

## Koncept för att minimera bildning av fint stoft och kväveoxider

Linda Bäfver, Caroline Renström, Johan Storm



**Koncept för att minimera bildning av  
fint stoft och kväveoxider**

**Concepts for minimizing the formation of fine dust  
and nitrogen oxides**

Linda Bäfver, Caroline Renström, Johan Storm

Projektnummer A12-202



## Förord

Arbetet i denna rapport har genomförts av Pöyry SwedPower och finansierats av Värmeforsk och Energimyndigheten. Författarna vill framföra ett stort tack till tillverkare av pannor och rökgasreningsutrustning som svarat på frågor om hur de arbetar för att minimera bildning av fint stoft och kväveoxider, samt forskare på universitet och forskningsinstitut som har lämnat uppgifter till arbetet. Vidare tackas projektets referensgrupp för goda råd och kritisk granskning av rapportens innehåll. Referensgruppen bestod av:

Daniel Eklund, Tekniska Verken

Sven Hermansson, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Jonny Olsson, E.ON

Jakob Thynell, ÅF

Monika Bubholz, Sweco (projektledare för Värmeforsk projekt A12-206 om driftserfarenheter från mindre förbränningsanläggningar)

Sist tackas de interna granskarna:

Anders Kjörk, Pöyry SwedPower

Mats Saltin, Pöyry SwedPower

Linda Bäfver, Caroline Renström och Johan Storm

Göteborg, januari 2014



## Abstract

Denna studie är en genomgång av koncept för minimering av bildning av fint stoft (partiklar  $< 1 \mu\text{m}$ ) respektive kväveoxider ( $\text{NO}_x$ ), d.v.s. primäråtgärder för reduktion av emissioner. Mindre bibränsleldade rostpannor, 2-10 MW, är i fokus. Störst potential för samtidig minimering av fint stoft och  $\text{NO}_x$  har avancerad stegad förbränning.





## Sammanfattning

I december 2013 publicerades ett förslag till EU-direktiv för att begränsa emissioner från förbränningsanläggningar med tillförd effekt mellan 1 MW och 50 MW. Det innebär sannolikt skärpta krav på emissionsgränsvärden framöver. För mindre förbränningsanläggningar kan det då bli problematiskt att klara gränsvärden för utsläpp med befintlig rökgasrening och svårt att bära kostnader för investeringar i konventionell rökgasreningsutrustning. Att istället använda sig av primäråtgärder, d.v.s. åtgärder för att minska bildning av emissioner, kan vara ett kostnadseffektivt alternativ. I detta arbete har det gjorts en genomgång av koncept för minimering av bildning av stoft respektive  $\text{NO}_x$  vid bibränsleförbränning. Forskningsaktörer samt leverantörer av pannor och rökgasreningsutrustning har kontaktats för att ta fram en samlad bild av vad det finns för koncept för att minska bildning av stoft respektive  $\text{NO}_x$ . Kontakterna togs i första hand per telefon och kompletterades med kontakt per e-post. Det övergripande målet med arbetet var att bidra till kostnadseffektiv minskning av emissioner av fina partiklar och  $\text{NO}_x$  från mindre förbränningsanläggningar, 2-10 MW. Projektets målgrupp är främst ägare till mindre bibränsleeldade förbränningsanläggningar. Från arbetet dras följande slutsatser:

- **Minimering av bildning av fina partiklar (< 1  $\mu\text{m}$ ) och  $\text{NO}_x$**  kan till stor del göras med samma slags primäråtgärder:
  - **Stegad förbränning**, vilket är den teknik som har störst potential för samtidig minimering av bildning av fint stoft och  $\text{NO}_x$ , men som är dyr eftersom det i dagsläget inte finns något ombyggnadskoncept för att nå låg stoftnivå. Utgångspunkten för stegad förbränning är reducerande förhållanden i primär förbränningszon. Vidare är det viktigt med väl avskilda förbränningszoner, god styrning av luft och minimering av inläckage av luft.
  - **Rökgasåterföring**, en väl beprövad primäråtgärd för minimering av  $\text{NO}_x$ , som används av många pannstillverkare, även i segmentet 2-10 MW. Det är också en viktig komponent vid samtidig minimering av bildning av fint stoft, då det används för att hålla nere förbränningstemperatur och för att skapa reducerande förhållande.
  - **Byte till ett bränsle med lägre halter av aska och kväve**, vilket är en relativt dyr metod för att minimera bildning av fint stoft och  $\text{NO}_x$ .
  - **Optimering av processtyrning**, vilket är det som bör göras först, om bildning av emissioner skall minimeras. Både kontroll av bildning av fint stoft och  $\text{NO}_x$  skall ingå samtidigt.
- **Additiv kan användas för att minimera bildning av fint stoft**, men det är relativt lite undersökt. Kaolin är det additiv som framstår som mest intressant, eftersom det fungerat på flera olika sorters bibränslen, samt är känt för att reducera risk för slaggning av bränslebädd. Additiv har förhållandevis lågt pris.
- **Befuktning av primär förbränningszon kan användas för minimering av  $\text{NO}_x$**  (men ej för fint stoft), två nyare koncept för minimering av bildning av  $\text{NO}_x$  har identifierats som relevanta för pannor 2-10 MW.

## Summary

In December 2013 a proposal for an EU directive was published to limit emissions from combustion installations with a rated thermal input between 1 MW and 50 MW. It will probably lead to stricter requirements for emission limit values. For small combustion plants, it may become problematic to meet emission limits with existing flue gas cleaning, and difficult to bear the cost of investment in conventional flue gas cleaning. Primary measures, i.e. measures to reduce the formation of emissions, can be a cost effective alternative to flue gas cleaning. In this work, a survey of concepts for minimizing the formation of dust and NO<sub>x</sub> during biomass combustion has been performed. Universities, research institutes and suppliers of boilers and flue gas treatment system have been contacted to compile this report about concepts for reduction of the formation of dust and NO<sub>x</sub>. Contacts were made primarily by telephone and supplemented by contact by e-mail. The overall objective of this work was to contribute to the cost-effective reduction of emissions of fine particulate matter and NO<sub>x</sub> from small combustion plants, 2-10 MW. The target group is primarily owners of such plants. From the work, the following conclusions are drawn:

- **Minimizing the formation of fine particles (<1 µm ) and NO<sub>x</sub>** can to a large extent be performed with the same kind of primary measures:
  - **Staged combustion**, which is the technology with the greatest potential for simultaneous minimization of the formation of fine particulate and NO<sub>x</sub>, but expensive because in the current situation there is no re-building concept available for fine dust. The starting point for staged combustion is reducing conditions in the primary combustion zone. Furthermore, it is important with separated combustion zones, control of air and minimizing leakage of air.
  - **Flue gas recirculation**, a proven primary measure for minimizing NO<sub>x</sub>, which is used by many boiler manufacturers, also in the segment of 2-10 MW. In addition, it is an important component in the simultaneous minimization of the formation of fine dust, used for holding down the combustion temperature and controlling the combustion conditions.
  - **Changing to a fuel with lower content of ash and nitrogen**, which is a relatively expensive method to minimize the formation of fine dust and NO<sub>x</sub>.
  - **Optimization of process control**, which should be done first if the formation of emissions must be minimized. Both the control of the formation of fine dust and NO<sub>x</sub> shall be included simultaneously.
- **Additives can be used to minimize the formation of fine dust**, but it is relatively scarcely studied. Kaolin is the additive that appears to be most interesting, as it has worked on several different types of biomass, and is known to reduce the risk of slagging of the fuel bed. Additive has relatively low price.
- **Humidification of the primary combustion zone can be used for minimizing the formation of NO<sub>x</sub>**. Two newer humidification concept have been identified as relevant for boilers 2-10 MW.

# Innehållsförteckning

1	INLEDNING .....	1
1.1	BAKGRUND .....	1
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET.....	2
1.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET .....	2
1.4	MÅL OCH MÅLGRUPP .....	2
1.5	AVGRÄNSNINGAR .....	3
2	TEORI.....	4
2.1	BILDNING AV STOFFPARTIKLAR .....	4
2.2	GRUNDER FÖR ATT MINSKA BILDNING AV STOFF, SÄRSKILT FINA PARTIKLAR .....	5
2.3	BILDNING AV KVÄVEOXIDER.....	7
2.4	GRUNDER FÖR ATT MINSKA BILDNING AV NO <sub>x</sub> .....	9
2.5	AVANCERAD STEGAD FÖRBRÄNNING: SAMTIDIG MINIMERING AV FINT STOFF OCH NO <sub>x</sub> .....	9
3	GENOMFÖRANDE.....	12
4	RESULTATREDOVISNING .....	13
4.1	KONCEPT FÖR ATT MINSKA BILDNING AV FINT STOFF .....	13
4.2	KONCEPT FÖR ATT MINSKA BILDNING AV KVÄVEOXIDER .....	17
5	RESULTATANALYS - MÖJLIGHETER OCH BEGRÄNSNINGAR.....	24
5.1	MÖJLIGHETER: POTENTIAL FÖR MINSKNING AV FINT STOFF .....	24
5.2	BEGRÄNSNINGAR: TEKNIK OCH EKONOMI FÖR MINIMERING AV FINT STOFF .....	25
5.3	MÖJLIGHETER: POTENTIAL FÖR MINSKNING AV NO <sub>x</sub> .....	26
5.4	BEGRÄNSNINGAR: TEKNIK OCH EKONOMI FÖR MINIMERING AV NO <sub>x</sub> .....	27
6	SLUTSATSER .....	29
7	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING .....	30
7.1	ANLÄGGNINGSÄGARE .....	30
7.2	PANNTILLVERKARE .....	31
8	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSPÅRBEDE.....	32
9	LITTERATURREFERENSER .....	33

## Bilagor

- A KONTAKTADE AKTÖRER
- B EXECUTIVE SUMMARY



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Inom en 10-årsperiod kan det förväntas skärpta krav på emissioner från förbränningsanläggningar mindre än 50 MW, eftersom det i december 2013 publicerades ett förslag till EU-direktiv för att begränsa emissioner från förbränningsanläggningar med tillförd effekt mellan 1 MW och 50 MW [1]. För mindre förbränningsanläggningar, 1-10 MW, kan det i framtiden bli problematiskt att klara utsläppsgränsvärden med befintlig rökgasrening och svårt att bära kostnader för investeringar i konventionell rökgasreningsutrustning. Att istället använda sig av primäråtgärder, d.v.s. olika åtgärder för att minska bildning av emissioner, kan vara ett kostnadseffektivt alternativ.

### 1.1.1 Stoff

I Sverige har bibränsleeldade förbränningsanläggningar mindre än 10 MW typiskt gränsvärden eller riktvärden för utsläpp av stoft på 35-150 mg/Nm<sup>3</sup> vid 13 % CO<sub>2</sub>, men det förekommer också att gränsvärden är lägre, högre, eller saknas helt [2]. Det nya förslaget till EU-direktiv säger att emissionsgränsvärden för stoft ska vara 30 mg/Nm<sup>3</sup> för befintliga anläggningar med effekt mellan 5 och 50 MW och 45 mg/Nm<sup>3</sup> för mindre anläggningar. För nya anläggningar föreslås ännu lägre emissionsgränsvärden, 20 mg/Nm<sup>3</sup> för anläggningar med effekt mellan 5 och 50 MW och 25 mg/Nm<sup>3</sup> för mindre anläggningar. Gränsvärden i förslaget till EU-direktiv gäller vid 6 % O<sub>2</sub> (ungefär jämförbart med 13 % CO<sub>2</sub>).

Befintliga anläggningar med emissionsgränsvärde på 100 mg/Nm<sup>3</sup> eller högre har generellt endast multicykloner för stoftavskiljning. Stoftet efter multicyklon utgörs till största del av fint stoft (partiklar < 1 µm), vilket till exempel visats för mindre bibränsleeldade rostpannor i ett tidigare Värmeforskarbete [3]. Primäråtgärder för att minska bildning av stoft bör därför fokusera på bildning av fint stoft.

### 1.1.2 Kväveoxider (NO<sub>x</sub>)

Emissionsgränsvärden för kväveoxider (NO<sub>x</sub>) varierar mycket för bibränsleeldade anläggningar mellan 2 och 10 MW [2]. 100 mg/MJ är ett vanligt förekommande gränsvärde, vilket motsvarar ungefär 300 mg/Nm<sup>3</sup> vid 6 % O<sub>2</sub>, men det är också vanligt att det saknas restriktioner för NO<sub>x</sub>.

I Sverige finns goda skäl att hålla nere emissionen av NO<sub>x</sub> för anläggningar som producerar minst 25 000 MWh nyttiggjord energi per år, eftersom de omfattas av ”NO<sub>x</sub>-avgiftslagen” om miljöavgift på utsläpp av kväveoxider vid energiproduktion, SFS 1990:613[4]. Det innebär att de allra minsta anläggningarna inte berörs av NO<sub>x</sub>-avgiftssystemet och att gränsen för när en anläggning berörs av NO<sub>x</sub>-avgiftssystemet brukar motsvara 5-7 MW (beroende av respektive anläggnings drifttid). Kväveoxidavgiften är ett verktyg för att minska utsläppen av kväveoxider från förbränningsanläggningar. Den ekonomiska drivkraften är att anläggningar med små utsläpp av kväveoxid relativt sin energiproduktion kan tjäna pengar i systemet, medan

anläggningar med stora utsläpp får betala. På så vis drivs utvecklingen framåt mot lägre och lägre utsläpp av kväveoxider, eftersom det kan löna sig att minska NO<sub>x</sub>-emissionen.

För kväveoxider säger det nyligen publicerade förslaget på EU-direktiv att emissionsgränsvärdet ska vara 650 mg/Nm<sup>3</sup> för befintliga anläggningar med effekt mellan 1 och 50 MW. För nya anläggningar föreslås emissionsgränsvärdet 300 mg/Nm<sup>3</sup>. Gränsvärden i förslaget till EU-direktiv gäller vid 6 % O<sub>2</sub>.

## 1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Höga halter av partiklar i luften påverkar vår hälsa. Ju mindre partiklarna är desto längre in i kroppen kan de ta sig och orsaka inflammation med följande hjärt- och kärlproblem. Stoft från förbränningsanläggningar är en betydande källa till partiklar i luften. Bildning av grovt stoft (partiklar > 1 µm) och fint stoft (partiklar < 1 µm) sker på olika sätt. Det har gjorts flera forskningsarbeten kring bildning och emissioner av stoftpartiklar från svenska förbränningsanläggningar, se t.ex. [5][6][7][8], och det pågår även en studie med fokus på rostpannor som eldas med biobränsle [9]. Stoftet består vid goda förbränningsförhållanden i huvudsak av askämnen. Man kan därför finna mycket kunskap om stoftpartiklar från studier av alkali (kalium och natrium) och bildning av beläggningar på värmeöverförande ytor i pannor, t.ex. i Värmeforsks ramprojekt om minimering av alkalirelaterade problem i fluidbäddar [10][11][12]. Mycket forskning har gjorts kring stoftpartiklar, men det saknas en samlad bild av hur man kan tillämpa kunskapen för att minimera bildning av stoftpartiklar genom primäråtgärder.

Emissioner av NO<sub>x</sub> uppmärksammades före stoftpartiklar. I Sverige gjordes de första förbränningstekniska primäråtgärderna för att minska bildning av NO<sub>x</sub> vid tidigt 80-tal, och när miljölagstiftningen skärptes 1990 intensifierades åtgärderna [13]. Det har genomförts många forskningsarbeten kring reduktion av NO<sub>x</sub>, och NO<sub>x</sub>-avgiftssystemet har fungerat som ett incitament för förbättringar. Ett flertal arbeten har utförts på området inom Värmeforsk, se t.ex. [13][14]. Mindre anläggningar har dock ofta haft lägre prioritet, med hänsyn till ekonomi såväl som emissionskrav. Idag är NO<sub>x</sub> från mindre anläggningar aktuellt med hänsyn till ökad konkurrens om bränsle och för att kunna möta skärpta emissionskrav framöver. För mindre anläggningar är det särskilt intressant att undersöka hur man kan förhindra bildning av NO<sub>x</sub> genom primäråtgärder, eftersom det ofta innebär lägre investeringskostnader jämfört med rökgasrening. Av samma orsak är det även för fint stoft angeläget att reda ut hur man kan minimera det genom primäråtgärder i mindre anläggningar.

## 1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

I detta arbete undersöktes vilka koncept som är intressanta för att minska bildning av fint stoft respektive NO<sub>x</sub> vid biobränsleförbränning. Panntillverkare, rökgasreningsföretag och forskare kontaktades för att ta fram en samlad bild av vad det finns för koncept för att minska bildning av fint stoft och NO<sub>x</sub>.

## 1.4 Mål och målgrupp

Det övergripande målet med arbetet är att bidra till kostnadseffektiv minskning av emissioner av fint stoft och NO<sub>x</sub> från mindre förbränningsanläggningar. Denna rapport kan användas som en vägledning till hur man kan minska bildning av stoft och NO<sub>x</sub> vid

förbränning av biobränsle. Projektet har som målsättning att presentera minst tre exempel på metodik för att minska bildning av fint stoft, samt minst tre motsvarande exempel för NO<sub>x</sub>. Arbetets målgrupp är främst ägare till mindre biobränsleeldade förbränningsanläggningar (2-10 MW). En annan målgrupp är tillverkare av mindre rostpannor för biobränsle.

## 1.5 Avgränsningar

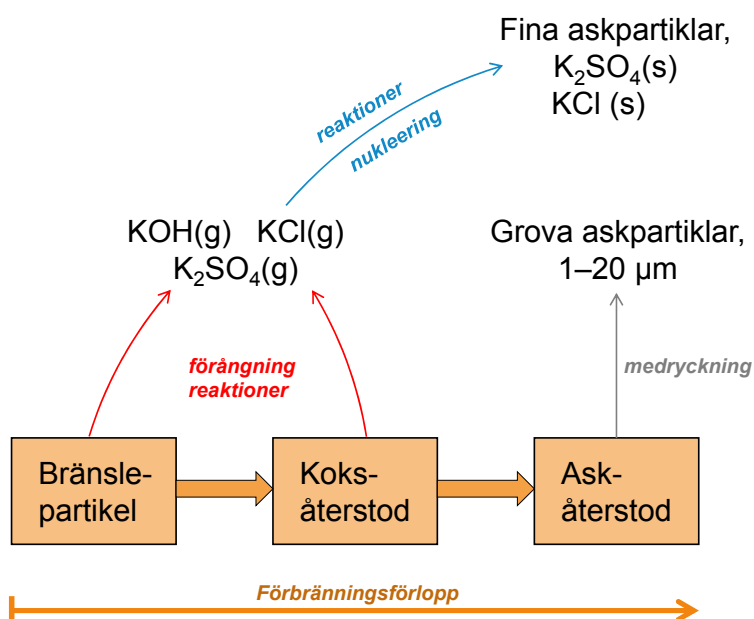
Arbetet avgränsar sig till biobränsleeldade pannor med en effekt på 2-10 MW. Rostpannor är i fokus, eftersom dessa är vanligast förekommande i det aktuella effektområdet. Pulverbrännare behandlas inte.

## 2 Teori

Reaktionsmekanismerna för bildning av stoftpartiklar och  $\text{NO}_x$  beskrivs och följs av teoretiska grunder för hur man kan minska bildning av fint stoft och  $\text{NO}_x$ . Principer för minimering av fint stoft beskrivs mer detaljerat än minimering av  $\text{NO}_x$ , eftersom de är betydligt mindre kända än motsvarande principer för att minimera  $\text{NO}_x$ .

### 2.1 Bildning av stoftpartiklar

Stoftpartiklar kan grovt delas upp i fint och grovt stoft. Fint stoft består av partiklar mindre än  $1 \mu\text{m}$ . Grovt stoft består av partiklar större än  $1 \mu\text{m}$ . Vid bra förbränningsförhållanden bildas partiklarna främst ur bränslets aska. I Figur 1 ges en översikt av bildning av askpartiklar vid förbränning av biobränsle. Vid sämre förbränningsförhållanden bildas också partiklar bestående av oförbränt material, så som sot och koks. Även bildning av askpartiklar påverkas av förbränningsförhållanden. Förbränningstemperaturen och luftfaktorn (d.v.s. kvoten mellan verklig och teoretisk luftmängd) påverkar förångningen av oorganiska komponenter, vilket i sin tur påverkar bildningen av askpartiklar.



Figur 1. Översikt av bildning av askpartiklar vid förbränning av biobränsle.

Figure 1. Overview of formation of ash particles during biomass combustion.

#### 2.1.1 Fina askpartiklar

Utgångspunkten för bildning av fina partiklar är att askelement förångats, främst kalium vid förbränning av skogsbränslen (zink och natrium bidrar också). Ju högre förbränningstemperaturen är desto mer kalium avgår. Övergång till reducerande förhållanden innebär direkt en lägre temperatur, jämfört med stökiometriska förhållanden.



Vid förbränning av biomassa börjar bildning av fina askpartiklar vid temperaturer över 900 °C (ca 950 °C vid förbränning av träpellets). Då reagerar gasformig kaliumklorid eller -hydroxid med gasformig SO<sub>2</sub> och bildar gasformig kaliumsulfat, som därefter faller ut som partiklar [15][16][17]. När temperaturen faller under 800 °C går bildning av kaliumsulfat-partiklar långsamt. Det hastighetsbegränsande steget har föreslagits vara oxidation av SO<sub>2</sub> till SO<sub>3</sub> [15][18][19] eller oxidation av sulfid till sulfat [20]. Oberoende av dessa detaljer, så börjar gasformig kaliumklorid bilda partiklar genom att kondensera på redan befintliga fina partiklar vid ca 600 °C.

Initialt bildas det ett stort antal fina partiklar, men med ökad uppehållstid blir medianstorleken för de fina partiklarna succesivt större, på grund av att fina partiklar växer genom koagulering, d.v.s. de kolliderar, slår sig ihop och bildar större partiklar.

Det bör också noteras att om förbränningen sker i en fluidiserad bädd kommer reaktioner mellan bäddmaterialet och flyktiga askkomponenter påverka bildningen av partiklar [21][22][23].

### 2.1.2 Grova askpartiklar

Grova askpartiklar bildas genom fragmentering under koksförbränningen. Bränsleaskan genomgår fragmentering antingen som mineralkorn eller som fragmentering av en brinnande kokspartikel. Askan kan smälta ihop med en del eller allt av det återstående oorganiska materialet. Den kan också genomgå betydande kemiska eller fysikaliska förändringar. De bildade grova partiklarna lämnar bränslebädden genom att ryckas med av rökgasströmmen.

## 2.2 Grunder för att minska bildning av stoft, särskilt fina partiklar

Då bildning av fina respektive grova askpartiklar sker med två helt olika förlopp fokuseras i detta arbete på att minska bildning av fina stoftpartiklar, eftersom dessa kräver mer omfattande rökgasrening än grova partiklar. För att minska bildning av fina stoftpartiklar utgår från nedanstående principer:

1. Optimering av processtyrning
2. Välja ett bränsle med låg askhalt
3. Tillföra additiv till bränsle eller bränslebädd
4. Stegad förbränning, med reducerande förhållande i bränslebädd

### 2.2.1 Optimering av processtyrning

Optimering av processtyrning för att säkerställa goda förbränningsförhållanden är en viktig grund för att minimera stoftutsläpp. Med goda förbränningsförhållanden hålls emissioner av stoft bestående av oförbränt material på en minimal nivå. Goda förbränningsförhållanden säkerställs genom optimering av temperatur, uppehållstid och omblandning. Detta är väl känt och kommer därför inte behandlas närmare i denna rapport.

### 2.2.2 Påverka bränslebäddens askhalt och asksammansättning

Vid goda förbränningsförhållanden domineras fint stoft av askpartiklar. Vid biobränsleförbränning är kalium den viktigaste komponenten för bildning av fina askpartiklar. Ju lägre askhalt bränslet har desto mindre kalium innehåller det, vilket ger lägre askhalt i bränslebädden och minskad bildning av fint stoft. Att välja ett bränsle med låg askhalt, t.ex. stamvedsflis, ger därför bildning av låg koncentration av fina stoftpartiklar.

Additiv används i dagsläget för att minska slagging, sintring, bildning av beläggningar och korrosion. Mindre utforskat och mindre känt är att additiv också kan ha positiv effekt på koncentrationen av fina stoftpartiklar [24][25][26]. Additiv kan tillföras på olika positioner i en panna. I denna rapport fokuseras på additiv som tillförs bränslet eller bränslebädden, eftersom man då får en effekt på asksammansättningen i bränslebädden. Ofta medför tillförsel av additiv en höjd masskoncentration av stoft efter bränslebädden orsakat av själva additivet, särskilt om det är av fast material. Ökningen i masskoncentration av stoft gäller grova partiklar, vilka kan avskiljas i multicyklon. Kalium, som är kritisk för bildning av fina partiklar (och beläggningar), kan fångas in av additiv och bilda svårflyktiga föreningar. De stannar i bränslebädden och lämnar sen pannan som bottenaska. Infångning av gasformigt kalium i bränslebädden används som grund för att minska bildningen av fina partiklar.

Fördelningen mellan Ca, K, Si och P sätter ramarna för vilka reaktioner som kommer att ske i en rostpanna som eldas med biobränsle. Denna fördelning kan påverkas genom val av bränsle, blandning av olika bränslen, eller tillsats av additiv. Genom termodynamiska beräkningar har grundläggande principer för vilka reaktioner som sker och vilka föreningar som är lågsmältande konstaterats [27]:

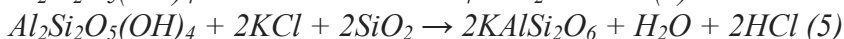
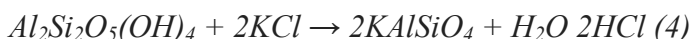
- K är mer flyktig och lågsmältande än Ca
- K-silikater skiljer sig från Ca-silikater genom att vara mer lågsmältande
- K och Ca reagerar hellre med P än med Si
- Fördelningen mellan K, Ca och Si påverkar avgången av kalium (samt slagging)
- K-fosfater är semiflyktiga och mer lågsmältande än Ca-fosfater (som är icke-flyktiga)
- Fördelning mellan K, Ca och P har betydelse för K-avgång och slagging, vilket är viktigt att tänka på om man blandar in fosforrika bränslen, t.ex. avloppsslam

Genom att tillföra additiv som innehåller Ca kan asksammansättningen och fördelningen mellan Ca, K, Si, och P påverkas så att K-avgång minskas. Ju mindre andel K askan innehåller i förhållande till Ca och Si, desto högre smältpunkt får askföreningarna som bildas.

Reaktionsförloppet påverkas också om aluminium tillförs systemet [27]. Aluminium kan t.ex. tillföras som en ingående komponent i lermineral som kaolin, eller som aluminium-malm. Tillförsel av aluminium till systemet ger en betydlig höjning av smälttemperaturen, vilket är positivt m.a.p. risk för slagging.

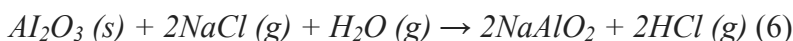
Kaolin är den mest studerade aluminiumsilikaten. Det är en lera, i huvudsak bestående av mineralet kaolinit,  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ . Kaolinit kan avlägsna gasformiga

kaliumföreningar som bildas vid förbränning genom att binda kalium till mineralet. Då bildas K-Al-silikater, vilka har högre smälttemperaturer än rena K-silikater, se t.ex. [28][29][30]. De övergripande reaktionerna mellan kaolin och kalium vid hög temperatur är (här med KCl som kaliumförening, men kan i princip också skrivas med  $K_2O$  eller KOH istället för KCl) [31]:



$KAlSiO_4$  (kalsilit) och  $KAlSi_2O_6$  (leucit) är K-Al-silikatmineral med hög smältpunkt som bildas vid förbränning av biomassa. Sammanfattningsvis så gör reaktionen mellan kaolin och kaliumklorid att man minskar mängden K som finns tillgänglig för reaktion med kiseldioxid till mer lågsmltande K-silikater och man binder K i grova askpartiklar.

Det har även gjorts försök med inblandning av aluminiummalm (bauxit). Den föreslagna reaktionen mellan aluminiummalm och alkaliklorid var ([32], citerad av [28]):



Om man tillsätter ett additiv som innehåller aluminium är fördelningen mellan K, Si och Al av stor betydelse för hur additivet fungerar. Inverkan av additivet kan studeras teoretiskt med hjälp av termodynamiska beräkningar, t.ex. för att uppskatta lämplig inblandningsgrad av additivet.

### 2.2.3 Stegad förbränning

Genom att påverka förhållandena i bränslebädden kan man minska avgången av askämnen ifrån bränslebädden och på så vis minska bildningen av fina partiklar [33]. Vanliga salter i flygaska från skogsbränslen är sulfater, klorider, karbonater, oxider samt hydroxider av kalium och kalcium. Tillgång till syre i glödbädden (primära förbränningszonen) ökar partikelbildningen genom oxidation av kalium och kalcium, samt genom ökad temperatur. Genom att minska lufttillförseln till glödbädden så att reducerande förhållanden uppnås kan man minska avgången av dessa ämnen. Minskad lufttillförsel minskar även medryckningen av fast material samt ökar koaguleringen av partiklar så att antalet minskar.

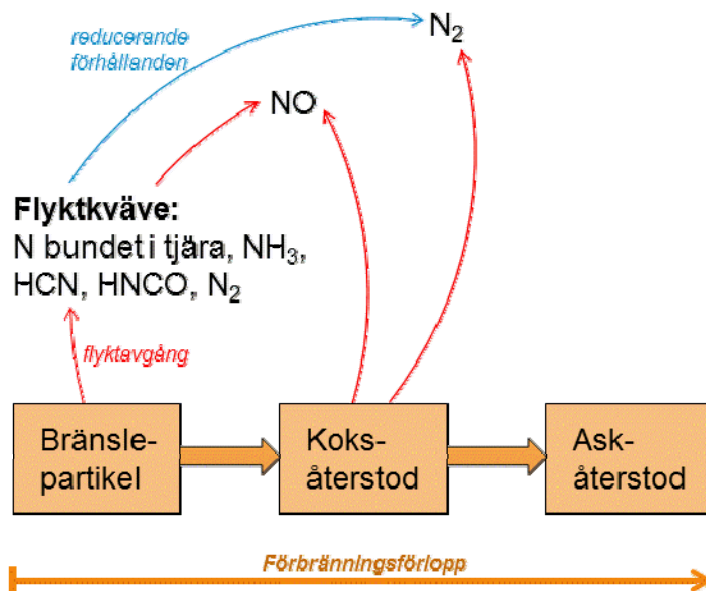
Reducerande förhållanden i primära förbränningszonen medför att mycket oförbränt material lämnar den, därför är det viktigt att pannan designas för att säkerställa god utbränning av avgasningsgaser och koksåterstod.

## 2.3 Bildning av kväveoxider

$NO_x$  bildas huvudsakligen genom tre processer; oxidation av kväve i luften (termisk  $NO_x$ ), reaktion mellan luftens kväve och syre i närvaro av kolväteradikaler (prompt  $NO_x$ ) samt ur kväve från bränslet (bränsle- $NO_x$ ).  $NO_x$  är ett samlingsbegrepp för  $NO$  och  $NO_2$  och brukar redovisas omräknat till  $NO_2$ , eftersom all  $NO_x$  blir  $NO_2$  efter tillräcklig tid i uteluften. Vid förbränning bildas dock  $NO$  initialt.

### 2.3.1 Bränsle- $\text{NO}_x$

Den största delen av bildad  $\text{NO}_x$  vid förbränning av bibränsle är bränsle- $\text{NO}_x$  [34][35], d.v.s. kvävet har sitt ursprung i bränslets kväveinnehåll. Bränslets kväveinnehåll varierar med typ, ålder och årstid, men kan även variera inom bränslet. Ofta har snabbväxande bränslen ett högt kväveinnehåll liksom bränslen, eller delar av bränslen, som är unga. I Figur 2 ges en översikt av bränsle-kvävets omvandling vid förbränning av bibränsle (utveckling av en illustration av referens [34]). När bränslet blir upphettat frigörs (vid ca 350 °C) flyktiga beståndsdelar. Under denna flyktavgång avgår kväve i form av N bundet i tjära,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCN}$ ,  $\text{HNCO}$  och  $\text{N}_2$  [36]. När dessa N-föreningar kommer i kontakt med luft reagerar de med syre och bildar  $\text{NO}$ . Vid avsaknad av luft, d.v.s. reducerande förhållanden, sker istället reaktion med kväveoxid ( $\text{NO}$ ) och kvävgas ( $\text{N}_2$ ) bildas. Efter flyktavgång sker koksförbränning. Då avgår N från bränslet i form av  $\text{NO}$  och  $\text{N}_2$ . Fördelningen emellan dessa beror bland annat på bränslepartiklarnas storlek, där det är fördelaktigt med större partikelstorlek för det ger möjlighet till reduktion av  $\text{NO}$  inuti bränslepartikeln eftersom där är reducerande förhållanden [34].



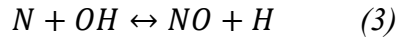
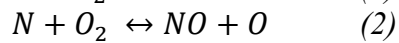
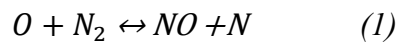
Figur 2. Översikt av omvandling av bränslekväve vid förbränning av bibränsle.

Figure 2. Overview of the conversion of fuel-nitrogen during biomass combustion.

### 2.3.2 Termisk $\text{NO}_x$

Bildning av termisk  $\text{NO}_x$  börjar vid en temperatur kring 1200 °C och ökar exponentiellt med temperaturen. Termisk  $\text{NO}_x$  är generellt sett inte ett problem i bibränsleeldade anläggningar, eftersom temperaturerna där inte är tillräckligt höga [34]. Dock kan det bildas termisk  $\text{NO}_x$  lokalt vid dålig omblandning, stråkbildning eller genomblåsning i bädden. Termisk  $\text{NO}_x$  bildas genom att luftens kväve och syre reagerar enligt

Zeldovich-mekanismen [37], vilket brukar beskrivas som (den utvidgade Zeldovich-mekanismen):



### 2.3.3 Prompt NO<sub>x</sub>

Prompt NO<sub>x</sub> brukar anses vara försumbart i förhållande till termisk NO<sub>x</sub>, samt brukar vara försumbart vid bibränsleeldade fastbränslepannor. Bildning av prompt NO<sub>x</sub> sker i flera olika steg, som börjar med att luftens kväve reagerar med kolväte från bränslet. Det initierar reaktioner som leder fram till bildning av NO. Precis som för termisk NO<sub>x</sub> behöver prompt NO<sub>x</sub> en hög temperatur för att bildas. Bildning av prompt NO<sub>x</sub> sker t.ex. i en flamma.

## 2.4 Grunder för att minska bildning av NO<sub>x</sub>

Bildning av NO<sub>x</sub> kan minimeras genom val av bränsle, vid design av panna, samt genom att optimera eller modifiera befintlig panna. De grundläggande principerna för att minimera bildning av NO<sub>x</sub> är (efter [38] samt egna tillägg):

- **Optimering av processtyrning.** T.ex. för att få låga NO<sub>x</sub>-värden vid olika laster, eller undvika stråkbildning som lokalt kan ge förhållanden som gynnar bildning av NO<sub>x</sub>.
- **Välja ett bränsle med lågt kväveinnehåll,** eftersom NO<sub>x</sub> i huvudsak bildas från bränslekväve vid förbränning av bibränsle.
- **Stegad förbränning,** d.v.s. dela upp förbränningen i olika zoner genom lufttillförsel i olika steg. Bildning av NO<sub>x</sub> hålls tillbaka genom att hålla reducerande förhållanden i förbränningszonen. Luft behövs för att säkerställa god utbränning och tillsätts i senare steg i pannan, som sekundär luft och eventuellt även tertiär luft.
- **Sänka förbränningstemperaturen** genom design eller drift som ger låg eldstadsbelastning.
- **Kort uppehållstid i zon med hög temperatur,** eftersom hög temperatur är gynnsamt för bildning av NO<sub>x</sub>.
- **Rökgasåterföring,** d.v.s. återföra en del av rökgasen till eldstaden för att sänka temperatur och syrekonzentration i bränslebädden.
- **Befuktning av primär förbränningszon,** för att minska temperatur och på så sätt hålla tillbaks bildning av NO<sub>x</sub>.

## 2.5 Avancerad stegad förbränning: Samtidig minimering av fint stoft och NO<sub>x</sub>

I det europeiska projektet FutureBioTec har man gjort experimentella studier av driftförhållande på rörlig rost för samtidig minimering av fina stoftpartiklar och NO<sub>x</sub> [39]. Utgångspunkten är avancerad stegad förbränning för en effektiv förbränning med

låg bildning av fint stoft och  $\text{NO}_x$ , vilket också innebär låga halter av oförbrända kolväten och kolmonoxid.

Avancerad stegad förbränning utgår från en eldstadsdesign med tillräcklig uppehållstid i såväl primär som sekundär förbränningszon. Det rekommenderas att förbränningstemperaturen i den primära förbränningszonen ligger mellan 900 °C och 1100 °C [39]. För bränslen med låg asksmältpunkt finns en risk för slaggning, så temperaturen skall inte vara för hög. Samtidigt skall hänsyn tas till  $\text{NO}_x$ -minimeringsreaktioner, vilket ger att förbränningstemperaturen inte bör vara lägre än 900 °C. För att klara styrning mot väl kontrollerade luftöverskott och temperaturer i olika förbränningszoner behövs god kontroll på lufttillförsel, rökgasåterföring, bra processkontrollstrategier och optimering av inställningar.

### *2.5.1 Eldstadsdesign*

Vid avancerad stegad förbränning är det viktigt att den primära förbränningszonen är väl avskild från den sekundära förbränningszonen, så att reducerande förhållanden kan hållas i primärzonen [39]. För effektiv stegad förbränning är det vidare viktigt med tillräckligt stor primärzon för att hinna få  $\text{NO}_x$ -minimeringseffekt. Uppehållstid i primärförbränningszon rekommenderas vara kring 1 s, eller åtminstone större än eller lika med 0,5 s [39]. Vidare innebär reducerande förhållanden i den primära förbränningszonen att mycket oförbränt material lämnar den. Det är därför viktigt att pannan designas så att god utbränning efter den primära zonen säkerställs, genom tillräckligt stor sekundärzon för fullständig utbränning.

### *2.5.2 Inläckage av luft*

Reducerande förhållanden motverkar både bildning av partiklar och  $\text{NO}_x$ , vilket beskrivits i tidigare avsnitt. För god kontroll på stegad förbränning bör man undvika inläckage av luft (tjuvluft), eftersom det oxiderar bränslet precis som förbränningsluft, men inte kan styras. Ofta ligger inläckage av luft under 20 %. Idealt bör detta vara lägre än 10 %. Största källorna till inläckage av luft är bränsleinmatningssystemet och askutmatningen [39].

### *2.5.3 Rökgasåterföring*

Rökgasåterföring är väl känt som en metod för att minska bildning av  $\text{NO}_x$ . I FutureBioTec konstateras att rökgasåterföring också är viktigt för att minimera bildning av fina partiklar [39], eftersom rökgasåterföring ger en bättre kontroll på temperatur i primär förbränningszon. Avseende partiklar poängteras också att rökgasåterföringen skall designas så att inte medryckning av partiklar från bädden riskeras.

### *2.5.4 Processkontrollstrategier och optimering av inställningar*

Med processtyrning skall man kunna styra luftinställningar och luftöverskott, i både primär och sekundär förbränningszon (oberoende av varandra), samt temperaturerna i primär och sekundär zon. Utifrån detta rekommenderas [39]:

- Kontinuerlig mätning av förbränningsluftsflöde och rökgasåterföringsflöde
- Korrekt kalibrerade temperaturgivare i primär respektive sekundär förbränningszon

- Inläckage av luft bör mätas upp under initial driftperiod och sedan minimeras
- Under den initiala driftperioden identifiera lägsta möjliga luftöverskott för tillräcklig utbränning

### 3 Genomförande

För att sammanställa koncept för minskning av partiklar och NO<sub>x</sub> kontaktades olika aktörer, se bilaga A. Kontakterna togs i första hand per telefon, med eventuell kompletterande kontakt per e-post. Pannleverantörer med mindre rostpannor och rökgasreningsleverantörer i Sverige kontaktades. Det togs kontakt med svenska universitet, högskolor och forskningsinstitut, med tidigare känd aktivitet på området. Därtill kontaktades några europeiska universitet, högskolor och forskningsinstitut (med tidigare känd verksamhet på området). I sökandet efter aktuell information på området gjordes också web-sökningar, vilka följdes upp av telefon- och e-postkontakt.

Först frågades om respektive aktör arbetar med koncept för minimering av NO<sub>x</sub> och/eller stoft. De aktörer som arbetar med minimering av NO<sub>x</sub> och/eller stoft har fått beskriva vad för metodik de använder. Vidare har de svarat på frågor om potential för minskning av emissioner, förutsättningar för utförande/installation av konceptet samt ungefärlig investeringskostnad och påverkan på de rörliga kostnaderna. Sist har det också getts möjlighet att skicka underlag som beskriver respektive koncept för minskning av partiklar och NO<sub>x</sub>. Leverantörer lämnade t.ex. produktblad, medan forskningsaktörerna hänvisade till vetenskapliga publikationer.

Koncepten för minimering av bildning av fint stoft respektive NO<sub>x</sub> diskuteras sedan med avseende på möjligheter och begränsningar. Med möjligheter avses potential för minskning av emissioner och med begränsningar avses tekniska och ekonomiska hinder.



## 4 Resultatredovisning

### 4.1 Koncept för att minska bildning av fint stoft

Nedan beskrivs de koncept som identifierats som relevanta att använda på 2-10 MW rostpannor för att minimera bildning av fina stoftpartiklar. Koncepten är:

1. optimering av processtyrning
2. byte av bränsle till ett med lägre askhalt
3. användning av additiven kaolin, aluminium-malm eller kalciumbaserade additiv
4. lågstoftspannor som bygger på avancerad stegad förbränning

Med optimering av processtyrning för att minska bildning av fina stoftpartiklar avses styrning för att säkerställa goda förbränningsförhållanden, d.v.s. minimera bildning av oförbrända stoftpartiklar. Optimering av processtyrning för att nå goda förbränningsförhållanden är väl känt och går därför inte igenom i denna rapport.

#### 4.1.1 Byte av bränsle

Byte till ett bränsle med lägre innehåll av aska och kalium kan minska bildningen av fint stoft, förutsatt att det från början eldas ett bränsle med högre askinnehåll (än stamvedsflis, briketter eller pellets). Potentialen för att minska emissionen av fint stoft med hjälp av bränslebyte kan dock inte fås genom direkt jämförelse av bränslenas askhalt eller kaliumhalt. Kemin för bildning av stoft är helt enkelt mer komplex än så. Här ges ett exempel för att illustrera att det ej går att uppskatta minskning av stoftemission genom jämförelse av kalium- eller askhalt i de olika bränslena. Utgångspunkten är ett tidigare Värmeforskarbete kring karakterisering av stoft och partikelstorleksfördelningar på två mindre rostpannor [3]. Jämförelse av två driftfall nedströms cyklon vid eldning av en mix grot/briketter respektive briketter visade på en minskning av fint stoft på ca 40 %, vid 75 % reduktion av K-halten i bränslet (och 88 % reduktion av askhalten) [3].

#### 4.1.2 Aluminiumsilikater, t.ex. kaolin, som additiv

Under förbränning i villabrännare har man observerat en signifikant minskning av fina partiklar vid tillsats av kaolin till bark- och grotpellets [24], respektive till havrekärnor [40][41][42]. Minskningen var ca 20 % vid förbränning av träpellets och ca 40 % vid barkpellets [24]. Vid eldning av havrekärnor med kaolin som additiv har man också visat att slaggning försvann, som en konsekvens av att lågsmältande K-rika silikater minskade [40]. Kostnaden för kaolin, exklusive transport, är ca 2000 SEK/ton (220 €/ton) [27].

#### 4.1.3 Aluminium-malm som additiv

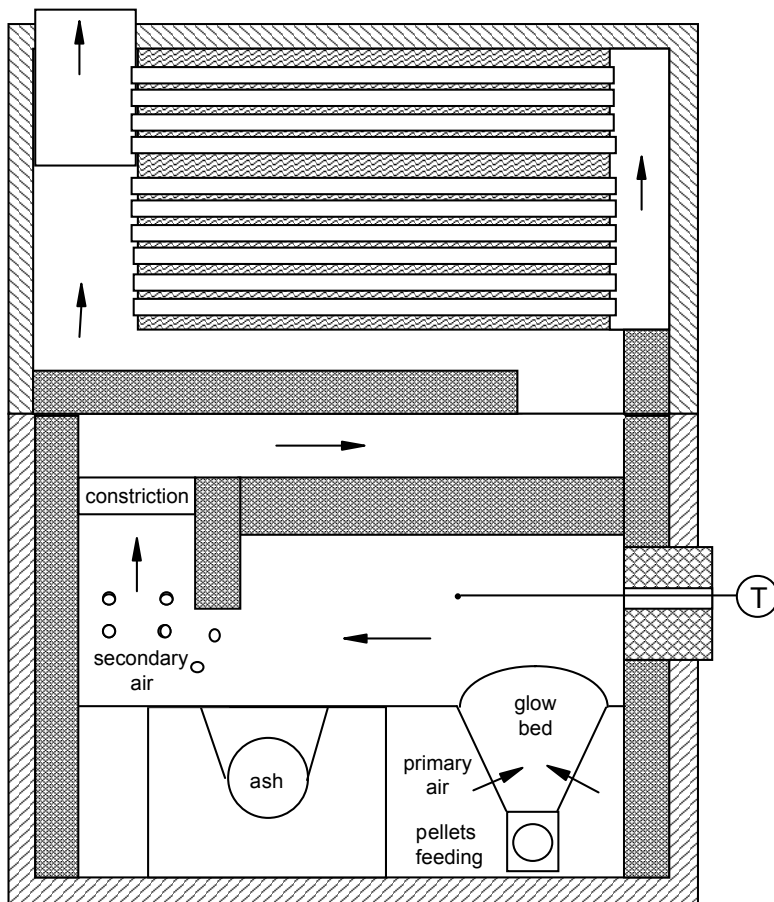
Aluminium som förbränningsadditiv har undersökts vid förbränning av avfall i fluidiserad bädd [32]. Aluminium-malmen bauxit (Al-oxid/hydroxid) användes. Man konstaterade att bauxit var mindre effektiv än lermineralet kaolin på att fånga alkali. Kostnad för bauxit (exkl. transport) är 2600 – 3400 SEK/ton (405 – 501 USD/ton) [43].

#### 4.1.4 Kalciumbaserade additiv

Tillsats av 1-2 % kalkspat ( $\text{CaCO}_3$ ) till bibränsle har vid experimentella studier indikerat en minskning av fina partiklar, samtidigt med en ökning av grova partiklar, vid förbränning av biomassa, bark och skogsavfall [24]. Kalk- och kalkstensadditiv har också visats fungera för infångning av kalium för att förhindra slagging i bädd, genom bildning av en högttemperatursmälta av kalcium/magnesium-kaliumsilikater [44][45] och -fosfater [46]. Priset på kalkspat/kalcit, exklusive transport, ligger runt 500 SEK/ton (44-66 EUR/ton) [27].

#### 4.1.5 Stegad förbränning: Lågstoftspanna för pellets

I Schweiz finns lågstoftspannan Pellinno, som är designad för pellets. Pellinno finns i effektområdet 0,1-1 MW och tillverkas av Müller AG Holzfeuerungen [47]. Effektområdet är egentligen något lägre än avsett i detta arbete och pannan erbjuds i dagsläget inte som ombyggnadskoncept. Pannan beskrivs ändå här eftersom principerna även skulle kunna appliceras på något större pannor. Bakgrunden till lågstoftspannan är ett forskningsarbete och en pilotpanna på 0,1 MW [33]. Pellinno ger stoftemissioner kring  $10 \text{ mg/Nm}^3$  (vid 13 %  $\text{O}_2$ ), vilket är betydligt lägre stofthalt än vad som erhålls med konventionell teknik. I Figur 3 visas en bild av pannan, som är en stoker där bränslet matas fram underifrån.



Figur 3. Lågstoftpanna för pellets [33].

Figure 3. Low dust boiler for pellets [33].

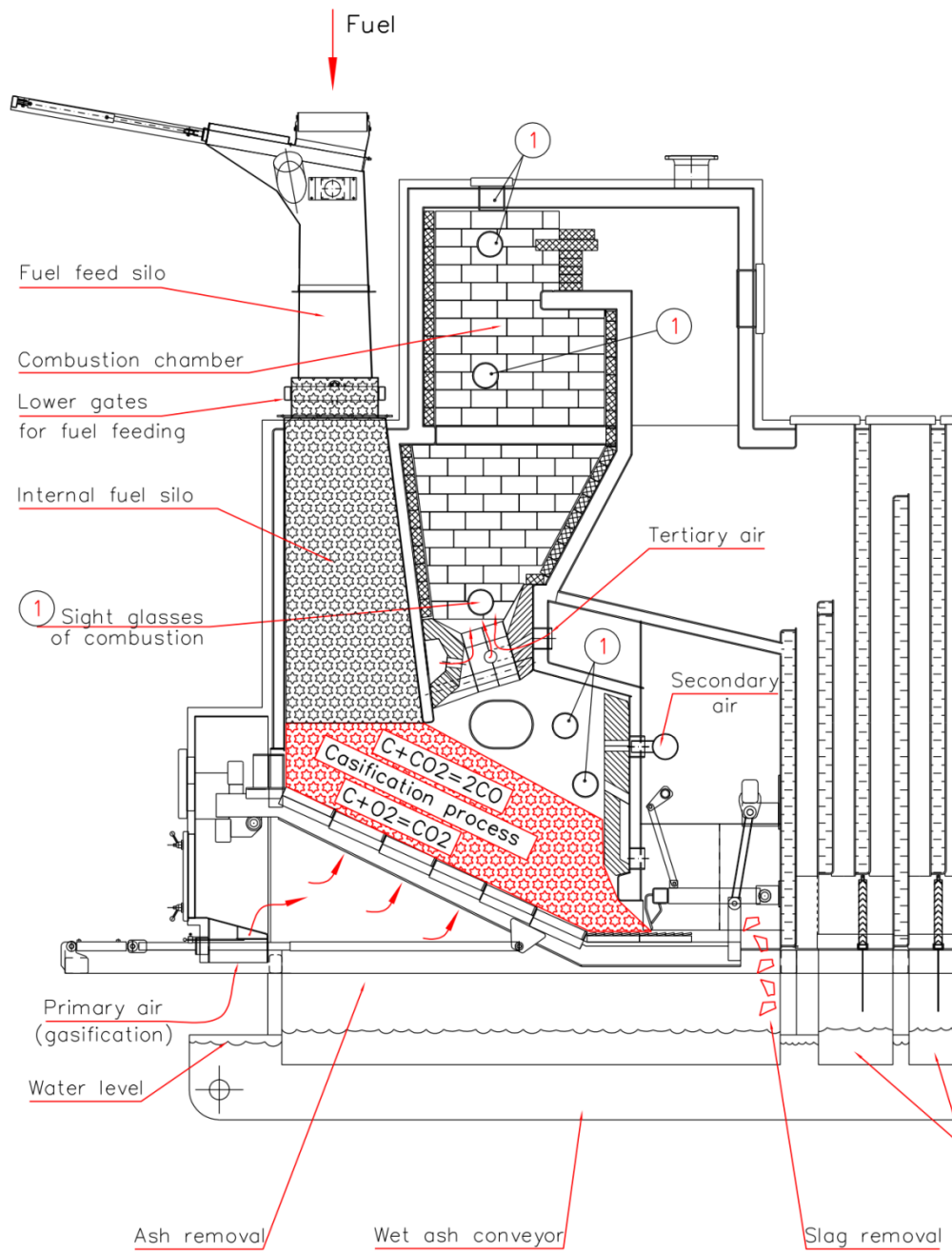
Principerna för lågstoftspannan togs fram i forskningsarbetet och är [33]:

- $\lambda$  i glödbädden (primära förbränningszonen) = 0,2 – 0,4, beroende på typ av bränsle.
- $\lambda_{\text{tot}} = 1.3 - 1.6$
- Klart åtskiljda förbränningszoner. Först en glödbäddszon med reducerande förhållanden och sen en sekundärluftzon för god utbränning. Avståndet mellan glödbädd och sekundärluftstillförsel måste vara tillräckligt stort, så att man inte får någon sekundärluftseffekt i glödbädden.
- En nästan fullständig gasfasoxidation måste åstadkommas, genom god omblandning mellan brännbara gaser och luft, vid tillräckligt hög temperatur (850 °C). En indikation att förbränningsförhållandena är tillräckligt bra är CO-halter lägre än 100 mg/Nm<sup>3</sup> (vid 13 % O<sub>2</sub>), vilket också indikerar god utbränning av kolväten.
- I glödbädden måste en minimumtemperatur upprätthållas för att säkerställa en fullständig omvandling av det fasta bränslet. I lågstoftspannan var 650 °C tillräckligt hög temperatur i glödbädden

#### 4.1.6 Stegad förbränning: Panna Laka Y

Tvåstegspannan Laka Y erbjuds i dagsläget inte som ombyggnadskoncept, men den beskrivs här ändå, eftersom den finns kommersiellt tillgänglig i segmentet 2-10 MW. Den finns för ett brett spann av biobränslen, med fukthalter på 10-55 %. Pannan Laka Y tillverkas av Laatikattila Oy i Finland. Kostnad för en ny panna på 7 MW är drygt 10 MSEK (1.2 MEUR) och för en panna på 3 MW, 4,4 MSEK, visst installationsarbete tillkommer. Utgående stofthalt blir lägre än 10 mg/MJ.

En principiell bild av pannan Laka Y visas i Figur 4. Den kallas förgasningsförbränningspanna av tillverkaren. Designen av pannan har sin utgångspunkt i patent. Pannan är även utrustad med en patenterad rökgasrenare, men den behövs främst vid uppstart och nedeldning. Pannan utgörs av två zoner, först förgasning och därefter förbränning av gaserna. De två zonerna är väl separerade, vilket håller avgången av flyktiga stoftbildande ämnen nere. I den första zonen är lufttillförseln låg i glödbädden. Därtill sker viss tillförsel av förvärmad sekundärluft, som styrs med utgångspunkt i O<sub>2</sub>-halten i utgående rökgas. Därefter går gaserna in i andra zonen där en förbränningsprocess med tertiär luft äger rum [48]. Pannan liknar en konventionell rostpanna och har en rörlig rost. Glödbädden är tjock (typiskt kring 0,8 m) och fungerar som ett slags filter i vilket flyktiga askämnen fångas in och sen lämnar pannan som bottenaska. Den låga syretillförseln till den primära förbränningszonen och att glödbädden fungerar som ett filter håller nere stofthalten i gaserna som går in till den sekundära förbränningszonen. Slutligen skall också noteras att pannan Laka Y även ger låga NO<sub>x</sub>-utsläpp (< 30 mg/MJ) [49].



Figur 4. Lågstoftpanna Laka Y [48][50].

Figure 4. Low dust boiler Laka Y [48][50].

## 4.2 Koncept för att minska bildning av kväveoxider

I detta avsnitt beskrivs de koncept som identifierats som intressanta för att minimera bildning av  $\text{NO}_x$ :

1. Optimering av processtyrning
2. Byte till ett bränsle med lägre kvävehalt
3. Stegad förbränning
4. Rökgasåterföring
5. Befuktning av primär förbränningszon

### 4.2.1 Optimering av processtyrning

Möjligheterna att optimera processtyrningen är ofta det första man tittar på när man vill sänka en pannas emissioner, enligt flera av de utfrågade. Detta eftersom optimering av processtyrning är ett relativt litet ingrepp. En studie där man går igenom förbränningsförhållande och processtyrning kostar i runda tal 100 000 SEK [51]. Genom att effektivisera processtyrningen kan förbränningsprocessen optimeras. En optimerad processtyrning håller lufttillförsel, bränsletillförsel, temperatur, uppehållstid och omblandning i rätta proportioner rent förbränningsmässigt. Med jämna temperaturer minskar risken för stråkbildning och högtemperaturzoner och därmed bildning av  $\text{NO}_x$ . Med en bättre omblandning och minimering av luftöverskott hålls reaktionen mellan bränslekväve och syre nere. Att effektivisera processtyrningen innebär i stora drag att effektivisera avläsning, återkoppling samt manöverdon som styr tillförsel av bränsle och luft till rätta proportioner och mängder. Ett exempel på en förbättringsåtgärd i en befintlig panna är att kunna ställa in automatisk spjällreglering av primärluft zonvis vid varierande last, vilket på äldre pannor ofta styrs manuellt [52].

För att minimera bildning av  $\text{NO}_x$  från en panna kan styrning av primär- och sekundärluft förbättras med hjälp av lambdasensorer, enkla syresensorer, på flera positioner i pannan. I ett tidigare arbete har det till exempel studerats att använda åtta lambdasensorer på olika positioner med syfte att undvika stråkbildning och  $\text{NO}_x$ -bildning i större biobränsleeldade rostpannor [53]. I mindre rostpannor är det vanligt med en lambdasensor för kontroll av  $\text{O}_2$ -halt [54].

Ett annat exempel på förbättring för att minska bildning av  $\text{NO}_x$  är att optimera antal givare och deras placering. Alternativt kan ett effektivare givarsystem, som bildanalys, installeras. Med bildanalys läses förbränningsprocessen in optiskt och ur en bild kan en dator hämta och tolka detaljerade mätvärden som form, täthet och ljusstyrka i olika zoner av pannan, och efter det styra lufttillförsel och rökgasåterföring för goda driftsförhållanden och minimering av  $\text{NO}_x$ -bildning. Bildanalys förekommer på större förbränningsanläggningar, men så vitt författarna känner till så finns det i dagsläget inte installerat på pannor 2-10 MW.

Beroende på hur väl processtyrningen av en panna fungerar, varierar potentialen för sänkning av  $\text{NO}_x$  genom optimeringsåtgärder. Optimering av processtyrning är också en viktig åtgärd då förutsättningarna för förbränningen förändras, som till exempel vid ombyggnad till en mer avancerad stegrad lufttillförsel eller vid byte av bränsle.

### 4.2.2 Byte av bränsle

Eftersom kvävet i bränslet är den största källan till NO<sub>x</sub>-bildning kan bildningen begränsas genom att välja ett bränsle med lågt kväveinnehåll. I regel är kväverika bränslen billigare och man får därmed räkna med högre bränslekostnader vid byte till ett bränsle med lägre kväveinnehåll. Som exempel ligger medelpriset för skogsflis på 198 SEK/MWh (och för biprodukter som bark och sågverksavfall på 172 SEK/MWh), tredje kvartalet 2013 [55]. Bränslen med lägre kväveinnehåll har generellt högre kvalitet. Att byta till ett bränsle med högre kvalitet kan medföra en sänkning av vissa rörliga kostnader. Högre bränslekvalitet minskar slitage och beläggning vilket minskar underhållsbehovet. Den högre kvaliteten medför också en stabilare panndrift vilket kan minska driftpersonalbehovet. Dessutom uppnås sannolikt en högre verkningsgrad, vilket ger en ökning av intäkter per tillförd MW bränsle. I Tabell 1 visas några vanliga bränslen med medianvärden på kväveinnehållet.

Tabell 1. Kväveinnehåll i några vanliga bränslen, från Värmeforsk Bränslehandbok [56]

Table 1. Nitrogen contents in some common fuels [56]

Bränsle	Kvävehalt (%)
Sågspån/stamvedsflis	0,05
Bark (barr)	0,31
GROT	0,4
Salix	0,5
Bark (björk)	0,8
Returträ	1,2
Torv	2,2

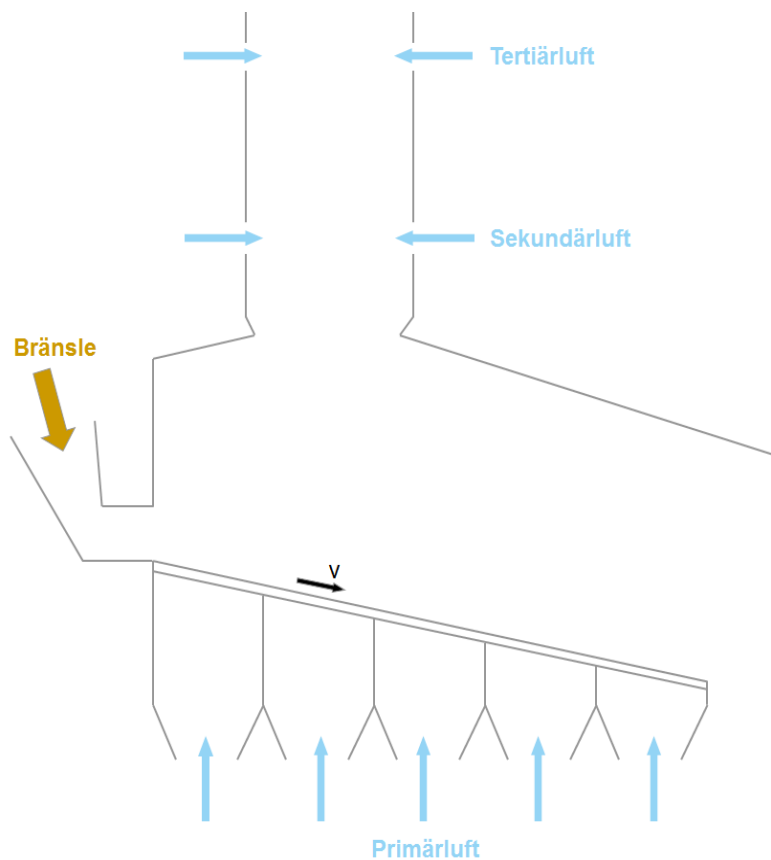
Beroende på vilket bränsle anläggningen är byggd för och vilket bränsle man byter till kan en mer eller mindre omfattande ombyggnad av bränslehanteringssystemet krävas. Det är viktigt att det bränsle man byter till inte avviker för mycket mot det bränsle pannan är designad för vad gäller fukthalt och värmevärde. Om skillnaden är för stor kan det resultera i att temperaturen i pannan blir för hög eller att bränslet inte går att elda.

### 4.2.3 Stegad förbränning: Stegvis lufttillförsel

Rostpannor i segmentet 2-10 MW brukar ha stegad förbränning genom stegvis lufttillförsel. En principiell skiss av en rostpanna med stegvis lufttillförsel visas i Figur 5. Primärluft tillförs så att ett understökiometriskt förhållande uppstår. Överluft, d.v.s. sekundärluft och eventuell tertiärluft, tillförs högre upp i pannan. Summering av de olika luftflödena ger det totala luftöverskottet, vilket är överstökiometriskt. Genom att begränsa tillgången på syre initialt minskar risken för existerande kväve att reagera med syret för bildning av NO<sub>x</sub>. Samtidigt finns en påtaglig risk att CO-halten ökar om temperaturen inte är tillräcklig. Överluftssystemet måste då klara av att hålla nere CO-halten utan att NO<sub>x</sub> bildas högre upp i pannan.

På en del pannor kan det passa att förbättra överluftssystemet för att minska bildning av NO<sub>x</sub> [52]. Då erhålls en bättre omblandning och även lägre CO och högre pannverkningsgrad. En förbättring av överluftssystemet kan innebära ändringar för

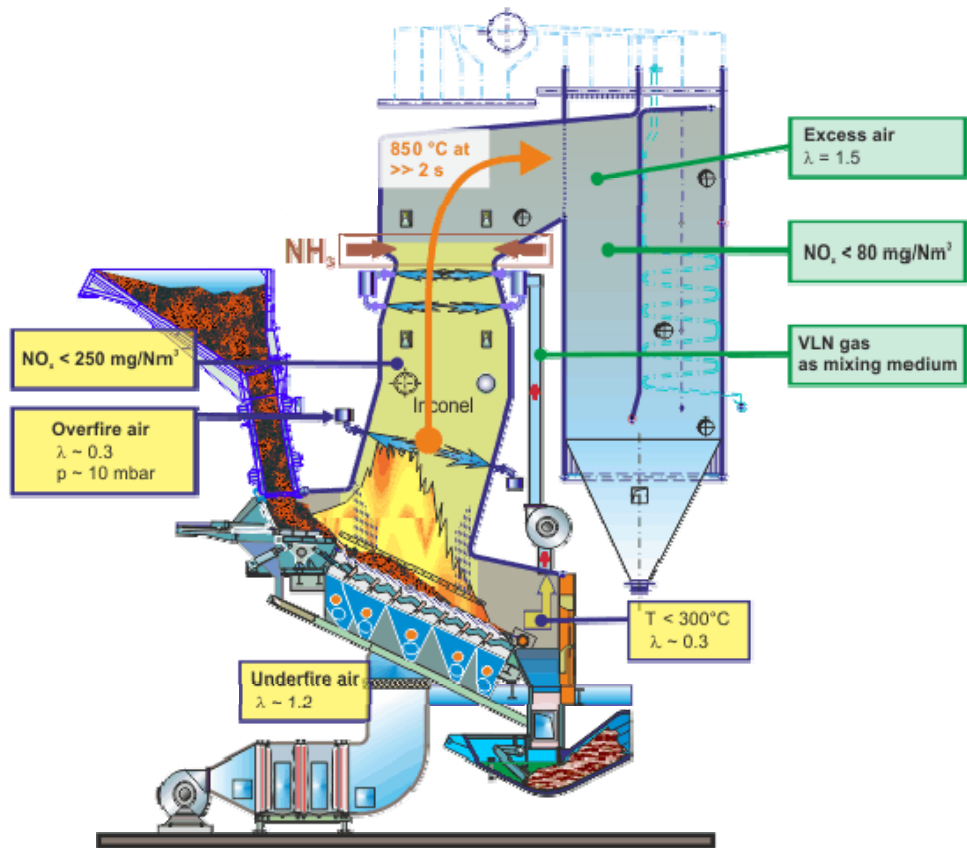
tillsättning av överluft m.a.p. mängd och tryck, eller införsel av temperaturreglering, samt installation av extra dysor placerade mer optimalt i eldstaden. Beroende på pannans utformning kan även en ombyggnad behövas.



Figur 5. Principskiss av rostpanna med stegad lufttillförsel.

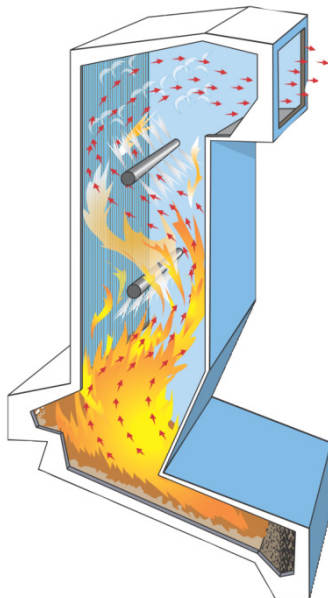
Figure 5. Grate boiler with air staging.

Om pannan inte är byggd med stegvis lufttillförsel från början krävs en omfattande ombyggnad av ugnen då nya dysor ska sättas in. Det kan då vara praktiskt och kostnadseffektivt att samordna en sådan ombyggnad med planerad ommurning. Utöver dysor ska också nya kanaler, isolering, fläkt och reglering installeras. Den nya fläkten måste byggas in i styrsystemet, vilket därefter måste optimeras för de nya luftnivåerna. En mer komplex variant av stegrad lufttillförsel för större rostpannor är VLN (Very Low  $\text{NO}_x$ ), som erbjuds av panntillverkaren MARTIN GmbH. Rent principiellt skulle konceptet kunna tillämpas på mindre rostpannor. En översikt på VLN visas i Figur 6. I VLN-processen extraheras överflödiga förbränningsgaser över den bakre delen av rosten samtidigt som trycket på sekundärluften sänks [57]. Detta ger en lägre syretillgång i nedre delen av eldstaden, vilket minskar bildningen av  $\text{NO}_x$ . Den extraherade gasen återförs till övre delen av eldstaden där den förbättrar omblandningen av rökgaserna.



Figur 6. Rostpanna med VLN-process [57].

Figure 6. Grate boiler with the VLN process [57].



Figur 7. Ecotube installerad i rostpanna [58].

Figure 7. Ecotube installed in a grate boiler [58].



Ecotube är ett annat exempel på en mer komplex stegvis lufttillförsel och i konceptet ingår också rökgasåterföring (se avsnitt 4.2.4 Rökgasåterföring). Konceptet medför en omfattande installation och riktar sig därför till större pannor. Rent principiellt skulle det även kunna installeras i en mindre panna. En översiktsbild av konceptet visas i Figur 7. Genom Ecotuberna som installeras på olika nivåer mitt i pannan tillsätts förbränningsluft och återförd rökgas på ett sätt som bryter de laminära flödena i pannan och därmed fås en förbättrad omblandning. En bättre omblandning minskar riskerna för lokala högtemperaturzoner samtidigt som det minskar behovet av luftöverskott och därmed håller nere bildningen av  $\text{NO}_x$ . (Systemet kan också kombineras med SNCR för ytterligare sänkning av  $\text{NO}_x$ -utsläppen.)

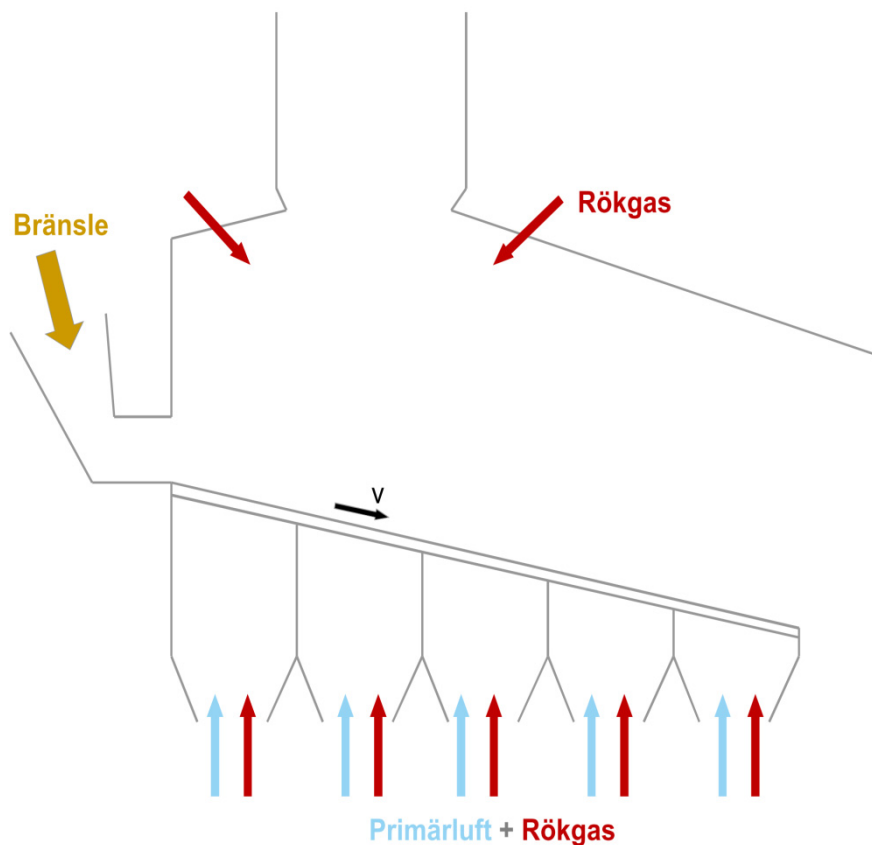
#### 4.2.4 Rökgasåterföring

De flesta panntillverkare arbetar med rökgasåterföring som en metod för att minimera bildning av  $\text{NO}_x$ . För mindre pannor tillsätts rökgasåterföringen oftast i överluften, det är inte lika vanligt med rökgasåterföring under rosten. Var det är lämpligast att installera dysor för rökgasåterföringen i en specifik panna beror på driftsförhållandena i just den pannan och vad som är orsaken till hög  $\text{NO}_x$ -halt i pannan, men även var det är praktiskt och ekonomiskt genomförbart att göra installationen. Generellt sett är det vanligaste att man installerar rökgasåterföringen i primär- och sekundärluftsregistren eller enbart i sekundärluftsregistret.

Ombyggnad för rökgasåterföring kostar, grovt uppskattat, 1 - 3 MSEK för en panna på 10 MW, enligt uppgifter från kontaktade pannleverantörer (Bilaga A). En principiell bild av en rostpanna med rökgasåterföring visas i Figur 8. Genom att återföra en del av rökgasen till pannan minskar koncentrationen av syre vilket minskar  $\text{NO}_x$ -bildningen. Rökgasåterföringen innebär också att det totala rökgasflödet genom pannan blir större vilket medför att den värme som bildas vid förbränningen tas upp av en större gasmängd och temperaturen blir lägre än den hade varit om endast förbränningsluft hade tillförts till pannan. Rökgasåterföring kan också motverka lokala högtemperaturzoner genom att bidra till mer homogen blandning av brännbara gaser och förbränningsluft genom pannan. Med rökgasåterföring installerad kan  $\text{NO}_x$ -utsläppen sänkas till 60-80 mg/MJ vid eldning av flis och ned till 40 mg/MJ vid eldning av pellets (enligt uppgifter från pannleverantörer, se Bilaga A).

Installation av rökgasåterföring innebär att nya dysor, kanaler, isolering och rökgasåterföringsfläkt ska på plats. I samband med installationen krävs även nya givare och omprogrammering av styrsystemet samt optimering av detta med avseende på återförd rökgas, primärluft och sekundärluft.

För att installera rökgasåterföring i sekundärluftregistret krävs en omfattande ombyggnad av ugnen då dysorna ska sättas in, eftersom murverket måste tas bort och rör bockas undan. För att göra det praktiskt och kostnadseffektivt är det därför bra att utföra installationen i samband med annan planerad ommurning [59].



Figur 8. Rostpanna med rökgasåterföring.

Figure 8. Grate boiler with flue gas recirculation.

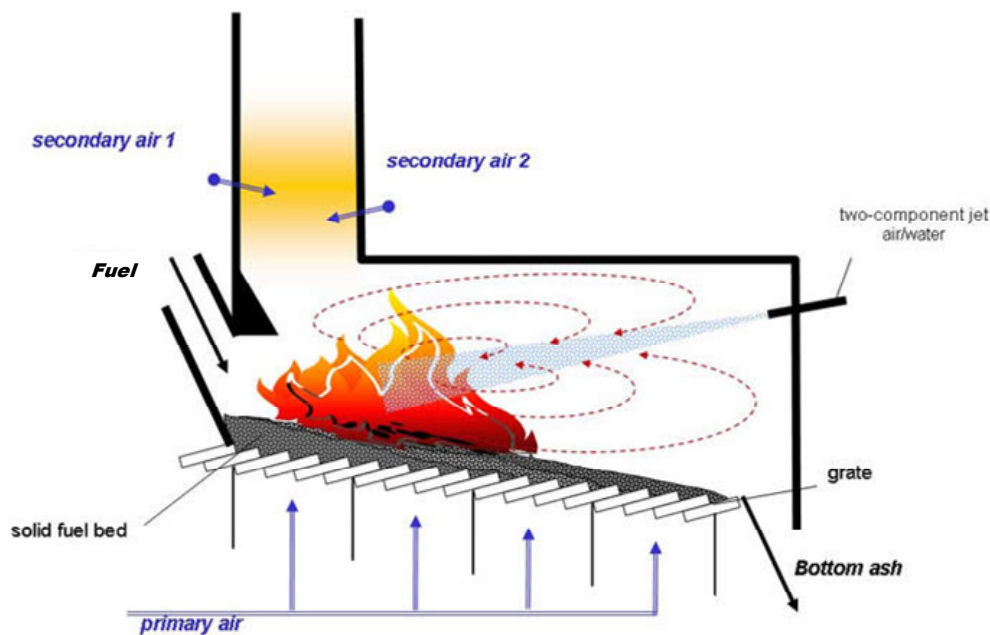
#### 4.2.5 Befuktning: Diminjektorer

Clean Combustion erbjuder ett koncept med speciellt utformade diminjektorer [60] för att skapa en anpassad dimma för att optimera och reglera fukthalten i förbränningszonen. Injektorerna placeras i luftsektionen vid bränsleinmatningen och vattendimma doseras in när förbränningstemperaturen blir för hög. Med regleringen av fukthalten kan man hålla nere förbränningstemperaturen och därmed  $\text{NO}_x$ -bildningen. Konceptet innebär installation av injektorer samt rör för vatten respektive tryckluft. Om inte anläggningen redan har en kompressor med tillräcklig kapacitet krävs också installation av sådan.

Denna teknik har än så länge endast installerats i full skala på en panna, där resultatet blev en sänkning av  $\text{NO}_x$ -emissionerna med ca 50 % samt betydligt minskade skador och angrepp på murverk samtidigt som kapaciteten kunde ökas i pannan. (Clean Combustions teknik används nu även i integrerade SNCR system för optimering av urea-/ammoniakkoncentration vilket leder till kraftigt sänkta  $\text{NO}_x$ -värden och kemikaliekostnader för anläggningen. Lösningen ingår i "Zero Emission Vision" konceptet och hyrs ut som funktionslösning med integrerade styrsystem.) Investeringkostnad för installation av diminjektorer för reglering av fukthalt är cirka 200 000 – 500 000 SEK exklusive styrsystem.

#### 4.2.6 Befuktning: CUTNOX

I Figur 9 visas  $\text{NO}_x$ -reduktionskonceptet CUTNOX [61]. Principen är att en stråle av vatten och luft sprutas in till den nedre delen av eldstaden. Insprutning görs från pannans bakvägg och syftar till att öka omblandningen i eldstaden. Oreagerat syre från koksförbränningen blandas med oförbränt material. På så sätt får förbränningen ett extra luftsteg och bildningen av  $\text{NO}_x$  minskar. Vattnet som sprutas in har också en reducerande effekt på förbränningstemperaturen, vilket minskar bildningen av  $\text{NO}_x$ . Med hjälp av god reglering av vatteninsprutningen erhålls också en stabilare förbränningstemperatur.



Figur 9. CUTNOX [62].

Figure 9. CUTNOX [62].

Investeringskostnaden för en installation av CUTNOX är cirka 1 MSEK för en panna på 10 MW [63] och blir dyrare om det även krävs processoptimering före installationen. CUTNOX är installerad på en avfallseldad rostpanna (Renova, Göteborg) och man har uppmätt en minskningspotential av  $\text{NO}_x$  på ca 30 %. Konceptet CUTNOX innebär installation av en eller flera spraylansar, ”booster”-fläkt, samt rördragning och inkoppling till vatten samt tryckluft. Det kan också behövas uppgradering av tryckluftskompressor, beroende på vad som finns på anläggningen i utgångsläget.

## 5 Resultatanalys - Möjligheter och begränsningar

I detta kapitel diskuteras möjligheter och begränsningar för att minimera bildning av fina partiklar och  $\text{NO}_x$ . För fint stoft visar denna studie att stegad förbränning har högst potential för emissionsminskning, men det är också dyrast eftersom konceptet i dagsläget inte finns som ombyggnadskoncept och därmed innebär investering i en helt ny panna. Billigaste konceptet (förutom optimering av processtyrning) är att använda additivet kaolin, men man kan då endast få en mindre minskning av fint stoft, jämfört med stegad förbränning. För  $\text{NO}_x$  har emissionsminskning genom avancerad stegad förbränning högst potential, men de koncepten är så pass dyra att de riktar sig till större pannor. Något lägre minskning av  $\text{NO}_x$ , till mer rimlig kostnad, kan erhållas genom användning av rökgasåterföring, eller koncept som bygger på befuktning av primär förbränningszon.

### 5.1 Möjligheter: Potential för minskning av fint stoft

Utgående från föregående kapitel har Figur 10 skapats, för att ge en översikt av potentialen att minimera fint stoft med de olika koncepten. Utgångspunkt är en panna där det eldas ett biobränsle med relativt hög askhalt, t.ex. grot, eftersom man då har relativt hög bildning av fint stoft beroende på hög askhalt. Potentialen för varje koncept gäller under förutsättning att inget av de andra koncepten redan är utfört.

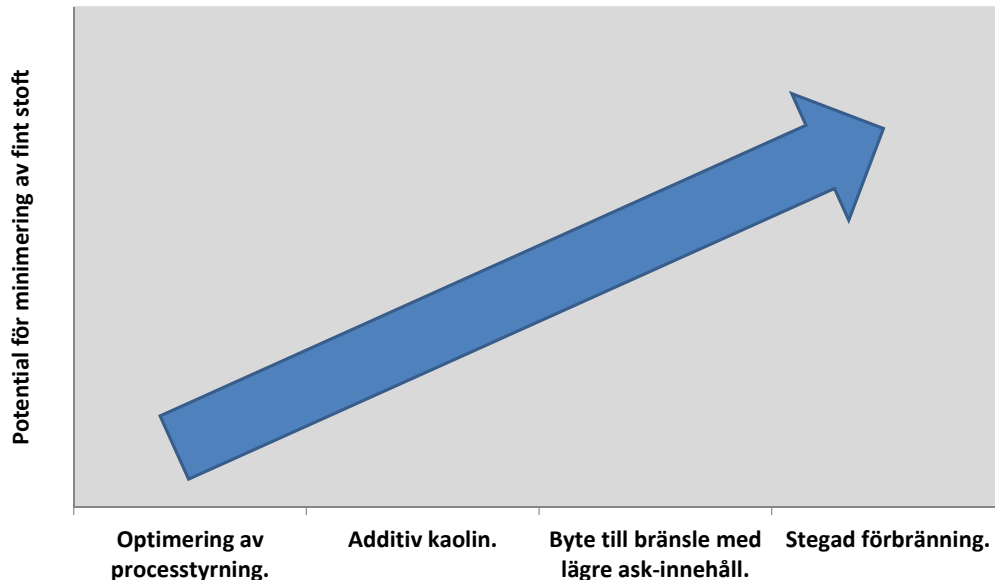
Om bildning av fint stoft skall minimeras är det lämpligt att starta med att se över processtyrningen. Optimering av processtyrning med avseende på god utbränning medför minimering av bildning av sotpartiklar (och högre verkningsgrad). I Figur 10 har optimering av processtyrning satts som lägst potential för minimering av bildning av fint stoft, eftersom det antas att sådan optimering redan är gjord, i enskilda fall kan dock minskningspotentialen vara betydligt högre.

Tillsats av additiv är en möjlighet för att minska bildning av fint stoft genom att binda upp kalium i grövre partiklar, för vilka det räcker med multicyklon för stoftavskiljning. Additiv för minimering av bildning av fint stoft är relativt oprövat vid kontinuerlig drift, men det har studerats i ett flertal forskningsstudier. Kaolin är mest undersökt och i Figur 10 ses det ha något högre potential än processoptimering. Tidigare arbete har visat på en minskningspotential på 20 % vid förbränning av träpellets och 40 % vid barkpellets [24]. Tillsats av kaolin är också väl känt för att ha en positiv effekt på bränslebädden, genom att minska risken för slagning.

Byte av bränsle till ett med lägre askinnehåll kan minska bildningen av fint stoft, förutsatt att det från början eldas ett bränsle med högre askinnehåll (än stamvedsflis, briketter eller pellets). Hur stor potentialen är för bränslebyte indikeras genom jämförelse av kaliuminnehållet i respektive bränsle, eftersom kalium är den viktigaste komponenten i fint stoft vid förbränning av biobränsle. Observera dock att ask-kemin är komplex och att andelen kalium som bildar fina partiklar skiljer sig mellan olika bränslen, så att jämföra kaliumhalter i olika bränslen rakt av ger inte minskningspotentialen för fint stoft. En mer handfast väg att gå tillväga för att få potentialen för emissionsminskning av fint stoft är att jämföra stoftemissioner vid

proveldning av olika bränslen. I sådana fall görs mätning av stoft nedströms multicykloner, där fint stoft dominerar.

Stegad förbränning bedöms ha högst potential för minimering av fint stoft, eftersom det finns åtminstone ett pannkoncept med så låg stoftemission som 10 mg/MJ, utan stoftrening. För pellets identifierades också ett pannkoncept med ännu lägre stoftemission. Dock har det i denna studie inte identifierats några ombyggnadskoncept för minimering av bildning av fint stoft.



Figur 10. Minskingspotential för emissioner av fina stoftpartiklar från rostpannor, 2-10 MW, vid förbränning av biobränsle med hög askhalt (t.ex. grot).

Figure 10. Potential for lowering the emissions of fine particles from grate boilers, 2-10 MW, at combustion of biomass with high ash content (e.g. forest residue).

## 5.2 Begränsningar: Teknik och ekonomi för minimering av fint stoft

De olika koncepten för att minska bildning av fint stoft skiljer sig åt såväl tekniskt som ekonomiskt. Begränsningar för respektive koncept diskuteras utifrån:

- Ekonomi: investeringskostnad och rörliga kostnader
- Tekniska krav som konceptet ställer på befintlig anläggning
  - Platsbehov
  - Processtyrning (modifiering)
  - Bränslehanteringssystem (modifiering)
  - Övriga specifika krav på anläggningens utformning
- Teknikens mognadsgrad, d.v.s. hur beprövad den är

Optimering av processtyrning är en relativt enkel åtgärd, till förhållandevis låg kostnad. Dock kan man inte förvänta sig någon större effekt av optimering av processtyrning, såvida anläggningen inte har problem med CO och oförbränt material. Vid optimering

av styrsystem bör också helhetsperspektiv beaktas, d.v.s. hänsyn tas till andra emissioner, särskilt NO<sub>x</sub>.

Användning av additiv eller byte till bränsle med lägre askinnehåll medför en förändring av förbränningskemin och på så vis en minskning av fint stoft. Proveldning med tillsats av kaolin till bränslet är förhållandevis enkelt, men kontinuerlig drift med additivtillförsel kräver investering av lämplig kringutrustning för hantering av additivet och kontinuerliga kostnader för additiv. Kontinuerlig drift med tillförsel av kaolin för minimering av fint stoft är också relativt obeprövat. Tillförsel av additiv kräver också att det finns plats för kringutrustning och att styrning av additivtillförsel integreras i processtyrningssystem. Byte till bränsle med lägre askinnehåll bör inte medföra några särskilda behov mer än viss optimering av processtyrning, förutsatt att det nya bränslet inte skiljer sig för mycket från tidigare bränsle avseende fraktionsfördelning, fukthalt och värmevärde. Dock kan man räkna med att lägre askhalt i bränslet medför högre rörliga kostnader för bränsle.

Stegad förbränning finns idag inte tillgängligt som ett ombyggnadskoncept, så det innebär en investering i en ny panna. Idag innebär därför stegad förbränning för minimering av fint stoft en högre kostnad än övriga koncept. Ombyggnadskoncept för stegad förbränning för minimering av bildning av fint stoft är oprövat, men har högsta potential för emissionsminskning av fint stoft.

### 5.2.1 Kostnad

Investeringskostnaden för lågstoftspannan Laka-Y på 7 MW uppgår till ca 10 MSEK. Med en antagen årlig produktion på 42 000 MWh och en avskrivningstid på 10 år, ger en omräkning av investeringskostnaden till en rörlig kostnad, enligt

$$\frac{I}{a * Q} \left[ \frac{SEK}{\text{år} * MWh/\text{år}} = \frac{SEK}{MWh} \right]$$

Där  $I$  = Investeringskostnad [SEK],  $a$  = avskrivningstid [år],  $Q$  = Årlig värmeproduktion [MWh/år].

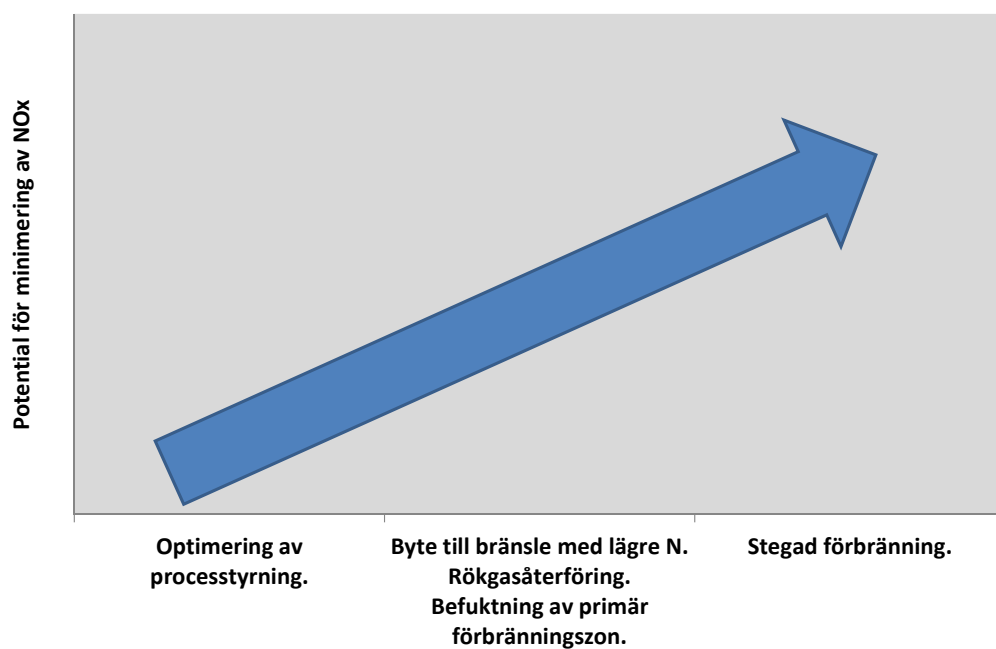
Det medför en kostnad på nästan 24 SEK/MWh. Inte oväntat blir kostnaden per producerad mängd värme betydligt högre för installation av en ny panna än de rörliga kostnaderna för att använda kaolin som additiv som är 3,8 SEK/MWh (exklusive transportkostnader).

## 5.3 Möjligheter: Potential för minskning av NO<sub>x</sub>

För att ge en översikt av potentialen att minimera NO<sub>x</sub> för de olika koncepten har Figur 11 skapats, utgående från föregående kapitel. Bilden utgår ifrån en panna där det eldas ett biobränsle med relativt hög halt av kväve, t.ex. grot, eftersom man då har relativt hög bildning av NO<sub>x</sub>. Potentialen för varje koncept gäller under förutsättning att inget av de andra koncepten redan är utfört. I praktiken kan flera olika koncept kombineras, t.ex. processoptimering, rökgasåterföring och stegad förbränning. Effekten av kombinationer av olika koncept är olämpligt att generalisera, eftersom det då blir än mer anläggningsspecifikt. Därför diskuteras inte kombinationer av olika koncept.

För att minimera bildning av  $\text{NO}_x$  är det lämpligt att starta med att säkerställa god processtyrning. Optimering av processtyrning med avseende på god omblandning och rätt temperatur är särskilt viktigt för att minimera bildning av  $\text{NO}_x$ . I Figur 11 har optimering av processtyrning satts som lägst potential för minimering av bildning av  $\text{NO}_x$ , eftersom det antas att sådan optimering redan är gjord. I enskilda fall kan minskningspotentialen dock vara betydligt högre.

En steg till ytterligare minimering av  $\text{NO}_x$  kan tas genom att byta till bränsle med lägre innehåll av kväve, installera rökgasåterföring eller installera ett system för befuktning av primär förbränningszon, vilka typiskt ger 30-50 % lägre bildning av  $\text{NO}_x$ . Ännu högre potential för minimering av bildning av  $\text{NO}_x$  har stegad förbränning.



Figur 11. Minskingspotential för  $\text{NO}_x$ -emissioner från rostpannor, 2-10 MW, vid förbränning av biobränsle med hög kvävehalt (t.ex. grot).

Figure 11. Potential for lowering  $\text{NO}_x$  emissions from grate boilers, 2-10 MW, at combustion of biomass with high nitrogen content (e.g. forest residue).

#### 5.4 Begränsningar: Teknik och ekonomi för minimering av $\text{NO}_x$

De olika koncepten för att minska bildning av fint stoft skiljer sig åt såväl tekniskt som ekonomiskt. Precis som för emissionsminskningskoncepten för fint stoft diskuteras begränsningar för respektive koncept för  $\text{NO}_x$ -minimering utifrån:

- Ekonomi: investeringskostnad och rörliga kostnader
- Tekniska krav som konceptet ställer på befintlig anläggning
  - Platsbehov
  - Processtyrning (modifiering)
  - Bränslehanteringssystem (modifiering)
  - Övriga specifika krav på anläggningens utformning
- Teknikens mognadsgrad, d.v.s. hur beprövad den är

Optimering av processtyrning är en relativt enkel åtgärd, till förhållandevis låg kostnad. Vid optimering av processtyrning för mindre bildning av NO<sub>x</sub> är det viktigt att inte suboptimera, utan att ha ett helhetsperspektiv så att emissioner av CO och oförbränt material beaktas samtidigt som NO<sub>x</sub>.

Byte till bränsle med lägre innehåll av kväve medför en minskad bildning av NO<sub>x</sub>, eftersom NO<sub>x</sub> i huvudsak bildas ur bränslets kväve vid förbränning av biobränsle. Ett sådant bränslebyte bör inte medföra några särskilda behov av förändringar på anläggningen mer än viss optimering av processtyrning, förutsatt att det nya bränslet inte skiljer sig för mycket från tidigare bränsle avseende fraktionsfördelning, torrhalt och värmevärde. Konsekvensen blir främst högre rörliga kostnader för bränsle.

Rökgasåterföring för minimering av bildning av NO<sub>x</sub> är väl beprövad teknik. Installation av rökgasåterföring innebär ett visst behov av plats för rökgasåterföringsfläkt och rördragningar. Det innebär också att processtyrning behöver optimeras med hänsyn till rökgasåterföring och att kontrollen på temperatur blir bättre tack vare rökgasåterföringen.

Befuktning av primär förbränningszon minimerar bildning av NO<sub>x</sub> genom bättre styrning av förbränningstemperatur och ökad omblandning. Installation av koncept med befuktning av primär förbränningszon innebär plats för rördragningar, samt ett behov av modifiering av processtyrningssystemet (och eventuellt en extra fläkt).

Stegad förbränning genom stegvis lufttillförsel, som primär- respektive sekundärluft, är i princip praxis. Syftet med stegad förbränning är att ha väl avskilda zoner för olika förbränningssteg för minimering av NO<sub>x</sub>-bildning. Mer avancerad stegad förbränning inkluderar även tertiärluft och väl avskilda förbränningszoner. Det är platskrävande, men framförallt är tillämpningen begränsad för mindre pannor på grund av höga investeringskostnader. Ombyggnad för mer avancerad stegad förbränning kräver även modifiering av processtyrningssystem.

#### **5.4.1 Kostnader**

För en panna på 10 MW är investeringskostnader för installation av rökgasåterföring och CUTNOX 1–3 MSEK respektive ca 1 MSEK. Med en antagen årlig värmeproduktion på 60 000 MWh per år ger en omräkning av investeringskostnaden, enligt metoden ovan (avsnitt 5.2.1), en kostnad på 1,7–5,1 SEK/MWh respektive 1,7 SEK/MWh. Detta kan jämföras med de ökade bränslekostnaderna för att byta bränsle från grot, 171 SEK/MWh, till flis, 203 SEK/MWh [55], vilket innebär en ökad bränslekostnad på 32 SEK/MWh. En investering på upp till 3 MSEK anses som en relativt stor kostnad för en panna på 10 MW. Med hänsyn till detta blir det tydligt att användning av det dyrare bränslet flis innebär en mycket hög kostnad.



## 6 Slutsatser

Efter kontakt med forskningsaktörer samt leverantörer av pannor och rökgasreningsutrustning dras följande slutsatser:

- **Minimering av bildning av fina partiklar (< 1 µm) och NO<sub>x</sub>** kan till stor del göras med samma slags primäråtgärder:
  - **Stegad förbränning**, vilket är den teknik som har störst potential för samtidig minimering av bildning av fint stoft och NO<sub>x</sub>, men som är dyr eftersom det i dagsläget inte finns något ombyggnadskoncept för att nå låg stoftnivå. Utgångspunkten för stegad förbränning är reducerande förhållanden i primär förbränningszon. Vidare är det viktigt med väl avskilda förbränningszoner, god styrning av luft och minimering av inläckage av luft.
  - **Rökgasåterföring**, en väl beprövad primäråtgärd för minimering av NO<sub>x</sub>, som används av många panntillverkare, även i segmentet 2-10 MW. Det är också en viktig komponent vid samtidig minimering av bildning av fint stoft, då det används för att hålla nere förbränningstemperatur och för att skapa reducerande förhållande.
  - **Byte till ett bränsle med lägre halter av aska och kväve**, vilket är en relativt dyr metod för att minimera bildning av fint stoft och NO<sub>x</sub>.
  - **Optimering av processtyrning**, vilket är det som bör göras först, om bildning av emissioner skall minimeras. Både kontroll av bildning av fint stoft och NO<sub>x</sub> skall ingå samtidigt.
- **Additiv kan användas för att minimera bildning av fint stoft**, men det är relativt lite undersökt. Kaolin är det additiv som framstår som mest intressant, eftersom det fungerat på flera olika sorters biobränslen, samt är känt för att reducera risk för slaggning av bränslebädd. Additiv har förhållandevis lågt pris.
- **Befuktning av primär förbränningszon kan användas för minimering av NO<sub>x</sub>** (men ej för fint stoft), två nyare koncept för minimering av bildning av NO<sub>x</sub> har identifierats som relevanta för pannor 2-10 MW.

## 7 Rekommendationer och användning

Utgående från slutsatser och resultat ges rekommendationer till anläggningsägare och panntillverkare som är intresserade av att minska bildning av fint stoft och NO<sub>x</sub> vid förbränning av biobränsle i en mindre rostpanna.

### 7.1 Anläggningsägare

Vid ett behov eller intresse (ekonomi, miljöpolicy, etc.) av att minska fint stoft och NO<sub>x</sub> är det en bra möjlighet att undersöka om det finns lämpliga primäråtgärder för att nå lägre emissionsnivåer. För att nå lägre emissioner av fint stoft och NO<sub>x</sub> rekommenderas:

- En nulägesanalys, d.v.s. en genomgång av pannan med avseende på vid vilka driftförutsättningar det uppkommer problem med emissioner. Se över:
  - Processtyrning. Kan man få en förbättring genom optimering, eller genom förändring m.a.p. placering av givare, typ av givare, etc.?
  - Vilka bränslen som eldas, är pannan designad för det som eldas idag? Behöver någon del av bränsleinmatning bytas ut eller byggas om för att elda annat bränsle än vad pannan designades för?
  - Status för ev. befintliga primäråtgärder, t.ex. rökgasåterföring, hur fungerar de för de bränslen som eldas idag, kan de förbättras, t.ex. genom bättre processtyrning, eller ombyggnad.
  - Hur stora inläckage av luft det finns och var luften kommer in. Gör mätningar och analys för att få bättre kontroll av luftfaktorn i olika förbränningszoner.
- Klargöra hur mycket emissionerna skall minskas.
- Beroende på hur stor emissionsminskning som skall genomföras rekommenderas för minimering av bildning av fint stoft (i prioriteringsordning):
  1. Optimering av processtyrning
  2. Proveldningar med tillsats av kaolin (gärna också billigare lermineral)
  3. Proveldningar av bränsle med lägre askinnehåll
  4. Ombyggnad till lågstoftpanna, investering i ny lågstoftpanna, eller förbättra stoftrening, t.ex. med elfilter eller slangfilter
- Beroende på hur stor emissionsminskning som skall genomföras rekommenderas för minimering av bildning av NO<sub>x</sub> (i prioriteringsordning):
  1. Optimering av processtyrning
  2. Koncept som bygger på rökgasåterföring eller befuktning av primär förbränningszon, alternativt att byta bränsle till ett med lägre N-innehåll
  3. Koncept som bygger på stegad förbränning, eller mer avancerade koncept som kombinerar stegad förbränning med fler metoder, t.ex. rökgasåterföring

## 7.2 Panntillverkare

För att optimera panndesign med avseende på minimering av bildning av fint stoft och  $\text{NO}_x$  rekommenderas:

- Stegad förbränning med reducerande förhållanden i primär förbränningszon. Primär förbränningszon skall vara väl avskild från sekundär förbränningszon.
- Lufttillförseln skall vara kontrollerad för att kunna styra processen väl. Inläckage av tjuvluft skall minimeras.
- Rökgasåterföring skall användas för att få en god kontroll på temperatur i olika zoner och för att öka omblandning. Samtidigt skall återföringen av rökgas göras på ett sätt så att medryckning av fint stoft undviks.
- God processkontrollstrategi och optimering av inställningar är viktigt för att nå låga emissioner. Med processtyrning skall man kunna styra temperaturer och luftöverskott, i både primär och sekundär förbränningszon, oberoende av varandra [39].

## 8 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Kraven på emissioner av stoft, NO<sub>x</sub> och SO<sub>2</sub> blir troligen hårdare framöver, särskilt för stoft. Det har gjorts flera forskningsarbeten kring bildning och emissioner av stoftpartiklar vid förbränning av biobränsle, så kunskapsläget är relativt gott. Tillgång till lösningar för att kostnadseffektivt minimera bildning av stoftpartiklar vid förbränning av biobränsle är dock begränsat. Det finns enstaka lågstoftspannor, men inga ombyggnadskoncept för att reducera bildning av stoft har identifierats i detta arbete. För att nå lägre emissioner av stoft behövs mer tillämpad forskning och utveckling av ombyggnadskoncept för minimering av bildning av stoft och nya pannor med låga stoftutsläpp. Annars är alternativet att komma ned i stoftutsläpp med hjälp av sekundär stoftrening, vilket är förhållandevis dyrt för pannor i segmentet 2-10 MW.

## 9 Litteraturreferenser

- [1] Proposal for a directive of the european parliament and of the council on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants, 2013-12-18, Europeiska kommissionen, 2013/0442 (COD)
- [2] Bubholtz, M., Bucht, F. och Kvist, H.; ”Drifterfarenheter från små förbränningsanläggningar”, Värmerforsk rapport 1245, maj 2014
- [3] Persson, H., Johansson (idag Bäfver), L., Tullin, C., Österberg, S., Johansson, M. and Leckner, B.; ”Partikelemissioner från biobränsleeldade mindre fjärrvärmecentraler”, Värmerforsk rapport 758, december 2001
- [4] Lag (1990:613) om miljöavgift på utsläpp av kväveoxider vid energiproduktion, Svensk författningssamling nr 1990:613, Miljödepartementet, utfärdad 1990-06-14, ändrad t o m 2011:1338
- [5] Johansson (idag Bäfver), L. S., Leckner, B., Tullin, C., Sjövall, P.; “Particle emissions from biomass combustion in small combustors”, Biomass and Bioenergy, 25, s. 435-446, 2003
- [6] Boman, C., Nordin, A., Boström, D. and Öhman, M.; "Characterization of Inorganic Particulate Matter from Residential Combustion of Pelletized Biomass Fuels", Energy & Fuels 18: 338-348, 2004
- [7] Strand, M., Bohgard, M., Swietlicki, E., Gharibi, A. and Sanati, M.; "Laboratory and Field Test of a Sampling Method for Characterization of Combustion Aerosols at High Temperatures", Aerosol Science and Technology 38(8), s. 757-765, 2004
- [8] Wiinikka, H. and Gebart, R.; "The Influence of Air Distribution Rate on Particle Emissions in Fixed Bed Combustion of Biomass", Combustion Science and Technology 177(9), s. 1747 – 1766, 2005
- [9] Analys av heta rökgaser, delprojekt Partikelbildning i rosterpanna, pågående arbete vid Linné-universitetet, kontaktperson Michael Strand
- [10] Davidsson, K., Eskilsson, D., Gyllenhammar, M., Herstad Svärd, S., Kassman H., Steenari B-M. och Åmand, L-E.; ”Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem; Ramprogram”, Värmerforsk rapport 997, december 2006
- [11] Gyllenhammar, M., Herstad Svärd, S., Davidsson, K., Åmand, L-E., Steenari B-M., Folkesson, N., Pettersson, J., Svensson, J-E., Boss, A., Johansson (idag Bäfver), L. och Kassman, H.; ”Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem Etapp 2; Ramprogram”, Värmerforsk rapport 1037, december 2007
- [12] Herstad Svärd, S., Åmand, L-E., Bowalli, J., Öhlin, J., Steenari, B-M., Pettersson, J., Svensson, J-E., Karlsson, S., Larsson, E., Johansson, L-G., Davidsson, K., Bäfver, L. och Almark, M.; ”Åtgärder för samtidig minimering av alkalirelaterade driftproblem Etapp 3; Ramprogram”, Värmerforsk rapport 1167, januari 2011
- [13] Hjalmarsson, A-K.; ”Skandinaviska anläggningar där åtgärder vidtagits för att minska NO<sub>x</sub>-emissionerna”, Värmerforsk rapport 427, mars 1992

- 
- [14] Schuster, R.; "Förbränningstekniska åtgärder för emissionsbegränsning i skogsbränsle-eldad panna med rörlig rost, rökgasåterföring och befuktning av förbränningsluft", Värmeforsk rapport 387, november 1990
- [15] Christensen, K. A., Stenholm M. and Livbjerg H.; "The formation of submicron aerosol particles, HCl and SO<sub>2</sub> in straw-fired boilers." *Journal of Aerosol Science* 29(4), s.421-444, 1998
- [16] Jiménez, S. and Ballester, J.; "Formation and Emission of Submicron Particles in Pulverized Olive Residue (Orujillo) Combustion." *Aerosol Science and Technology* 38(7), s. 707-723, 2004
- [17] Wiinikka, H., Gebart, R., Boman, C., Boström, D., Nordin A. and Öhman, M.; "High-temperature aerosol formation in wood pellets flames: Spatially resolved measurements.", *Combustion and Flame* 147(4), s. 278-293, 2006
- [18] Glarborg, P. and Marshall, P.; "Mechanism and modeling of the formation of gaseous alkali sulfates.", *Combustion and Flame* 141(1-2), s. 22-39, 2005
- [19] Jiménez, S. and Ballester, J.; "Formation of alkali sulphate aerosols in biomass combustion.", *Fuel* 86(4), s. 486-493, 2007
- [20] Hindiyarti, L., Frandsen, F., Livbjerg, H., Glarborg P. and Marshall, P.; "An exploratory study of alkali sulfate aerosol formation during biomass combustion.", *Fuel* 87(8-9), s.1591-1600, 2008
- [21] Latva-Somppi, J., Kauppinen, E. I., Valmari, T., Petri, A., Gurav, A. S., Kodas, T. T. and Johanson, B.; "The ash formation during co-combustion of wood and sludge in industrial fluidized bed boilers.", *Fuel Processing Technology* 54(1-3), s. 79-94, 1998
- [22] Valmari, T., Lind, T. M., Kauppinen, E. I., Sfiris, G., Nilsson K. and Maenhaut, W.; "Field Study on Ash Behavior during Circulating Fluidized-Bed Combustion of Biomass. 1. Ash Formation.", *Energy Fuels* 13(2), s. 379-389, 1999
- [23] Lind, T., Kauppinen, E. I., Hokkinen, J., Jokiniemi, J. K., Orjala, M., Aurela, M. and Hillamo, R.; "Effect of Chlorine and Sulfur on Fine Particle Formation in Pilot-Scale CFBC of Biomass.", *Energy Fuels* 20(1), s. 61-68, 2006
- [24] Boman, C., Boström D. and Öhman, M.; "Effect of Fuel Additive Sorbents (Kaolin and Calcite) on Aerosol Particle Emission and Characteristics during Combustion of Pelletized Woody Biomass", In the proceedings of the 16<sup>th</sup> European Biomass Conference & Exhibition, 2-6 June 2008, Valencia, Spain.
- [25] Bäfver, L., Rönnbäck, M., Leckner, B., Claesson, F. and Tullin, C.; "Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of limestone or kaolin", *Fuel Processing Technology* 90(3), s. 353-359, 2009
- [26] Bäfver, L., Boman, C. and Rönnbäck, M.; "Reduction of particle emissions by using additives", *Proceedings from the Central European Biomass Conference, January 26-29, 2011, Graz, Austria*
- [27] Boman, C., Boström, D., Fagerström, J., Öhman, M., Näzelius, I. and Bäfver, L.; "Fuel additives and blending as primary measures for reduction of fine ash particle emissions – State of the art", *Final report within era-net-project FutureBioTec, 7 September 2012*

- 
- [28] Coda, B., Aho, M., Berger, R. and Hein, K. R. G.; "Behavior of Chlorine and Enrichment of Risky Elements in Bubbling Fluidized Bed Combustion of Biomass and Waste Assisted by Additives", *Energy Fuels*, 2001, s. 680-690.
- [29] Uberoi, M., Punjak, W. A. and Shadman, F.; "The kinetics and mechanism of alkali removal from flue gases by solid sorbents", *Prog. Energy Combust. Sci.* 16, 1990, s. 205-211.
- [30] Tran, K-Q., Steenari, B-M., Iisa, K. and Lindqvist, O.; "Capture of potassium and cadmium by kaolin in oxidizing and reducing atmospheres", *Energy Fuels* 18, 2004, s. 1870-1876.
- [31] Steenari, B-M. and Lindqvist, O.; "High-temperature reactions of straw ash and the anti-sintering additives kaolin and dolomite", *Biomass Bioenergy* 14, 1998, s. 67-76.
- [32] Lee, S. H.; Johnson, I. J. Removal of Gaseous Alkali Metal Compounds from Hot Flue Gas by Particulate Sorbents. *Eng. Power* 1980, 102, 397-402.
- [33] Oser, M. and Nussbaumer, T; "Low particle furnace for wood pellets based on advanced staged combustion", In the proceedings of Science in thermal and chemical biomass conversion, August 2004, Victoria BC, Canada
- [34] Samuelsson, J., Tullin, C. och Leckner, B.; "Omvandling av bränslekväve i en biobränslebädd", SP Sverige Provnings- och Forskningsinstitut/Chalmers Tekniska Högskola, slutrapport för projekt P13085-2, Borås, februari 2006
- [35] Nussbaumer, T.; "Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction", *Energy & Fuels* 2003, 17, s. 1510-1521
- [36] Samuelsson, J., Tullin, C., Leckner, B.; "Conversion of Nitrogen in a Fixed Burning Biofuel Bed", Chalmers University of Technology, Thesis for the degree of licentiate of engineering, 2006
- [37] Glassman, I.; "Combustion (third edition)", Academic press Inc, 1996, s 362-377.
- [38] Alvarez, H.; "Energiteknik del 1", upplaga 3:5, Studentlitteratur, 2006, s 621
- [39] Obenberger, I., Biedermann, F., Brunner, T., Sippula, O., Jokiniemi, J., Finnan, J., Carroll, J., Boman, C. and Niklasson, F.; "Design and operation concepts for low-emission biomass grate furnaces based on advanced air staging", report within the scope of the ERA-NET Bioenergy project "FutureBioTec", October 2012
- [40] Boström, D., Grimm, A., Boman, C., Björnbom, E. and Öhman, M.; "Influence of Kaolin and Calcite Additives on Ash Transformations in Small-Scale Combustion of Oat", *Energy Fuels* 23, 2009, 5184–5190.
- [41] Tissari, J., Sippula, O., Kouki, J., Vuorio, K. and Jokiniemi, J.; "Fine particle and gas emissions from the combustion of agricultural fuels fired in a 20 kW burner", *Energy Fuels* 22, 2008, s. 2033-2042
- [42] Bäfver, L. S., Rönnbäck, M., Leckner, B., Claesson, F. and Tullin, C.; "Particle emission from combustion of oat grain and its potential reduction by addition of limestone or kaolin", *Fuel Process. Technol.* 90, 2009, s. 353-359
- [43] <http://www.indmin.com/MarketTracker/197171/AlumniaBauxite.html?id=ABR-C,AL-C>, 27 november 2013

- 
- [44] Öhman, M., Nordin, A., Hedman, H. and Jirjis, J.; "Reasons for slagging during stemwood pellet combustion and some measures for prevention", *Biomass & Bioenergy*, 2004, 27, s. 597-605.
- [45] Öhman, M., Hedman, H., Boström, D. and Nordin, A.; "Effect of kaolin and limestone addition on slag formation during combustion of wood fuels", *Energy & Fuels*, 2004, 18, s. 1370-1376.
- [46] Lindström, E., Sandström, M., Boström, D. and Öhman M.; "Slagging characteristics during combustion of cereal grains rich in phosphorus", *Energy Fuels* 21, 2007, s. 710-717.
- [47] <http://www.mueller-holzfeuerungen.ch>, 28 november 2013.
- [48] Laatikattila OY, Broschyr: Laka-Y Automatisk bioenergipanna
- [49] <http://www.laatikattila.fi/valkommen> 10 december 2013
- [50] Lampinen, S.; director of international sales, Laatikattila OY, muntlig kommunikation, oktober 2013
- [51] Hermansson, M.; Marknadschef, HOTAB-gruppen, Muntlig kommunikation, september 2013.
- [52] Andersson, B.; Product Manager, Valmet (tidigare Metso Power AB), Muntlig kommunikation samt e-post, oktober 2013.
- [53] Boman, K. och Edvardsson, E.; "Utvärdering av lambdasensorer för optimering av förbränning på rörlig rost", *Värmeforsk rapport 1017*, Stockholm, oktober 2007.
- [54] Eskilsson, D., Tullin, C.; Utveckling av ny självoptimerande sensorteknologi till närvärmecentraler, Energimyndighetens projekt nr 22154-1, 2006
- [55] Dahlberg, A. och Ekander, I.; Trädränsle- och torvpriser, Energimyndigheten & SCB, 2013 nr 4, 2 december 2013
- [56] Strömberg, B. och Herstad Svärd, S.; "Bränslehandboken 2012", *Värmeforsk rapport 1234*, Stockholm, 2012
- [57] Martin GmbH,  
[http://www.martingmbh.de/index\\_en.php?level=2&CatID=6.79&inhalt\\_id=66](http://www.martingmbh.de/index_en.php?level=2&CatID=6.79&inhalt_id=66), 20 november 2013
- [58] Ecomb AB, [http://ecomb.se/pdf/brouchure/ECotube\\_Information\\_less\\_english.pdf](http://ecomb.se/pdf/brouchure/ECotube_Information_less_english.pdf) 2013-10-14
- [59] Abrahamsson, H.; Programmer/R&D, Jernforsen Energi System AB, muntlig kommunikation, september 2013
- [60] Wolf, L och Myrén, K; Försäljningschef respektive VD, Clean Combustion, muntlig kommunikation, september 2013
- [61] Hunsinger, H., Seifer, H., Persson, J. and Andersson, S.; "Primary NOx Reduction and Bottom Ash Improvement for Waste Incineration Plants", *Proceedings from the 31<sup>st</sup> International conference on thermal treatment technologies and hazardous waste combustors*, New Orleans LA, USA, October 22-24 2012.
- [62] Götaverken Miljö AB, <http://www.gmab.se/cutnox.htm>, 14 oktober 2013
- [63] Örn, M.; Area Sales Manager, Götaverken Miljö, muntlig kommunikation, november 2013



## A Kontaktade aktörer

<i>Företag</i>	<i>Telefon-nr (växel)</i>
<b>Alstom</b>	0470-76 20 00
<b>Clean Combustion</b>	011-105 600
<b>Ecomb AB</b>	08-550 125 50
<b>Götaverken Miljö</b>	031-501 960
<b>HOTAB-gruppen</b>	044-218 400
<b>Jernforsen</b>	035-177 550
<b>KLm Energi</b>	0716-193 30
<b>KMW Renewables</b>	0176-50 56 00
<b>Laatukattila OY</b>	+358 (0)32 141 411
<b>Saxlund International/Opcon Bioenergy</b>	08-580 873 00
<b>SBCA</b>	08-782 08 50
<b>Swebo flis</b>	0921-578 00
<b>Valmet (tidigare Metso Power)</b>	031-501 000
<b>Vattenfall</b>	08-739 50 00

<i>Universitet, högskola eller forskningsinstitut</i>	<i>Telefon-nr (växel)</i>
<b>Bioenergy 2020+, Österrike</b>	+43 (0)316 481 300
<b>Linköpings universitet</b>	013-28 10 00
<b>Linné-universitet</b>	0772-288 000
<b>SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut</b>	010-516 50 00
<b>Umeå universitet</b>	090-786 50 00
<b>University of Eastern Finland</b>	+358 (0)294 451 111
<b>Verenum, Schweiz</b>	+41 (0)44 377 70 70



## B Executive summary

### Introduction

In December 2013 a proposal for an EU directive was published to limit emissions from combustion installations with a rated thermal input between 1 MW and 50 MW. It will likely lead to stricter requirements for emission limit values. Small district heating plants may not have sufficient flue gas cleaning technology to keep emission levels below emission limit values, or to bear the costs for investments in conventional flue gas cleaning technology. Applying primary measures, i.e. measures that prevent formation of emissions, can be a cost-effective alternative.

In this work, a survey of concepts for minimizing the formation of dust and NO<sub>x</sub> during biomass combustion has been performed. Universities, research institutes and suppliers of boilers and flue gas treatment system have been contacted to compile this report about concepts for reduction of the formation of dust and NO<sub>x</sub>. Contacts were made primarily by telephone and supplemented by contact by e-mail. The overall objective of this work was to contribute to the cost-effective reduction of emissions of fine particulate matter and NO<sub>x</sub> from small combustion plants, 2-10 MW. The target group is primarily owners of such plants.

### Method

In this work a survey of concepts for lowering the emissions of particles and NO<sub>x</sub> was compiled by contacting suppliers of boilers and flue gas cleaning equipment, universities, and research institutes. Suppliers and researchers have provided data and estimations of the concept's potential for lowering emissions. The concepts were discussed regarding possibilities and limitations.

### Results

#### *Concepts for lowering the formation of fine dust*

Concepts identified as relevant for minimizing the formation of fine dust from 2-10 MW grate boilers are presented. The concepts are:

1. Optimization of process control
2. Change of fuel, to one with lower ash content
3. Use of additives kaolin, aluminum ore or calcium-based additive
4. Low dust boiler based on advanced staged combustion

Reduction of the formation of fine dust particles by optimization of process control to means reduction of the formation of unburnt dust particles. Optimization of process control to achieve good combustion conditions is well known. Therefore it is not described in this report.

### *Change of fuel*

Changing the fuel into another fuel with lower ash content can reduce the formation of fine dust, provided that the original fuel has higher ash content (compared to wood chips, briquettes or wood pellet fuel). The potential for reducing the emission of fine dust through fuel switching cannot be achieved by direct comparison of the fuel's concentration of ash or potassium. The chemistry of the formation of dust is more complex than that. Here is an example to illustrate that it is not possible to estimate the reduction in the emission of dust by comparison of potassium or ash content of the various fuels. The starting point is a former Värmeforsk report about the characterization of particles and particle size distributions in two small grate boilers [3]. Comparison of two operating modes downstream multicyclones when firing a mixture of forest residue/ briquettes and briquettes showed a reduction of fine dust at about 40 %, at 75 % reduction of K- content of the fuel (and 88 % reduction in the ash content) [3].

### *Aluminium silicates, e.g. kaolin, as additive*

During residential biomass combustion significant reduction of fine particles has been observed at addition of the clay mineral kaolin to bark and forest residues pellets [24], and to oat energy grain [40][41][42]. The reduction was about 20% at combustion of wood pellets and about 40 % at combustion of bark pellets [24]. When burning oat energy grain with kaolin as additive, there was also a reduction of slagging, as a consequence of the low melting K-rich silicates [40]. The cost of kaolin, excluding transport, is approximately 2000 SEK/ton (€ 220/ton) [27].

### *Aluminium ore (bauxite) as additive*

Aluminium as a combustion additive has been investigated for waste incineration in fluidized bed [32]. Aluminum ore bauxite (Al-oxid/hydroxid) was used. It was shown that bauxite was less effective than the clay mineral kaolin at capturing alkali. Cost of bauxite (excluding transport) is 2600-3400 SEK/ton (405-501 USD/ton) [43].

### *Additives based on calcium*

Addition of 1-2% calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) to biomass has indicated a reduction of fine particles, simultaneously with an increase of coarse particles, at the combustion of biomass, bark and forest residues [24]. Lime and limestone additive have also been shown to work for the capture of potassium to prevent slagging in bed, by forming a high temperature melt of calcium/magnesium-potassium silicates [44][45] and phosphates [46]. The price of calcite, excluding transportation, is about 500 SEK/ton (44 to 66 EUR/ton) [27].

### *Staged combustion: Low dust boiler for pellets*

The Swiss low dust boiler Pellinno is designed for pellets. Pellinno has a heat output of 0.1-1 MW, and is produced by Müller AG Holzfeuerungen [47]. The heat output is actually slightly lower than intended in this work and the boiler is not available as a retrofit concept, but the boiler is nevertheless described here since the principles also could be applied to somewhat larger boilers. The origin of the low dust boiler is a research project and a pilot boiler of 0.1 MW [33]. Pellinno gives dust emissions around

10 mg/Nm<sup>3</sup> (at 13 % O<sub>2</sub>), which is lower than conventional technic. Figure 1 shows the boiler, which is a stoker where the fuel is fed from below. Principles of the low dust boiler were developed in the research and are [33]:

- $\lambda$  in glow bed = 0,2 - 0,4, depending on the type of fuel.
- $\lambda_{tot} = 1.3 - 1.6$
- Distinct separated zones. First a smouldering zone with reducing conditions and then a secondary zone for good burnout. The distance between the glow bed and secondary air supply must be large enough, to avoid secondary burning air effect in the first zone.
- An almost complete gas phase oxidation must be accomplished by good mixing between combustible gas and air, at sufficiently high temperature (850 °C) and sufficient mixing. One indication that combustion conditions are good enough is that CO levels are below 100 mg/Nm<sup>3</sup> (at 13 % O<sub>2</sub>).
- In the glow bed (primary combustion zone), a minimum temperature to maintain a complete solid fuel conversion is needed. In the low dust boiler a temperature of 650 °C was sufficient in the glow bed.

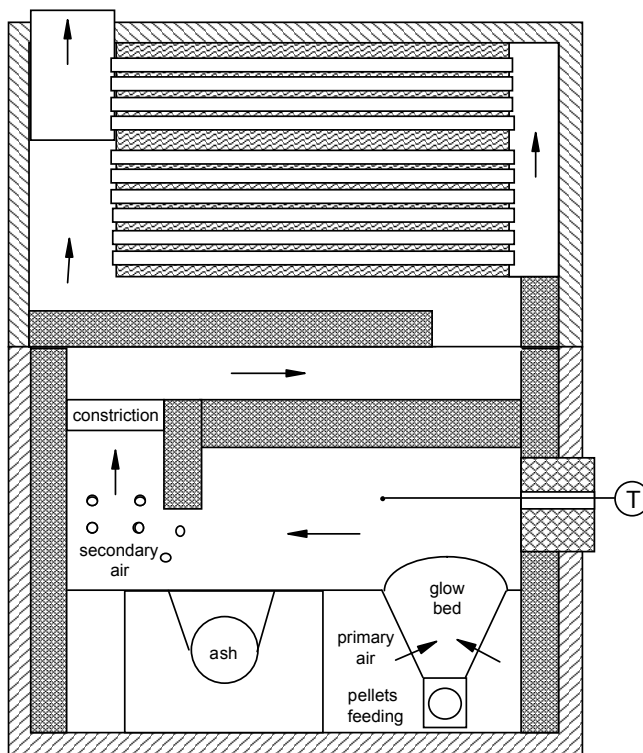


Figure 1. Low dust boiler for pellets [33].

### Staged combustion: Laka Y boiler

The two-stage boiler Laka Y is in the current situation not offered as a retrofit concept, but it is described here anyway, since it is commercially available in the segment 2-10 MW. The boiler can handle a wide range of solid biomass, with moisture contents of

10-55 %. The boiler Laka Y is manufactured by Laatikattila Oy in Finland. Cost of a new boiler of 7 MW is just over 10 million SEK (1.2 million euro) and for a boiler of 3 MW, 4.4 million SEK (some installation work not included). The emission of fine dust from the LAKA Y boiler is lower than 10 mg/MJ.

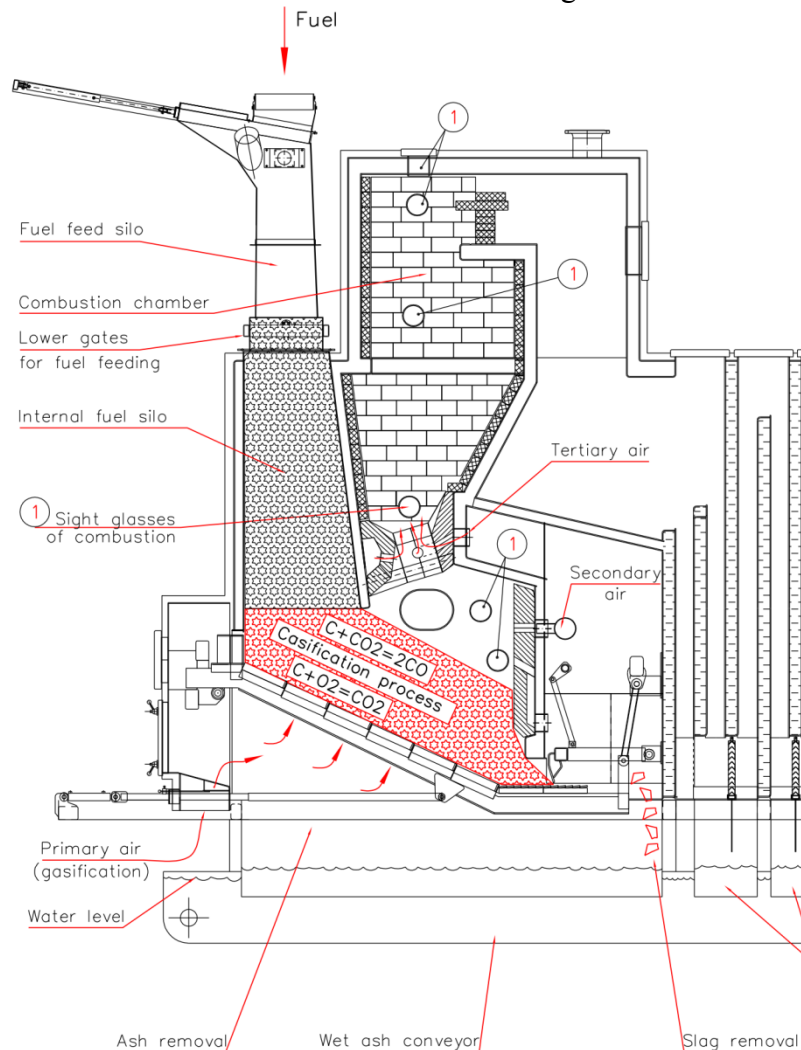


Figure 2. Laka Y boiler [48].

A principal design of the boiler is shown in Figure 2. It is called a gasification combustion boiler by the manufacturer. The design of the boiler has its origin in patents. The boiler is also equipped with a patented flue gas cleaning system, but that is mostly needed while starting and stopping the boiler. The boiler consists of two zones, which are well separated, keeping the release of volatile dust forming substances down. In the first zone, the air is low in the glow bed. In addition, there is a certain supply of preheated secondary air, which is controlled from the  $O_2$  content in the outgoing flue gas. Then the gases proceed into the second zone where a combustion process with tertiary air takes place [50]. The boiler is similar to a conventional grate boiler and has a moving grate. The glow bed is thick (typically about 0.8 m), and acts as a kind of filter in which the volatile ash compound are captured and then leave the boiler as bottom

ash. The low oxygen supply to the primary combustion zone and that the glow bed acts as a filter holds down the dust content of the gases entering the secondary combustion zone. Finally, it should also be noted that the boiler Laka Y also provides low NO<sub>x</sub> emissions (<30 mg / MJ) [49].

## Concepts for lowering formation of nitrogen oxides

This section describes the concepts identified as being of interest to minimize the formation of NO<sub>x</sub>:

1. Optimization of process control
2. Change of fuel, to one with lower nitrogen content
3. Staged combustion
4. Flue gas recirculation
5. Humidification of the primary combustion zone

### *Optimization of process control*

Optimization of process control is a relatively small measure. Thus, it is often the first measure to be assessed as a mean to lower emissions from a boiler. A study in which combustion conditions and the control systems are checked costs approximately 100 000 SEK [51]. An optimized process control regulates air supply, fuel supply, temperature, residence time and mixing in optimal proportions. Optimizing process control implies broadly speaking to optimize the measuring, feedback and actuators that regulate the supply of fuel and air to optimal proportions and amounts.

An example of a process control improvement is to setup automatic damper regulation of primary air zone-wise. The regulation of supply of primary and secondary air can also be improved by using lambda sensors at several positions in the boiler, which has been studied with the purpose to avoid zones of poor mixing and formation of NO<sub>x</sub> [53]. In small grate boilers one lambda sensor for control of O<sub>2</sub> concentration is common [54].

Another example is to optimize the amount of sensors and their positions. Alternatively, a potentially more efficient measuring system, like infrared combustion control, can be installed. With an infrared camera the combustion process is read optically and a computer can interpret details like shape, density and light intensity in different zones of the boiler.

### *Change of fuel*

Since the fuel bound nitrogen is the main source to formation of NO<sub>x</sub>, the formation can be limited by choosing a fuel with low nitrogen content. A fuel with low nitrogen content is normally of a better quality and is thus more expensive than a fuel with higher nitrogen content. On the other hand, a change to a high quality fuel can lead to lower maintenance and operation costs, since it lowers wear and formation of deposits, and can result in a steadier boiler operation, which can decrease the need for operating personnel.

### *Staged combustion*

Grate boilers in the range 2 – 10 MW usually have staged combustion, by staging air supply. A schematic of a grate boiler with air staging is shown in Figure 3. Primary air is supplied, so that sub-stoichiometric conditions are achieved. Overfire air is supplied higher up in the boiler. In total, air is supplied over-stoichiometric. By limiting the access of oxygen initially the risk of existing nitrogen reacting with oxygen is reduced.

For some boilers an improved overfire air system can be an efficient measure for lowering formation of  $\text{NO}_x$  [52]. An improved overfire air system can imply changes in over fire air supply with regards to flow and pressure, or introduction of temperature regulation and installation of extra air nozzles.

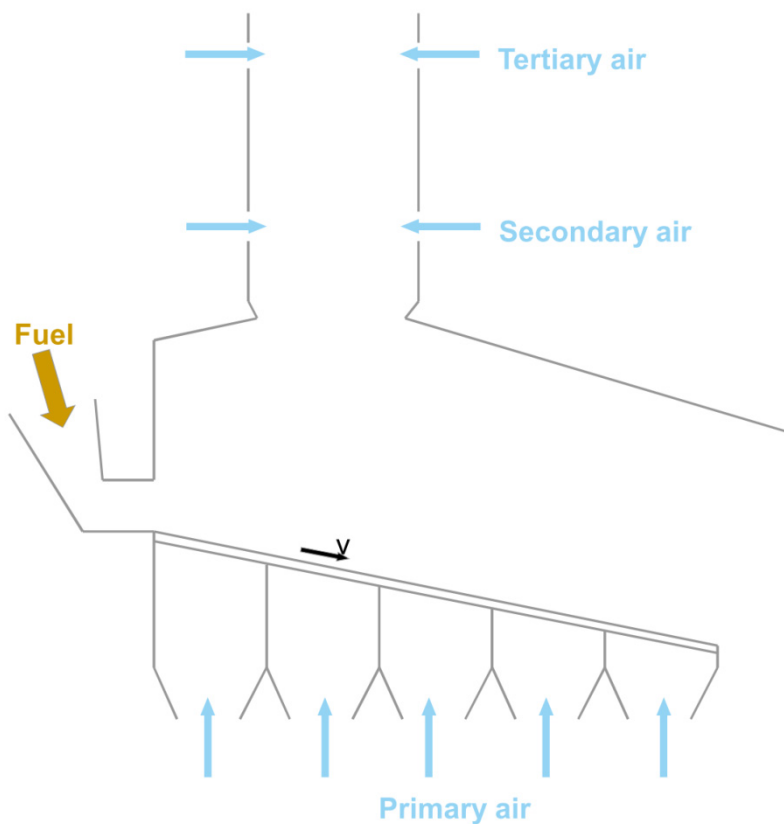


Figure 3. Grate boiler with air staging.

### *Flue gas recirculation*

Most boiler suppliers are working with flue gas recirculation as a method to minimize formation of  $\text{NO}_x$ . Flue gas recirculation is commonly installed in primary and secondary air registers or only in the secondary air register. Where flue gas recirculation should be installed in a specific boiler depends on the operation conditions of that boiler, the causes of the high  $\text{NO}_x$  emissions and where it is practically and economically feasible to make the installation.



Retrofit costs for flue gas recirculation are, roughly estimated, 1-3 MSEK for a boiler of 10 MW, according to data from contacted boiler suppliers (Appendix A). An illustration of a grate boiler with flue gas recirculation is shown in Figure 4. By recirculating a part of the flue gas flow to the boiler the concentration of oxygen is reduced which reduces formation of  $\text{NO}_x$ . Flue gas recirculation also causes that the total flue gas through the boiler becomes larger, which means that the heat produced during combustion is absorbed by a larger amount of gas and the temperature will be lower than it would have been if only combustion air was supplied to the boiler. Flue gas recirculation can also counteract local high temperature zones by contributing to a more homogeneous mixture of combustible gases and combustion air through the boiler. Flue gas recirculation can reduce  $\text{NO}_x$  emissions to 60-80 mg/MJ at combustion of wood chips and down to 40 mg/MJ at combustion of wood pellets (according to contacted boiler suppliers, see Appendix A).

Installation of flue gas recirculation means installation of flue gas injectors, ducts, insulation and a flue gas recirculation fan. Installation also requires new sensors and reprogramming of the control system and optimization of this with respect to the recirculated flue gas, primary combustion air and secondary combustion air.

Installation of flue gas recirculation into secondary air register requires a major rebuild of the furnace where the nozzles are to be placed. To make installation practical and cost effective, it should be done simultaneously with planned exchange of boiler brickwork [59].

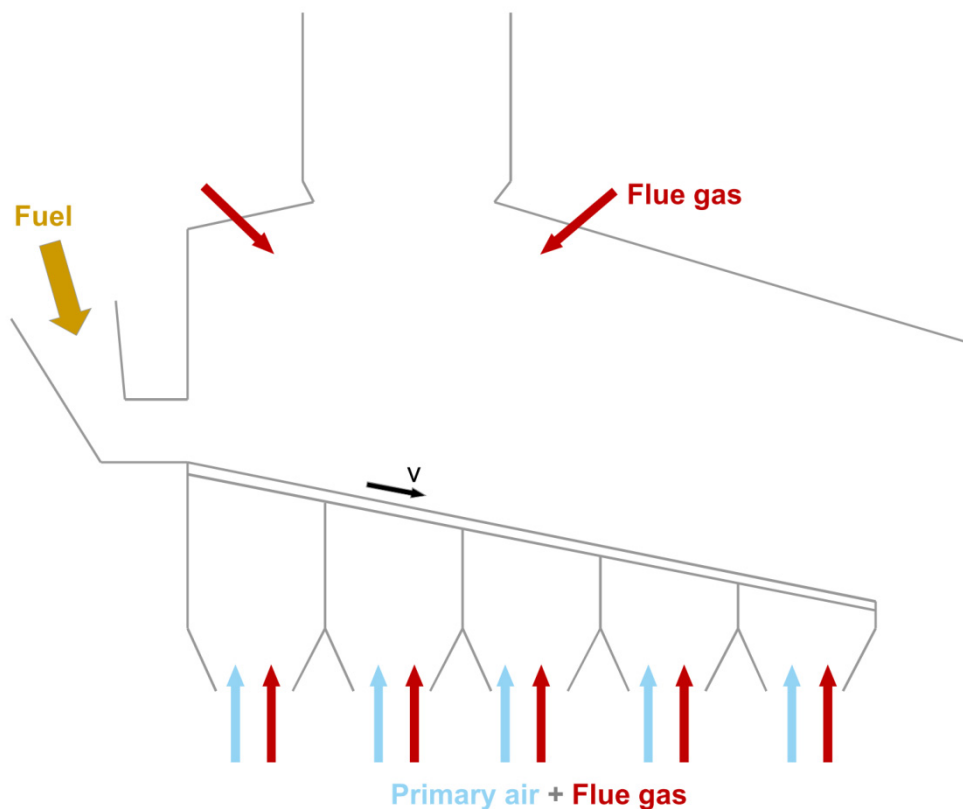


Figure 4. Grate boiler with flue gas recirculation

### *Humidification: Fog spray injectors*

Clean Combustion offers a concept with specially designed water injectors [60] to create a fog spray for controlling the moisture content of the combustion zone, and thereby lowering the combustion temperature. The injectors are placed in the air section of the fuel feed and water is injected when the combustion temperature becomes too high. With the regulation of moisture, combustion temperature can be controlled and hence  $\text{NO}_x$  formation is reduced.

This technique has so far only been installed in full scale in one boiler, where the result was a reduction of  $\text{NO}_x$  emissions by approximately 50 %. Investment costs (excluding process control system) is about 200 000 – 500 000 SEK.

### *Humidification: CUTNOX*

The  $\text{NO}_x$  reduction concept CUTNOX is shown in Figure 5. A jet of water and air is injected into the lower part of the furnace. The jet increases the mixing in the furnace and the water decreases the combustion temperature, improving the combustion and lowering the  $\text{NO}_x$  formation. By good control of the water injected a more stable combustion temperature is achieved. The investment cost of CUTNOX is approximately 1 MSEK for a 10 MW boiler [63] plus eventual costs for process control optimization.

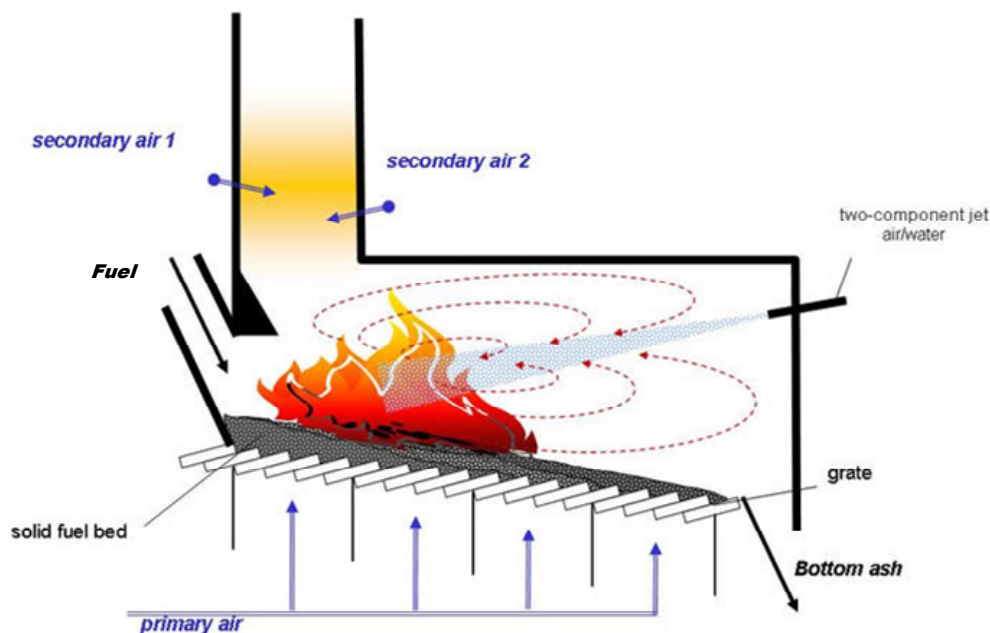


Figure 5. CUTNOX [62]

---

## Conclusions

From the work, the following conclusions are drawn:

- **Minimizing the formation of fine particles (<1 µm ) and NO<sub>x</sub>** can to a large extent be performed with the same kind of primary measures:
  - **Staged combustion**, which is the technology with the greatest potential for simultaneous minimization of the formation of fine particulate and NO<sub>x</sub>, but expensive because in the current situation there is no re-building concept available for fine dust. The starting point for staged combustion is reducing conditions in the primary combustion zone. Furthermore, it is important with separated combustion zones, control of air and minimizing leakage of air.
  - **Flue gas recirculation**, a proven primary measure for minimizing NO<sub>x</sub>, which is used by many boiler manufacturers, also in the segment of 2-10 MW. In addition, it is an important component in the simultaneous minimization of the formation of fine dust, used for holding down the combustion temperature and controlling the combustion conditions.
  - **Changing to a fuel with lower content of ash and nitrogen**, which is a relatively expensive method to minimize the formation of fine dust and NO<sub>x</sub>.
  - **Optimization of process control**, which should be done first if the formation of emissions must be minimized. Both the control of the formation of fine dust and NO<sub>x</sub> shall be included simultaneously.
- **Additives can be used to minimize the formation of fine dust**, but it is relatively scarcely studied. Kaolin is the additive that appears to be most interesting, as it has worked on several different types of biomass, and is known to reduce the risk of slagging of the fuel bed. Additive has relatively low price.
- **Humidification of the primary combustion zone can be used for minimizing the formation of NO<sub>x</sub>**. Two newer humidification concept have been identified as relevant for boilers 2-10 MW

