



### Träpulvereldning i direktuppvärmda spannmålstorkar för ökad resurseffektivitet och fossilfrihet

Susanne Paulrud, Marcus Gullberg, Esbjörn Pettersson, Kent Davidsson RISE  
Björn Forsberg, WTS

RISE Rapport: 2022:156

# Träpulvereldning i direktuppvärmda spannmålstorkar för ökad resurseffektivitet och fossilfrihet

Susanne Paulrud, Marcus Gullberg, Esbjörn  
Pettersson, Kent Davidsson RISE  
Björn Forsberg, WTS

# Abstract

## **Wood powder firing in directly heated grain dryers for increased resource efficiency and lower carbon dioxide emission**

In industrial scale, grain drying is done with combustion heat in dryers that supply heat directly by contact between the flue gas and the grain, or indirectly via heat exchange to air. Direct heat supply is generally 10-20 % more efficient, has better controllability, and requires lower investments. So as not to contaminate the grain, it is required that the fuel be natural gas or liquefied petroleum gas, but there is reason to believe that flue gas from firing wood powder could be used without problems. In the project, grain was dried in a developed test dryer with flue gas from wood powder, and the components of the flue gases were analysed. The contents of polyaromatic hydrocarbons and heavy metals in grain was analysed before and after drying. The result showed that using wood powder as fuel does not give rise to flue gases with an unfavorable composition for drying grain. Of the toxic metals examined here, only cadmium and, in one case lead, are present in concentrations above the detection limit. The presence of PAHs is below the detection limit in all trials. The levels of dioxins are for most dioxins lower than the detection limits. The result will be used to adjust the regulation to allow flue gas from more sustainable fuels in drying, whereby a potentially large fraction of fossil fuels and electricity can be replaced.

Key words: Wood powder combustion, grain drying

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport: 2022:156

ISBN: 978-91-89711-38-9

# Innehåll

<b>Abstract</b> .....	<b>1</b>
<b>Innehåll</b> .....	<b>2</b>
<b>Förord</b> .....	<b>3</b>
<b>Sammanfattning</b> .....	<b>4</b>
<b>1 Inledning</b> .....	<b>5</b>
1.1 Syfte och mål.....	7
<b>2 Projektets genomförande</b> .....	<b>8</b>
2.1 Utveckling och tillverkning av en testtork för spannmål .....	8
2.2 Försöksupplägg, mätningar och provtagning.....	12
2.3 Rökasmätning .....	14
2.4 Provtagning spannmål.....	15
2.5 Analyser på spannmål.....	15
<b>3 Resultat och Diskussion</b> .....	<b>16</b>
<b>4 Säkerställa livsmedelssäkerheten på spannmål som torkas med rök-gaser från träpulvereldning i pilotanläggning</b> .....	<b>20</b>

# Förord

Projektet Träpulvereldning i direktuppvärmda spannmålstorkar för ökad resurseffektivitet och fossilfrihet har finansierats av Energimyndigheten genom programmet Bio+.

Arbetet har genomförts i samarbete mellan RISE Research Institutes of Sweden, World Thermal Service Nyköping AB (WTS) och Lantmännen.

Vi vill tacka deltagare och finansiär som alla medverkat till projektets genomförande.

RISE Göteborg, december 2022

# Sammanfattning

Idag tillåts endast naturgas, stadsgas eller gasol som bränsle för direktuppvärmda spannmålstorkar. Inledande diskussioner med representanter för Livsmedelsverket, Jordbruksverket och Statens veterinärmedicinska anstalt gav att en regeländring skulle kunna vara möjlig förutsatt att livsmedels säkerheten kan säkerställas. Myndighetsrepresentanterna pekade på behovet att utföra rökgasanalyser från träpulverförbränning samt att även göra analyser av spannmål som torkats med direktvärd träpulvereldad spannmålstork.

Syftet med detta projekt är att uppnå fossilfrihet och hög resurseffektivitet inom direktuppvärmd spannmålstorkning genom att utvärdera förutsättningarna att använda träpulver. Målet med projektet är att säkerställa livsmedelssäkerheten på spannmål som torkas med rökgaser från träpulvereldning.

I projektet har en testtork utvecklats och tillverkats av WTS som sedan har integrerats med en befintlig testtrigg för träpulverförbränning placerad på RISE i Piteå. Efter ombyggnationen och montage av torken har systemet testats med torkgas från ca 100 kW träpulverförbränning med en nedskalad WTS brännare. Vid testerna har rökgasernas komponenter analyserats. För att säkerställa att spannmålen ej påverkats av rökgaserna har spannmålen analyserats före och efter torkning, bland annat med avseende på polycykliska aromatiska kolväten (PAH) och tungmetaller.

Rökgasmätningarna visar att träpulver inte ger upphov till rökgaser med ogynnsam sammansättning för torkning av spannmål. Av de toxiska metaller som undersökts här är det bara kadmium och, i ett fall bly, som finns i halter över detektionsgränsen. Kadmium uppvisar likartade halter före och efter torkning och oavsett torkningsmetod. Kadmiumhalten påverkas alltså inte av rökgaser från träpulver. Det går inte att utesluta att bly från träpulvret bidragit till att blyhalten i spannmål i ett fall överstiger detektionsgränsen. Det går inte heller att utesluta någon annan förklaring eftersom de två andra försöken med torkning med rökgas från träpulvereldning inte givit en sådan effekt. Förekomsten av PAH är under detektionsgränsen i alla försök. Halterna av dioxiner är för de flesta dioxiner lägre än detektionsgränserna.

För att i praktiken upprätthålla livsmedelssäkerheten för spannmål som torkas med rökgaser från träpulvereldning i en kommersiell pilotanläggning behöver systemet utformas så att spannmålet inte påverkas av rökgaserna. Som bränsle måste träpellets med låg askhalt 0,3-0,5% (EN Class1) användas; d.v.s. endast träpulver baserat på rent vitt trä utan barkinblandning då detta ökar askhalten. Höga krav bör också ställas på partikelstorleken i pulver för att säkerställa mycket god utbränning av träpulvret. Systemet bör utformas så att vid en ökad CO nivå i rökgaserna går gas som stödbränsle in och sameldas med träpulver. Vid för hög CO nivå tar gasen över helt. Utöver hur tekniken utformas och körs så bör CO kontinuerligt mätas under drift. Analyser på spannmål före och efter torkning bör göras regelbundet. Bra drift och underhåll på förbränningsutrustningen är också viktigt för att få en problemfri förbränning med låga emissioner.

# 1 Inledning

I Sverige skördas 5–6 miljoner ton spannmål per år med skördevattenhalter som varierar mellan år och över landet. För att möjliggöra lagring utan mögeltillväxt och oönskad mikrobiell aktivitet måste spannmålet torkas. Att behöva sänka vattenhalten i spannmålen med 5 procentenheter i södra Sverige och upp emot 10 procentenheter i norra Sverige är inget ovanligt. Med 5 miljoner ton och 3 procentenheters nedtorkning ger det att 150 000 ton vatten torkas bort ur spannmål varje år i Sverige, vilket kräver stora mängder värmeenergi. Hur mycket som krävs beror på vilken teknik som används.

I industriellt bruk är det i nästan enbart kontinuerliga torkar som används, med kapaciteter på mellan 10 och 200 ton spannmål per timme vid nedtorkning från 18 till 14 %. Värmeöverföringen kan antingen vara direkt eller indirekt där direkt torkning innebär att rökgaserna från naturgas eller gasol används för att torka spannmålen. I indirekt uppvärmda system värms vatten upp för att sedan via värmeelement övergå till torkluften. Olja, biobränslen samt fjärrvärme är vanliga värmekällor.

Generellt är direktvärmda torkar mer energieffektiva då överföringsförlusterna kan minimeras. Verkningsgraden är i storleksordningen 10–20 % högre än motsvarande indirekt system. Direktvärmda system ger även bättre reglerbarhet samt en lägre investeringskostnad då man slipper pannrum och all VVS-utrustning i torken. Vattenburna system innebär vinterhållningsproblematik då torkarna nästan aldrig används vintertid och därmed måste varmhållas, tömmas på vatten eller glykolfyllas vilket medför ökade kostnader.

Energianvändningen för en modern tork är strax över 1 kWh per kg borttorkat vatten medan en äldre ofta behöver mer än 2 kWh per kg borttorkat vatten, vilket kan jämföras med förångningsvärmets på 0,66 kWh per kg vatten. Att fasa ut äldre torkar mot moderna direktvärmda torkar skulle minska värmebehovet avsevärt. Torkar från 70–90-talet utgör huvuddelen av dagens industriella spannmålstorkar.

Eftersom direktuppvärmda spannmålstorkar är gaseldade har det inte funnits självklara fossilfria tekniker att konvertera till. 2015 konverterades den gasoeldade ångpannan på Lantmännens foder- och spannmålsanläggning i Åhus till att eldas med träpulver med hjälp av en svensktillverkad brännare från World Thermal Services (WTS). Anläggningen har årligen minskat utsläppen av fossil koldioxid med ca 2000 ton och även ökat konkurrenskraften för svenskt lantbruk genom låga värmekostnader vid spannmålstorkning och foderberedning.

Det finns idag inga erfarenheter kring direkteldning av spannmålstorkar med träpulver. Enligt brännar- och torkleverantörer är bedömningen att det inte finns några tekniska begränsningar. Idag tillåts dock endast naturgas, stadsgas eller gasol som bränsle för direktuppvärmda spannmålstorkar (18§ LIVSFS 2007:6) men Livsmedelsverket har inte kunnat finna några underlag till det beslutet. Inledande diskussioner med representanter för Livsmedelsverket, Jordbruksverket och Statens veterinärmedicinska anstalt gav att en regeländring skulle kunna vara möjlig förutsatt att livsmedels säkerheten kan säkerställas. Myndighetsrepresentanterna pekade på behovet att utföra rökgasanalyser från träpulverförbränning samt att även göra analyser av spannmål som torkats med direktvärmad träpulvereldad spannmålstork.

Sot, oförbränt kol, polycykliska aromatiska kolväten (PAH) och kondenserbara organiska föreningar får inte förekomma i rökgaserna vid direktledning för spannmålstorkning. Dessa komponenter beror på ofullständig förbränning som i sin tur orsakas av för låg temperatur, brist på syre, för kort uppehållstid under förbränningsprocessen eller bristfällig omblandning under förbränningsprocessen.

För att uppnå en fullständig förbränning vid träpulvereldning kan brännkammarens väggar invändigt förses med eldfast material som hettas upp vid start till en hög temperatur med hjälp av gaseldning. Detta säkerställer att allt pulver blir förbränt och om, mot förmodan, temperaturen skulle sjunka under den gräns som fastställts kan man antingen samelda med gas för att få upp temperaturen eller stoppa pulvereldningen och övergå helt till gas.

Vid förbränning med syftet att skapa värme för ångproduktion eller fjärrvärme vill man ha en hög temperatur på rökgaserna. Därför strävar man efter att hålla lufttillförseln så låg som möjligt utan att CO-halten blir för hög. För torkändamål behövs inte denna avvägning göras utan luftöverskottet kan anpassas för att maximalt minimera CO-halten.

Om brännkammaren designas för att passa kapaciteten vid pulvereldning och brännkammaren görs tillräckligt stor kan tillräckligt lång uppehållstid uppnås utan problem. WTS pulverbrännare har dessutom en kraftig rotation och turbulens i flammen med en kraftig intern cirkulation vilket skapar god omblandning.

Lantmännen tar årligen emot 1–2 miljoner ton spannmål som torkas i någon av de 140 torkar som är fördelade på 23 platser, med en samlad momentan teoretisk torkkapacitet på 5 000 ton per timme. Värmeanvändningen skiljer sig mellan åren beroende på mottagen volym men i genomsnitt de senaste 10 åren har 80 GWh använts. Historiskt har värmekällorna främst varit olja, gas och avrens, som främst består av skal, små spannmålskärnor och damm. Lantmännen satte 2009 ett mål om att fasa ut eldningsolja och att spannmålsproduktionen i Norden ska vara fossilfri senast 2025, sedan dess har en lång rad konverteringar gjorts och eldningsoljan eliminerats. De tillkommande värmekällorna har främst varit träbaserat biobränsle, bioolja och fjärrvärme. För att bli helt fossilfri måste det även finnas lösningar för de gaseldade direktuppvärmda spannmålstorkarna.

Många av torkanläggningarna ligger centralt i städer med hamnläge. I samband med att städerna expanderar och vill bygga bostäder behöver anläggningarna flyttas. Detta hände i Uppsala där silon låg mycket centralt och hade tillgång till fjärrvärme. För att ersätta den anläggningen gjordes 2019 en nyetablering i Hargshamn i Östhammars kommun med torkning och lagring till skörd. Där fanns inte fjärrvärme och då Lantmännen inte ville investera fast sig i fossila bränslen eller en vattenburen tork, föll valet på en eluppvärmd direktverkande tork.

Fler anläggningar kommer att behöva stänga i Mälardalen de kommande åren av samma anledning och ytterligare utbyggnad planeras i Hargshamn. Först och främst behövs lagringskapacitet men på några års sikt kommer även ny torkkapacitet att behövas. Att värma upp torken med grön el är inget bra alternativ då överföringskapaciteten är begränsad i området. Vattenfall utreder möjligheterna att få fram ytterligare 7 MW samtidigt som Lantmännen undersöker alternativa värmekällor. Uppskattat värmebehov är 3-4000 MWh per år, vilket med gasol motsvarar ca 800 ton fossil koldioxid per år.



Om det visar sig vara möjligt och tillåtet att direktuppvärma spannmålstorkar med träpulver är det ett stort steg för att uppnå fossilfrihet och hög resurseffektivitet inom spannmålstorkning vilket också leder till att värdekedjan för spannmål blir mer hållbar. Lösningen kan även vara attraktiv på en internationell marknad vilket gynnar export av svensk teknik.

## 1.1 Syfte och mål

Det övergripandet syftet med projektet är att uppnå fossilfrihet och hög resurseffektivitet inom direktuppvärmd spannmålstorkning genom att utvärdera förutsättningarna att använda träpulver. Projektet avser att ge ett långsiktigt underlag som möjliggör direkt implementering på marknaden.

Målet med projektet är att säkerställa livsmedelssäkerheten på spannmål som torkas med rökgaser från träpulvereldning.

Projektets delmål var:

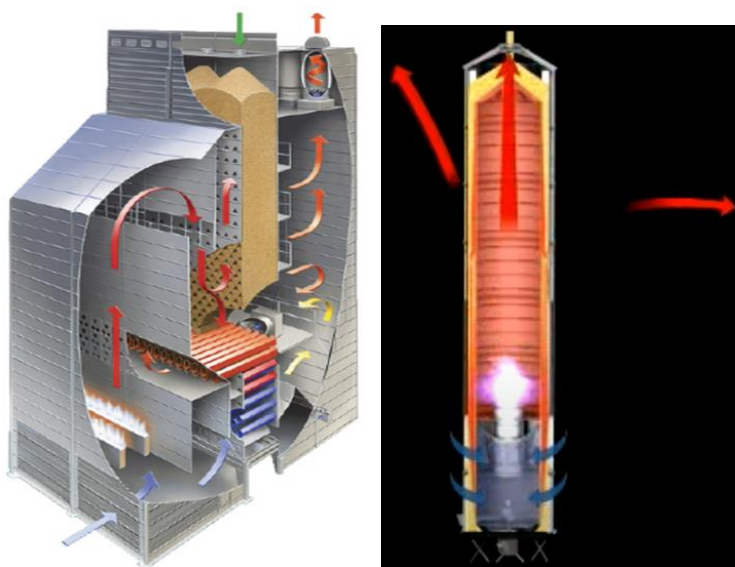
1. Att det efter 6 månader finns en testtork av SUKUP typ som kan integreras med en träpulverförbränningsanläggning
2. Att det efter 8 månader finns en färdigställd testrigg för torkning av spannmål med rökgaser från träpulvereldning
3. Att det efter 10 månader finns kunskap om rökgasernas innehåll och dess påverkan på spannmål
4. Att det efter 11 månader finns anvisningar avseende teknik och drift som säkerställer kraven som ställs på torkad spannmål

## 2 Projektets genomförande

I genomförandet har ingått att säkerställa att spannmål som torkats med en direktvärm� träpulvereldad spannmålstork ej kontamineras med skadliga ämnen. En testtork har utvecklats och tillverkats av WTS som sedan har integrerats med en befintlig testrigg för träpulverförbränning placerad på RISE i Piteå. Efter ombyggnationen och montage av torken har systemet testats med torkgas från ca 100 kW träpulverförbränning med en nedskalad WTS brännare. Vid testerna har rökgasernas komponenter analyserats. För att säkerställa att spannmålen ej påverkats av rökgaserna har spannmålen analyserats före och efter torkning, bland annat med avseende på PAH och tungmetaller.

### 2.1 Utveckling och tillverkning av en testtork för spannmål

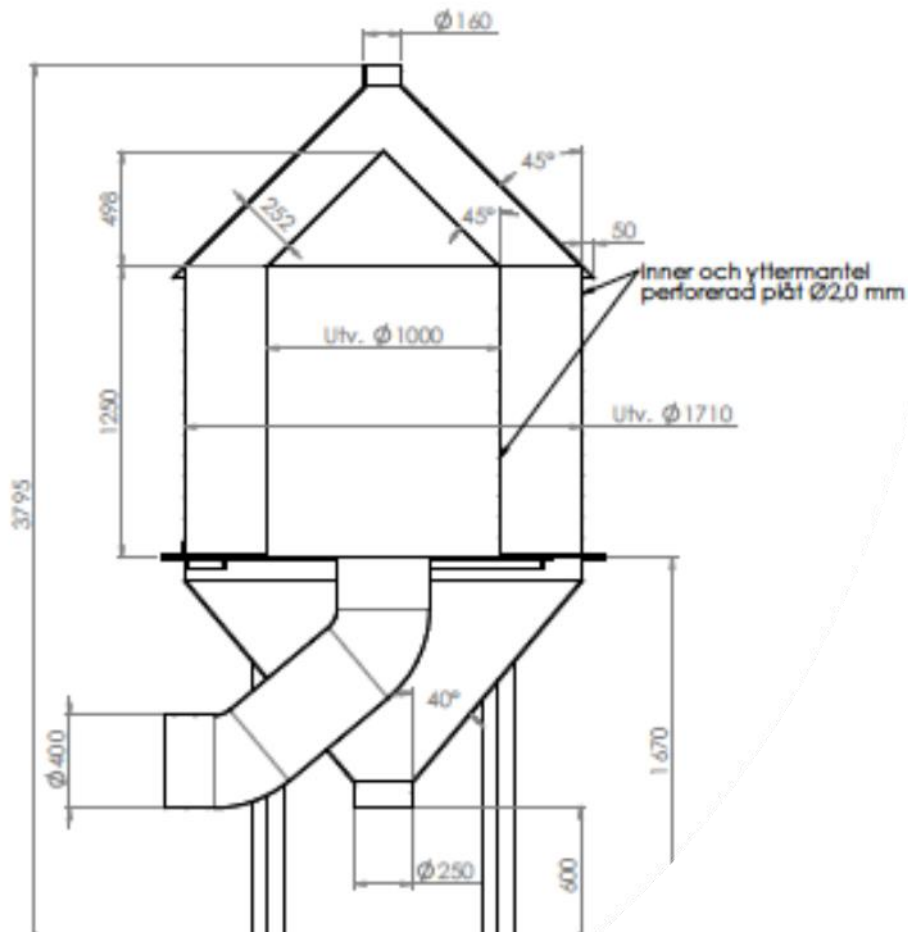
Balktork är idag den vanligaste industriella torktypen i Europa medan torntork är vanligast i Nordamerika. I Sverige finns en handfull torntorkar och hundratals balktorkar. Båda teknikerna bygger på att stora luftflöden med temperaturer mellan 50 och 100 grader passerar genom 30-40 cm spannmål som rör sig mer eller mindre kontinuerligt uppifrån och neråt i torken. Torntorken är däremot mer lättillgänglig och lätt att hålla ren och är den torktyp som testtorken bygger på. Figur 1 visar båda principerna.



Figur 1. Balktork till vänster och torntork till höger i bilden.

I projektet har en testtork av SUKUP typ tillverkats för att integreras med en träpulverförbränningsanläggning med WTS brännare som finns på RISE i Piteå. Testtorken har byggts enligt torntorkprincipen som har sitt ursprung från SUKUP som även har bidragit med dimensioneringsdata (figur 2). Principen för detta system är att en perforerad plåt bildar en innercylinder som skapar ett tomrum i centrum av torken och där blåser torkgasen in. Torken har dessutom en ytttermantel som också är tillverkad

av perforerad plåt. Mellan inner- och ytermantel finns då ett utrymme på ca 350 mm och detta fylls med spannmål. Inncylindern är öppen i botten och spannmål kan fylla upp bottenkonan som är förlängningen av ytermanteln. I botten på konan tappas spannmålen av till en disktransportör vilken lyfter upp spannmål från botten av konan till toppen av torken där det faller in i torken igen och fyller mellanrummet mellan innercylinder och ytermanteln. Disktransportören är varvtals styrd och hastigheten på disktransportören bestämmer cirkulationsflödet.



Figur 2. Skiss över torken.

Torken togs fram och monterades av WTS i Nyköping där den kallkördes med spannmål innan den skickades till RISE i Piteå. Torken kopplades där samman med systemet för träpulverförbränning (figur 3 och 4). Pulverbrännaren ses till vänster monterad i ugnsgaveln (figur 3). Träpulvret matade från ett förråd från Tomal (figur 4) och där matningshastigheten varierar genom frekvensstyrning av motorn till matarskruvar.

Förbränningen av träpulver och referensbränsle (gasol) gjordes i en keramiskt infodrad ugn (figur 5). Ugnens tvärsnitt var ca 55 cm x 55 cm med ett svagt välvt tak, och dess invändiga längd var ca 330 cm och infodringen var ca 25 cm tjock. Efter ugnen fanns en övergång där rökgasen kunde ledas till en panna eller riktas om till torken genom att öppna och stänga ett högttemperaturspjäll. Övergången var isolerad invändigt med ca 5 cm isolering (filt och plattor). I övergången fanns även öppningar där extra luft sögs in.

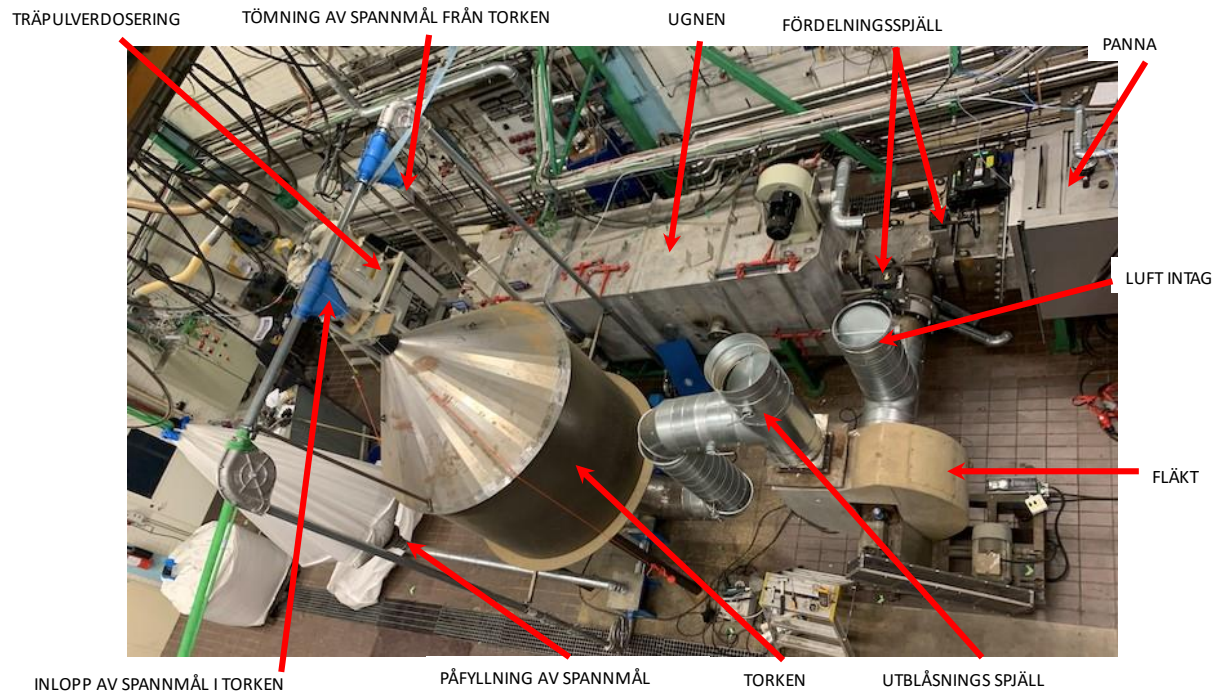
Ugnen kördes alltid med undertryck antingen genom en rökgasfläkt efter pannan eller genom undertrycket som bildades av fläkten kopplat till torken.

Torkprincipen bygger på att fläkten suger in utspädda rökgaser och blandar om dessa med kyl Luften inne i fläkten så att man får en jämn temperatur på 80 °C som blåser in i torkens centrum. Varm luften blåser sedan genom spannmålet mellan de inre och yttre mantlarna av perforerad plat. Spannmål omsätts hela tiden av disktransportören som tar ut från botten och fyller på i toppen. Påfyllning av spannmål gjordes från storsäck med hjälp av en travers i taket.



Figur 3. Torken ihopkopplad med förbränningssystemet.





Figur 4. Torken ihopkopplad med förbränningssystemet.



Figur 5. Vänster: Keramiskt infodrad ugn med brännargaveln borttagen. Höger: Brännargavel sedd från sidan som är vänd in mot ugnen.

## 2.2 Försöksupplägg, mätningar och provtagning

I projektet har tre torkförsök genomförts med träpulver (Pulver I, II och III) och två torkförsök genomförts med referensbränslet gasol (Gasol I och II). Upplägget har varit samma för alla försök.

På natten före varje körning eldades ugnen med en oljebrännare för att förvärma keramiken. På testdagen byttes sedan till aktuell brännare för pulver eller gasol (figur 6). Nytt spannmål fylldes på och cirkulerades först med kallluft. När gasanalysen och temperaturen visade stabila värden öppnades spjället och temperaturen på torkluften justerades in till 80 °C. Torkning pågick tills spannmålet visade en fukthalt på 14 % vilket tog ca 1,5 timmar. Fuktmätning gjordes varje halvtimme tills fukthalten var 14 %. Brännaren stoppades då och spjället ändrades så att spannmålet kylades till rumstemperatur. När spannmålet var kallt tappades det till storsäckar. Fukthaltsmätningen genomfördes med en handhållen fuktmätare för spannmål (figur 7). Typ av spannmål som skall testas ställs in på instrumentet. Mängden spannmål som skall testas matas in genom ett mått på locket och spannmål fylls ner i mätkammaren på instrumentet. När locket skruvas fast mals spannmålet av den runda plattan. På displayen visas därefter den uppmätta fukthalten.



Figur 6 Vänster, gasolbrännare Bentone BFG 1 H3. Höger, träpulverbrännare WTS.





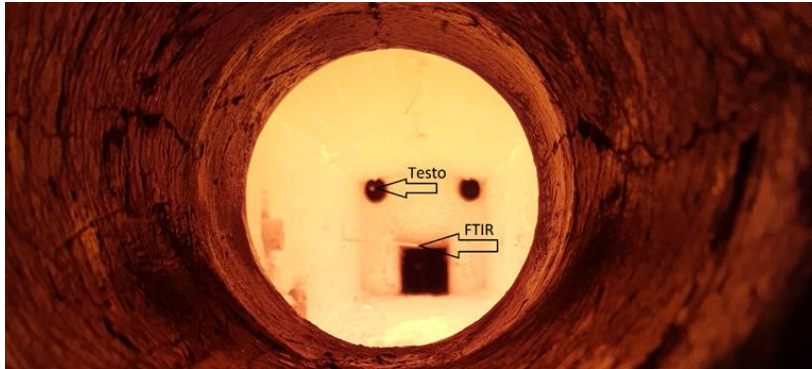
Figur 7. Handhållen fuktmätare för spannmål.

Gasolbrännaren hade egen fläkt för lufttillförsel vilket gjorde att flödet inte kunde mätas direkt samt att luftmängden påverkades av undertrycket i ugnen. Resulterande syrehalt kunde däremot användas för att kontrollera en acceptabel lufttillförsel. En ungefärlig bränsleeffekt vid gasolkörningarna kontrollerades med hjälp av ett gasur monterat på gasolledningen precis uppströms brännaren kombinerat med tidtagning.

En ungefärlig bränsleeffekt erhöles utifrån erfarenhet från tidigare matning av träpulver med samma förråd. Vikten på förrådet loggades även under körningen. Efter skruvarna föll pulvret ner i ett fallschakt och blåstes med luft till brännaren. Luften tillfördes med en ejektor kopplad på ledningen under fallschaktet, viss medrycksluft släpptes även in via fallschaktet. Den tillförda luften till ejektorn kontrollerades med massflödeskontroller och medrycksluften mättes med flödesmätare. Utöver transportluften tillfördes luft i tre olika register i brännaren med tre olika massflödeskontroller. Träpulvret som eldades kom från träpellets från Stenvalls som rivits med en Rapid granulator och sedan malts i en hammarkvarn från MAFA. I hammarkvarnen användes en siktplåt med storleken 0,75 mm.

## 2.3 Rökasmätning

Gassammansättningen mättes med 2st gasanalysinstrument, dels med Testo 350 (kemiska celler), dels med FTIR (endast två av dagarna). Gasen sögs ut ur ugnen genom rostfria stålrör, se Figur 8. Testons stålrör stacks in från övre hörnet i ugnens bakkant och mynnade strax innanför keramiken (ca 1 dm). FTIR röret stacks in från långsidan ca 250 cm nedströms brännaren och mynnade centralt i ugnen.



Figur 8. Mätpunkter för gasanalys, sett från brännarporten.

Halten och storleksfördelningen av partiklar bestämdes med en impaktor från Dekati strax uppströms torken. Impaktorn separerar partiklarna i 13 steg, från 10,7  $\mu\text{m}$  till 33 nm, beroende på deras aerodynamiska diameter. Rökgasen vid ca 80 °C sögs ut isokinetiskt. De passerade först en cyklon med en cut-off på ca 8,6  $\mu\text{m}$ . Detta för att undvika att vattendroppar skulle kunna bildas och påverka den mätta storleksfördelningen. Partiklarna i impaktorn fångades upp på små aluminiumplåtar som vägdes före och efter provtagning på en 6 1/2 decimalers våg från Mettler-Toledo.





Figur 9. Impaktorprovtagningen i de 80 gradiga rökgaserna uppströms torken.

## 2.4 Provtagning spannmål

För varje försök togs 3 spannmålsprover från olika säckar före torkning. 1 prov togs efter torkning (omblandat i torken) i samband med tömning till storsäck.

## 2.5 Analyser på spannmål

Spannmålsproverna har analyserats avseende fukthalt, tungmetaller, PAH och dioxiner. Analyserna har utförts av ett ackrediterat laboratorium, Eurofins.

De tungmetaller som man oftast pratar om i samband med livsmedelssäkerhet är bly, kadmium, arsenik och kvicksilver. I EU's förordning nr 1181/2006 finns gränsvärden med maxhalter beskrivna för dessa metaller.

PAH står för Polycykliska aromatiska kolväten och är en grupp av flera hundra föreningar som bildas när organiska material hettas upp eller förbränns ofullständigt.

Bens(a)pyren (BaP) är en av de mest studerade PAH. Inom EU finns det gränsvärden för hur mycket av vissa PAH som livsmedel får innehålla. Gränsvärden finns för bens(a)pyren och för summan av bens(a)pyren, bens(a)antracen, bens(b)fluoranten och krysén.

Dioxiner är ett samlingsnamn för polyklorerade dibenzodioxiner (PCDD) och polyklorerade dibenzofuraner (PCDF) i livsmedel, djur och människor så är det 17 olika toxiska PCDD- och PCDF-kongener (varianter) som brukar analyseras. De olika detekterade ämnena (kongenerna) multipliceras med olika faktorer när summan beräknas som presenteras som: WHO(2005)-PCDD/F TEQ.

För att mäta förekomsten av aska från träpulvret i det torkade spannmålet har dess innehåll av vattenlösliga karbonater, som inte borde förekomma naturligt, mätts. Det skedde genom titrering (0,01 M HCl (aq)) på vatten som genomsköljt spannmålet. Karbonaterna ger en vattenlösning med högt pH. Ofta runt pH=10. Dessa analyser har genomförts av RISE i Borås.

### 3 Resultat och Diskussion

Resultatet från rökgasmätningarna visas i Tabell 1. Resultatet visar låga halter av CO och partiklar vilket tyder på bra förbränning. Som framgår av tabellen så ligger luftöverskottet något högt för första gasolmätningen vilket kan ge en kylande effekt som resulterar i något högre CO och mer partiklar jämfört med andra försöket med gasol. Motsvarande resultat uppvisar träpulver vid första försöket.

Tabell 1. Halter i rökgaserna.

Försök	O <sub>2</sub> %	CO mg/nm <sup>3</sup>	NOX mg/nm <sup>3</sup>	Partiklar mg/nm <sup>3</sup>
Gasol I	18,4	9,4	24,5	1,3
Gasol II	16,7	1,2	49,4	0,05
Pulver I	14,4	1,6	86,8	10,7
Pulver II	11,4	0,2	96,1	3,8
Pulver III	10,3	1,1	105,9	3,9

Tabell 2 visar pH i lakvatten från tvätt av spannmål. De tre kontrollerade spannmålen har härvid liknande lakvatten. Det är ingen signifikant skillnad i pH mellan de tre proverna och pH ligger under 10 vilket visar att inga större mängder aska förekommer i spannmålsproverna.

Tabell 2. pH i lakvatten från tvätt av spannmål.

Försök	pH
Före torkning	7,8
Efter torkning gasol II	7,3
Efter torkning pulver III	8,1
Referensaska	10,1

I Tabell 3 återfinns fukt- och metallhalter i spannmål före och efter torkning. I alla försök har fukthalten minskat från ca 18 % till 11-12 %. Metallhalterna är överlag låga. Kvicksilver och arsenik är under detektionsgränsen i alla försök, och med undantag för Pulver I efter torkning, är även bly det. Koncentrationen av kadmium är detekterbar men likartad i alla försök.

Tabell 3. Fukt- och metallhalter i spannmål före (FT) och efter (ET) torkning.

Analys	Gasol I FT	Gasol I ET	Pulver I FT	Pulver I ET	Pulver II FT	Pulver II ET	Pulver III FT	Pulver III ET	Gasol II FT	Gasol II ET
Vattenhalt %	17.8	11.8	18.1	11.8	17.8	11.8	17.8	12.1	18.0	11.2
Arsenik mg/kg	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
Bly mg/kg	<0,020	<0,020	<0,020	0,032	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020
Kadmium mg/kg	0,016	0,017	0,015	0,017	0,016	0,017	0,016	0,016	0,016	0,015
Kvicksilver mg/kg	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02

Halter av PAH i spannmål före och efter torkning återfinns i Tabell 4. Halterna av de fyra analyserade PAH:erna är alla under detektionsgränsen.

Tabell 4. Halter av PAH i spannmål före (FT) och efter (ET) torkning.

PAH	Gasol I FT	Gasol I ET	Pulver I FT	Pulver I ET	Pulver II FT	Pulver II ET	Pulver III FT	Pulver III ET	Gasol II FT	Gasol II ET
Bens(a)antracen µg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Benso(a)pyren µg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Benso(b)fluoranten µg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Krysen µg/kg	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5

Halter av dioxiner återges i Tabell 5. Med undantag för Gasol I ET och, i ett par fall i Pulver II ET, är halterna av dioxinerna i de flesta fall under detektionsgränsen.

Tabell 5. Halter av dioxiner i spannmål före (FT) och efter (ET) torkning. ND = ej detekterad.

Dioxiner pg/g	Gasol I FT	Gasol I ET	Pulver II FT	PulverII ET	Pulver III ET	Gasol II ET
2,3,7,8-TetraCDD	<0.0124	< 0.0132	<0.0125	<0.0126	<0.0125	<0,0127
1,2,3,7,8-PentaCDD	<0.0163	0.0414	<0.0164	<0.0166	<0.0164	<0,0167
1,2,3,4,7,8-HexaCDD	<0.0248	0.0464	<0.0249	<0.0253	<0.0250	<0,0254
1,2,3,6,7,8-HexaCDD	<0.0340	0.0840	<0.0341	<0.0346	<0,0342	<0,0347
1,2,3,7,8,9-HexaCDD	<0.0320	0.0464	<0.0321	<0.0326	<0,0322	<0,0327
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	0.0523	0.668	<0.0524	0.138	<0,0526	0,123
OktaCDD	0.379	1.23	<0.380	<0.386	<0,381	<0,387
2,3,7,8-TetraCDF	<0.0340	0.0774	<0.0341	<0.0346	<0,0342	<0,0347
1,2,3,7,8-PentaCDF	<0.0235	0.0893	<0.0236	<0.0240	<0,0237	<0,0240
2,3,4,7,8-PentaCDF	<0.0366	0.296	<0.0368	0.0466	<0,0368	<0,0374
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	<0.0386	0.212	<0.0387	<0.0393	<0,0388	<0,0394
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	<0.0353	0.268	<0.0354	0.0439	<0,0355	<0,0360
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	<0.0261	<0.0824	<0.0262	<0.0266	<0,0263	<0,0267
2,3,4,6,7,8-HexaCDF	<0.0320	0.443	<0.0321	0.0725	<0,0322	0,063
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	<0.0366	1.7	<0.0368	0.274	0,0918	0,212
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	<0.0255	0.313	<0.0256	0.0607	<0,0256	0,0492
OktaCDF	<0.0784	1.71	<0.0786	0.261	0,0872	0,212
WHO(2005)-PCDD/F TEQ exkl. LOQ	ND	0.278	ND	0.0304	0,000944	0,0102
WHO(2005)-PCDD/F TEQ inkl. ½ LOQ	0.0337	0.289	0.0338	0.0551	0,0346	0,0424
WHO(2005)-PCDD/F TEQ inkl. LOQ	0.0674	0.300	0.0676	0.0798	0,0683	0,0746

Rökgasmätningarna (Tabell 1) visar att träpulver inte ger upphov till rökgaser med ogynnsam sammansättning för torkning av spannmål. Svårigheten under försöken var att noga kontrollera förbränningen avseende effekt och luftöverskott. Halten O<sub>2</sub> i rökgaserna efter förbränning är det mått som används för att veta att det finns ett visst luftöverskott. Halt av O<sub>2</sub> beror på eldstadens utformning, bränsle och aktuell belastning på eldstaden.

Sker förbränningen med luftunderskott kommer förbränningstemperaturen att sjunka vilket resulterar i att CO stiger. Likaså kommer temperaturen att sjunka om förbränning sker med ett för högt luftöverskott vilket antas kan ha skett vid första gasolprovet och

första träpulverprovet. CO bildas antingen vid låg temperatur eller vid för liten kontakt med syre. CO är därför ett bra mått på dålig förbränning och svarar relativt snabbt på förändringar i förbränningen.

Halterna  $\text{NO}_x$  och partiklar är högre vid träpulvereldning. Det  $\text{NO}_x$  som bildas vid gasolförbränning är förmodligen termiskt  $\text{NO}_x$  eftersom gasol inte innehåller kväve. Termiskt  $\text{NO}_x$  bildas troligen även vid träpulvereldning även om temperaturen kan vara en annan i flammans delar. Dessutom finns det lite kväve i träpulver som kan bilda bränsle- $\text{NO}_x$ . Det förklarar de högre halterna vid träpulvereldning. Den högre partikelhalten kan på liknande sätt förklaras av förekomsten av askbildande ämnen i träpulver. Dessa frigörs när träets organiska delar brunnit upp, och bildar då via olika mekanismer partiklar från tiotals nanometer och uppåt. Partikelhalterna är dock mycket låga.

De partiklar som förekommer i rökgaserna skulle kunna fastna på spannmålen. pH i lakvatten från tvättning av spannmålen är något högre då det torkats med rökgaser från träpulvereldning (Tabell 2). Det skulle kunna bero på askbildande ämnen från träpulvret. Titring av lakvatten från spannmål visade ingen detekterbar mängd karbonat. Givet att det är samma förhållande mellan karbonater och aska som i andra kända askor så kan man sluta sig till att mängd aska som fastnat på spannmålen är < 87 mg/kg spannmål.

Av de toxiska metaller som undersökts här (Tabell 3) är det bara kadmium och, i ett fall bly, som finns i halter över detektionsgränsen. Kadmium uppvisar likartade halter före och efter torkning och oavsett torkningsmetod. Kadmiumhalten påverkas alltså inte av rökgaser från träpulver. Det går inte att utesluta att bly från träpulvret bidragit till att blyhalten i spannmål i ett fall överstiger detektionsgränsen. Det går inte heller att utesluta någon annan förklaring eftersom de två andra försöken med torkning med rökgas från träpulvereldning inte givit en sådan effekt.

Förekomsten av PAH är under detektionsgränsen i alla försök. De halterna är alltså låga. Halterna av dioxiner är för de flesta dioxiner lägre än detektionsgränserna i alla fall utom Gasol I ET och Pulver II ET. Dioxiner bildas från reaktioner mellan klorföreningar och produkter från ofullständig förbränning. Gasol innehåller inget klor och bör inte ge upphov till ökade halter av dioxiner. En förklaring är att de senaste åren har HICK:en (förbränningsugnen) mest använts för att destruera förgasningsgas, från en relativt liten förgasare. I dessa förgasningsprojekt har också klorinnehållande bränslen testats för att studera just dioxiner. Under dessa tidigare tester blev aldrig ugnen så varm som under träpulverförsöken, varför det kan ha funnits kontamineringar av div. slag från tidigare försök som kan ha överlevt och som kan ha skapat dioxiner.

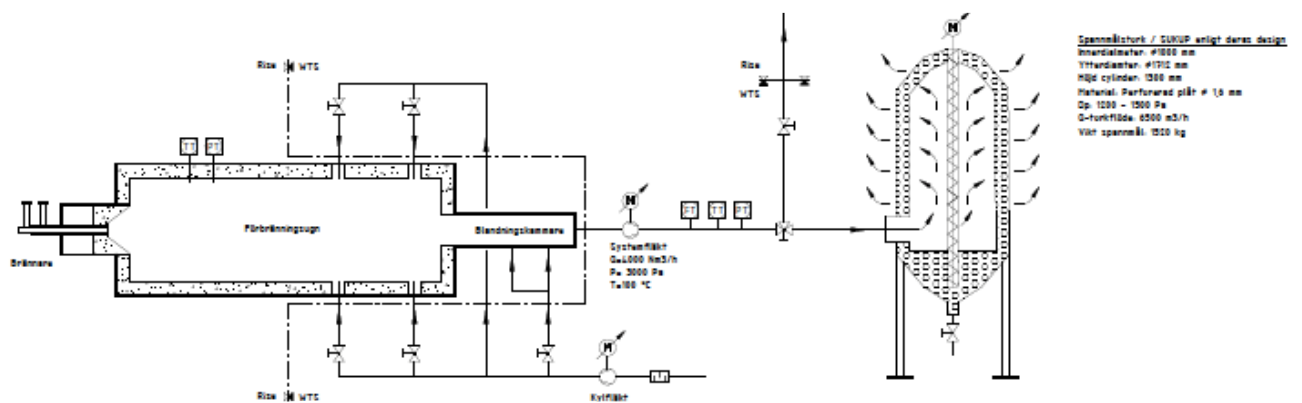
## 4 Säkerställa livsmedelssäkerheten på spannmål som torkas med rökgaser från träpulvereldning i pilotanläggning

Om det visar sig vara möjligt och tillåtet att direktuppvärma spannmålstorkor med träpulver är det ett viktigt steg för att uppnå fossilfrihet och hög resurseffektivitet inom spannmålstorkning. Lösningen kan även vara attraktiv på en internationell marknad vilket gynnar export av svensk teknik.

För att i praktiken upprätthålla livsmedelssäkerheten för spannmål som torkas med rökgaser från träpulvereldning i en kommersiell pilotanläggning behöver systemet utformas så att spannmålet inte påverkas av rökgaserna. Som bränsle måste träpellets med låg askhalt 0,3-0,5% (EN Class1) användas; d.v.s. endast träpulver baserat på rent vitt trä utan barkinblandning då detta ökar askhalten. Höga krav bör också ställas på partikelstorleken i pulver för att säkerställa mycket god utbränning av träpulvret.

Nedan görs en beskrivning hur systemet kan utformas för att säkerställa att spannmålen inte kontamineras.

Systemet består av en murad brännkammare i vilken det sitter en brännare som kan elda både gas och träpulver. Efter brännkammaren finns en blandningsfläkt som suger in en blandning av rökgaser från brännkammaren samt spädluft för att få ner temperaturen på torkluften in i spannmålstorken.



Figur 10. Principskiss pulvereldad spannmålstork.

Som första steg då alla system är klara för att tända måste en vädringssekvens starta för att vädra ut eventuella brännbara gaser som kan ha samlats inne i brännkammaren. Detta tillhör säkerhetssystemet och är ett myndighetskrav. Detta sker oberoende av varmt eller kallt system. När vädringssekvensen har gått klart, stänger spjällen på brännaren men fläkten fortsätter att gå. Därefter tänds startbrännaren som är gasoleldad och när den tänt och indikerar flamma, öppnar gasventilerna för huvudgasolen och tänds brännaren. Tändbrännare stoppar när flamvakten indikerar flamma. Nu brinner brännaren på gasol med låg last.

I nästa steg startar en uppvärmningssekvens av den murade brännkammaren. Hur lång tid detta tar beror på mängden murning men innebär oftast flera timmars drift då lasten på brännaren ökas sakta enligt en fastställd kurva. Man kan under denna tid använda rökgaserna från gaseldningen till torken men kapaciteten är på låg last. De varma gaserna kyls ner av spädluft innan de går till torken.

Efter att temperaturen inne i brännkammaren uppnått ett fastställt värde kan man börja att tillsätta träpulver. Detta sker samtidigt som gasolen brinner och träpulvret som tillsätts är inledningsvis en låg andel och mängden som tillsätts styrs så att CO bibehåller låga värden. I detta läge går rökgaserna till spannmålstorken genom att spjället till torken är öppet och spjället till atmosfären stängt. Temperaturökningen inne i brännkammaren sker nu med träpulver och den ökande temperaturen kompenseras hela tiden i blandningsfläkten så att mer och mer spädluft kyler de heta rökgaserna från brännkammaren så att temperaturen in i spannmålstorken hålls konstant. Om CO ökar så öppnar gasolen till brännaren för att kompensera och sänka CO.

När brännkammartemperaturen uppnåtts och CO är stabilt kan gasen stängas med reglerventilen så gasflödet blir noll. Dock får inte gasens magnetventiler stängas eftersom gasen ligger och väntar om CO skulle öka och då öppnar reglerventilen och tillsätter gas. Då torken har kommit i drift blir det den som styr och justerar lasten mot fukthalten på spannmål eller manuellt av operatörerna. Brännaren kommer att följa med och ge mer energi till torken men det är inloppstemperaturen till torken som styr luftmängden.

Om CO ökar under träpulverdrift kommer gasen att momentant tillföras för att kompensera detta och träpulver att dras ned i motsvarande mängd tills dess att CO värdet sjunkit ner till det fastställda värdet som får finnas i torkluften. När torkningen är klar, stoppas brännaren. Därefter öppnas spjället till atmosfären och spjället till torken stängs och värmen ventileras direkt till atmosfären. Brännarens förbränningsluftfläkt fortsätter att gå till dess att temperaturen sjunkit så att värmen i brännkammaren inte överhettar fläktsystemet.

Utöver hur tekniken utformas och körs så bör CO kontinuerligt mätas under drift. Mätningar av partiklar kan genomföra som kontroll i början av säsongen. Analyser på spannmål före och efter torkning bör göras regelbundet. Bra drift och underhåll på förbränningsutrustningen är också viktigt för att få en problemfri förbränning med låga emissioner.

Through our international collaboration programmes with academia, industry, and the public sector, we ensure the competitiveness of the Swedish business community on an international level and contribute to a sustainable society. Our 2,800 employees support and promote all manner of innovative processes, and our roughly 100 testbeds and demonstration facilities are instrumental in developing the future-proofing of products, technologies, and services. RISE Research Institutes of Sweden is fully owned by the Swedish state.

I internationell samverkan med akademi, näringsliv och offentlig sektor bidrar vi till ett konkurrenskraftigt näringsliv och ett hållbart samhälle. RISE 2 800 medarbetare driver och stöder alla typer av innovationsprocesser. Vi erbjuder ett 100-tal test- och demonstrationsmiljöer för framtidssäkra produkter, tekniker och tjänster. RISE Research Institutes of Sweden ägs av svenska staten.



RISE Research Institutes of Sweden AB Box 857, 501 15 BORÅS Telefon: 010-516 50 00 E-post: <a href="mailto:info@ri.se">info@ri.se</a> , Internet: <a href="http://www.ri.se">www.ri.se</a>	Energiteknik 1 RISE Rapport: 2022:156 ISBN: 978-91-89711-38-9
---	---