



SHREK: Sekundær højeffektiv reduktion af emission fra kedler

MUDP Rapport

September 2021

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Thomas Nørregaard Jensen, Teknologisk Institut
Quynh Thu Nguyen, Teknologisk Institut
Torben Nørregaard Jensen, Teknologisk Institut
Anders Pødenphant, Teknologisk Institut
Per Holm Hansen, PHX innovation (herefter PHX)
Bjarke Borup Vinther, Scandtec
Jannich Hansen, NBE Production (herefter NBE)

Fotos:

Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-7038-343-1

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

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1.	Forord	5
2.	Ordforklaring	6
3.	Sammenfatning og konklusion	7
4.	Summary and conclusion	9
5.	Introduktion	11
5.1	Emissioner fra kedler og deres regulering	11
5.2	Projektets formål	12
5.3	Projektets udførelse	12
6.	Udvalgte kedler	13
6.1	NBE	13
6.1.1	Ready To Burn® 16 Phoenix	13
6.1.2	RTB 16 Phoenix kondens	14
6.2	Scandtec	15
6.2.1	Kedlen og brænderen	15
7.	Analysemetoder	19
7.1	Forsøgsopstilling	19
7.2	Gravimetrisk støvmåling og partikelmåling	19
7.2.1	Gravimetrisk støvmåling	19
7.2.2	Partikelmasse med DustTrak DRX	20
7.2.3	Partikelantal med NanoScan SMPS	20
7.2.4	Black carbon med aethalometer	20
7.3	Gasmåling	20
8.	Udvikling af elektrostatisk filter	21
8.1	Udvikling af elektrostatisk filter for pillekedler op til 25 kW	21
8.2	Udviklingsmålinger hos PHX	23
9.	Evaluering af elektrostatisk filter i laboratoriet	24
9.1	Indledning	24
9.2	NBE-kedler	24
9.3	Scandtec-kedel	25
9.4	Stresstest efter drift hos privat bruger	26
9.5	Variation af tempo efter drift hos privat bruger	27
10.	Evaluering af elektrostatisk filter hos privat bruger	29
10.1	Beskrivelse af kedlen hos privat bruger	29
10.2	Forsøgsopstilling	29
10.3	Resultater ved montering af elektrostatisk filter	30
10.4	Resultater fra laboratorietest efter drift hos bruger	31
10.4.1	Sammenligning af snavset og rensed filter	32

10.4.2	Før og efter drift hos brugeren	32
10.5	Brugererfaringer	33
10.5.1	Event log	36
10.5.2	Øvrige erfaringer	36
10.5.3	Konklusion	36

1. Forord

Denne projektrapport afslutter projektet 'SHREK: Sekundær højeffektiv rensning af emissioner fra kedler' under Miljøstyrelsens tilskudsordning Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP). Projektet er gennemført i perioden fra marts 2019 til maj 2021 med det overordnede formål at udvikle, implementere og evaluere elektrostatisk filterteknologi til rensning af røg fra biomassekedler.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem PHX, Scandtec, NBE og Teknologisk Institut. Rapporten giver et samlet overblik over det arbejde, der er udført i løbet af projektet, og over de væsentligste udfordringer, resultater og konklusioner.

Teknologisk Institut

Aarhus, juni 2021

2. Ordforklaring

Nedenfor er vist en kort oversigt over forkortelser, som anvendes i denne rapport.

Forkortelse	Engelsk betegnelse	Dansk betegnelse
BC	Black carbon	-
CO	Carbon monoxide	Kulmonoxid
CO ₂	Carbon dioxide	Kuldioxid
CPC	Condensation particle counter	-
ESP	Electrostatic precipitator	Elektrostatisk filter
NO _x	Nitrous gases (sum of NO and NO ₂)	Nitrøse gasser (NO+NO ₂)
OGC	Organic gasous compounds	Organiske gasser
PM	Particulate Matter	Partikulært materiale
PN	Particle Number Concentration	Partikelantalskoncentration
RDMA	Radial Differential Mobility Analyser	-
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer	-

3. Sammenfatning og konklusion

Afbrænding af træ er en billig energikilde med lav CO₂-udledning, men afbrændingen giver anledning til partikelemissioner og udgør dermed en signifikant bidragsyder til den samlede luftforurening. Derfor har producenter af biomassekedler de seneste 30-40 år arbejdet ihærdigt på at udvikle mere miljøvenlige og energieffektive kedler, og emissionerne fra kedlerne er nu bragt på så lavt et niveau, at det i praksis er vanskeligt at reducere dem yderligere – i det mindste ved hjælp af primære reduktionsmetoder. I nærværende projekt er målet at anvende sekundære reduktionsmetoder til at reducere emissionerne fra kedler mere end nogensinde før.

Målet med projektet er at reducere luftforureningen fra biomassefyrede kedler markant med særligt fokus på partikelforurening ved anvendelse af elektrostatisk filterteknologi. Mere specifikt er formålet at reducere partikelforureningen fra biomassekedler med mindst 90 % i typeprøvning og mindst 50 % under real life-test i forhold til de strengeste gældende krav på 20 mg/m³. Dette gælder ikke kun med hensyn til den traditionelle vægtangivelse, men måske mere interessant med hensyn til reduktionen i antallet af partikler, og dermed i antallet af de ultrafine partikler, som gældende standard ikke tager hensyn til, selvom forskning indikerer, at det er denne parameter, der er mest sundhedsskadelig. Projektets succeskriterier er dermed at reducere både partikelantal og partikelmasse med 90 % i typeprøvning henholdsvis 50 % i real life-test. For partikelmassen er succeskriteriet dermed at komme under 2 mg/m³ i typeprøvning og 10 mg/m³ i real life-test.

Projektet blev gennemført i perioden fra marts 2019 til maj 2021. For at sikre det optimale udgangspunkt før montering af et elektrostatisk filter arbejdede NBE og Scandtec indledningsvis på udvælgelsen af relevante kedler og undersøgte i samarbejde med Teknologisk Institut, hvilke primære forbedringer der kunne udføres på de udvalgte kedler. Sideløbende med producenternes arbejde, fokuserede PHX på videreudvikling af det elektrostatiske filter, som PHX allerede havde udviklet til røgrensning på brændeovne. Det var et udfordrende forløb at videreudvikle teknologien til at kunne fungere på kedler, men det lykkedes i meget høj grad.

Det udviklede elektrostatiske filter blev evalueret på en ikke-kondenserende kedel fra Scandtec (TPK HS20 21,8 kW) og på to kedler fra NBE: en kondenserende (Phoenix V16, 12 kW) og en ikke-kondenserende (Phoenix RTB, 16 kW). Yderligere laboratorieundersøgelser under realistiske forhold blev udført på den ikke-kondenserende kedel fra Scandtec (TPK HS20 21,8 kW), da kedlen hos den private bruger ligeledes er af den ikke-kondenserende type (HS Tarm Multi Heat). Testene omfattede en stresstest og en simulering af sommer- og vinterbrug.

For de tre testede kedler var partikelreduktionen generelt set over 96 % – målt på både partikelantal og partikelmasse. Med tændt filter kunne partikelmassen ikke detekteres med den gravimetriske metode, hvor detektionsgrænsen er 5 mg/m³, men med laserdiffraktion blev koncentrationen målt til under 1 mg/m³. Kun i de tilfælde, hvor partikelemissionen i forvejen var lav, var filterets effektivitet under 96 % - som forventet er effektiviteten højest, når partikelemissionen i udgangspunktet er højt (dvs. at der er partikler at fjerne).

Til real life-testen af det elektrostatiske filter anvendtes en ældre kedel - en Multi Heat 1,5. Denne kedel blev i sin tid skabt til forbrænding af koks og kul i starten af 90'erne. I slutningen af 90'erne blev kedlerne tilrettet med – for den tid – meget moderne elektroniske styringer og

flere forskellige produktionsmæssige forbedringer. I begyndelsen af måleperioden var effektivitetsværdierne for det tændte ESP-filter høje (94 % for partikelmassekoncentrationen og 90 % for partikelantalskoncentrationen). Målekampagnen varede i 3,5 måned, og undervejs blev selvrensingsfrekvensen af filteret reduceret efter ønske fra brugeren, da den automatiske rensfunktion på prototypen afgiver støj. Selvrensingsfrekvensen blev reduceret fra hver 8. time til 1 gang dagligt. Da rensfrekvensen var nedsat, havde filteret på tidspunktet for de afsluttende målinger hos brugeren ikke kørt automatisk rensfunktion i 3 dage. Dette viste sig at have en negativ indflydelse på effektiviteten, som efter 3,5 måneders drift var faldet til hhv. 70 % for partikelmassekoncentrationen og 38 % for partikelantalskoncentrationen.

Det viste sig dog nemt at rense filteret. Da den automatiske selvrensning blev reaktiveret, blev filteret således stort set rent igen, hvorefter effektiviteten blev målt til mindst 93 % for partikelmassekoncentrationen og mindst 95 % for partikelantalskoncentrationen. Målekampagnen hos den private bruger bekræftede således, at én daglig rensning af filteret ikke er tilstrækkeligt for at opretholde en høj effektivitet, hvorimod rensning hver 8. time er tilstrækkeligt. PHX gennemgår nu en proces omkring produktionsoptimering med henblik på at reducere produktionsprisen, og PHX forventer, at filteret er klar til markedet første halvår i 2022.

Hvis den største miljømæssige effekt af elektrostatiske filtre skal opnås, vil en tilgang i produktudviklingen med en add-on-løsning være den mest hensigtsmæssige. Det vil sige en tilgang med fokus på filtre, som ikke er indbygget i produktet, og som ikke er direkte afhængige af teknologi indbygget i kedlen. Herved vil filtrene kunne anvendes på det betydelige antal allerede installerede kedler. Ud fra en rent produktstrategisk betragtning vil det ligeledes være mest hensigtsmæssigt at disse filtre udgør særskilte enheder, hvorved produktsortimentet kan indskrænkes til produkter uden filtre – forudsat naturligvis, at der ikke findes en ultimativ lovgivning på området.

Nærværende projekts undersøgelser fremviser elektrostatiske filterteknologi som en god mulighed for at forbedre støvemissionerne fra biomassekedler – en forbedring, som det vil være meget vanskeligt at opnå alene ved optimering af de basale kedler og brændere. Men som med så mange andre fremskridt drives udviklingen kun trængt af idealisme.

NBE har imidlertid valgt den tilgang til projektet, at et eventuelt elektrostatiske filter bør indbygges i kedlen, hvilket dels vil reducere omkostningerne til teknologien, dels give mulighed for rensning sammen med kedlens indbyggede rensmekanisme. NBE ser et klart potentiale i et elektrostatiske filter, hvis de nuværende krav til partikeludledning strammes så meget, at det bliver svært at opfylde kravene uden decideret røgrønsning.

Så længe der ikke indføres strengere krav via lovgivning – eventuelt med hensyn til både masse og antal af partikler – så vil udbredelsen af teknologien blive langvarig og især være afhængig af slutbrugerens omkostning til etablering af filterteknologien. Ses isoleret på det danske marked, har efterspørgslen efter de billige produkter taget fart over de seneste 10 år, samtidig med at markedet i løbet af de seneste 5 år har været kraftigt faldende.

Denne udvikling giver ikke større håb for evnen/viljen til at investere ud over det nødvendige. P.t. synes det mest sandsynligt, at udviklingen på området vil skulle drives uden for Danmarks grænser. Andre lande i Europa stiller efterhånden strengere krav til emissioner – oftest drevet med guleroden og ikke med pisk. Således ydes der i flere lande tilskud til indkøb af de produkter, som lever op til de strenge krav, mens produkter, der ikke lever op til kravene, langsomt udfases, fordi salget bortfalder uden dette tilskud.

4. Summary and conclusion

Burning wood is an inexpensive source of energy with a low CO₂ discharge, but the combustion of wood results in particle emissions that significantly contribute to air pollution. Therefore, the manufacturers of biomass boilers have over the past 30-40 years made energetic attempts to develop more environmentally friendly and energy efficient boilers. Boiler emissions have now reached a very low level, which in practice is difficult to reduce further – at least, by means of primary reduction methods. In this project, the objective is to use secondary reduction methods to reduce boiler emissions more than ever.

The objective of this project is to significantly reduce air pollution from biomass boilers with special focus on particle pollution by using electrostatic precipitators (particle filter technology). More specifically, the objective is to reduce particle pollution from biomass boilers by at least 90% through type testing and at least 50% through real life testing relative to the strict requirement of 20 mg/m³. That not only concerns the traditional declaration of weight, but perhaps to a greater extent the reduction in particle numbers and thus the number of ultrafine particles. That has not been considered in the current standard, although research indicates that ultrafine particles constitute the most health hazardous parameter. Therefore, the success criterion of this project is to reduce particle number and particle mass by 90% through type testing and 50% through real life testing. For particle mass, the success criterion is less than 2 mg/m³ through type testing and 10 mg/m³ through real life testing.

The project was carried out from March 2019 till May 2021. In order to ensure an optimum starting point before mounting the electrostatic precipitator, NBE Production and Scandtec first had to consider which relevant boilers they wanted to use, and in cooperation with Danish Technological Institute they investigated which improvements could be carried out on the chosen boilers. Concurrently with the work of the manufacturers, PHX innovation focused on the further development of the electrostatic precipitator, which PHX innovation already had developed for smoke purification on solid fuel stoves. It was very challenging to further develop the technology so it could function on boilers, but the challenge paid off.

The developed electrostatic precipitator was evaluated on a non-condensing boiler from Scandtec (TPK HS20 21.8 kW) and on two boilers from NBE: a condensing boiler (Phoenix V16, 12 kW) and a non-condensing boiler (Phoenix RTB, 16 kW). Further laboratory studies under realistic conditions were carried out on the non-condensing boiler from Scandtec (TPK HS20 21.8 kW), as the private customer also has a non-condensing boiler (HS Tarm Multi Heat). The tests comprise a stress test and a simulation of summer and winter consumption.

In general, the particle reduction of the three tested boilers amounted to more than 96% - measured on particle number and particle mass. When the precipitator was switched on, the particle mass could not be detected with the gravimetric method where the detection limit is 5 mg/m³, but with laser diffraction the concentration was measured to less than 1 mg/m³. In cases where the particle emission already was low, the efficiency of the filter was below 96% - as expected, efficiency is highest when the particle emission is high (i.e., particles have to be removed).

An older boiler was used for the real-life test of the electrostatic precipitator - a Multi Heat 1.5. At the beginning of the 1990s, the boiler was made for the combustion of coke and coal. At the end of the 1990s, the boilers were modified with up-to-date electronic controls of the time and various improvements related to production. At the beginning of the measuring period, the effi-

ciency values of the running electronic precipitator (ESP filter) were very high (94% for the particle mass concentration and 90% for the particle number concentration). The measurement campaign took 3.5 months, and during that period the self-cleaning frequency of the filter was reduced as the customer found the automatic cleaning function of the prototype very noisy. Due to the reduced cleaning frequency, the automatic cleaning function of the filter had not been in operation for 3 days when the final measurements were carried out at the location of the private customer. That had a negative impact on efficiency, and after 3.5 months the particle mass concentration had declined to 70% and the particle number concentration had declined to 38%.

However, it turned out that it was easy to clean the filter. Reactivation of the automatic self-cleaning function by and large cleaned the filter, and then the efficiency was measured to at least 93% for the particle mass concentration and at least 95% for the particle number concentration. The measurement campaign at the private consumer confirmed that regular filter cleaning is necessary to maintain high efficiency. PHX is now working on optimising the production process to reduce the production costs. PHX expects that the filter will be ready for the market during the first six months of 2022.

If the greatest environmental effect of an electrostatic precipitator is to be obtained, then the appropriate approach would be to utilize an add-on solution in product development. That means an approach focussing on filters that are not incorporated in the product and that is not directly dependent on the technology incorporated in the boiler. That would make it possible to use the precipitators on the considerable number of boilers that have already been installed. From a pure manufacturing point of view, it would also be more appropriate if the precipitators were individual units. Then the product range could be reduced to products without filters – of course, provided that no ultimate legislation exists in the field.

Studies in this project show that electrostatic filter technology could improve dust emissions from biomass boilers – an improvement that is very difficult to obtain solely through the optimisation of basic boilers and stoves. However, as in the case of many types of progress, development is slow when driven by idealism.

Meanwhile, in this project, NBE has chosen an approach that incorporates a possible electrostatic precipitator in the boiler. That would reduce technology costs and also permit cleaning together with the boiler's built-in cleaning mechanism. NBE believes that an electronic precipitator has potential if the current demands to particle emissions are tightened considerably making it difficult to meet the requirements without actual smoke purification.

As long as stricter requirements are not implemented through legislation – perhaps with regard to mass and number of particles – the dissemination of the technology will become protracted and especially depend on the end-user's initial costs for filter technology. Viewed separately, the demand for inexpensive products has increased considerably on the Danish market in the past 10 years, and at the same time the market has declined considerably in the past 5 years.

That development is not promising for the ability/desire to invest beyond the necessary.

Currently, it seems most likely that development in this area will take place outside of Denmark. Gradually, other countries in Europe are placing heavy demands on emissions – often with a carrot instead of a stick. Several countries subsidize products that meet heavy demands, whereas products that do not meet the demands are slowly phased-out because sales drop without subsidies.

5. Introduktion

5.1 Emissioner fra kedler og deres regulering

Afbrænding af træ er CO₂-udledningsneutral, da træ optager samme mængde CO₂, når det vokser, som når det forbrændes eller ligger i træbunden og rådner, men afbrændingen giver samtidig anledning til partikelemissioner og udgør dermed en signifikant bidragsyder til den samlede luftforurening. Derfor har producenter af biomassekedler de sidste 30-40 år arbejdet ihærdigt på at udvikle mere miljøvenlige og energieffektive kedler, og emissionerne fra kedlerne er nu bragt på så lavt et niveau, at det i praksis er vanskeligt at reducere dem yderligere – i det mindste ved hjælp af primære reduktionsmetoder. I nærværende projekt er målet at anvende sekundære reduktionsmetoder til at reducere emissionerne fra kedler mere end nogensinde før.

Udover at kedlerne har fået renere forbrænding, er de også blevet langt mere effektive. De er desuden blevet meget enklere at betjene og vedligeholde. De fleste kedler har i dag automatisk tænding og indbygget udstyr til automatisk rensning af brænder- og konvektionsdel. Nogle har derudover automatisk askeudmadning (fjernelse af asken). Derudover fås der udstyr til automatisk indblæsning, som kan fylde piller fra et fjernlager på kedlens pilletank. Samlet set er den nødvendige daglige betjening af kedlerne således reduceret til et minimum i forhold til tidligere, og kedlerne kræver efterhånden ikke meget mere pasningstid end et oliefyr.

Samtidig er kWh-prisen ca. halvdelen af kWh-prisen for et oliefyr, så pille fyrene er et særdeles attraktivt alternativ til oliefyr og derfor også meget udbredt.

På europæisk plan finder 49 % af træafbrændingen sted i brændeovne og kedler¹ i private hjem. Et studie fra 2011 viser, at partikelforureningen fra træafbrænding i en fyringssæson i en mindre by i Sydtykland udgjorde 57 % af den samlede lokale PM10-emission.² Så selvom emissionerne fra kedlerne er på vej nedad, er det stadig aktuelt at udvikle nye løsninger for at gøre kedlerne endnu mere miljøvenlige. I Danmark vurderes der at være ca. 130.000 eksisterende biomassekedler³, hvorfor det er essentielt for udbredelsen af en ny teknologisk løsning, at den kan eftermonteres på eksisterende kedler.

I EU er biomassekedler underlagt de gældende krav i Ecodesignforordningen (L 193/114), som trådte i kraft januar 2020. Kravene gælder CO, NO_x, OGC, og partikelgrænseværdierne er angivet som årsemissioner og beregnes/vægtes på baggrund af emissioner målt under fuld- og lavlastydelse. Vægtningen baseres på 20 % fuldlast og 80 % lavlast, og der differentieres mellem manuelt og automatisk fyrede kedler. Derudover findes der nationale tilskudsordninger med formålet at reducere emissionerne yderligere.

Projektet har fokus på klargøring af udvalgte kedler til integration af et i projektet nyudviklet elektrostatisk filter. Med en kedel med integreret partikelreduktionsløsning vil partnerne i projektet blive *first movers* og få adgang til et større europæisk marked.

¹ Biomass for Heat Statistical Report 2020, Bioenergy Europe

² Paur, H.R., Bologna, A., Ecker, M. & Rheinheimer, H.P., 2014 Int. Aerosol Conf.: Control of ultrafine particle emissions from small-scale wood combustion boilers by optimized combustion and electrostatic precipitation

³ Ea Energianalyse for Energistyrelsen: "Det danske træpillemarked 2018", oktober 2019

5.2 Projektets formål

Formålet med nærværende projekt er at reducere luftforureningen fra biomassefyrede kedler markant med særligt fokus på partikelforurening ved anvendelse af elektrostatisk filter-teknologi. Mere specifikt er formålet at reducere partikelforureningen fra biomassekedler med mindst 90 % i typeprøvning og mindst 50 % under real life-test i forhold til de strengeste gældende krav på 20 mg/m³. Projektets succeskriterier er dermed at reducere støvemissionen til under 2 mg/m³ i typeprøvning og 10 mg/m³ i real life-test.

5.3 Projektets udførelse

Projektet blev gennemført i perioden fra marts 2019 til maj 2021 med en projektførelse på tre måneder grundet COVID-19-restriktioner. I de følgende kapitler beskrives det udførte arbejde i projektet fra udvælgelsen af kedler til udvikling og test af det udviklede elektrostatiske filter i laboratoriet og hos en privat bruger.

For at sikre det optimale udgangspunkt før montering af et elektrostatisk filter arbejdede NBE og Scandtec indledningsvist på udvælgelsen af relevante kedler og undersøgte i samarbejde med Teknologisk Institut, hvilke primære forbedringer der kunne udføres på de udvalgte kedler. Sideløbende med producenterens arbejde fokuserede PHX på videreudvikling af det elektrostatiske filter, som PHX allerede havde udviklet til røgrensning på brændeovne. Det var et udfordrende forløb at videreudvikle teknologien til anvendelse på kedler, men det lykkedes i høj grad. Dette arbejde er nærmere beskrevet i Kapitel 8. Endelig blev effektiviteten af filteret evalueret ved typeprøvning i laboratoriet (Kapitel 9) samt hos en privat bruger (Kapitel 10).

6. Udvalgte kedler

6.1 NBE

NBE Production A/S er markedsførende inden for produktion af træpillefyr/stokere og har således mere end 100.000 anlæg i drift i det meste af verden. Vi arbejder konstant på at forbedre vores kunders oplevelser via innovativ tænkning og anvendelse af den seneste nye teknologi.

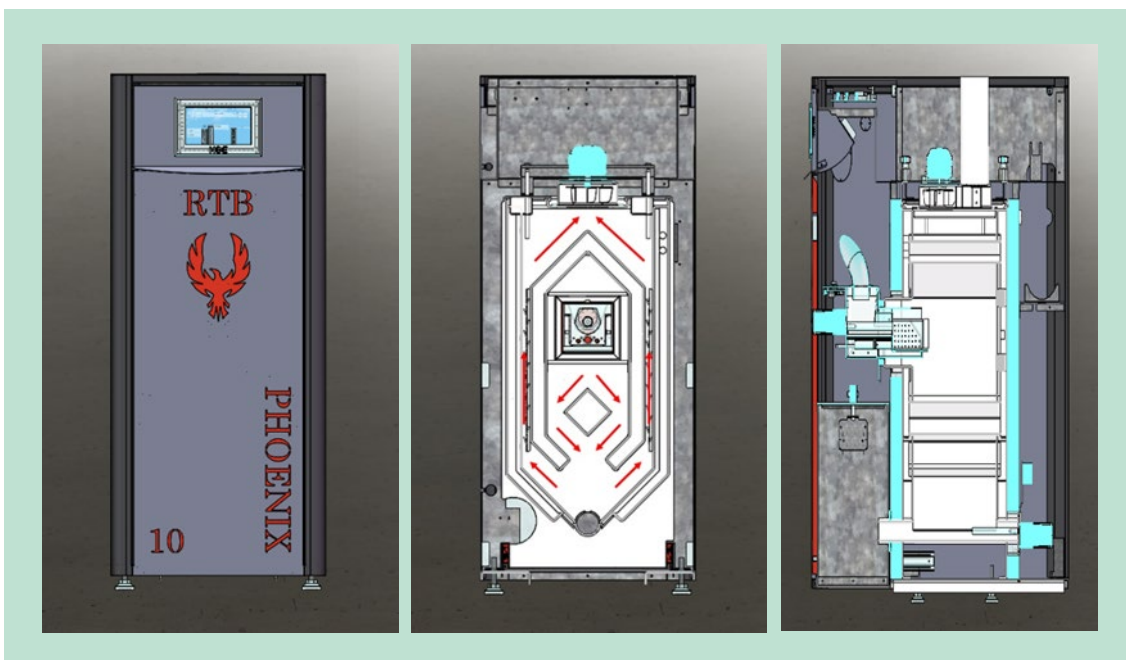
Det skal være nemt, bekvemt og økonomisk fordelagtigt at købe og eje et NBE-produkt. Derfor skal vores produkter, herunder online koncepter, være de absolut bedste og samtidig mest innovative på det globale marked for træpillefyr til privatmarkedet og små- og mellemstore virksomheder/institutioner.

6.1.1 Ready To Burn® 16 Phoenix

RTB 16 har en meget høj effektivitet og samtidig en forholdsvis lav røgtemperatur. Det stiller relativt højere krav til skorstenen når der skal opnås en optimal drift. Skorstene med dårligt træk kan bl.a. have tendens til kondensering ved lave røgtemperaturer. Røgsuger kan i flere situationer være en billig løsning når der skal korrigeres for en ineffektiv skorsten.

NBE har derfor introduceret RTB PHOENIX hvor røgsuger er indbygget i kedlen og ved hjælp af en sensor måles på og tilpasses skorstenens undertryk. Flowmåler og iltstyring er standard i RTB Fumus og sikrer en løbende tilpasning af hhv. blæserhastighed og kalibrering af det nødvendige indtag af piller. Såvel flowmåling og iltstyring giver en forbedret drift henover årets forskelle i varmebehov.

RTB 16 Phoenix er en standardkedel i modelserien 10-100 kW. Den har indbygget røgsuger med undertryksmåling, iltstyring og luftmassemåler, der sikrer en optimal forbrænding under alle tænkelige forhold. Desuden er kedlerne bygget med kompressorens og askeudmadning, hvilket giver særdeles lange rensintervaller, hvilket vil sige, at askeskuffen skal tømmes et par gange årligt og brænderen renses én gang årligt.

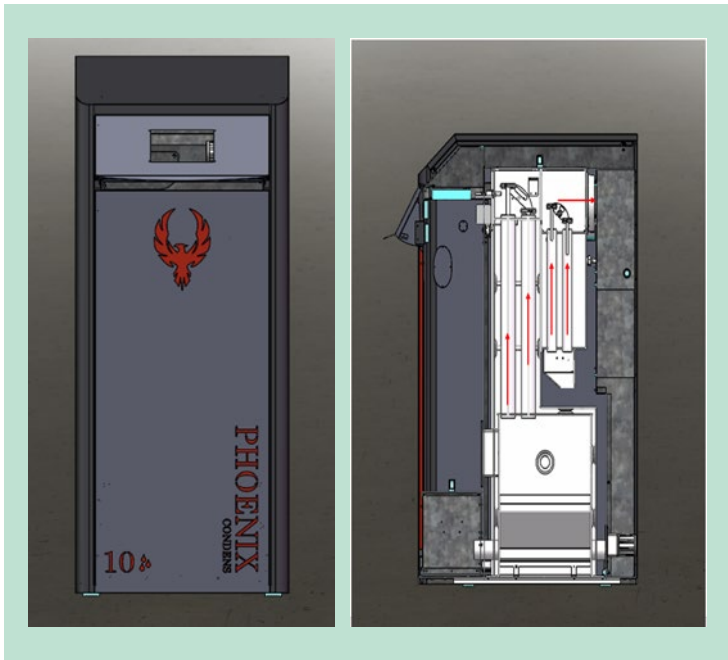


FIGUR 1. Oversigtskitser af RTB 16 Phoenix.

6.1.2 RTB 16 Phoenix kondens

RTB 16 Phoenix kondens er en prototypekedel på 16 kW. Kedlen adskiller sig væsentligt ved at være udstyret med en kondenskøler i rustfrit stål, der sænker røgtemperaturen til under dugpunktet, hvorfor røggassen kondenserer. Der trækkes på den måde mere energi ud af røggassen og derved opnås en forbedring af virkningsgraden, på op til 5-10%, i forhold til ikke kondenserende drift.

RTB 16 Phoenix kondens har ligesom standardkedlen indbygget røgsuger med undertryksmålning, iltstyring og luftmassemåler, som sikrer en optimal forbrænding under alle tænkelige forhold. Desuden er den monteret med kompressorrens og askeudmadning, hvilket giver særdeles lange rensintervaller.



FIGUR 2. Oversigtsskitser af RTB 16 Phoenix kondens.

6.2 Scandtec

TPK HS20 kedlen, der i dette projekt er blevet brugt i forbindelse med laboratorieforsøgene med det elektrostatiske filter, er udviklet med flere formål for øje:

- Prismæssigt i den nedre ende uden at gå på kompromis med Scandtec/HS Tarms sædvanlige, høje kvalitetskrav
- Lille fodaftryk, dvs. at kedlen skal være kompakt
- Enkel at vedligeholde, dvs. at alle komponenter skal være let tilgængelige for vedligehold og service
- Løs pillebrænder med så få bevægelige dele som muligt
- Eksternt magasin – valgfrihed efter behov
- Skal minimum leve op til klasse 5 i EN303-5:2012
- Tilstræbes at komme på den tyske BAFA-liste – og således overholde de skrappeste krav i Europa med hensyn til emissioner (kravene fordrer anvendelse af iltstyring).

Udviklingen af kedlen ligger tidsmæssigt flere år tilbage – produktet kom på markedet i efteråret 2015. Selve kedlen blev i originalformen introduceret med en anden indkøbt brænder helt tilbage i 2009. Sammen med udviklingen af den særskilte pillebrænder HS20 blev der foretaget mindre tilretninger på kedlen, ikke kun af hensyn til minimering af strålingstabet, men også for at muliggøre forskelligt add-on-udstyr såsom iltstyring og automatisk askeudtag.

Udviklingsprojektet strakte sig tidsmæssigt over 2 år, idet der i samme omgang blev introduceret en ny styringsplatform, hvortil der skulle udformes en tilpasset software. Gennem udviklingsforløbet blev mange tiltag afprøvet, ombygget og genprøvet, indtil det syntes sandsynligt, at alle projektets formål kunne blive opfyldt.

Hertil har HS Tarms eget veludstyrede prøvningslaboratorie været en stor hjælp. I dette laboratorium kan kedler testes med hensyn til virkningsgrad og emissioner (CO₂, CO, OGC, NO_x og støv) i ydelsesområdet 1-100 kW med basis i sporbart kalibrerede måleinstrumenter (masse, temperatur, flow, prøvegasser).

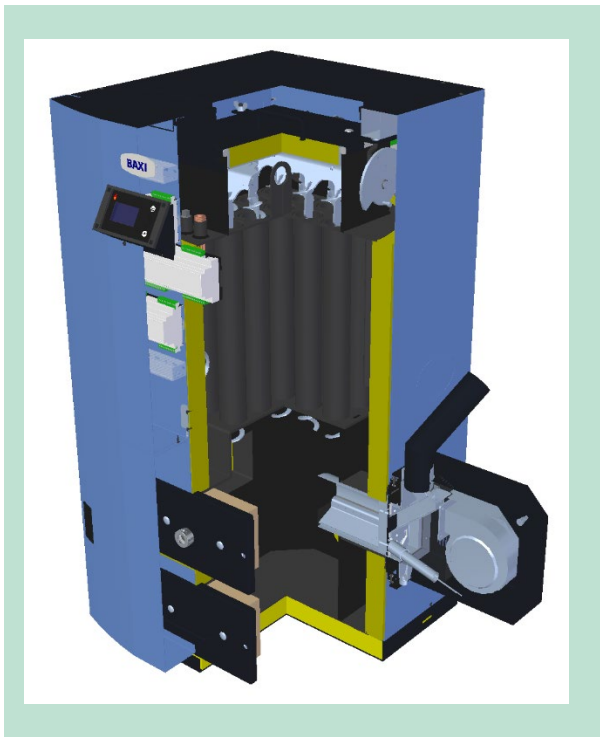
6.2.1 Kedlen og brænderen

TPK-kedlen (**Træ-Pille-Kedel**) blev udviklet i 2008-2009 med udgangspunkt i at skabe et produkt, der fyldte så lidt som muligt, og som kunne sælges for langt lavere pris end de eksisterende produkter.

Kedlen skulle være simpel at producere. Derfor blev der valgt en rund grundform, der kunne produceres med så få stæg (afstivninger) som muligt. For at gøre kedlen kompakt blev det valgt at placere rørvarmeveksleren lige lodret over brændkammeret. Herved kunne der også enkelt introduceres rensning af veksleren, idet rensningerne kunne renses ned i den indvendige kedels eneste kammer (brændkammeret).

Oprindeligt blev kedlen designet således, at den særskilte pillebrænder valgfrit kunne monteres i en af kedlens sider, eller i den store frontlåde. Konceptet blev i den senere version ændret, så montage kun kunne vælges mellem de 2 sider af kedlen.

Den tidligere store frontlåde blev ændret til 2 mindre og bedre isolerede dæksler.

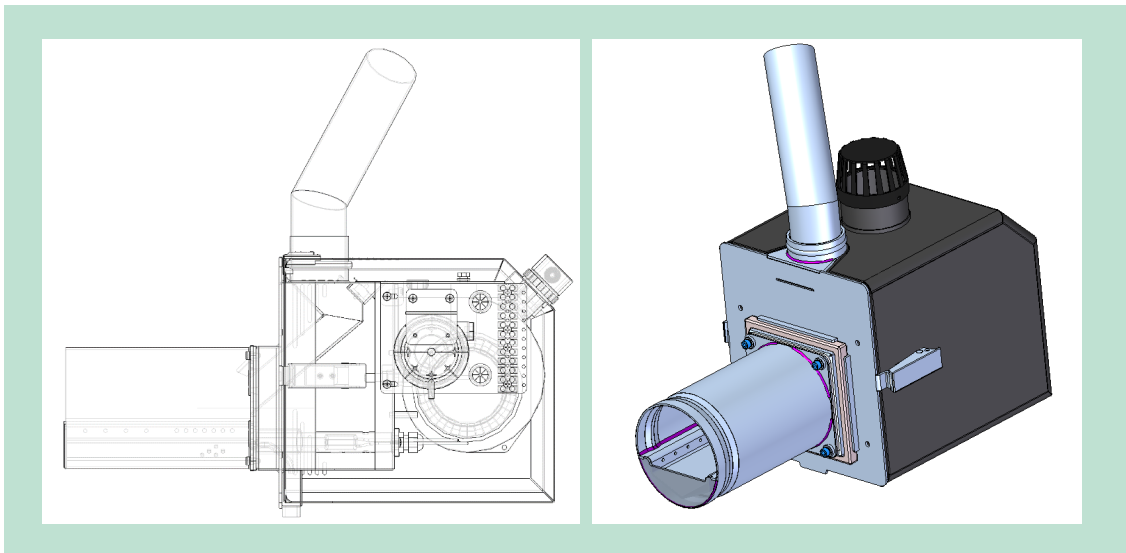


FIGUR 3. Skitse af TPK (HS20).

TPK-kedlens svaghed i forbindelse med støvemissioner viser sig at være den meget kompakte konstruktion – rørvarmeveksler direkte oven på brændkammeret. Denne konstruktion er væsentligt medvirkende til, at støvemissionerne vanskeligt kan nedbringes helt.

Uanset hvor god en forbrænding, der skabes, vil det lette støv fra forbrændingen naturligt svæve med op gennem rørvarmeveksleren og dermed videre ud i skorstenen. På trods af denne udfordring lykkedes det alligevel at skabe en forbrænding, der muliggjorde en EN303-5:2012-afprøvning, hvor støvemissionerne kunne imødekomme BAFA-listens stramme krav (<20 mg/m³ ved 13 % O₂).

Det store brændkammer tillader i øvrigt, under normale forhold, drift over længere tid uden tømning for aske – op mod 2,5 ton træpiller (god kvalitet) kan forbrændes, før rensning er nødvendig. Denne komfortparameter vil dog forøge støvemissionerne fra kedlen, jo mere aske der ophobes i brændkammeret.



FIGUR 4. Tekniske tegninger af pillebrænderen HS20.

Grundidéen for udviklingen af pillebrænderen HS20 var at skabe en robust og enkel brænder med så få bevægelige dele som muligt. Det skulle være en såkaldt 'drop-brænder' – altså en brænder, hvor brændslet (træpiller) falder ned i forbrændingen fra fødesystemet uden yderligere hjælp fra fx en intern snegl.

Normalt designs denne type brændere med en enkel sliske med en passende vinkel mellem faldrør og brændkammer, således at brændslet gnidningsfrit kan overføres/doseres til brænderen ved hjælp af det eksterne fødesystem. Erfaringerne med denne type brændere var dog, at selve tilførslen af brændslet til brændzonen havde en tendens både til at være for tilfældig og til ofte at ske for langt fremme i brændzonen.

For at forbedre denne situation blev det valgt at prøve med en 'knækket' sliske, dvs. at brændslet ikke falder direkte på en skrå flade for derfra at blive 'skudt' ind i brændzonen. Dette knæk på slisken sænker hastigheden på brændslet på vejen mod brændzonen, og brændslet lander derfor mere præcist i den rigtige zone af brændkammeret.

Selve brændkammeret er en simpel cylinder med indlagt (svejst) bundplade formet på en sådan måde, at brændslet placeres optimalt i brændzonen. Lufttilførslen foregår fra 4 forskellige zoner: nedefra tæt på sliskens udløb (primær luft), bagfra (blandet primær og sekundær luft), fra siden omkring brændzonen (blandet primær og sekundær luft) og fra siden forrest i brænderen (tertiær luft). Mixet mellem antal og størrelse af de forskellige huller er fundet gennem en lang række forsøg med forskellige kombinationer.

Hvad angår sikkerhedsforskrifterne i EN303-5:2012, er disse løst både mekanisk og ved hjælp af overvågningsinstrumenter.

Brænderens blæser overvåges ved hjælp af en trykswitch, der registrerer trykket i brænderens trykkammer. Ved manglende tryk slår trykswitchen driften af fødemotoren fra, dvs. ingen luftforsyning – intet brændsel.

Overfyring, dvs. fx kontinuert kørende fødesystem, der vil resultere i en overfyldning af brændkammeret med deraf følgende stor risiko for CO-eksplosioner, er imødegået ved hjælp af den knækkede sliske: hvis der overfyldes, vil brændslet bygge op i slisken, og hvis brændslet når knækket i slisken, vil brændslet her danne en "prop". Brændslet på slisken under knækket skrider langsomt ned i brænderen, mens det forbrændes med forstørrede emissionsværdier

end normalt, men aldrig med risiko for stor CO-udvikling. Til gengæld tilføres der ikke yderligere brændsel – dette sikrer den dannede "prop" i knækket.

Når brændslet i brænderen og brændslet fra slisken er forbrændt, vil brænderen igangsætte en restart. Da der ikke kommer brændsel frem til brændzonen, vil systemet gå på optændingsfejl.

7. Analysemetoder

7.1 Forsøgsopstilling

Der blev brugt en standardopsætning som vist i FIGUR 5.

ESP-filteret blev monteret lodret på skorstenen ca. 25 cm fra kedlen. En mængde af røggassen ekstraheres i fortyndingskanalen, hvor røggassen blev fortyndet med baggrundsluft til en ønsket fortyndingsgrad, som typisk var 15-30 gange. Partikelantalskoncentration, partikelmassekonzentration og BC blev målt fra fortyndingskanalen, mens andre parametre (CO, CO₂, OGC, NO_x, støv) blev målt ufortyndet.



FIGUR 5. Forsøgsopstilling med ESP-filter monteret på skorsten. En mængde af røggassen ekstraheres i fortyndingskanalen, hvor røggassen blev fortyndet med baggrundsluft.

7.2 Gravimetrisk støvmåling og partikelmåling

7.2.1 Gravimetrisk støvmåling

Dette er den konventionelle metode til at bestemme støvudledning fra kedler. Partikelmassen bestemmes gravimetrisk ved sampling i den varme, ufortyndede røggas. Partiklerne opsamles isokinetisk på et opvarmet filter (110° C) uden for skorstenen. Udtagningen foretages isokinetisk, hvilket betyder, at hastigheden i sampledysens munding er den samme som røggasstrømmen i skorstenen og bevirker, at partikler af forskellig masse opsamles i korrekt forhold. Filtrene er konditioneret både før og efter sampling. Sampleudstyret er opbygget jf. EN 13284-

1 og er udført efter samme procedure som under akkrediterede typeprøvninger af biomassekedler.

7.2.2 Partikelmasse med DustTrak DRX

Som supplerende måling af partikelmassen anvendes en TSI DustTrak. Dette er en vejledende og ikke en akkrediteret måling. Partikelmassekoncentration blev målt direkte fra fortyndingskanalen ved brug af en DustTrak-aerosolmonitor (TSI DRX 8533) med en måleopløsning på 10 sekunder. DustTrak er et lysspredningslaserfotometer, der giver en realtidsmåling af partikelmassekoncentrationer svarende til PM₁, PM_{2.5}, PM_{respirabel} (PM₄), PM₁₀, og Total PM-fraktion fra 0,1 til 15 µm i partikeldiameter.

7.2.3 Partikelantal med NanoScan SMPS

Partikelantalskoncentration (#/cm³) blev målt ved brug af NanoScan (TSI NanoScan SMPS 3910). Luften fra fortyndingskanalen blev fortyndet ekstra (fortyndingsfaktor 15) foran NanoScan ved brug af fortyndingsudstyr med roterende disk (Testo AG MD19-3E), som giver en total fortyndingsgrad af røggas til målinger af partikelantalskoncentration mellem 225-450 gange.

NanoScan bruger en cyklon til at fjerne større partikler, hvorefter partikler oplades af en unipolær oplader og sorteres efter en Radial Differential Mobility Analyser (RDMA). Partikler blev derefter dyrket 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.

7.2.4 Black carbon med aethalometer

Sort kulstofs (black carbon, BC) massekoncentration (mg/m³) blev målt fra fortyndingskanalen ved brug af en Black carbon-monitor (Zenzors Aethlabs microAeth AE51). Analyse var realtid med princippet for målt hastighed af ændring i absorption af transmitteret lys på grund af kontinuerlig opsamling af aerosoldeponering på filteret. Der anvendes en bølgelængde på 880 nm, og signalet herfra omregnes til en koncentration af BC. Målefrekvensen er 1 minut.

7.3 Gasmåling

I forsøgene måles følgende gasser

- CO
- CO₂
- OGC (Organic Gasous Compounds)
- NO_x.

Gasemissioner måles som CO/CO₂ i en ABB IR-analyser, NO_x måles med en Eco Physics CLD, og OGC måles via et FID-meter fra M&A Thermo.

8. Udvikling af elektrostatisk filter

8.1 Udvikling af elektrostatisk filter for pillekedler op til 25 kW

Som en del af projektet indgår udviklingen af et elektrostatisk partikelfilter. Filteret skal være universalt med mulighed for montering på forskellige kedelfabrikater for at opnå så bred en anvendelse som muligt. Det elektrostatiske filter skal være med automatisk drift, være selvrensende og kunne monteres bag på kedlen hhv. oven på kedlen.

I projektet, danner to kedler grundlag for udviklingen af filteret. Den ene er en traditionel (ikke-kondenserende) pillekedel på 22 kW, den anden er en kondenserende pillekedel på 12 kW. For nemmest at kunne foretage montage af filteret og udføre service skal filteret monteres lige efter røggasafgangen på kedlen. Dette giver imidlertid udfordringer mht. driftsforhold.

Den traditionelle kedel har en røggastemperatur på 200 grader, hvilket teoretisk kan påvirke filterets effektivitet negativt, da færre af de flygtige partikler er kondenseret ved denne temperatur, hvorfor der i teorien er færre partikler at fjerne. Derudover vil den indbyggede styring være udsat for en noget større varmepåvirkning, hvilket giver udfordringer på konstruktionen af indkapslingen.

Den kondenserende kedel har en røggastemperatur på 35 grader, hvilket teoretisk er godt, fordi alle flygtige partikler er kondenseret. Men pga. den meget lave temperatur er røggassen fra forbrændingen meget fugtig, og denne fugt vil afsætte sig på de kolde flader igennem filteret, indtil systemet er varmet igennem. Den fugtige røg har en større strømmæssig ledningsevne end tør røggas og kan give anledning til strømoverslag i filteret; dog primært under opstart, indtil system og skorsten har opnået jævn temperatur. Med den kondenserende kedel, kan denne opstartsperiode strække sig over en time. Ved strømoverslag har filteret ingen renseseffekt.

Referencepunktet, der blev anvendt for udvikling og test af de forskellige versioner, var opretholdelse af en renseseffekt (virkningsgrad) på mindst 90 %, både på partikelmasse (PM_{total}) og på partikelantal (PN_{0,5}), ved fuldlast og ved dellast.

Umiddelbart var det tanken at fremstille en filterboks, der kunne stå på gulvet bagved kedlen, således at røggasafgangen fra kedlen kunne køres ned igennem denne boks og op igennem det elektrostatiske filter. Derved kunne de partikler, der blev opfanget i filteret, afrensede og falde ned i denne boks, og boksen kunne tømmes via en skuffe i bunden. Grundidéen var, at det skulle være en slags "plug and play"-kasse der står på gulvet, og som er nem at servicere og tømme.

Der blev først fremstillet en forholdsvis lille boks med røggasindgang vandret ind i den ene ende og lodret udgang i den anden ende op igennem det elektrostatiske filter. Løsningen blev afprøvet på begge kedler og fungerede godt i en periode. Men efter et antal drift timer kunne de afrensede partikler ikke holdes nede i boksen pga. det røggas flow igennem boksen, der medtager opfangede partikler, hvorved partikelkoncentrationen blev uforholdsmæssigt meget større igennem partikelfilteret med det resultat, at effektiviteten faldt.

For at undgå at der medrives allerede opsamlede partikler, blev boksen gjort større/højere, så røggas flowet kunne være i toppen af boksen, og de opsamlede partikler kunne opsamles i

bunden under en rist. Derudover blev indløb og udløb fremstillet identisk, således at det kunne afprøves at placere ESP-filteret hhv. i indløb eller i udløb for at se, om det ville gøre en forskel mht. rensningsgraden. Forsøget med den store boks viste, at det godt kunne lade sig gøre at inddæmme de opfangede partikler, så de ikke blev revet med ud i afgang, og at ESP-filteret skal sidde på afgang af boksen for at få den bedste virkningsgrad. Men forsøget viste også, at den kondenserende kedels store kolde overflader giver problemer under opstart af kedlen. Den megen fugt, der er i røggassen, afsættes på alle kolde flader, inklusive i ESP-filteret, og det medfører, at ESP-filteret ikke har noget effektivitet i op til 2 timer efter kedelopstart. I slutfasen blev boksen desuden så stor, at det ikke var en brugbar løsning.

Af de nævnte grunde blev det valgt at gå væk fra boksløsningen og i stedet gå efter en løsning, hvor ESP-filteret er monteret i røgrøret lige efter udgangen fra kedlen. Herved kunne problemet med fugt på vandrette flader løses, ligesom de opsamlede partikler kunne holdes uden for røg flowet. Hvis der er røgfågang på toppen af kedlen, og filteret er monteret direkte i forlængelse af afgang på et lige røg rør, så vil de opsamlede partikler falde ned i kedlen og bliver fjernet, når kedlen renses. Hvis kedlen har røg rør bagud, bør der monteres et T-stykke på røgfågangen, således at der under T-stykket kan laves en form for opsamlingsboks, der skal tømmes med jævne mellemrum.

For at få ESP-filteret så kompakt som muligt, hvorved det nemmere kunne implementeres i et nyt system og eftermonteres på et eksisterende system, blev der prøvet flere versioner dels med forskellig længde, dels med forskellig diameter med henblik på at få den ønskede effektivitet i en så kompakt enhed som muligt. Desuden blev hver version afprøvet med forskellige elektrodedesign.

Med hensyn til røgrørs diameter kan der ud fra den i projektet valgte maksimale kedeffect på 30 kW anvendes en minimumsdiameter på Ø130 mm for at overholde den maksimalt anbefalede røggashastighed igennem filteret på 1 m/s.

For at finde en kombination af den mindst mulige længde og diameter blev der som reference anvendt partikelmåledata fra et filter med en rørlængde på 1 meter og en diameter på Ø200 mm, som blev sat til en effektivitet på 100 %. Ved at måle på forskellige kombinationsmuligheder var det muligt at gå ned i dimensioner og forsøgsvis nærme sig en reduktionsgrad på 90 %, som var projektets minimumskrav. Undervejs blev elektroden løbende modificeret dels for at opnå optimal effektivitet, dels for at undgå overslag i filteret.

Det lykkedes at finde et godt kompromis med en rørlængde på 650 mm og en elektrodelængde på 500 mm. Fra de valgte mål og ned kunne der forholdsvis hurtigt ses en reduktion i effektiviteten, særligt under forhold, hvor der dannes rigtig mange partikler, dvs. ved opstart og i situationer, hvor kedlen ikke kørte optimalt. Dimensionerne nåede på et tidspunkt 500 mm/400 mm, hvor der meget tydelig kunne ses en uønsket reduktion i effektiviteten.

Da filterdimensionerne var fastlagt, kunne designfasen indledes. Designet blev valgt med henblik på, at filteret skulle monteres lige efter kedlen i et kedelrum, og at filteret skulle være let at udføre service på. Der blev inkluderet et T-stykke i designet, fordi der skal være en opsamlingsmulighed for de afrensede partikler på de kedler, der har røgfågang bagud. På kedler med røgfågang i toppen vil de afrensede partikler falde ned i kedlen og blive fjernet i forbindelse med en kedelrens. Det vurderes, at der i Danmark er cirka lige mange kedler som har røgfågang i toppen som der er bagud.

Indkapslingen har ikke IP-rating, så der må ikke sprøjtes vand på filteret ved fx vask. Indkapsling er udført i rustfrit stål.

8.2 Udviklingsmålinger hos PHX

Undervejs i udviklingsprocessen blev der løbende udført emissionsmålinger hos PHX, og derudover blev der i efteråret 2019 hos PHX udført samtidig emissionsmåling af Teknologisk Institut og PHX. Formålet med dette var (1) at evaluere de foreløbige resultater til udvikling af ESP-filteret; (2) at sammenligne måleresultater for partikelantalskoncentration mellem PHX og Teknologisk Institut.

Målinger blev udført med to typer kedler: NBE Phoenix kondenserende kedel og Scandtec BAXI ikke-kondenserende kedel. NBE-kedlen blev testet ved både fuldlast (100 %) og lavlast (30 %) med ESP-filter slukket. BAXI-kedel blev testet ved både høj last (100 %) og lav last (30 %) med ESP-filter tændt og slukket 3 gange med faste intervaller under hver belastning. Resultaterne er vist i TABEL 1, som allerede viste et højt niveau af effektivitet af ESP-filteret på BAXI-kedlen. Der blev også observeret en god overensstemmelse mellem partikelkoncentrationsmålinger af Teknologisk Institut og PHX.

TABEL 1. Måleresultater og effektivitet af ESP-filter ved fuldlast (100 %) og lavlast (30 %) for den ikke-kondenserende BAXI-kedel (Scandtec, 21,8 kW). Den kondenserende NBE-kedel (Phoenix V16, 12 kW) blev kørt uden slukket/tændt ESP-filter. Måletid af hver last er vist i Tabellen.

Fabrikat	Prøve	BAXI ikke-kondenserende, 21,8 kW		BAXI ikke-kondenserende, 21,8 kW		NBE Phoenix kondenserende 12 kW		
		Fuldlast tændt filter	Fuldlast slukket filter	Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter	Fuldlast slukket filter	Lavlast slukket filter	
	Returtemperatur	°C	59,1	58,9	54,4	54,9	30,0	26,3
	Fremløbstemperatur	°C	73,0	72,7	67,3	68,5	45,2	40,5
	Varmeydelse	kW	15,4	15,3	6,0	6,3	12,4	3,5
	Måletid	h	3,7	3,7	3,7	3,7	2,0	2,0
	Røgteperatur	°C	155	154	100	102	37	32
	CO ₂	%vol	10,2	10,2	7,2	7,2	11,9	4,5
	Støv ved 10% O ₂	mg/mn ³	< 5	18	< 5	16	21	18
	CO ved 10% O ₂	mg/mn ³	63	57	261	234	104	1377
	NOx (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/mn ³	249	250	244	246	233	223
	OGC (C) ved 10% O ₂	mg/mn ³	< 6	< 6	6	7	< 6	33
	Partikelmasse-koncentration <i>DustTrak</i>	mg/m ³	0,1	1,4	0,2	2,4	7,1	10,2
	Effektivitet ^{Partikelmasse}		90,2%		90,4%		-	-
	Partikelantal-koncentration <i>NanoScan</i>	#/cm ³	39 x 10 ⁴	64 x 10 ⁶	14 x 10 ⁴	37 x 10 ⁶	39 x 10 ⁶	25 x 10 ⁶
	Effektivitet ^{Partikelantal}		99,4%		99,6%		-	-
	Black carbon <i>microAeth</i>	mg/m ³	0,003	0,014	0,008	0,38	0,93	1,71
	Effektivitet ^{Black carbon}		79,4%		97,9%		-	-

9. Evaluering af elektrostatiske filter i laboratoriet

9.1 Indledning

Laboratorietest af effektiviteten af det udviklede elektrofilter blev udført på forskellige kedler fra Scandtec/HS Tarm og NBE. Standardeffektivitetstest på forskellige parametre inklusive partikelmassekoncentration, partikelantalskoncentration, BC, CO, CO₂, O₂ og NO_x blev udført i henhold til analysemetoderne beskrevet i Kapitel 7.

Testene blev udført på en ikke-kondenserende kedel fra Scandtec (BAXI 21,8 kW) og to kedler fra NBE: en kondenserende (Phoenix V16, 12 kW) og en ikke-kondenserende (Phoenix RTB, 16 kW).

Yderligere laboratorieundersøgelser under realistiske forhold blev udført på den ikke-kondenserende kedel fra Scandtec (BAXI 21,8 kW), da kedlen hos den private bruger ligeledes er af den ikke-kondenserende type (Scandtec Multi Heat). Testene omfattede en stresstest og en simulering af sommer- og vinterbrug.

9.2 NBE-kedler

To typer af kedler fra NBE blev testet med ESP-filteret: en kondenserende kedel (Phoenix V16, 12 kW) og en ikke-kondenserende kedel (Phoenix RTB, 16 kW), begge ved fuldlast og lavlast med ESP-filteret tændt og slukket 3 gange til hver last. Resultater er vist i TABEL 2.

Generelt er effektiviteten af elektrofilteret på den ikke-kondenserende NBE-kedel (Phoenix RTB, 16 kW) på næsten 100 %, hvad angår partikelmasse- og antalskoncentration samt BC-koncentration (for både fuldlast og lavlast). Det skal også bemærkes, at reduktionen synligt kunne observeres inden for få sekunder efter tænding af elektrofilteret.

Effektiviteten af elektrofilteret på den kondenserende NBE-kedel (Phoenix, 12 kW) på partikelantalskoncentration, partikelmassekoncentration og BC-koncentration var også meget høj (99 %) ved lavlast. Ved fuldlastskørsel, var effektiviteten på partikelantalskoncentrationen ligeledes høj (99 %).

TABEL 2. Måleresultater og effektivitet af ESP-filter ved fuldlast (100 %) og lavlast (30 %) for den ikke-kondenserende NBE-kedel (Phoenix RTB, 16 kW) og den kondenserende NBE-kedel (Phoenix V16, 12 kW). Måletid af hver last er vist i Tabellen. Resultaterne for PM- og BC-målinger ved fuldlast for den kondenserende NBE-kedel er ikke inkluderet på grund af den højere fortyndingsgrad i fortyndingskanalen den dag, hvilket kunne påvirke målingerne af PM og BC, som måles direkte fra fortyndingskanalen.

Fabrikat		NBE RTB Phoenix 16 ikke-kondenserende, 16 kW				NBE Phoenix kondenserende, 12 kW			
		Fuldlast tændt filter	Fuldlast slukket filter	Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter	Fuldlast tændt filter	Fuldlast slukket filter	Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter
Returtemperatur	°C	48,0	47,9	47,4	47,6	30,2	30,2	30,1	30,2
Fremløbstemperatur	°C	71,4	71,6	71,7	72,0	48,3	48,3	49,6	49,5
Varmeydelse	kW	15,1	15,2	3,8	3,8	12,0	12,1	3,1	3,1
Måletid	h	3,2	3,2	3,2	3,2	4,0	4,0	3,8	3,8
Røgtemperatur	°C	107	108	71	71	39	39	35	35
CO ₂	%vol	12,4	12,4	5,5	5,7	8,4	8,4	4,3	4,3
Støv ved 10% O ₂	mg/mn ³	< 5	23	< 5	32	< 5	19	7	54
CO ved 10% O ₂	mg/mn ³	65	76	499	436	405	405	183	151
NOx (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/mn ³	206	207	174	175	207	208	182	187
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/mn ³	< 6	< 6	17	16	< 6	< 6	8	7
Partikelmasse-koncentration DustTrak	mg/m ³	0,02 ± 0,02	11,3 ± 1,5	0,03 ± 0,02	15,6 ± 1,3	-	-	0,3 ± 0,1	27,5 ± 6,6
Effektivitet _{Partikelmasse}		99,8%		99,8%		-		99,0%	
Partikelantal-koncentration NanoScan	#/cm ³	1,6 ± 0,4 × 10 ⁴	8,1 ± 0,4 × 10 ⁶	2,2 ± 0,6 × 10 ⁴	11,3 ± 1,2 × 10 ⁶	44 ± 4 × 10 ⁴	32 ± 0,4 × 10 ⁶	8,6 ± 0,9 × 10 ⁴	8,7 ± 0,6 × 10 ⁶
Effektivitet _{Partikelantal}		99,8%		99,8%		98,7%		99,0%	
Black carbon microAeth	mg/m ³	0,005 ± 0,001	4,0 ± 0,3	0,007 ± 0,001	5,6 ± 0,8	-	-	0,09 ± 0,05	10,0 ± 2,2
Effektivitet _{Black carbon}		99,9%		99,9%		-		99,1%	

9.3 Scandtec-kedel

Den ikke-kondenserende kedel fra Scandtec (BAXI 21,8 kW) blev testet med ESP-filteret ved både fuldlast og lavlast og med ESP-filteret tændt og slukket 3 gange til hver last. Resultater er vist i TABEL 3.

TABEL 3. Måleresultater og effektivitet af ESP-filteret ved fuldlast (100 %) og lavlast (30 %) for den ikke-kondenserende kedel BAXI (Scandtec, 21,8 kW). Måletid af hver last er vist i Tabellen.

Fabrikat	Prøve	Scandtec BAXI ikke-kondenserende, 21,8 kW				
		Fuldlast tændt filter	Fuldlast slukket filter	Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter	
	Returtemperatur	°C	58,0	58,0	57,5	57,5
	Fremløbstemperatur	°C	71,6	71,8	72,8	72,6
	Varmeydelse	kW	19,4	19,7	6,1	6,1
	Måletid	h	5,2	5,2	3,2	3,2
	Røgteperatur	°C	205	208	127	126
	CO ₂	%vol	12,0	12,1	7,7	7,6
	Støv ved 10% O ₂	mg/mn ³	< 5	21	6	43
	CO ved 10% O ₂	mg/mn ³	49	43	154	141
	NOx (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/mn ³	205	204	191	195
	OGC (C) ved 10% O ₂	mg/mn ³	< 6	< 6	< 6	< 6
	Partikelmasse-koncentration <i>DustTrak</i>	mg/m ³	0,1 ± 0,01	0,9 ± 0,1	0,5 ± 0,4	16,2 ± 3,0
	Effektivitet _{Partikelmasse}		89,4%		96,7%	
	Partikelantal-koncentration <i>NanoScan</i>	#/cm ³	83 ± 17 × 10 ⁴	69,8 ± 0,9 × 10 ⁶	18 ± 5 × 10 ⁴	24,5 ± 0,6 × 10 ⁶
	Effektivitet _{Partikelantal}		98,8%		99,3%	
	Black carbon <i>microAeth</i>	mg/m ³	0,006 ± 0,003	0,017 ± 0,016	0,1 ± 0,1	4,8 ± 1,6
	Effektivitet _{Black carbon}		N/A		97,1%	

Effektiviteten af elektrofilteret på den kondenserende Scandtec-kedel (BAXI, 21,8 kW) på partikelantalskoncentration, partikelmassekoncentration og BC-koncentration var høj ved lavlast (97-99 %). Ved fuldlaststest var effektiviteten på partikelantalskoncentrationen stadig høj (99 %), men lavere på partikelmassekoncentrationen (89 %). Det skal bemærkes, at koncentrationen af partikelmasse (0,9 mg/m³) var betydeligt lavere i tilfælde af fuldlast sammenlignet med lavlast. Det betød en mindre mængde partikler, der skulle rengøres i røggassen. Det var ikke muligt at kalkulere effektiviteten på BC grundet meget lav BC-koncentration ved fuldlasten.

Ved at sammenligne måleresultaterne for alle 3 typer kedler (en fra Scandtec og to fra NBE) i laboratoriet viste det sig, at ESP-filteret fungerer mere effektivt på en ikke-kondenserende kedel, selvom resultaterne fra kondenserende kedler også er meget lovende.

9.4 Stresstest efter drift hos privat bruger

For at evaluere filterets ydeevne til senere test hos en privat bruger blev der udført en stress-test på den ikke-kondenserende BAXI-kedel, hvor kedlen blev testet med ESP-filteret ved lavlast med ESP-filteret tændt og slukket 3 gange med forhøjet luftoverskud. For at øge luftoverskuddet blev kedlens styringsparametre ændret; dels blev der ændret på blæsertallet (justeret op), og dels blev brændselsmængden reduceret ved at forøge den afvejede brændselsmængde. Luftoverskuddet har den effekt, udover at forringe selve forbrændingen, at strømningshastigheden på luften i brænderen medvirker til at løfte asken og dermed transportere en større andel heraf ud gennem røggaskanalen.

Resultaterne viser som ventet forøget emission af CO og OGC. Støvemissionen (i mg/m³) er nogenlunde uændret med slukket filter, mens den er højere med tændt filter.

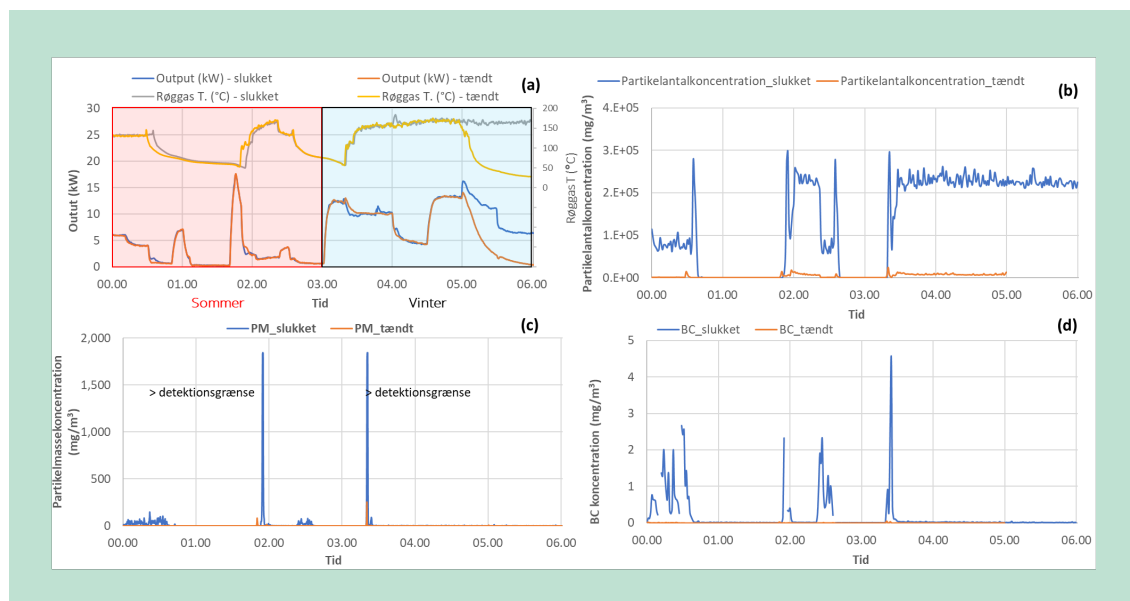
Resultaterne viser ESP-filterets gode effektivitet med hensyn til reduktion af koncentrationer af BC (92 %) og partikelantalskoncentration (98 %) under stress med luftoverskud. Der er en mindre effekt på partikelmassekoncentrationen (70 %).

TABEL 4. Måleresultater og effektivitet af ESP-filteret ved lavlast (30 %) for den ikke-kondenserende kedel BAXI (Scandtec, 21,8 kW) med luftoverskud. Det bemærkes, at PM-koncentrationen med slukket filter var relativt lav, hvorfor filtereffektiviteten er lavere end ellers.

Fabrikat		Scandtec BAXI ikke-kondenserende, 21,8 kW	
		Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter
Returtemperatur	°C	57,9	58,1
Fremløbstemperatur	°C	72,0	71,9
Varmeydelse	kW	5,6	5,5
Måletid	h	3,2	3,2
Røgstemperatur	°C	134	134
CO ₂	%vol	4,8	4,8
Støv ved 10% O ₂	mg/m ³	11	38
CO ved 10% O ₂	mg/m ³	1,362	1,328
NOx (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m ³	215	212
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m ³	71	70
Partikelmassekoncentration <i>DustTrak</i>	mg/m ³	0,6 ± 0,2	2,0 ± 0,1
Effektivitet _{Partikelmasse}		70,1%	
Partikelantalkoncentration <i>NanoScan</i>	#/cm ³	92 ± 14 × 10 ⁴	42,4 ± 0,7 × 10 ⁶
Effektivitet _{Partikelantal}		97,8%	
Black carbon <i>microAeth</i>	mg/m ³	0,028 ± 0,003	0,4 ± 0,1
Effektivitet _{Black carbon}		92,4%	

9.5 Variation af tempo efter drift hos privat bruger

For at evaluere filterets ydeevne til senere test hos private bruger blev der udført en test af variationen af tempo efter drift hos en privat bruger. Testen blev udført på den ikke-kondenserende BAXI-kedel, som blev testet ved 6 timers simuleret sommer-/vinterbrug, først med ESP-filteret slukket, og derefter med ESP-filteret tændt. Et 6 timers simuleret sommer-/vinterbrug inkluderer 3 timer med sommermodul og 3 timer med vintermodul. Resultater er vist i FIGUR 6.



FIGUR 6. Et program med sommer- (første 3 timer) og vintermoduler (sidste 3 timer) kendetegnet ved kedelydelse og røggastemperatur (a) og observerede effekter på partikelantalskoncentration (b), partikelmassekoncentration (c) og BC-koncentration (d).

Tempovariationen justeres efter kedelydeevne, hvilket afspejler den forventede brug i private hjem om sommeren og om vinteren. Der er en forsinkelse fra tidspunktet for indstilling af kedelydeevne (output) til det tidspunkt, kedlen reagerer, hvilket er angivet med røggastemperatur (FIGUR 6). Som det kan ses af figuren, var der en vis afvigelse af 'output' og røggas i den sidste time af 6-timers simuleret sommer-/vinterbrug i tilfælde af tændt filter på grund af et ukendt problem. Effektivitetsværdierne for partikelmassekoncentration, partikelantalskoncentration og BC-koncentration blev derfor beregnet som gennemsnit af målinger fra de første 5 timer af programmet med filteret tændt versus filteret slukket.

Visuelt kan det observeres, at signalerne af partikelmassekoncentration, partikelantalskoncentration og BC-koncentration er fraværende, når ESP-filteret blev tændt (FIGUR 6). Med hensyn til gennemsnitlig reduktionsprocent blev det beregnet, at effektiviteten for disse parametre lå mellem 97 % og 99 % (TABEL 5).

TABEL 5. Måleresultater og effektivitet af ESP-filteret ved lavlast (30 %) for den ikke-kondenserende kedel BAXI (Scandtec, 21,8 kW) ved simuleret sommer-/vinterbrug. Det var ikke muligt at beregne andre parametre med simuleringen.

Fabrikat		Scandtec BAXI ikke-kondenserende, 21,8 kW	
		Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter
Prøve			
Returtemperatur	°C	N/A	N/A
Fremløbstemperatur	°C	N/A	N/A
Varmeydelse	kW	N/A	N/A
Måletid	h	N/A	N/A
Røgstemperatur	°C	N/A	N/A
CO ₂	%vol	N/A	N/A
Støv ved 10% O ₂	mg/mn ³	N/A	N/A
CO ved 10% O ₂	mg/mn ³	N/A	N/A
NOx (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/mn ³	N/A	N/A
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/mn ³	N/A	N/A
Partikelmassekoncentration <i>DustTrak</i>	mg/m ³	0,6 ± 7,1	18,3 ± 133,6
Effektivitet _{partikelmasse}		96,8%	
Partikelantalkoncentration <i>NanoScan</i>	#/cm ³	71 ± 78 × 10 ⁴	21,2 ± 19,6 × 10 ⁶
Effektivitet _{partikelantal}		96,7%	
Black carbon <i>microAeth</i>	mg/m ³	0,04 ± 0,01	2,4 ± 6,6
Effektivitet _{black carbon}		98,9%	

10. Evaluering af elektrostatiske filter hos privat bruger

10.1 Beskrivelse af kedlen hos privat bruger

Til fieldtestafprøvningen af det elektrostatiske filter anvendtes en Multi Heat 1,5, som er forgængeren til TPK'en beskrevet i afsnit 6.2. Denne kedel blev i sin tid udviklet til forbrænding af koks og kul tilbage i starten af 90'erne, og det var forventet, at støvemissionen fra denne kedel ville være højere sammenlignet med støvemissionen fra kedlerne udvalgt til laboratorietest. Formålet med testen hos den private bruger var både at teste filterets håndtering af større støvmængder og at teste effekten af en reduktion af filterets rensfrekvens.

I slutningen af 90'erne blev kedlerne tilrettet med – for den tid – meget moderne elektroniske styringer og flere forskellige produktionsmæssige forbedringer. Denne kedeltype, som fandtes i tre varianter: en 15 kW-, en 25 kW- og 40 kW-version, er blevet solgt over hele Europa i op mod 50.000 stk. i årene 1996 til 2014, hvorefter produktet udgik af produktion – ikke på grund af dets ydelse eller emission, men fordi denne type kedel var blevet utidssvarende. Kedlerne er nemlig uden automatisk tænding – funktionen vedligeholdes med en såkaldt pausefyring. Et princip, hvor evnen til at følge anlæggets varmebehov bliver understøttet af en mindre glødebunke, der vedligeholdes og bringes til opblussen, når varmebehovet igen er større end minimalydelsen for kedlen. Under kontinuert drift (fuld last) er emissionerne fra disse kedler i overensstemmelse med kravene til klasse 5 i EN303-5:2012. Dog må det forventes, at grænserne overskrides i almindelig drift, hvor kedlen skifter mellem fuld last og pausefyring.

10.2 Forsøgsopstilling

Testen blev udført hos en privat bruger i Brødstrup. Filteret blev monteret den 2. november 2020 og fjernet efter ca. 15 uger (3,5 måneder) den 12. februar 2021.

Der blev brugt en opsætning svarende til standardindstillingen i afsnit 7.1. ESP-filteret blev monteret lodret på skorstenen, ca. 25 cm fra kedlen. En mængde af røggassen ekstraheres i fortyndingskanalen, hvor røggassen blev fortyndet med baggrundsluft. Partikelantalskoncentration, partikelmassekonzentration og black carbon blev målt fra fortyndingskanalen, mens andre parametre (CO, CO₂, O₂, NO_x, støv) blev målt ufortyndet. Målinger af CO₂ blev anvendt til at kalkulere fortyndingshastigheden i fortyndingskanalen.

I november 2020 blev målinger udført i 3 dage (3/11-6/11, fortyndingsgrad 7,1) med filter tændt og 3 dage med filter slukket (9/11-12/11, fortyndingsgrad 23,0). I februar 2021, blev målinger udført i 1 dag med filter tændt (9/2-10/2, fortyndingsgrad 34,0) og 1 dag med filter slukket (10/2-11/2, fortyndingsgrad 41,7). Det var ikke muligt at indstille en fast fortyndingsgrad hver gang på grund af ukendt udgangspunkt for kedlen under drift ved indstillingen.



FIGUR 7. Forsøgsopstilling hos en privat bruger med ESP-filter monteret på toppen af kedlen (Scandtec BAXI Multiheat 1,5). En mængde af røggassen ekstraheres i fortyndingskanalen, hvor røggassen blev fortyndet med baggrundsluft. Partikelantalskoncentration, partikelmassekoncentration og BC blev målt fra fortyndingskanalen, mens andre parametre (CO, CO₂, O₂, NO_x, støv) blev målt ufortyndet.

10.3 Resultater ved montering af elektrostatisk filter

Resultater fra målinger hos privat bruger er vist i TABEL 6.

I begyndelsen af måleperioden var effektivitetsværdierne for det tændte ESP-filter høj (94 % for partikelmassekoncentration, 90 % for partikelantalskoncentration, 88 % for BC-koncentration). Efter 3,5 måneder var effektivitetsværdierne lavere (70 % for partikelmassekoncentration, 38 % for partikelantalskoncentration og 51 % for BC-koncentration) (TABEL 8).

Det skal bemærkes, at ESP-styringen blev justeret af PHX for at reducere selvrensningssfrekvensen af ESP-filteret fra hver 8. time til 1 gang dagligt efter anmodning fra den private bruger grundet støjgener i forbindelse med rensningen. Som et resultat var filteret synligt dækket af støv i slutningen af måleperioden, hvilket med meget høj sandsynlighed har haft stor indflydelse på måleresultaterne.

Det skal også bemærkes, at betingelserne for kedlen ikke var de samme i starten og i slutningen af måleperioden. Fx genererede kedlen i starten af måleperioden (108±177) mg/m³ i gennemsnit de dage, hvor ESP-filteret blev slukket, mens kedlen kun genererede (13±45) mg/m³ i slutningen af måleperioden. Det er derfor vigtigt at bemærke, at filteret udviste en høj effektivitet i startperioden på trods af den usædvanligt høje partikelbelastning fra kedlen. Derudover var der store variationer i måleresultater som følge af det skiftende mønster for familiens brug af kedlen efter behov, hvilket gør det udfordrende at beregne en repræsentativ gennemsnitsværdi af partikelmassekoncentration, partikelantalskoncentration eller BC-koncentration.

Når man måler under virkelig drift, vil der typisk være forøget usikkerhed på måleresultaterne, og det kan samtidig være svært at opnå fuldstændig sammenlignelige forhold fra den ene måling til den anden. I modsætning til laboratoriemålinger, hvor kedlens betingelser kan holdes stabile, kører den i virkelig drift efter det behov, der er i huset. Behovet varierer bl.a. alt efter husholdningens varmtvandsforbrug og den aktuelle udetemperatur. Disse parametre har væsentlig betydning for, hvordan kedlen kører – hvor meget effekt den skal levere. Og det spiller igen betydeligt ind på, hvordan de forskellige forbrændingsparametre viser sig.

Typisk vil en kedel køre med bedre forbrænding, jo højere effekt den skal levere. Det har væsentlig betydning, hvordan de ovennævnte forhold er fra den ene måling til den anden.

I projektet er der målt i november hhv. i februar. Tilfældet ville, at det var en meget kold februar, da slutmålingerne blev gennemført, hvilket betød, at kedlen kørte med noget højere ydelse under slutmålingen end under startmålingen. Det fremgår af resultaterne, hvor der ses væsentligt bedre værdier ved slut- end ved startmålingerne. NO_x er den eneste parameter, der er dårligere ved slutmålingen, men det er forventet, idet NO_x som den eneste parameter stiger med bedre forbrænding.

Umiddelbart behøver de forskellige driftsbetingelser ikke påvirke filterets effektivitet, men problematikken bør iagttages, når data evalueres.

TABEL 6. Måleresultater og effektivitet af ESP-filteret ved starten (november 2020) og slutningen (februar 2021) af måleperioden hos den private bruger. PM-målingen i februar 2021 med slukket filter var markant lavere end i november 2021. Det skyldes formentlig, at februar 2021 var en særlig kold måned, hvorfor kedlen kørte med højere ydelse og dermed bedre forbrænding.

Fabrikat		Start (Nov 2020)		Slut (Feb 2021)	
		3 dage tændt filter	3 dage slukket filter	1 dag tændt filter	1 dag slukket filter
Prøve					
Returtemperatur	°C	-	-	-	-
Fremløbstemperatur	°C	-	-	-	-
Varmeydelse	kW	-	-	-	-
Måletid	h	16:00	16:00	24:00	24:00
Røgteperatur	°C	101	105	145	143
CO ₂	%vol	3,2	3,6	5,1	4,9
Støv ved 10% O ₂	mg/mn ³	-	-	-	-
CO ved 10% O ₂	mg/mn ³	4123	3728	1256	1448
NO _x (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/mn ³	173	194	316	307
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/mn ³	623	567	31	33
Partikelmasse-koncentration <i>DustTrak</i>	mg/m ³	6,9 ± 11,2	107,5 ± 177,2	4,0 ± 8,6	13,0 ± 45,2
Effektivitet ^{Partikelmasse}		93,6%		69,5%	
Partikelantal-koncentration <i>NanoScan</i>	#/cm ³	136 ± 29 x 10 ⁴	14,1 ± 16,7 x 10 ⁶	12,3 ± 14,6 x 10 ⁶	19,7 ± 19,7 x 10 ⁶
Effektivitet ^{Partikelantal}		90,4%		37,7%	
Black carbon <i>microAeth</i>	mg/m ³	0,1 ± 0,9	0,8 ± 1,8	1,4 ± 2,0	2,9 ± 5,9
Effektivitet ^{Black carbon}		87,5%		50,9%	

10.4 Resultater fra laboratorietest efter drift hos bruger

Laboratorietest af effektiviteten af det udviklede elektrofilter blev udført på den ikke-kondenserende kedel fra NBE (RTB Phoenix 16 kW). Der blev brugt en lignende opstilling som beskrevet i afsnit 7.1.

Da elektrofilteret visuelt var snavset efter 3 måneders test hos den private bruger, blev der desuden udført en yderligere test på effektiviteten af det snavsede filter under laboratorieforhold på begge ved fuldlast (100 %) og lavlast (30 %).

Efter rensning af elektrofilteret blev en standardtest af filterets effektivitet udført, hvor kedlen blev kørt på fuldlast (100 %) og lavlast (30 %) med filter tændt og slukket 3 gange til hver last.

10.4.1 Sammenligning af snavsset og rensset filter

Effektiviteten af det snavsede filter sammenlignet med det rensede filter er vist i TABEL 7. Generelt viste det snavsede filter stadig god effektivitet i laboratorieopstillingen med en virkning på 87-96 % på partikelmassereduktion, ~96-97 % på partikelantalsreduktion og 100 % på sodreduktion. Rensning af partikelfilteret øgede effekten på fjernelsen af partikler ved fuldlastindstilling fra 87 % til 93 %. Ellers blev der ikke observeret nogen signifikante virkninger, til dels fordi effektiviteten af det snavsede filter allerede var meget høj.

TABEL 7. Sammenligning af måleresultater af snavsset filter sammenlignet med rensset filter. Målingerne blev udført i laboratoriet hos Teknologisk Institut.

Fabrikat		Snavset filter				Rensset filter			
		NBE RTB Phoenix 16 ikke-kondenserende, 16 kW				NBE RTB Phoenix 16 ikke-kondenserende, 16 kW			
Prøve		Fuldlast tændt filter	Fuldlast slukket filter	Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter	Fuldlast tændt filter	Fuldlast slukket filter	Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter
Returtemperatur	°C	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0	48,0
Fremløbstemperatur	°C	72,3	72,3	73,2	73,2	70,8	70,8	72,2	72,2
Varmeydelse	kW	15,6	15,6	3,9	3,9	14,6	14,6	3,7	3,7
Måletid	h	2,2	2,2	2,2	2,2	3,4	3,4	3,3	3,3
Røgtemperatur	°C	109	109	73	73	106	106	73	73
CO ₂	%vol	11,7	11,7	5,4	5,4	11,2	11,2	4,7	4,7
Støv ved 10% O ₂	mg/mn ³	< 5	20	< 5	16	< 5	17	< 5	11
CO ved 10% O ₂	mg/mn ³	162	162	195	195	67	67	294	294
NOx (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/mn ³	194	194	190	190	200	200	211	211
OGC (C) ved 10% O ₂	mg/mn ³	8	8	7	7	< 6	< 6	9	9
Partikelmasse-koncentration DustTrak	mg/m ³	1,0	7,6	0,3	10,9	0,2 ± 0,1	3,0 ± 0,7	0,39 ± 0,03	8,3 ± 2,0
Effektivitet _{Partikelmasse}		87,4%		96%		92,8%		95,3%	
Partikelantal-koncentration NanoScan	#/cm ³	1,5 x 10 ⁶	49 x 10 ⁶	32 x 10 ⁴	8,4 x 10 ⁶	2,3 ± 0,3 x 10 ⁶	45 ± 1 x 10 ⁶	5,5 ± 0,6 x 10 ⁴	9,2 ± 0,1 x 10 ⁶
Effektivitet _{Partikelantal}		96,9%		96,2%		95,0%		99,4 %	
Black carbon <i>microAeth</i>	mg/m ³	0,1	3,8	0,1	3,9	0,04 ± 0,01	1,2 ± 0,8	0,05 ± 0,01	3,5 ± 1,2
Effektivitet _{black carbon}		99,7%		99,7%		96,9%		98,7%	

10.4.2 Før og efter drift hos brugeren

Elektrofilterets ydeevne ved standardlaboratorieindstilling efter 3 måneders drift hos privat bruger blev sammenlignet med effektivitet før perioden (TABEL 8). Langvarig brug af filteret har ført til 5-7 % lavere effekt på fjernelsen af partikelmasse, 1-5 % lavere effekt på fjernelsen af partikelantallet, og 1-3 % lavere effekt på fjernelsen af sod. På den anden side skal det bemærkes, at de målte koncentrationer (i tilfælde af slukket filter) af partikelmasse, partikelantal og sod efter drift hos brugeren generelt var lavere end de målte værdier før driften, hvilket kunne medføre i en fejltolkning af den reelle effektivitet. Desuden var filterets selvrensningssfrekvens reduceret fra hver 8. time til én gang dagligt, hvilket også forventeligt har haft en negativ effekt på ydeevnen.

TABEL 8. Sammenligning af måleresultater af filter på den ikke-kondenserende kedel (NBE RTB Phoenix 16, 16 kW) før og efter drift hos brugeren. Disse målinger blev udført som laboratoriemåling hos Teknologisk Institut.

Fabrikat	Prøve	FØR drift hos forbrugeren				EFTER drift hos forbrugeren			
		NBE RTB Phoenix 16 ikke-kondenserende, 16 kW		NBE RTB Phoenix 16 ikke-kondenserende, 16 kW		NBE RTB Phoenix 16 ikke-kondenserende, 16 kW		NBE RTB Phoenix 16 ikke-kondenserende, 16 kW	
		Fuldlast tændt filter	Fuldlast slukket filter	Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter	Fuldlast tændt filter	Fuldlast slukket filter	Lavlast tændt filter	Lavlast slukket filter
	Returtemperatur	°C	48,0	47,9	47,4	47,6	48,0	48,0	48,0
	Fremløbstemperatur	°C	71,4	71,6	71,7	72,0	70,8	70,8	72,2
	Varmeydelse	kW	15,1	15,2	3,8	3,8	14,6	14,6	3,7
	Måletid	h	3,2	3,2	3,2	3,2	3,4	3,4	3,3
	Røgtemperatur	°C	107	108	71	71	106	106	73
	CO ₂	%vol	12,4	12,4	5,5	5,7	11,2	11,2	4,7
	Støv ved 10% O ₂	mg/m ³	< 5	23	< 5	32	< 5	17	< 5
	CO ved 10% O ₂	mg/m ³	65	76	499	436	67	67	294
	NOx (NO ₂) ved 10% O ₂	mg/m ³	206	207	174	175	200	200	211
	OGC (C) ved 10% O ₂	mg/m ³	< 6	< 6	17	16	< 6	< 6	9
	Partikelmasse-koncentration DustTrak	mg/m ³	0,02 ± 0,02	11,3 ± 1,5	0,03 ± 0,02	15,6 ± 1,3	0,2 ± 0,1	3,0 ± 0,7	0,39 ± 0,03
	Effektivitet _{Partikelmasse}		99,8%		99,8%		92,8%		95,3%
	Partikelantal-koncentration NanoScan	#/cm ³	1,6 ± 0,4 × 10 ⁴	8,1 ± 0,4 × 10 ⁶	2,2 ± 0,6 × 10 ⁴	11,3 ± 1,2 × 10 ⁶	2,3 ± 0,3 × 10 ⁵	45 ± 1 × 10 ⁶	5,5 ± 0,6 × 10 ⁴
	Effektivitet _{Partikelantal}		99,8%		99,8%		95,0%		99,4 %
	Black carbon microAeth	mg/m ³	0,005 ± 0,001	4,0 ± 0,3	0,007 ± 0,001	5,6 ± 0,8	0,04 ± 0,01	1,2 ± 0,8	0,05 ± 0,01
	Effektivitet _{Black carbon}		99,9%		99,9%		96,9%		98,7%

10.5 Brugerefaringer

Partikelfiltret blev i 4. kvartal 2020 og begyndelsen af 1. kvartal 2021 udsat for langtidsafprøvnin g på en eksisterende centralvarme installation på adressen Gammelstrupvej 22, 8740 Brædstrup. Fyret var en BAXI Multiheat 1,5 pillefyr fra 2003.

BAXI Multiheat 1,5 er et af de tidligste danske pillefyr tilbage fra midten af 1990'erne. Fyret har termostatstyret forsyning af træpiller ved hjælp af en vandet snegl og luftforsyningen indstilles manuelt i nogle trin fra 30-100% luftmængde. Forbrændingsluftblæseren er også underlagt termostaten, idet strømmen til blæseren afbrydes når kedlen har nået sit set punkt. Fyret har ikke lambdasonde til automatisk luftregulering, selvom lambdasonde kunne tilkøbes som ekstraudstyr. Det betyder at forbrændingskvaliteten ikke står helt optimalt, men er empirisk justeret efter udseende af asken, lugt og slaggedannelse. Det årlige forbrug af træpiller udgør 4-5 T til opvarmning af ca. 150 kvm beboelse i grundplan.

Fyret har, modsat moderne pillefyr, ingen selvtænder, så det kører med pausefyring. Det vil sige at der i perioder hvor huset ikke kalder på varme, holdes kontinuet gang i ilden ved at sneglen kører lidt piller ind og blæseren lige kører op i omdrejninger kortvarigt. Pausefyring og opstart i yderkanterne af fyringszonen giver anledning til ret kraftig røgudvikling, der godt kan slå ned i gårdspladsen og give forbigående lugtgener.

På vinterdage, når der er konstant varmebehov, ses også en røgfane fra skorstenen, dog mindre markant, når fyret har kørt i nogle minutter. Noget af det der ses om vinteren er jo også kondenseret vanddamp fra forbrændingsreaktionen mellem brint fra træet og forbrændingsluftens indhold af ilt.



FIGUR 8. Partikelfilter indsat i stedet for røg rør.

Efter opsætning af filtret i begyndelsen af oktober var det tydeligt at der kom meget mindre røg op af skorstenen, både når fyret var i drift og ved pausefyring. Det stemmer godt overens med at partikelfilteret fjerner røgpartiklerne, uforbrændte kulbrinter, men ikke har nogen effekt på vanddampen.

Til gengæld var indeklimaet blevet dårligere i fyrrummet. Skorstenen er ikke ret høj og den yder i underkanten af det skorstenstræk, der var ønskværdigt for at sikre en effektiv bortledning af forbrændingsprodukterne. Idet røgrøret blev erstattet med partikelfilter og flexslange, steg modstanden i systemet og det kunne tydeligt mærkes at der kom flere røgpartikler ud i rummet.

Filtret i sig selv yder ikke ret meget modstand, så effekten må primært tilskrives flexslangen, der tilmed havde en skarp bøjning. (se fig. 1 ovenfor). Det blev derfor besluttet at opsætte en røgsuger på skorstenen, for at sikre et forsvarligt indeklima.

Da målingerne kom i gang, opstod der en ret høj temperatur i fyrrummet, på over 40 grader C. Det skyldtes varme fra instrumenterne og de opvarmede slanger og målesonder. Vi så at varmeudviklingen forstyrrede måleinstrumentet til NOx og et af partikelmålingsinstrumenterne. Partikelfiltret fik også udfald pga. overophedning. Styringen og de elektroniske kredsløb sad placeret på siden af filtret men indvendig i kabinettet, så de modtog varme fra røggasserne. I kombination med øget rumtemperatur, faldt filtret ud af drift og gik i en fejltilstand. Den kraftige varmeudvikling bevirkede at partikelfiltret let gik i en fejltilstand. BAXI Multiheat fyret kører med højere røgtemperatur end moderne pillefyr, men stadig lavere end brændeovne. Røgtemperaturen var ca. 170 °C i kontinuert drift, når fyret var rensat. I takt med at der

afsættes aske og sod i fyrets konvektionsdel, stiger røgtemperaturen til 220 grader. Fyret forudsættes rensat ca. 1 gang ugentligt. De fleste moderne pillefyr har selvrensning, så de ikke kræver så meget pasning og også lettere opretholder god energiudnyttelse af brændslet. Vi fik etableret en form for ventilation i rummet, så toppen blev taget af rumtemperaturen og vi fik stabiliseret driften af NOx målingen.



FIGUR 9. Målesonder og indtag til fortyndingskanal.



FIGUR 10. Fortyndingskanal, instrument rack og slange til udsugning af varm luft.

10.5.1 Event log

6. oktober 2020: Partikelfiltret opsættes og tilsluttes

2. november 2020: Målesektionen monteres

23. november 2020: Røgsuger opsættes på skorstenspipen og tilsluttes

Februar 2021: Målekampagne gennemføres

12. februar 2021: Partikelfiltret nedtages

10.5.2 Øvrige erfaringer

Partikelfiltret har en indbygget selvrensningfunktion, der normalt træder i kraft hver 8. time. Det er en form for hammer der slår belægning løs af rørets sider. Af hensyn til natteroen, blev rensningssat ned til 1 gang i døgn. Man vænnede sig nu hurtigt til bankeriet, og det havde nok været optimalt at have bibeholdt de 3 daglige rensninger.

10.5.3 Konklusion

Det var tydeligt at se at partikelfiltret fungerede og begrænsede røgfugtigheden gennem skorstenen. Når man opholdt sig ude i gårdspladsen, var der ikke længere den samme sure røglugt, der ellers har været det normale.

Vi kunne også se på mængden af støv der samlede sig under filteret, i røgekassen, at filteret virkede. Det støv der samlede sig under filteret, havde en fin lysegrå farve. Der var både helt fint støv og større klumper af slagge, antagelig noget der ved selvrensning var slået fri fra belægningen indvendig i røret.

Ud fra en subjektiv vurdering, mener vi, at partikelfiltret havde en god effekt. Hvis prisen kommer ned i et niveau under 10.000 kr., hvilket er realistisk, kunne anskaffelse af et partikelfilter være et godt alternativ til enten fyringsforbud eller krav om udskiftning af fyret, når eller hvis miljøkravene bliver skærpede. Serviceintervallet vil afhænge af faktorer som kedeltype og -model samt effekt og driftsmønster. Filteret skal efterses og evt. renses ved isolator i forbindelse med besøg af skorstensfejer. Om rensning omkring isolator/elektrode er nødvendigt hyppigere afhænger af ovenstående faktorer. Ovenstående kan måske udføres af brugeren. Det er ikke bestemt endnu. Ud fra de nuværende erfaringer er der ikke yderligere vedligeholdelseskrav. Men for at sikre en god filterydelse gælder det naturligvis, at kedlen holdes ren og renses jævnlige.



FIGUR 11. Støv opsamlet neden under partikelfiltret.



FIGUR 12. Kig ned i filtret, da det havde været slukket i en uge.

SHREK – Sekundær højeffektiv reduktion af emission fra kedler

Afbrænding af træ er en billig energikilde med lav CO₂-udledning, men afbrændingen giver samtidig anledning til partikelemissioner og udgør således en signifikant bidragsyder til den samlede luftforurening. I nærværende projekt demonstrerer projektgruppen, at det er muligt med et eftermonteret elektrostatiske filter at reducere partikeludledningen fra biomassefyrede kedler med op til 95 % - målt på både partikelmasse og partikelantal.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk