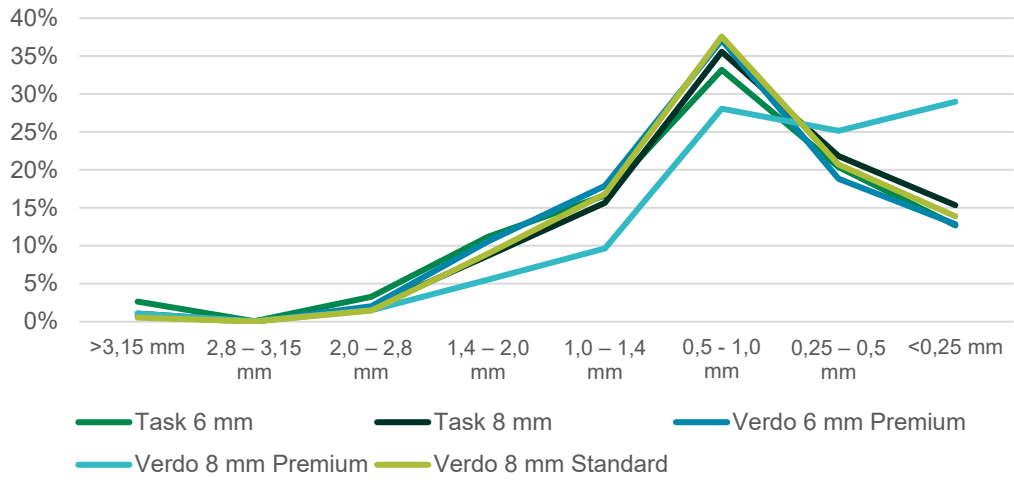
5.5.3 Opløste piller

Udover mekanisk holdbarhed er der også foretaget en test af partikelstørrelsesfordelingen af de 5 forskellige træpiller. I kraftværker med pulverbrænder til energiproduktion har operatørerne brug for information om partikelstørrelsesfordelingen af brændstoffet til optimering af partikeludbrænding under forbrænding. Udstyr til forberedelse af brændstof, såsom pulveriseringsmidler, bruges til at knuse piller til deres originale partikelstørrelse, fra før materialet blev presset til piller. Metoden er beregnet til at karakterisere partikelstørrelsesfordeling af materialet indeholdt i brændselspiller og tillader også en relativ sammenligning af piller fra forskellige producenter.

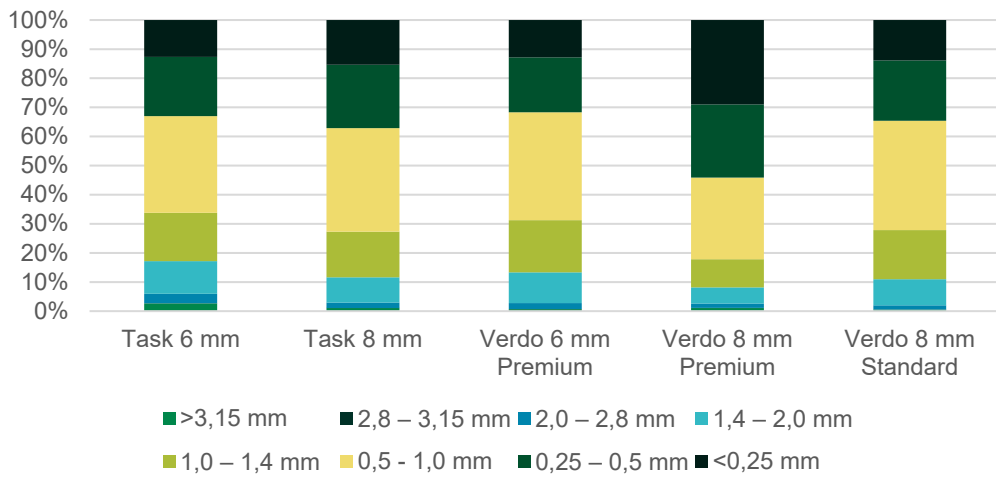
Partikelstørrelsesfordelingen bestemmes, efter at prøvepillerne er opløst i varmt vand og tørret i et varmeskab. Bestemmelsen udføres ved sigtning af det tørrede materiale i overensstemmelse med ISO 17827-2.

FIGUR 21 illustrerer at fire ud af de fem træpiller har en relativ ens partikelstørrelsesfordeling, hvor ca. 30-35 % er helt fint støv (<0,5 mm). Det er en fornuftig procentdel af de helt fine partikler. Verdo 8 mm premium skiller sig dog ud og har ca. 50 % helt fine partikler, hvilket er relativt højt. Ud fra forbrændingsresultaterne længere nede i afsnittet har det dog ikke den store konsekvens for Verdo 8mm Premium (ved første afvejning). For NY Verdo 8mm Premium forsøget vises dog en smule højere CO-emission som konsekvens af den højere effekt.

Partikelfordeling af opløste piller



Partikelfordeling af opløste piller



FIGUR 21. Fordelingen af partikler i de 5 opløste piller vist på to måder. Øverste figur viser de 8 størrelsesfordelinger hen ad X-aksen, mens de er summeret på de 5 træpiller på den nederste figur.

5.6 Delkonklusion for emissioner og forbedringer på kedler gennem udvikling

Kedel N (NBE)

To pillefyr-kedelprototyper, hhv. opbygget efter to-trins-forbrændings-princip og med røggasrecirkulering blev testet. Kedlen med to-trins-forbrænding har været gennem flere udviklingsiterationer, mens recirkuleringskedel N-R var en meget tidlig prototype.

Kedel N viste i ideal drift ret lave CO-, OGC-, NO- og støvemissioner, sammenlignet med målsætning i projektet. Dette resultat er dog overskygget af en ustabil forbrænding, der medfører kortvarige, betydelige overskud i ufuldstændig forbrændte stoffer (CO, OGC, og partikler). Disse spontane/kaotisk optrædende emissionsspidser er årsag til, at kedlen ikke overholder emissionskrav i gennemsnit over en længere periode (flere minutter til timer). Begge effekter – det lavere basisniveau og spidserne – ses især ved fuldlast. Der formodes, at kedlen virker som en konventionel pillefyr ved lavlast på grund af det højere luftoverskud, der bruges under disse driftsforhold. Umiddelbart anbefales at afklare årsagen til de kortvarige emissionsspidser, inden der udvikles videre i forbrændingsprincippet til et kommercielt produkt.

Anvendelse af røggasrecirkulering havde kun mindre effekt på de undersøgte emissioner (CO, OGC, NO). På baggrund af de indledende forsøg synes det ikke umiddelbart nødvendigt at forfølge teknologien videre for at opnå projektets emissions-målsætninger. Når røggasrecirkulering var i drift, var CO-emissionerne lidt højere, uden at opnå væsentlig lavere NO-emissionerne. En bedre forståelse af recirkulationsforhold (både mængde og placering af den recirkulerede røggas) kunne dog støtte en mulig videre udviklingsproces.

Kedel K (KSM)

KSM har igennem projektet udviklet en Kedel K, som har delvist kommercielt potentiale.

Kedel K har fået foretaget en komplet afprøvning efter EN303-5, hvilket vil sige 1x6 timer afprøvning i fuldlast (10,2 kW) og 1x6 timers afprøvning i lavlast (1,8 kW). Resultaterne heraf viser, at Kedel K lever op til emissionskravene sat i Ecodesign. Desuden viser et gennemsnit for de 6 støvprøver, foretaget under hver af de to laster, en reduktion på ca. 64% af støvkravene for Ecodesign på 40mg/m³ v/10% O₂. En rensecyklus under lavlastprøven påvirker imidlertid resultaterne markant, hvorfor kedlens potentiale i form af 2x4 bedste støvprøver giver en reduktion på op til 75% af kravene. For de øvrige emissions-parametre CO, OGC og NO_x viser resultaterne for Kedel K at overholde emissions-kravene.

Desuden viser online-målinger af partikelmassekoncentration og sort kulstofkoncentration en ret stabil kørsel fra start til slutning af 6-timers fuldlast og ved et lavere koncentrationsniveau sammenlignet med lavlast, hvilket er forventet. Imens målinger af partikelmassekoncentration og sort kulstofkoncentration (black carbon) under lavlast viste en tendens til at variere betydeligt mere. På den anden side viser fuldlast-kørslen en tendens til at generere et højere antal mindre partikler og derved en højere partikelantalskoncentration under fuldlast på grund af lavere tilgængelige koagulations-, absorptions- og kondensvask som beskrevet.

For Kedel K-R vedr. røggasrecirkulering er det ikke lykkedes at sænke NO_x-niveauet på over 30% opsat i projektmålsætningen. Dog overholder Kedel K stadig kravene i Ecodesign.

Træpilleforsøg Kedel K

Som konkluderet i afsnit 3 var der ingen direkte sammenhæng mellem de kemiske- og forbrændingsmæssige resultater med undtagelse af en klar korrelation mellem indholdet af NO kontra den udledte NO_x-emission. På baggrund af den information er der ikke udført yderligere undersøgelser af den kemiske sammensætning, men der er i stedet undersøgt forskellige træpillers mekaniske holdbarhed og partikelsammensætning og igen sammenholdt op imod de forbrændingsmæssige resultater på den endelige Kedel K med forgasningsteknologi.

For Verdo 6mm Premium adskiller forbrændingsresultaterne sig for denne træpille for de øvrige prøvede træpiller allerede efter ca. 20 minutter, hvor både CO og partikelmassekoncentrationen stiger ret markant. Herefter forbliver

niveauet højt, og kedlen kan ikke få emissionerne ned igen. Noget kan tyde på at der kan være sket en u hensigtsmæssig tilstopning af brænderen for denne type træpiller, til trods for at indkøring og selve testen er udført som de øvrige træpiller. For de forkerte afvejede 8mm træpiller (C, D, E) leverer kedlen relativt stabile og lave CO-emissioner ved reduceret ydelse, dog for støv-koncentrationen er niveauet højere end referencepillen primært pga. den lave CO₂ under disse kørsler. For de korrekte afvejede 8mm træpiller (C2, D2, E2) er forbrændingssystemet mere følsom overfor CO-emissionerne for to af de tre 8 mm træpiller, mens støvkoncentrationen synes meget ens for de tre og samtidig relativt tæt op af resultaterne fra fuldlasten fra Kedel K.

Testen for den mekaniske holdbarhed (test af hårdhed af træpillen) viste at de fem undersøgte træpiller alle lå indenfor $\pm 0,9\%$ -point. Den hårdst pressede træpille af de fem viste sig at være Verdo 6mm Premium, men dette bør ikke have en direkte sammenhæng med at de emissionsmæssige resultater for denne træpille var markant anderledes end de øvrige træpiller.

For partikelstørrelsesfordeling fra testen med de opløste piller viste fire ud af de fem træpiller en relativ ens partikelstørrelsesfordeling, hvor ca. 30-35 % er helt fint støv (<0,5 mm). Fra et analyseperspektiv er det en fornuftig procentdel af de helt fine partikler. Verdo 8 mm premium skiller sig dog ud og har ca. 50 % helt fine partikler, hvilket er til den høje side. Selvom Verdo 8mm Premium leverer de højeste emissioner af støv og CO (jf. TABEL 10) af de tre 8mm træpiller i forsøget er disse ikke markant anderledes end de to andre, hvorfor man heller ikke her entydigt kan konkludere, at partikelstørrelsesfordelingen for de pressede træpiller har stor indvirkning på forbrændingsresultaterne med dette forbrændingsprincip. Ej heller viser de online partikelmålinger udført under testen en markant forskel for denne træpille.

Under træpilleforsøget har det vist sig at dette systems snegl (snegl 1, vist i afsnit 5.4.1) spiller en stor rolle, når der tilføres større brændsel til forbrændingen. 8mm træpiller kræver op imod 58% længere indfødningstid end 6mm træpiller, da en stor del af strømmen går tabt på grund af stor modstand til snegl-motoren. Dette skal der tages højde for i kommende styringer og de interne afvejninger for at sikre, at kedlen kan levere den nødvendige effekt.

6. Formidlingsaktiviteter gennem projektperioden

Igennem projektperiode er der udført følgende formidlingsaktiviteter til offentligheden enten via medier eller fysiske præsentationer af projektet.

Medier;

- Præsenteret på Teknologisk Instituts Hjemmeside;
 - <https://www.teknologisk.dk/projekter/projekt-ecodesign-plus-boiler/40232cms.query=ecodesign>
- Delt via LinkedIn;
 - <https://www.teknologisk.dk/projekter/forgasning-i-mindre-kedler-skal-reducere-emissioner/41465?cms.query=ecodesign%2B>

Artikler;

- Projekt omtalt i FiB – Forskning i Bioenergi, Brint og Brændselsceller, nr. 88 december 2019;
 - <https://www.biopress.dk/PDF/forgasning-i-mindre-kedler-skal-reducere-emissionerne-og-haev-virkningsgraden>

Internationale præsentationer;

- Præsentation ved: *27th European Biomass Conference & Exhibition*, EUBCE, 27.-30. Maj 2019, Lissabon Portugal v/Anne Mette Frey (tidligere Projektleder, Teknologisk Institut)
- Præsentation ved: *6th Central European Biomass Conference*, CEBC, 22.-24. Januar 2020, Wien, Østrig v/René Lyngsø Hvidberg (Projektleder, Teknologisk Institut)

7. Referencer

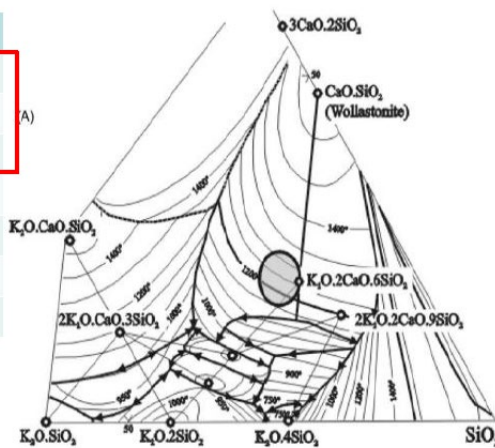
- [1] R. L. Hvidberg, J. S. Andersen, K. Vang, P. K. Sørensen, B. Eskerod, O. Hansen og S. N. Bertel, »LowCarbon Brændkammer – MUDP 1946,« 2017.
- [2] P. Glarborg, A. D. Jensen og J. E. Johnsson, »Fuel nitrogen conversion in solid fuel fired systems,« *Progress in Energy and Combustion Science*, årg. 29, p. 89–113, 2003.
- [3] J. Warnatz, U. Maas og R. W. Dibble, *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*, Springer, 2001.
- [4] Ø. Skreiberg, P. Glarborg, A. Jensen og K. Dam-Johansen, »Kinetic NO modelling and experimental results from single wood particle combustion,« *Fuel*, årg. 76, p. 671–682, 1997.
- [5] E. Houshfar, R. A. Khalil, T. Løvås og Ø. Skreiberg, »Enhanced NO_x Reduction by Combined Staged Air and Flue Gas Recirculation in Biomass Grate Combustion,« *Energy & Fuels*, årg. 26, p. 3003–3011, 4 2012.
- [6] J. P. Carroll, J. M. Finnan, F. Biedermann, T. Brunner og I. Obernberger, »Air staging to reduce emissions from energy crop combustion in small scale applications,« *Fuel*, årg. 155, p. 37–43, 9 2015.
- [7] H. Khodaei, F. Guzzomi, D. Patiño, B. Rashidian og G. H. Yeoh, »Air staging strategies in biomass combustion-gaseous and particulate emission reduction potentials,« *Fuel Processing Technology*, årg. 157, p. 29–41, 3 2017.
- [8] H. Wiinikka og R. Gebart, »The influence of air distribution rate on particle emissions in fixed bed combustion of biomass,« *Combustion Science and Technology*, årg. 177, p. 1747–1766, 9 2005.

Bilag 1. Askesmelte egenskaber

Aske smelter forskelligt alt afhængigt af mængden og sammensætning af uorganiske forbindelser, der er til stede. Især natrium, kalium, silicium, aluminium, calcium og magnesium spiller en stor rolle i dette. Som eksempel vises her to fasediagrammer, der også tydeliggør kompleksiteten. Det er velkendt, at det hyppigt er de samme typer metal ioner, man finder i de store støvpartikler, der måtte indeholde uorganiske komponenter, hvilket foreslår at forhold omkring slagge kunne tænkes at være interessant også i forhold til den uorganiske del af partiklerne der ses som en del af støvemissionerne.

HUSK KORREKT OPSÆTNING AF TO "BILLEDER"

| | træ | halm | kul | Smelt T |
|--------------------------------|-----|------|-----|---------|
| SiO ₂ | 17 | 56 | 53 | ↓ |
| CaO | 26 | 13 | 5 | ↑ |
| K ₂ O | 11 | 16 | 0,4 | ↓ |
| Na ₂ O | 1 | 2 | 0,5 | ↓ |
| MgO | 5 | 3 | 2 | ↑ |
| Al ₂ O ₃ | 5 | 4 | 29 | ↑ |
| Fe ₂ O ₃ | 1 | 2 | 4 | |



| | træ | halm | kul | Smelt T |
|--------------------------------|-----|------|-----|---------|
| SiO ₂ | 17 | 56 | 53 | ↓ |
| CaO | 26 | 13 | 5 | ↑ |
| K ₂ O | 11 | 16 | 0,4 | ↓ |
| Na ₂ O | 1 | 2 | 0,5 | ↓ |
| MgO | 5 | 3 | 2 | ↑ |
| Al ₂ O ₃ | 5 | 4 | 29 | ↑ |
| Fe ₂ O ₃ | 1 | 2 | 4 | |

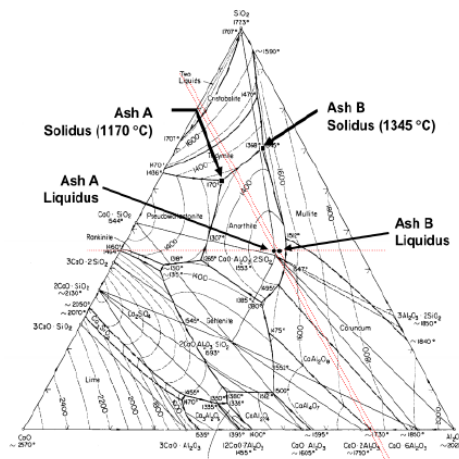
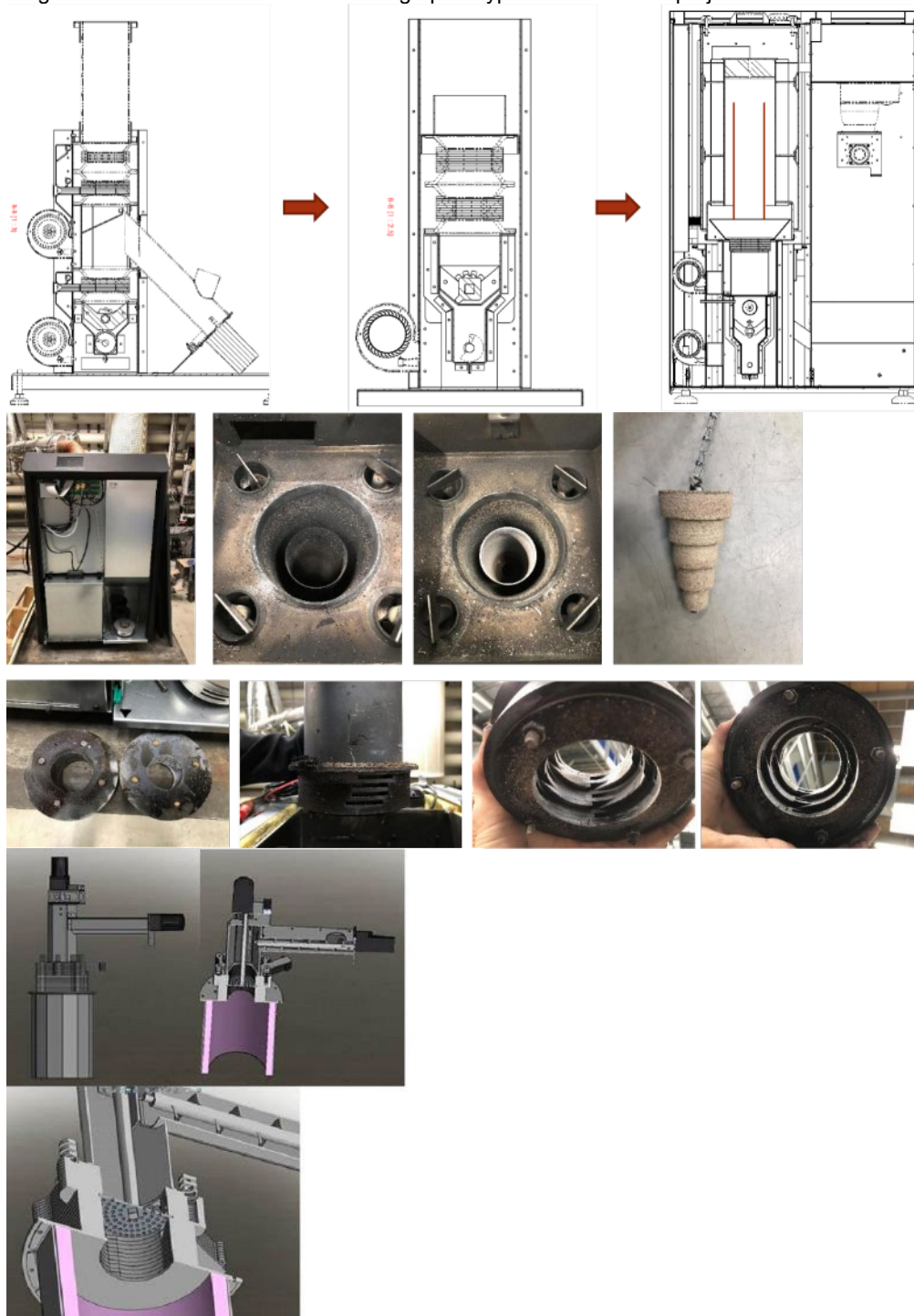


Fig. 8 : CaO-Al₂O₃-SiO₂ phase diagram.

[Tekst - Slet ikke efterfølgende linje, sektionsskifte]

Bilag 2. Prototyper NBE

Følgende billeder af udsnit af de forskellige prototyper NBE i løbet af projektet har leveret.



Bilag 3. Prototyper KSM



KSM-Stoker A/S

Næssundvej 440, DK-7960 Karby DK.

Tlf. +45 97761072 Fax. +45 97761372 Mobil. +45 20991072

Www.ksm-stoker.dk Email. Info@ksm-stoker.dk

CVR Nr: Dk32269648

Udvikling af KSM P-Line til at køre forbrænding i 2 trin med forgasnings princippet (horizontalt forgasningsprincip).

Vi har beklædt brænderen i top med en ildfast sten



Efterfølgende byggede vi en firkantet "skorsten", som flammen skulle op igennem for at afbrænde de sidste partikler.

Den blev hængt inde i inderrøret, og støtter ned på brænderen.



Man kan her se "skorstenen" den fra siden før brænderen er sat ind på plads.



"Skorstenen" gav det ikke den forventede effekt, og vi monterede derfor en lille sekundær blæser.



Monteringen af den sekundære blæser hjalp ikke det store. Vi kunne ikke få flammen og den tilførte luft til at blande sig, luftoverskuddet blev for stor.

Vi måtte finde en anden udformning på det sekundære forbrændingskammer.

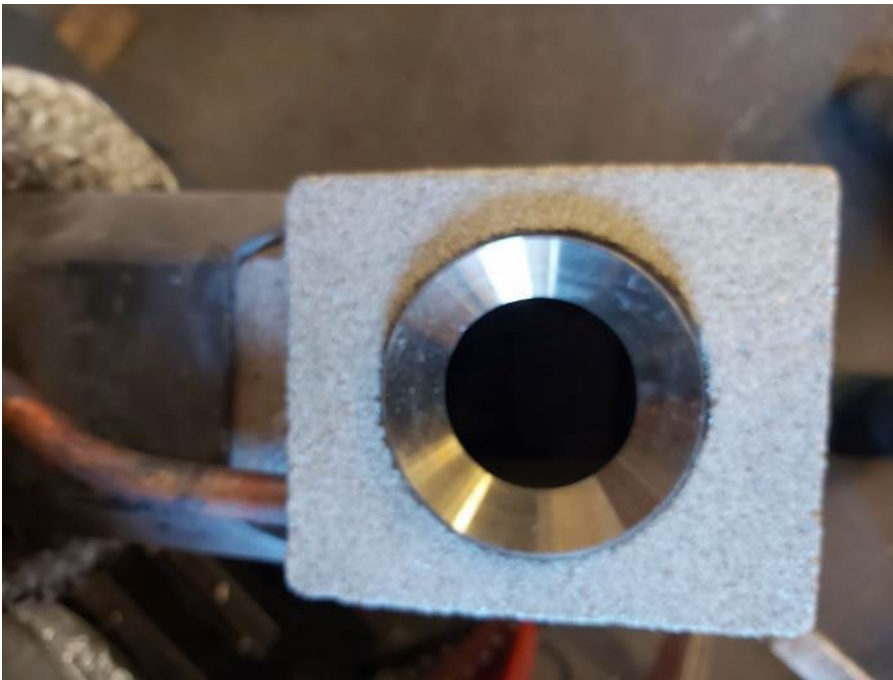
Vi fremstillede en form for venturi, for at blande den sekundære luft bedre med røggasserne



Venturien monterede vi i en blok, med luftkammer hele vejen rundt så vi kunne tilføre luft fra den sekundære blæser.



Herunder er venturinen placeret i den sekundære luftforsynings klods, kobberøret fra venstre, er den sekundære luftforsyning.



Hele arrangementet, sættes først ned på brænderen, når den er inde på plads. Og den vil være placeret, som på billedet herunder.



Vi har lavet mange test / forsøg og når det kører rigtigt godt, har vi en helt blå gas flamme, der står op af venturien. Men den oser hvis vi skruer den mere en op til 5-8kw, så næste forsøg er er en længere/højere venturi/forbrændingsrør.

Prototype 2+3 samlet med lodret forgasningsprincip



System set oppefra



Sekundærdyse monteret med højtryksblæser



Forskellige sekundærringe

EcoDesign + Boiler

Formålet med projektet er at udvikle to nye mindre ultra-lavemissionsbiomassekedler (<50 kW) med forgasningsteknologi og røggasrecirkulering til at reducere henholdsvis støv- og NOx-emissioner, samtidig med

at energieffektiviteten øges, således at disse kedler er klar til fremtidens strengere krav og kan blive en ny kedelgeneration. Det er lykkedes at fremstille en 10kW kedel med forgasningsteknologi, der potentielt reducerer støvemissioner op til 75% af Ecodesign 2020 krav.

Indlagt i projektet er også et træpilleanalysestudie bestående af både fysiske og kemiske analyser op imod træpillernes tilhørende forbrændingsegenskaber for at finde eventuelle sammenhænge. Her ses blandt andet en tydelig korrelation mellem nitrogenindholdet og den udledte NOx fra de forskellige træpiller.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk